

Abschlussbericht

Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland

Projekt UTAMO

von:

Dr. Lutz Stobbe, Nikolai Richter, Maximilian Quaeck, Konstantin Knüfermann,
Jan Druschke, Maximilian Fahland, Victor Werner Höller,
Nico Wahry, Hannes Zedel, Michael Kaiser, Stefan Hoffmann,
Michael Töpper, Dr. Nils F. Nissen

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, IZM
Abteilung Environmental & Reliability Engineering,
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 26/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3718 36 324 0
FB000921

Abschlussbericht

Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland

Projekt UTAMO

von

Dr. Lutz Stobbe, Nikolai Richter, Maximilian Quaeck, Konstantin
Knüfermann, Jan Druschke, Maximilian Fahland, Victor Werner Höller,
Nico Wahry, Hannes Zedel, Michael Kaiser, Stefan Hoffmann,
Michael Töpper, Dr. Nils F. Nissen

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, IZM
Abteilung Environmental & Reliability Engineering,
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de)

Durchführung der Studie:

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Abschlussdatum:

November 2021

Redaktion

Referat Z 2.3 Digitalisierung und Umweltschutz, E-Government
Jürgen Baumeister

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung:**Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland**

Dieser Bericht präsentiert eine überschlägige Umweltbewertung der deutschen Mobilfunknetze für das Referenzjahr 2019 sowie eine Prognose der Entwicklung bis zum Jahr 2030. Zu diesem Zweck wurde vom Fraunhofer IZM ein komplexes Sachbilanzmodell entwickelt, welches die umweltrelevanten Aspekte der wesentlichen Technik- und Infrastrukturelemente der Funkzugangsnetze sowie der Transportkernnetze erfasst. Neben den konventionellen Trägerfrequenzen wurden erstmals auch neuartige 5G Millimeterwellensysteme modelliert. Die lebenszyklusorientierte Umweltbewertung bilanziert die Herstellungs- und Nutzungsphase der Mobilfunknetztechnik in einem Basisszenario sowie in mehreren alternativen Szenarien, die Umweltoptimierungen beinhalten. Im Basisszenario, welches die theoretische Netzkapazität um einen Faktor 45 vervielfacht, wird der elektrische Energiebedarf der deutschen Mobilfunknetze von 2,3 TWh im Jahr 2019 um 325 % auf 7,5 TWh im Jahr 2030 ansteigen. Der größte Anteil des nutzungsbezogenen Energiebedarfs entfällt mit weit über 80% auf die Funkzugangsnetze. Im Vergleich der Herstellungs- zur Nutzungsphase zeigt sich, dass der elektrische Energiebedarf des operativen Betriebs mit durchschnittlich über 90 % stark überwiegt. Die prognostizierte Umweltwirkung kann durch diverse Maßnahmen deutlich minimiert werden. Diese Maßnahmen beinhalten Aspekte der Netz- und Standortplanung, der Geräte- und Anlagenmodernisierung, sowie eines aktiven Last- und Energiemanagements. Der Bericht erläutert den methodischen Ansatz der Modellierung, die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Entwicklungsszenarien sowie die Handlungsempfehlungen für Entscheider aus Wirtschaft und Politik.

Abstract:**Environmental technology assessment of mobile communication in Germany (UTAMO)**

This report presents an environmental impact assessment of the German mobile communication networks for the reference year 2019 as well as a forecast of the development up to the year 2030. For this purpose, the Fraunhofer IZM developed a complex life cycle inventory model as part of the UTAMO research project, which includes the environmentally relevant aspects of the essential technical and infrastructure elements which constitute the radio access networks as well as the transport core networks. The life cycle-oriented environmental assessment balances the production and use phase of the mobile network technology in a baseline scenario as well as in several alternative scenarios that include environmental optimization. In the baseline scenario, which multiplies the theoretical network capacity by a factor of 45 in 2030, the electrical energy demand of the German mobile communication networks will increase by 325% from 2.3 TWh in 2019 to 7.5 TWh in 2030. The largest share of the usage-related electricity consumption is accounted for by the radio access networks, well over 80%. A comparison of the manufacturing phase with the use phase shows that the electricity consumption in use strongly outweighs the manufacturing with an average of over 90%. The future environmental impact can be significantly minimized by various measures. These measures include aspects of network and location planning, device and infrastructure modernization, as well as active load and energy management. The report explains the methodological approach of the modeling, the calculation results for the individual development scenarios, as well as the recommendations for decision-makers from business and politics.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	17
Zusammenfassung	23
Summary	34
1 Einführung	44
1.1 Motivation	44
1.1.1 Wie hoch sind der Energiebedarf und die CO2-Bilanz von Mobilfunknetzen?	44
1.1.2 Mobilfunknetze in Deutschland	45
1.1.3 Fünf prinzipielle Faktoren bestimmen die Umweltbilanz der Mobilfunknetze	47
1.1.4 UTAMO-Projekt und Berichtsstruktur	50
1.2 Zielstellung	52
1.2.1 Aufgabenstellung	52
1.2.2 Vorgehensweise	53
1.3 Überschlägige Umweltbewertung	55
1.3.1 Gegenstand und Ziele der Umweltbewertung	55
1.3.2 Bezugsrahmen des Sachbilanzmodells	56
1.3.3 Sachbilanzmodell auf Basis der 5K-Methode	58
1.3.4 Modellierung der Mobilfunknetze als Sachbilanz	61
1.3.5 Thematische Schwerpunkte der Umweltbewertung	62
1.3.6 Strommix und Umrechnungsfaktoren für CO2-Bilanz	65
1.4 Relevante Vorarbeiten, Literatur und Informationsquellen	69
1.4.1 Literatur zu existierenden Energiemodellen für den Mobilfunk	69
1.4.2 Themenspezifische Literaturquellen	73
1.4.3 Fachgespräche mit Behörden und Industrie	74
2 Methode der Sachbilanzmodellierung und Umweltbewertung von Mobilfunknetzen	76
2.1 Funkzellenverteilungsmodell – RCD-Modell	77
2.1.1 Drei vergleichbare Mobilfunknetze in Deutschland	77
2.1.2 Konzept der Modellierung des Funkzellenverteilungsmodells	80
2.1.3 Berechnung des Funkzellenverteilungsmodells	83
2.1.4 Transceiver-Konfiguration und Sendeleistung der Antennenstandorte	85
2.1.5 Lastprofil und Nutzungsmuster	91
2.2 Funkzugangsnetzmodell – RAN-Modell	93

2.2.1	Konzeption der Modellierung	93
2.2.2	Antennenmodul (AU)	98
2.2.3	Funkmodul (RU)	103
2.2.4	Basisbandmodul (BU)	108
2.2.5	Berechnungsformeln und Konfiguration des RAN-Modells	112
2.3	Transportkernnetzmodell – TCN-Modell	114
2.3.1	Konzeption der Modellierung	114
2.3.2	Anlagentechnik im TCN	118
2.3.3	Berechnungsformeln und Konfiguration des TCN-Modells	120
2.4	Material- und CO2-Bilanz der Komponentenherstellung	121
2.4.1	Sachbilanz und Umweltbewertung der Herstellungsphase	121
2.4.2	CO2-Bilanz Herstellung RAN	125
2.4.3	CO2-Bilanz Herstellung TCN	130
2.4.4	CO2-Bilanz Herstellung Endgeräte	132
2.4.4.1	Smartphone	132
2.4.4.2	Sensor mit Funkmodul	137
3	Umweltbewertung der Mobilfunknetze 2019 bis 2030	140
3.1	Entwicklungstrends und Szenarien	140
3.1.1	Durchführen einer Delphi-Befragung zur Ermittlung relevanter Trends und Einflussfaktoren im Kontext der Entwicklung der Mobilfunknetze bis 2030	140
3.1.1.1	Delphi-Befragung	140
3.1.1.2	Vorgehen bei der Trendanalyse	141
3.1.2	Trends in der Mobilfunktechnologie	143
3.1.2.1	Frequenzspektrum und Bandbreite	143
3.1.2.2	Trägermodulation und Kanalkodierung	144
3.1.2.3	MIMO und Beamforming	146
3.1.2.4	Neue Netzarchitektur	147
3.1.3	Trends in der Hardwaretechnologie	148
3.1.3.1	Leistungssteigerung und Energieeffizienz in der Mikroelektronik	148
3.1.3.2	Wirkungsgrad in der Leistungselektronik	152
3.1.4	Frequenzvergabe	154
3.1.4.1	Überlegungen der Bundesnetzagentur	154
3.1.4.2	Mobilfunkstrategie der Bundesregierung	156
3.1.5	Prognose des mobilen Datenvolumens	157

3.1.5.1	Annahme für einen Nutzungstrend	157
3.1.5.2	Fortschreibung der aktuellen Wachstumsrate	159
3.1.6	Prognose Standortkonfiguration bis 2030	160
3.1.7	Szenarien im Überblick	163
3.2	Szenarien für Makrozellen (cm-Welle)	165
3.2.1	Szenario 1: Basisszenario für den Netzausbau von Makrozellen	166
3.2.2	Szenario 2: Basisszenario mit beschleunigter Technikmodernisierung	177
3.2.3	Szenario 3: Basisszenario mit bundesweitem Roaming	183
3.2.4	Szenario 4: Basisszenario mit konsequentem Energiemanagement	186
3.2.5	Szenario 5: Kombination der Szenarien 2, 3 und 4	189
3.3	Szenarien für Mikrozellen (mm-Welle)	192
3.3.1	Anwendungsfälle für Mikrozellen	192
3.3.2	Annahmen zum Szenario ASK 7 (Outdoor) und ASK 8 (Indoor)	194
3.3.2.1	Anwendung und Auslegung der Mikrozellen	194
3.3.2.2	Konfiguration des Antennensystems ASK 7 (Outdoor)	197
3.3.2.3	Konfiguration des Antennensystems ASK 8 (Indoor)	198
3.3.2.4	Bestand und Nutzungsmuster	198
3.3.3	Berechnungsergebnisse	199
3.4	Auswertung der Umweltbewertung und Diskussion	208
3.4.1	Vergleich und Interpretation der Szenarien	208
3.4.2	Diskussion der Methodik und Datenlage	217
4	Maßnahmenempfehlungen zur Reduzierung des Energie- und Ressourcenbedarfs der Mobilfunkinfrastruktur	220
4.1	Empfehlungen zur Schaffung einer umweltbezogenen Datenbasis	220
4.1.1	Daten in den Umweltberichten der Mobilfunknetzbetreibern	220
4.1.2	Detailliertes Messen bzw. Monitoring des Energiebedarfs	222
4.1.3	Transparente und nützliche Leistungskennzahlen	223
4.1.4	Energie- und Materialangaben in Produktdatenblättern	225
4.1.5	Technologiespezifische Ökobilanzdaten für Umweltbewertungen	226
4.2	Empfehlungen an die Netzbetreiber und Netzausrüster	228
4.2.1	Netzplanung und Standorte	228
4.2.1.1	Empfehlungen zum Themenkomplex Netzplanung	229
4.2.1.2	Empfehlungen zum Themenkomplex Standortplanung	229
4.2.2	Stromversorgung und Infrastruktur	230

4.2.2.1	Empfehlungen zum Themenkomplex Stromversorgung	230
4.2.2.2	Empfehlungen zum Themenkomplex Kühlung.....	232
4.2.3	Mobilfunktechnik und Energiemanagement	233
4.2.3.1	Empfehlungen zum Themenkomplex spektrale Effizienz.....	233
4.2.3.2	Empfehlungen zum Themenkomplex Energiemanagement	234
4.2.3.3	Empfehlungen zum Themenkomplex Interoperabilität:	234
4.2.4	Kontinuierliche Verbesserung und Nachhaltigkeitsmanagement	235
4.2.4.1	Konditionen	236
4.2.4.2	Kapazität	237
4.2.4.3	Konfiguration	237
4.2.4.4	Komponente	238
4.2.4.5	Kontrolle	239
4.3	Empfehlungen an die Politik und Gesellschaft	240
4.3.1	Europäische Ökodesign Richtlinie.....	240
4.3.2	Datenbasis zum Energiebedarf der Mobilfunknetze	241
4.3.3	Frequenzvergabe und nachhaltiger Netzausbau	241
4.3.4	Technologische Souveränität.....	243
4.3.5	Weiterer Forschungsbedarf.....	243
4.3.6	Schlussbemerkung	244
A	Anhang	261
A.1	Sendeleistung in Abhängigkeit von Frequenz und Zellgröße (ASK 1-3)	261
A.2	Sendeleistung in Abhängigkeit von Frequenz und Zellgröße (ASK 4-6)	262
A.3	Datenbasis für das RAN-Modell	262
A.4	Berechnung der Datenrate (2019)	266
A.5	Datenbasis für das TCN-Modell	267
A.6	Berechnung der Datenrate (2030)	271
A.7	Liste der untersuchten Smartphones.....	272
A.8	Sachbilanzdaten und Carbon Footprint der Smartphones und Sensoren	273
A.9	Sachbilanzdaten aller Komponenten.....	275
A.10	CO2-Bilanz der Herstellung aller Komponenten	276
A.11	Weitere Ergebnisdiagramme der Szenarien	277
A.12	Weitere Tabellen.....	286

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs in TWh/a der Funkzugangsnetze (RAN) und Transportkernnetze (TCN) in Deutschland im Basisszenario 2019 bis 2030.....	26
Abbildung 2:	Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Basisszenario 2019 und 2030)	27
Abbildung 3:	Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Basisszenario 2019 und 2030).....	28
Abbildung 4:	Gegenüberstellung der Energiebedarfsprognose aller fünf Szenarien (2019-2030).....	30
Figure 5:	Forecast of the electrical energy demand for radio acces networks (RAN) and transport core networks (TCN) for Germany 2019 to 2030 in the baseline scenario.....	37
Figure 6:	Comparison of the CO2 balance according to the climate protaction and the reference electricity mix (baseline scenario 2019 to 2030)	38
Figure 7:	Absolute CO2 emissions related to the manufacturing phase of macro cell components (baseline scenario 2019 to 2030).....	39
Figure 8:	Comparison of the energy demand forecast of all five scenarions (2019 to 2030)	41
Abbildung 9:	Architektur eines Mobilfunknetzes (Schema)	45
Abbildung 10:	Parallele bundesweite Mobilfunknetze von drei Netzbetreibern (Schema)	46
Abbildung 11:	Inhalte und methodisches Vorgehen im UTAMO-Projekt.....	54
Abbildung 12:	Übersichtsdarstellung der überschlägigen Umweltbewertung	56
Abbildung 13:	Bezugsgegenstand und Ebenen des Sachbilanzmodells.....	57
Abbildung 14:	5K-Methode als strukturelle Grundlage des Sachbilanzmodells	59
Abbildung 15:	Netzebenen und funktionale Aspekte eines Mobilfunknetzes	61
Abbildung 16:	Struktur und Elemente des Sachbilanzmodells	62
Abbildung 17:	Spezifische Treibhausgasemissionen nach Energieträger	66
Abbildung 18:	Zwei Prognosen zur Entwicklung des deutschen Strommixes	68
Abbildung 19:	Teilmodelle der Sachbilanz im Überblick	76
Abbildung 20:	Bestandteile und Struktur des Funkzellenverteilungsmodells	81
Abbildung 21:	Im ComGreen Projekt ermittelte Tageslastprofile an vier typischen Standortarten.....	92
Abbildung 22:	Funktionale Verknüpfung von der drei Teilmodelle.....	93
Abbildung 23:	Schematische Darstellung des Funkzugangsnetzmodells	95
Abbildung 24:	Funktionale Komponenten und wesentliche Energieparameter im RAN-Modell	97
Abbildung 25:	Schematische Darstellung von MIMO Antennenmodulen mit Antennenelementen	99

Abbildung 26:	Massive MIMO Antennensystem mit Beamforming	102
Abbildung 27:	Schnittstellen und Stromversorgung von AU, RU und BU im RAN-Modell	103
Abbildung 28:	Prinzipielle Architektur und funktionale Komponenten eines Funkmoduls	104
Abbildung 29:	Prinzipielle Architektur und funktionale Komponenten einer Baseband Unit	109
Abbildung 30:	Struktur des Transport- und Kernnetzes	116
Abbildung 31:	CO2-Bilanz der Hauptkomponenten eines Funkmoduls	129
Abbildung 32:	Jährliche CO2-Bilanz der Hauptkomponenten eines Antennenstandortes (2019)	130
Abbildung 33:	CO2-Bilanz Herstellung TCN-Komponenten (gesamt)	131
Abbildung 34:	CO2-Bilanz Herstellung TCN-Komponenten (anteilig pro Jahr)	132
Abbildung 35:	CO2-Bilanz der Herstellung unterschiedlicher Smartphones ..	135
Abbildung 36:	CO2-Bilanz der Herstellung unterschiedlicher Sensoren	138
Abbildung 37:	CO2-Bilanz der Gesamtanzahl an Smartphones und Sensoren (2019-2030)	139
Abbildung 38:	Ausgewählte Entwicklungsfaktoren für die Bildung der Szenarien	143
Abbildung 39:	Auswirkungen der Limitationen des Moore'schen Gesetzes auf den Energiebedarf der IKT	150
Abbildung 40:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Basisszenario 2019-2030)	167
Abbildung 41:	Prognose des absoluten jährlichen elektrischen Energiebedarfs in Abh. der Standortkategorie (Basisszenario 2019-2030)	168
Abbildung 42:	Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Basisszenario 2019 und 2030)	169
Abbildung 43:	Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Basisszenario 2019 und 2030)	170
Abbildung 44:	Prognose der theoretischen Datenrate von Makrozellen in Deutschland (Basisszenario 2019-2030)	171
Abbildung 45:	Theoretische Datenrate der Funkmodule eines Standortes in Abhängigkeit der Frequenz und Standortkategorie (Basisszenario 2019 und 2030)	172
Abbildung 46:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Basisszenario 2019 und 2030)	173
Abbildung 47:	Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Basisszenario 2019 und 2030)	174

Abbildung 48:	Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Basisszenario 2019 und 2030).....	175
Abbildung 49:	Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Mengenmaterialien, Basisszenario 2019-2030).....	176
Abbildung 50:	Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Gold und Silizium, Basisszenario 2019-2030)	177
Abbildung 51:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Technikmodernisierung 2019-2030)	179
Abbildung 52:	Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Technikmodernisierung 2019 und 2030)	180
Abbildung 53:	Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Technikmodernisierung 2019 und 2030)	181
Abbildung 54:	Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Mengenmaterialien, Technikmodernisierung 2019-2030) ...	182
Abbildung 55:	Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Gold und Silizium, Technikmodernisierung 2019-2030)	183
Abbildung 56:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Roaming 2019-2030)	185
Abbildung 57:	Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Roaming 2019 und 2030)	186
Abbildung 58:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Energiemanagement 2019-2030).....	188
Abbildung 59:	Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Energiemanagement 2019 und 2030).....	189
Abbildung 60:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (kombiniertes Szenario 2019-2030)	191
Abbildung 61:	Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)	192
Abbildung 62:	Schematische Darstellung einer Mikrozelle ASK 7	196
Abbildung 63:	Prinzipielles Design eines mm-Wellenantennensystems für ASK 7	197
Abbildung 64:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 7 Outdoor-Mikrozellen in Deutschland (Basisszenario 2019-2030).....	200
Abbildung 65:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 7 Outdoor-Mikrozellen in Deutschland (Technikmodernisierung 2019-2030).....	201
Abbildung 66:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 8 Indoor-Mikrozellen in Deutschland (Basisszenario 2019-2030).....	202
Abbildung 67:	Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 8 Indoor-Mikrozellen in Deutschland (Technikmodernisierung 2019-2030).....	203

Abbildung 68:	Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, 2030).....	204
Abbildung 69:	Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, Basiszenario 2019 und 2030)	205
Abbildung 70:	Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, Technikmodernisierung 2019 und 2030).....	205
Abbildung 71:	Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Mikrozellen-Komponenten in Deutschland (2019 und 2030)	206
Abbildung 72:	Gegenüberstellung der Energiebedarfsprognose aller fünf Szenarien (2019-2030).....	208
Abbildung 73:	Gegenüberstellung der Energieeffizienz aller fünf Szenarien (2019-2030)	209
Abbildung 74:	Gegenüberstellung der CO2-Bilanzprognose aller fünf Szenarien (Strommix Klimaschutzszenario 2019-2030)	211
Abbildung 75:	Vergleich des Energiebedarfs von Makro- und Mikrozellen (Basiszenario 2019-2030).....	212
Abbildung 76:	100 % Flächenabdeckung mit Makro- vs. Outdoor-Mikrozellen (Basiszenario, 2030)	213
Abbildung 77:	Vergleich der Datenrate von Makro- und Mikrozellen (2019-2030).....	214
Abbildung 78:	Gegenüberstellung der Energieeffizienz der Mikrozellenszenarien (2019-2030).....	215
Abbildung 79:	Gegenüberstellung der jährlichen CO2-Bilanz von Makrozellen, Mikrozellen und Endgeräten (Basis- bzw. kombiniertes Szenario, 2030)	216
Abbildung 80:	Fünf Ebenen des Sachbilanzmodells entsprechend der 5K Methode	217
Abbildung 81:	Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Technikmodernisierung 2019 und 2030)	277
Abbildung 82:	Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Technikmodernisierung 2019 und 2030)	277
Abbildung 83:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Technikmodernisierung 2019 und 2030).....	278
Abbildung 84:	Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Roaming 2019 und 2030).....	279

Abbildung 85:	Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Roaming 2019 und 2030)	280
Abbildung 86:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Roaming 2019 und 2030)	281
Abbildung 87:	Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Energiemanagement 2019 und 2030).....	282
Abbildung 88:	Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Energiemanagement 2019 und 2030).....	283
Abbildung 89:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Energiemanagement 2019 und 2030).....	284
Abbildung 90:	Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (kombiniertes Szenario 2019 und 2030).....	285
Abbildung 91:	Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)	285
Abbildung 92:	Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (kombiniertes Szenario 2019 und 2030).....	286

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Frequenzspektrum für Mobilfunknetze in Deutschland	78
Tabelle 2:	Flächennutzung in Deutschland (Stand 31.12.2017).....	82
Tabelle 3:	Einwohner- und Flächenverteilung (Gemeindeebene)	82
Tabelle 4:	Basisparameter und Daten des Funkzellenverteilungsmodells für Referenzjahr 2019.....	85
Tabelle 5:	Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank – Frequenznutzung	87
Tabelle 6:	Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Funkkanäle (gemittelt).....	87
Tabelle 7:	Gerundete Transceiver-Konfiguration für das Referenzjahr 2019	88
Tabelle 8:	Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank – Sendeleistung	89
Tabelle 9:	Annahme zur typischen Sendeleistung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im ländlichen Raum	90
Tabelle 10:	Annahme zur typischen Sendeleistung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im städtischen Raum	91

Tabelle 11:	Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Antennengewinn	99
Tabelle 12:	Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Antennenhöhe	100
Tabelle 13:	MIMO-Konfiguration der Mobilfunkgenerationen in den Entwicklungsszenarien	102
Tabelle 14:	Annahmen zu Wirkungsgraden von Leistungsverstärkern unterschiedlicher Trägerfrequenzen auf Basis von Literaturwerten (Referenzjahr 2019)	105
Tabelle 15:	Exemplarische Daten zur elektrischen Leistungsaufnahme von Mobilfunkanlagen.....	109
Tabelle 16:	80 Plus Zertifikat Anforderungen an den Wirkungsgrad von Computer-Netzteilen.....	111
Tabelle 17:	Mindestanforderungen der EC an den Netzteil-Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor ab dem 1. März 2020.....	112
Tabelle 18:	Aggregierte Datenrate als Skalierungsfaktor für das TCN-Modell.....	117
Tabelle 19:	Daten der TCN-Hauptkomponenten in den Entwicklungsszenarien	120
Tabelle 20:	Berechnung der Masse von Betontürmen	127
Tabelle 21:	Berechnung der Masse von Stahltürmen.....	128
Tabelle 22:	Entwicklung der Anzahl an Smartphones.....	136
Tabelle 23:	Entwicklung der Anzahl an Sensoren	138
Tabelle 24:	Mindestanforderungen der Europäischen Kommission an die Effizienz von Netzteilen für Server	154
Tabelle 25:	Demografische Verteilung 2019-2030.....	157
Tabelle 26:	Anzahl Mobilfunknutzer 2019-2030.....	157
Tabelle 27:	Bitraten und Datenvolumen Streaming	158
Tabelle 28:	Prognose der Entwicklung des mobilen Datenvolumens in Deutschland.....	159
Tabelle 29:	Entwicklung der Anzahl von Mobilfunkanlagen und Transceiver (berechnet).....	161
Tabelle 30:	Durchschnittliche Transceiver-Konfiguration für das Jahr 2030	162
Tabelle 31:	Basisdaten des Funkzellenverteilungsmodells für Szenario 2030	162
Tabelle 32:	Annahmen zum Szenario 1 (Basisszenario).....	166
Tabelle 33:	Annahmen zum Szenario 2 (Technikmodernisierung)	178
Tabelle 34:	Annahmen zum Szenario 3 (bundesweites Roaming)	183
Tabelle 35:	Vergleich der Zelldurchmesser zwischen Basis- und Roamingszenario (2019)	184
Tabelle 36:	Annahmen zum Szenario 4 (konsequentes Energiemanagement)	186

Tabelle 37:	Annahmen zum Szenario 5 (kombiniert).....	189
Tabelle 38:	Annahmen Basisszenario Mikrozellen.....	199
Tabelle 39:	Energiebedarf Mobilfunk im Vergleich zu Bruttostrombedarf Deutschland 2019 und 2030.....	216
Tabelle 40:	Vergleich von energiebezogenen Angaben von Netzbetreibern	220
Tabelle 41:	Die 30 kritischen Rohstoffe für die EU 2020	226
Tabelle 42:	Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der RU (Referenzjahr 2019).....	263
Tabelle 43:	Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der BU (Referenzjahr 2019).....	264
Tabelle 44:	Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der BU (Szenario 2030).....	265
Tabelle 45:	Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Switchen	267
Tabelle 46:	Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Routern	268
Tabelle 47:	Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Gateways	268
Tabelle 48:	Gerätebestand im TCN-Modell für das Referenzszenario 2019	269
Tabelle 49:	Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der TCN- Gerätetechnik.....	269
Tabelle 50:	Übersichtstabelle der ausgewerteten Mobilfunkanlagen.....	286

Abkürzungsverzeichnis

2G, 3G, 4G, 5G	Mobilfunkgenerationen
5G NSA	5G Non-Stand-Alone
5G SA	5G Stand-Alone
ACPI	Advanced Configuration and Power Interface
ADC	Analog Digital Converter
AE	Antenna Element
AR	Augmented Reality
AS	Antenna Site/Antennenstandort
ASK	Antennenstandortkategorie
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
AU	Antenna Unit/Antennenmodul
BBU	Baseband Unit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNetzA	Bundesnetzagentur
bps	Bit per Second
BU	Baseband Unit/Basisbandmodul
CDMA	Code Division Multiple Access
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
cm-Wave	Centimeter Wave/Zentimeterwelle
CN	Core Node
CNS	Core Network Server
CoMP	Coordinated Multi-Point
CPRI	Common Public Radio Interface
CPU	Central Processing Unit
C-RAN	Cloud-RAN/Centralized RAN
CU	Central Unit
DAC	Digital-to-Analog Converter
dB	Dezibel

dB	Dezibel
DL	Downlink
DSP	Digital Signal Processor
DU	Distributed Unit
eCPRI	Enhanced Common Public Radio Interface
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EMF	Elektromagnetische Felder
ENIG	Electroless Nickel Gold
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ERP	Emitted Radio Power
EUV	Enhanced Ultra Violet
EW	Einwohner
Fab	Fabrication (Produktionslinie)
FDM	Frequency Domain Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiplex Access
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
FR	Frequency Range
FR-4	Flame Retardant (Leiterplattenmaterial)
FWA	Fixed Wireless Access
GaN	Galliumnitrid
GB	Gigabyte
Gbit/s (Gbps)	Gigabit per Second
GHz	Gigahertz
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GPU	Graphics Processing Unit
GSM	Global System for Mobile Communications

GWh	Gigawattstunden
GWP	Global Warming Potential
HBM	High Bandwidth Memory
HFC	Hybrid Fiber Coax
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
Hz	Hertz
IA	Inline Amplifier
IBW	Instantaneous Bandwidth
IC	Integrated Circuit
ICT	Information and Communications Technologies
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBTs	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IKT	Infomation and Communication Technology
IoT	Internet of Things
JRC	Joint Research Centre
Kap	Kapitel
kHz	Kilohertz
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
KVP	Kontinuirlicher Verbesserungsprozess
LCA	ife Cycle Assessment
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
M2M	Maschine-to-Maschine
mAh	Milliamperstunden
MHz	Megahertz

MIG	Mobilfunkinfrastrukturgesellschaft
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine-type Communication
mm-Wave	Millimeterwelle
MOSFETs	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors
MWh	Megawattstunden
NGFI	Next Generation Fronthaul Interface
NR	New Radio (5G)
NU	Network Unit
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplex Access
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
O-RAN	Open RAN
PA	Power Amplifier
PAE	Power Amplifier Efficiency
PB	Petabyte
PCB	Printed Circuit Board
PON	Passive Optical Network
PSK	Phase Shift Keying
PSU	Power Supply Unit
PTRS	Phase-Tracking Reference Signal
PUE	Power Usage Effectiveness
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access network
RAT	Radio Access Technology
RC	Radio Cell

RCD	Radio-Cell-Distribution
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RU	Radio Unit/Funkmodul
RX	Receiver
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiplex Access
SDN	Software Defined Network
SHF	Super High Frequency
SiC	Siliziumkarbid
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System-on-Chip
SRS	Sounding Reference Signal
SSD	Solid-State-Drive
TB	Terrabyte
Tbit/s	Terrabit per Second
TCN	Transport Core Network
TDM	Time Domain Multiplexing
TDMA	Time Division Multiplex Access
TDP	Thermal design power
TRX	Transceiver
TWh	Terrawattstunden
TX	Transceiver
U	User/Nutzer
UE	User Equipment
UL	Uplink
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VGA	Video Graphics Array
VR	Virtual Reality
V-RAN	Virtual RAN
WRC	World Radiocommunication Conference
X-Haul	Front and Backhaul

Zusammenfassung

Zielstellung

Das Projekt UTAMO (umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk) wurde vom deutschen Umweltbundesamt mit der Zielstellung beauftragt, den Energie- und Ressourcenbedarf der bundesweiten Mobilfunknetze für das Referenzjahr 2019 überschlägig zu bilanzieren und in mehreren Entwicklungsszenarien die Größenordnung der Umweltwirkung bis zum Jahr 2030 zu prognostizieren. Das Fraunhofer IZM entwickelte in der Projektlaufzeit von Januar 2019 bis November 2021 ein komplexes Sachbilanzmodell, welches die herstellungs- und nutzungsbezogenen Umweltlasten der Mobilfunktechnik anteilig pro Jahr für den gesamten Anlagenbestand quantifizierte. In der Sachbilanz wurde aufgrund der relativen Vergleichbarkeit der existierenden, parallel aufgebauten Mobilfunknetze der drei in Deutschland agierenden Netzbetreiber, der Deutschen Telekom, Vodafone und Telefónica, zunächst ein generisches, bundesweites Mobilfunknetz modelliert und dann auf den Gesamtbestand hochgerechnet.

Diese Aufgabe benötigte eine umfangreiche Datenbasis. Das Projekt UTAMO konnte für den Zweck der Bestandsmodellierung und Umweltbewertung u.a. die EMF-Standortdatenbank der Bundesnetzagentur nutzen. Die in Deutschland tätigen Mobilfunknetzbetreiber unterstützten das Projekt mit Hinweisen und beteiligten sich an mehreren Fachgesprächen. Konkrete Daten zur Netzausstattung, zum operativen Betrieb und dem resultierenden Energiebedarf wurden aber nur im Umfang bereits publizierter Daten zur Verfügung gestellt. So musste gerade in Bezug auf die Technikparameter weitgehend mit Literaturdaten gearbeitet werden. Die grundlegenden Annahmen für die Entwicklungsszenarien wurden mit Ministerien, Behörden und Unternehmen in Fachgesprächen diskutiert und validiert. Die so entwickelte Datenbasis kann in Abwesenheit primärer Messdaten für den Zweck der vorliegenden Studie als adäquat betrachtet werden. Ausführliche Hinweise zur Verbesserung der Datenbasis werden in Kapitel 4 am Schluss des Berichtes gegeben.

Die Modellierung von Entwicklungsszenarien für den Mobilfunk in Deutschland bis zum Jahr 2030 bildet einen Schwerpunkt im Projekt UTAMO. An die Entwicklungsszenarien wurden zwei Zielstellungen geknüpft. Erstens soll ein realistischer Netzausbau modelliert werden, der die nationalen Randbedingungen der Frequenzvergabe und Mobilfunknutzung sowie die globale Technikentwicklung berücksichtigt. Zweitens sollen alternative Szenarien berechnet werden, die geeignete Maßnahmen zur Energie- und Ressourceneinsparung reflektieren und eine konsequente *Green ICT*-Entwicklung abbilden. Darüber hinaus wurden zwei eigenständige Szenarien für neuartige 5G-Millimeterwellensysteme entwickelt, da die Produktentwicklung hier noch nicht abschlossen ist und über den kommerziellen Einsatz nur spekuliert werden kann. Die Szenarien dienen nicht nur der politischen Orientierung bezüglich der Umweltwirkung von Mobilfunknetzen. Sie zeigen detailliert, in welchem Umfang sich der Energie- und Ressourcenbedarf bzw. die damit verbundenen Treibhausgasemissionen insgesamt entwickeln und schlüsseln diese Entwicklung ursachenbezogen auf. Diese Identifizierung und Erläuterung von wichtigen kausalen Wechselwirkungen bildet die Grundlage für die letzte Aufgabenstellung - die Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Akteure aus Wirtschaft und Politik.

Die Empfehlungen adressieren die umweltseitige Optimierung von Mobilfunknetzen und die Schaffung von entsprechenden Randbedingungen. Diese Aufgabe erfordert eine ganzheitliche Herangehensweise. Das Fraunhofer IZM hat zu diesem Zweck eine Checkliste mit fünf Leitbegriffen entwickelt. Diese fünf Leitbegriffe beginnen alle mit den Buchstaben K und daher wurde der methodische Ansatz „5K“ genannt. Die Checkliste adressiert mit dem ersten Begriff „Konditionen“ die anwendungsspezifischen Randbedingungen, mit dem Begriff „Kapazität“ die leistungsbezogenen Nutzeranforderungen, mit „Konfiguration“ die Systemarchitektur und

Dimensionierung, mit „Komponenten“ die unmittelbaren Produkt- und Umwelteigenschaften der Geräte und Anlagen, sowie mit dem fünften Begriff „Kontrolle“ die Möglichkeiten einer aktiven Steuerung und Energiemanagements. Die auf dieser Basis abgeleiteten Handlungsempfehlungen sind sehr konkret. Gleichzeitig wird damit eine Schablone für ein strukturiertes Vorgehen zur Verfügung gestellt, das als Konzept für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess genutzt werden kann.

Gegenstand

Den Hauptgegenstand der überschlägigen Umweltbewertung bilden die Mobilfunkanlagen und Infrastrukturen der über 80.000 Antennenstandorte in Deutschland. Diese Anlagen realisieren die Mobilfunkzellen des sogenannten Funkzugangsnetzes. Sie bestehen aus Antennen-, Funk- und Basisbandmodulen sowie Infrastrukturtechnik einschließlich der Kühlung und Stromversorgung. Die Mobilfunkanlagen haben im operativen Betrieb einen vergleichsweise hohen elektrischen Energiebedarf, der im Jahr 2019 in Deutschland rund 2 TWh betrug. Vor dem Hintergrund der Einführung von 5G und dem forcierten Ausbau der Mobilfunknetze sollte das Projekt UTAMO die Frage beantworten, in welcher Weise sich der Energie- und Ressourcenbedarf bis zum Jahr 2030 entwickelt. Neben den herkömmlichen Antennensystemen mit Trägerfrequenzen im Zentimeterwellenbereich könnten mittelfristig auch neuartige Millimeterwellensysteme (Mikrozellen) in Unterstützung der Zentimeterwellen-Makrozellen zum Einsatz kommen. Des Weiteren ist zu bedenken, dass mit einem zunehmenden mobilen Datenvolumen mittelfristig auch der Energiebedarf der optischen Aggregations- und Transportnetze steigen könnte, über die der Datenverkehr in andere Netze verteilt und über weite Strecken transportiert wird. So werden im Sachbilanzmodell auch die Transport-, Vermittlungs- und Netzsteuerungstechnik des sogenannten Transportkernnetzes überschlägig bewertet. Der Energiebedarf von mobilen Endgeräten ist hingegen nicht Gegenstand der Untersuchung. Im Rahmen des Projektes wurden lediglich die CO₂-Bilanzen der Herstellung von durchschnittlichen (5G-) Smartphones und Funksensoren erstellt, welche exemplarisch die Größenordnung dieser Umweltwirkung im Vergleich zu den Anlagen der Mobilfunkinfrastruktur aufzeigen sollen. Kein Gegenstand des Projektes war zudem die potenzielle Energie- und Ressourceneinsparung wie z.B. geteilte Mobilität (*Shared Mobility*) oder funkbasierte Zählerablesung (*Wireless Meetering*), welche durch den Einsatz der Mobilfunknetze realisiert wird. Auch wurde das Thema „Umwelt- und Gesundheitswirkung der elektromagnetischen Strahlung“ explizit als Gegenstand der Studie ausgeschlossen.

Überschlägige Umweltbewertung

Die überschlägige Umweltbewertung ist lebenszyklusorientiert. Sie bilanziert für die Nutzungsphase den elektrischen Energiebedarf des operativen Betriebes der Mobilfunknetze und berechnet die damit verbundenen Treibhausgasemissionen als Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (t CO₂e) mittels eines Umrechnungsfaktors für den Strommix. Es werden zwei Annahmen für die Entwicklung des deutschen Strommixes bis 2030 verwendet, um eine konventionelle bzw. beschleunigte Umstellung auf erneuerbare Energieträger in der Stromversorgung abzubilden. Des Weiteren werden CO₂-Bilanzen der Materialien und Herstellung wesentlicher Komponenten, Geräte und Infrastrukturelemente erstellt. Diese CO₂-Bilanzen werden unter Annahme einer typischen Produktlebensdauer anteilig der CO₂-Bilanz eines Nutzungsjahres zugeschlagen. Andere Umweltaspekte wie der Transport, die Installation, die Wartung, die Entsorgung oder das Recycling von Altgeräten werden aufgrund fehlender Daten nicht modelliert.

Der technische Bezugsrahmen der Umweltbewertung beinhaltet, wie bereits erwähnt, die wesentliche Anlagentechnik der Funkzugangsnetze und der Transportkernnetze. In der

Binnengliederung werden sechs Antennenstandortkategorien unterschieden. Diese spiegeln die typische Transceiver-Konfiguration der Standorte auf dem Land, in der Stadt und den Übergangsbereichen wider. Ein sogenanntes Funkzellenverteilungsmodell liefert Daten, beispielsweise zur Funkzellengröße und zum Anlagenbestand pro Kategorie.

Der zeitliche Bezug der Umweltbewertung beinhaltet das Referenzjahr 2019 sowie Szenarien zum Netzausbau in den Jahren 2022, 2026 und 2030. Für diesen Prognosezeitraum werden technische Trends im Bereich der Mobilfunktechnologie, der Halbleitertechnologie und Stromwandlungstechnologie berücksichtigt und im Bericht erläutert. Einen wesentlichen Einfluss auf die Mobilfunkentwicklung in Deutschland hat die Frequenzvergabe bzw. Anforderungen, die an die Frequenznutzung seitens der Bundesnetzagentur gestellt werden. In der Modellierung der Entwicklungsszenarien werden daher das verfügbare Spektrum und die Nutzungsbedingungen berücksichtigt. Schließlich wird der Netzausbau von der realen Nachfrage der Kunden, dem mobilen Datenvolumen, beeinflusst. Im Rahmen des UTAMO-Projektes wurden mit zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen Prognosen für die Entwicklung des mobilen Datenvolumens modelliert. Diese Prognosen zeigen einen substanzialen Anstieg des kundenbezogenen Datenvolumens von 2019 bis 2030 um etwa einen Faktor 45. Die Ursache hierfür ist die erwartete Nutzung von mobilem Videostreaming durch eine steigende Zahl von Netzteilnehmern. Dieser prognostizierte Anstieg bildet u.a. die Grundlage für die Modellierung des Netzausbau im Basisszenario.

Das vom Fraunhofer IZM entwickelte Berechnungsmodell kann pro Standortkategorie vielfältige Parameter variieren. So können beispielsweise die Art und Anzahl der Transceiver-Pfade, Antennenkonfigurationen, die frequenzbezogenen Kanaleigenschaften, Modulationsverfahren, die Auslegung von Schnittstellen, Wirkungsgrade und Technikgenerationen, sowie Lastprofile und Nutzungsmuster individuell eingestellt werden. Dies erlaubt die Berechnung vielfältiger Szenarien. Im vorliegenden Bericht werden Berechnungsergebnisse für die folgenden Entwicklungsszenarien vorgestellt und ausgewertet:

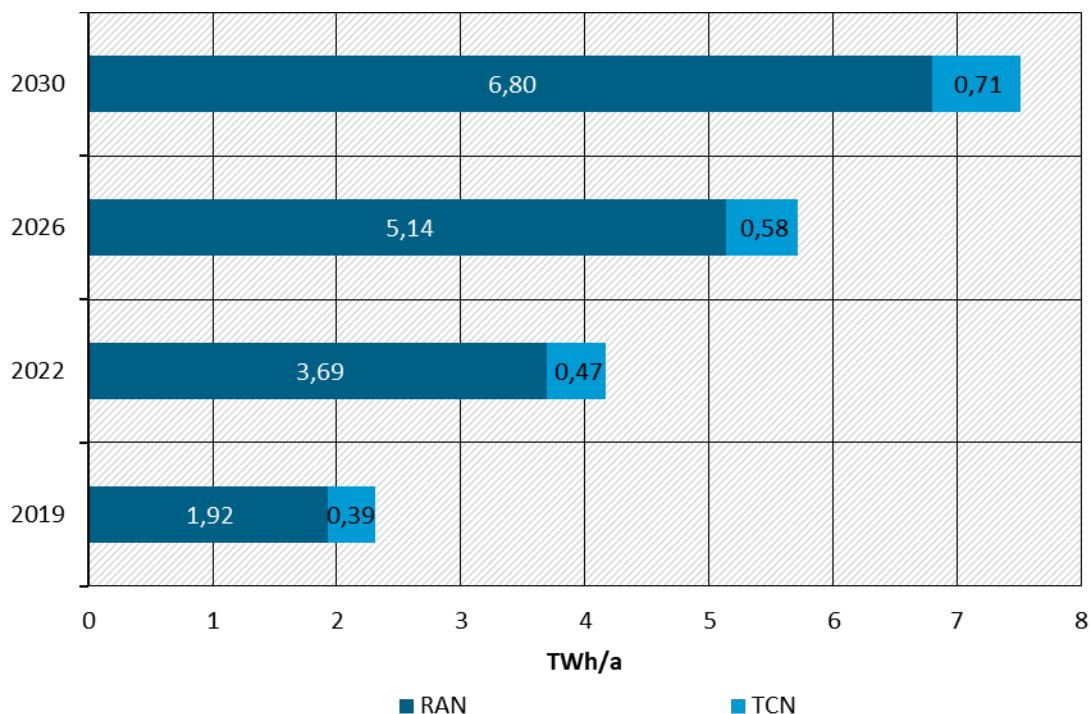
- ▶ Szenario 1: Basisszenario für den Netzausbau von Makrozellen (cm-Welle)
- ▶ Szenario 2: Szenario 1 mit beschleunigter Technikmodernisierung (Technikaustausch alle drei Jahre anstatt alle sieben Jahre)
- ▶ Szenario 3: Szenario 1 mit bundesweitem Roaming (theoretische Verkleinerung der Funkzellenfläche)
- ▶ Szenario 4: Szenario 1 mit konsequentes Energiemanagement (Abschaltung einzelner Trägerfrequenzen in Zeiten niedriger Auslastung)
- ▶ Szenario 5: Kombination der Szenarien 2, 3 und 4
- ▶ Szenario 6: Szenario für eine definierte Flächenabdeckung mit Mikrozellen (mm-Welle)

Basisszenario

Das Basisszenario ist eine Prognose des elektrischen Energiebedarfs der Funkzugangsnetze (*Radio Access Network, RAN*) und der Transportkernnetze (*Transport Core Network, TCN*) in Deutschland für den Zeitraum von 2019 bis 2030. Es werden hierbei die flächendeckenden Makrozellen auf Basis der Frequenzbänder im Zentimeterwellenbereich von 700 MHz bis 3.600 MHz berücksichtigt. Die potenzielle Umweltwirkung von neuen, unterstützenden Mikrozellen im Millimeterwellenbereich 26 GHz bis 28 GHz werden im separaten Szenario 6 prognostiziert. Der modellierte Netzausbau reflektiert eine substanziale Steigung der theoretisch bereitgestellten mobilen Datenrate um einen Faktor 45 gegenüber dem Referenzjahr 2019. Die bundesweite

Anzahl von Antennenstandorten steigt der Prognose nach von rund 81.000 im Jahr 2019 auf 108.000 im Jahr 2030. Gleichzeitig werden aber alle Antennenstandorte deutlich stärker ausgerüstet, d.h. je nach Antennenstandortkategorie werden die Anzahl der dezidierten Sende- und Empfangskanäle (*Transceiver, TRX*) von 12 bis 15 im Jahr 2019 auf 23 bis 25 im Jahr 2030 sehr stark erhöht, um die benötigte Kapazität zu gewährleisten. Die Logik hinter dieser Modellierung ist, dass neue Standorte schwer zu akquirieren sind und es daher kostengünstiger ist, Bestandsstandorte weiter auszubauen, solange die Grenzwerte der maximalen Strahlungsleistung (*Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP*) nicht überschritten werden. Hinsichtlich der Netzkonfiguration werden im Basisszenario die neuen 5G-Frequenzen im Band 700 MHz und 3.500-3.600 MHz schnell ausgebaut, die Antennensysteme der Frequenzbänder größer 1.000 MHz auf höhere Mehrfachantennen (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*) umgestellt, sowie die Funktechnologie auf 4G und 5G ausgelegt. Die 3G-Technologie (UMTS) wird zum Jahr 2022 deaktiviert und die 2G-Technologie (GSM) verbleibt bis 2030 zur Grundversorgung aktiv. Bezüglich des Modernisierungsgrades der Technik wird von einem durchschnittlichen Austauschzyklus von sieben Jahren ausgegangen. Der Wirkungsgrad der Stromversorgung hat mit 83 % bis 86 % im durchschnittlichen Teillastbetrieb ein gutes Niveau. Im Basisszenario wird kein aktives Energiemanagement wie beispielsweise eine Abschaltung von Trägern in Nachtstunden angenommen.

Abbildung 1: Prognose des elektrischen Energiebedarfs in TWh/a der Funkzugangsnetze (RAN) und Transportkernnetze (TCN) in Deutschland im Basisszenario 2019 bis 2030



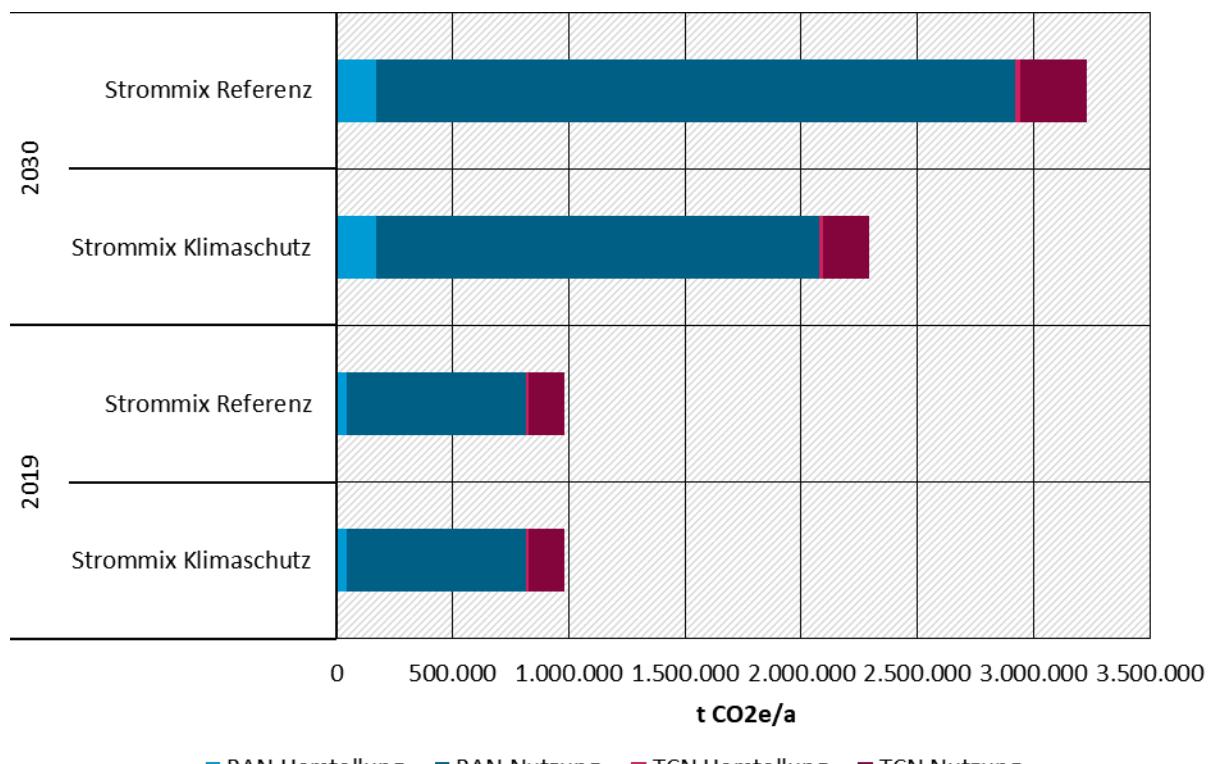
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Abbildung 1 zeigt die Berechnungsergebnisse für das Basisszenario. Der elektrische Energiebedarf der gesamten Mobilfunknetze in Deutschland wird demnach von 2,31 TWh im Jahr 2019 auf 7,51 TWh im Jahr 2030 ansteigen (ca. 1,3 % des bundesweiten Strombedarfs 2030). Der modellierte Energiebedarf der Mobilfunknutzung für das Referenzjahr 2019 deckt sich ungefähr mit publizierten Angaben der drei Netzbetreiber, sodass das Modell als valide beurteilt werden kann. Der Anstieg des jährlichen Energiebedarfs um 325 % ist substanziell. Dieser Wert spiegelt aber auch die gestiegene relative Energieeffizienz wider, da sich die

Netzkapazität mit dieser Verdreifachung des Energiebedarfs theoretisch um einen Faktor 45 vervielfacht hat. Der größte Anteil des Energiebedarfs entfällt auf das Funkzugangsnetz, mit 83,3 % im Jahr 2019 und 90,5 % im Jahr 2030. Der Betrieb der Funkmodule, welche die Leistungsverstärker und Analog-Digital-Wandler beinhalten, haben mit über 60 % den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf. Insbesondere die Leistungsverstärker erzeugen starke energetische Verluste, die bei höheren Frequenzen noch steigen. Konventionelle Leistungsverstärker sind zudem auf feste Arbeitspunkte optimiert und kaum lastadaptiv. Ein weiterer Aspekt trägt zum steigenden Energiebedarf bei; Größere durchgängige Kanalbandbreiten (3,5 GHz-Band), eine Vervielfachung der Antennenpfade (Massive MIMO), neue Modulationsverfahren (z.B. 256 QAM) und andere 5G-Technologien tragen maßgeblich zu den höheren Datenraten bei. Mit den höheren Datenraten steigt aber auch der Rechenaufwand der Analog-Digital-Wandlung und insbesondere die digitale Signalverarbeitung im Basisbandmodul. Dieser wachsende Rechenaufwand hat Auswirkungen auf den Energiebedarf. Er wird nur teilweise durch neue Rechnerarchitekturen und die noch anhaltende Hardware-Miniaturisierung kompensiert. Gerade längerfristig könnte sich die kompensierende Wirkung des sogenannten Mooreschen Gesetzes deutlich verlangsamen, sodass mehr parallele Hardwarestrukturen geschaffen werden müssen, um den Rechenbedarf zu decken. Damit nimmt aber der Energie- und Ressourcenbedarf anteilig zu.

In Abbildung 47 wird die jährliche CO₂-Bilanz der beiden Netzbereiche im Basisszenario jeweils aufgeteilt in die Nutzungs- und die anteilige Herstellungsphase dargestellt. Dabei werden beide vom UBA prognostizierten Strommixe miteinander verglichen. Ausgehend von einem Umrechnungswert von rund 400 g CO₂e/kWh im Jahr 2019 erreicht der Wert beim „Strommix Referenz“ nach einem Anstieg im Jahr 2030 wieder diesen Ausgangswert, wohingegen der „Strommix Klimaschutz“ auf 280 g CO₂e/kWh im Jahr 2030 sinkt.

Abbildung 2: Vergleich der CO₂-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Basisszenario 2019 und 2030)

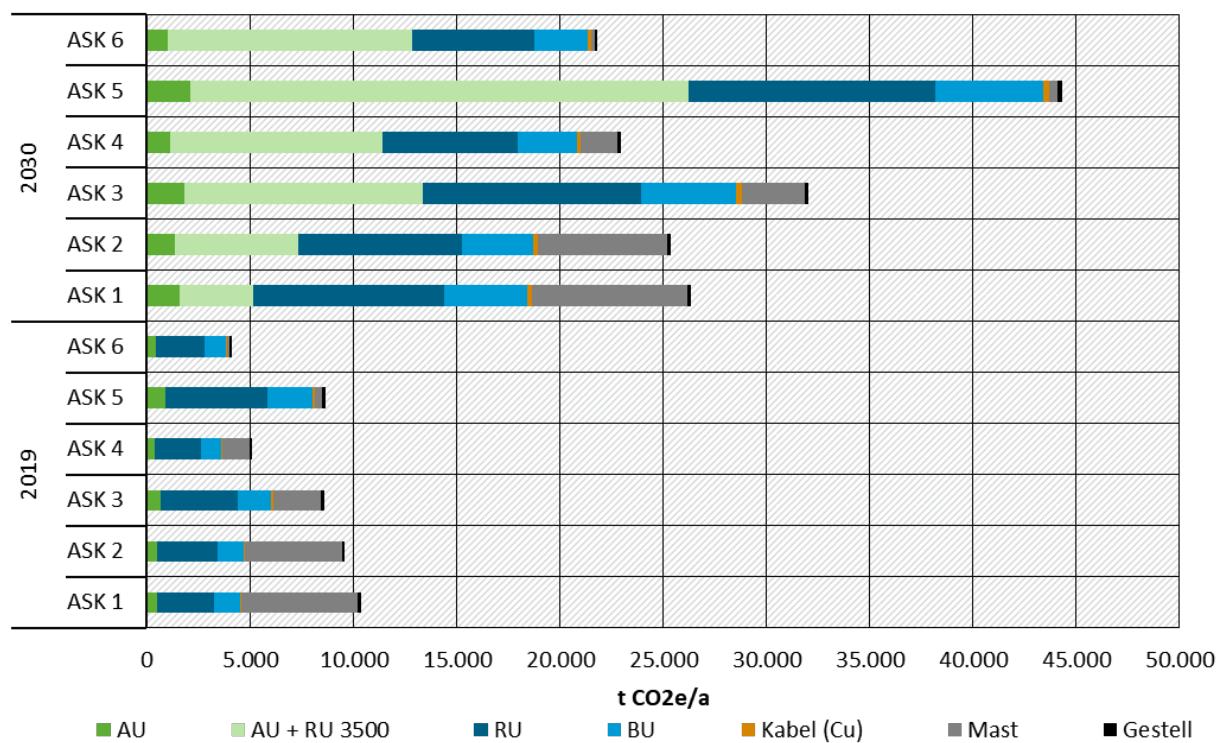


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Es ist zu erkennen, dass die jährliche Emission von Treibhausgasen in jedem dargestellten Teilespekt aufgrund des starken Zubaus von Mobilfunkanlagen zunehmen wird. Unter Annahme des Umrechnungswertes im Strommix Klimaschutz steigen die CO2-Emissionen von 981.590 Tonnen auf 2.295.404 Tonnen und im Strommix Referenz sogar auf 3.230.222 Tonnen im Jahr 2030. Für das Jahr 2030 ergibt sich beim Strommix Klimaschutz eine deutliche Verringerung der Treibhausgasemissionen von 29 % durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien gegenüber dem Referenzstrommix. Dennoch liegt die jährliche Gesamtemission noch immer um den Faktor 2,3 höher als 2019.

Im Vergleich der Herstellungs- zur Nutzungsphase zeigt sich, dass der elektrische Energiebedarf des operativen Betriebs mit durchschnittlich über 90 % stark überwiegt. Diesbezüglich sind zwei Aspekte anzumerken. Erstens, die Annahmen zur typischen Lebensdauer der Anlagentechnik beeinflussen den Wert der anteiligen Herstellung pro Jahr. Eine kürzere Produktlebensdauer würde den Wert steigen lassen. Zweitens, die Datenlage für die überschlägige Umweltbewertung der Rohstoffe und Fertigungsprozesse (Ökobilanzdaten) ist teilweise veraltet und unvollständig. Hierdurch kann es zu einer Unterschätzung der Gesamtumweltwirkung kommen.

Abbildung 3: Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Basisszenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In der Abbildung 3 wird die Herstellungsphase aufgeschlüsselt nach Antennenstandortkategorien (ASK) und funktionalen Hauptkomponenten wie u.a. den Antennenmodulen (*Antenna Unit, AU*), Funkmodulen (*Radio Unit, RU*) und Basisbandmodulen (*Baseband Unit, BU*). Die ASK resultieren aus dem Funkzellenverteilungsmodell. ASK 1 sind die größten Funkzellen ländlicher Antennenstandorte und ASK 6 sind kleine innerstädtische Antennenstandorte. Aus der Binnengliederung wird ersichtlich, dass die Antennen- und Funkmodule anteilig die höchste Umweltwirkung erzeugen. Die Ursache hierfür liegt in den steigenden Stückzahlen dieser

Anlagen. Die Umweltwirkung resultiert dabei primär aus der energieintensiven Herstellung der Halbleiterbauelemente in Reinräumen. Ein weiterer Faktor ist die sonstige Komponenten- und Leiterplattenherstellung. Die steigende Zahl an Halbleiterbauelementen und höher integrierte Leiterplatten bestimmen auch die zunehmende Umweltwirkung der immer rechenintensiveren Basisbandmodule. Ein interessanter Punkt sind die Aluminiumgehäuse, beispielsweise der Funkmodule. Diese funktionalen Gehäuse dienen als Kühlkörper und benötigen vergleichsweise große Aluminiummengen. Die Umweltwirkung dieser Gehäuse variiert jedoch stark, je nachdem ob primäres oder recyceltes Aluminium in der Sachbilanz angesetzt wird. Der Einsatz von recycelten Rohstoffen verbessert die Umweltbilanz teilweise erheblich. Auch die Stahlmasten und hohen Betontürme, an den die Antennen- und Funkmodule insbesondere im ländlichen Gebiet installiert sind, haben eine nicht unerhebliche Umweltwirkung, selbst bei den angenommen langen Einsatzzeiten von 40 bis 100 Jahren. Diese Infrastrukturen sollten daher gut positioniert und möglichst effizient genutzt werden.

Die Analyse des Basisszenarios gibt Hinweise auf die Schwerpunkte und Ursachen der Umweltwirkung infolge des angenommen Netzausbau. Nun stellt sich die Frage, ob und mit welchen Maßnahmen diese Umweltwirkung bei gleichem Umfang des Netzausbau bzw. gleicher mobilen Datentransportkapazität minimiert werden kann. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden alternative Szenarien berechnet, welche spezifische Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkung zum Gegenstand haben. Aufgrund der Dominanz der Nutzungsphase, aber auch bedingt durch den Mangel an Daten zur Herstellungsphase, fokussieren die alternativen Szenarien auf die Senkung des elektrischen Energiebedarfs im operativen Betrieb der Mobilfunknetze.

Alternative Szenarien

Das alternative Szenario 2 „Technikmodernisierung“ berechnet das hardwaretechnische Verbesserungspotenzial, welches insbesondere aus den noch immer kontinuierlichen Fortschritten der Halbleiterindustrie resultiert. Durch die Miniaturisierung verbessert sich in einem gewissen Umfang die Energieeffizienz. Es kann, vereinfacht ausgedrückt, mit einer definierten Energiemenge mehr Rechenleistung realisiert werden. Gleichwohl sich dieses Verbesserungspotenzial (*Koomeys Law*) möglicherweise in den kommenden Jahren verlangsamt, hat es derzeit noch immer eine sehr hohe Hebelwirkung zur Senkung des Energiebedarfs im operativen Betrieb, wie das Szenario zeigt. Unter der theoretischen Annahme, dass die Systemtechnik nicht alle sieben, sondern bereits alle drei Jahre auf die neuste Hardwaretechnologie umgestellt wird, reduziert sich der elektrische Energiebedarf beispielsweise im Jahr 2030 von 7,5 TWh auf 4,8 TWh. Diese Energieeinsparung von 36 % gegenüber dem Basisszenario ist vergleichsweise groß, denn die Steigerung der hardwaretechnischen Energieeffizienz wirkt dreifach, da die energiesparenden Komponenten auch die absoluten Wandlungsverluste der Stromversorgung und schlussendlich den absoluten Kühlungsaufwand reduzieren.

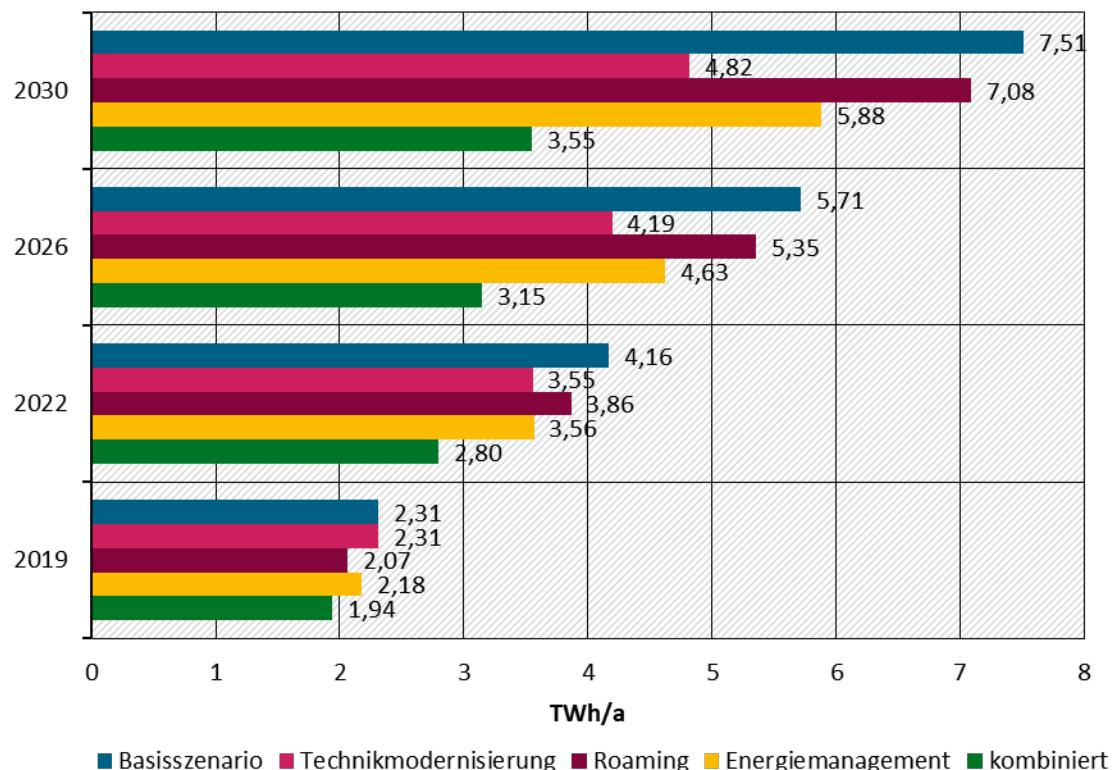
Das alternative Szenario 3 „Roaming“ simuliert ein bundesweites Roaming. In der Modellierung dieses Szenarios werden die Funkzellen aller drei Netzbetreiber rein theoretisch gleich verteilt, wodurch sich der Durchmesser der Funkzellen pro Standortkategorie im Vergleich zum Basisszenario auf etwas mehr als die Hälfte reduziert. Diese theoretische Verkleinerung könnte prinzipiell zu einer Senkung der Sendeleistung pro Funkzelle führen. Allerdings zeigt das Szenario nur eine relativ geringe Einsparung von rund 6 % gegenüber dem Basisszenario. Die geringe Wirkung dieses Effekts ist darauf zurückzuführen, dass die Sendeleistung entsprechend der Daten im UTAMO-Modell nicht adaptiv genug auf die verkleinerten Zellen reagieren kann. Dies liegt daran, dass heutige Leistungsverstärker nicht darauf ausgelegt sind, sich last- bzw. reichweitenadaptiv zu verhalten. Eine neue Generation an Verstärkern bzw. Funkmodulen, die

auf eine insgesamt geringere Sendeleistung ausgelegt sind, könnte das Einsparungspotenzial aber deutlich vergrößern. Im Zuge der Modernisierung könnte dies mit der Zeit erfolgen.

Das alternative Szenario 4 „Energiemanagement“ beinhaltet ein konsequentes Energiemanagement wie ein bewusstes Abschalten von ausgewählten Transceivern in den Zeitintervallen mit niedriger Auslastung (*Low Load*). Das Szenario simuliert einen stärker lastadaptiven Betrieb der Mobilfunknetze. Durch diese Maßnahmen können ungefähr 1,49 TWh bzw. 22 % an elektrischer Energie im Jahr 2030 eingespart werden. Je nach Praktikabilität und Umfang dieser Maßnahme kann dieser Wert in einem realen Anwendungsfall entsprechend kleiner oder größer ausfallen.

Das alternative Szenario 5 „kombiniert“ alle drei vorhergehenden Szenarien mit dem Ziel, das kumulierte Einsparpotenzial von energieoptimierten Mobilfunknetzen anzudeuten. Mit der beschleunigten Technikmodernisierung, einem bundesweiten Roaming und konsequenten Energiemanagement können im Jahr 2030 theoretisch fast 4 TWh eingespart werden, was einer Energieeinsparung von 53 % gegenüber dem Basiszenario entspricht. Die Einsparungen wirken dabei sowohl im Funkzugangsnetz als auch im Transportkernnetz. Die Abbildung 4 zeigt die Energiebedarfsprognose aller Szenarien für die Entwicklung bis 2030 in einem Überblick.¹

Abbildung 4: Gegenüberstellung der Energiebedarfsprognose aller fünf Szenarien (2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Das Basiszenario und die alternativen Szenarien berücksichtigen in der Modellierung des Netzausbau bislang keine neuartigen 5G Millimeterwellensysteme. Da der Netzausbau mit dieser Technologie zum jetzigen Zeitpunkt (Ende 2021) sehr spekulativ ist, wurde die

¹ In dieser Abbildung werden die einzelnen Szenarien auch rückwirkend für das Referenzjahr 2019 ausgewiesen. Dies ist zwar unlogisch, zeigt aber die Größenordnungen der unterschiedlichen Szenarien zum direkten Vergleich.

Entscheidung getroffen, im Basisszenario nur die cm-Wellen-basierten Makrozellen (700 MHz bis 3.600 MHz) zu erfassen und die mm-Wellen-basierten Mikrozellen (26 GHz bis 28 GHz) in einem exemplarischen Flächenbezugsszenario abzubilden.

5G Millimeterwelle

Ein Gegenstand der 5G-Standardisierung ist die Nutzbarmachung von Frequenzen im Bereich der Millimeterwelle, da damit größere durchgängige Bandbreiten zur Verfügung stünden, welche die Kapazität und spektrale Effizienz der Funkzellen deutlich erhöhen würde. Die Weltfunkkonferenz WRC19 hat für den Zweck des Mobilfunks u.a. die als 26-GHz-Band bezeichneten Spektren und das als 28-GHz-Band bezeichnete Spektrum vorgeschlagen. Trotz fortgeschrittener 5G-Standardisierung befindet sich die Anwendung dieses Millimeterwellenspektrums noch in einem frühen Stadium und es sollte angenommen werden, dass eine kommerzielle Nutzung frühestens ab 2023 beginnt. Vor diesem zeitlichen Hintergrund überrascht es kaum, dass die vorhanden Technik- und Anwendungsdaten nur aus der Forschung, Standardisierung und Whitepaper kommen. Sie ergeben kein eindeutiges Abbild der technischen und anwendungsspezifischen Auslegung künftiger mm-Wellensysteme. Allerdings sind die grundlegenden technischen Eigenschaften dieser Systeme durchaus klar und können die Basis für die technische Spezifikation eines Millimeterwellenszenarios bilden. Schwieriger ist die Abschätzung bezüglich eines realen Netzausbaus. Die Industrie verfolgt verschiedene Szenarien für den Einsatz der Millimeterwellensysteme im Außen- und Innenbereich. Die aufgrund der Frequenzeigenschaften stark begrenzte Reichweite erlaubt den Aufbau von kleineren Mikrozellen und Richtfunkstrecken.

Vor diesem Hintergrund wurde die Entscheidung getroffen, nicht ein reales Ausbauszenario abzuschätzen, sondern für eine Außen- und Innenanwendung jeweils lediglich ein leicht skalierbares Flächenszenario zu berechnen. Als Frequenzspektrum wurden die Pionierbänder im Bereich von 26 bis 28 GHz gewählt, da diese sehr wahrscheinlich als erste zur Anwendung kommen werden. Das erste Millimeterwellenszenario sind Mikrozellen in der Außenanwendung mit einer Reichweite von 150 m. Dieses Outdoor-Szenario wird für die Abdeckung von 1 % der Fläche Deutschlands berechnet. Das zweite Szenario sind Mikrozellen in einer Innenraumanwendung mit einer Reichweite von 30 m in hoher Qualität. Dieses Indoor-Szenario wird für die Abdeckung von 0,1 % der Fläche Deutschlands berechnet.

Für eine Abdeckung von 1 % der Fläche Deutschlands mit Outdoor-Mikrozellen im Jahr 2030 würde ein elektrischer Strombedarf von insgesamt 3,1 TWh entstehen, wobei 2,05 TWh auf das Funkzugangsnetz und 1,05 TWh auf das Transportkernnetz entfallen. Auffällig ist hierbei der weitaus höhere Anteil des Transportkernnetzes am Gesamtenergiebedarf. Der Grund hierfür liegt in der Annahme, dass mit diesen Mikrozellen ein massives Datentransportvolumen entsteht. Im Vergleich zu den Makrozellen, welche das gesamte Bundesgebiet abdecken und hierfür 7,51 TWh im Jahr 2030 benötigen, erscheint der Wert zunächst recht hoch. Zieht man jedoch in Betracht, dass die Mikrozellen gegenüber den Makrozellen bei vergleichbarer Energiemenge eine 16-fache höhere mobile Datentransportkapazität haben, wird zumindest in der Größenordnung das funktionale Potenzial und die relative Energieeffizienz der Millimeterwelle deutlich. Gleichzeitig zeigt dieses Beispiel sehr deutlich, dass der Einsatz von Millimeterwellensystemen gut und in Abstimmung mit den Makrozellen geplant werden sollte, damit keine Überkapazität installiert wird, die unnötig Energie- und Rohstoffe benötigt.

Das Indoor-Szenario unterstreicht diese Erkenntnis, denn aufgrund der relativ kleinen Größe der Funkzellen entsteht für die Abdeckung von 0,1 % der Fläche Deutschlands ein Energiebedarf von 5,77 TWh im Jahr 2030. Auch dieser Wert bedarf weiterer Erläuterungen, da in diesem

Szenario ein durchgängiger Betrieb (z.B. in einem industriellen Produktionsumfeld) angenommen wurde.

Diese exemplarischen Berechnungen zeigen in der Analyse sehr anschaulich, dass eine Vielzahl an Faktoren den realen Energie- und Ressourcenbedarf von Millimeterwellensystem beeinflussen. Hierzu zählen die Konzeption der Funkzelle einschließlich der Konfiguration der Antennen- und Funksysteme, welche die realen Anwendungsbedingungen und Lastprofile berücksichtigen sollten. Des Weiteren ist die Verortung und Art der digitalen Signalverarbeitung (Stichworte sind C-RAN und O-RAN), sowie die Auslegung von Front- und Backhaul zu berücksichtigen. Das reale Lastprofil bildet schließlich noch die Randbedingung für ein aktives Energiemanagement, was den Gesamtenergiebedarf maßgeblich beeinflussen kann.

Handlungsempfehlungen

Mobilfunknetze sind sehr funktional und haben eine hohe wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung. Sie müssen als kritische Infrastruktur dauerhaft und ausfallsicher betrieben werden können. Die Kapazität unserer Mobilfunknetze wird in den kommenden Jahren sicherlich deutlich ausgebaut, um anwendungsinduzierte Trends zu realisieren. Diese Entwicklung führt, wie die Szenarien zeigen, zu einem Anstieg des Energie- und Rohstoffbedarfs. Das Kernproblem ist die begrenzte spektrale Effizienz einer Funkverbindung. Allerdings kann die Effizienz des Mobilfunks durch netzplanerische und technologische Maßnahmen sowie ein operatives Energiemanagement sehr positiv beeinflusst werden. Die Handlungsempfehlungen reflektieren diese grundsätzlichen Optionen.

Die Planung des weiteren Netzausbau und der Netzmodernisierung haben höchste Priorität, da hierdurch frühzeitig und in direkter Form Einfluss auf die spätere Umweltwirkung genommen werden kann. Die Netzplanung betrifft nicht nur mehr den einzelnen Netzbetreiber. Es besteht heute ein gewisser Bedarf, die Entwicklung der Mobilfunknetze bundesweit mit dem Ziel abzustimmen, Unter- und Überversorgungen aus ökologischen Gründen zu vermeiden. Die flächendeckende Durchhaltefähigkeit (Resilienz durch Redundanz) der Mobilfunknetze muss als Faktor aber einkalkuliert werden.

Die technologische Erneuerung und ein konsequentes Ökodesign bilden einen weiteren Schwerpunkt der Empfehlungen. Dieser Themenkomplex betrifft sowohl die Entwicklung der Standortinfrastruktur als auch der Gerätetechnik. Um gezielt optimieren zu können, muss zunächst die existierende Datenbasis deutlich verbessert werden. Dies betrifft einerseits den Energiebedarf im operativen Betrieb. Diesbezüglich wird angenommen, dass die Netzbetreiber bereits in einem gewissen Umfang detaillierte Energiemessungen vornehmen. Allerdings gab es in den Fachgesprächen Hinweise darauf, dass der spezifische Energiebedarf der gleichstromversorgten Funkmodule noch nicht gemessen werden kann. Die Datenlage hinsichtlich der Ökobilanz der Herstellung der Geräte- und Anlagentechnik ist deutlich schlechter. Hier müssen internationale Rahmenbedingungen geschaffen werden, um diese Daten gezielt zu ermitteln und nutzen zu können.

Die Themen der technologischen Verbesserung sind vielfältig. Einen wichtigen Fokus bilden die verlustbehafteten Verstärkersysteme der Funkmodule. Diese tragen maßgeblich zum Gesamtenergiebedarf der Mobilfunknetze bei. Neue Architekturen und Halbleitertechnologien haben ein hohes Potenzial. Allerdings kommen hier vermehrt Materialien zum Einsatz, die als kritische Rohstoffe eingestuft sind. Künftige Umweltbewertungen sollten die ökologischen Vor- und Nachteile dieses Einsatzes von kritischen Rohstoffen prüfen. Die Datenbasis hierfür muss dringend geschaffen werden. Generell hat die Entwicklung der Halbleiter- und Chipindustrie einschließlich der Leistungshalbleiter einen sehr großen Einfluss auf die Performanz und

Umweltwirkung der Mobilfunksysteme. In diesem Zusammenhang wird im Bericht auch das Thema „technologische Souveränität“ adressiert.

Die Implementierung eines aktiven Last- und Energiemanagements bilden den letzten Themenschwerpunkt der Empfehlungen. Eine höchstmögliche Auslastung existierender Systeme spart Ressourcen. Auch die Interoperabilität ist eine wichtige Voraussetzung für ein Lastmanagement. Das Energiemanagement ist eng damit verknüpft. Hier wird insbesondere die bedarfsgerechte Zu- und Abschaltung von Funkressourcen adressiert. Die umweltseitige Optimierung von Mobilfunkanlagen ist ein kontinuierlicher Prozess, der methodisch in die operative Betriebsplanung integriert und den Akteuren didaktisch vermittelt werden muss.

Summary

Objective

The project UTAMO (Environmental impact Assessment of Mobile Communication Networks) was commissioned by the German Federal Environment Agency with the aim of assessing the energy and resource consumption of the nationwide mobile communications networks for the reference year 2019 and to forecast the magnitude of the environmental impact up to 2030 in several development scenarios. During the project period from January 2019 to November 2021, Fraunhofer IZM developed a complex life cycle inventory model that quantifies the production and use-related environmental loads of mobile network technology proportionally per year for the entire system. The inventory model is an extrapolation of a generic nationwide mobile network. Due to the relative comparability of the existing mobile networks of the three network operators in Germany, Deutsche Telekom, Vodafone and Telefonica, it was possible to take this approach without modelling each network individually.

This task required an extensive database. The UTAMO project was able to use the EMF antenna location database of the Federal Network Agency for the purpose of inventory modeling and environmental assessment. The mobile network operators active in Germany supported the project with information and took part in several technical discussions. However, specific data on network equipment, operational data and the resulting energy demand were only made available to the extent that the data had already been published. In relation to the technical parameters, literature data had to be used to a large extent. The basic assumptions for the development scenarios were discussed and validated in technical discussions with ministries, authorities and companies. The database developed in this way can be regarded as adequate for the purpose of the present study in the absence of primary measurement data. Detailed information on improving the database is given in Chapter 4 at the end of the report.

The modeling of development scenarios for mobile communication networks in Germany up to the year 2030 builds the focus of the UTAMO project. Two objectives were linked to the development scenarios. First, a realistic network expansion is to be modeled that takes into account the specific frequency allocation and mobile network usage in Germany, as well as the global technology development. Second, alternative scenarios are to be calculated that reflect measures to save energy and resources and map a consequent eco-design of information communication technology (Green ICT) development. In addition, two independent scenarios for novel 5G millimeter wave systems were developed, as product development has not yet been completed and one can only speculate about commercial use. The scenarios not only serve as a political orientation with regard to the environmental impact of mobile communications networks. They show in detail the extent to which the energy and resource requirements and the associated greenhouse gas emissions develop overall and break down this development based on the cause. This identification and explanation of important causal interactions forms the basis for the last task - the elaboration of recommendations for decision makers in business and politics.

The recommendations address the environmental optimization of mobile radio networks and the creation of corresponding boundary conditions. This task requires a holistic approach. For this purpose, Fraunhofer IZM has developed a checklist with five key terms. These five key concepts all begin with the letter C. That is why the methodological approach was called "5C". The checklist addresses the application-specific boundary conditions with the first term "conditions", with the term "capacity" the performance-related user requirements, with "configuration" the system architecture and dimensioning, with "components" the immediate environmental properties of the devices and systems, and the fifth term "control" the

possibilities of active control and energy management. The recommendations for action derived on this basis are very specific. At the same time, this provides a template for a structured procedure that can be used as a concept for a continuous improvement process.

Scope of the study

The main object of the rough environmental assessment is the cell phone systems and infrastructures of the more than 80,000 antenna locations throughout Germany. These systems implement the mobile radio cells of the so-called radio access network. They consist of antenna, radio and baseband modules as well as infrastructure technology including the power supply. The mobile radio systems have a comparatively high electrical energy requirement in operation, which was around 2 TWh in Germany in 2019. Against the background of the introduction of 5G and the accelerated expansion of cellular networks, the UTAMO project should answer the question of how energy and resource requirements will develop up to 2030. In addition to conventional antenna systems with carrier frequencies in the centimeter wave range, new types of millimeter wave systems could also be used in the medium term to support macro cells. Furthermore, it should be considered that with an increasing volume of mobile data, the energy demand of the optical aggregation and transport networks could also increase in the medium term, via which the data traffic is distributed to other networks and transported over long distances. The transport, switching and network control technology of the so-called transport core network are roughly assessed in the life cycle inventory model. The energy demand of mobile devices is not the subject of the investigation. As part of the project, only CO₂ balances of the production of average 5G smartphones and wireless sensors were created, which are intended to show the magnitude of this environmental impact in comparison to the systems of the mobile phone infrastructure. In addition, no object of the project was to access the potential energy and resource savings such as shared mobility or wireless metering, which is realized through the use of cellular networks. The topic of “environmental effects of electromagnetic radiation” was also explicitly excluded from the study.

Simplified environmental assessment

The simplified environmental assessment follows a standard life cycle assessment approach. For the use phase, it balances the electrical energy requirements of the operational operation of the mobile network and calculates the associated CO₂ emissions using a conversion factor for the electricity mix. Two assumptions are used for the development of the German electricity mix up to 2030 in order to map a conventional and accelerated switch to renewable energy sources in the electricity supply. Furthermore, CO₂ balances of the materials and the manufacture of essential components, devices and infrastructure elements are created. Assuming a typical product lifespan, these CO₂ balances are added proportionally to the CO₂ balance of a year of use. Other environmental aspects such as the transport, installation, maintenance, disposal or recycling of old devices are not modeled due to a lack of data.

As already mentioned, the technical framework of the environmental assessment includes the essential system technology of the radio access networks and the transport core networks. Six antenna location categories are distinguished in the internal structure. These reflect the typical transceiver configuration of the locations in the country and in the city. A so-called radio cell distribution model provides data, for example, on the radio cell size and the system inventory per category. The temporal reference of the environmental assessment includes the reference year 2019 as well as scenarios for network expansion in 2022, 2026 and 2030. For this forecast period, technical trends in the field of mobile communications technology, semiconductor technology and power conversion technology are taken into account and explained in the report.

The allocation of frequencies and the requirements placed on the use of frequencies by the Federal Network Agency have a major influence on the development of mobile communications in Germany. The available spectrum and the conditions of use are therefore taken into account when modeling the development scenarios. After all, the network expansion is influenced by the real demand from customers and the resulting mobile data volume. As part of the UTAMO project, two different approaches were used to model forecasts for the development of the mobile data volume. These forecasts show a substantial increase in customer-related data volume from 2019 to 2030 by around a factor of 45. The reason for this is the expected use of mobile video by an increasing number of network participants. This forecast increase forms, among other things, the basis for modeling the network expansion in the base scenario.

The calculation model developed by Fraunhofer IZM can vary a wide range of parameters for each location category. For example, the type and number of transceiver paths, antenna configurations, the frequency-related channel properties, modulation methods, the design of interfaces, efficiency levels and technology generations, as well as load profiles and usage patterns can be set individually. This allows a variety of scenarios to be calculated. In this report, calculation results for the following development scenarios are presented and evaluated:

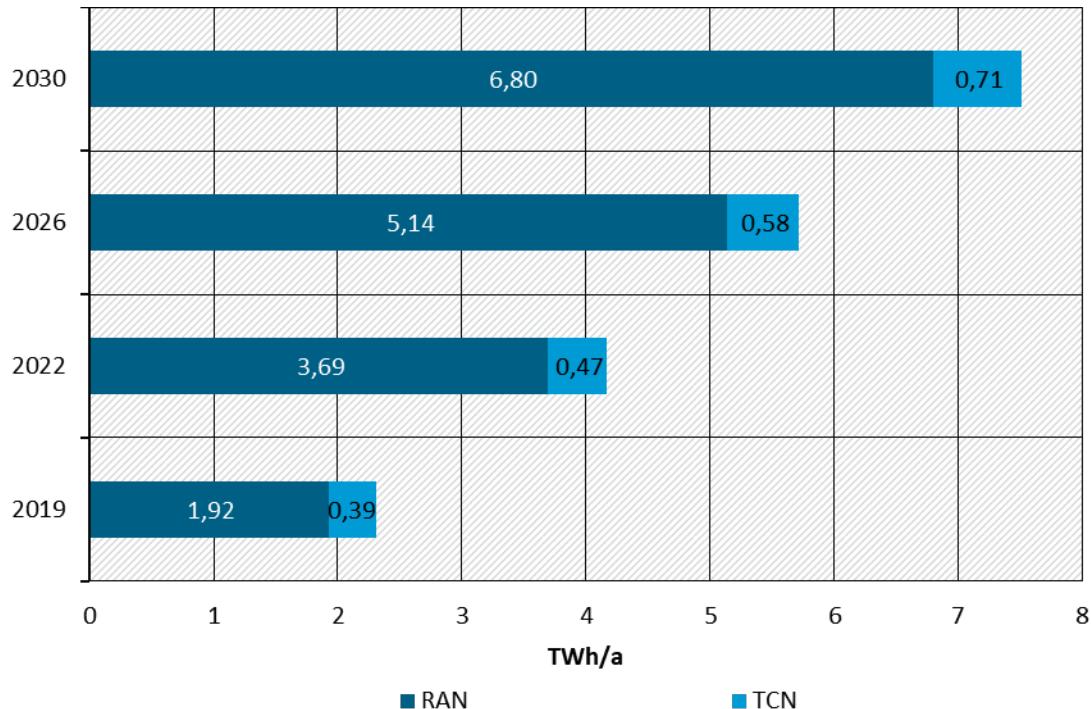
- ▶ Scenario 1: Basic scenario for the network expansion of macro cells (cm wave)
- ▶ Scenario 2: Scenario 1 with accelerated technology modernization (technology replacement every three years instead of every seven years)
- ▶ Scenario 3: Scenario 1 with nationwide roaming (theoretical reduction of the radio cell area)
- ▶ Scenario 4: Scenario 1 with consistent energy management (disconnection of individual carrier frequencies in times of low utilization)
- ▶ Scenario 5: Combination of scenarios 2, 3 and 4
- ▶ Scenario 6: Scenario for a defined area coverage with micro cells (mm wave)

Baseline scenario

The baseline scenario is a forecast of the electrical energy demand of the radio access networks (RAN) and the transport core networks (TCN) in Germany for the period from 2019 to 2030. The RAN consists of macrocells and takes all centimeter wave antenna systems in the range from 700 MHz to 3,600 MHz into account. A separate scenario 6 provides a forecast for the potential environmental impact of new supporting microcells in the millimeter wave range 26 GHz to 28 GHz. The modeled network expansion reflects a substantial increase in the theoretically provided mobile data rate by a factor of 45 compared to the reference year 2019. According to the forecast, the nationwide number of antenna locations will increase from around 81,000 to 108,000 in 2030. According to the antenna location category, the number of dedicated transmission and reception channels (transceiver, TRX) will be increased significantly from 12 to 15 in 2019 to 23 to 25 in 2030 in order to guarantee the required capacity. The logic behind this modeling is that new locations are difficult to acquire and it is therefore more cost-effective to expand existing locations as long as the limit values for maximum equivalent isotropically radiated power (EIRP) are not exceeded. With regard to the network configuration, in the basic scenario the new 5G frequencies in the 700 MHz and 3,600 MHz band will be quickly expanded, the antenna systems in the frequency bands greater than 1,000 MHz will be converted to higher multiple antennas (Multiple Input Multiple Output, MIMO), and the radio technology will be designed for 4G and 5G. 3G technology (UMTS) will be deactivated in 2022 and 2G technology (GSM) will remain active until 2030 for basic supply. With regard to the degree of modernization

of the technology, an average replacement cycle of seven years is assumed. The efficiency of the power supply has a good level of 83% to 86% in average partial load operation. The baseline scenario assumes no active energy management, such as the shutdown of girders at night.

Figure 5: Forecast of the electrical energy demand for radio acces networks (RAN) and transport core networks (TCN) for Germany 2019 to 2030 in the baseline scenario



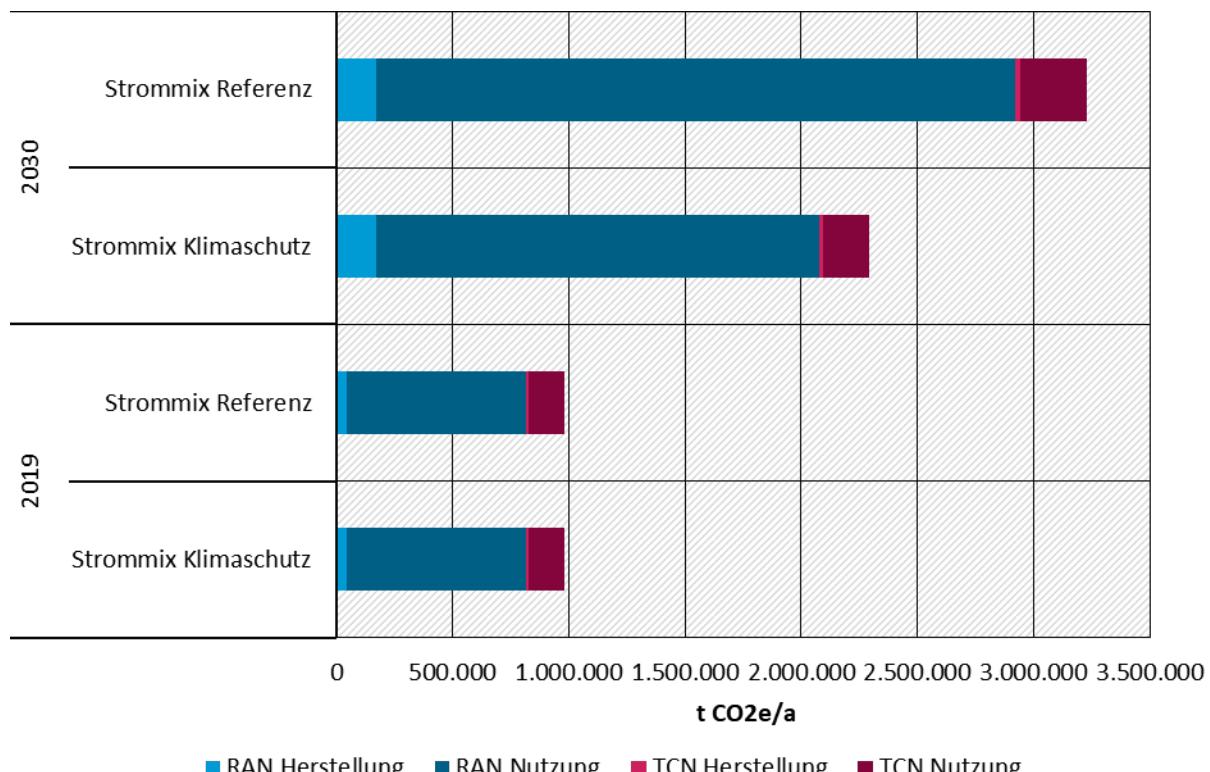
Source: Own illustration, Fraunhofer IZM

Figure 1 shows the calculation results for the basic scenario. The electrical energy demand of the entire mobile network in Germany will increase from 2.31 TWh in 2019 to 7.51 TWh in 2030 (approx. 1.3% of the nationwide electricity demand). The modeled energy demand for mobile phone use for the reference year 2019 roughly coincides with the information published by the three network operators, so that the model can be assessed as valid. The 325% increase in annual energy demand is substantial. However, this value also reflects the increased relative energy efficiency, since with this tripling, the network capacity has theoretically multiplied by a factor of 45. The radio access network accounts for the largest share of the energy requirement, with 83.3% in 2019 and 90.5% in 2030. The operation of the radio modules, which contain the power amplifiers and analog-to-digital converters, is the largest at over 60% Share of total energy demand. The power amplifiers in particular generate strong energetic losses, which increase at higher frequencies. Conventional power amplifiers are also optimized for fixed operating points and are hardly load-adaptive. Another aspect contributes to the increasing energy demand. Larger continuous channel bandwidths (3.5 GHz band), a multiplication of the antenna paths (massive MIMO), new modulation methods (e.g. 256 QAM) and other 5G technologies contribute significantly to the higher data rates. With the higher data rates, however, the computational effort of the analog-to-digital conversion and, in particular, the digital signal processing in the baseband module also increase. This growing computational effort has an impact on the energy demand. It is only partially compensated for by new computer architectures and the ongoing miniaturization of hardware. In the longer term in particular, the compensatory effect of Moore's law could slow down significantly, so that more

parallel hardware structures would have to be created in order to cover the computing requirements. However, this increases the energy and resource requirements proportionally.

Figure 2 shows the annual CO₂ balance of the two network areas in the base scenario, each divided into the usage phase and the proportionate production phase. Both electricity mixes forecast by the UBA are compared with one another. Based on a conversion value of around 400g CO₂e / kWh in 2019, the value for the “reference electricity mix” will again reach this initial value after an increase in 2030, whereas the “climate protection electricity mix” will decrease to 280g CO₂e / kWh in 2030.

Figure 6: Comparison of the CO₂ balance according to the climate protection and the reference electricity mix (baseline scenario 2019 to 2030)



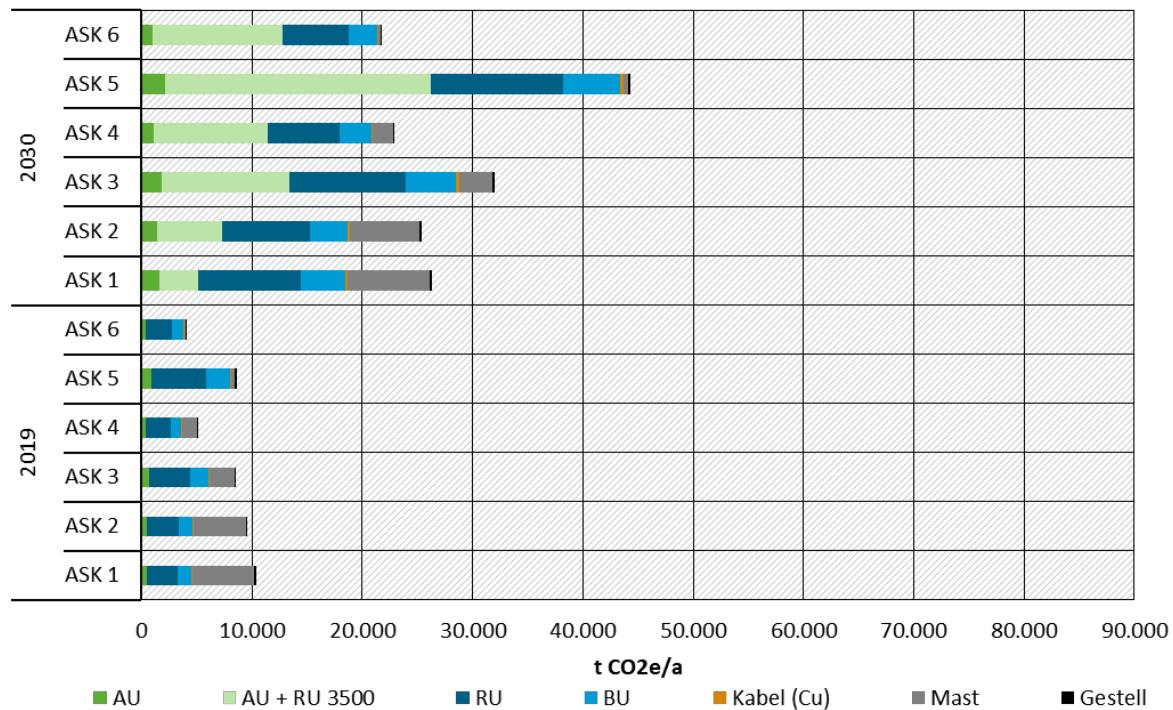
Source: Own illustration, Fraunhofer IZM

It can be seen that the annual emissions of greenhouse gases will increase in each of the sub-aspects presented due to the large expansion of the mobile communication network. The CO₂ emissions rise from 981,590 tons in 2019 to 2,295,404 tons in 2030 assuming the climate protection electricity mix. The impact is with up to 3,230,222 tons in 2030 even higher when assuming the reference electricity mix. For 2030, the climate protection electricity mix results in a significant reduction in greenhouse gas emissions of 29% through an increased expansion of renewable energies compared to the reference electricity mix. Nevertheless, the total annual emissions are still 2.3 times higher than in the reference year 2019.

A comparison of the manufacturing phase with the usage phase shows that the electrical energy requirement of the operational operation strongly outweighs with an average of over 90%. There are two points to note in this regard. First, the assumptions about the typical service life of the plant engineering influence the value of the proportionate production per year. A shorter product life would increase the value. Second, the data for the rough environmental assessment

of raw materials and manufacturing processes (life cycle assessment data) is partly out of date and incomplete. This can lead to an underestimation of the overall environmental impact.

Figure 7: Absolute CO2 emissions related to the manufacturing phase of macro cell components (baseline scenario 2019 to 2030)



Source: Own illustration, Fraunhofer IZM

In Figure 3, the manufacturing phase is broken down into antenna location category (ASK) and functional main components such as the antenna unit (AU), radio unit (RU) and baseband unit (BU). The ASK result from the radio cell distribution model. ASK 1 are the largest radio cells in rural antenna locations and ASK 6 are small inner-city antenna locations. The internal structure shows that the antenna and radio modules proportionally produce the greatest environmental impact. The reason for this lies in the increasing numbers of these systems. The environmental impact results primarily from the energy-intensive manufacture of semiconductor components in clean rooms. Other factors are the manufacture of other components and circuit boards. The increasing number of semiconductor components and more highly integrated circuit boards also determine the increasing environmental impact of the increasingly computationally intensive baseband modules. The aluminum housings for the radio modules, for example, are an interesting point. These functional housings serve as heat sinks and require comparatively large amounts of aluminum. However, the environmental impact of these enclosures varies greatly if, for example, new or recycled aluminum is included in the inventory. The use of recycled raw materials improves the environmental balance in some cases considerably. The steel masts and high concrete towers on which the antenna and radio modules are installed, especially in rural areas, have an inconsiderable environmental impact, even with the assumed long operating times of 40 to 100 years. These infrastructures should therefore be well positioned and equipped with as many antenna systems as possible.

The analysis of the basic scenario provides information on the focal points and causes of the environmental impact as a result of the assumed network expansion. The question now arises as to whether and with what measures this environmental impact can be minimized with the same scope of network expansion or the same mobile data transport capacity. To investigate this question, alternative scenarios were calculated that deal with specific measures to reduce the environmental impact. Due to the dominance of the usage phase, but also due to the lack of data on the manufacturing phase, the alternative scenarios focus on reducing the electrical energy requirement in the operational operation of the mobile network.

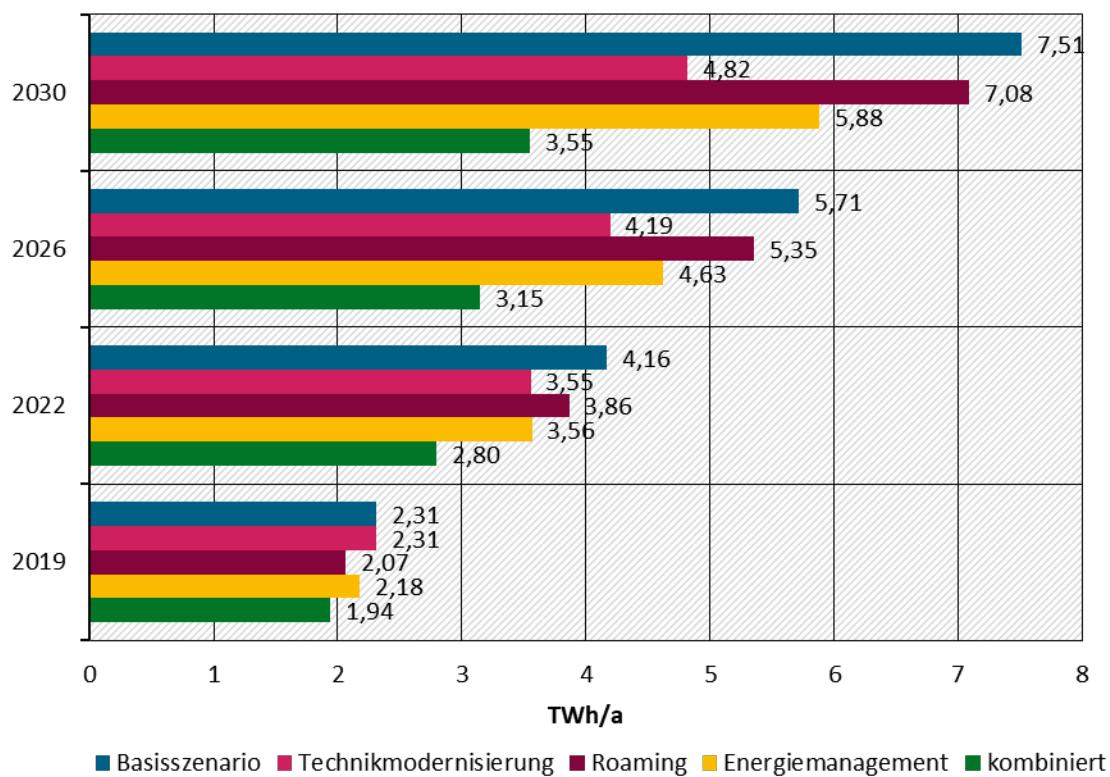
Alternative scenarios

The alternative scenario 2 calculates the hardware-technical improvement potential, which results in particular from the still continuous progress of the semiconductor industry. The miniaturization improves the energy efficiency to a certain extent. In simple terms, more computing power can be achieved with a defined amount of energy. Although this potential for improvement (Koomeys Law) may slow down in the coming years, it currently still has a very high leverage effect for reducing energy requirements in operations, as the scenario shows. Under the theoretical assumption that the system technology will not be converted to the latest hardware technology every seven but every three years, the electrical energy requirement will be reduced from 7.5 TWh to 4.8 TWh in 2030, for example. This energy saving of 36% compared to the basic scenario is comparatively large, because the increase in hardware-related energy efficiency has a threefold effect. The energy-saving components also reduce the absolute conversion losses of the power supply and ultimately the absolute cooling effort.

The alternative scenario 3 simulates nationwide roaming. In the modeling, the radio cells of all three network operators are theoretically distributed equally, which reduces the diameter of the radio cells per location category to a little more than half compared to the basic scenario. This theoretical reduction could in principle lead to a reduction in the transmission power per radio cell. However, the scenario only shows a relatively small saving of around 6% compared to the base scenario. The small effect of this effect is due to the fact that the transmission power cannot react adaptively enough to the reduced cells according to the data in the UTAMO model. This is because today's power amplifiers are not designed to be load or range adaptive. A new generation of amplifiers or radio modules that are designed for an overall lower transmission power could, however, significantly increase the savings potential. In the course of modernization, this could be done over time.

Alternative scenario 4 includes consistent energy management such as deliberately switching off selected transceivers in the time intervals with low load. The scenario simulates a more load-adaptive operation of the cellular networks. These measures can save around 1.49 TWh or 22% of electrical energy in 2030. Depending on the practicability and scope of this measure, this value can be correspondingly smaller or larger in a real application.

Alternative scenario 5 combines all three previous scenarios with the aim of indicating the cumulative savings potential of energy-optimized cellular networks. With the accelerated modernization of technology, nationwide roaming and consistent energy management, almost 4 TWh can theoretically be saved in 2030, which corresponds to an energy saving of 53% compared to the basic scenario. The savings are effective both in the radio access network and in the transport core network. Figure 4 shows an overview of the energy demand forecast for all scenarios for development up to 2030.

Figure 8: Comparison of the energy demand forecast of all five scenarios (2019 to 2030)

Source: Own illustration, Fraunhofer IZM

So far, the basic scenario and the alternative scenarios have not taken into account any new 5G millimeter wave systems in the modeling of the network expansion. Since the network expansion with this technology is very speculative at the moment (end of 2021), the decision was made to only record the cm-wave-based macro cells (700 MHz to 3,600 MHz) and the mm-wave-based micro cells (26 GHz to 28 GHz) in an exemplary area reference scenario.

5G millimeter wave

One object of the 5G standardization is the utilization of frequencies in the millimeter wave range, as this would provide greater continuous bandwidth, which would significantly increase the capacity and spectral efficiency of the radio cells. The world radio conference WRC19 has, among other things, the spectrum designated as the 26 GHz band (n258: 24.25-27.5 GHz; n257: 26.5-29.5 GHz) and the spectrum designated as the 28 GHz band (n261: 27.5-28.35 GHz) suggested. Despite advanced 5G standardization, the application of this millimeter wave spectrum is still at an early stage and it should be assumed that commercial use will not begin until 2023 at the earliest. Against this temporal background, it is hardly surprising that the available technology and application data only come from research, standardization and white papers. They do not provide a clear picture of the technical and application-specific design of future mm shaft systems. However, the basic technical properties of mm-wave systems are quite clear and can form the basis for the technical specification of a millimeter-wave scenario. Estimating a real network expansion is more difficult. The industry is pursuing various scenarios for the use of millimeter wave systems in outdoor and indoor areas. The range, which is severely limited due to the frequency properties, allows the construction of smaller microcells and radio links.

Against this background, the decision was made not to estimate a real expansion scenario, but only to calculate an easily scalable area scenario for an outdoor and indoor application. The

pioneer bands in the range from 26 to 28 GHz were chosen as the frequency spectrum, as these will very likely be the first to be used. The first millimeter wave scenario are microcells in outdoor use with a range of 150 meters. This outdoor scenario is calculated for the coverage of 1% of the area of Germany. The second scenario is high quality microcells in an indoor application with a range of 30 meters. This indoor scenario is calculated for the coverage of 0.1% of the area of Germany.

Covering 1% of the area of Germany with outdoor microcells in 2030 would result in a total of 3.1 TWh of electricity, with 2.05 TWh being accounted for by the radio access network and 1.05 TWh by the transport core network. What is striking here is the far higher share of the transport core network in the total energy requirement. The reason for this lies in the assumption that these microcells create a massive data transport volume. Compared to the macro cells, which cover the whole of Germany and require 7.51 TWh for this in 2030, the value initially appears to be quite high. However, if one takes into account that the microcells have a 16 times higher mobile data transport capacity compared to the macrocells with a comparable amount of energy, the functional potential and the relative energy efficiency of the millimeter wave becomes clear, at least in terms of magnitude. At the same time, this example shows very clearly that the use of millimeter wave systems should be planned carefully and in coordination with the macro cells so that no excess capacity is installed that unnecessarily requires energy and raw materials.

The indoor scenario underscores this finding that due to the relatively small size of the radio cells, an energy requirement of 5.77 TWh in 2030 is required to cover 0.1% of the area of Germany. This value also requires further explanations, as in this scenario continuous operation (e.g., in an industrial production environment) was assumed. These exemplary calculations clearly show in the analysis that a large number of factors influence the real energy and resource requirements of the millimeter wave system. This includes the conception of the radio cell including the configuration of the antenna and radio systems, which should take into account the real application conditions and load profiles. Furthermore, the location and type of digital signal processing (keywords are C-RAN and O-RAN) as well as the layout of the front and backhaul must be taken into account.

The real load profile ultimately forms the boundary condition for active energy management, which can significantly influence the overall energy requirement.

Recommendations

Cellular networks are very functional and are of great economic and social importance. As a critical infrastructure, they must be able to operate permanently and fail-safe. The capacity of our cellular networks will certainly be expanded significantly in the coming years in order to implement application-induced trends. As the scenarios show, this development leads to an increase in the demand for energy and raw materials. The core problem is the limited spectral efficiency of a radio link. However, the efficiency of mobile radio can be influenced very positively by network planning and technological measures, as well as operational energy management. The recommendations for action reflect these basic options.

The planning of the further expansion of the network and the modernization of the network the highest priority, since this allows early and direct influence on the later environmental impact. Network planning no longer only affects the individual network operator. Today there is a certain need to coordinate the development of mobile communications networks nationwide with the aim of avoiding undersupply and oversupply for ecological reasons. The nationwide resilience of the mobile network must be taken into account as a factor.

Technological renewal and consistent eco-design are another focus of the recommendations. This complex of topics concerns both the development of the site infrastructure and the device technology. In order to be able to optimize in a targeted manner, the existing database must first be significantly improved. On the one hand, this affects the energy demand in operational operations. In this regard, it is assumed that the network operators already carry out detailed energy measurements to a certain extent. However, there were indications in the technical discussions that the specific energy requirement of the radio modules with direct current supply has not yet been measured. The data situation with regard to the life cycle assessment of the manufacture of the device and system technology is significantly worse. International boundary conditions must be created here in order to be able to determine and utilize this data in a targeted manner.

The topics of technological improvement are diverse. The lossy amplifier systems of the radio modules form an important focus. These make a significant contribution to the total energy demand of the mobile network. New architectures and semiconductor technologies have good potential. However, materials that are classified as critical raw materials are increasingly being used here. New environmental assessments should examine the ecological advantages and disadvantages of this use of critical raw materials. The database for this needs to be created urgently. In general, the development of the semiconductor and chip industry, including power semiconductors, has a major impact on the performance and environmental impact of mobile radio systems. In this context, the report also addresses the subject of “technological sovereignty”.

The implementation of an active load and energy management form the final focus of the recommendations. The highest possible utilization of existing systems saves resources. Interoperability is also an important prerequisite for load management. Energy management is closely linked to it. In particular, the needs-based connection and disconnection of radio resources is addressed here. The environmental optimization of mobile radio systems is a continuous process that must be methodically integrated into operational planning and communicated to the actors in a didactic manner.

1 Einführung

1.1 Motivation

1.1.1 Wie hoch sind der Energiebedarf und die CO2-Bilanz von Mobilfunknetzen?

Der Klimaschutz und der Weg zur Klimaneutralität sind für den anhaltend wachsenden Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) einschließlich der Mobilfunkbranche eine große aktuelle Herausforderung. Ein Blick auf die Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte von Netzbetreibern vermittelt einen ersten Eindruck von den konkreten Maßnahmen, die ergriffen werden, um die Umweltlasten zu reduzieren bzw. die CO2-Bilanz² zu verbessern (vgl. Kap. 4.1.1). Immer konsequenter werden die Vorgaben der Global Reporting Initiative³ (GRI) durch Unternehmen der Mobilfunkbranche umgesetzt. So werden beispielsweise für den Betrieb der Telekommunikationsnetze und Rechenzentren die jährlich genutzten Energiemengen (elektrischer Energiebedarf in TWh/a) und klimaschädlichen Treibhausgasemissionen (Kohlenstoffdioxid-Äquivalente in t CO2e/a) sowie der Anteil der genutzten erneuerbaren Energien in den Berichten ausgewiesen.

Diese aggregierten Daten geben aber nur teilweise Auskunft über die spezifische Umweltwirkung einzelner Aspekte der Mobilfunknetze. So werden Daten für die einzelnen Netzbereiche, Technologien, etc. nicht separat ausgewiesen. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Umweltwirkung der Herstellung der Netztechnik in den Berichten derzeit keine Betrachtung findet. Jahresberichte und Strategiepapiere beschränken sich auf die Entwicklung des relativen Energiebedarfs (z.B. Watt pro Datenrate) und die Quote der Nutzung erneuerbarer Energien. Längerfristige Prognosen zum absoluten Energie- und Rohstoffbedarf bzw. zur CO2-Bilanz liegen beispielsweise für die kommenden zehn Jahre nicht vor. Gerade die umweltseitigen Auswirkungen der sukzessiven Modernisierung und Erweiterung des nutzbaren Frequenzspektrums in Folge der Einführung der fünften Mobilfunktechnologiegeneration (5G) werden in der öffentlichen Darstellung nicht detailliert beleuchtet. Vielmehr wird in der 5G-Standardisierung und in technologiestrategischen Dokumenten (Whitepaper) immer wieder auf die Verbesserung der relativen Energieeffizienz verwiesen, ohne die absolute, ganzheitliche Umweltwirkung zu quantifizieren.

Vor diesem Hintergrund stellte das deutsche Umweltbundesamt (UBA) bereits im Jahr 2018 die kritische Frage nach der Höhe des absoluten Energie- und Rohstoffbedarfs bzw. der CO2-Bilanz künftiger Mobilfunknetze. Folgende Fragestellungen sollten beantwortet werden:

- ▶ Wie hoch sind der aktuelle Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der deutschen Mobilfunknetze?
- ▶ Welchen Anteil haben die Nutzungsphase und die anteilige Herstellungsphase der Gerätetechnik?
- ▶ Wie entwickelt sich die CO2-Bilanz bis zum Jahr 2030 in unterschiedlichen Ausbau- und Einsatzszenarien?
- ▶ Welche Maßnahmen können ergriffen werden, um den Energiebedarf und die CO2-Bilanz ohne funktionale Einbußen zu senken?

² In diesem Bericht wird unter dem Begriff „CO2-Bilanz“ die Gesamtmenge der bei der Herstellung und Nutzung von Geräten emittierten Treibhausgase verstanden. Diese wird in kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten (kg CO2e) angegeben.

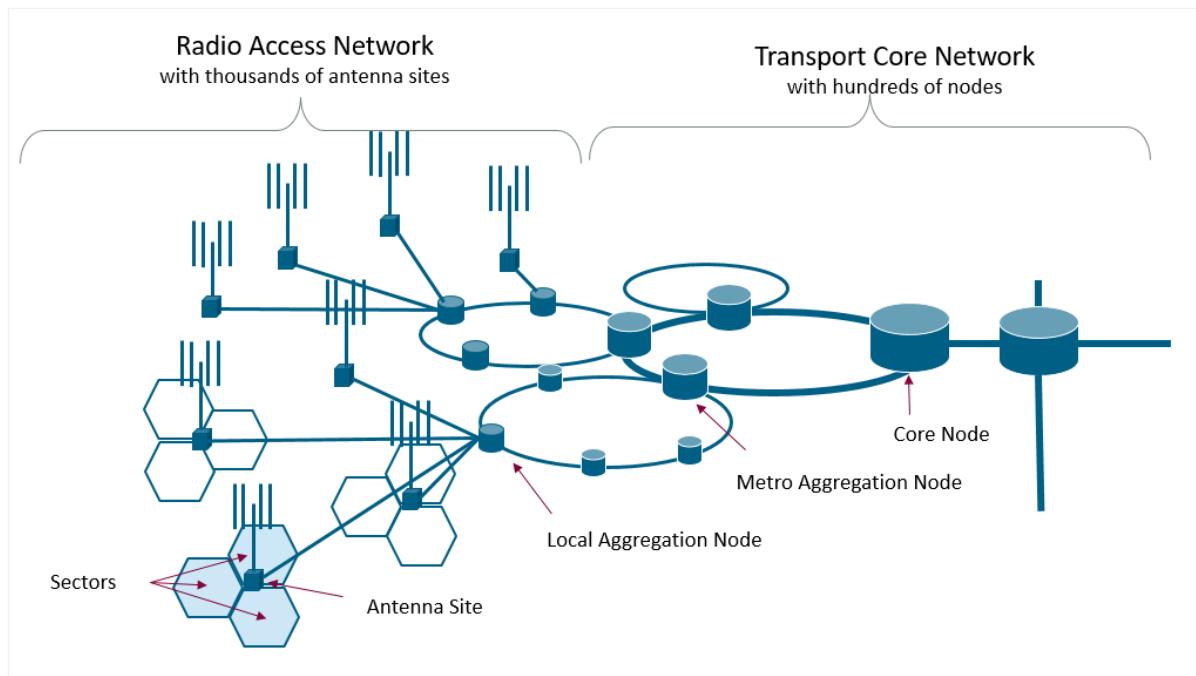
³ GRI Webseite: <https://www.globalreporting.org/>

Die Beantwortung dieser Fragestellungen soll eine belastbare Datenlage schaffen und angesichts der Erfüllung aktueller Klimaschutzziele strategisch nutzbare Fakten liefern. Für eine aktive Verbesserung der Entwicklung ist es wichtig, jene Faktoren zu identifizieren und zu analysieren, welche die CO₂-Bilanz der Mobilfunknetze maßgeblich beeinflussen. Diese Faktoren wurden im Grundsatz bereits in der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Studie „Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland“ identifiziert (Stobbe et al. 2015). Diese vom Fraunhofer IZM und Borderstep Institut durchgeführte Studie entwickelte einen methodischen Ansatz zur Berechnung des absoluten Energiebedarfs von IKT. Dabei wurden der Gerätebestand und die Technikeigenschaften sowie die für den Energiebedarf relevanten Nutzungsaspekte berücksichtigt. Aufbauend auf diesen Vorarbeiten sowie der Forschung im Rahmen der vorliegenden Studie werden fünf Faktoren bzw. Themenbereiche betrachtet, welche die Umweltbilanz von Mobilfunknetzen maßgeblich beeinflussen: die Netzkapazität, der Gerätebestand, die Technologiegeneration, der Betrieb und die Energiequelle (siehe 1.1.3).

1.1.2 Mobilfunknetze in Deutschland

Ein Mobilfunknetz umfasst die gesamte technische Infrastruktur, die für die Bereitstellung einer flächendeckenden drahtlosen Kommunikation mittels mobiler Endgeräte von Nöten ist. Es unterteilt sich in das sogenannte Funkzugangsnetz (*Radio Access Network, RAN*) sowie das Aggregations- und das Transportnetz, welches im Rahmen dieser Studie als Transportkernnetz (*Transport Core Network, TCN*) bezeichnet wird (vgl. Abbildung 9).

Abbildung 9: Architektur eines Mobilfunknetzes (Schema)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die drahtlose Kommunikation erfolgt über eine sogenannte Luftschnittstelle zwischen einem mobilen Endgerät und dem nächstgelegenen Antennenstandort (in der Grafik als hellblaue Funkmäste dargestellt). Dort befinden sich die Mobilfunkanlagen, welche die Funkzelle erzeugen (in der Grafik als hellblaue Sechsecke dargestellt). Die Technologie hierfür wird in einem Mobilfunkstandard der entsprechenden Generation festgelegt (2G, 3G, 4G, 5G).

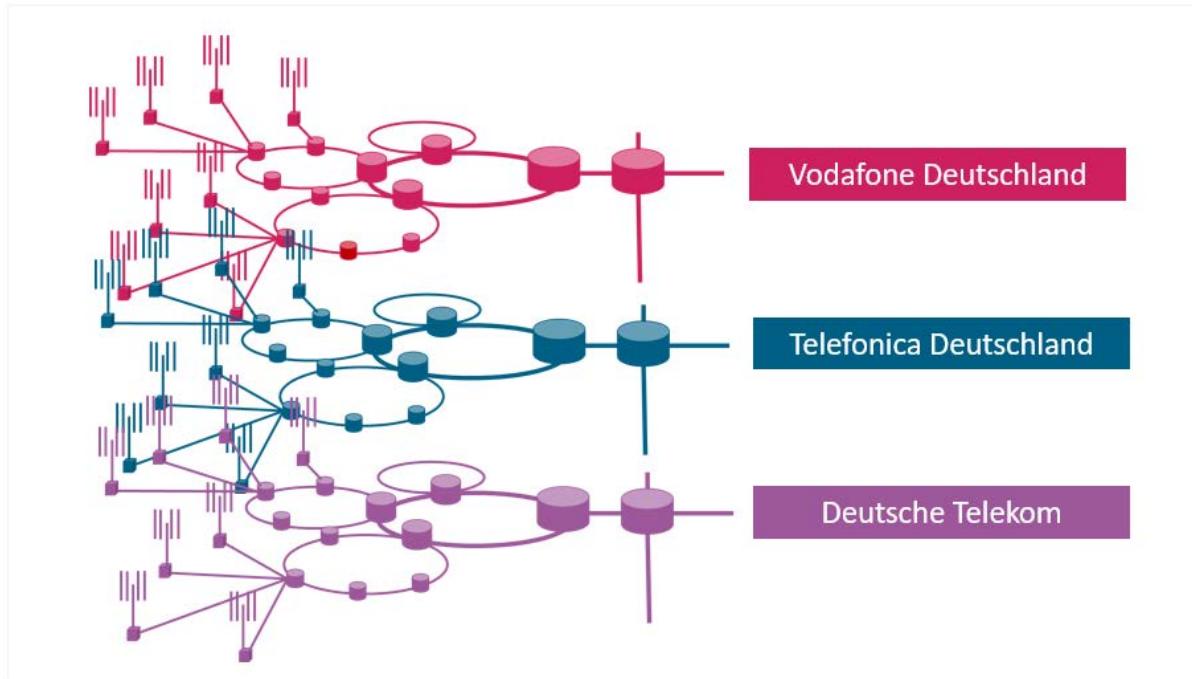
Die Mobilfunkanlage umfasst Antennenmodule, Funkmodule und mindestens ein Basisbandmodul. Umgangssprachlich wird eine Mobilfunkanlage auch Basisstation genannt. An Antennenstandorten werden meist mehrere Anlagen verschiedener Frequenzbänder gebündelt und in Sektoren ausgerichtet. Die Größe und Lage der Funkzelle wird primär durch die Ausrichtung des Sektors, den Öffnungswinkel der Abstrahlung und die nutzbare Signalreichweite der Mobilfunkanlage charakterisiert.

Die Antennenstandorte sind so verteilt, dass sie ein flächendeckendes Netz aus Funkzellen aufspannen - das Funkzugangsnetz - sodass die Signalversorgung überall und jederzeit gedeckt werden kann. Die Standordtichte hängt dabei von der Zellgröße bzw. Signalreichweite und somit u.a. von dem genutzten Frequenzspektrum, der Anzahl und Mobilität der verbundenen Nutzer, der Sendeleistung und der Signaldämpfungscharakteristik der Umgebung ab.

Das Transportnetz dient der kabelgebundenen Weiterleitung⁴ des Signals zwischen den Antennenstandorten und der Anbindung an das Kernnetz, in dem die übertragenen Daten weiter verteilt und verwaltet werden. Für die logische Steuerung der Netze und beispielsweise das Kundenmanagement werden Server genutzt, die zumeist an größeren Standorten in einer Rechenzentrums-Infrastruktur betrieben werden. Das Transportkernnetz bildet die Schnittstelle zu den anderen Nutzern und zum Internet.

In Deutschland werden mit Stand 2021 bundesweit drei parallele bzw. übereinander liegende Mobilfunknetze durch die Deutsche Telekom, Telefónica Deutschland und Vodafone Deutschland betrieben (vgl. Abbildung 10). Laut dem Jahresbericht 2020 der Bundesnetzagentur (BNetzA) (2021a) beinhalteten die Funkzugangsnetze Ende 2020 insgesamt etwa 84.000 Antennenstandorte mit rund 225.000 daran installierten Mobilfunkanlagen. Damit befinden sich an jedem Standort etwa 2-3 Mobilfunkanlagen (im Durchschnitt 2,7).

Abbildung 10: Parallele bundesweite Mobilfunknetze von drei Netzbetreibern (Schema)



⁴ ausgenommen Richtfunk

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

An jedem Antennenstandort werden unter Ausnutzung des verfügbaren und am besten geeigneten Frequenzspektrums mehrere, sich überlappende große Funkzellen gebildet (sogenannte Makrozellen), die teilweise mit kleineren Verdichtungszellen (Mikrozellen) ergänzt werden, um mehr Kapazität zu Spitzenlastzeiten bereitzustellen. Das benutzte Frequenzspektrum ist lizenziert und wird von den Netzbetreibern in Frequenzversteigerungen des Bundes kommerziell erworben. An die Frequenzvergabe sind meistens auch Anforderungen bezüglich der Flächenabdeckung geknüpft. Hierbei kommen auch die unterschiedlichen Mobilfunkgenerationen ins Spiel.

Gleichwohl die drei Netzbetreiber bereits seit mehreren Jahren in einem gewissen Maße und primär in ländlichen Gebieten dieselben Mobilfunkstandorte (z.B. Masten, Türme) nutzen, wird ein sogenanntes nationales Roaming – die Nutzung von Antennenstandorten eines Betreibers durch die Kunden eines anderen Betreibers – in Deutschland nicht praktiziert.

Die Aggregations- und Transportnetze sind gewachsene Infrastrukturen mit deutlich weniger Standorten. Statistische Angaben existieren hierzu nicht. Ein Grund hierfür könnte in der Tatsache liegen, dass die Transportnetze von den meisten Netzbetreibern nicht nur für den Mobilfunk, sondern auch für den kabelgebundenen Datenverkehr genutzt werden. Das optische Transportnetz ermöglicht eine äußerst energieeffiziente Datenübertragung auch über größere Entfernungen. Im Gegensatz dazu ist die Datenübertragung über die Luftschnittstelle der Funkzugangsnetze deutlich ineffizienter und benötigt mit Abstand den größten Teil des Energiebedarfs eines Mobilfunknetzes.

Es ist festzuhalten, dass die aktuell existierenden Mobilfunknetze in Deutschland drei getrennte, parallele Infrastrukturen darstellen. Mit der Vergabe erster 5G Frequenzspektren wird mit der United Internet AG in Zukunft zumindest ein weiterer Netzbetreiber in Deutschland aktiv werden, und es ist nicht auszuschließen, dass noch weitere hinzukommen (vgl. die Ausführungen zur Frequenzvergabepolitik und zu Marktentwicklungstrends im Kap. 3.1.4). Inwiefern vor diesem Hintergrund ein noch weiterer Ausbau paralleler Netzstrukturen erfolgt, oder ob durch eine gezielte Zusammenarbeit bzw. Roaming wie im Fall von United Internet und Telefónica eine Konsolidierung ggf. stattfinden wird, kann heute noch nicht beurteilt werden.

1.1.3 Fünf prinzipielle Faktoren bestimmen die Umweltbilanz der Mobilfunknetze

Folgende prinzipielle Faktoren bzw. Themenbereiche bestimmen die Umweltbilanz, d.h. die herstellungs- und nutzungsseitige Ressourcennutzung sowie die resultierenden Treibhausgasemissionen von Mobilfunknetzen. Sie zeigen insbesondere die Wechselwirkung von wichtigen technischen Aspekten des Mobilfunks mit dessen Energiebedarf. Die fünf Faktoren sind:

- ▶ Netzkapazität: die vom Netz bereitgestellte Performanz pro Netzteilnehmer (Spitzen- und Durchschnittsdatenrate)
- ▶ Gerätbestand: die Anzahl und Konfiguration der Mobilfunkanlagen (Antennen-, Funk- und Basisbandmodule)
- ▶ Technologiegeneration: der Grad des implementierten technischen Fortschritts (Mobilfunkstandard und Fertigungsgeneration der Technikkomponenten)
- ▶ Betrieb: das Lastprofil und Maßnahmen zur lastadaptiven Netzsteuerung (Last- und Energiemanagement)

- Energiequelle: die elektrische Stromversorgung einschließlich der Art der Energieerzeugung (Strommix)

Netzkapazität: Mobilfunknetze sind kritische Infrastrukturen, die in den kommenden Jahren modernisiert und weiter ausgebaut werden. Der Grund für den voranschreitenden Netzausbau ist offensichtlich: Mobilfunknetze ermöglichen vielfältige Anwendungen im industriellen Bereich und sind essenzieller Bestandteil der privaten Kommunikation und mobilen Mediennutzung. Der stetige Netzausbau zielt sowohl auf eine vollständige Flächenabdeckung⁵ als auch auf die Gewährleistung hoher Datenraten, beispielsweise für Videotelefonie und Streaming. Eine Progression der aktuellen Entwicklung (vgl. 3.1) des durchschnittlichen Datenvolumens pro Nutzer in Deutschland kommt zu dem Ergebnis, dass die Nachfrage bis 2030 um bis zu einem Faktor 50 gegenüber dem Jahr 2019 steigen könnte und die Netzkapazität unter dieser Annahme deutlich ausgebaut werden müsste. Ein solcher Netzausbau benötigt Ressourcen und wird vermutlich auch zu einer Steigerung des Energiebedarfs beitragen.

Gerätebestand: Zur Erhöhung der Netzkapazität werden durch die Netzbetreiber bestehende Antennenstandorte modernisiert und mit zusätzlichen Antennenanlagen ausgebaut. Gleichzeitig werden veraltete Technologien und entsprechende Gerätetechnik zurückgebaut (3G bis 2022, langfristig auch 2G). Des Weiteren werden zur Netzverdichtung neue Antennenstandorte errichtet und insbesondere im ländlichen Bereich Antennenmasten von mehreren Betreibern genutzt. Die neuen Frequenzbänder ($> 3 \text{ GHz}$) werden primär als kleine Funkzellen zur Unterstützung stark bebauter Flächen eingesetzt. Hier kommen Mehrfachantennensysteme (*Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO*) zum Einsatz, welche die Anzahl der Sende- und Empfangspfade deutlich erhöhen und damit auch die spektrale Effizienz⁶ verbessern. Wann und in welchem Umfang der Ausbau von zusätzlichen Millimeterwellenzellen ($> 26 \text{ GHz}$) erfolgt, ist weitgehend ungewiss, allerdings sollte mit entsprechenden Entwicklungen ab 2025 gerechnet werden. Es ist angesichts der oben genannten Entwicklungen davon auszugehen, dass sich das nutzbare Frequenzspektrum und der physische Bestand an Antennen in den kommenden Jahren weiter erhöhen wird. Dies wird einen steigenden Energie- und Rohstoffbedarf nach sich ziehen, sofern damit nicht an anderer Stelle energetische und materielle Einsparungen erzielt werden.

Technologiegeneration: Neben konventioneller Zentimeterwellentechnik (sub-6-GHz) wird mit 5G auch neue Millimeterwellentechnik (26 – 28 GHz) entwickelt. Diese wird in nächster Zeit zur Unterstützung der Kapazität von Makrozellen (das sind die großen Antennenstandorte) zum Einsatz kommen. Obwohl derzeit noch keine kommerziellen Millimeterwellensysteme zum Einsatz kommen, deuten Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung daraufhin, dass diese Funkzellen je nach Konfiguration der Antennenmodule hoch performant sind. Sie verfügen über deutlich höhere Kanalbandbreiten mit mehreren hundert MHz (im Vergleich dazu liefert 4G heutzutage typischerweise nur 10 oder 20 MHz). In Kombination mit neuen Modulations- und Kodierungsverfahren werden mit 5G vergleichsweise hohe Datenraten pro Kanal und damit gegenüber 4G (LTE) eine deutlich erhöhte spektrale Effizienz erzielt, was die relative Energieeffizienz um einen Faktor 10 bis 100 steigern kann. Einen nicht unerheblichen Effekt hat der Umstand, dass die physischen Abmessungen der Antennen bei höheren Frequenzen abnehmen. Die Millimeterwelle erlaubt den Aufbau relativ kompakter, aktiver Antennensysteme, die über sehr viele Transceiver und Antennenelemente verfügen. Diese

5 Vor dem Hintergrund der Auflagen der Bundesnetzagentur (BNetzA) zur Frequenzvergabe.

6 Die spektrale Effizienz einer definierten Funkzelle beschreibt das Verhältnis zwischen der Datenübertragungsrate als Wert in Bit pro Sekunde (bps) und der Bandbreite des Signals in Hertz. Die maximal mögliche spektrale Effizienz, bei welcher prinzipiell eine fehlerfreie Übertragung möglich ist, wird nach dem Shannon-Hartley-Theorem durch das Signal-Rausch-Verhältnis (Signal Noise Ratio, SNR) begrenzt.

Mehrfachantennensysteme (*Massive MIMO*) kompensieren die vergleichsweise geringe Reichweite der Millimeterwelle und gestatten den Bau steuer- und formbarer Antennenstrahlen (*Beamsteering / Beamforming*). Weitgehend unklar ist zum aktuellen Zeitpunkt (2021) der Umfang des Netzausbau mit millimeterwellenbasierten Mikrozellen. Ein weiterer technologischer Aspekt betrifft die Entwicklung der Leistungsverstärker. Wie in Fachkreisen allgemein bekannt ist und die vorliegende Studie auch noch einmal verdeutlicht, verursachen die Leistungsverstärker in den Transceivern der Funkstationen den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf im Mobilfunk. Mit höheren Frequenzen nimmt der Wirkungsgrad der Verstärker ab und die Verlustleistung steigt. Mit neuen Halbleitertechnologien basierend auf Materialien wie Gallium, Germanium, Indium und anderen, meist versorgungs-umweltkritischen Rohstoffen versucht die Industrie diesen energetisch negativen Effekt zu kompensieren. Trotzdem werden die Auslegung und der Betrieb der Leistungsverstärker, insbesondere für die Millimeterwellentechnik, zu einem entscheidenden Faktor für den Energiebedarf. Die Themen Technologie und Hardware werden im Kapitel 0 und Kapitel 3.1 ausführlich dargestellt.

Betrieb: Die Art und Weise, wie die Netzkomponenten genutzt, ausgelastet, gesteuert oder an- und abgeschaltet werden, kann einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf im Betrieb eines Mobilfunknetzes haben. Mit 5G kommen schrittweise auch neue Netzarchitekturen, intelligenter Systemtechnik und eine konsequente Software-basierte Netzsteuerung zur Anwendung. *Software-Defined Network* (SDN) und Virtualisierung sind Hauptmerkmale der neuen Technologie. In diesem Zusammenhang stehen auch die neuen Cloud-basierten Architekturen für Funkzugangsnetze (*Centralized Radio Access Network, C-RAN*) mit programmierbaren Netzelementen (*Open Radio Access Network, O-RAN*). Diese sollen einen flexibleren Umgang mit den vorhanden Funk- und Rechenressourcen ermöglichen. Das Thema Energieeffizienz findet gerade bei diesen zwei zuletzt genannten 5G-Entwicklungen häufig Erwähnung. Ein Blick in die Strategiepapiere der Netzbetreiber und Geräteausrüster zeigt (vgl. Kap. 4.1.1), welchen hohen Stellenwert das Thema Energieeffizienz beim Ausbau von 5G hat. Auch die Forschung adressiert dieses Thema zunehmend. Neben einer bedarfsgerechten Planung der Netze wird dem Thema Netzsteuerung und insbesondere der Aufgabe einer lastabhängigen Zu- und Abschaltung von Funkressourcen eine hohe Aufmerksamkeit in der Forschung geschenkt. Konsequentes Energiemanagement, wie es bei Endnutzergeräten zum Einsatz kommt, ist auch bei der Mobilfunknetzinfrastruktur ein großer Hebel für die Reduktion des Energiebedarfs.

Energiequelle: Der Energie- und Ressourcenbedarf der Mobilfunknetze wird auch von der Art und Auslegung der Netzteile, der Gleichstromwandlung und der Batteriepuffer für die unterbrechungsfreie Stromversorgung beeinflusst. Überdimensionierung und geringe Wirkungsgrade der Wandler führen zu unnötigem Energieverlust. Die Auslegung der Stromversorgung ist auch für ein effektives Energiemanagement wichtig, wie im Weiteren noch ausführlich erläutert wird.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Nutzung erneuerbarer Energien. Elektrischer Strom aus erneuerbaren Energien hat eine deutlich geringere CO₂-Bilanz als Strom aus fossilen Brennstoffen. Dieser Umstand macht den Einsatz erneuerbarer Energien im Kontext des Klimaschutzes wichtig. Allerdings ist die Nutzung von erneuerbaren Energien heute nicht vollständig CO₂-neutral. Es kommt daher immer darauf an, so viel Energie wie möglich einzusparen und sorgsam mit natürlichen Ressourcen umzugehen. Die Problematik der Nutzung von erneuerbaren Energien in der Ökobilanzierung wird in Kapitel 1.3.6 näher diskutiert.

Wie diese knappe Darstellung der 5 Themenbereiche und deren Problematiken andeutet, ist die Berechnung der Umweltwirkung bzw. CO₂-Bilanz heutiger und künftiger Mobilfunknetze eine

komplexe Aufgabe. Die hierfür notwendigen Berechnungsmodelle müssen eine hohe technische Komplexität abbilden und dabei mit einer vergleichsweise begrenzten Datenlage auskommen. Der Modellierungsansatz muss also die Komplexität sinnvoll reduzieren. Fehlende Daten müssen mittels theoretischer Grundlagen sowie Expertenwissen und begründeten Annahmen kompensiert werden.

1.1.4 UTAMO-Projekt und Berichtsstruktur

Im Jahr 2019 beauftragte das Umweltbundesamt das Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) mit der Durchführung des Vorhabens „Technikfolgenabschätzung der Veränderungsprozesse für den Bereich der Netzinfrastrukturen des Mobilfunkes inklusive der Endgeräte und der sich daraus ergebenden Umweltbelastungen“ (FKZ: 3718 36 324 0).

Das Vorhaben wurde vom IZM unter dem Projektakronym UTAMO (Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung von Mobilfunknetzen) von Januar 2019 bis September 2021 bearbeitet. Die übergeordnete Zielstellung des Vorhabens besteht in der Verbesserung der aktuellen Datenlage zum Energie- und Rohstoffbedarf bzw. der CO2-Bilanz von Mobilfunknetzen in Deutschland. Damit soll die Arbeitsgrundlage für eine weitere Beschäftigung mit dem Thema geschaffen werden. Der hier vorliegende Ergebnisbericht des UTAMO-Projektes beschreibt das methodische Vorgehen, die Datenbasis und die Berechnung von Energie- und Rohstoffbedarf bzw. der CO2-Bilanz. Er enthält eine Analyse der Berechnungsmethode und eine Auswertung der Ergebnisse für die Kommunikation gegenüber Industrie, Politik und Gesellschaft. Der Bericht ist in vier Kapitel gegliedert.

Das erste Kapitel vermittelt die Hintergründe und Zielstellungen des Projektes. Unterkapitel 1.2 beschreibt kurz die umweltrelevanten Aspekte von Mobilfunknetzen. In Unterkapitel 1.3 wird das prinzipielle methodische Vorgehen bei der überschlägigen Umweltbewertung skizziert. Der Umweltbewertung liegt ein komplexes, mehrteiliges Sachbilanzmodell zugrunde, welches in Kapitel 2 dann noch detailliert dargestellt wird. Das erste Kapitel schließt mit der Auswertung relevanter Vorarbeiten bezüglich des Themas Energiemodelle für Mobilfunknetze (1.4.1) und einem Überblick über weitere themenspezifische Literaturquellen (1.4.2). In Abschnitt 1.4.3 wird auch das Vorgehen bei der Datenbeschaffung sowie die Zusammenarbeit der Autoren mit Fachleuten aus Behörden, Industrie und Forschung während des Projektes dargelegt.

Das zweite Kapitel liefert einen vertieften Einblick in das methodische Vorgehen und beschreibt den Aufbau und die Datengrundlage des komplexen Sachbilanzmodells. Im Unterkapitel 2.1 werden die Struktur und wichtige Parameter der Mobilfunknetze in Deutschland erläutert. Diese Angaben bilden die Datenbasis für das sogenannte Funkzellenverteilungsmodell, dem ersten Teilmodell der Sachbilanz, welches den Bestand, die räumliche Verteilung und die Konfiguration der Antennen- bzw. Mobilfunkstandorte quantifiziert. Die Datenbasis des Funkzellenverteilungsmodells für das Referenzjahr 2019 bildet den Abschluss dieses ersten Abschnitts.

Das Unterkapitel 2.2 beschreibt die Architektur und Technikelemente des Funkzugangsnetzes. Darin werden zudem die Berechnung des elektrischen Energiebedarfs der Antennenstandorte in der Nutzungsphase als Funktion der technischen Konfiguration und des betrieblichen Lastprofils erläutert. Am Schluss des Unterkapitels werden die Berechnungsergebnisse für den Energiebedarf der Funkzugangsnetze für das Referenzjahr 2019 dargestellt. In gleicher Weise werden im dritten Unterkapitel 2.3 das Transportkernnetz beschrieben und die wesentlichen Datensätze erläutert. Auch dieses Unterkapitel schließt mit der Darstellung des elektrischen Energiebedarfs des Transportkernnetzes für das Referenzjahr 2019. Das Unterkapitel 2.4 erläutert die methodischen Besonderheiten der überschlägigen Umweltbewertung der Herstellungsphase der technischen Anlagen, wesentlichen Komponenten und beispielhafter

Endgeräte (Smartphones sowie Sensoren mit Funkmodul). Im Fokus steht ein Mengen- bzw. Sachbilanzmodell der eingesetzten Rohstoffe. Das Unterkapitel erläutert die Methode und Datengrundlage. Im Anschluss werden die Berechnungsergebnisse für das Referenzjahr 2019 dargestellt.

Das dritte Kapitel präsentiert die Umweltbewertungen für ausgewählte Entwicklungsszenarien. Der Prognosehorizont ist mit dem Jahr 2030 zeitlich recht weit in der Zukunft. Die noch immer dynamische Entwicklung von Markt und Technik erfordert daher viele begründete Annahmen. Grundlegende Entwicklungstrends und das Vorgehen bei der Bildung der Szenarien werden im ersten Unterkapitel 3.1 beschrieben. Im Unterkapitel 3.2 folgt die Darstellung und Erläuterung der Szenarien für cm-Wellen-basierte Makrozellen. In diesem Zusammenhang werden ein Basisszenario und weitere alternative Szenarien dargestellt. Diese vier Alternativszenarien beinhalten eine beschleunigte Technikmodernisierung, ein bundesweites Roaming, ein technisch anspruchsvolles, konsequentes Energiemanagement sowie die Kombination aller Alternativszenarien. Das Unterkapitel 3.3 beschreibt Entwicklungsszenarien für den Ausbau von mm-Wellen-basierten Mikrozellen in Außen- und Innenräumen. Diese Szenarien basieren diese auf theoretischen Grundlagen und Expertenwissen, da sich reale Produktsysteme noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase befinden. Sie können daher lediglich Größenordnungen sowohl bezüglich der Performanz als auch der Umweltwirkung vermitteln.

In Unterkapitel 3.4 werden die Ergebnisse der Umweltbewertung zusammengefasst, analysiert, interpretiert und diskutiert. Die Auswertung fokussiert zwar auf die Beurteilung der absoluten Umweltwirkung, die relative Energieeffizienz der modellierten Netze wird aber auch beleuchtet.

Das vierte und abschließende Kapitel vermittelt Handlungsoptionen und richtet sich primär an Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft. In Unterkapitel 4.1 werden Empfehlungen zum Messen und Bewerten des funktionalen Nutzens in Gegenüberstellung der umweltseitigen Belastung ausgeführt. So wird auf die Notwendigkeit der kontinuierlichen und detailierten Messung der elektrischen Leistungsaufnahme und weiterer Leistungs- bzw. Bezugsdaten verwiesen. Zweitens werden Metriken bzw. Leistungsindikatoren (*Key Performance Indicator, KPI*) im Kontext der Bewertung der Energieeffizienz von Mobilfunknetzen diskutiert. Schließlich wird die Notwendigkeit der fortlaufenden Bereitstellung von umweltrelevanten Produkt- und Komponentendaten argumentiert. Auch Ökobilanzdaten zu Fertigungsprozessen werden für verbesserte Umweltbewertungen dringend benötigt. Das Unterkapitel 4.2 beinhaltet konkrete Empfehlungen an Netzbetreiber und Netzausrüster hinsichtlich einer ökodesignorientierten Netzplanung und Geräteausstattung sowie einen nachhaltigen Betrieb von Mobilfunknetzen. Es umfasst Maßnahmen zur angemessenen Konfiguration von Standorten, zur Verbesserung der Stromversorgung und zum Energiemanagement. Das letzte Unterkapitel 4.3 fasst wichtige Erkenntnisse des UTAMO-Projektes kurz zusammen und gibt Empfehlungen an die Politik zur Gestaltung von Randbedingungen für eine energie- und ressourcenschonende Weiterentwicklung der Mobilfunknetze in Deutschland. In diesem Zusammenhang stehen Themen wie die Verbesserung der Datenbasis zum Energiebedarf der Mobilfunknetze, die technologische Souveränität bei der Gestaltung der Netze, die Frequenzvergabe und der Netzausbau, sowie der verbleibende Forschungsbedarf.

1.2 Zielstellung

1.2.1 Aufgabenstellung

Die primäre Aufgabenstellung des UTAMO-Projektes bestand in der Entwicklung eines Berechnungsmodells zur überschlägigen Umweltbewertung von Mobilfunknetzen. Dieses Modell bildet die Architektur der Mobilfunknetze, den Bestand und die technische Konfiguration der Anlagentechnik sowie die Lastprofile und den Betrieb der Mobilfunknetze ab. Es ist parametrisierbar und kann damit auch technische und operative Entwicklungen auf der Basis von Annahmen berechnen. Damit bildet dieses Sachbilanzmodell den Grundbaustein für die zweite Aufgabe, welche die überschlägige, lebenszyklusbasierte Umweltbewertung der Mobilfunknetze in Deutschland zum Ziel hat.

Ziel der Umweltbewertung ist es, den jährlichen Energiebedarf und die resultierenden Treibhausgasemissionen einschließlich der anteiligen Umweltwirkung der Herstellung der Anlagentechnik zu bilanzieren. Durch die Berechnung unterschiedlicher Entwicklungsszenarien können die umweltseitigen Auswirkungen der Modernisierung und der erwarteten Netzverdichtung mit dem zunehmenden Ausbau von 5G prognostiziert und analysiert werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die überschlägige Umweltbewertung der neuen 5G-Technik einschließlich der noch in der Entwicklung befindlichen, hoch performanten Millimeterwellentechnik. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Datenbasis werden Industriekräfte in Konsultationen eingebunden. Eine Delphi-Befragung wesentlicher Akteure der Industrie zu Aspekten des Netzausbau ist ein Arbeitspaket des Projektes. Die letzte Aufgabe besteht in der Analyse der Daten und Berechnungsergebnisse, mit dem Ziel, Verbesserungspotentiale und Maßnahmen zu identifizieren. Die auf eine energie- und ressourcenoptimierte Technik und Nutzung der Mobilfunknetze ausgerichteten Handlungsempfehlungen (Ökodesign-Strategien) sollen sich im gesamten Spektrum der Akteure an die Industrie, Politik und Gesellschaft richten.

Das UTAMO-Projekt hat folgende konkrete Zielstellungen:

- ▶ Entwicklung eines Berechnungsmodells zur überschlägigen Umweltbewertung von Mobilfunknetzen, welche die Herstellungs- und Nutzungsphase der Netztechnik, unterschiedliche Technologien und Netzbereiche anteilig ausweist.
- ▶ Die überschlägige Umweltbewertung soll den elektrischen Energiebedarf des Netzbetriebes sowie die absolute CO₂-Bilanz der Mobilfunknetze einschließlich des Herstellungsanteils für jeweils ein definiertes Nutzungsjahr abbilden. Die Entsorgung oder das Recycling von Altgeräten wird nicht modelliert. Als Referenz dient das Jahr 2019.
- ▶ Durchführung einer Trendanalyse und Delphi-Befragung zur Ermittlung technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Trends im Bereich der Mobilfunknetze in Deutschland bis zum Jahr 2030. Ein Schwerpunkt wird auf die Entwicklung von 5G einschließlich der Millimeterwellentechnik gelegt.
- ▶ Ausarbeitung und Berechnung von Entwicklungsszenarien für den Ausbau und Betrieb der Mobilfunknetze bis 2030. Berücksichtigung von potenziellen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Bilanz.
- ▶ Analyse und Interpretation der Berechnungsergebnisse einschließlich der Identifizierung von ökologischen Hotspots, Trends und Maßnahmen zur Verbesserung.

- ▶ Ausarbeitung von Vorschlägen zur technischen und organisatorischen Optimierung im Sinne eines Ökodesigns. Identifizierung von Leistungskennzahlen, welche den Energiebedarf und die CO2-Bilanz der Mobilfunknetze informativ abbilden.
- ▶ Aufzeigen von Einflussmöglichkeiten durch Netzbetreiber, Geräteausrüster, Politik und Gesellschaft.

HINWEIS: An dieser Stelle soll explizit darauf hingewiesen werden, dass das UTAMO-Projekt lediglich die direkte Umweltwirkung der Mobilfunknetze einschließlich der Rohstoffvorkette quantifiziert. Erweiterte Umwelteinsparpotenziale, die mittels des Einsatzes der Mobilfunknetze erzielt werden (Green by ICT), sind nicht Gegenstand der Studie. Des Weiteren werden keine umwelt- oder gesundheitlichen Aspekte der elektromagnetischen Strahlung des Mobilfunkes untersucht. Es geht primär um die Quantifizierung des Energie- und Rohstoffbedarfs der Mobilfunknetztechnik sowie der damit verbundenen Treibhausgasemissionen.

Die Begriffe Umweltbewertung bzw. -wirkung beziehen sich im Rahmen dieser Studie ausschließlich auf den Treibhauseffekt (Beitrag zum Klimawandel), welcher durch die CO2-Bilanz quantifiziert wird. Andere Umweltwirkungskategorien werden nicht berücksichtigt. Diese sollten anknüpfend an diese Studie in künftigen Forschungsarbeiten eingehend untersucht werden, um die Umweltbelastungen ganzheitlicher zu bilanzieren (vgl. Kap 4.3). Die Grundlage für diese Berechnungen und die Analyse der aktuellen Entwicklung ist das im UTAMO-Projekt entwickelte Sachbilanzmodell.

1.2.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Erreichung der oben benannten Aufgaben und konkreten Zielstellungen orientiert sich grundsätzlich an der etablierten Methode der lebenszyklusbasierten Umweltbewertung nach (ISO 14040; ISO 14044) (Ökobilanz-Methode), ohne jedoch das vollständige Anforderungsspektrum des Standards zu erfüllen.

Im ersten Schritt werden die konkrete Zielstellung, der Bezugsrahmen und die funktionellen Einheiten der überschlägigen Umweltbewertung definiert. Im zweiten Schritt wird die Sachbilanz für das Referenzjahr und die einzelnen Entwicklungsszenarien erstellt. Die Sachbilanz basiert auf dem im UTAMO-Projekt entwickelten Berechnungsmodell für Mobilfunknetze. Der dritte Schritt ist die eigentliche Umweltbewertung, welche die jährliche Umweltwirkung der Mobilfunknetze auf Basis des elektrischen Energiebedarfs im Betrieb und den daraus resultierenden Treibhausgasemissionen einschließlich der Technikherstellung abschätzt. Im vierten Schritt erfolgen eine Analyse und Interpretation der Berechnungsergebnisse. In diesem Zusammenhang werden ökologische Schwerpunkte aufgezeigt und erläutert, sowie strategische Handlungsempfehlungen und weiterer Forschungsbedarf formuliert.

Im Kern des Vorhabens steht somit die Entwicklung und Parametrisierung eines technisch anspruchsvollen Sachbilanzmodells, welches die datenseitige Grundlage – das Mengengerüst – für die Umweltbewertung der Mobilfunknetze bildet. Zur Strukturierung des Sachbilanzmodells wurde vom Fraunhofer IZM mit der sogenannten 5K-Methode⁷ ein eigenes Vorgehen entwickelt. Die 5K-Methode zielt auf die umfängliche Parametrisierung der technischen, operativen und marktwirtschaftlichen Aspekte der Mobilfunknetze in Deutschland. Mittels der 5K-Methode wurden drei verknüpfte Teilmödelle für die Sachbilanz entwickelt. Der erste Teil ist das Funkzellenverteilungsmodell (2.1). Es beinhaltet Daten zum Technikbestand und skaliert das

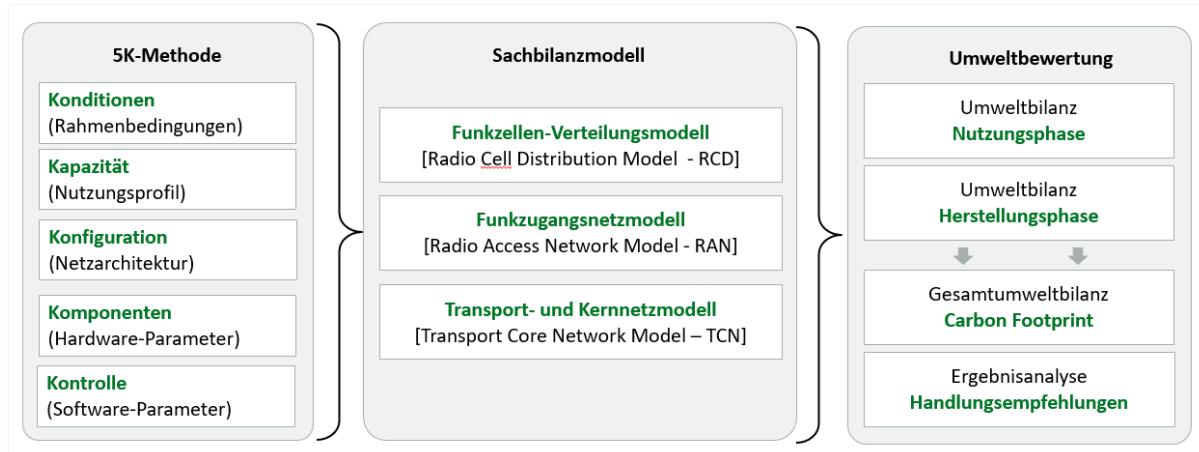
⁷ Die 5K-Methode beschreibt eine strukturierte und analytische Aufteilung des untersuchten Systems in die fünf Aspekte Konditionen, Konfiguration, Komponenten, Kapazität, Kontrolle. Diese Methode wird in 1.3.3 näher erläutert. Bisherige Studien, die auf diesem Ansatz basierten, sind noch nicht veröffentlicht.

Sachbilanzmodell der einzelnen Komponenten zur Berechnung der deutschlandweiten Umweltlasten der Mobilfunknetze. Das zweite Teilmodell bildet die technologiespezifischen und umweltrelevanten Parameter der Funkzugangsnetze (0) und das dritte Teilmodell die Transport- und Kernnetze ab (2.3).

Das initiale Sachbilanzmodell wird am Status des Referenzjahres 2019 ausgerichtet, da die Datenlage rückwirkend umfangreicher ist und das Berechnungsergebnis damit besser validiert werden kann. Grundsätzlich kann das Sachbilanzmodell aber frei parametrisiert werden, sodass basierend auf Annahmen mehrere Szenarien für die Entwicklung bis zum Jahr 2030 berechnet werden (3.1.1). Die Berechnungsergebnisse umfassen den kumulierten elektrischen Energiebedarf des operativen Betriebes (Nutzungsphase) der Mobilfunknetze für ein Jahr. Dieser Energiebedarf erzeugt je nach Art der Energieerzeugung mehr oder weniger klimaschädliche Treibhausgasemissionen, die in CO₂-Äquivalenten (kg CO₂e) ausgedrückt werden. Die Umrechnung von TWh in t CO₂e erfolgt auf Basis von Umrechnungsfaktoren (siehe 1.3.6). Die anteilige Umweltwirkung der Technikherstellung wird ebenfalls in CO₂e angegeben. Grundlage hierfür sind die Art, Abmessungen und Materialparameter der im Modell erfassten Komponenten. Die Emissionswerte für die komponentenbezogenen Rohstoffe, Materialien und Fertigungsprozesse entstammen Ökobilanzdatenbanken und Literaturquellen (2.4).

Die nachstehende Abbildung 11 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise im Überblick. Die 5K-Methode liefert den Kontext für die Konzeption und Parametrisierung des Sachbilanzmodells. Durch die Verknüpfung der drei Teilmodelle wird die Umweltwirkung der Mobilfunknetze, d.h. die Umweltbilanz der Herstellungs- und Nutzungsphase berechnet. Die gesamte Umweltwirkung wird als CO₂-Bilanz (*Carbon Footprint*) ausgewiesen. Am Schluss steht eine kritische Ergebnisanalyse, welche die Umweltwirkung interpretiert.

Abbildung 11: Inhalte und methodisches Vorgehen im UTAMO-Projekt



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Das folgende Kapitel vertieft den Überblick zum Vorgehen bei der vereinfachten, überschlägigen Umweltbewertung der Mobilfunknetze.

1.3 Überschlägige Umweltbewertung

1.3.1 Gegenstand und Ziele der Umweltbewertung

Mit der überschlägigen Umweltbewertung sollen der jahresbezogene elektrische Energiebedarf der Nutzung sowie die resultierenden Treibhausgasemissionen von Herstellung und Nutzung der Mobilfunknetztechnik bilanziert werden. Damit orientiert sich die überschlägige Umweltbewertung an etablierten Ökobilanzmethoden. Sie fokussiert jedoch auf die hinreichend genaue Quantifizierung des Energiebedarfs und der klimaschutzrelevanten Umweltwirkungen der Mobilfunknetztechnik.⁸ An die Umweltbewertung wird weiterhin die Anforderung gestellt, nicht nur die relative Umweltwirkung einzelner Technikelemente, sondern die absolute Umweltwirkung aller im Einsatz befindlichen Technikelemente unter Berücksichtigung der Nutzungsintensität zu berechnen.

Die mengenmäßige Erfassung der Material- und Energieflüsse der Herstellung und Nutzung der Mobilfunkanlagen sowie resultierender Treibhausgasemissionen (CO2-Bilanz bzw. engl. *Carbon Footprint*) basiert daher auf einem komplexen Sachbilanzmodell. Das Sachbilanzmodell reflektiert grundlegende Netzarchitekturen und erfasst die wesentlichen Baugruppen der Mobilfunkanlagen einschließlich der wichtigsten mechanischen, elektrischen, elektronischen und optischen Komponenten. Dieser Bottom-up-Ansatz erlaubt sowohl die herstellungsbezogene als auch nutzungsbezogene Quantifizierung der Umweltwirkung der Netztechnik.⁹ Gleichwohl das Sachbilanzmodell immer noch eine sehr starke Vereinfachung der komplexen technischen Realität darstellt, wird in der Modellierung großer Wert auf die Berücksichtigung theoretischer Grundlagen wie der spektralen Effizienz, Dämpfungsverhalten, etc. sowie auf die aktuelle Technikentwicklung gelegt, um in der Berechnung hinreichend genau zu sein.

Existierende Umweltbewertungen von Mobilfunknetzen – beispielsweise von dem Umweltexperten der Firma Ericsson, Jens Malmodin – deuten an, dass die Nutzungsphase aufgrund der vergleichsweise hohen dauerhaften elektrischen Leistungsaufnahme der Mobilfunkanlagen dominiert und meist über 90% der gesamten lebenszyklusorientierten Umweltwirkung ausmacht (Malmodin 2020). Vor diesem Hintergrund wird der Detailierungsgrad der Sachbilanz¹⁰ bezüglich der Nutzungsphase überwiegen. Gleichzeitig verweist Jens Malmodin auf die Tatsache, dass für eine zufriedenstellende Bewertung der Herstellungsphase nicht genügend Ökobilanzdaten zur Verfügung stehen. Die Herstellung der Mobilfunknetztechnik wird in dieser Studie dennoch überschlägig bilanziert und anteilig dem Jahresszenario zugeschlagen. Das bedeutet, dass die Umweltwirkung der Geräteherstellung auf die Einsatzdauer im Netzbetrieb umgelegt und der jährliche Anteil betrachtet wird. Ist eine Mobilfunkanlage beispielweise sieben Jahre im Einsatz so wird dem Bezugsjahr ein Siebtel der Herstellungsumweltlast zugerechnet. Die Umweltwirkung der Herstellungsphase beinhaltet Treibhausgasemissionen, die im Zusammenhang mit der Rohstoffgewinnung und den Fertigungsprozessen stehen. Dabei wird der Strommix des Fertigungsstandortes so weit wie möglich durch die Auswahl von länderspezifischen Ökobilanzdatensätzen aus entsprechenden Datenbanken wie GaBi berücksichtigt.

Die Grundlage für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Nutzungsphase bildet der

⁸ Andere Wirkungskategorien werden zunächst nicht betrachtet, könnten aber durchaus mit dem Sachbilanzmodell und entsprechenden Datensätzen berechnet werden.

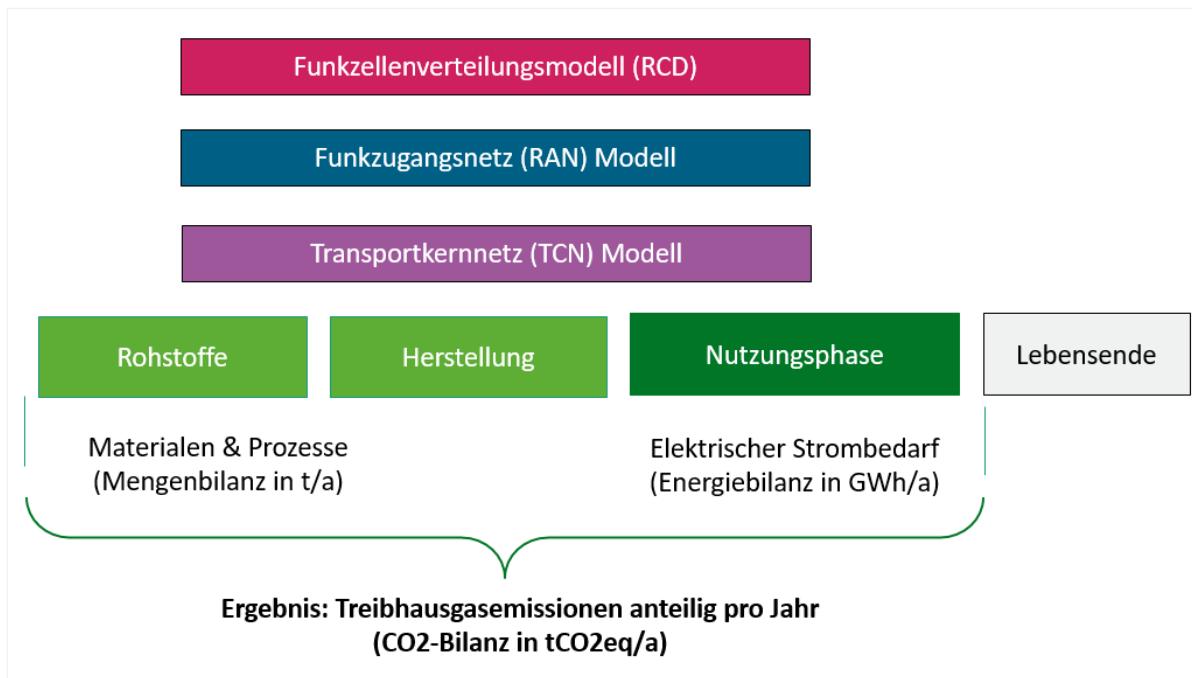
⁹ Weitere Lebenszyklusphasen wie der Transport, die Installation, die Entsorgung oder auch das Recycling der Netzanlagentechnik und Systeminfrastruktur werden aufgrund begrenzter Daten und der Abschätzung, dass diese Phasen einen eher kleinen Anteil zu der Umweltwirkung beitragen, im Sachbilanzmodell nicht abgebildet.

¹⁰ Der Begriff Sachbilanz umfasst auch die Energieflüsse, nicht nur die Materialien.

absolute elektrische Energiebedarf der Mobilfunknetze. Die an die elektrische Energiezeugung gekoppelten Treibhausgasemissionen werden durch einen Umrechnungsfaktor ermittelt. Dabei ist zu bedenken, dass die unterschiedlichen Verfahren zur elektrischen Energieerzeugung einschließlich erneuerbarer Energiequellen zu stark variierenden Treibhausgasemissionen führen (Memmler et al. 2019). Vor diesem Hintergrund werden die Treibhausgasemissionen der Nutzungsphase mit Umrechnungsfaktoren des allgemeinen deutschen Strommixes berechnet.

Die nachstehende Abbildung 12 zeigt die prinzipiellen Inhalte der überschlägigen Umweltbewertung in einer Übersichtsdarstellung.

Abbildung 12: Übersichtsdarstellung der überschlägigen Umweltbewertung



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

1.3.2 Bezugsrahmen des Sachbilanzmodells

Im vorangegangenen Abschnitt wurden bereits der generelle Bezugsrahmen, die Zielstellung und das Vorgehen skizziert. Konkret haben die einzelnen Sachbilanzmodelle und damit die Umweltbewertungen der Szenarien den folgenden Bezugsrahmen:

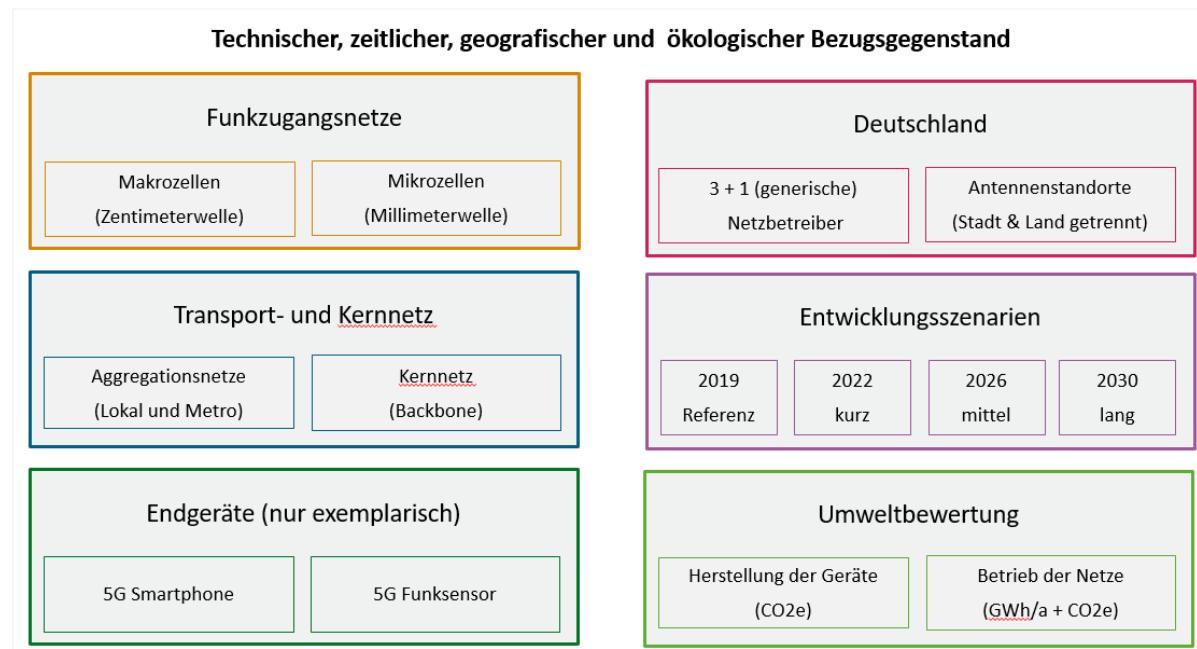
- Der technische Bezugsrahmen der Umweltbewertung umfasst die Funkzugangsnetze sowie die Transport- und Kernnetze aller in Deutschland aktiven Netzbetreiber.¹¹ Zusätzlich werden exemplarisch auch die Herstellung von Endgeräten wie 5G-fähigen Smartphones und Funksensoren modelliert.

¹¹ Im Jahr 2021 werden in Deutschland Mobilfunknetze von den Unternehmen Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica betrieben. Mit der erfolgreichen Teilnahme an der 5G-Frequenzauktion wird in Zukunft mit Drillisch 1&1 AG ein weiterer Betreiber in den deutsch Mobilfunkmarkt eintreten. Informationen zum Frequenzspektrum und statistische Daten zur Mobilfunkbranche in Deutschland werden von der Bundesnetzagentur bereitgestellt: <https://www.bundesnetzagentur.de>.

- Der geografische Bezug für die Zellverteilung und Zellkonfiguration ist Deutschland. Es werden alle für den Mobilfunk in Deutschland genutzten und geplanten Funkfrequenzen einschließlich Annahmen zum künftigen Millimeterwellenspektrum berücksichtigt.¹²
- Der zeitliche Bezug beinhaltet das Referenzjahr 2019 sowie Szenarien zum Netzausbau in den Jahren 2022, 2026 und 2030. Für diesen Zeitraum wird die Entwicklung der Mobilfunktechnologie berücksichtigt.
- Die Umweltbewertung beinhaltet die Herstellungs- und Nutzungsphase. Andere Phasen wie Transport, Installation, Entsorgung oder Recycling werden nicht erfasst.
- Die primär verwendete Umweltwirkungskategorie adressiert den Treibhauseffekt. Der elektrische Energiebedarf der Nutzungsphase wird in Terawattstunden pro Jahr (TWh/a) bilanziert und die daran gekoppelten Treibhausgasemissionen in Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten pro Jahr (t CO₂e/a) umgerechnet. Die anteilige Herstellungsphase wird ebenfalls in t CO₂e/a angegeben.

Die nachstehende Abbildung 13 zeigt die wesentlichen Bezugsdaten nochmals in einer Übersichtsdarstellung.

Abbildung 13: Bezugsgegenstand und Ebenen des Sachbilanzmodells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Als allgemeine funktionelle Einheit der Umweltbewertung dient die Mobilfunkversorgung aller Mobilfunknutzer in der gesamten Fläche Deutschlands für ein Jahr. Der Begriff „Mobilfunkversorgung“ ist an dieser Stelle jedoch sehr dehnbar formuliert und stellt zunächst keine Anforderungen an die Qualität, Zuverlässigkeit oder das zu übertragende Datenvolumen (Dienstgüte). Für das Referenzjahr 2019 wird die Bezugsgröße des Datenvolumens aus der bereits vorhandenen Netzkonfiguration abgeleitet. Für die Entwicklungsszenarien bis 2030 werden Vorgaben an ein zu erreichendes Datenvolumen gesetzt, welches auf Prognosen zum Zuwachs des mobilen Datenverkehrs basieren.

¹² Die Frequenzauktion für das Millimeterwellenspektrum ist zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichtes noch nicht erfolgt.

Dennoch stellt die Bestimmung einer aussagekräftigeren funktionellen Einheit, welche den Energie- und Ressourcenbedarf ins Verhältnis zum funktionalen Nutzen bzw. der Dienstgüte der Mobilfunknetze setzt, eine Herausforderung dar, da die Kombination sehr vieler Parameter die Performanz einer Funkzelle bzw. des gesamten Mobilfunknetzes beeinflusst. Im vorliegenden Bericht wird an mehreren Stellen das theoretische bzw. auch kundenbezogene, jährliche Datenvolumen zum Energiebedarf (Wh/GB) als Orientierungsgröße angegeben. Eine vertiefende Diskussion der Problematik erfolgt im Kapitel 4.1.3.

1.3.3 Sachbilanzmodell auf Basis der 5K-Methode

Da die Zielstellung im Vorhaben nicht nur die Berechnung einer Ist-Situation beinhaltet, sondern auch Prognosen in Form von unterschiedlichen Entwicklungsszenarien, müssen die Sachbilanzmodelle die zeitliche Entwicklung bestandsseitig, technisch-technologisch und auch nutzungsbezogen bestmöglich abbilden. Die folgenden zeitbezogenen Aspekte sind bei der Entwicklung der einzelnen Sachbilanzmodelle (Szenarien) zu berücksichtigen:

- ▶ die Entwicklung der systemtechnischen Architektur der Mobilfunknetze in Deutschland einschließlich des Ausbaus von Mobilfunkstandorten und Antennenbestand
- ▶ die gerätetechnische Implementierung der Mobilfunknetze unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklung, Eigenschaften und Einsatzdauer der Komponenten und Systeminfrastruktur
- ▶ die Entwicklung der nutzungsbezogenen Nachfrage bezüglich mobiler Datenrate bzw. Datenvolumen
- ▶ die Entwicklung des operativen Betriebes bzw. der Steuerung der Mobilfunknetze einschließlich direkter Maßnahmen für ein aktives Energiemanagement
- ▶ Die Entwicklung des Strommixes und der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien

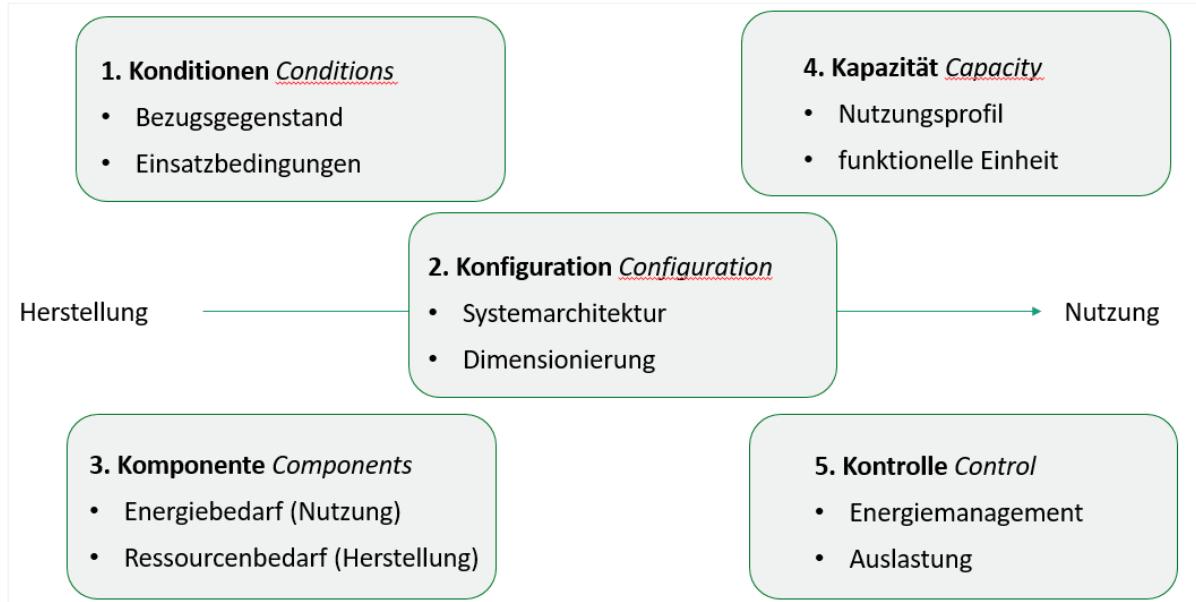
Wie bereits ausgeführt wurde, weist das Sachbilanzmodell eine hohe Komplexität auf, da nicht nur die relative Umweltwirkung eines einzelnen Techniksystems, sondern die für einen geografisch und zeitlich definierten Bezugsraum absolute Umweltwirkung ermittelt werden soll. Daraus ergeben sich für die Modellierung folgende methodische Herausforderungen:

Es müssen alle relevanten Einflussparameter einschließlich des Gerätebestandes, der Gerätetechnik und Gerätenutzung datenbasiert erfasst werden. Die Erreichung der notwendigen Granularität des Modells ist anspruchsvoll, da sowohl der elektrische Energiebedarf des operativen Betriebs als auch der herstellungsbezogenen Carbon Footprint der Netzkomponenten orientierungssicher quantifiziert werden soll. Des Weiteren sollen unterschiedliche Technologiegenerationen und der Einfluss der verschiedenen Frequenzspektren im Modell abgebildet werden. Die Granularität wird darüber hinaus durch den Anspruch erhöht, die reale Situation in Deutschland und damit die bestandsbezogene Verortung der Antennenstandorte in Stadt und Land abzubilden. Aufgrund der unterschiedlichen topologischen Eigenschaften und Versorgungsanforderungen in ländlichen und städtischen Gebieten sind die Sendeleistungen und Transceiver-Konfigurationen der Antennenstandorte den jeweiligen spezifischen Bedingungen angepasst. Schließlich haben auch die Auslastung und die daran gebundene operative Steuerung der Mobilfunknetze einen Einfluss auf den Energiebedarf und sollten im Sachbilanzmodell entsprechend Berücksichtigung finden.

Zur strukturierten Entwicklung der einzelnen Sachbilanzmodelle wurde zu Beginn des UTAMO-Projektes die sogenannte 5K-Methode entwickelt. Die 5K-Methode beinhaltet eine prinzipielle

Struktur, welche die komplexen, technischen und anwendungsspezifischen Wechselwirkungen eines Sachbilanzmodells für Mobilfunknetze so vollständig wie möglich abbildet. Die fünf Grundbausteine (5Ks) dieses methodischen Ansatzes sind in der nachstehenden Abbildung 14 im schematischen Überblick dargestellt.

Abbildung 14: 5K-Methode als strukturelle Grundlage des Sachbilanzmodells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die 5K-Methode strukturiert die Sachbilanz auf Basis der folgenden fünf Begriffe:

- ▶ Konditionen
- ▶ Konfiguration
- ▶ Komponenten
- ▶ Kapazität
- ▶ Kontrolle

Diese Begriffe beinhalten folgende prinzipielle Aspekte, die an dieser Stelle nur als Überblick aufgelistet und in Kapitel 2 ausführlich beschrieben werden.

Konditionen

Unter diesem Begriff werden prinzipiell der technische, geografische, ökonomische und zeitliche Bezugsgegenstand analysiert und wesentliche Parameter für die Erstellung des Bestandsmodells identifiziert. Informationen und Daten umfassen in diesem Zusammenhang beispielsweise die im Sachbilanzmodell berücksichtigte geografische Fläche, die flächenbezogene Verteilung von Stadt und Land, die Anzahl und Art der Antennenstandorte (Bestand), sowie Marktdaten zu Kundenzahlen, Datenraten und Funkfrequenzspektrum der Netzbetreiber. Aufgrund des zeitlichen Bezugs (Prognose) sind die Veränderungen dieser Daten zu berücksichtigen. Damit bildet der Strukturbaustein „Konditionen“ einen wesentlichen Teil der Datenbasis des für die Berechnung der absoluten Umweltwirkung notwendigen Bestandsmodells. Die entsprechenden

Informationen werden aus öffentlichen Quellen der Netzbetreiber, Bundesstatistiken und insbesondere der Bundesnetzagentur bezogen.

Konfiguration

Dieser Strukturbaustein baut auf der Datenbasis der Konditionen auf und modelliert den technischen Aufbau der Funkzugangsnetze sowie der Transport- und Kernnetze. Die kontinuierliche Technologieentwicklung ist hierbei zu berücksichtigen. Die Konfiguration bestimmt, wie viele und welche gerätetechnischen Komponenten in das Modell eingehen, wie diese verknüpft sind und ggf. das Modell skalieren. Im unmittelbaren Vorgehen werden die funktionalen Komponenten entlang des Kommunikationskanals einerseits und die umweltseitigen Parameter entlang des Energieflusses andererseits modelliert. Die entsprechenden Informationen stammen zumeist aus technischen Dokumenten im Kontext der Standardisierung und Produktentwicklung.

Komponenten

Dieser Strukturbaustein umfasst die umweltrelevanten Aspekte der Gerätetechnik bzw. deren Hauptkomponenten. Der Begriff Komponente wird in diesem Zusammenhang flexibel ausgelegt und kann ein ganzes Gerät oder nur eine Baugruppe bezeichnen. Die Daten umfassen zunächst die elektrische Leistungsaufnahme in den unterschiedlichen Betriebszuständen, die Verlustleistungen der Verstärker und Wandler in der Stromversorgung sowie die zusätzlichen Energieaufwände für eine aktive Kühlung bzw. Klimatisierung auf Geräte- und Raumebene. Der Begriff Komponenten hat auch für die Modellierung der herstellungsbezogenen Umweltwirkungen eine große Bedeutung. Für ein vereinfachtes Modell werden beispielsweise Art, Größe und Materialzusammensetzung der verbauten Halbleiter, Leiterplatten, Kühlkörper, Stecker, Kabel und Gehäuse hiermit erfasst. Auch Werte zur durchschnittlichen Einsatzdauer der Komponenten und Produkte werden benötigt. Die entsprechenden Daten stammen aus überschlägigen Berechnungen, Demontagebildern und konkreten Produktdatenblättern.

Kapazität

Dieser Strukturbaustein liefert nutzungsbezogene Leistungsdaten, primär in Abhängigkeit der Technologiegeneration, manchmal aber auch in Abhängigkeit der Auslastung oder anderer Nutzungsfaktoren. Mit der Kapazität werden also die Leistungsmerkmale wie die kanal- und modulationsdefinierte Datenraten, die Teilnehmerzahl und das jährliche durchschnittliche Datenvolumen pro Teilnehmer erfasst. Mit dem Begriff Kapazität wird des Weiteren auch das Nutzungsmuster und die Systemauslastung beschrieben, da im Ergebnis ein jährlicher Stromverbrauch berechnet werden soll. Die Informationen und Daten resultieren aus öffentlichen Statistiken, Unternehmensberichten sowie Dokumenten aus dem Kontext der Standardisierung.

Kontrolle

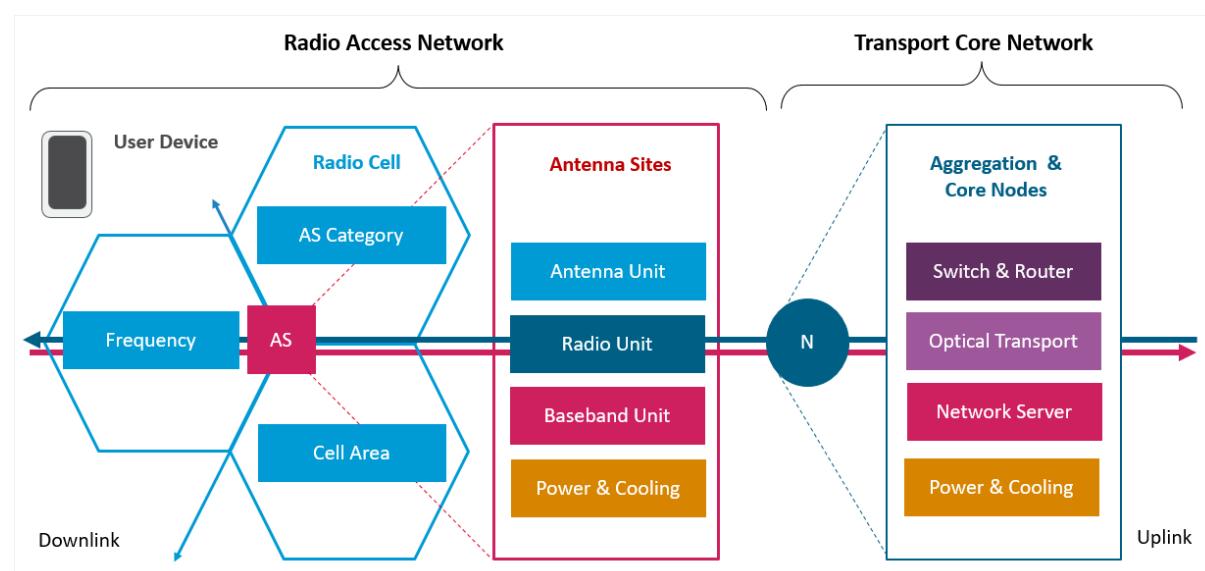
Der letzte Strukturbaustein bildet die Nutzungsphase und damit die Faktoren ab, die den Energiebedarf im operativen Betrieb beeinflussen. Hierzu gehören alle Information zu einzelnen Betriebszuständen und den technischen Optionen für ein lastabhängiges Energiemanagement. Da die im Feld stehende Gerätetechnik nutzungsbedingt nicht immer vollständig ausgelastet wird, jedoch meist unter Vollast im Betrieb ist, wird zukünftig ein konsequentes Energiemanagement einschließlich der lastabhängigen Zu- und Abschaltung einzelner Technikelemente ein erhebliches Energieeinsparpotenzial aufweisen. Um diese zukünftige Entwicklung in der Modellierung abilden zu können, sind entsprechende technische Daten wie beispielsweise Reaktivierungszeiten zu erfassen.

Die 5K-Methode dient im UTAMO-Projekt primär der strukturierten Datenrecherche zur Erstellung der Sachbilanzmodelle und liegt deren Aufbau zugrunde. Die fünf Begriffe werden aber auch für die Ergebnisanalyse und der Ableitung von Ökodesign-Maßnahmen im Nachgang der Umweltbewertung verwendet.

1.3.4 Modellierung der Mobilfunknetze als Sachbilanz

Die Berechnung der Umweltwirkung der Mobilfunknetze basiert prinzipiell auf einem sogenannten Bottom-Up-Ansatz (vgl. Literaturanalyse in Kap. 1.4.1). Hierbei werden umweltrelevante Parameter des Mobilfunknetzes, wie beispielsweise die elektrische Leistungsaufnahme der Gerätetechnik, entlang des gesamten Funk- bzw. Kommunikationskanals von der Funkzelle bzw. Antennenstandorten des Funkzugangsnetzes bis zu den Netzknoten und Servern des Transportkernnetzes sowohl technologie- als auch leistungsspezifisch erfasst. Im Sachbilanzmodell werden für diesen Zweck relevante Daten der wesentlichen Gerätetechnik als „Komponenten“ modelliert. Die Abbildung 15 verdeutlicht diesen grundlegenden Ansatz und zeigt am Beispiel eines singulären Kommunikationskanals die Netzwerkebene und die funktionalen Netztechnikkomponenten.

Abbildung 15: Netzebenen und funktionale Aspekte eines Mobilfunknetzes



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Ausgehend von den vielen tausend Antennen- bzw. Mobilfunkstandorten (*Antenna Sites, AS*) des Funkzugangsnetzes (*Radio Access Network, RAN*) werden die funktionalen Hauptkomponenten technisch beschrieben und Parameter zur Quantifizierung des Energie- und Ressourcenbedarfs bestimmt. Hierzu zählen das Antennenmodul (*Antenna Unit, AU*) mit den Antennenelementen (*Antenna Elements, AE*), die in ihrer Geometrie durch die Trägerfrequenz und die gewünschte Abstrahlcharakteristik definiert werden. Dann folgt das Funkmodul (*Radio Unit, RU*) mit Leistungsverstärkern (*Power Amplifier, PA*) und Signalwandlern (*Analog Digital Converter, ADC*). Das Basisbandmodul (*Baseband Unit, BU*) mit der digitalen Prozessoreinheit für die Modulation und Kodierung des Signals sowie weiterer Funktionalitäten ist das letzte Hauptelement eines Antennenstandortes.

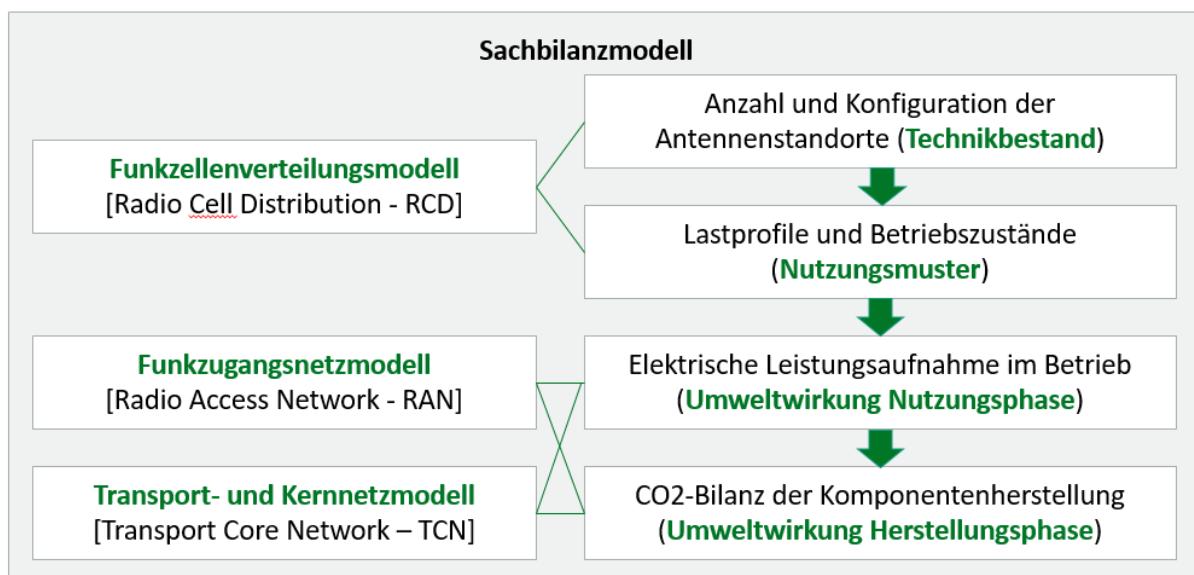
Das gleiche methodische Vorgehen erfolgt für die Gerätetechnik in den Aggregations- und Verteilungsknoten (*Nodes*) sowie den großen optischen Fernverkehrstrassen (*Backbone*) der Transportkernnetze (*Transport Core Network, TCN*). Es werden die Energie- und

Ressourcenbedarfe der funktionalen Hauptkomponenten der Vermittlungstechnik (*Switches, Router, Gateways*), der optischen Transporttechnik (*Optical Network Units, ONU* sowie *Line Terminals, Multiplexer*) und Netzsteuerungs- und Managementtechnik (*Core Network Server, Storage*) erfasst. Abbildung 15 zeigt die prinzipiellen Ebenen und wesentlichen funktionalen Technikelemente eines Mobilfunknetzes in einer schematischen Übersichtsdarstellung. Dabei wird der Kanal zum Endgerät der Mobilfunkteilnehmer als *Downlink (DL)* und der Kanal in das Transportnetz bzw. der Cloud als *Uplink (UL)* bezeichnet.

Zur Berechnung der absoluten Umweltwirkung werden mengenmäßige Angaben zum Gerätebestand und die typische Konfiguration der Standorte benötigt. Für diesen Zweck wurde im UTAMO-Projekt ein sogenanntes Funkzellenverteilungsmodell (*Radio Cell Distribution Model, RCD*) als eine Teilkomponente der Sachbilanzmodellierung entwickelt. Die Hauptfunktion des RDC-Modells ist die Abbildung der Anzahl, Kategorie und Transceiver-Konfiguration der Antennen- bzw. Mobilfunkstandorte (AS). Damit liefert das RDC-Modell wesentliche Daten zum Geräte- und Anlagenbestand, welche wiederum die Grundlage für die Berechnung des absoluten Energiebedarfs sind.

Die nachstehende Abbildung 16 zeigt die inhaltliche Verknüpfung drei Teilmodeleller Sachbilanz zur überschlägigen Umweltbewertung von Mobilfunknetzen.

Abbildung 16: Struktur und Elemente des Sachbilanzmodells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

1.3.5 Thematische Schwerpunkte der Umweltbewertung

Die überschlägige Umweltbewertung betrachtet die Herstellungs- und Nutzungsphase der Geräte und Anlagen. Sie soll klären, welche Funktionalität und Nutzungsparameter zu einem hohen Maße den Energie- und Ressourcenbedarf beeinflussen. Da die Funktionalität durch technologiespezifische Hardware und Software realisiert wird, richtet sich der Fokus auf die technischen Baugruppen und Komponenten, welche die Funktionalität realisieren. Wie gerade skizziert wurde, wird daher die Sachbilanz als verknüpftes Komponentenmodell aufgesetzt. Es ist die Hardwarekomponente, die gefertigt werden muss und die eine elektrische Leistungsaufnahme hat, um eine Funktion zu erfüllen. Der Begriff „Komponente“ wird im methodischen Ansatz des UTAMO-Sachbilanzmodells bewusst breit ausgelegt. Er umfasst beispielsweise eine komplette funktionale Baugruppe wie ein Netzteil, kann aber auch nur einen

Prozessorchip beinhalten. Die Mobilfunktechnik wie Antennen-, Funk- und Basisbandmodule, die Vermittlungstechnik wie Switche, Router und Gateways sowie die optische Transport- und Steuerungstechnik besteht dabei immer aus einer Kombination dieser Komponenten. Diese vollständigen Produkte werden ihrerseits allerdings auch wieder als Komponenten bezeichnet.

In der folgenden Auflistung werden wesentliche Umweltaspekte der im Sachbilanzmodell grundsätzlich erfassten Komponenten und funktionalen Baugruppen kurz erläutert. Diese einführende Darstellung dient als Kontext zum Verständnis der thematischen Schwerpunkte der Umweltbewertung. Sie soll zudem zeigen, wie bei einigen Komponenten die Umweltwirkung der Herstellungs- und Nutzungsphase in Wechselwirkung stehen. So kann beispielsweise der Einsatz eines seltenen Materials bei einem Verstärker-Chip eine hohe Energieeffizienz bewirken, sich aber erst umweltseitig amortisieren, wenn die Komponente lange genug im Einsatz war oder recycelt werden kann. Folgende Komponenten und funktionale Baugruppen bilden die Grundlage des Sachbilanzmodells:

- ▶ Integrierte Schaltkreise (*Integrated Circuit, IC*)
- ▶ Schnittstellen (*Port*)
- ▶ Leiterplatten (*Printed Circuit Board, PCB*)
- ▶ Kühlung (*Cooling*)
- ▶ Gehäuse (*Chassis*)

Integrierte Schaltkreise

Der Energiebedarf in der Nutzungsphase resultiert aus der elektrischen Leistungsaufnahme der aktiven halbleiterbasierten Mikroelektronik- und Photonik-Baugruppen, also aus integrierten Schaltkreisen bestehend aus Transistoren und Dioden, die je nach Material und Technologie die elektrische Energie als thermische Verluste abgeben. Bei Verstärkern und Stromwandlern zeigt der Wirkungsgrad die Effektivität des Energieeinsatzes an. So tragen die vergleichsweise geringen Wirkungsgrade von Leistungsverstärkern wesentlich zum Energiebedarf von Funkanlagen bei. Auch der Wirkungsgrad der Spannungswandlung (AC/DC) wird heute maßgeblich vom Einsatz halbleiterbasierter Leistungselektronik bestimmt. Die unzähligen Halbleiterbauelemente (ICs) sind nicht nur primär für den Energiebedarf in der Nutzungsphase verantwortlich, sondern bestimmen auch maßgeblich die Umweltwirkung der Herstellung der Telekommunikationstechnik. ICs werden aufgrund der immer kleiner zu fertigenden Strukturgrößen in sehr energieaufwendigen Reinräumen und komplexen Prozessketten hergestellt. Für die Fertigung werden hochreine Chemikalien und teilweise noch immer klimaschädliche Substanzen verwendet. Der größte Teil aller ICs wird auf Basis von hochreinem Siliziumoxid gefertigt. Für hochfrequente Anwendungen und hohe Stromfestigkeit kommen aber auch Halbleiter auf Basis von Gallium, Germanium und Indium vermehrt zur Anwendung. Bei Spannungswandlern wird Siliziumkarbid, aber auch Galliumnitrid eingesetzt. Zudem werden Edelmetalle wie Gold und Palladium, aber auch andere kritische Rohstoffe bei der Kontaktierung der ICs und Mikrosystemintegration benötigt. Die Fertigungsausbeute wird stark vom Miniaturisierungsgrad beeinflusst. Eine geringe Fertigungsausbeute erhöht die Umweltwirkung der ICs substanzell.

Schnittstellen

Dieser Begriff steht synonym für alle Schnittstellen, d.h. Stecker, Kabel und auch Antennen. Sie stehen in enger Wechselwirkung mit den aktiven Bauelementen (ICs) wie beispielsweise Leistungsverstärkern bei Luftschnittstellen oder Laserdioden bei optischen Schnittstellen. Da

Schnittstellen (*Ports*) einerseits mechanisch robust und andererseits sicher stromführend sein müssen, kommen hier neben Kupfer, Aluminium und Eisen häufig wertvolle Materialien einschließlich Gold, Palladium, aber auch Nickel, Kobalt oder Beryllium als Beschichtung zum Einsatz. Die galvanischen Prozesse zur Herstellung sind energieintensiv. Kabel sind gesondert zu betrachten, doch das Übertragungsmedium beeinflusst die Signaldämpfung und wirkt sich schlussendlich auf den Energiebedarf in der Nutzungsphase aus. Über längere Entfernungen ist eine Glasfaserverbindung deutlich energieeffizienter als ein Koaxialkabel oder eine Funkverbindung (Luftschmittstelle). In der Umweltbewertung ist auch bei Kabeln der Materialeinsatz zu berücksichtigen. Hierfür sind allerdings genaue Angaben zur Kabelart und -länge nötig.

Leiterplatten

Die ICs und die passiven Elektronikbauelemente werden auf Leiterplatten (*Printed Circuit Boards, PCBs*) verschaltet, um eine komplexe Funktion bereitzustellen. Leiterplatten bestehen aus mehreren dünnen Lagen Kupfer sowie isolierendem, glasfaserverstärktem und flammgehemmtem Kunststoff. Die Herstellung von Leiterplatten hat aufgrund thermischer und nasschemischer Fertigungsprozesse eine vergleichsweise hohe Umweltrelevanz. Die Außenlagen sind zum Schutz häufig mit Nickel-Gold beschichtet. Die aktiven und passiven Bauelemente werden typischerweise mit Zinn-Silber-Kupfer-Loten auf den Leiterplatten kontaktiert. Passive Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten (Spulen) sind aufgrund der bei mikroelektronischen Anwendungen geringen Baugröße tendenziell weniger umweltkritisch. Allerdings gilt diese Aussage nicht pauschal. So sind besonders Kondensatoren aus Tantal aufgrund dieses Materials sehr umweltkritisch.

Kühlung

Aktive Bauelemente, d.h. ICs mit einer hohen elektrischen Leistungsaufnahme bzw. Verlustleistung werden zum Zweck der Entwärmung mit Kühlkörpern, einphasigen oder zweiphasigen *Heatpipes* ausgestattet. Diese können aus Kupfer, Aluminium oder Eisen bestehen. Passiv wirkende Kühlkörper und *Heatpipes* werden meist mit aktiven Kühlkomponenten kombiniert. Primär werden drehzahlgesteuerte Lüfter zur Erzeugung einer geregelten Konvektionskühlung eingesetzt. Die elektrische Leistungsaufnahme nimmt hierbei mit steigender Umdrehungszahl überproportional zu. Daher wirkt sich die aktive Kühlung bei hoher elektrischer Leistungsaufnahme und thermischen Verlusten (durch geringe Wirkungsgrade) als zusätzlicher Energiebedarf deutlich in der Umweltbewertung aus. Fluidik-Kühlungen sind prinzipiell effektiver, aber technisch komplex und kaum im Markt anzutreffen.

Gehäuse

Das Gehäuse (Chassis) steht synonym für Komponenten aus Mengenmaterialien wie Kupfer, Aluminium, Stahl, Beton und Kunststoffe. Sie bilden die materialseitige Grundlage von Gehäuseteilen, IT-Schränken, Aufhängungen, aber auch Antennenmasten. Diese Materialien haben meist eine geringere relative Umweltwirkung (pro kg Material) im Vergleich zu hochwertigen Materialien in der Mikroelektronik. Sie sind jedoch aufgrund der großen Einsatzmengen in der absoluten Umweltwirkung relevant. Beispiele sind – wie die Umweltbewertung zeigen wird – das Aluminium in den Gehäusen der Funkmodule oder auch der Beton für Antennenmasten in ländlichen Gebieten.

Mit dem komponentenbasierten Sachbilanzmodell ist eine Umweltbewertung sowohl der Herstellungs- als auch der Nutzungsphase grundsätzlich möglich. Die kurze Darstellung hat aber bereits einen Eindruck von der Komplexität einer solchen lebenszyklusorientierten Bewertung

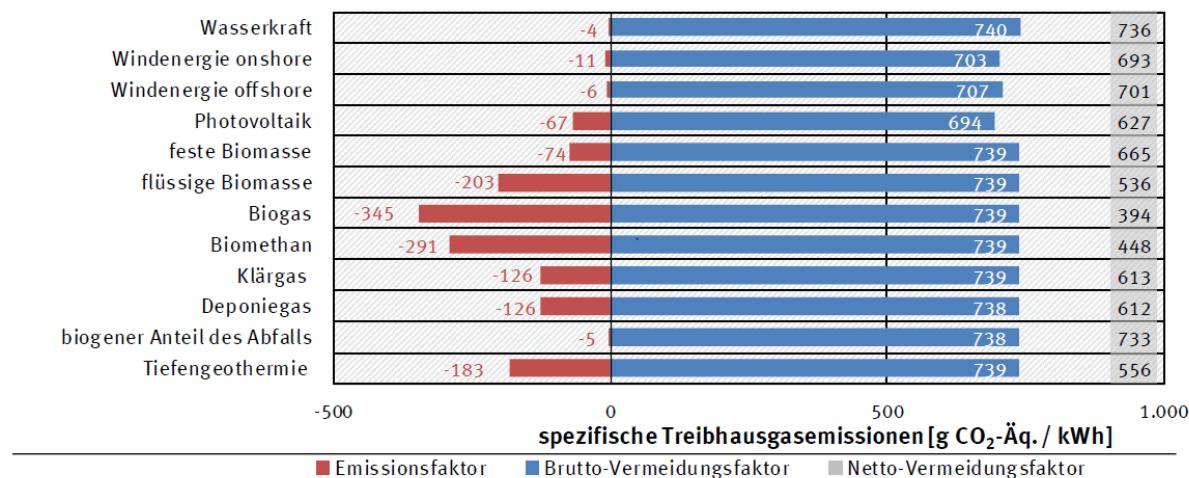
angedeutet. Die überschlägige Umweltbewertung adressiert folgende thematische Schwerpunkte und Fragestellungen:

- ▶ Welche Umweltwirkung haben einzelne Netzbereiche, Geräteklassen, und funktionale Komponenten?
- ▶ Welche Unterschiede charakterisieren die Umweltwirkung von Mobilfunkstandorten in Stadt und Land?
- ▶ Wie beeinflussen neue Mobilfunk- und Hardwaregenerationen die Umweltwirkung?
- ▶ Welche Größenordnung hat die Umweltwirkung der Herstellungsphase im Vergleich zur Nutzungsphase?
- ▶ Wie entwickelt sich dieses Verhältnis in der Zukunft, beispielsweise auch unter der Berücksichtigung der Einsatzdauer der Geräte- und Anlagen?
- ▶ Welche Technikbereiche können umweltseitig von einer beschleunigten Modernisierung profitieren?
- ▶ Ändert sich die Größenordnung der Umweltlast durch gemeinsame Standortnutzung und andere Maßnahmen wie Roaming?
- ▶ Welche technischen und operativen Maßnahmen des Energiemanagements können zur Reduktion der Umweltlast beitragen?
- ▶ Welche umweltseitigen Hotspots können in der Zukunft entstehen?

Auch der Aspekt der Nutzung erneuerbarer Energien ist ein Thema, welches im Kontext des Mobilfunks aufgrund des hohen und konstanten Energiebedarfs der Netze stark im Fokus steht. Zu diesem Thema werden im Anschluss einige grundlegende Randbedingungen erläutert.

1.3.6 Strommix und Umrechnungsfaktoren für CO2-Bilanz

Jeder zur Stromerzeugung genutzter Energieträger hat eine spezifische CO2-Bilanz, welche die direkten und indirekten CO2-Äquivalente-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde angibt (Umrechnungsfaktor in g CO2e/kWh). Diese unterscheiden sich untereinander teilweise erheblich, was der Vergleich in Abbildung 17 beispielhaft veranschaulicht. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft, Offshore Windkraft sowie die Verstromung von Bioabfall weisen die geringsten spezifischen CO2-Äquivalent-Emissionen auf. Photovoltaik und feste Biomasse haben zwar gegenüber fossilen Energieträgern eine etwa zehnmal geringere, gegenüber Wasser- und Windkraft jedoch eine deutliche höhere CO2-Bilanz (Memmler et al. 2019).

Abbildung 17: Spezifische Treibhausgasemissionen nach Energieträger

Quelle: Eigene Darstellung des UBA

Es bleibt festzuhalten, dass die elektrische Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern im Vergleich zu den Fossilien eine sehr deutliche Reduktion klimaschädlicher Treibhausgase bewirkt. Die Anteile der unterschiedlichen Energieträger an der gesamten Stromerzeugung einer Region beschreiben den sogenannten Strommix und bestimmen den durchschnittlichen Umrechnungsfaktor für die Bestimmung der CO2-Bilanz. Dieser Wert wird für Deutschland vom Umweltbundesamt (UBA) anhand von Bundesstatistiken jährlich berechnet. Laut UBA sanken die durchschnittlichen Kohlendioxidemissionen von 764 g CO2e/kWh im Jahr 1990 auf 471 g CO2e/kWh im Jahr 2018 (Icha et al. 2021). Für die Jahre 2019 und 2020 weisen die zum Zeitpunkt der Erstellung noch vorläufigen Berechnungen deutlich verbesserte Werte von 488 g CO2e/kWh und 366 g CO2e/kWh aus. Der Trend zeigt eine mit 44 % signifikante Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung und starke handelsbezogene Einflüsse.¹³

Selbst der Einsatz von 100 % erneuerbaren Energien ist sowohl aufgrund der derzeit nicht emissionsfreien Herstellung der Energieerzeugungsanlagen (siehe Abbildung 17) als auch wegen der noch auf längere Sicht nötigen Absicherung dieser volatilen Energieerzeugung mit fossilen Energieträgern oder Speichertechnologien momentan nicht klimaneutral. Der Umrechnungsfaktor wird demnach in absehbarer Zeit nicht auf null sinken können.

Wenn nun Mobilfunkbetreiber elektrischen Strom zu 100% aus erneuerbaren Energieträgern über Zertifikate beziehen, ist unklar, wie sich der Strommix genau zusammensetzt und mit dem nationalen Strommix verrechnet wird. Zunächst ist festzustellen, dass sich die Beschaffung erneuerbarer Energien sehr positiv auf die Klimafreundlichkeit auswirkt und die Energiewende fördert. Dabei kann aber noch nicht von Klimaneutralität gesprochen werden.

Denn solange die Mobilfunkbetreiber nicht direkt ihren Strom erzeugen (der Anteil lag 2020 im niedrigen einstelligen Prozentbereich), muss der erneuerbare Strom an anderer Stelle erzeugt, bundesweit durch das deutsche Stromnetz transportiert, zwischengespeichert und damit in die Bilanz mit einkalkuliert werden. Dieser erneuerbare Stromanteil der Mobilfunkbetreiber ist also immer noch ein Teil des deutschen Strommixes. Würde man einem Unternehmen, das „grünen“

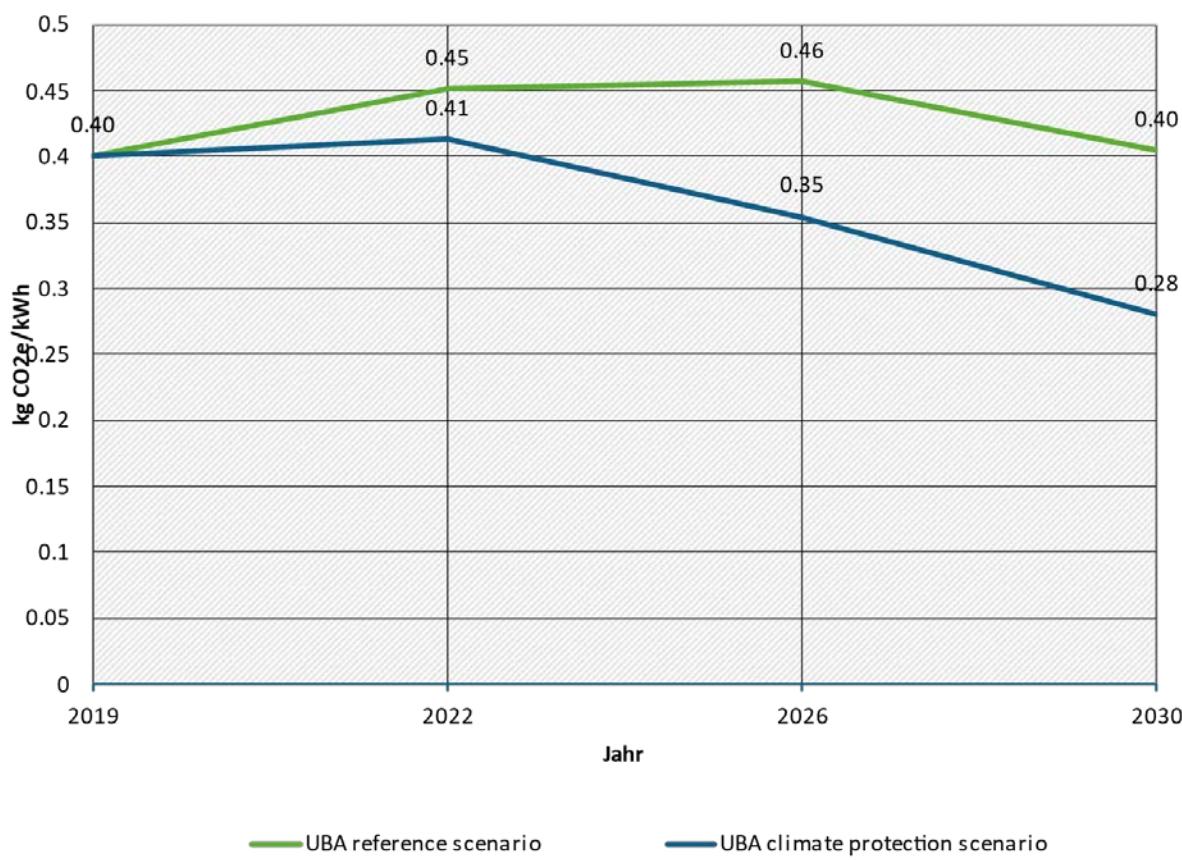
¹³ Die Berechnungen beziehen sich auf CO2-Emissionsfaktoren ohne Berücksichtigung des Handelssaldos. Im Fall einer Berücksichtigung des Handelssaldos ist der Wert beispielsweise für 2019 mit 401 g CO2/kWh etwas geringer.

Strom einkauft, im Rahmen einer CO2-Bilanzierung nur diesen zuschreiben, käme es zum sogenannten „*Double Counting*“, da der Stromanteil des Unternehmens einmal vollständig für dieses und noch einmal anteilig im nationalen Strommix bilanziert würde.

Die Ermittlung der genauen Anteile am Strommix eines Mobilfunkbetreibers und damit eines unternehmensspezifischen Umrechnungsfaktors übersteigt die Möglichkeiten der Studie. Wie im Methodenkapitel 2 zudem ausführlich dargestellt wird, basiert das Berechnungsmodell auf der Abbildung eines generischen, bundesweit agierenden Mobilfunknetzbetreibers. Daher erfolgt die Berechnung der nutzungsbezogenen Treibhausgasemissionen auf Basis der UBA-Prognosen zur Entwicklung des deutschen Strommixes. Aussagen über die CO2-Bilanz eines konkreten Netzbetreibers könnten nur unter Berücksichtigung der konkreten technischen Bestands- und Verbrauchsdaten der realen Infrastruktur, ihrer Konfiguration, der Betriebsmodi und der Nutzungsintensität (siehe 5K-Methode) sowie des spezifischen eingesetzten Strommixes aller Standorte ermittelt werden. Diese Daten liegen nicht vor. Daher wird im Sinne der wettbewerbsneutralen Natur dieser Studie und der Konsistenzwahrnehmung bei einer Betrachtung des gesamtdeutschen Mobilfunknetzes ein generischer Netzbetreiber unter Verwendung des deutschen Strommixes betrachtet.

Aus diesem Grunde hat das Umweltbundesamt den Autoren dieser Studie im Sommer 2021 zwei Prognosen zur Entwicklung des deutschen Strommixes bis 2030 bereitgestellt.¹⁴ Abbildung 18 zeigt beide Prognosen. Die erste Prognose ist das Referenzszenario, welches eine Extrapolation der Entwicklung unter Berücksichtigung aktueller Marktbedingungen zeigt. Die zweite Prognose ist das sogenannte Klimaschutzszenario, welches Anforderungen zur Erreichung der gestellten Klimaschutzziele reflektiert.

¹⁴ Diese Prognosen berücksichtigten noch nicht den UBA Climate Change 45/2021 Bericht, der eine deutliche Verbesserung des Strommix-Wertes in 2020 ermittelte: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021.pdf

Abbildung 18: Zwei Prognosen zur Entwicklung des deutschen Strommixes

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Es ist zu erkennen, dass entgegen dem Trend in Richtung des Ausbaus erneuerbarer Energien der Umrechnungsfaktor zunächst mittelfristig ansteigt. Ein Grund hierfür ist, dass der elektrische Energiebedarf durch die zunehmende Elektrifizierung nach Meinung vieler Experten weiter steigen wird (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2021) und Erneuerbare Energien nicht im selben Maße zugebaut werden können, wodurch der erhöhte Bedarf somit weiter von fossilen Energieträgern aufgebracht werden muss. Dieser Effekt wird durch Deutschlands bis 2022 geplanten Ausstieg aus der Kernkraft – einer relativ CO2-armen Energiequelle (Umweltbundesamt 2019) – weiter verstärkt (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2011).

Diese beiden Entwicklungen können durch das derzeitige Ausbautempo (siehe Referenzszenario) für erneuerbare Energieträger erst nach 2026 kompensiert werden. Ab diesem Zeitpunkt sinkt der Umrechnungsfaktor und wird ab 2030 unter die aktuelle Marke von etwa 400 g CO2e/kWh sinken. Die vergleichsweise frühere und stärkere Senkung der Emissionen im Klimaschutzszenario ist auf den erhöhten Anteil an erneuerbaren Energien zurückzuführen, wobei aber deutlich ersichtlich ist, dass selbst in diesem ambitionierteren Szenario noch längerfristig eine erhebliche Umweltlast mit der Stromerzeugung verbunden bleiben wird (280 g CO2e/kWh im Jahr 2030).

1.4 Relevante Vorarbeiten, Literatur und Informationsquellen

1.4.1 Literatur zu existierenden Energiemodellen für den Mobilfunk

In diesem Abschnitt werden die relevanten Vorarbeiten, insbesondere im Kontext der Modellierung des Energiebedarfs von Mobilfunknetzen, kurz skizziert und damit auch die Ausgangslage für den gewählten methodischen Ansatz präsentiert. Bisherige wissenschaftliche Arbeiten zur Modellierung des Energieverbrauchs von Mobilfunknetzen fokussierten auf den Antennenstandort¹⁵ mit Funk- und Antennenanlagen. Wissenschaftlich wird das Thema seit etwa dem Jahr 2010 vertiefter untersucht. Im Kontext der Einführung der vierten Mobilfunkgeneration LTE (4G) wurden grundlegende Energiemodellansätze entwickelt. Unternimmt man den Versuch einer Kategorisierung dieser Ansätze, so lassen sich drei prinzipielle Herangehensweisen unterscheiden.

Die erste Kategorie könnte man als „Hauptkomponenten-Energiemodell“ bezeichnen (siehe Details weiter unten). Dieser Kategorie gehören Modelle an, welche einen einzelnen Antennenstandort zum Bezugsgegenstand haben und für die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme das Funkmodul (Radio Unit) und das Basisbandmodul (Baseband Unit) in ihren Hauptkomponenten abbilden. Aufgrund des wesentlichen Anteils der Leistungsverstärker im Funkmodul an der Gesamtleistungsaufnahme werden diese meist gesondert betrachtet. Parameter wie die verwendete Bandbreite oder die Anzahl aktiver Antennen, die mit der Konfiguration des Antennenstandortes zusammenhängen, werden ebenfalls abgebildet. Während deren Einflüsse auf die Leistungsaufnahme in der Realität jedoch häufig komplex sind, werden diese hier vereinfacht und meist über lineare Zusammenhänge modelliert. In den Modellen werden teilweise auch Nutzungsmuster bzw. Lastprofile berücksichtigt. Dadurch lassen sich mit den Modellen auch Aussagen zum absoluten Energiebedarf treffen.

Die zweite Kategorie ist eine Erweiterung der ersten Kategorie und kann als „Subkomponenten-Energiemodell“ bezeichnet werden. Dieser Kategorie gehören Modelle an, welche eine hohe Granularität bezüglich der betrachteten Haupt- und Unterkomponenten aufweisen. Ziel dieser Modelle ist es oftmals, den Energiebedarf bzw. die Energieeffizienz von spezifischen Technologieaspekten, Designs und Gerätekonfigurationen zu berechnen. Die Modellierung des relativen Energiebedarfs einzelner Komponenten auf Basis von Lastprofilen steht im Vordergrund. Teilweise werden mit dieser Art von Modellen auch Auswirkungen auf den Datentransport zwischen den einzelnen Netzkomponenten (*X-Haul*) berechnet.

Die dritte Modellkategorie unterscheidet sich von den eher „Bottom-up-basierten“ Komponentenmodellen dadurch, dass sie von einer „Top-down“ Anwendungsperspektive ausgehen. Diese „Anwenderbasierten Energiemodelle“ stellen einen Zusammenhang zwischen dem Nutzungsverhalten der Mobilfunkteilnehmer und dem daraus resultierenden Energiebedarf her. Eine zentrale Größe für die Abbildung des Nutzungsverhaltens stellt dabei die Datenrate dar, welche auch das Datenvolumen in nicht unerheblicher Weise beeinflusst. In diesen Modellen wird teilweise auch der Gerätebestand berücksichtigt. Ziel der Modelle ist es, den absoluten Energiebedarf bzw. auch die relative Energieeffizienz (z.B. Wh/GB) für ein konkretes Bezugssystem (Mobilfunknetz) zu berechnen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Vertreter der beschriebenen Kategorien chronologisch aufgelistet und erläutert. Dabei wird auf besonders relevante Modelle detaillierter eingegangen.

¹⁵ In vielen im Folgenden aufgeführten Literaturquellen wird ein Antennenstandort als Basisstation (*Base Station*) bezeichnet. Da der Begriff Basisstation in anderen Literaturquellen und Datenblättern allerdings auch teilweise für das Basisbandmodul verwendet wird, verzichten die Autoren dieser Studie auf die Verwendung des Begriffs Basisstation und nutzen stattdessen die eindeutig zuordbaren Begriffe Antennenstandort und Basisbandmodul.

Hauptkomponenten-Energiemodelle

In (Deruyck et al. 2011) wird bereits eine Unterteilung des Antennenstandortes in Komponenten vorgenommen, die den oben genannten Hauptkomponenten ähnlich sind. Darunter auch der Leistungsverstärker, welcher durch die technologieabhängige Anzahl aktiver Antennen skaliert und dessen Wirkungsgrad berücksichtigt wird. Außerdem werden additiv Leistungsaufschläge vorgenommen, welche die erwarteten Verluste durch Verbindungen in das Transportnetz (*Backhaul* oder *microwave link*), AC/DC-Umwandlungen und Kühlung modellieren. Für die Komponenten werden jeweils Leistungswerte für 3G-Technologien angesetzt, aus denen sich die Gesamtleistungsaufnahme eines Standortes berechnen lässt.

Da die Leistungsaufnahme eines Antennenstandortes in der Realität nicht konstant ist, sondern teilweise vom Lastprofil abhängt, wurde in (Son et al. 2011) die prozentuale Auslastung als Variable in ein Energiemodell eingeführt. Dieser Ansatz ist sinnvoll und verbessert grundsätzlich das Modell. Allerdings macht K. Son die zu stark vereinfachte Annahme, dass die Auslastung direkt proportional zur gesamten Leistungsaufnahme ist. Daraus folgt rein rechnerisch, dass sich bei einer Auslastung von 0 % eine Leistungsaufnahme von 0 Watt ergibt. Es wurde schnell erkannt, dass dieser Ansatz die Realität unzureichend abbildet, weil die Komponenten nicht alle lastabhängig sind und zumindest eine grundlegende Spannungsversorgung benötigen. Somit muss bei einer 0 % Auslastung (Bereitschaftszustand ohne Last) eine Basisleistungsaufnahme (Base Power) ausgewiesen werden. Je höher das Verhältnis zwischen dieser Basis und dem Maximalwert ist, desto besser ist prinzipiell die lastabhängige Leistungsaufnahme.

Als Teil des durch die EU geförderten Projektes „Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies“ (EARTH) wird mit der Studie nach Auer et al. (2011) ein grundlegendes und realitätsnahes Energiemodell für einen Mobilfunkstandort publiziert. Die Modellierung ist ausgelegt für eine einfache Abbildung des Leistungsbedarfs einzelner 4G/LTE-Standorte verschiedener Zellgrößen. Dabei steht die Abbildung der Lastabhängigkeit im Vordergrund. Dem Ansatz des EARTH-Projektes liegen die Annahmen zugrunde, dass die Gesamtleistungsaufnahme linear von der Antennenanzahl sowie von der Auslastung abhängt.

In diesem Modell wird zunächst der gesamte Energiebedarf des Antennenstandortes bei maximaler Auslastung berechnet. Die Auslastung beschreibt dabei grundsätzlich das Verhältnis von der maximalen zur realen Sendeleistung. Für die Berechnung der gesamten elektrischen Leistungsaufnahme wird die Basisstation in ihre Hauptkomponenten Basisbandmodul und Funkmodul mit Leistungsverstärker aufgeteilt. Der Energiebedarf des Basisbandmoduls wird aus einem Funksignal-, einem Kodier- und einem Prozessor-Anteil gebildet. Der Energiebedarf des Funkmoduls setzt sich additiv aus einem durch Receiver und einem durch Transmitter bedingten Grundleistungswert zusammen. Der Leistungsverstärker wird als Quotient von ausgesendeter Leistung der Antennen und der eingespeisten Leistung (Verstärkereffizienz) berechnet. Anschließend wird dieser Anteil mit einem weiteren Wirkungsgrad gewichtet, welcher die Verluste berücksichtigt, die durch die Verbindungskabel zwischen Verstärker und Antenne entstehen. Die Verluste durch die DC/DC-Wandlungen, die AC/DC-Wandlungen des Netzteils sowie der energetische Mehraufwand für die Kühlung werden generell über Wirkungsgrade abgebildet und in die Gesamtleistungsaufnahme eingerechnet.

Um die Lastabhängigkeit abzubilden, wird zusätzlich ein Leerlauf-Wert bestimmt, der die elektrische Leistungsaufnahme des gesamten Mobilfunkstandortes ohne Nutzlast beziffert. Zwischen diesem und der zuvor berechneten Leistungsaufnahme bei voller Auslastung wird nun linear interpoliert, sodass die Leistungsaufnahme als eine lineare Funktion der Auslastung dargestellt werden kann. Neu für den EARTH-Projekt-Ansatz ist außerdem die Möglichkeit, sogenannte Ruhezustände (*Sleep Modes*) abzubilden, welche die Abschaltung von einigen Komponenten des Antennenstandortes vorsehen, wenn diese nicht genutzt werden. Im Modell

wird diese Art der Energiesparmaßnahme umgesetzt, indem festgelegt wird, dass bei minimaler Auslastung ein Leistungswert angenommen wird, welcher der Leistungsaufnahme unter Berücksichtigung der Abschaltung entsprechender Komponenten entspricht.

Die benötigten Grundwerte der Komponenten sowie die Ergebnisse der linearen Interpolation werden für eine konkrete LTE-Konfiguration von 2010 auf die Anzahl eingesetzter Antennen bezogen. Es werden damit Daten zur elektrischen Leistungsaufnahme für Standorte von Funkzellen unterschiedlicher Größe bereitgestellt¹⁶. Die Anzahl eingesetzter Antennen wird als Eingangsparameter angesetzt, welcher den gesamten Leistungsaufwand linear skaliert. Erstes gilt jedoch nur näherungsweise für weniger als vier Antennen. Letzteres stellt ebenfalls eine starke Vereinfachung dar, da die Effizienz des Leistungsverstärkers (PA) in der Realität nicht linear von der Last abhängt.¹⁷

Holtkamp et al. (2013) entwickeln das EARTH-Modell nach Auer et al. (2011) weiter, indem sie das komplexere Modell nach Dessel et al. (2012) aus der Kategorie „Subkomponenten-Energiemodelle“ (vgl. 0) parametrisieren. Dabei wird die Bandbreite als Parameter eingeführt, der die Leistungsaufnahme des Standortes skaliert. Die Kanalbandbreite hat nach Analysen des komplexeren Modells für alle betrachteten Standorttypen einen annähernd linearen Einfluss auf die Gesamtleistungsaufnahme.

Ein ähnlicher struktureller Aufbau des Energiomodells wird in (Micallef 2013) vorgestellt. In diesem Modell wird ebenfalls die Lastabhängigkeit dargestellt, jedoch erfolgt die Gewichtung dessen mithilfe eines Tuning-Faktors. Für die Modellierung sind daher vorerst weitere Kenntnisse über die spezifische Leistungsaufnahme des abzubildenden Standortes notwendig. Der Tuning-Faktor schließt dabei nicht erfasste Verluste und die Leistungsverstärker-Effizienz mit ein, sodass deren tatsächlicher Einfluss nicht untersucht werden kann.

In (Deruyck et al. 2014) werden die betrachteten Komponenten direkt in lastabhängige und lastunabhängige eingeteilt.¹⁸ Anhand vorgenommener Messungen konnte die Abbildung der Lastabhängigkeit hinsichtlich des resultierenden Leistungsaufwands validiert werden.

Eine weitere Modifikation des Modells nach Auer et al. (2011) wird in (Mushtaq et al. 2017) vorgenommen, um die dynamische Zuweisung des Basisbandmoduls in C-RAN Architekturen zu berücksichtigen.

Subkomponenten-Energiemodelle

Ein erstes Mobilfunk-Energiomodell mit hoher Granularität (Aufteilung nach Subkomponenten) und Flexibilität in den Anpassungsmöglichkeiten (Parametrisierbarkeit) wird in (Dessel et al. 2012) vorgestellt. Dieser Modellierungsansatz resultiert ebenfalls aus dem EARTH-Projekt. Er bildet die Hauptkomponenten der Basisstation deutlich detaillierter mittels Subkomponenten ab. Für ein Referenzszenario werden gemessene oder geschätzte Grundwerte der Subkomponenten angegeben und beschrieben, wie sich diese verhalten, wenn sich Parameter wie Bandbreite, Modulationsart oder Kodierungsrate ändern. Der Einfluss eines solchen von der Standortkonfiguration abhängigen Parameters auf eine Subkomponente ist dabei fest vorgegeben und wird über einen Exponenten dargestellt. Ist beispielsweise der Exponent des Parameters Bandbreite für eine Subkomponente gleich eins, bedeutet dies, dass eine lineare Abhängigkeit des Grundwertes von der Bandbreite erwartet wird. Nach diesem Vorgehen kann der Anteil aller Subkomponenten in Abhängigkeit der Parameter bestimmt werden und durch

¹⁶ Funkzellen werden der Größe nach in die folgenden Kategorien eingeteilt (in aufsteigender Reihenfolge): Femto-, Pico-, Mikro- und Makrozellen

¹⁷ Der grundlegende komponenten- und lastabhängige Ansatz des EARTH-Projektes wurde auch im UTAMO-Modell implementiert.

¹⁸ Dieser Ansatz wurde erst im Verlauf der Entwicklung des UTAMO-Modells übernommen.

Aufsummierung auf die Gesamtleistungsaufnahme des Standortes geschlossen werden. Neu und hervorzuheben ist bei (Desset et al. 2012), dass die benötigte Rechenleistung der Basisband-Verarbeitung als Skalierungsfaktor zunächst extra berechnet wird. So werden Grundwerte von Subkomponenten des Basisbandmoduls durch benötigte Rechenoperationen (*Giga Operations per Second, GOPS*) und der korrelierenden elektrischen Leistungsaufnahme pro Rechenoperation modelliert. Da es nicht gelang, den Energiebedarf des Leistungsverstärkers durch Skalierung eines Referenzszenarios abzubilden, wird dieser gesondert über gemessene Zusammenhänge ermittelt. Während die Abhängigkeiten der Parameter qualitativ gut abgebildet werden können, sorgt die hohe Flexibilität in der Wahl betrachteter Subkomponenten in diesem Modell jedoch insgesamt für weniger präzise Ergebnisse. Das Modell berechnet die Gesamtleistungsaufnahme diverser Hardware-Zusammensetzungen unter Variation von Werten wie Modulationsart, Bandbreite und Kodierungsrate.

Eine noch höhere Flexibilität und Genauigkeit stellt die bislang aktuellste Version des Modells von Desset et al. (2012) in (Debaillie et al. 2015) dar. In diesem Nachfolgermodell werden fünf Hauptkomponenten etabliert, welche den Leistungsverstärker, die analoge und digitale Signalverarbeitung, die digitale Steuerung und die Stromversorgung umfassen. Unter den vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich Hardware, Betriebsmodus, etc. ist das Modell beispielsweise darauf ausgelegt, massive MIMO-Konfigurationen abzubilden. Neu ist auch, dass zur Abschätzung des Einflusses der technologischen Entwicklung ein Skalierungsfaktor auf Basis des Mooreschen Gesetzes für Komponenten der analogen und digitalen Signalverarbeitung vorgeschlagen wird. Die intendierte Anwendung dieses Modells besteht darin, vielseitige Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Hardwarekonfiguration als auch im Betriebsverhalten zu analysieren. Ähnlich dem Vorgängermodell wird dafür von einem Referenzszenario ausgehend skaliert, sodass keine Messdaten vorliegen müssen. Anders als das Vorgängermodell in (Desset et al. 2012), liefert dieses Modell jedoch deutlich genauere Werte, ist aber deutlich komplexer in der Anwendung geworden.

Eine Modifikation des Modells von Desset et al. (2012) wird von Alhumaima (2017) vorgenommen. Hierbei werden Anpassungen für die Beschreibung von verschiedenen C-RAN Architekturen ergänzt. Eine detaillierte Modellierung einer einzelnen Komponente wird in (Abbas et al. 2017) vorgenommen. In diesem Modell wird ausschließlich die elektrische Leistungsaufnahme eines aktiven, Beamsteering-fähigen Antennenmoduls im Uplink betrachtet. Dabei wird ein Millimeterwellen-Antennensystem simuliert, wie es in 5G-Mikrozellen eingesetzt werden könnte. Es wird der Vergleich einer analogen, hybriden und digitalen Beamsteering-Systemarchitektur vorgenommen.

Anwenderbasierte Energiemodelle

In der Studie von Auer et al. (2011) wird neben dem beschriebenen Ansatz zur Berechnung des Leistungsaufwandes eines Antennenstandortes (*Basic EARTH Model*) auch ein Modell unter dem Namen „Energy Efficiency Evaluation Framework“ (E3F) vorgestellt, welches ausgehend von der erwarteten Datenrate pro Mobilfunkteilnehmer eine Hochrechnung auf den gesamten Energiebedarf eines Landes durch Antennenstandorte ermöglicht. Hierfür wird die betrachtete geografische Fläche in Standortkategorien gemäß der Bevölkerungsdichte eingeteilt (*dense urban, urban, suburban and rural*). Je nach Standortkategorie wird der benötigte Flächen-Durchsatz (*area-throughput*) abgeschätzt, indem die erwartete Datenrate pro Nutzer mit einem durchschnittlichen Nutzungsprofil (Zeitdauer) und der Bevölkerungsdichte gewichtet wird.¹⁹ Um von dem Flächendurchsatz auf die aufzuwendende Leistung pro Fläche je Standortkategorie

¹⁹ Im UTAMO-Modell wird ein vergleichbarer Standort-Ansatz gewählt, allerdings ohne den Area-Throughput-Parameter, da Daten zur durchschnittlichen Antennenausstattung pro Standortkategorie auf Basis der BNetzA-Standortdatenbank vorlagen.

zu schließen, wird eine statistische Simulation gemäß 3GPP-Richtlinien (3GPP TR 36.814 V9.0.0) auf Systemebene durchgeführt. Das zuvor entwickelte komponentenbasierte Modell eines Standortes stellt dabei die Grundlage für die Simulation dar. Über die auf das Land bezogenen anteiligen Flächen der Standortkategorien kann damit auf die gesamte elektrische Leistungsaufnahme aller Standorte geschlossen werden. Da in die Modellierung bereits ein über den Tag gemitteltes Nutzungsprofil mit eingeflossen ist, kann auch die Energie berechnet werden, die in einem festgelegten Zeitraum benötigt wird. Dadurch ermöglicht der Berechnungsansatz nach dem „E3F-Modell“ eine fein aufgelöste Hochrechnung des Energiebedarfs von Standorten auf große geografische Flächen. Die statistische Simulation für die Zuordnung von Flächen-Durchsatz zu Leistung pro Fläche ist allerdings aufwendig.

Andere Ansätze, die einen starken Top-Down Charakter tragen, stellen oftmals eine sehr hohe Vereinfachung der Realität dar. In (Andrae und Edler 2015) wird der gesamte Energiebedarf von Mobilfunknetzen prognostiziert, wobei die Anteile verschiedener Technologiegenerationen einzeln betrachtet werden. Hierfür wird ein konstanter Faktor herangezogen, welcher die Energie pro Datenrate der jeweiligen Technologiegeneration beschreibt. Dieser wird mit der erwarteten Datenrate in einem Zukunftsszenario multipliziert, um die benötigte Energie zu berechnen. Die Annahme, dass der Energiebedarf einer Technologiegeneration direkt proportional zur Datenrate ist, berücksichtigt allerdings zu wenige Faktoren.

Vorarbeiten des Fraunhofer IZM

Das Fraunhofer IZM hat im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) eine Studien zum Energiebedarf der IKT in Deutschland (Stobbe et al. 2015), (Stobbe et al. 2016) erstellt, in dem auch die Telekommunikationsnetze einschließlich des Mobilfunkes modelliert wurden. Vorarbeiten zu dieser Studie liefen im Begleitforschungsprojekt IT2Green - Energieeffiziente IKT für Mittelstand, Verwaltung und Wohnen (BMWi)²⁰. Weitere methodische Vorarbeiten entstanden im Rahmen eines Gutachtens für die Bundesnetzagentur (Nissen et al. 2019), dem Begleitforschungsprojekt IP45G -Informationsplattform für industrielles Internet (BMBF)²¹, sowie im direkten Zusammenhang mit den UTAMO Projekt (Stobbe et al. 2021).

1.4.2 Themenspezifische Literaturquellen

Die 5K-Methode vermittelt einen guten Eindruck bezüglich des Umfanges der benötigten Informationen und Daten zur Erstellung der Sachbilanzmodelle. Der Bottom-up-Ansatz erfordert beispielsweise Daten zu typischen Transceiver-Konfigurationen der Antennenstandorte in Stadt und Land sowie zur elektrischen Leistungsaufnahme einzelner Geräte und Baugruppen in unterschiedlichen Betriebszuständen. Prinzipiell können ökonomisch beeinflusste Bestandsdaten, technologisch beeinflusste Produktdaten und Nutzer-beeinflusste Betriebsdaten unterschieden werden. Die Technologie- und Produktdaten ermöglichen beispielsweise die Berechnung eines gerätespezifischen Energiebedarfs in einzelnen Betriebszuständen. Sie sind wichtig für die Bestimmung der relativen Umweltwirkung einzelner Systemkomponenten. Die Bestands- und Nutzungsdaten skalieren das Modell und beeinflussen maßgeblich die absolute Umweltwirkung.

Die Datenlage hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte von Technologien und Produkten (Anlagentechnik) wird primär gespeist aus Produktdatenblättern zu:

- Mobilfunkanlagen wie Antennensystemen, Funk- und Basisbandmodulen

²⁰ IT2Green: <https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AbgeschlosseneProgrammeProjekte/IT2Green/it2green.html>

²¹ IP45G: <https://www.ip45g.de/>

- ▶ Datentransport- und Vermittlungstechnik wie optische Terminals, Multiplexer, Switches, Router und Gateways
- ▶ Netzsteuerungs- und Systemmanagementtechnik wie Server und Datenspeicher
- ▶ Hauptkomponenten wie Verstärker, Filter, Prozessoren, Speicher und Konnektoren
- ▶ Weitere produktorientierte Umweltdaten können folgenden Quellen entnommen werden:
 - ▶ EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment (Zielwerte für die elektrische Leistungsaufnahme im Bereitschaftszustand und aktiven Betrieb)
 - ▶ Publizierte System- und Produktökobilanzen
 - ▶ Ökobilanzdatenbanken

Hinsichtlich Informationen zur Architektur- und Technologieentwicklung sind folgende Datenquellen nützlich:

- ▶ Dokumente im Kontext der Mobilfunkstandardisierung (3GPP, ITU-R/T, IEEE, etc.)
- ▶ Whitepaper der Netzbetreiber, Ausrüster und Industrieverbände (z.B. 5GPPP)
- ▶ Wissenschaftliche Veröffentlichungen der akademischen und industriellen Forschung
- ▶ Die Quellen für Gerätbestands- und Nutzungsdaten begrenzen sich auf ausgewählte Bundesstatistiken und Publikationen der Netzbetreiber. Hierzu gehören vorrangig:
 - ▶ Webseite der Bundesnetzagentur (BNetzA) zum Themenkomplex Telekommunikation inklusive der Jahresberichte, Dokumente zur Frequenzvergabe und Standortdatenbank
 - ▶ Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte sowie Pressemitteilungen der Netzbetreiber und -ausrüster

1.4.3 Fachgespräche mit Behörden und Industrie

Neben der Literaturrecherche wurde im UTAMO-Projekt frühzeitig begonnen, Informationen und Daten durch direkte Kontakte aus der betroffenen Industrie und den verantwortlichen Behörden zu erhalten. Dabei unterstützte das UBA aktiv die Vernetzung mit Experten in den verantwortlichen Ministerien und stellte insbesondere den Kontakt zur Bundesnetzagentur (BNetzA) her.

Die BNetzA ermöglichte den Autoren Ende 2019 den Zugang zum EMF-Datenportal.²² Diese Mobilfunkstandortdatenbank, welche primär Angaben im Kontext elektromagnetischer Felder der Mobilfunksysteme enthält, wurde hinsichtlich energierelevanter Daten untersucht. Da die Datenbank für das Sachbilanzmodell hilfreiche Angaben insbesondere zur Antennenkonfiguration der Standorte beinhaltet, wurde eine gezielte Datenabfrage durchgeführt, welche methodische Aspekte der Modellbildung berücksichtigte. Die Datenblätter zur Konfiguration der Antennenstandorte lagen einzeln vor und konnten nicht aggregiert ausgewertet werden, weshalb die Auswertung stichprobenartig, aber unter der Wahrung bestmöglicher Repräsentativität durchgeführt werden musste. Insgesamt wurden 309 Standortdatensätze für das UTAMO-Projekt ausgewertet (vgl. Kap 2.1 und 3.1).

²² BNetzA EMF-Datenportal:
https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/EMF/EMF-Datenportal/emf_datenportal_node.html

Neben den Daten der BNetzA waren die Kontakte zu den drei Netzbetreibern in Deutschland für das Vorhaben sehr hilfreich. So wurden initial existierende Kontakte des Fraunhofer IZM und des UBA genutzt. Im Laufe des Projektes unterstützte zusätzlich das BMVI die erweiterte Kontaktaufnahme zu den Unternehmen. Hierdurch wurde das UTAMO-Vorhaben dann auch von den Netzbetreibern auf unterschiedlichen Arbeitsebenen durch Informationen unterstützt. Detaillierte Zahlen zum Energiebedarf und Planungsdaten für den zukünftigen Netzausbau wurden im Rahmen des Vorhabens allerdings durch die Unternehmen aus Geheimhaltungsgründen nicht bereitgestellt.

Die im UTAMO-Projekt geplante Delphi-Befragung mit ausgewählten Industrievertretern und Wissenschaftlern zu konkreten technischen Trends scheiterte.²³ Mittels einer zweistufigen Befragung sollten Trends zu technischen Entwicklungen und zum künftigen Netzausbau sowie konkrete Daten zur Konfiguration und den operativen Betrieb der künftigen Netztechnik bis 2030 ermittelt werden. Auf den vom Fraunhofer IZM versendeten Fragenkatalog gab es nur eine vollständige Antwort. Die restlichen Befragten konnten keine verbindlichen Aussagen machen und nahmen Abstand von der Befragung. Die gescheiterte Delphi-Befragung war dennoch lehrreich. Erstens zeigte sich, dass energiebezogene Technik- und Netzplanungsdaten in der benötigten Granularität der Geheimhaltung unterliegen. Zweitens verteilen sich die geforderten Informationen scheinbar auf mehrere Betriebsbereiche und liegen nicht zentral vor. Drittens, die vorausschauende Datenabfrage verdeutlicht die Komplexität der energiebezogenen Technik- und Netzplanung und dass selbst Experten in diesem Bereich keine gesicherten, aussagekräftigen Prognosen abgeben können. Schlussendlich kann festgestellt werden, dass im Verlauf des UTAMO-Projektes das thematische Interesse und die Zusammenarbeit mit Industrie und Behörden stetig zugenommen hat. Die politische Debatte um verstärkte Klimaschutzmaßnahmen und die seit 2020 spürbar zunehmenden Klimaschutzaktivitäten der Telekommunikationsbranche haben hierbei sicherlich einen nicht unerheblichen Anteil.

Zusammenfassend werden nachfolgend die wesentlichen Maßnahmen im Kontext der direkten Daten- und Informationsbeschaffung aufgelistet:

- ▶ Zwei große Fachgespräche mit Behörden und Industrievertretern im Frühjahr 2020 und 2021. Daran nahmen Vertreter aus Ministerien (BMU, BMWi und BMVI) und nachgeordneten Behörden (UBA und BNetzA), Vertreter der Netzbetreiber (Deutsche Telekom, Telefónica und Vodafone) sowie Netzausrüster (Ericsson, Nokia und Huawei) teil.
- ▶ Vertiefende individuelle Online-Meetings mit Behörden, Netzbetreibern, Netzausrütern und Komponentenherstellern unter Beteiligung des UBA.
- ▶ Vorstellung des Projektes und der Berechnungsmethode und ausgewählter Aspekte im BITKOM Arbeitskreis Telekommunikation (2021)
- ▶ Delphi-Befragung ausgewählter Industrievertreter und Wissenschaftler zu konkreten technischen Trends, Daten zum künftigen Netzausbau, sowie zur Konfiguration und dem operativen Betrieb der künftigen Netztechnik bis 2030.

²³ „Die Delphi-Methode ist ein systematisches, mehrstufiges Befragungsverfahren mit Rückkopplung und ist eine Schätzmethode, die dazu dient, zukünftige Ereignisse, Trends, technische Entwicklungen und dergleichen möglichst gut einschätzen zu können“ (Wikipedia – Die freie Enzyklopädie 2021).

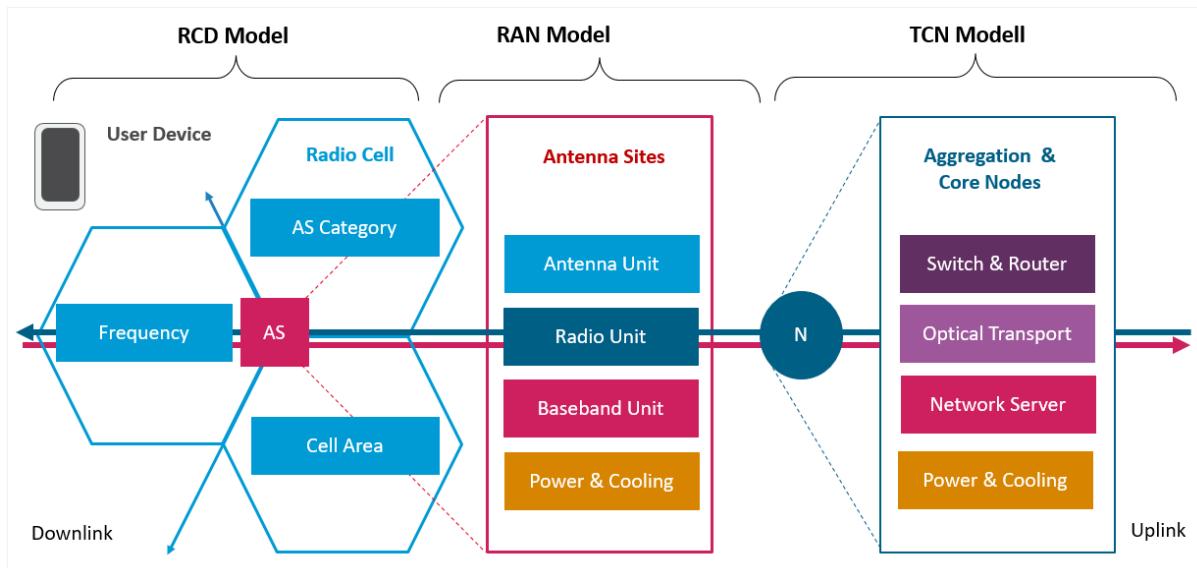
2 Methode der Sachbilanzmodellierung und Umweltbewertung von Mobilfunknetzen

Im Kapitel 2 werden methodische Aspekte, Parameter und Daten der drei Teilmodelle der Umweltsachbilanz im Detail erläutert. Die drei Teilmodelle sind das:

- ▶ Modell Funkzellenverteilung (*Radio Cell Distribution, RCD*),
- ▶ Modell Funkzugangsnetz (*Radio Access Network, RAN*),
- ▶ Modell Transportkernnetz (*Transport Core Network, TCN*).

Die Abbildung 19 zeigt die wesentlichen, technischen und funktionalen Aspekte der Teilmodelle ausgehend von der Funkzelle bzw. dem Antennenstandort im Funkzugangsnetz hin zum Transportkernnetz mit den Aggregations- und Hauptnetzknoten. In der folgenden Beschreibung der einzelnen Teilmodelle wird zunächst die konzeptionelle Einbindung in das Sachbilanzmodell und die logische Verknüpfung erklärt. Im Anschluss werden die Hauptkomponenten bzw. funktionalen und technischen Aspekte des Teilmodells erläutert. Die Beschreibung von Technikelementen beschränkt sich dabei auf die grundlegende Architektur, Funktionsprinzipien und wichtige Technologieaspekte im Kontext der Umweltbewertung. Diese komprimierte Technikdarstellung dient primär der Begriffsklärung und bildet den Hintergrund zum Verständnis des Modellierungsansatzes. Sie ist keine vertiefende Technikanalyse und kann auch keinen Überblick hinsichtlich der vielfältigen technologischen Varianten geben. Weitere Inhalte des Kapitels sind die Erläuterung der Berechnungsformeln und der Daten für die Parametrisierung des ersten Sachbilanzmodells für das Referenzjahr 2019.

Abbildung 19: Teilmodelle der Sachbilanz im Überblick



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

2.1 Funkzellenverteilungsmodell – RCD-Modell

2.1.1 Drei vergleichbare Mobilfunknetze in Deutschland

In Deutschland existieren aktuell drei eigenständige und fast vollständig flächendeckende Mobilfunknetze, die von der Deutschen Telekom, Telefónica Deutschland²⁴ und Vodafone Deutschland betrieben werden. Wie vergleichbar sind diese Mobilfunknetze? Um diese Frage zu beantworten, betrachten wir zunächst einige ausgewählte Eckdaten wie die Anzahl der Nutzer, die Anzahl der Antennenstandorte, sowie das den drei Netzbetreibern zur Verfügung stehende verfügbare Frequenzspektrum.

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) erfasst quartalsbezogen die Anzahl der aktiven SIM-Karten je Netzbetreiber. Demnach hatte im ersten Quartal 2021 die Deutsche Telekom rund 49,1 Mio., die Telefónica Deutschland rund 44,4 Mio. und die Vodafone Deutschland 58,4 Mio. SIM-Karten im Einsatz (Bundesnetzagentur 2021b).²⁵ Allerdings wird bei dieser Angabe kein Unterschied zwischen personenbezogenen oder maschinenbezogenen SIM-Karten gemacht. Laut BNetzA Jahresbericht waren Ende 2020 107,5 Mio. aktive SIM-Karten für den personenbezogenen Mobilfunk und 36,3 Mio. SIM-Karten für den maschinenbezogenen (M2M) Mobilfunk im Einsatz (Bundesnetzagentur 2021a). Da derzeit aber insbesondere der personenbezogene Mobilfunk größere Datenraten erfordert und damit den Netzausbau stärker beeinflusst, ist diese Angabe von Interesse. Dem Geschäftsbericht 2020 von Vodafone Deutschland ist zu entnehmen, dass das Unternehmen etwa 30,8 Mio. Mobilfunkkunden versorgt (Vodafone 2020).²⁶ Bei 107,5 Mio. personenbezogenen SIM-Karten in Deutschland 2020 entfallen also rein rechnerisch noch 76,7 Mio. SIM-Karten auf die Deutsche Telekom und Telefónica. Nimmt man das Verteilungsverhältnis beider Unternehmen bei der Gesamtzahl der SIM-Karten als Ausgangspunkt, so ergeben sich 40,3 Mio. Mobilfunkkunden (personengebundene SIM-Karten) für die Deutsche Telekom und 36,4 Mio. für Telefónica Deutschland. Damit nähern sich die Werte etwas an und man könnte argumentieren, dass die drei Netzbetreiber im Mittel 36 Mio. Mobilfunkkunden haben. Für Deutschland bedeutet diese Anzahl, dass theoretisch jeder Bürger über 1,3 aktive SIM-Karten verfügt. In der Realität gibt es etwas weniger Mobilfunknutzer als Einwohner (vgl. Berechnung von realen Nutzerzahlen in Kap. 3.1.5). Zudem verteilen sich die SIM-Karten auf unterschiedliche Endgeräte wie z.B. einfache Mobiltelefone, Smartphones, Tablets und Notebooks mit Mobilfunkadapter. Zum Vergleich, laut BNetzA waren im Jahr 2019 beispielsweise etwa 66 Millionen breitbandfähigen Smartphones im Einsatz (Bundesnetzagentur 2020b).

Um die Größe und Vergleichbarkeit der drei Netze weiter einschätzen zu können, wird die Anzahl der Antennenstandorte mit Mobilfunkanlagen und die Anzahl der Mobilfunkanlagen (synonym auch Basisstationen genannt) betrachtet. Nach Angaben der BNetzA wurden Ende 2020 in Deutschland an 83.703 Antennenstandorten insgesamt 224.555 Mobilfunkanlagen betrieben. Für das Jahr 2019 waren es 82.282 Antennenstandorte. Die genaue Anzahl der Antennenstandorte und Mobilfunkanlagen pro Netzbetreiber wird von der BNetzA leider nicht angegeben. Die Deutschen Telekom benennt im Geschäftsbericht 2020 eine Anzahl von rund 30.000 Antennenstandorten und erwähnt in einer Pressemitteilung vom Mai 2021 eine Anzahl von 32.000. Laut einer anderen Pressemitteilung verfügte Telefónica Deutschland Ende 2020 über 22.000 Antennenstandorte mit moderner 4G-Technologie (Streicher 2020) und über 26.000 Antennenstandorte insgesamt (Telefónica 2021b). Vodafone Deutschland verfügt über

²⁴ Zusammenschluss der Netze Telefónica / O2 und E-Plus

²⁵ Die Anzahl der aktiven SIM-Karten und Mobilfunkkunden wird in Statistiken synonym verwendet.

²⁶ Hier macht das UTAMO Projekt die Annahme, dass dies personengebundene SIM-Karten sind.

21.000 Antennenstandorte mit 4G-Technologie (Neuhetzki 2021) und etwas weniger als 26.000 Antennenstandorte insgesamt (Vodafone 2021). Die Angaben zeigen, dass hinsichtlich der Anzahl an Antennenstandorte Vodafone und Telefónica mit aktuell rund 26.000 sehr ähnlich aufgestellt sind und die Deutschen Telekom mit 32.000 Antennenstandorten etwas mehr Standorte ausgebaut hat. Auch diese Gegenüberstellung des Netzausbau am Beispiel der Anzahl an Antennenstandorten zeigt eine relative gute Vergleichbarkeit der drei Netzbetreiber.

Ein weiterer Aspekt bezüglich der Vergleichbarkeit der drei Netze ist das den Netzbetreibern zur Verfügung stehende Frequenzspektrum. Aktuell werden in Deutschland für den kommerziellen Mobilfunk Funkfrequenzen im Zentimeterwellenbereich von 700 MHz bis 3600 MHz genutzt.²⁷ Die Nutzung einzelner Funkfrequenzen war in der Vergangenheit meist direkt an eine spezifische Mobilfunktechnologie (2G/GSM, 3G/UMTS, 4G/LTE) geknüpft (für eine vertiefende Darstellung auch von Trends vgl. Kap. 3.1.4). Mit dem Übergang zur fünften Mobilfunkgeneration (5G) ändert sich diese direkte Zuordnung. So werden mit dem bis Ende 2021 geplanten Rückbau von 3G (UMTS-Varianten) diese Frequenzbänder als Träger für moderne Mobilfunktechnologien (4G/5G) frei. Das hat zur Folge, dass bestehende Antennenanlagen durch wenige, insbesondere softwareseitige Maßnahmen modernisiert und damit flexibel mit 4G oder 5G betrieben werden können.

Einen Überblick der aktuellen Frequenznutzung und künftiger Entwicklung zeigt die Tabelle 1 auf Basis von Daten der BNetzA mit Stand 2021. Die drei Netzbetreiber verfügen über ein relativ vergleichbares Spektrum, wobei die Deutsche Telekom in einzelnen Bändern größere Anteil hat. Diese Darstellung beinhaltet bereits die zu Anfang des Jahres 2019 versteigerten neuen 5G Frequenzen. Daher wird auch bereits die United Internet AG (Tochterunternehmen 1&1 Drillisch) mit aufgelistet, ein vierter Netzbetreiber, der nach Pressemitteilungen aus dem Februar 2021 in Kooperation mit Telefónica agieren wird (Roaming Vertrag), aber aus der Frequenzvergabe der BNetzA auch Auflagen zum Aufbau eigener Netzkapazitäten erfüllen muss (Kerkemann und Scheuer 2021). Potenzielle Randbedingungen und Auswirkungen der wichtige Frequenzvergabe im Zuge des Auslaufens von Bändern im Segment 800 MHz, 1800 MHz und 2600 MHz werden in Kapitel 3.1.4 ausführlicher erläutert.

Tabelle 1: Frequenzspektrum für Mobilfunknetze in Deutschland

Frequenzbereich	Anbieter	Spektrum	Netzstandard	Zuteilungsdauer
700 MHz	Telekom	2 × 10 MHz	LTE Band 28 für 2019 geplant, künftig auch 5G Band N28	31.12.2033
	Vodafone	2 × 10 MHz	Künftig 5G Band N28, LTE Band 28 möglich	31.12.2033
	Telefónica	2 × 10 MHz	Künftig 5G Band N28, LTE Band 28 möglich	31.12.2033
800 MHz	Telekom	2 × 10 MHz	LTE Band 20	31.12.2025
	Vodafone	2 × 10 MHz	LTE Band 20	31.12.2025
	Telefónica	2 × 10 MHz	LTE Band 20	31.12.2025
900 MHz	Telekom	2 × 15 MHz	GSM & LTE Band 8	31.12.2033

²⁷ Des Weiteren werden für die 5G-Anwendung industrieller Nutzer (Verticals) zusätzlich Funkfrequenzen im Bereich 3.700 bis 3.800 MHz bereitgestellt. Diese Anwendungen werden in der UTAMO-Studie aufgrund fehlender Daten nicht betrachtet.

Frequenzbereich	Anbieter	Spektrum	Netzstandard	Zuteilungsdauer
	Vodafone	2 × 10 MHz	GSM	31.12.2033
	Telefónica	2 × 10 MHz	GSM	31.12.2033
1500 MHz	Telekom	1 × 10 MHz (ungepaart)	LTE Band 32	31.12.2033
	Vodafone	1 × 10 MHz (ungepaart)	LTE Band 32	31.12.2033
1800 MHz	Telekom	2 × 30 MHz	LTE Band 3	31.12.2033, teilweise 31.12.2025
	Vodafone	2 × 25 MHz	GSM & LTE Band 3	31.12.2033
	Telefónica	2 × 20 MHz	GSM & LTE Band 3	31.12.2033, teilweise 31.12.2025
2100 MHz	Telekom	2 × 20 MHz	LTE Band 1 oder 5G	ab 01.01.2021
	Vodafone	2 × 20 MHz	LTE Band 1 oder 5G	ab 01.01.2021 (2 × 15 MHz), ab 01.01.2026 (2 × 5 MHz)
	Telefónica	2 × 10 MHz	LTE Band 1 oder 5G	ab 01.01.2021 (2 × 15 MHz), ab 01.01.2026 (2 × 5 MHz)
2600 MHz	1&1	2 × 10 MHz	LTE Band 1 oder 5G	ab 01.01.2026
	Telekom	2 × 20 MHz	LTE Band 7	31.12.2025
	Vodafone	2 × 20 MHz	LTE Band 7	31.12.2025
3400-3700 MHz	Telefónica	2 × 30 MHz	LTE Band 7	31.12.2025
	Telekom	90 MHz	5G Band N78	2040
	Vodafone	90 MHz	5G Band N78	2040
3700-3800 MHz	Telefónica	70 MHz	5G Band N78	2040
	1&1	50 MHz	5G Band N78	2040
	Industrie-unternehmen	100 MHz	5G Band N78	Vergabe erfolgte ab Q3/2019
26 GHz	offen	offen	5G Band N85	Vergabe offen
42 GHz	offen	offen	5G	Vergabe offen
66 GHz	offen	offen	5G	Vergabe offen

Der Vergleich bezüglich Mobilfunkkunden, Antennenstandorten und Frequenzspektrum zeigt eine relative Übereinstimmung der drei Netzbetreiber. Die größte Abweichung mit einem durchschnittlich etwa 15 % höheren Wert liegt bei der Deutsche Telekom.

Vor diesem Hintergrund liegt dem UTAMO Sachbilanzmodell der methodische Ansatz zugrunde, ein **generisches deutsches Mobilfunknetz** abzubilden und dieses im Anschluss mit drei zu multiplizieren, um die Umweltwirkung der bundesweiten Mobilfunknetze insgesamt zu berechnen. Dieser Ansatz eines generischen Modells hat aus Sicht der Zielstellung des Projektes folgende Vorteile:

- ▶ Es ist neutral und vermeidet die fortlaufende Berücksichtigung individueller Geschäftsentscheidungen der Netzbetreiber (z.B. spezifische Gerätebeschaffung)
- ▶ Es reduziert die Granularität und benötigte Datenvielfalt (Zeit- und Kostenintensität)
- ▶ Es fokussiert auf wesentliche Größenordnungen, theoretische Prinzipien sowie die primären Faktoren und Wechselwirkungen (Bestand, Technik, Betrieb).
- ▶ Es lässt sich jederzeit auf individuelle Mobilfunknetze und Szenarien adaptieren.

Diesen Vorteilen steht eine Ungenauigkeit gegenüber, die bewusst in Kauf genommen wird. Die Ungenauigkeit resultiert beispielsweise aus der betreiberspezifischen Standortkonfiguration. Da diese Daten aber, wie noch gezeigt wird, nur begrenzt den Datenbanken der BNetzA zu entnehmen sind, reflektiert das generische Modell in gewisser Weise bereits die Datenbasis. Allerdings kann das UTAMO Modell jederzeit mit spezifischen Daten der einzelnen Netzbetreiber parametrisiert werden, um noch genauere Ergebnisse zu berechnen. Da die initiale Zielstellung des UTAMO Projektes die Entwicklung eines Werkzeuges zur Umweltbewertung von Mobilfunknetzen ist, überwiegen die Vorteile eines Sachbilanzmodells welches generisch angelegt und spezifisch parametrisiert werden kann.

Der erste Baustein des Sachbilanzmodells ist das sogenannte Funkzellenverteilungsmodell (*Radio-Cell-Distribution Model, RCD*). Es hat die Aufgabe, den Bestand, die Verteilung und technische Ausstattung der in Deutschland betriebenen Funkzellen in einer ausreichenden Granularität (generisch) zu quantifizieren.

2.1.2 Konzept der Modellierung des Funkzellenverteilungsmodells

Für die Bewertung der absoluten Umweltwirkung werden insbesondere Daten zu den Antennen- bzw. Transceiver-Konfigurationen, den beschalteten Mobilfunkgenerationen je Frequenzband, sowie zu den typischen Zellgrößen und frequenzabhängigen Sendeleistungen benötigt. Da diese Parameter u.a. in Abhängigkeit des Einsatzortes variieren, werden, wie schon in anderen Energiemodellen (vgl. Kap. 1.4.1), mehrere Antennenstandortkategorien (ASK) in der Ausprägung von Stadt bis Land unterschieden. Zudem wird ein prinzipieller Unterschied zwischen cm-Wellen-basierten Makrozellen und neuen mm-Wellen-basierten Mikrozellen gemacht, gleichwohl in der Realität eher technologisch und von der Verteilung her hybride Funkzellen existieren.

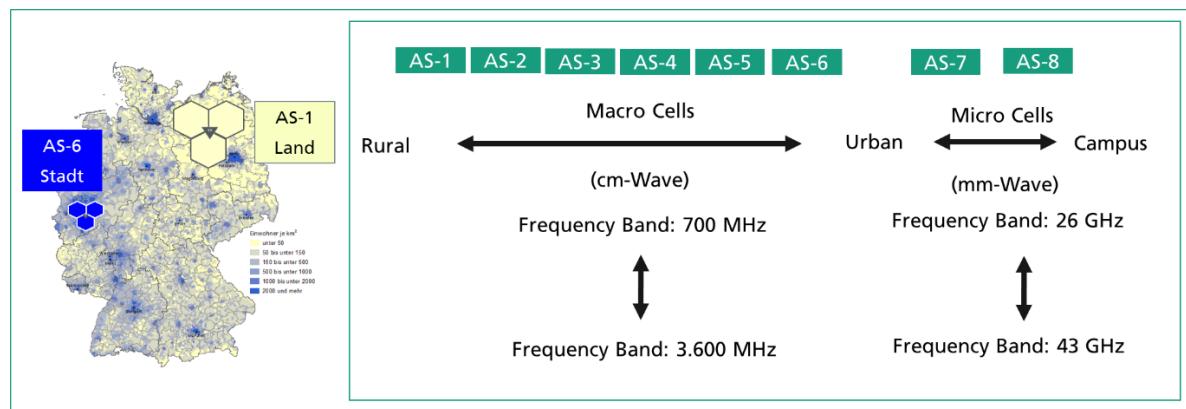
Das Funkzellenverteilungsmodell geht von der grundlegenden Idee aus, dass die flächenmäßige Funkzellenverteilung direkt mit der Bevölkerungsdichte korreliert. In Gebieten mit einer hohen Bevölkerungsdichte sind danach die Funkzellen kleiner und es werden flächenbezogen mehr Funkzellen bzw. Antennenstandorte benötigt. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte in einem städtischen Gebiet steigt der Bedarf an Funkressourcen, um eine definierte Datenrate für alle Netzteilnehmer sicherzustellen. Gleichzeitig bestimmen die Anzahl und Konfiguration der Funkzellen im Umkehrschluss die Flächenabdeckung und Dienstgüte des Mobilfunknetzes in einem Gebiet. Um diesen Zusammenhang in einer ausreichenden Granularität abzubilden, wurde für das UTAMO Sachbilanzmodell der methodische Ansatz gewählt, das generische Mobilfunknetz anhand unterschiedlicher Antennenstandortkategorien zu modellieren. Die

Standortkategorien definieren die Charakteristik der Funkzelle, die Transceiver-Konfiguration und andere Parameter (ausführliche Darstellung siehe unten). Es werden insgesamt acht Antennenstandortkategorien (ASK 1 bis ASK 8) definiert, die folgende Grundmerkmale aufweisen:

- ▶ ASK 1 und ASK 2: sehr große Makrozellen im ländlichen Bereich (Rural) mit einem größeren Anteil von Frequenzbändern unter 1 GHz.
- ▶ ASK 3 und ASK 4: große Makrozellen im Übergangsbereich von Stadt und Land (Suburban) mit einer hohen Spanne an verwendeten Frequenzbändern.
- ▶ ASK 5 bis ASK 6: mittelgroße und kleinere Makrozellen im städtischen Bereich (Urban) mit einem größeren Anteil von Frequenzbändern über 2 GHz.
- ▶ ASK 7: kleine Outdoor-Mikrozellen in Unterstützung von städtischen Hotspots und Verkehrswegen im (erwarteten) Frequenzband von 26 bis 28 GHz.
- ▶ ASK 8 kleine Indoor-Mikrozellen zur Unterstützung von primär industriellen Anwendungen.

Die nachstehende Abbildung 20 zeigt nochmals schematisch die inhaltlichen Bestandteile des Funkzellenverteilungsmodells einschließlich der sechs Antennenstandortkategorien für die Makrozellen, die sich vom ländlichen zum städtischen Raum erstrecken, sowie den zwei Standortkategorien für die Mikrozellen. In der Vertikalen werden die Frequenzbänder aufgelistet, die sich über alle Standortkategorien erstrecken. Das Modell steht in engster Wechselwirkung mit dem Funkzugangsnetzmodell (vgl. Kap. 2.2.1) und erschließt sich daher ggf. erst nach vollständigem Lesen beider Kapitel.

Abbildung 20: Bestandteile und Struktur des Funkzellenverteilungsmodells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Festlegung des geografischen Flächenbezuges

Die Festlegung eines geografischen Flächenbezuges ist ein erster Schritt in der Modellbildung. Das RCD-Modell soll in der finalen Ausprägung die Mobilfunknetze in Deutschland möglichst realitätsnah abbilden. Die geografische Bezugsfläche ist somit die Grundfläche von Deutschland. Die Fläche Deutschlands beträgt 357.582 km² (Statistisches Bundesamt 2019a).

Unter der Annahme, dass die flächennutzungsbezogene Einwohnerdichte mit der Mobilfunknutzerdichte und damit der Netzdichte korreliert²⁸, können sowohl die Einwohnerdichte als auch Flächennutzungskategorien zur Modellierung der Netzdichte bzw. der

²⁸ damit sind insbesondere die Verteilung und Auslegung der Antennenstandorte gemeint

durchschnittlichen Verteilung der Antennenstandorte genutzt werden. Die Tabelle 2 zeigt die nutzungsbezogene Aufschlüsselung der Gesamtfläche Deutschlands laut Angaben des Statistischen Bundesamtes.

Tabelle 2: Flächennutzung in Deutschland (Stand 31.12.2017)

Gegenstand	Fläche in km ²	Anteil in %
Landwirtschaftliche Fläche	182.009	50,9
Waldfläche	106.202	29,7
Wasserfläche	8.224	2,3
Sonstige Flächen	11.443	3,2
Siedlungs- und Verkehrsflächen	49.346	13,8
davon Siedlung	39.334	11,0
davon Verkehr	10.012	2,8
Gesamtfläche Deutschland	357.582	100,0

Quelle: Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2019a).

Demnach haben Siedlungs- und Verkehrsflächen mit knapp 50.000 km² einen Flächenanteil von 13,8 Prozent. Es wird in der weiteren Modellbildung davon ausgegangen, dass die Netzdichte (Anzahl und Art von Antennenstandorten) hier deutlich höher ausfällt als in der verbleibenden Land- und Wasserfläche. Um diese Verteilung zu überprüfen, wird im nächsten Schritt die flächenmäßige Einwohnerverteilung betrachtet. Für eine angemessene Granularität des Modells wird das Gemeindeverzeichnis des Statistischen Bundesamtes Statistisches Bundesamtes (2019b) mit 11.039 Datensätzen auf Gemeindeebene angewendet.

Auf der Basis von Schwellwerten für die Bevölkerungsdichte wurden Kategorien für die Flächennutzung festgelegt. Laut der Europäischen Kommission (European Commission 2018) liegt die Grenze für Gebiete mit mittlerer Besiedlungsdichte bei 300 Einwohnern pro Quadratkilometer (im Folgenden als Kleinstadt bezeichnet). Von dicht besiedelten Gebieten spricht man demnach ab 1500 Einwohnern pro Quadratkilometer oder mehr (im Folgenden als Stadt bezeichnet). Alles darunter wird als ländliches Gebiet betrachtet, wobei in diesem immer noch 35 % der deutschen Bevölkerung leben. Die Flächen für Verkehrswege werden separat betrachtet, da dort zwar keine Menschen leben, aber aufgrund der hohen Nutzung und der Geschwindigkeit der Teilnehmer ein engmaschigeres Mobilfunknetz von Nöten ist als beispielsweise in ländlichen Regionen. Die aus dieser Korrelation resultierende Flächenverteilung zeigt die Tabelle 3.

Tabelle 3: Einwohner- und Flächenverteilung (Gemeindeebene)

Flächen-kategorie	Schwell-wert [EW/km ²]	Anzahl Einwohner [EW]	Bevölkerungs-dichte [EW/km ²]	Bevölkerungs-anteil [%]	Fläche [km ²]	Flächen-anteil [%]
Verkehrs-wege		0	0	0%	10.012	2,8%
ländliches Gebiet	0	29.058.857	98	35%	287.121	80,3%

Flächen-kategorie	Schwell-wert [EW/km ²]	Anzahl Einwohner [EW]	Bevölkerungs-dichte [EW/km ²]	Bevölkerungs-anteil [%]	Fläche [km ²]	Flächen-anteil [%]
Kleinstadt	300	31.547.943	616	38%	51.246	14,3%
Stadt	1500	22.412.413	2.436	27%	9.202	2,6%
Deutschland		83.019.213	232	100%	357.582	100,0%

Die Verkehrswege beanspruchen 2,8 % der Fläche, sind aber nicht bevölkert. Dem ländlichen Gebiet sind 35 % der deutschen Bevölkerung und 80,3 % der gesamtdeutschen Fläche zuzuordnen. Für die Kleinstädte sind es jeweils 38 % und 14,3 % und in den Städten 27 % und 2,6 %.

Trotz der relativ hohen Auflösung auf Gemeindeebene mit über 11.000 Datensätzen können lokale Schwankungen in der Bevölkerungsdichte nicht abgebildet werden. So ist beispielsweise die Stadt Berlin nur als Ganzes mit einer mittleren Bevölkerungsdichte angegeben, sodass Unterschiede zwischen einzelnen Bezirken nicht repräsentiert sind, obwohl diese sehr drastisch ausfallen können (z.B. der Vergleich Friedrichshain-Kreuzberg mit 14.404 EW/km² zu Treptow-Köpenick mit 1.625 EW/km² (Stand: 31.12.2019) (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2020)). Diese sehr feingliedrigen Unterschiede zwischen beispielsweise einzelnen Stadtbezirken, oder einem Stadtpark und einem dichtbesiedelten Wohngebiet können also in dem RCD-Modell nicht berücksichtigt werden. Eine zusätzliche manuelle Einbindung der Bezirke ausgewählter Großstädte in das Modell wäre aber theoretisch möglich. Für die Aufgabenstellung von UTAMO wird die gewählte Granularität als ausreichend beurteilt.

2.1.3 Berechnung des Funkzellenverteilungsmodells

Der Berechnung des Funkzellenverteilungsmodells für Deutschland basiert auf folgenden Parametern und Formeln:

- Es wird aufgrund der eingangs dargestellten Situation von bundesweit derzeit drei Mobilfunknetzen (Provider) ausgegangen. Da diese drei Netze relativ ähnlich sind, wird ein Durchschnitt gebildet und zur Vereinfachung im Sachbilanzmodell mit drei gleichen generischen Mobilfunknetzen weitergerechnet. Das generische Mobilfunknetz hat eine bundesweite Flächendeckung. Es besteht je Bezugsjahr (Szenario) aus einer festen Anzahl an Antennenstandorten (AS) und Mobilfunknutzern (Usern). Die Antennenstandorte sind in sechs Makro-Standortkategorien (Makro ASK) unterteilt. Ein Standort besteht (wie in Kap. 0 ausführlich beschrieben wird) aus je drei generischen 120° Funkzellen, die standortspezifisch konfiguriert werden (Art und Anzahl an frequenzspezifischen Transceivern). Die Anzahl der Nutzer und Antennenstandorte pro Provider können hinsichtlich der gewählten Szenarien für die Jahre 2019, 2022, 2026 und 2030 entsprechend den analysierten Trends und abgeleiteten Annahmen in den Werten variieren.

Daraus ergibt sich für ein Bezugsjahr:

- User/Provider_{gesamt}
- AS/Provider_{gesamt}

- Aus diesen zwei Größen ergibt sich eine neue Größe, die für jede der sechs Makro-AS-Kategorien als konstant angenommen wird:

$$\text{User/AS} = \frac{\text{User/Provider}_{\text{gesamt}}}{\text{AS/Provider}_{\text{gesamt}}} = \text{const.}$$

- Entsprechend der Einteilung der Antennenstandortkategorien ergibt sich für jede der sechs Makro-AS-Kategorien:

$$\rightarrow \text{User/Provider}_{\text{AS-Kategorie}}$$

- Für eine AS-Kategorie berechnet sich die Anzahl an AS eines Providers dann nach:

$$\text{Anzahl}_{\text{AS}} = \frac{\text{User/Provider}_{\text{AS-Kategorie}}}{\text{User/AS}}$$

- Nun ist die Anzahl an AS in einer AS-Kategorie und die Fläche der AS-Kategorie bekannt. Über die Annahme, dass ein AS mit drei 120°-Sektoren / Zellen ausgestattet ist, kann die Sektor- / Zellfläche berechnet werden. Dazu werden die Sektoren / Zellen vereinfacht als ein flächenfüllendes, hexagonales Raster beziehungsweise Netz betrachtet. Die Zellgröße beschreibt die maximale Reichweite der Antennen in der Zelle. Sie entspricht der längsten Diagonale in einem regulären Sechseck (doppelter Umkreisradius) und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Zellfläche} = \frac{\text{Fläche}_{\text{AS-Kategorie}}}{3 * \text{Anzahl}_{\text{AS}}}$$

$$\text{Zellgröße} = 2 * \sqrt{\frac{2 * \text{Zellfläche}}{3 * \sqrt{3}}}$$

- Die Zellgröße beeinflusst im weiteren Modell die Sendeleistung. In der Realität bestimmt die Transceiver-spezifische Sendeleistung (Frequenzband, Anzahl und Richtwirkung der Antennen) neben weiteren Aspekten die Größe der Funkzelle. Es besteht also eine gewisse Wechselbeziehung zwischen der durchschnittlichen Zellgröße und der Transceiver-Konfiguration in Stadt und Land. Da das RCD-Modell auf der Festlegung von AS-Kategorien beruht, wird im Sachbilanzmodell etwas pragmatisch die Sendeleistung einzelner frequenzabhängiger Transceiver aus der Funkzellengröße abgeleitet und als Eingangsgröße in das Funkzugangsnetzmodell verwendet (vgl. Abbildung 22).

Die Tabelle 4 zeigt beispielhaft für das Referenzjahr 2019 die Basisparameter und Daten für das Funkzellenverteilungsmodell der AS-Kategorien eins bis sechs. Die Berechnung der anzahlmäßigen Standortverteilung und der Zellgrößen bzw. durchschnittlichen Reichweite erscheint vor dem Hintergrund verfügbarer Literaturdaten und im exemplarischen Abgleich mit der EMF-Karte der BNetzA²⁹ plausibel.

²⁹ EMF-Karte der BNetzA: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/TK/Funktechnik/EMF/start.html>

Tabelle 4: Basisparameter und Daten des Funkzellenverteilungsmodells für Referenzjahr 2019

Standortkategorie	Einheiten	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6
Standort- charakterisierung		ländlich	ländlich	vor- städtisch	vor- städtisch	städtisch	städtisch
Zellart		Makro	Makro	Makro	Makro	Makro	Makro
min. Bevölkerungsdichte	Einwohner/ km ² (>=)	0	150	300	750	1.200	2.700
max. Bevölkerungsdichte	Einwohner/ km ² (<)	150	300	750	1.200	2.700	20.000
Bevölkerungsanteil	%	19,03%	15,92%	20,62%	12,24%	21,64%	10,55%
Nutzer pro Provider	U	4.440.329	3.715.394	4.811.129	2.854.903	5.048.810	2.462.768
Flächenanteil	km ²	233.428	63.568	37.457	10.696	9.976	2.457
Flächenanteil	%	65,28%	17,78%	10,47%	2,99%	2,79%	0,69%
Zellen (120°)	C	15.468	12.943	16.760	9.945	17.588	8.579
Nutzer pro Zelle	U/C	288	288	288	288	288	288
Antennenstandorte	AS	5.156	4.314	5.587	3.315	5.863	2.860
Nutzer pro Antennenstandort	U/AS	861	861	861	861	861	861
Zellgröße (durchschnittliche Reichweite)	km	4,82	2,75	1,85	1,29	0,93	0,66

2.1.4 Transceiver-Konfiguration und Sendeleistung der Antennenstandorte

Mit der Unterscheidung der acht AS-Kategorien und der flächenbezogenen Verteilung der Antennenstandorte wurde ein erster Baustein des Sachbilanzmodells geschaffen. Nun muss die logische Verknüpfung zum technischen Funkzugangsnetzmodell erfolgen. Folgende Parameter dienen als Schnittstellen zwischen dem RCD-Modell und dem RAN-Modell:

- ▶ Die Transceiver-Konfiguration, d.h. die Art und Anzahl am AS zum Einsatz kommenden Frequenzbändern
[Zusätzlich wird in diesem Zusammenhang auch die typischerweise zum Einsatz kommende Mobilfunkgeneration für die Berechnung beispielweise der Datenrate festgelegt, da diese zumindest teilweise frequenzspezifisch ist.]
- ▶ Die durchschnittliche Sendeleistung pro Frequenzband in Abhängigkeit der AS-Kategorie bzw. Zellgröße
- ▶ Die Höhe der Sender bzw. Antennenanlagen
[Diese Angaben sind u.a. auch Eingangsparameter für die Umweltbewertung der Herstellungsphase der Antennenmasten und Türme]

Die Unterscheidung der pro AS-Kategorie zum Einsatz kommenden Frequenzbänder ist für die Berechnung des absoluten Energiebedarfs und der relativen Energieeffizienz wichtig. Das

Frequenzband bestimmt Faktoren wie beispielsweise die Kanalbandbreite (Kapazität), die prinzipielle Signalausbreitung (Reichweite) und aufgrund technologischer Aspekte auch indirekt den Wirkungsgrad des Leistungsverstärkers. Das Frequenzband definiert im Sachbilanzmodell maßgeblich die angenommene Sendeleistung.

Die EMF-Standortdatenbank der BNetzA lieferte im Rahmen des UTAMO Projektes die Datenbasis für die Konfiguration der Antennenstandorte. Insgesamt wurden 309 Funkanlagendatenblätter eingesehen, wobei ein Datenblatt einen physischen Antennenstandort erfasst. Die Auswahl der Datensätze erfolgte anhand der im RCD-Modell definierten sechs Makrozell-Antennenstandortkategorien und der festgelegten minimalen und maximalen Bevölkerungsdichte pro AS-Kategorie (siehe nochmals Tabelle 4). Um nun exemplarische Antennenstandorte aus der EMF-Standortdatenbank auszuwählen, wurde die bundesdeutsche Gemeindestatistik nach Einwohnerdichte und AS-Kategorie geordnet, sodass eine Liste aller Gemeinden pro AS-Kategorie vorlag. Im Anschluss wurden etwa 50 Datenblätter pro AS-Kategorie nach Postleitzahl ausgewählt. Im nächsten Schritt wurde bei der Auswahl auf eine weitgehend gleiche Verteilung der Antennenstandorte auf die Netzbetreiber geachtet, um einen repräsentativen Marktquerschnitt abzubilden. Auch wurde darauf geachtet, einige Standorte auszuwählen, an dem zwei oder alle drei Netzbetreiber vertreten waren.³⁰

Die Datenblätter der EMF-Standortdatenbank umfassen eine Vielzahl von Parametern, die nicht alle relevant für das Sachbilanzmodell sind. Für die statistische Auswertung wurden folgenden Parameter herangezogen:

- ▶ Ort der Funkanlage: Diese Information erlaubte, wie bereits erläutert, initial die Zuordnung des Datensatzes zu den im Modell definierten AS-Kategorien.
- ▶ Art und Anzahl der Funksysteme und entsprechender Betriebsfrequenz: Diese Information zur Transceiver-Konfiguration ist essentiell und bildet die Basis für weitere Werte und Zuordnungen von Parametern.
- ▶ Hauptstrahlrichtung und Anzahl der Funkkanäle: Dadurch wird die Anzahl und Größe der Sektoren pro Antennenstandort gegeben.
- ▶ Montagehöhe der Antennenanlagen, Antennengewinn und Verluste am Antennenausgang: Diese Werte dienen in Kombination mit einem Dämpfungsmodell zur Bestimmung bzw. Überprüfung der theoretischen Zellgröße.
- ▶ Sendeleistung am Antennenausgang (ERP) pro Kanal: Dieser maximale Wert unterstützt die Festlegung von Annahmen zur realen, operativen Sendeleistung.

Im methodischen Vorgehen wurden die Angaben der 309 Datenblätter tabellarisch erfasst und den sechs Standortkategorien zugeordnet. Im zweiten Auswertungsschritt wurden die Durchschnittswerte pro Standortkategorie und Frequenzband gebildet. Eine Unterscheidung der Angaben nach dem Frequenzband wurde, wie bereits mehrfach erwähnt, gewählt, da die Zellgröße und Sendeleistung unmittelbar mit der Sendefrequenz korreliert. Die Auswertung der exemplarischen Datenblätter der EMF-Standortdatenbank kann den nachfolgenden Tabellen und Erläuterungen entnommen werden.

Die nachstehende Tabelle 5 zeigt die prozentuale Verteilung der Frequenznutzung in den einzelnen AS-Kategorien. Dieser Datensatz ist für die AS-spezifische Transceiver-Konfiguration

³⁰ Die Datenbank erfasst die Antennenanlagen entsprechend der Netzbetreiber. Für das Projekt wurde auch einer initialen Datenanalyse alle für das UTAMO-Modell verwendeten Daten anonymisiert und aggregiert, sodass einzelne Datensätze nicht nachvollziehbar sind oder einem Netzbetreiber zugeordnet werden kann.

im Sachbilanzmodell ein wichtiger Eingangswert. Die Verteilung zeigt wenig überraschend, dass die niedrigen Frequenzen vermehrt in den flächenbezogenen, größeren Funkzellen auf dem Land und die höheren Frequenzen anteilig mehr in der Stadt genutzt werden. Dennoch wird in allen AS-Kategorien fast das gesamte zur Verfügung stehende Frequenzspektrum genutzt, um eine höchstmögliche Kapazität bereitzustellen.

Tabelle 5: Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank – Frequenznutzung

Frequenznutzung							Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6	
700	0,8%	-	-	-	-	-	
800	28,9%	25,8%	21,9%	22,3%	18,6%	13,6%	
900	35,5%	30,5%	29,4%	25,5%	22,0%	20,1%	
1500	-	0,7%	0,4%	-	-	-	
1800	11,6%	16,6%	19,3%	19,1%	19,5%	22,7%	
2100	17,4%	25,8%	28,1%	26,6%	31,4%	26,4%	
2600	5,8%	0,7%	0,9%	6,4%	8,5%	16,8%	
3500	-	-	-	-	-	0,4%	

Tabelle 6 zeigt nach Frequenzband unterschieden die Anzahl der Funkkanäle pro Antennenstandort bzw. 120° Sektor. Die Anzahl der Transceiver (Funkkanäle) pro Frequenz und Standort ist ein sehr aufschlussreicher Datensatz und für das Sachbilanzmodell einer der wichtigsten Parameter. Grundsätzlich nimmt die Anzahl der Funkkanäle ausgehend von 12 in der ländlichen Kategorie ASK 1 in Richtung Stadt in der Kategorie ASK 6 mit 18 schrittweise zu. Gleichzeitig ist festzustellen, dass in den mittel und weniger stark besiedelten Gebieten, die Antennenstandorte sehr gleichmäßig konfiguriert sind. Dabei gibt es eine sehr hohe Basisabdeckung mit 2G in den 900 MHz und teilweise auch 1800 MHz Bändern. Die 4G Abdeckung erfolgt mit dem wichtigen 800 MHz Band und wird durch höhere Frequenzen nochmals im Nahbereich verdichtet. Einzelne Frequenzbänder werden je Betreiber etwas unterschiedlich genutzt. Auch ist zu berücksichtigen, dass beispielsweise auslaufende Frequenzen bzw. auch auslaufende Mobilfunktechnologien (3G) von den Netzbetreibern teilweise unterschiedlich an den Standorten verwendet werden und die Auswertung der BNetzA-Datenbank einen Zeitstempel trägt. Änderungen in der statistischen Verteilung entstehen natürlich mit der Zeit. Dennoch wird die Datenlage als hinreichend genau für das Referenzszenario beurteilt.

Tabelle 6: Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Funkkanäle (gemittelt)

Anzahl TRX [#]							Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1 [#]	ASK 2 [#]	ASK 3 [#]	ASK 4 [#]	ASK 5 [#]	ASK 6 [#]	

Anzahl TRX [#]					Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309	
700	0,07	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
800	3,44	3,42	2,73	3,11	2,54	1,86
900	3,40	3,60	3,13	2,54	2,92	2,68
1500	k. A.	0,13	0,11	k. A.	k. A.	k. A.
1800	1,89	3,56	4,17	4,21	4,41	5,88
2100	2,16	3,33	3,69	3,46	5,21	4,30
2600	1,47	0,06	0,12	0,82	2,77	2,84
3500	k. A.	0,01				
Summe (AS):	12	14	14	14	18	18
Summe (120°):	4	5	5	5	6	6

Auf Basis der hier dargestellten Daten wird für das Sachbilanzmodell eine generische Transceiver-Konfiguration je AS-Kategorie durch Rundung der Werte aus Tabelle 6 vorgenommen. Die nachstehende Tabelle 7 zeigt die Annahmen für das Referenzszenario 2019. Insgesamt wurden die Anzahl der Transceiver pro AS-Kategorie entsprechend den Meridianwerten etwas abgerundet. Gleichzeitig wird für das Szenario 2022 eine etwas stärkerer Zuwachs prognostiziert, der den sich zwischen 2019 und 2021 abzeichnenden Trend besser abbildet (vgl. Kap. 3.1).

Tabelle 7: Gerundete Transceiver-Konfiguration für das Referenzjahr 2019

TRX [#]					Referenz	2019
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1 [#]	ASK 2 [#]	ASK 3 [#]	ASK 4 [#]	ASK 5 [#]	ASK 6 [#]
700	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
800	3,00	3,00	2,50	3,00	2,50	1,50
900	3,00	3,50	3,00	2,50	2,50	2,50
1500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1800	1,50	3,50	4,00	4,00	4,00	5,50
2100	2,00	3,00	3,50	3,00	5,00	4,00
2600	1,00	0,00	0,00	0,50	2,50	2,50
3500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe:	10,50	13,00	13,00	13,00	16,50	16,00

Ein letzter Parameter in der Verknüpfung des RCD-Modells mit dem RAN-Modell ist die typische Sendeleistung pro Transceiver. Die in der Funkanlagendatenbank angegebene Sendeleistung pro

Kanal am Senderausgang stellt bei näherer Betrachtung scheinbar einen Maximalwert dar. Dieser Eindruck wurde in Gesprächen mit der BNetzA auch bestätigt. Zur Illustration zeigt Tabelle 8 die aus den Datenblättern gemittelten Sendeleistung pro AS-Kategorie und Frequenzband. Zunächst fällt auf, dass die Sendeleistung innerhalb eines Frequenzbandes über alle AS-Kategorien vergleichsweise wenig variiert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auf dem Land eine größere Reichweite erzielt und in der Innenstadt die Bebauung und die damit einhergehende Signaldämpfung kompensiert werden soll. Einen gewissen Einfluss auf den Durchschnittswert hat die individuelle Nutzung und Einstellung der Antennensysteme durch die Netzbetreiber. Große Unterschiede wie beispielsweise beim 2.600 MHz Band sind auf die Einsatzweise und sicherlich auch Standortbesonderheiten zurückzuführen. Bei der Auswertung der Datenblätter konnte zumindest teilweise festgestellt werden, dass zwei Netzbetreiber tendenziell Maximalwerte angeben und ein Netzbetreiber eher realistische Werte angibt, die der Standortcharakteristik (Link-Budget) entsprechen. Die Angabe von maximalen Werten der Gerätetechnik hat zur Folge, dass am Standort die Grenzwerte der elektromagnetischen Verträglichkeit ausgeschöpft werden könnten. Damit wird die Möglichkeit eingeschränkt, dass ein anderer Netzbetreiber an dem Standort tätig wird. Wenn nun der am Standort bereits tätige Netzbetreiber seine Antennensysteme weiter aufrüstet, werden die Angaben zu den Sendeleistungen sukzessive auf realistische Werte herabgesetzt.

Tabelle 8: Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank – Sendeleistung

(max.) Sendeleistung [W]							Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309	
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1 [W]	ASK 2 [W]	ASK 3 [W]	ASK 4 [W]	ASK 5 [W]	ASK 6 [W]	Mittelwert:	Median:
700	160,00	k. A.	160	160				
800	73,18	70,60	64,62	58,13	52,90	67,09	64	66
900	131,21	137,79	133,79	127,64	128,24	136,76	133	133
1500	k. A.	60,00	60,00	k. A.	k. A.	k. A.	60	60
1800	75,89	87,33	70,84	73,02	75,28	88,75	79	76
2100	81,91	84,90	90,04	87,34	78,83	100,44	87	86
2600	70,46	104,20	68,50	104,20	52,46	98,80	83	85
3500	k. A.	200,00	200	200				

Da Literaturangaben typischerweise relativ konstante Sendeleistungen von Mobilfunkanlagen im Bereich von 20 Watt, 40 Watt und 60 Watt (selten 80 Watt) angeben, sind die in den Datenblättern ausgewiesene Werte durchschnittlich etwa doppelt so hoch. Reale Angaben standen für das UTAMO Projekt nicht zur Verfügung.

Daher wurden auf Basis der soeben dargestellten Situation vereinfachte Annahmen getroffen. Die Annahmen wurden durch Beispielrechnungen mit sogenannten Link-Budget Rechnern³¹, welche in Abhängigkeit der Frequenz, Kanalbandbreite, des Antennengewinns, der Sendeleistung, etc. für eine gute Verbindung noch notwendige Pegel unter wiederum der

³¹ Beispielsweise der Link-Budget Rechner von 5G Tools for RF Wireless: <https://5g-tools.com/5g-nr-link-budget-calculator/>

Berücksichtigung von Zellgröße, Bebauungs- und Vegetationsgraden, etc. kalkuliert. Des Weiteren wurden Anforderungen an eine typische Außenbereichsabdeckung (*Outdoor Coverage*) und eine Innenabdeckung (*Indoor Coverage*) berücksichtigt.³² Die Berechnungen zeigten - wenig überraschend - große Unterschiede in den unterschiedlichen Frequenzbereichen sowie stärker in der Außen- und Innenabdeckung. Ein letzter, technischer Aspekt bezüglich der Sendeleistung betrifft den Umstand, dass die Transceiver in Abhängigkeit ihrer Technologie eine gewisse Wirkungsgradcharakteristik aufweisen. Die meisten Leistungsverstärker in den Transceivern haben einen optimalen Arbeitspunkt, der nur eine geringe Variation bei der Ausgangsleistung zulässt, ohne dass der Wirkungsgrad stark abfällt. Daher bleibt die Sendeleistung im Mittel relativ konstant, da es keinen Sinn macht, die Sendeleistung außerhalb der Verstärkerparameter dynamisch anzupassen.

Die getroffenen Annahmen zur typischen Sendeleistung zeigen die Tabelle 9 und Tabelle 10. Die Werte bilden eine Matrix, die in das RAN-Modell integriert wird. Die Matrix erlaubt in gewisser Weise die energetischen Veränderungen abzubilden, die sich aus einer steigenden Anzahl an Antennenstandorten ergeben, da bei den hierbei entstehenden kleineren Funkzellen, die durchschnittliche Sendeleistung etwas abnimmt.

Tabelle 9: Annahme zur typischen Sendeleistung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im ländlichen Raum

(typ.) Sendeleistung in Abhängigkeit von Trägerfrequenz und Zellgröße [W]							ASK 1-3 (ländlicher Raum)				
Trägerfrequenz	5000 m	3613 m	2610 m	1886 m	1362 m	984 m	711 m	514 m	371 m	268 m	194 m
700	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0	18,0	16,0	14,0	11,0
800	28,0	28,0	25,0	25,0	22,0	20,0	20,0	18,0	16,0	14,0	13,0
900	35,0	35,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0	16,0
1500	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0	18,0	16,0	14,0
1800	32,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0	18,0	16,0
2100	32,0	32,0	32,0	28,0	28,0	25,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0
2600	35,0	35,0	32,0	32,0	28,0	28,0	25,0	25,0	25,0	22,0	20,0
3500	50,0	50,0	45,0	45,0	40,0	40,0	35,0	35,0	32,0	32,0	28,0
[MHz]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]

³² Siehe zu dem Stand der Standardisierung von Mobilfunk-Dämpfungsmodellen (Tataria et al. 2021).

Tabelle 10: Annahme zur typischen Sendeleistung unterschiedlicher Trägerfrequenzen im städtischen Raum

(typ.) Sendeleistung in Abhängigkeit von Trägerfrequenz und Zellgröße [W]							ASK 4-6 (städtischer Raum)				
Trägerfrequenz	5000 m	3613 m	2610 m	1886 m	1362 m	984 m	711 m	514 m	371 m	268 m	194 m
700	35,0	35,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0	14,0
800	35,0	35,0	32,0	32,0	28,0	25,0	25,0	22,0	20,0	18,0	16,0
900	45,0	45,0	40,0	35,0	35,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	20,0
1500	40,0	35,0	35,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0	18,0
1800	40,0	40,0	35,0	35,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0	22,0	20,0
2100	40,0	40,0	40,0	35,0	35,0	32,0	32,0	28,0	28,0	25,0	22,0
2600	45,0	45,0	40,0	40,0	35,0	35,0	32,0	32,0	32,0	28,0	25,0
3500	63,0	63,0	56,0	56,0	50,0	50,0	45,0	45,0	40,0	40,0	35,0
[MHz]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]

2.1.5 Lastprofil und Nutzungsmuster

Für die Berechnung des Energiebedarfs der Antennenstandorte würde unter heutigen Bedingungen die Berücksichtigung eines Lastprofils bzw. eines Nutzungsmusters nur bedingt notwendig sein, da viele technische Systemkomponenten nicht lastadaptiv sind. Lastadaptiv bedeutet, dass die elektrische Leistungsaufnahme beispielsweise in Abhängigkeit der zeit- und raumbezogenen Auslastung der Funkzelle variiert. Idealtypische würden dabei sowohl die analogen Funkkomponenten als auch die digitalen Signalverarbeitungskomponenten auf die geänderten Lastbedingungen durch eine elektrische Leistungsanpassung reagieren. Ein weiteres Merkmal eines lastadaptiven Technikverhaltens sind auch z.B. verschiedene Betriebszustände (*Power Modes*). Diese Betriebszustände sind durch ein vordefiniertes Funktionsspektrum sowie bei Energiesparzuständen (*Low Power Modes*) durch ein zeitlich definiertes Deaktivierungs- und Reaktivierungsintervall gekennzeichnet. Ein lastadaptives Energiemanagement ist eine ökologische Notwendigkeit, die auch als Markttrend in der Mobilfunkbranche sichtbar wird.

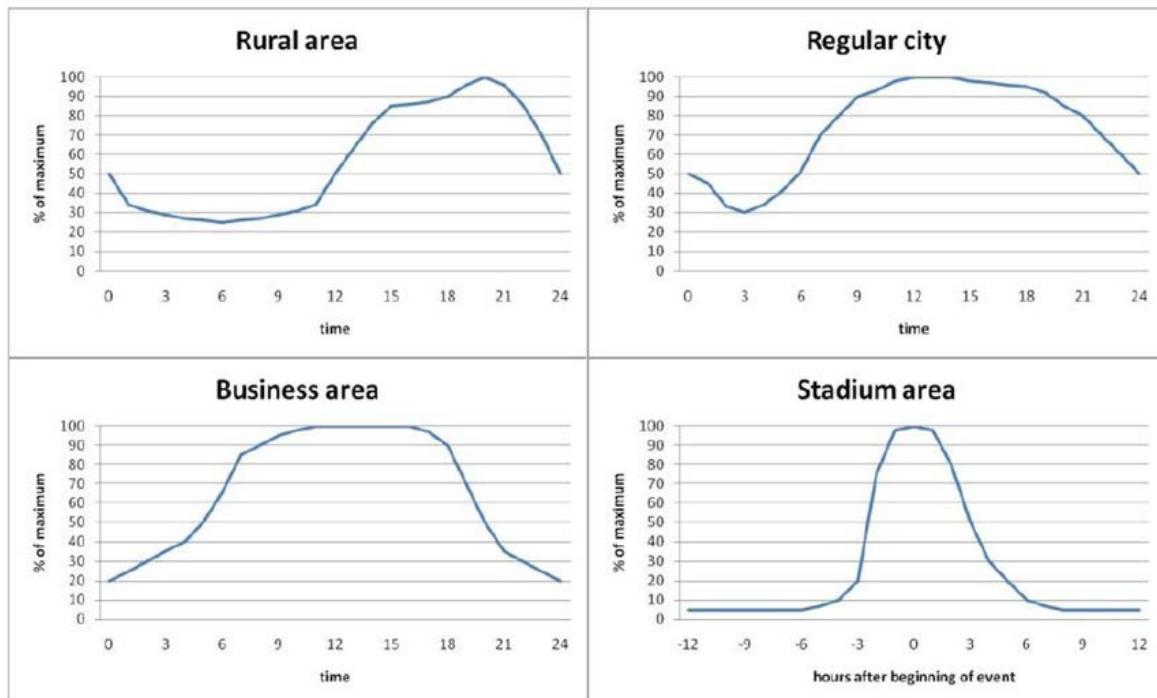
Vor diesem Hintergrund wird im Sachbilanzmodell die Möglichkeit geschaffen, Tageslast- bzw. Nutzungsprofile zu berücksichtigen. Der ETSI Standard ES ETSI ES 202 706-1 V1.6.0: „Metrics and measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment“ gibt eine erste Orientierung für die Struktur und Parametrisierung eines Tageslastprofils. Dieser seit Jahren existierende und in 2021 überarbeitete Standard gibt zur verbesserten Berechnung des Energiebedarfs drei last- und zeitdefinierte Betriebszustände an:

- ▶ Low Load: sechs Stunden pro Tag
- ▶ Medium Load: 10 Stunden pro Tag
- ▶ High Load (Busy Hour): 8 Stunden pro Tag

Im ETSI Standard werden in Abhängigkeit der Mobilfunkgeneration und anderer Parameter sehr detaillierte Beispielkonfigurationen zur Berechnung der Energieeffizienz angegeben. Diese Konfigurationen sind für exemplarische Berechnungen hilfreich, aber für den Zweck des Sachbilanzmodells nicht erforderlich. Vielmehr wären statistische Angeben zur Tageslastprofilen in unterschiedlichen AS-Kategorien hilfreich. Literaturdaten zu diesem Thema sind kaum existent, zudem muss berücksichtigt werden, dass Lastprofile in unterschiedlichen geografischen Gebieten, aufgrund der Einwohnerdichte, Mobilitätsdynamik und auch kultureller Unterschiede teilweise stark abweichen können.

Abbildung 21 zeigt exemplarische Tagesverläufe des Verkehrsaufkommens an vier unterschiedlichen Antennenstandorten. Die Lastprofile wurden im Rahmen des Forschungsprojekts ComGreen erfasst und gemittelt.³³ Der Vergleich der zeitlichen Verteilung (Ausprägung) der Lastkurve im ländlichen und städtischen Standort zeigt deutliche Unterschiede. Da das ComGreen Projekt bereits im Zeitraum von 2010 bis 2014 durchgeführt wurde und seither die Nutzungsintensität mit LTE und mobilem Internet deutlich zugenommen hat, sollte davon ausgegangen werden, dass sich die Nutzung etwas angleicht. Offen bleibt die Frage, wie hoch die reale Auslastung der theoretisch verfügbaren Netzkapazität ist. Die in Abbildung 21 dargestellten Tageslastprofile sind relativ dargestellt, d.h. sie orientieren sich an der maximalen Auslastung pro Tag. Dies bedeutet aber nicht, dass diese maximale Auslastung auch die maximale (theoretische) Netzkapazität ist. Eine solche Unterscheidung ist aber für ein Energiemodell sehr relevant. Leider konnten Daten zur realen Netzkapazitätsauslastung beispielsweise für typische Antennenstandortkategorien oder als Durchschnitt eines oder aller Netzbetreiber im Rahmen von UTAMO nicht ermittelt werden.

Abbildung 21: Im ComGreen Projekt ermittelte Tageslastprofile an vier typischen Standortarten



Quelle: Unveröffentlichter Abschlussbericht ComGreen

³³ Das Forschungsprojekt ComGreen wurde von 2010 bis 2014 vom BMWi im Rahmen der Forschungsinitiative IT2Green gefördert.

Im Sachbilanzmodell werden vor diesem Hintergrund drei Betriebszustände (Low, Mid, High) unterschieden, wobei die Zeitdauer pro Tag je AS-Kategorie und Szenario angepasst werden kann. Allerdings wird in der Grundkonfiguration von identischen Lastprofilen in allen AS-Kategorien ausgegangen, da keine ausreichende Datenlage für begründete Annahmen vorliegen.

2.2 Funkzugangsnetzmodell – RAN-Modell

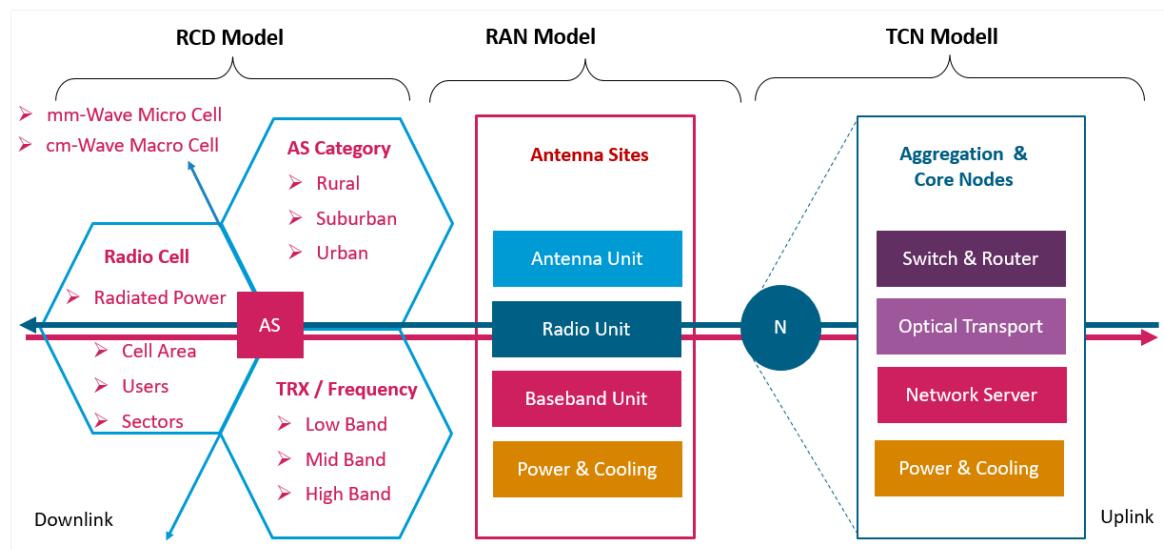
2.2.1 Konzeption der Modellierung

Das Funkzugangsnetzmodell (*Radio Access Network, RAN*) hat die primäre Aufgabe, den Energie- und Ressourcenbedarf von individuellen Antennenstandorten abzubilden und in Verknüpfung mit dem Funkzellenverteilungsmodell die absolute CO₂-Bilanz von Mobilfunknetzen in Szenarien zu berechnen. Das RAN-Modell ist für diesen Zweck als eine generische Sachbilanz angelegt. Es basiert auf theoretischen Grundlagen der Nachrichtentechnik und reflektiert in der Grundkonfiguration reale Architekturen, Technologien und Prinzipien von Funkzugangsnetzen nach aktuellem Stand der Technik. Der dem Modell zugrundeliegende theoretische Ansatz soll es ermöglichen, orientierungssicher auch zukünftige Entwicklungen überschlägig zu berechnen. In diesem Zusammenhang werden insbesondere die Unterschiede zwischen der herkömmlichen cm-Wellen-Technik (Makrozellen) und der mm-Wellen-Technik (Mikrozellen) berücksichtigt und separat modelliert. Für diesen Zweck werden neben theoretischen Grundlagen auch Konzepte und Daten aus der laufenden Forschung und Standardisierung in die Modellierung einbezogen.

Das RAN-Modell ist unmittelbar mit dem Funkzellenverteilungsmodell (RCD-Modell) verknüpft, da dieses viele Eingangsparameter für die überschlägige Umweltbewertung vorgibt. Von großer Bedeutung ist hierbei die Unterscheidung der verschiedenen Antennenstandort-Kategorien, die Berücksichtigung der individuellen Transceiver-Konfiguration (inkl. der Frequenzbänder und Mobilfunkgeneration) sowie die hieran geknüpften Annahmen für die Sendeleistung. Schließlich gibt das RCD-Modell auch das Lastprofil bzw. Nutzungsmuster inklusive der Unterscheidung von drei Betriebszuständen vor.

Die Abbildung 22 zeigt wesentliche Parameter des RCD-Modell, die in enger Wechselwirkung mit der Konfiguration eines Antennenstandortes und damit des RAN-Modells stehen.

Abbildung 22: Funktionale Verknüpfung von der drei Teilmodelle



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Vordergründig beinhaltet das RAN-Modell zunächst viele energierelevante Parameter und entspricht damit einem komplexen Energiemodell. Es werden aber auch relevante Parameter erfasst, mit denen der Rohstoff- und Herstellungsaufwand überschlägig bewertet werden kann. Das im UTAMO-Projekt entwickelte RAN-Modell orientiert sich grundlegend am Energiemodell für Integrierte Basisstationen (in dieser Studie als Antennenstandorte bezeichnet) nach dem ETSI Standard ETSI ES 202 706-1 V1.6.0: „Metrics and Measurement Method for Energy Efficiency of Wireless Access Network Equipment“. Gleichzeitig adaptiert es weitere konzeptionelle Ansätze für komplexere, komponentenbasierte Energiemodelle von Mobilfunkstandorten, wie sie in Kap. 1.4.1 vorgestellt wurden. Damit soll sichergestellt werden, dass unterschiedliche Technologien, Architekturen und Standortparameter präziser abgebildet werden können.

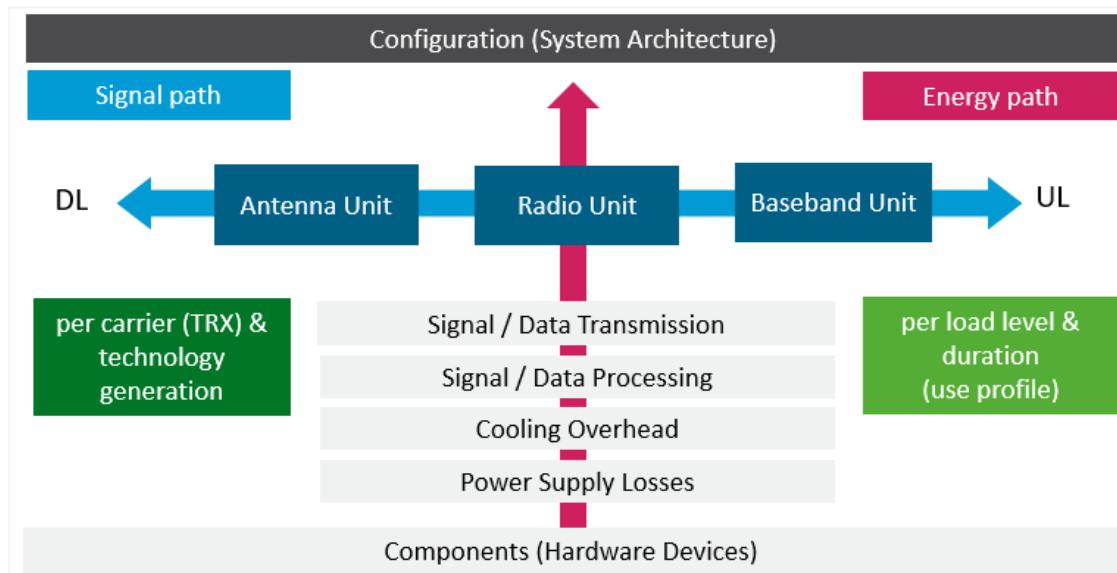
Einen thematischen Fokus bilden die unterschiedlichen Faktoren und Technologien, die zu einer Steigerung des Antennengewinns bzw. der spektralen Effizienz beitragen. Hierbei ist die Modellierung unterschiedlicher Designkonzepte für moderne MIMO-Antennenmodule von großem Interesse. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Charakteristik und die technische Entwicklung der Leistungsverstärker im Funkmodul, da diese maßgeblich zum Energiebedarf beitragen. Schließlich wird noch die technologische Entwicklung im Bereich der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik berücksichtigt, um energiebezogene Fortschritte bei der Hardware in den Zukunftsszenarien einberechnen zu können. Diese Entwicklung hat für die Modellierung der digitalen Komponenten große Bedeutung.

Prinzipiell kann das RAN-Modell aus zweierlei Richtungen (Pfaden) betrachtet werden, dem Signalpfad und dem Energiepfad. Der sogenannte Signalpfad folgt dem Kommunikationskanal vom Endgerät in der Funkzelle über den Antennenstandort zum Transportkernnetz (*Uplink, UL* bzw. in umgekehrter Richtung *Downlink, DL*) und erfasst alle wesentlichen funktionalen Komponenten und Baugruppen des Antennenstandortes. Ausgehend von der Luftschnittstelle zwischen Antenne und Endgerät bzw. der abgestrahlten Sendeleistung an der Antenne (*Effective Radiated Power, ERP*) beinhaltet das RAN-Modell folgende Komponenten:

- ▶ Antennenmodul (*Antenna Unit, AU*)
- ▶ Funkmodul (*Radio Unit, RU*)
- ▶ Basisbandmodul (*Baseband Unit, BU*)

Die Grundstruktur des RAN-Modells wird in der untenstehenden Abbildung 23 veranschaulicht.

Abbildung 23: Schematische Darstellung des Funkzugangsnetzmodells



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Eine genauere Beschreibung der im RAN-Modell berücksichtigten Parameter und Daten dieser funktionalen Hauptkomponenten einschließlich aller Schnittstellen, der Stromversorgung und aktiven Klimatisierungstechnik folgen weiter unten (vgl. 2.2.2 ff.).

Das RAN-Modell ist Transceiver-spezifisch. Das bedeutet, dass im Modell die Eigenschaften der individuellen Frequenzbänder im Bereich der cm-Wellen und mm-Wellen einzeln berücksichtigt werden (vgl. Transceiver-Konfiguration im RCD-Modell). Dem Frequenzband kann im Modell eine generische oder auch spezifische Bandbreite (entsprechend des verfügbaren Spektrums der einzelnen Netzbetreiber) sowie eine spezifische Mobilfunkgeneration und damit auch ein definiertes Modulationsverfahren zugeordnet werden. Daraus lassen sich die theoretischen Datenraten berechnen. Entsprechend dieser Konfiguration und Berechnungen skalieren im Modell beispielsweise der elektrische Energiebedarf der digitalen Komponenten im Basisbandmodul und auch die Front- und Backhaul-Schnittstellen. Die Komplexität des im UTAMO-Projekt entwickelten RAN-Modells resultiert zum großen Teil aus diesen Skalierungen, die die Wechselwirkungen der Komponenten untereinander quantifizieren. Die Skalierungsfaktoren wurden sowohl auf Basis theoretischer Grundlagen als auch konkreter Produktdaten ermittelt. Das bedeutet, dass einzelne Faktoren im Laufe der Zeit dem realen Stand der Technik angepasst werden müssen.

Zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs wird im RAN-Modell ein zweiter Pfad, der sogenannte Energiepfad, abgebildet. Der Energiepfad beginnt bei der unterbrechungsfreien Stromversorgung und liegt jeweils quer über den Hauptkomponenten (vgl. Abbildung 23). Im engeren Sinne ist der Energiepfad ein energiebezogenes Prozessflussmodell³⁴, bei dem folgende Energieparameter erfasst werden (vgl. auch Abbildung 24):

- ▶ die wirkungsgradabhängige Verlustleistung der Netzteile (*AC/DC losses*)
- ▶ die wirkungsgradabhängige Verlustleistung von Verstärkern und Leistungswandlern (*DC/DC losses*)

³⁴ In Anlehnung an eine umweltbezogene Input-Output-Sachbilanz.

- ▶ die lastvariable elektrische Leistungsaufnahme der aktiven Komponenten (*adaptive power*)
- ▶ die konstante elektrische Leistungsaufnahme der funktionalen Hauptbaugruppen (*constant or base power*)
- ▶ die zusätzliche elektrische Leistungsaufnahme von aktiven Kühlungssystemen (*cooling overheads*)

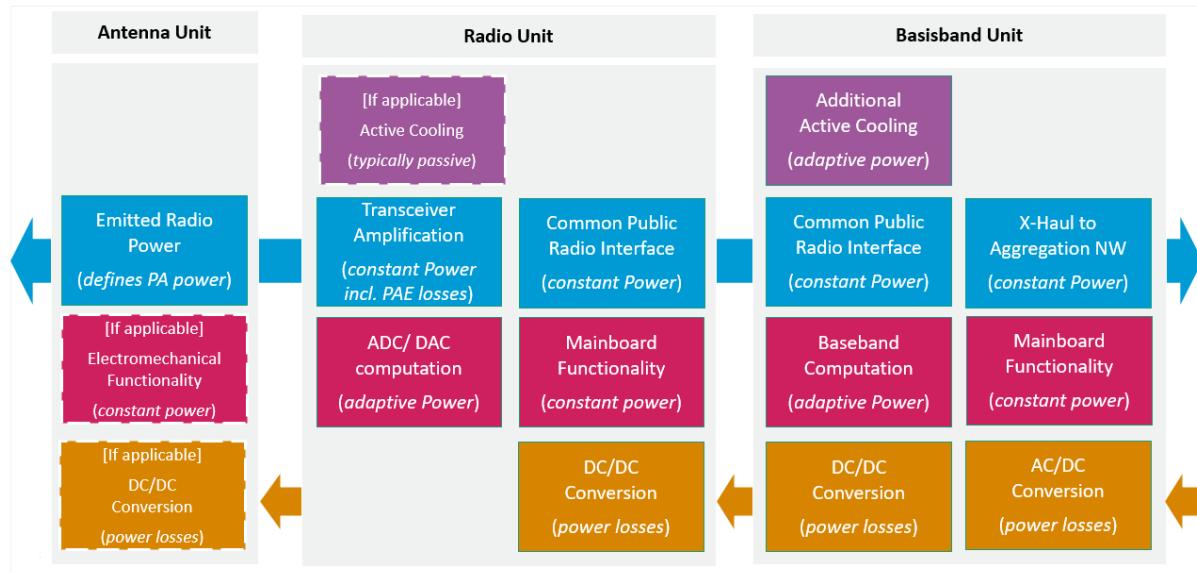
Im RAN-Modell werden wie bereits in Kapitel 2.1.5 ausgeführt drei Betriebszustände für eine niedrige, mittlere und hohe Auslastung berücksichtigt. Die im ETSI-Standard angegebenen Beispielkonfigurationen zur Berechnung der Energieeffizienz wurden für das UTAMO-Modell nicht übernommen, da eine spezifische Konfiguration aus dem RCD-Modell hergeleitet werden kann.

Das generische RAN-Modell kann zur Berechnung von Szenarien für unterschiedliche Standortkonfigurationen und Lastprofile angepasst werden. Primär können zu diesem Zweck folgende Parameter angepasst werden:

- ▶ die Sendeleistung (unter Berücksichtigung der Standortkategorie bzw. auch EMV-Grenzwerten oder anderen Vorgaben sowie der Dämpfung zwischen Ausgang des Verstärkers und der Antenne)
- ▶ die Antennenkonfiguration (unter Berücksichtigung des verfügbaren bzw. angenommen Frequenzspektrums, technologischer Optionen wie MIMO und gerätespezifischer Optionen wie Mehrfachantennenträger)
- ▶ die Art und der Wirkungsgrad des Leistungsverstärkers (unter Berücksichtigung der Trägerfrequenz, Sendeleistung, Technologiegeneration und des funktionalen Integrationsgrades [beispielsweise *Beamforming ICs* mit integriertem Leistungs- und Empfangsverstärker])
- ▶ die Annahmen zum Anteil der konstanten Grundlast der Hauptbaugruppen und zur lastvariablen elektrischen Leistungsaufnahme der aktiven Komponenten
- ▶ die Annahme zur frequenzabhängigen Mobilfunktechnologie, Bandbreite und Modulationsverfahren (diese Parameter skalieren den digitalen Rechenbedarf und damit die elektrische Leistungsaufnahme des Basisbandmoduls)
- ▶ die Annahmen zum Wirkungsgrad der Stromversorgung und zum kühlungsbezogenen Energieaufwand
- ▶ das Lastprofil und das Auslastungsniveau sowie die Dauer der drei Betriebszustände

Des Weiteren können steuerungsseitige Stellgrößen (Kontrolle) wie beispielsweise der Einfluss eines aktiven Energiemanagements im RAN-Modell berücksichtigt werden. In diesem Fall kann die Konfiguration der aktiven Transceiver angepasst und zum Beispiel zeitbezogen auf null gesetzt werden, um ein Abschalten zu simulieren. Die Datenlage für die Parametrisierung solcher Energiemanagementvarianten ist allerdings ungenügend. So sind Angaben zur Abschaltung einzelner Transceiver einschließlich der Dauer und des Energiebedarfs der Reaktivierung nur vereinzelt bekannt und konnten nicht verifiziert werden. Das RAN-Modell kann theoretisch um diese Aspekte erweitert werden.

Abbildung 24: Funktionale Komponenten und wesentliche Energieparameter im RAN-Modell



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Abbildung 24 zeigt die wesentlichen funktionalen Komponenten und Energieparameter des RAN-Modells in einer schematischen Darstellung. In blauer Farbe sind die energierelevanten Aspekte der Signal- und Datenübertragung (*Transmission*) und in roter Farbe die der Signal- und Datenverarbeitung (*Computation*) gekennzeichnet. Hierbei wird prinzipiell zwischen einer konstanten elektrischen Leistungsaufnahme und einer lastadaptiven, d.h. dem Betriebszustand angepassten Leistungsaufnahme unterschieden. In oranger Farbe sind die Aspekte der Stromversorgung einschließlich der Wandlungsverluste abgebildet. Die aktive Kühlung z.B. mittels integrierter Lüfter, aber auch raumbasierter Klimatechnik, wird in violetter Farbe dargestellt. Je nach Technologie und Standortkonfiguration sind bestimmte Aspekte optional oder nicht enthalten.

Im folgenden Kapitel werden die Funktionalität und Technikmerkmale der drei Hauptmodule (AU, RU, BU) sowie die Datenbasis zur Parametrisierung des RAN-Modells kurz beschrieben. Ziel ist es dabei einerseits, die wesentlichen technischen Begriffe zu klären und andererseits, etwas detaillierter die technischen und operativen Aspekte der elektrischen Leistungsaufnahme einer Mobilfunkanlage zu erläutern. Eine ausführliche Technikbeschreibung erfolgt jedoch nicht. In der Realität gibt es eine hohe Vielfalt an Gerätetechnik und Gerätekonfigurationen. Diese resultiert aus dem Umstand, dass an heutigen Antennenstandorten immer mehrere Mobilfunk- und Hardwaregenerationen gleichzeitig zum Einsatz kommen. Detaillierte Daten oder Statistiken zur gerätetechnischen Ausstattung von Mobilfunkstandorten in Deutschland liegen nicht vor. Die Datenbasis ist auf Produktdatenblätter der Geräteausrüster (Ericsson, Nokia, Huawei, ZTE)³⁵ begrenzt. Welche Technik die drei Netzbetreiber in Deutschland in welchem Umfang genau einsetzen, ist nicht bekannt, da diese Art von Information der Vertraulichkeit unterliegen.

Da im generischen RAN-Modell aber ohnehin eine angemessene Reduktion der in der Praxis bestehenden Produkt- und Technologievielfalt erfolgen muss, kommt es darauf an, mit dem Wissen über technische Details die prinzipiellen Geräteeigenschaften und Funktionsweisen zu

³⁵ Siehe Produktdatenblätter im Quellenverzeichnis.

abstrahieren und insbesondere die theoretischen Wechselwirkungen und Skalierungsfaktoren zu identifizieren. Mit dieser Zielstellung werden auf einer relativ hohen Abstraktionsebene die Funktion und die Technik der Systemkomponenten skizziert sowie die energiebezogenen Faktoren hervorgehoben und erläutert. In diesem Zusammenhang werden in der folgenden Beschreibung und bei den Daten immer wieder auf „typische“ oder „generische“ Konfigurationen verwiesen. Die Datenbasis wird exemplarisch für das Referenzszenario 2019 erhoben und vorgestellt.

Im Anschluss an diese technisch-funktionale Beschreibung der drei Komponentenmodule und Vorstellung der Datenbasis werden die Formeln für die Berechnung des RAN-Modells erläutert.

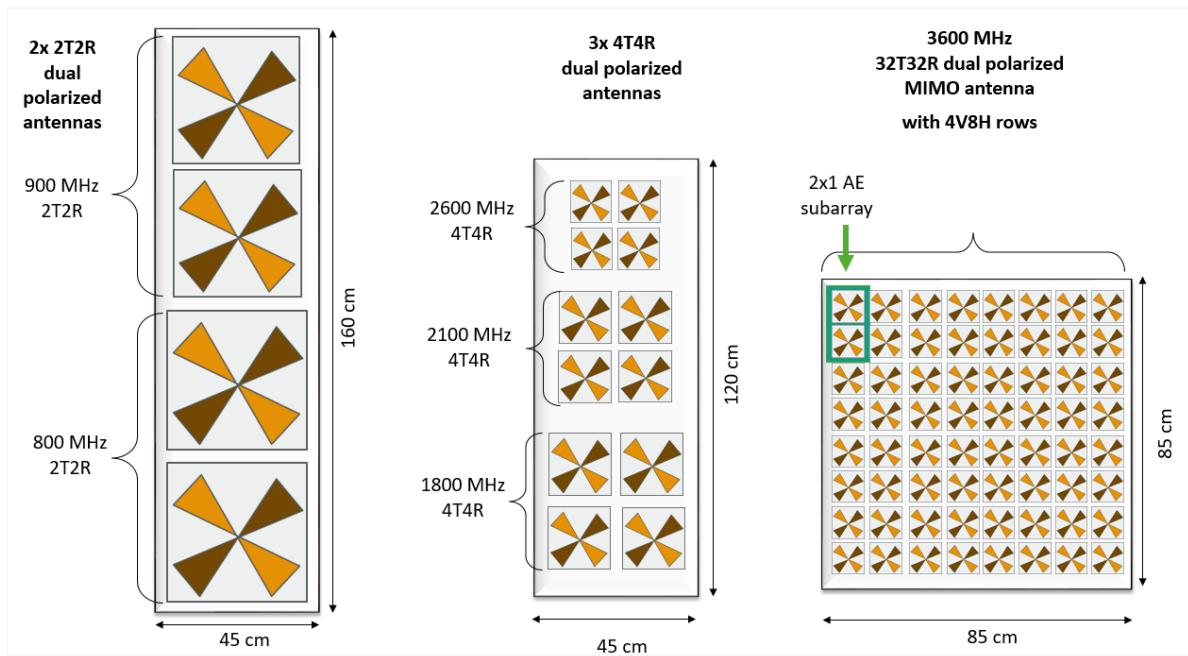
2.2.2 Antennenmodul (AU)

Architektur

Das Antennenmodul des Mobilfunkzugangsnetzes realisiert die unmittelbare Luftschnittstelle zwischen dem Antennenstandort und den mobilen Endgeräten der Nutzer. Die AU ist meist erhöht an einem Mast befestigt und umfasst eine bestimmte Anzahl an frequenzspezifischen Antennen. Die Antennenmodule bestehen aus Subarrays, welche wiederum aus einem oder mehreren Antennenelementen (*Antenna Elements, AE*) bestehen (vgl. Abbildung 25).

Die Größe des Antennenelementes ist proportional zur Funkfrequenz. Das AE einer 800 MHz-Antenne ist ca. 37,5 cm lang und ein AE einer 3.600 MHz-Antenne lediglich 8,3 cm lang. Mit höherer Frequenz nimmt die Größe des Antennenelementes ab. Die meisten Antennen sind für das gleichzeitige Senden und Empfangen dual polarisiert. Mehrfachantennensysteme (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*) nutzen mehrere AE und konfigurieren diese in vertikal (V) und horizontal (H) angeordneten Subarrays. Die Anzahl der AE pro Subarray kann mit zunehmender Frequenz ebenfalls zunehmen, da die Größe des AE abnimmt. Antennensystemen der neuen 5G-Frequenzbänder 3,5-3,8 GHz können eins bis vier AE pro Subarray und Millimeterwellensysteme 24-28 GHz zwei bis acht AE pro Subarray haben (Huawei 2017b; Samsung 2020).

Die Abbildung 25 zeigt prinzipielle Antennenkonfigurationen in einer vereinfachten, aber etwa maßstabsgerechten Darstellung. Die Anordnung der AE ist bei Zentimeterwellensystemen aus Platzgründen meist vertikal. Bei Antennensystemen größer 3 GHz werden meist symmetrische, Anordnungen angestrebt, um die Leitungsverluste vom Leistungsverstärker zu minimieren und synchrone Ansteuerungen der AE zu gewährleisten. Einen guten Überblick zu aktuellen Multiband-Antennensystemen und kompakten aktiven 5G-Antennensystemen liefert der Produktkatalog (Huawei 2017a).

Abbildung 25: Schematische Darstellung von MIMO Antennenmodulen mit Antennenelementen

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Antennengewinn

Die Anzahl, Anordnung, Ausrichtung und Höhe der Antennenelemente haben einen Einfluss auf den Antennengewinn (*Antenna Gain*) und damit auf die Reichweite, Flächenabdeckung und Kapazität der Funkzelle. Der Antennengewinn wird in dBi angeben und ist ein wichtiger Korrekturwert für die Sendeleistung. Vereinfacht gilt: Je höher der Antennengewinn, desto geringer der Energiebedarf der Funkmodule, deren Leistungsverstärker die Sendeleistung aufbringen müssen.

Die EMF-Datenbank der BNetzA liefert Angaben zum Antennengewinn der einzelnen Anlagen. Eine Auswertung der Standortdatensätze mit Zuordnung der AS-Kategorie und des Frequenzbandes zeigt die nachstehende Tabelle 11. Die Auswertung der Datensätze zum Antennengewinn zeigt zunächst ein sehr homogenes Bild. In diesem Fall liegt der Durchschnittswert in den niedrigeren Frequenzbereichen unter 1 GHz bei rund 15 dBi und bei 1 bis 3 GHz bei rund 18 dBi. Diese Verteilung könnte dadurch erklärt werden, dass die höheren Frequenzen aufgrund des kleineren Formfaktors als MIMO-Antennen konfiguriert sind und damit einen verbesserten Antennengewinnen aufweisen. Verdeutlicht wird diese Annahme durch die (allerdings wenigen) 5G-Datensätze im Frequenzband 3,5 GHz.

Tabelle 11: Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Antennengewinn

Antennengewinn [dBi]								Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309
Trägerfrequenz	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6	Mittelwert:	
700	14,50	k. A.	15					

Antennengewinn [dBi]						Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309	
800	15,76	15,41	15,26	15,35	14,89	14,90	15
900	15,71	15,50	15,45	15,68	15,27	15,07	15
1.500	k. A.	18,40	18,40	k. A.	k. A.	k. A.	18
1.800	18,06	17,79	17,48	17,79	17,53	17,35	18
2.100	18,12	17,99	18,03	18,07	17,68	17,85	18
2.600	17,26	18,90	18,69	18,18	17,07	18,02	18
3.500	k. A.	23,22	23				
[MHz]	[dBi]	[dBi]	[dBi]	[dBi]	[dBi]	[dBi]	[dBi]

Die Datenblätter der EMF-Standortdatenbank liefern auch Angaben zur Antennenhöhe. Die folgende Tabelle 12 zeigt eine entsprechende Auswertung der Datensätze. Es werden die durchschnittliche sowie die über den Bestand gewichteten Antennenhöhen bezogen auf die unterschiedlichen Frequenzbänder und AS-Kategorien angegeben.

Tabelle 12: Auswertung Funkanlagen BNetzA-Datenbank - Antennenhöhe

Antennenhöhe [m]							Anzahl ausgewählter Antennenstandorte: 309
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6	
700	47,80	k. A.					
800	38,68	30,99	28,32	35,44	34,25	27,98	
900	39,33	31,12	28,29	35,14	33,07	28,07	
1500	k. A.	51,30	42,50	k. A.	k. A.	k. A.	
1800	35,81	29,17	28,12	35,14	31,94	29,63	
2100	39,30	29,46	28,40	34,81	29,32	28,45	
2600	40,22	40,22	19,10	36,84	29,82	29,55	
3500	k. A.	54,71					
Mittelwert:	40	35	29	35	32	33	

Die ländlichen Standorte (ASK 1 und ASK 2) zeigen im Vergleich durchschnittlich leicht höhere Aufstellhöhen mit maximalen Werten bis 47 Meter. Im gewichteten Mittel sind Antennenhöhen von 31 bis 39 Metern zu verzeichnen. Die großen ländlichen Antennenmasten und Türme werden zunehmend von spezialisierten Infrastrukturanbietern betrieben und kommerziell an alle Netzbetreiber vermietet.

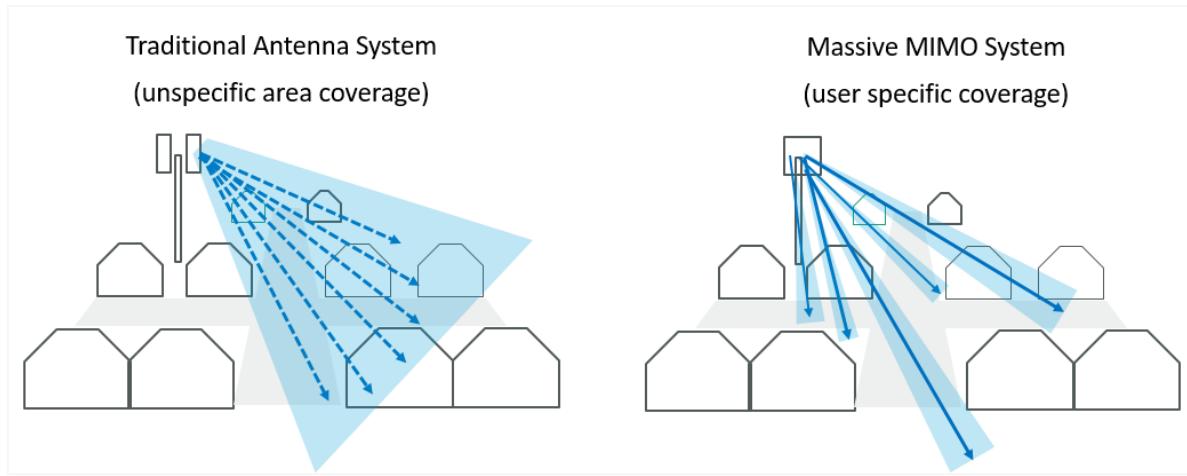
Die Antennenhöhe nimmt in Richtung städtischer Standorte (ASK 5 und ASK 6) im Mittelwert nur leicht ab. Sie bleibt auf einem Wert zwischen 29 und 35 Metern. Die große Höhe im eng bebauten Umfeld hat einerseits mit der durchschnittlichen Gebäudehöhe zu tun. Allerdings werden auch im städtischen Bereich immer höhere Masthöhen verwendet und so der Neigungswinkel verkleinert. Dadurch wird die Antenne stärker lotrecht zum Erdboden in die Funkzelle gerichtet, was die punktuelle Funkwellenausbreitung verbessert. Bezuglich der Verteilung in Abhängigkeit der Funkfrequenz ist festzustellen, dass die Durchschnittshöhen variieren, ohne ein festes Muster zu bilden. Die wenigen Datensätze zu neuen 5G-Standorten lassen noch keine Aussagen zu realen Durchschnittswerten zu.

Neben der Antennenhöhe und der vertikalen Ausrichtung (Neigung, *Tilt*) haben auch die horizontale Ausrichtung bzw. die Sektorenbildung eine Auswirkung auf die Größe und Kapazität der Funkzelle. Die Antennenstandorte heutiger Mobilfunknetze verfügen meist über drei 120° Sektoren und teilweise bereits über sechs 60° Sektoren (die jeweils so ausgerichtet sind, dass die vollen 360° um die Antenne als Mittelpunkt ausgeleuchtet werden). Auch hier gilt der Grundsatz, je fokussierter und schmäler die physische Antennenausrichtung ist, desto höher ist die Richtwirkung.

MIMO

Wie gerade ausgeführt wurde, beeinflussen die Anordnung und die Ausrichtung der AE die Richtwirkung der Antenne bzw. den Antennengewinn. Ein weiterer Designaspekt beeinflusst die Kapazität der Funkzelle: Die Erhöhung der Anzahl physischer Antennenelemente sowie die Erhöhung der Anzahl logischer Antennen (MIMO) durch größere Antennenarrays sind technologische Ansätze, mit denen die spektrale Effizienz in der Funkzelle verbessert werden kann, ohne den Energiebedarf maßgeblich zu erhöhen. MIMO-Antennensysteme verfügen über mehrere Sender (*Transmitter*, T) und Empfänger (*Receiver*, R). Die Konfiguration wird beispielsweise als 2T2R oder 4T4R angegeben. Die frequenzgebundene Größe der AE erlaubt mit höheren Frequenzbändern eine sogenannte *Massive MIMO* Konfiguration. Typische Konfiguration sind hierbei 16T16R, 32T32R oder 64T64R. Damit wird eine stärkere Richtwirkung und damit einhergehende größere Reichweite bei gleicher Sendeleistung erreicht. *Massive MIMO* wird bei Antennensystemen > 3 GHz und insbesondere bei Systemen > 26 GHz künftig zum Einsatz kommen. Theoretisch sind noch größere Arrays im Millimeterwellenbereich möglich.

Massive MIMO gestattet neue Formen des *Beamsteering*, d.h. der gezielten Ausrichtung und dynamischen Richtungsanpassung des Abstrahlungswinkels über die Phase, sowie des *Beamforming*, d.h. der zusätzlichen Anpassung des phasengesteuerten Signals über die Amplitude unter Berücksichtigung der Anforderungen eines Kanals. Hierdurch kann ein optimaler Kanal zum mobilen Endgerät mit einem individuell angepassten Antennenstrahl (*Beam*) realisiert werden. Diese individuelle Ausrichtung einzelner Antennenarrays reduziert theoretisch die erforderliche Sendeleistung, da die Energie nicht so stark in der Fläche verloren geht (vgl. Abbildung 26).

Abbildung 26: Massive MIMO Antennensystem mit Beamforming

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Bislang wurden große cm-Wellen-Antennen typischerweise bei der Installation einmal physisch ausgerichtet. Einige moderne Antennensysteme haben kleine Stellmotoren und können in begrenzter Weise den Neigungs- und Seitenwinkel leicht anpassen. Diese mechanische Steuerung ist eher langsam und kann nicht als dynamisches *Beamsteering* verstanden werden.

Die für das UTAMO-Modell angenommenen MIMO-Konfigurationen in Abhängigkeit des Frequenzbands und dessen Mobilfunkgeneration in den jeweiligen Entwicklungsszenarien kann der nachfolgenden Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: MIMO-Konfiguration der Mobilfunkgenerationen in den Entwicklungsszenarien

Frequenz MHz	2019		2022		2026		2030	
	Generation	MIMO	Generation	MIMO	Generation	MIMO	Generation	MIMO
700	5G (sub-6)	2						
800	4G	2	4G	2	4G	2	4G	2
900	2G	1	2G	1	2G	1	2G	1
1.500	4G	2	4G	2	4G	2	4G	2
1.800	4G	2	4G	4	4G	4	4G	4
2.100	3G	2	3G	4	3G	4	3G	4
2.600	4G	2	4G	4	4G	4	4G	4
3.500	5G (sub-6)	32						
26.000	5G (mm)	64	5G (mm)	64	5G (mm)	64	5G (mm)	64
28.000	5G (mm)	32	5G (mm)	32	5G (mm)	32	5G (mm)	32

Schnittstellen

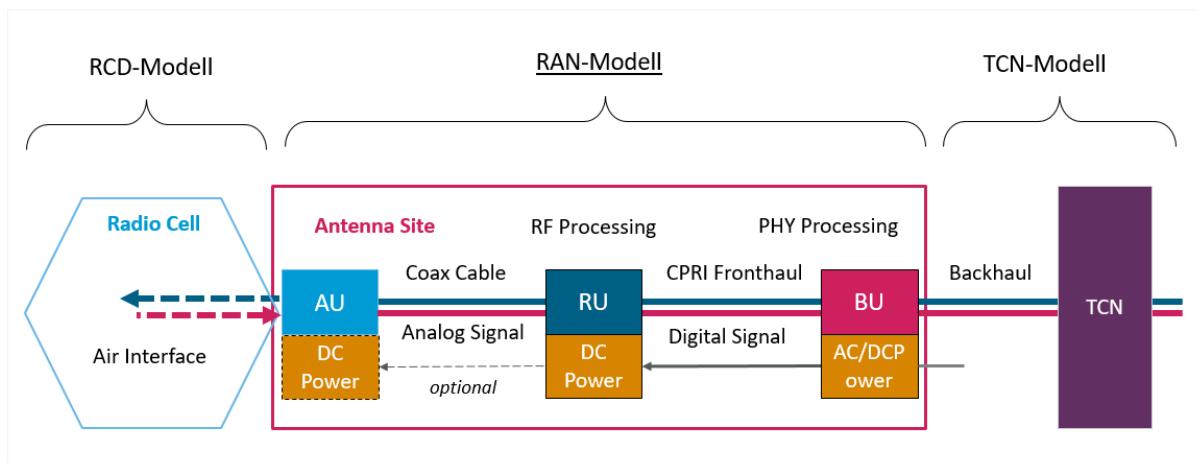
Das Antennenmodul ist bei konventionellen, zentimeterwellenbasierten Mobilfunkanlagen über Koaxialkabel mit dem Funkmodul (*Radio Unit, RU*) verbunden. Heutige Funkmodule werden meist als sogenannte Remote Radio Heads (RRH) unmittelbar unter der Antenne am Mast montiert, was kurze Signalwege ermöglicht, die Dämpfung verringert und zusätzliche Verstärker vermeidet. Typische Kabellängen sind meist um die zwei Meter. Je länger das sogenannte Feeder-Kabel zwischen der RU und der AU ist, desto höher sind die Verluste, die beim Transport des Signals über die Strecke auftreten. Im RAN-Modell werden die Verluste aufgrund der geringen Distanz mit 1dB angerechnet. Mit 5G und der Verwendung höherer Frequenzen > 3 GHz werden kompaktere Antennenmodule entwickelt, welche konstruktiv in einem mehrlagigen Aufbau direkt mit dem Funkmodul (RU) verbunden und in einem Gehäuse als sogenanntes *Active Antenna Array* verbaut werden. Das Design und die Materialzusammensetzung der AU kann daher in Abhängigkeit der Frequenz und MIMO-Konfiguration deutlich variieren.

Stromversorgung

Im RAN-Modell werden die Antennenmodule in der Grundvariante nicht mit einer Gleichstromversorgung ausgelegt, da die Sendeleistung durch die Funkmodule bereitgestellt wird. Eine zusätzliche Stromversorgung ist aber optional, denn am Markt gibt es Antennenmodule, die mit kleinen Stellmotoren ausgerüstet sind. Inwiefern diese zum Einsatz kommen, ist unklar. Deren Leistungsaufnahme wird aber im Vergleich zur Sendeleistung als vernachlässigbar klein eingeschätzt.

Die Abbildung 27 zeigt schematisch die Schnittstellen und Stromversorgung des Antennenmoduls, Funkmoduls und Basisbandmoduls entlang des Signalpfades im Funkzugangsnetzmodell.

Abbildung 27: Schnittstellen und Stromversorgung von AU, RU und BU im RAN-Modell



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

2.2.3 Funkmodul (RU)

Architektur

Das Funkmodul (*Radio Unit, RU*)³⁶ ist ein funktechnischer Transceiver (TRX), der das digitale Signal des Basisbandmoduls (*Physical Layer Processing*) in ein analoges Signal wandelt (*Radio*

³⁶ Es gibt eine Fülle von deutschen und englischen Begriffen für das Funkmodul, welche sich im Rahmen der technischen Entwicklung sowie der Standardisierung im Mobilfunk ausgeprägt haben. Einige dieser Begriffe spezifizieren die Positionierung des Funkmoduls separat von der Basisstation, wie

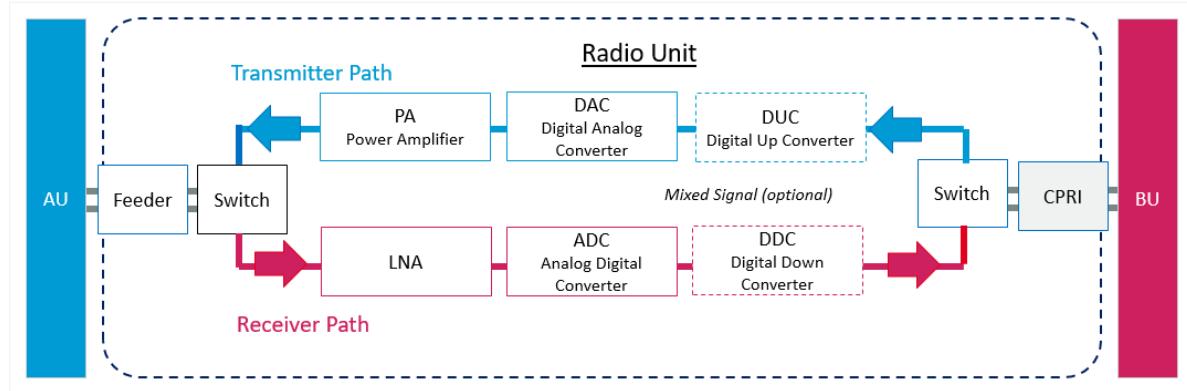
Frequency Processing), dieses verstärkt und an das Antennenmodul (AU) ausgibt. Die Verstärkung des Sendesignals ist in Abhängigkeit des Funkkanals besonders energieintensiv. Das Funkmodul realisiert parallel zum Sendepfad (*Downlink, DL*) auch den Empfangspfad (*Uplink, UL*), d.h. das von der Antenne kommende Eingangssignal. Ein physisches Funkmodul unterstützt je nach Frequenzband, Mobilfunktechnologie und Konfiguration der Antennenmodule zwei oder mehr Transceiver (Antennenpfade). Im RAN-Modell wird die Anzahl der Transceiver pro Funkmodul als ein Skalierungsfaktor berücksichtigt.

Das Funkmodul ist über ein Koaxial-Kabel mit der AU verbunden und wird heute meist knapp unterhalb der AU am Antennenmast angebracht. Die Außenmontage und das für eine einfache Installation geringe Gewicht von typischerweise weniger als 25 kg (von einem Monteur tragbar) erfordern stark reduzierte Abmessungen von heute meist kleiner 50 x 50 x 25cm. Diese Designanforderungen gestatten keine aktive Kühlung und so wird gewöhnlich ein kompaktes Gehäuse aus Aluminium verwendet, welches mit Kühlrippen versehen ist, die eine passive Entwärmung sicherstellen. Die Stromversorgung der RU erfolgt über einen Gleichstromanschluss (*DC Power*) und kommt von der unterbrechungsfreien Stromversorgung der Basisstation (BU). Die Verbindung zum Basisbandmodul (BU) bzw. der sogenannte Fronthaul basiert auf dem *Common Public Radio Interface* (CPRI-Schnittstelle).

Die

Abbildung 28 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Funkmoduls einschließlich der funktionalen Komponenten entlang des Empfangs- und Sendepfades. Im Folgenden werden einzelne Hauptkomponenten und energiespezifische Aspekte der RU sowie die Eingangsparameter und die Datenbasis zur Berechnung der RU im RAN-Modell erläutert.

Abbildung 28: Prinzipielle Architektur und funktionale Komponenten eines Funkmoduls



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Leistungsverstärker

Das Funkmodul ist für die Wandlung, Verarbeitung, Verstärkung und Verteilung des Funksignals (RF-Signal) verantwortlich. Hierfür werden Bauelemente wie Filter, Verstärker, Oszillatoren und Mischer benötigt, die in der Nutzung teilweise sehr energieintensiv sind. Wie aus vorangegangenen Untersuchungen bekannt ist, beeinflusst insbesondere der Leistungsverstärker (*Power Amplifier, PA*) als energetisch verlustbehaftete HF-Komponente im Sendepfad den Energiebedarf der RU und des gesamten RAN in großer Weise (vgl. 1.4.1). Daher

beispielsweise die Begriffe Remote Radio Unit (RRU) oder Remote Radio Head (RRH). Des Weiteren werden häufig die Begriffe Radio Front End oder Radio Transceiver verwendet.

wird im RAN-Modell dieser Komponente eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt und die technischen und operativen Aspekte, welche den resultierenden Energiebedarf der Verstärker beeinflussen, möglichst umfänglich berücksichtigt.

Im vorliegenden RAN-Modell werden wesentliche Nutzungsdaten des Leistungsverstärkers durch die im RCD-Modell definierte Sendeleistung (*ERP*) in Abhängigkeit der AS-Kategorie sowie der Trägerfrequenz, Kanalkonfiguration und Mobilfunktechnologie vorgegeben.

Ein wesentlicher Eingangsparameter ist der Wirkungsgrad der Leistungsverstärker (*Power Added Efficiency, PAE*). Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von effektiver Ausgangsleistung (*ERP*) und DC-Eingangsleistung. Die Sendefrequenz und die Sendeleistung haben einen Einfluss auf die Auswahl der Art und Technologie des eingesetzten Leistungsverstärkers. Höhere Sendefrequenzen ab 3 GHz reduzieren den Wirkungsgrad konventioneller Leistungsverstärker, die auf Basis von Siliziumoxid in CMOS-Technologie³⁷ gefertigt werden. Für höhere Frequenzen im Mobilfunk werden je nach Frequenzband und gewünschten Eigenschaften Verstärker auf Basis von Gallium-Nitrid (GaN), möglicherweise auch Gallium-Arsenid (GaAs) oder Silizium-Germanium (SiGe) eingesetzt.

Tabelle 14: Annahmen zu Wirkungsgraden von Leistungsverstärkern unterschiedlicher Trägerfrequenzen auf Basis von Literaturwerten (Referenzjahr 2019)

Verstärker-Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Trägerfrequenz und Sendeleistung [%]																
	0,1 W	0,2 W	0,3 W	0,4 W	0,6 W	1,0 W	1,6 W	2,5 W	4,0 W	6,3 W	10,0 W	16,0 W	25,0 W	40,0 W	63,0 W	
Trägerfrequenz [MHz]	20 dBm	22 dBm	24 dBm	26 dBm	28 dBm	30 dBm	32 dBm	34 dBm	36 dBm	38 dBm	40 dBm	42 dBm	44 dBm	46 dBm	48 dBm	
700	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	45%	50%	55%	60%	
800	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	45%	50%	55%	60%	
900	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	45%	50%	55%	60%	
1500	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	45%	50%	55%	60%	
1800	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	45%	50%	55%	60%	
2100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	40%	45%	50%	55%	
2600	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	40%	45%	50%	55%	
3500	x	x	x	x	15%	20%	25%	30%	30%	35%	35%	30%	25%	25%	20%	
26000	20%	23%	25%	25%	30%	30%	30%	25%	20%	20%	x	x	x	x	x	
28000	20%	23%	25%	25%	30%	30%	30%	25%	20%	20%	x	x	x	x	x	

Quellen: Datenblätter, Whitepaper und Artikel aus Fachzeitschriften zum Leistungsverstärkerwirkungsgrad: (Abdulkhaleq et al. 2019; Agilent Technologies 2009; Ampleon 2017; Cadence Design Systems 2020; Benson 2017; Camarchia et al. 2016; Freescale Semiconductor 2011; Fuhrmann 2016; Hu et al. 2019; Jang und Wilson 2018; Lie et al. 2018; Moreno Rubio et al. 2015; Niknejad 2014; Sajedin et al. 2019; Skyworks Solutions 2017, 2018; Vasjanov und Barzdenas 2018; Wolfspeed 2021; Zhang et al. 2020; Ali et al. 2019; Kang et al. 2006; Li et al. 2018; Li und Wang 2018; Lie et al. 2017b; Maksimovic et al. 2014; Niknejad 2014; NXP Semiconductors 2020; Pham et al. 2017; Vasjanov und Barzdenas 2018; Wolff 2019; Alhumaima 2017;

³⁷ CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) ist das Standardverfahren zur Herstellung halbleiterbasierter Integrierter Schaltkreise (IC).

Beltran 2017; Dielacher et al. 2019; Eramo et al. 2016; ETSI ES 202 706-1 V1.5.0; Hegarty 2019; Huawei 2017b; Lie et al. 2017a; Liu et al. 2005; Lozhkin et al. 2018; Vasjanov und Barzdenas 2018).

Leistungsverstärker

Die Tabelle 14 zeigt eine Zusammenstellung typischer PA-Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Trägerfrequenz und Sendeleistung. Wie diese vereinfachte Matrix andeutet, variiert der Wirkungsgrad von Leistungsverstärkern in der Praxis zwischen 60 % und 35 % bei cm-Wellen-Systemen und kann bei mm-Wellen-Systemen deutlich unter 30 % liegen. Da Leistungsverstärker auf eine definierte Sendeleistung (Ausgangsleistung) als optimalen Arbeitspunkt ausgelegt werden und nur über eine begrenzte Aussteuerungsreserve verfügen (Back-off typischerweise 5 bis 10 dB), leidet der Wirkungsgrad schnell und nimmt mit sinkender Sendeleistung und höheren Frequenzen deutlich ab. Die Flexibilität (Aussteuerungsreserve) und der lastbezogene Wirkungsgrad von Leistungsverstärkern wird von dem Design, den verwendeten Materialien und anderen Technologieaspekten beeinflusst.

So behindert die fehlende Flexibilität der PAs unter heutigen Bedingungen noch immer eine dynamische Anpassung der Ausgangsleistung und damit ein Energiemanagement des Funkmoduls. Die potenziellen Energieeinsparungen flexibler PAs könnten substanzell sein. Daher ist und bleibt die Entwicklung neuartiger Verstärker insbesondere für künftige mm-Wellen-Systeme ein dominantes Forschungsthema. Im Fokus stehen dabei mehrstufige Doherty-Verstärker-Designs sowie neuartige Halbleitermaterialien mit höherer Ladungsträgerdichte.³⁸

Auf Basis von Werten zur Sendeleistung und dem Wirkungsgrad der Leistungsverstärker kann die primäre elektrische Energieaufnahme der RU als eine wichtige Teilgröße im RAN-Modell berechnet werden. Der Wirkungsgrad des PA dient zudem auch als Eingangsparameter für die theoretische Berechnung der thermischen Abwärme. Da die Funkmodule als RRH aber bislang passiv über das Gehäuse gekühlt werden, muss ein zusätzlicher Aufwand für eine aktive Kühlung nicht berechnet werden. Das RAN-Modell könnte aber auch bei Bedarf eine aktive Kühlung quantifizieren. Neben dem Leistungsverstärker bestimmen aber noch weitere funktionale Komponenten den Energiebedarf der RU, die im Folgenden erläutert werden.

Signalverarbeitung

Der Sende- und Empfangsbetrieb wird über parallele Signalpfade realisiert (vgl.

Abbildung 28). Traditionelle Funkmodule der zweiten, dritten und vierten Mobilfunkgeneration nutzen Frequenzmultiplexverfahren (Frequency Domain Multiplexing, FDM). Sie verfügen daher über sogenannte Cavity Duplexer mit größeren Resonatoren für den Senderausgang und kleineren für den Empfängereingang. Die Herstellung des Gehäuses und der Hohlräume für den relativ großen Duplexer sowie die genaue Materialzusammensetzung ist unklar³⁹. Sie scheint jedoch von Hersteller zu Hersteller nur leicht zu variieren (vgl. hierfür Kap. 2.4). Mit dem neuen 5G-Standard werden in den breitbandigen Massive MIMO-Funkmodulen Zeitmultiplexverfahren (Time Domain Multiplexing, TDM) zur Anwendung kommen. In diesen Systemen werden

³⁸ Im BMBF Innovationswettbewerbs „Elektronik für energiesparsame Informations- und Kommunikationstechnik“ im Rahmen der Initiative „Green ICT“ und dem Aktionsplan „Natürlich. Digital. Nachhaltig.“ gewannen im August 2021 drei Forschungsprojekte (DAKORE, E4C und Edge-Limit) aus dem Bereich der Telekommunikationstechnik, die neuartige Leistungsverstärker und Rechenarchitekturen für den Mobilfunk entwickeln. Siehe Pressemitteilung vom 19.08.2021 „Karliczek: Digitale Technik und Klimaschutz müssen Hand in Hand gehen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2021/08/190821-ICT-II.html>

³⁹ Der Youtuber KAIZER Power Electronic veröffentlicht sehr anschauliche Videos zu Demontagen (*Teardowns*) von u.a. Telekommunikationstechnik und Funkmodulen. Das Video zur Demontage der Huawei RRU3928 1800MHz Radio Base Station ist exemplarisch und zeigt die Hauptbaugruppen und Konstruktion einer RU: <https://www.youtube.com/watch?v=Pi097E7IZWU>

mikroelektronische Switche die Frequenz-Duplexer für die Trennung der Sende- und Empfangssignale ersetzen.

Mit der Trennung von Eingangs- und Ausgangssignal wird das von der Antenne kommende elektromagnetische Funksignal mittels eines Empfangsverstärkers (*Low Noise Amplifier, LNA*) für die weiteren Stufen rauschfrei aufbereitet. Im Design werden auch aus Energiegründen die Rauschbeiträge der einzelnen funktionalen Komponenten berücksichtigt⁴⁰. Der Energiebedarf der Empfangsverstärker ist allerdings im Vergleich zum Leistungsverstärker deutlich geringer und wird in den meisten Energiemodellen und so auch im RAN-Modell aus diesem Grund zwar berechnet, aber nicht separat ausgewiesen. Im nächsten Schritt konvertiert ein Mischer (*Mixer*) das empfangene RF-Signal auf eine Zwischenträgerfrequenz (*Intermediate Frequency, IF*), die von einem lokalen Oszillator (*Local Oscillator, LO*) erzeugt wird. Diese Schritte sind im Vergleich nur wenig energieintensiv und gehen als eine Grundlast in das RAN-Modell ein.

Das noch immer analoge Signal wird nun mittels eines Analog-Digital-Wandlers (*Analog Digital Converter, ADC*) umgesetzt, mit einer angemessenen Bitrate abgetastet (*Sampling*) und dann als digitales Signal an die BU weitergegeben. Dieser Prozess der Digitalisierung basiert auf einer schnellen Fourier-Transformation (*Fast Fourier Transform, FFT*). Der Algorithmus wird von einem digitalen Signalprozessor (*DSP*) ausgeführt und kann sehr rechenintensiv sein.

Mit der Implementierung von 5G werden sich die Frequenzen, die Bandbreite und Anzahl der Kanäle deutlich erhöhen. In Kombination mit immer komplexeren Modulationsverfahren und hohen Abtastraten wird die Analog-Digital-Wandlung (ADC und DAC) immer rechenintensiver. Dies kann zu einem stark steigenden Energiebedarf führen. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass der noch anhaltende Fortschritt bei der Miniaturisierung der halbleiterbasierten Mikroelektronik (Moore'sche Gesetz) sowie neue Rechenarchitekturen und Designs diesen theoretisch steigenden Energiebedarf der digitalen Prozessoren zumindest teilweise kompensieren wird. Eine präzise Quantifizierung dieses Verbesserungspotenzials konnte aus der Literatur und im Rahmen des UTAMO-Projektes nicht ermittelt werden.

Schnittstellen

Die Kommunikationsschnittstelle zur Steuerungs- und Basisbandeinheit der BU (*Fronthaul*) wird aktuell über das serielle *Common Public Radio Interface (CPRI)* sichergestellt, einem de facto Industriestandard, der alle herkömmliche Mobilfunkgenerationen unterstützt. Die CPRI-Schnittstelle arbeitet mit einem TDM-Verfahren und die Fronthaul-Bitrate skaliert mit der Trägerbandbreite und Anzahl der Antennenpfade. Die CPRI-Bitrate von 2,5 bis 10 Gbps ist für aktuelle Kanalbandbreiten im cm-Wellenbereich < 3 GHz bzw. für den Datentransport der zweiten, dritten und vierten Mobilfunkgeneration ausreichend. Mit der 5G-Technologie wird der Bedarf der Fronthaul-Kapazität auf 10 bis 50 Gbps stark steigen. Daher werden derzeit neue Verfahren wie *Enhanced CPRI (eCPRI)* von den Netzausrüstern (Trojer et al. 2021) eingeführt und X-Haul-Alternativen wie „*IEEE 1914 Next Generation Fronthaul Interface*“ (NGFI) entwickelt.

Stromversorgung

Da Messdaten und präzise Angaben zum Energiebedarf einzelner RU-Baugruppen bzw. auch unterschiedlich konfigurierter Funkmodule öffentlich nicht verfügbar sind, werden existierende Daten zu Mobilfunkanlagen (welche das Funkmodul und das Basisbandmodul beinhalten) als

⁴⁰ Jede Komponente des Signalpfads sowie äußere Einflüsse (Signaldämpfung und -interferenz, thermische Einflüsse sowie durch elektromagnetische Felder hervorgerufene Induktion) können dem Signal ein Rauschen beimischen (Rauschbeitrag), welches die Signalqualität mindert und herausgefiltert werden muss.

Näherungswerte herangezogen. Von Interesse sind hierbei Datenblätter, bei denen Angaben zum Energiebedarf die folgenden Details aufweisen:

- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme bei definierten Betriebszuständen (*Idle, Typical, Maximum*)
- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme bei definierten Auslastungszuständen (*Low, Mid, High*)
- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme bei definierten Antennen-/MIMO-Konfigurationen
- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit einzelner Frequenzbänder
- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Mobilfunkgeneration
- ▶ Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Sendeleistung (ERP)

Einen Überblick zur Datenbasis und eine Auswertung der Datenblätter erfolgt im Kontext der Modellbeschreibung des Basisbandmoduls im anschließenden Abschnitt. Die Daten und Annahmen zum mechanischen Design, der Materialzusammensetzung und Fertigung des Funkmoduls folgt in Unterkapitel 2.4.

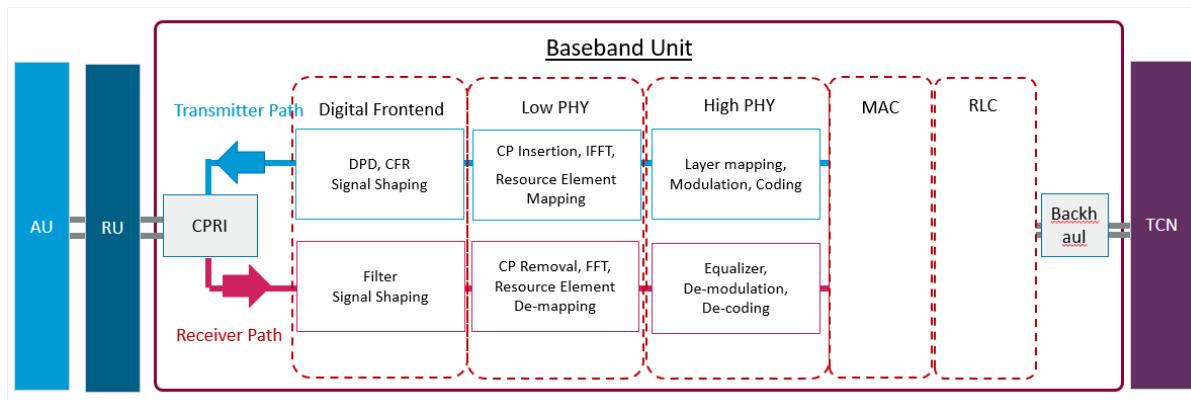
2.2.4 Basisbandmodul (BU)

Architektur

Das Basisbandmodul (*Baseband Unit, BU*) umfasst die digitale Signalverarbeitung und ist von der Antenne aus gesehen dem Funkmodul nachgelagert. Es hat die Funktion, die vom Funkmodul kommenden hochfrequenten Funksignale (RF-Signale) umzusetzen (Demodulation) und an das Transportkernnetz (TCN) weiterzuleiten bzw. in Umkehrung die vom TCN kommenden Signale in hochfrequente Signale zu wandeln und an die Funkmodule weiterzugeben. Für die Signalübertragung im Basisband kommen die verschiedenen, durch die Mobilfunkstandards definierten Kodier- und Modulationsverfahren zur Anwendung (vgl. 3.1.1).

Die Last der digitalen Signalverarbeitung steht in enger Wechselwirkung mit der Übertragungsgeschwindigkeit (Datenrate) und den entsprechenden Kodier- und Modulationsverfahren. Sie ist ein Indikator für den Energiebedarf des Basisbandmoduls.

Das Basisbandmodul (siehe Abbildung 29) steuert zudem das Zusammenwirken einzelner Funkkanäle bzw. auch mehrerer Antennensysteme einschließlich benachbarter Funkzellen. Ein Basisbandmodul kann gewöhnlich mehrere Funkmodule versorgen. Die Auswertung von Datenblätter lässt den Schluss zu, dass typischerweise etwa sechs unterschiedliche Transceiver von einer BU versorgt werden. Da ein singulärer frequenzbandbezogener Transceiver-Pfad die Grundeinheit im RAN-Modell bildet, werden der Energiebedarf des Funk- und Basisbandmoduls darauf anteilig bezogen berechnet. Um die getroffenen Modellannahmen für diesen anteiligen Energiebedarf eines spezifischen Transceivers zu verifizieren, wurden die zur Verfügung stehenden Angaben aus den Datenblättern durch die typische Anzahl versorgter Transceiver (sechs) dividiert. Dieser Ansatz zeigte eine gute Übereinstimmung der Modellannahmen und realen Produktdaten.

Abbildung 29: Prinzipielle Architektur und funktionale Komponenten einer Baseband Unit

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Digitale Signalverarbeitung

Die elektrische Leistungsaufnahme des Basisbandmoduls variiert in Abhängigkeit des Frequenzbandes, der Übertragungsgeschwindigkeit und damit der Mobilfunkgeneration sowie der konkret zur Anwendung kommenden Kodier- und Modulationsverfahren. Daher werden diese Parameter im RAN-Modell berücksichtigt. Ähnlich dem Ansatz beim Funkmodul wird für das Basisbandmodul auch eine konstante elektrische Leistungsaufnahme als Grundlast (*Base Power*) und eine lastabhängige, variable Leistungsaufnahme (*Adaptive Power*) im RAN-Modell unterschieden. Die Auswertung von verfügbaren Datenblättern für Basisbandmodule zeigen teilweise stark abweichende Werte bei unterschiedlichen Betriebs- bzw. Auslastungszuständen. Datenblätter für Mobilfunkanlagen werden nur selten veröffentlicht und konnten für die Studie nicht direkt beschafft werden. Das vorhandene Material bildet einen Technikstand von 2016 bis 2019 ab. Als Beispiele zur Orientierung dienen die Huawei DBS3900 mit RRU 3958 (Huawei 2017c), die Nokia 2016 Flexi Multiradio BTS (Nokia 2016b), die Ericsson AIR 6468 (Ericsson 2018), und die ZTE ZXSDR R8854, S2600 (ZTE 2018a).

Eine weitere Datenquelle für die elektrische Leistungsaufnahme von Mobilfunkanlagen (BU plus RU) unterschiedlicher Konfiguration und Auslastung ist der „EU Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment“ (Version 7.1 und Version 8.0) (Bertoldi und Lejeune 2020, 2021). Diese unverbindlichen Empfehlungen für ein vorbildliches Verhalten (*Best Practice*) wird in regelmäßigen Abständen vom Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission publiziert. Die Empfehlungen umfassen Richtwerte zur elektrischen Leistungsaufnahme von Mobilfunkanlagen im Leerlauf (*Idle Mode*) und im typischen Betrieb (*Active Mode*). Sie unterscheiden hierbei Systemkonfigurationen für die zweite, dritte und vierte Mobilfunkgeneration. Die folgende Tabelle 15 zeigt exemplarisch aggregierte Daten zur elektrischen Leistungsaufnahme von Mobilfunkanlagen.

Tabelle 15: Exemplarische Daten zur elektrischen Leistungsaufnahme von Mobilfunkanlagen

Modell	Marke	Jahr	Frequenz [MHz]	Bandbreite [MHz]	Transceiver	ERP [W]	Typische Leistungsaufnahme [W]	Maximale Leistungsaufnahme [W]
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	60	669	943

Modell	Marke	Jahr	Frequenz [MHz]	Bandbreite [MHz]	Transceiver	ERP [W]	Typische Leistungsaufnahme [W]	Maximale Leistungsaufnahme [W]
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	40	510	673
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	20	374	450
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	2	20	510	600
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	4	20	690	960
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	6	20	785	1235
ZXSDR R8854 S2600	ZTE	2018	2600	20	4	20	315	560
LTE Radio Base Station	CoC	2020	2600	20	6	20	565	790
WCDMA/HSDPA Radio Base Station	CoC	2020	2100		6	20	505	725
GSM/EDGE Radio Base Station	CoC	2020	900/1800		12	20	520	760

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf der hauptsächlich digitalen Komponenten des Basisbandmoduls hat der funktionale Integrationsgrad (Integrierte Schaltkreise, ICs), die Anwendungsspezifik der Software und Hardware (ASIC vs. FPGA vs. CPU/COTS) und allgemein die funktionsspezifische Technologiegeneration der Hardware. Da der technologische Fortschritt in der Halbleiter- bzw. Mikroelektronikindustrie in direkter Wechselwirkung mit der elektrischen Leistungsaufnahme steht, werden für die Modellierung von Zukunftsszenarien im RAN- und TCN-Modell explizit auch Annahmen zur prozentualen Verbesserung des Energiebedarfs einzelner Komponenten berücksichtigt. Die technologischen Trends und Annahmen werden in 3.1.2 ausführlich dargestellt.

Schnittstellen

Das Basisbandmodul ist mittels einer Glasfaserleitung mit der ersten Aggregationsebene des Transportkernnetzes verbunden. Die technische Auslegung der Schnittstelle (Port) skaliert im RAN-Modell mit einem definierten Anteil der theoretisch maximalen Datenübertragungsrate des Antennenstandortes. Allerdings wird nicht der maximale Wert angesetzt, sondern je nach Szenario ein prozentualer Anteil von beispielsweise 10 oder 25 %. Dieser prozentuale Wert der benötigten Datenrate bzw. des Datentransportvolumens skaliert auch das gesamte an das Basisbandmodul angeschlossene TCN-Modell. Die Annahmen zur elektrischen

Leistungsaufnahme der Schnittstelle orientieren sich an heute gängigen 1 Gbps, 10 Gbps und 25 Gbps-Produkten.

Kühlung

Ein weiterer Faktor im Energiemodell ist der Energiebedarf einer optionalen Gerätekühlung. Dieser zusätzliche Energieaufwand wird als prozentualer Zuschlag (*Overhead*) ähnlich einem PUE-Wert (*Power Usage Effectiveness*) im Modell angerechnet. Da Lüfter in Abhängigkeit der operativen Auslastung die Drehzahl anpassen, korreliert dieser Energiebedarf mit den im Modell berücksichtigten Betriebszuständen (*Low, Mid, High Load*). Der Energiebedarf der Lüfter ist hierbei nicht proportional mit der Last, sondern steigt überproportional bei Auslastungen über 50 % der Maximallast. Die unmittelbaren Annahmen zum lastspezifischen, prozentualen Zuschlag wurden auf Basis der ausgewerteten Datenblätter und anderen Literaturquellen getroffen. Der typische Zuschlag schwankt zwischen 7 und 15 %.

Stromversorgung

Im Energiemodell (RAN und TCN) werden des Weiteren die elektrischen Wandlungsverluste der Stromversorgung sowohl auf der Gleichstromebene (DC/DC)⁴¹ als auch durch die Netzteile (AC/DC)⁴² berücksichtigt. Die Ermittlung bzw. Abschätzung von effektiven Wirkungsgraden der Stromversorgung ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da die Auslegung der Stromwandlung viele Leistungsparameter, Technologie- und Designaspekte beinhaltet. Zu Bedenken sind die unterschiedlichen Wirkungsgrade in den Teillastbereichen je nach Auslegung des optimalen Arbeitspunktes. Des Weiteren sind zusätzliche Verluste durch Leistungskorrektur (*Power Correction*) zu berücksichtigen. Die Kosten für sehr effiziente AC/DC-Netzteile und DC/DC-Wandler werden durch die Güte der passiven Komponenten (Kondensatoren und Induktivitäten), sowie die Art, Technologie und Auslegung der aktiven Leistungselektronikkomponenten (IGBTs, MOSFETs) bestimmt. Gerade die Auslegung der Leistungs- und Ansteuerungskomponenten führen zu einem erheblichen Unterschied.

Verfügbare Datenblätter von Mobilfunkanlagen liefern bezüglich der Auslegung der Stromversorgung und insbesondere der Wirkungsgrade in Teillastbereichen leider nur rudimentäre Angaben. Eine Orientierung hinsichtlich typischer Netzteil-Wirkungsgrade bieten hingegen Industriezertifikate wie das 80 Plus Zertifikat (CLEAResult o. J.) und die Zertifikate von Cybenetics (Cybenetics o. J.). Auch relevante gesetzliche Vorgaben der EU Ökodesign-Richtlinie „Commission Regulation (EU) 2019/424“ (OJ L 74, 2019, S. 46-66) können herangezogen werden, gleichwohl diese meist auf den 80 Plus-Anforderungen aufsetzen. Exemplarisch sind in Tabelle 16 die 80 Plus-Anforderungen und in Tabelle 17 die Anforderungen der Europäischen Kommission an Server-Netzteile aufgeführt.

Tabelle 16: 80 Plus Zertifikat Anforderungen an den Wirkungsgrad von Computer-Netzteilen

Nennlast in Prozent	10%	20%	50%	100%
80 Plus Bronze		81%	85%	81%
80 Plus Silber		85%	89%	85%
80 Plus Gold		88%	92%	88%
80 Plus Platinum		90%	94%	91%

⁴¹ Insbesondere relevant im Kontext der gleichstrombetriebenen Funkmodule.

⁴² Netzbasierte Stromversorgung der Antennenstandorte. Die Pufferbatterien der unterbrechungsfreien Stromversorgung werden nicht betrachtet.

Nennlast in Prozent	10%	20%	50%	100%
80 Plus Titanium	90%	94%	96%	91%
230 V Redundante Auslegung				

Tabelle 17: Mindestanforderungen der EC an den Netzteil-Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor ab dem 1. März 2020

	Mindestwert für den Netzteil-Wirkungsgrad				Mindestwert für den Leistungsfaktor
Nennlast in Prozent	10%	20%	50%	100%	50%
Multi Ausgang	-	88%	92%	88%	0,90
Einfach Ausgang	-	90%	94%	91%	0,95

Quelle: „Commission Regulation EU 2019/424“ (OJ L 74, 2019, S. 46-66).

Mittlere Wirkungsgrade von AC/DC-Netzteilen liegen unter Berücksichtigung der Werte für eine Nennleistung von 50 % zwischen 85 % und 89 % und gute bis sehr gute zwischen 92 % und 96 %. Für das RAN-Modell wird für das Referenzjahr 2019 ein Wert von 85 % angenommen. Dieser Wert reflektiert die typischerweise längere Lebensdauer der Mobilfunkanlagen. Laut Angaben von Netzbetreibern und Ausrüstern werden Mobilfunkanlagen zwischen fünf und neun Jahre lang betrieben (durchschnittlich sieben). Somit sind die im Jahr 2019 betriebenen Anlagen durchschnittlich bereits drei bis vier Jahre älter und nicht auf dem neuesten Stand der Technik.

2.2.5 Berechnungsformeln und Konfiguration des RAN-Modells

Im Folgenden werden die soeben dargestellten methodischen Informationen und technischen Daten zusammengeführt und die grundlegenden Berechnungsformeln für das RAN-Modell beschrieben. Diese Darstellung versucht, die Komplexität der tabellarischen Implementierung des RAN-Modells auf die wesentlichen Aspekte zu reduzieren. In der Implementierung des Modells gibt es, in Abhängigkeit vorhandener Daten, eine Reihe weiterer Optionen, um die Granularität der Berechnung zu erhöhen. Alle Parameter sind dabei variabel in Abhängigkeit von dem betrachteten Entwicklungszeitraum (2019-2030) und dem Szenario (siehe 3.1.7).

Der gesamte jährliche Leistungsbedarf der Funkzellen wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$P_{\text{Gesamt_Jahr}} \left[\frac{\text{TWh}}{\text{a}} \right] = \sum_{\text{ASK}} \{ P_{\text{AS}}(\text{ASK}) * \text{Anzahl}_{\text{AS}}(\text{ASK}) \} * 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} * 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} * 10^{-12}$$

Dabei wurde die Anzahl der Antennenstandorte (Anzahl_{AS}) pro Antennenstandortkategorie (ASK) im RCD-Modell berechnet. Diese skaliert die elektrische Leistungsaufnahme eines Antennenstandortes (P_{AS}) in W in dieser ASK auf den Gesamtbestand der Antennenstandorte dieser ASK. Dies wird für alle sechs ASK durchgeführt und die Zwischenergebnisse aufsummiert, um den Gesamtbestand Deutschlands abzubilden.

Die Multiplikation mit 24 Stunden und 365 Tagen dient der Hochrechnung der auf den jährlichen Energiebedarf Wh/a. Zur Umrechnung in TWh/a wird dieser Wert mit 10⁻¹² multipliziert.

P_{AS} berechnet sich über:

$$P_{\text{AS}} [\text{W}] = \frac{\sum_{\text{Load}} \{ (P_{\text{RUS}} + (P_{\text{BUS}} * \text{Kühlung})) * \text{Load}_{\text{Zeitraum}} \}}{24 \text{ h}} / \eta_{\text{AC/DC}}$$

Die Leistungsaufnahmen der Funk- (P_{RUs}) und Basisbandmodule (P_{BUs}) bestehen aus konstanten und lastabhängig variablen Werten. Die Leistungsaufnahmen inklusive Kühlungsaufwand des Basisbandmoduls werden mit den jeweiligen Zeiträumen ($Load_{Zeitraum}$) der drei Lastzustände (*Low, Mid, High Load*) multipliziert und aufsummiert. Diese Zeiträume ergeben insgesamt 24 Stunden und bilden das Tagesprofil ab. Die Division durch 24 Stunden korrigiert das Ergebnis auf Watt. Das Zwischenergebnis wird anschließend durch den Wirkungsgrad bzw. die Effizienz des Netzteils ($\eta_{AC/DC}$) dividiert. So würde der Energiebedarf am Netzteil bei einer Netzteileffizienz von z.B. 85 % um den Faktor 1,18 ($1 / [85\%]$) höher liegen als die gesamte Leistungsaufnahme der daran angeschlossenen Komponenten. Die Differenz beschreibt die Wandlungsverluste.

Die Leistungsaufnahme der Funkmodule (P_{RUs}) berechnet sich nach:

$$P_{RUs} [W] = \sum_{\text{Frequenz}} \{ \text{Anzahl}_{\text{TRX}} * P_{\text{RU_TRX}} \}$$

Hierbei werden für jedes Frequenzband die Leistungsaufnahmen pro Transceiver-Pfad ($P_{\text{RU_TRX}}$) mit der Anzahl der Transceiver-Pfade an dem betrachteten Antennenstandort ($\text{Anzahl}_{\text{TRX}}$) multipliziert. Anschließend werden die Leistungsaufnahmen der Funkmodule aller einzelnen Frequenzen aufsummiert.

Die Berechnung von $P_{\text{RU_TRX}}$ ist relativ komplex und von vielen Parametern abhängig:

$$P_{\text{RU_TRX}} [W] = (PA_{\text{Anzahl}} * \frac{\text{Sendeleistung}_{\text{TRX}}}{\eta_{\text{Duplexer}} * \eta_{\text{PA}}} + P_{\text{Base}} + P_{\text{Compute}} + P_{\text{CPRI}}) * \eta_{\text{DC/DC}}$$

Vereinfacht beschrieben wird die Leistungsaufnahme der Leistungsverstärker in Abhängigkeit der Sendeleistung der jeweiligen Transceiver ($\text{Sendeleistung}_{\text{TRX}}$) unter Berücksichtigung der Duplexer- und Verstärkereffizienzen (η_{Duplexer} und η_{PA}) ermittelt. Anschließend werden sämtliche Leistungsverstärker eines Transceiver-Pfads (PA_{Anzahl}), die konstante Basisleistungsaufnahme (P_{Base}) und die lastabhängigen Computing- und CPRI- Leistungsaufnahmen (P_{Base} und P_{CPRI}) aufsummiert. Das Ergebnis wird zuletzt durch die Effizienz der Gleichstromwandlung ($\eta_{\text{DC/DC}}$) geteilt.

Die Leistungsaufnahme der Basisbandmodule (P_{BUs}) berechnet sich wie folgt:

$$P_{BUs} [W] = \sum_{\text{Anzahl}_{\text{BUs}}} \left\{ P_{\text{BU_Base}} + \sum_{\text{Frequenz}} \{ \text{Anzahl}_{\text{TRX}} * P_{\text{BU_TRX}} \} \right\}$$

$$P_{\text{BU_TRX}} [W] = \text{DataRate} * P_{\text{adaptiv}}$$

Die Leistungsaufnahme der BU wird primär durch den Computing-Aufwand ($P_{\text{BU_TRX}}$) in Abhängigkeit der auslastungsvariablen Datenrate und damit der Frequenz bestimmt. Da ein Basisbandmodul allerdings mehrere Funkmodule unterschiedlicher Frequenzen ansteuert, werden die Leistungsaufnahmen aller verarbeiteten Transceiver-Pfade ($\text{Anzahl}_{\text{TRX}}$) aller Frequenzen aufsummiert. Zusätzlich wird die lastunabhängige Basisleistungsaufnahme ($P_{\text{BU_Base}}$) aufgeschlagen. Schlussendlich werden alle Basisbandmodule eines Antennenstandortes ($\text{Anzahl}_{\text{BUs}}$) addiert.

Die Werte für die lastabhängigen Leistungsaufnahmen der Funk- und Basisbandmodule finden sich für das Referenzjahr 2019 in Tabelle 42 und Tabelle 43 im Anhang A.3.

Berechnung der Datenrate

Im Folgenden soll kurz die Berechnung der theoretischen Datenrate an der Antenne beschrieben werden. Diese reflektiert lediglich die mögliche Kapazität eines Transceivers ausgehend von der Bandbreite pro Frequenzband und in Abhängigkeit des Modulationsverfahrens, der Mobilfunkgeneration, der MIMO-Konfiguration und des Mehraufwands für Steuersignale (*control overhead*). Diese Parameter sind wiederum abhängig vom jeweiligen Entwicklungsszenario (2019-2030).

Die tatsächliche beim Endgerät bzw. Nutzer ankommende Datenrate kann nach Abzug der Steuersignale und durch die Signaldämpfung während der Wellenausbreitung als Funktion der Distanz und Umgebungstopologie deutlich geringer sein.

Die folgenden Formeln wurden auf Basis von (Rathi et al. 2014) erstellt:

$$\text{Symbole pro Sekunde} \left[\frac{\text{Sym}}{\text{s}} \right] = \left(\frac{(\text{BB}_{\text{Subcarrier}} * \text{Carrier}_\text{Aggregation}) * 0,9}{\text{BB}_{\text{Resource}_\text{Block}}} * 168.000 \right)$$

Zunächst werden die pro Sekunde übertragenen Symbole berechnet. Dazu wird die Bandbreite pro Subcarrier ($\text{BB}_{\text{Subcarrier}}$) mit der Anzahl der aggregierten Kanäle multipliziert (*Carrier_Aggregation*). Davon werden 10 % abgezogen (Faktor 0,9), um die effektive Bandbreite zu erhalten pro Transceiver zu erhalten. Anschließend wird diese durch die Bandbreite der Resource Blocks ($\text{BB}_{\text{Resource}_\text{Block}}$) geteilt und mit einem Umrechnungsfaktor 168.000 multipliziert.

$$\text{Datenrate}_{\text{TRX}} \left[\frac{\text{Mbit}}{\text{s}} \right] = \text{Symbole pro Sekunde} * \text{Bits pro Symbol} * \text{MIMO}_\text{Outputs}$$

Die Datenrate pro Transceiver ($\text{Datenrate}_{\text{TRX}}$) berechnet sich aus der Multiplikation der Symbole pro Sekunde mit der Anzahl Bits, die in einem Symbol kodiert werden können (abhängig vom Modulationsverfahren) und der Anzahl der MIMO-Outputs. Jeder MIMO-Output bildet im Prinzip einen eigenen Subtransceiver, weshalb die Datenraten aller Outputs aufaddiert werden. Dieser Faktor skaliert die Datenrate der Antennenarrays in Massive MIMO-Systemen erheblich (siehe Berechnungsergebnisse der Datenrate in 3.2.1).

Ein Teil der übertragenen Bandbreite wird für Steuerungssignale verwendet und kann nicht für die Übertragung von Inhalten wie Textnachrichten, Video, etc. genutzt werden. Um die vom Nutzer erfahrbare Datenrate zu ermitteln, wird der Steuerungsanteil abgezogen. Dieser hängt von der Mobilfunkgeneration ab und sinkt tendenziell mit steigender Generation (etwa 75 % bei 2G und 3G, 25 % bei 4G und 15 % bei 5G).

$$\text{Datenrate (ohne Steuerungsanteil)}_{\text{TRX}} \left[\frac{\text{Mbit}}{\text{s}} \right] = \text{Datenrate}_{\text{TRX}} * (1 - \text{Steuerungsanteil})$$

Tabellen zu den Berechnungen der Datenraten pro Frequenzband für die Jahre 2019 und 2030 finden sich in A.4 beziehungsweise A.5.

2.3 Transportkernnetzmodell – TCN-Modell

2.3.1 Konzeption der Modellierung

Das Transportkernnetz besteht aus Technikelementen zur Steuerung, Aggregation, Verteilung und Weiterleitung des von und zu den Antennenstandorten (RAN) fließenden Datenverkehrs. Für die Transportfunktionalität kommt hauptsächlich glasfaserbasierte Netzwerktechnik unterschiedlicher Kapazität zum Einsatz. Teilweise könnten in der ersten Aggregationsstufe (*Backhaul*) auch Richtfunkstrecken existieren, aber hierzu liegen keine genauen Angaben vor,

daher werden diese nicht weiter betrachtet.

Zur Weiterleitung des Datenverkehrs existieren Netzvermittlungsknoten (*Network Nodes*), an denen je nach Notwendigkeit Switches, Router, oder bei Übergängen in neue Netze auch Gateways zum Einsatz kommen. Des Weiteren werden vom sogenannten Kernnetz (*Core Network*) auch wichtige Netzsteuerungs- und Kundenmanagementfunktionen realisiert. Diese Funktionalität erfordert Server und teilweise auch Datenspeichersysteme, die an größeren Standorten (*Offices*) zusammengefasst werden.

Die Aggregationsnetze sind häufig als verknüpfte Ringe ausgelegt und dem Funkzugangsnetz unmittelbar nachgelagert. Sie haben die Aufgabe, die einzelnen Antennenstandorte in der Peripherie des Mobilfunknetzes an das Transportkernnetz anzubinden. Angaben zu individuellen Netztopologien der Aggregationsnetze wie beispielsweise die Anzahl von Netzknopen, typischen Beschriftungsgrößen der Vermittlungstechnik, etc. liegen nicht vor. Daher wird die Aggregations- und Kernnetzebene anhand einer generischen Topologie auf Grundlage der ITU-T Recommendation (Rec. ITU-T G.8300) – einer Empfehlung für hybride 5G Transportnetze – im TCN-Modell nachgebildet. Konkret wird von zwei Aggregationsringen und einem verzweigten Kernnetz (*Backbone*), bestehend aus den folgenden Netzelementen, ausgegangen:

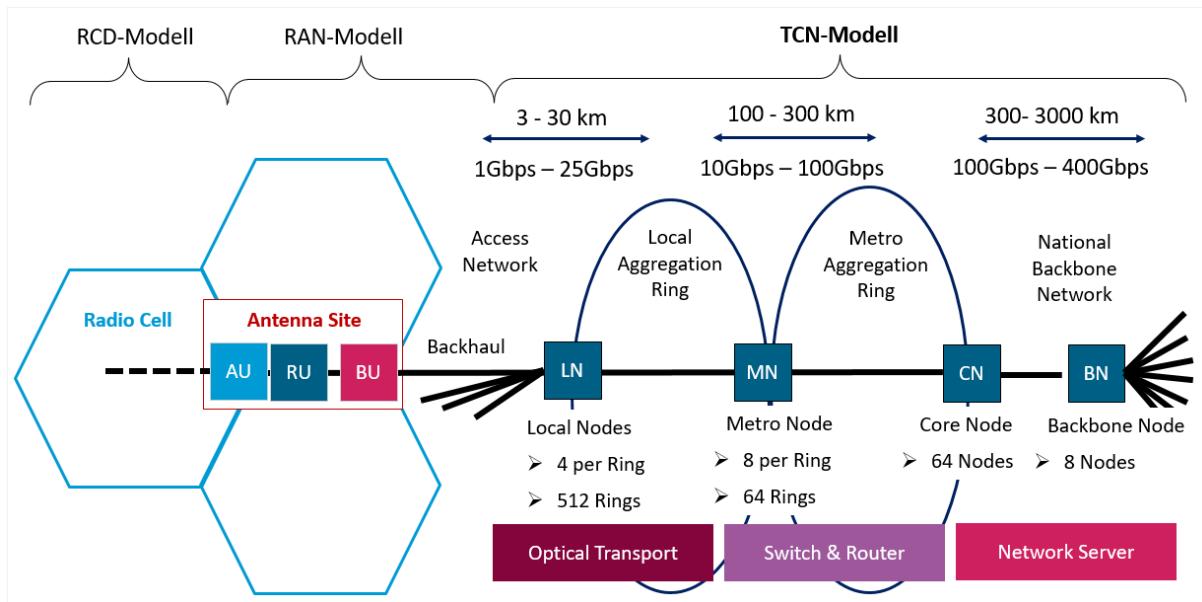
- ▶ 512 lokale Aggregationsringe mit je vier Verteilknoten pro Ring
- ▶ 64 Metro-Aggregationsringe mit je acht Verteilknoten pro Ring
- ▶ 64 Verteilknoten, welche die Verbindung zwischen den Hauptverteilern des Kernnetzes und der Metroebene bilden
- ▶ 8 redundant ausgelegte Hauptverteilern

Die Anzahl von 2.048 (512x4) lokalen Aggregationsknoten (*Local Aggregation Nodes*) eines generischen bundesweiten Aggregationsnetzes ist ein Schätzwert, der von der Annahme ausgeht, dass die Entfernung zwischen einem Antennenstandort und dem ersten, lokalen Aggregationsknoten durchschnittlich etwa 10 km beträgt.⁴³

Die Abbildung 30 zeigt die im TCN-Modell verwendete Netztopologie in einer prinzipiellen Darstellung.

⁴³ Für das TCN-Modell wird aus mehreren Gründen mit einer vergleichsweise kurzen Strecke (10 km) gerechnet, auch wenn dies die Anzahl der Aggregationsknoten rechnerisch erhöht und in der Realität möglicherweise weniger Knoten von den Netzbetreibern unterhalten werden. Langfristig wird ein enges Aggregationsnetz mit kurzen Strecken nötig, da in der 5G Standardisierung das Konzept verankert ist, die digitale Signalverarbeitung der BU (derzeit im 5G Standard als *Distributed Unit [DU]* bezeichnet) in der ersten lokalen Aggregationsebene aus Effizienzgründen teilweise zu bündeln (*Pooling*) und als sogenannte *Centralized Units (CU)* zu betreiben. Eine Bedingung zur Erreichung der notwendigen Latenz zwischen RU und CU sind kurze eCPRI-Strecken von maximal 20 km für eine Signallaufzeit von 5 ms für Hin- und Rückweg (*Roundtrip*).

Abbildung 30: Struktur des Transport- und Kernnetzes



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Für die überschlägige Berechnung wurde die Zahlenbasis des RCD-Modells für das Referenzjahr 2019 herangezogen. Ein generischer Netzbetreiber verfügt demnach über rund 28.000 Antennenstandorte und 2.048 Aggregationsknoten, die sich über die gesamte Fläche Deutschlands verteilen.⁴⁴ Der Vereinfachung wegen wird in der Berechnung von einer absolut gleichmäßigen Verteilung der Antennenstandorte innerhalb der jeweiligen Antennenstandortkategorien ausgegangen. In der gleichen Fläche liegen die Aggregationsknoten ebenfalls gleichmäßig verteilt. So entstehen im Durchschnitt über die sechs Antennenstandortkategorien der Makrozellen Funkzellflächen von 12,8 km² und Aggregationszellflächen von 174,6 km² mit entsprechenden Radien, da bei Letzteren für die überschlägige Berechnung von Kreisflächen ausgegangen wird.⁴⁵ Um nun die mittlere Entfernung vom Aggregationsknoten zum Antennenstandort zu bestimmen, wird der halbe Radius der Aggregationsfläche ermittelt, welcher einen Wert von rund 5,3 km hat. Dieser berechnete Durchschnittswert liegt deutlich unter der eingangs getroffenen Annahme von 10 km.

Um diese Annahme zu überprüfen, wird in gleicher Weise die Entfernung für die 5.156 ländlichen Antennenstandorte (ASK 1) berechnet. Diese 18 % aller Antennenstandorte bedecken 65 % der Fläche Deutschlands. Geht man davon aus, dass jeder Aggregationsknoten etwa eine identische Anzahl an Antennenstandorten versorgt (14), so sind 369 Aggregationsknoten in der Fläche verteilt. Jeder Aggregationsknoten hat eine Fläche von 633 km², sodass sich unter Anwendung des oben beschriebenen Vorgehens eine Entfernung von durchschnittlich 10 km ergibt. Vor dem Hintergrund dieser überschlägigen Rechnungen erscheint der Schätzwert von 2.048 Aggregationsknoten als gerechtfertigt. Die genaue Anzahl der Netzknoten ist eine Information, die das Modell präzisiert, aber nicht essenziell ist, da für die Berechnung des Energiebedarfs des TCN der theoretische Datenverkehr und die Datenrate des Anschlusses am Antennenstandort als Eingangswert im TCN-Modell verwendet wird (siehe weiter unten). Die Anzahl ist aber insofern wichtig, da für die Berechnung von Aufschlägen (z.B.

⁴⁴ Hier wird von 100 % ausgegangen, gleichwohl die Abdeckung eher bei 98 % der Fläche liegt.

⁴⁵ Auch hier eine Vereinfachung des Ansatzes im RCD-Modell, welches die Funkzellen als Hexagon abbildet.

Kühlung und Auslegung der Stromversorgung) sowie der CO2-Bilanz der Geräteherstellung eine Stückzahl benötigt wird.

Die Annahmen zu den Netzknoten der nachgelagerten Netzebenen wurden ähnlich zum Ansatz der ersten Aggregationsebene ermittelt. Hierbei wird eine immer höhere Bündelung des Datenverkehrs, der real über optische Transportsysteme (*Dense Wavelength Division Multiplex, DWDM*) geführt wird, angenommen und vereinfacht als eine Schnittstellen-Bitrate (*Port Bitrate*) modelliert. Dieser Ansatz erlaubt insbesondere für Zukunftsszenarien eine schnelle Skalierung des Modells, da beispielsweise die Backhaul-Datenrate pro Link von aktuell 10 auf 25 Gbps mit einer der entsprechenden Datenrate zugeordneten elektrischen Leistungsaufnahme verknüpft werden kann.

An jedem Netzknoten wird zuzüglich zum optischen Transport eine Komponente der Netzvermittlungstechnik, d.h. ein Switch, Router oder Gateway anteilig angerechnet. Auch in diesem Fall skaliert die angesetzte Datenrate den Wert der elektrischen Leistungsaufnahme. Diese Werte orientieren sich wiederum an aktuellen Produktdatenblättern (siehe weiter unten). Die Datenrate im Uplink und Downlink resultiert aus der Berechnung der theoretischen Datenrate der Transceiver inklusive des Steuerungsanteils entsprechend der Standortkonfiguration (RAN-Modell).

Hierzu werden im RAN-Modell die theoretische Datenrate der einzelnen Transceiver in Abhängigkeit der angenommenen Mobilfunkgeneration, des Modulationsverfahrens, der frequenzabhängigen Kanalbandbreite, etc. berechnet und alle Transceiver aufaddiert (siehe 2.2.5). Diese theoretische Datenkapazität wird real nicht übertragen. Sie liefert aber in Kombination mit Literaturwerten und den Statistikdaten zum durchschnittlichen Nutzerdatenvolumen gute Anhaltspunkte für die Auslegung der Schnittstelle zum Aggregationsnetz und kann als maximale Datenrate betrachtet werden, auf die das TCN ausgelegt ist. Tabelle 18 zeigt die berechneten Werte einer aggregierten, theoretischen Datenrate, die als Skalierungsfaktoren der Schnittstellenkonfiguration im TCN-Modell dienen.

Tabelle 18: Aggregierte Datenrate als Skalierungsfaktor für das TCN-Modell

Jahr	Frequenzbereich	Durchschnittliche Auslastung	In das TCN eingespeiste Datenrate (alle Standorte)
2019	Zentimeterwelle	25%	4.448.913 Mbit/s
2030	Zentimeterwelle	25%	159.296.971 Mbit/s
2030	Millimeterwelle	10%	1.824.030.866 Mbit/s

Um eine Ausfallsicherheit des TCN zu simulieren, wird der Datenverkehr im TCN-Modell ab der ersten Aggregationsebene (lokale Knoten) verdoppelt und sozusagen über zwei Pfade geführt. Hierdurch verdoppeln sich die virtuellen Schnittstellen und der damit verbundene Energie- und Ressourcenbedarf. Ein weiterer konzeptioneller Ansatz bezüglich der Skalierung des TCN-Modells ist die Unterscheidung der Betriebszustände (*Low, Mid, High Load*), die vom RAN-Modell übernommen und direkt verknüpft wurden. Mit diesem Ansatz variiert auch die Auslastung des Transportnetzes und so können beispielsweise Szenarien für ein aktives Energiemanagement in der Sachbilanz abgebildet werden. In Abhängigkeit des Betriebszustands und der Datenrate variieren im TCN-Modell auch die Energiebedarfe der Vermittlungstechnik und Netzwerk-Server. Hierbei wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Datenvolumen auch der Rechenaufwand der digitalen Signalverarbeitung steigt. Dieser Zusammenhang ist

jedoch nicht linear und so werden anhand von Datenblättern Werte für elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten bei niedriger, mittlerer und hoher Auslastung festgelegt. Des Weiteren wird auch die technische Entwicklung hinsichtlich der Verbesserung der Energieeffizienz der Hardware ähnlich dem Ansatz im RAN-Modell auch im TCN-Modell berücksichtigt. Schließlich werden die Auslegung der Stromversorgungsanlage sowie die Kühlungs- und Klimatisierungsanlagen modelliert und entsprechende Verlustleistungen und Aufschläge ermittelt.

2.3.2 Anlagentechnik im TCN

Hinsichtlich der Netzvermittlungs-, optischen Transport- und Netzsteuerungstechnik werden im TCN-Modell folgende funktionale Komponenten berücksichtigt:

- ▶ Switch
- ▶ Router
- ▶ Gateway
- ▶ Optical Network Unit (ONU)
- ▶ Core Network Server (CNS)

Diese befinden sich auf unterschiedlichen Schichten des OSI-Modells⁴⁶ und werden im Folgenden kurz beschrieben.

Switch Unit

Switches sind Netzwerkgeräte, die auf der OSI-Schicht 2 (*Layer 2, L2*), die Datenpakete innerhalb eines logischen Netzwerks an bestimmte physische Ports im Gerät senden. Die Steuerung und damit der zuverlässige Datenaustausch basiert auf der Sicherungsschicht (*Data Link Layer*). Der elektrische Energiebedarf der Switches ist abhängig von der Port-Konfiguration und den maximal erreichbaren Datenraten. Zur Ermittlung von durchschnittlichen Werten für die elektrische Leistungsaufnahme von Switchen wurden Datenblätter ausgewertet (vgl. Tabelle 45 in A.5). Soweit möglich, wurden Werte zur typischen Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Datenrate erfasst und auf definierte Datenraten gemittelt. Im TCN-Modell werden diese Werte in Abhängigkeit des Szenarios eingesetzt.

Router Unit

Router sind Netzwerkgeräte, die auf der OSI-Schicht 3 (*L3*) Datenpakete von einem logischen Netzwerk zu einem anderen entlang eines vordefinierten oder dynamisch erkannten Pfads weiterleiten. Dieses „Routen“ basiert auf Informationen der Netzwerkschicht, die in den Steuerdaten der Netzwerkpakete eingebettet sind. Damit vermitteln Router die Datenströme in aktiver Form mittels einer definierten Logik. Router benötigen mehr Rechenleistung als Switches, da sie aktive Abgleiche mit Routingtabellen machen. Ähnlich wie Switches wird die elektrische Leistungsaufnahme von der Port-Konfiguration und Datenrate bestimmt. Um durchschnittliche Werte zu ermitteln, wurden auch in diesem Fall Datenblätter ausgewertet (vgl. Tabelle 46 in A.5).

Gateway Unit

⁴⁶ Das OSI-Modell (*Open Systems Interconnection Model*) wird standardmäßig zur Beschreibung von Schichten in Netzwerkprotokollen verwendet. Siehe: <https://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell>

Gateways sind Netzwerkgeräte, die auf der OSI-Schicht 4 (*L4*) logisch und physisch getrennte Netzwerke mit unterschiedlichen Protokollen und Architekturen verbinden. Gateways werden meist mit Netzsicherheitskomponenten (z.B. Firewalls) ausgerüstet, um das eigene Netzwerk vor unerwünschtem Datenverkehr zu schützen. Damit bilden Gateways die Hauptnetzketten und Übergänge zu anderen Betreibernetzen. Die komplexe Funktionalität erfordert hohe Prozessorleistungen, Pufferspeicher und Netzwerkkapazität. Entsprechend ist die elektrische Leistungsaufnahme vergleichsweise hoch. Ähnlich dem Vorgehen bei den Switchen und Routern wurden mittels Datenblättern und Onlineliteratur durchschnittliche Werte für die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Datenrate ermittelt (vgl. Tabelle 47 in A.5).

Optical Network Unit

Der Begriff wird synonym für Schnittstellen (*Ports*) und Leitungsendgeräte (*Optical Line Terminal, OLT*) optischer Netzwerkkomponente verwendet. Diese Komponenten bilden die Endpunkte eines faseroptischen Links und wandeln zwischen optischen und elektrischen Signalen zu deren Übertragung in andere Netzbereiche. Im TCN-Modell erfolgt die Auslegung dieser Systemkomponente beispielsweise als 10 oder 25 Gbps Schnittstelle.

Des Weiteren werden optische Multiplexer im Modell berücksichtigt. Diese sind beispielsweise *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (ROADM)*, mit denen mehrere Kanäle auf einem einzigen Übertragungsmedium (Glasfaserystem) zusammengefasst werden. Ohne diese könnte nur ein Kanal pro Glasfaserkabel betrieben werden. Mit ROADMs können breitbandige Kanäle auch ohne eine optisch-elektrische Wandlung bzw. Konvertierung aller Wellenlängenmultiplex-Kanäle (*Wavelength Division Multiplex, WDM*) der Transportfaser hinzugefügt (*add*) oder entnommen (*drop*) werden. Damit eignen sich diese optischen Verteil- und Transportsysteme ideal für große Netzketten und den energieeffizienten Transport großer Datenmengen über lange Distanzen. Typischerweise muss ein Signal aber etwa alle 100 km verstärkt werden. Im TCN-Modell wird die Leistungsaufnahme optischer Multiplexer über die Datenrate skaliert (W/bps).

Network Server Unit

Ein Server ist hier ein physischer Computer, auf dem Dienste und andere Programme für dedizierte Anwendungen (*Applications*) bereitgestellt werden. Server werden meist gebündelt in Serverschränken oder -gestellen (*Racks*) betrieben, welche in klimatisierten Rechenzentren (*Data Center*) stehen. Die Hardware-Konfiguration der Server mit Prozessoren, Speichermodulen (ggf. auch dedizierten Speichersystemen) und Kommunikationsschnittstellen wird von der Funktionalität und der benötigten Datenverarbeitungskapazität bestimmt. Der elektrische Energiebedarf der Datenverarbeitung skaliert maßgeblich mit der anwendungsspezifischen Auslegung der Prozessoren.

Stromversorgung

Die Gleichstromwandlung (DC/DC) für die dedizierte Stromversorgung der elektronischen Komponenten auf den Leiterplatten erzeugt je nach verwendeter Hardware energetische Verluste, die als thermische Energie (Wärme) abgegeben wird. Der Wirkungsgrad der DC/DC-Wandler liegt heute typischerweise zwischen 85 % und 95 %.

Kühlung

Lüfter sind Bestandteil des thermischen Gerätemanagements. Die durchschnittliche thermische Verlustleistung aktiver Elektronikkomponenten wie der Prozessoren (*Central Processing Unit, CPU*) wird mit der TDP-Kennzahl (*Thermal Design Power*) angegeben. Je nach Konfiguration muss zusätzlich zur passiven Entwärmung über Kühlkörper auch mit Lüftern die Wärme verteilt

bzw. abgeführt werden. Der Energiebedarf der Lüfter steigt mit zunehmender Drehzahl überproportional an.

Die folgende Tabelle 19 zeigt zusammengefasst die Daten der TCN-Hauptkomponenten. Dargestellt sind die absoluten, von allen Komponenten dieser Art zu verarbeitenden Datenraten sowie die individuellen Leistungsaufnahmen pro Gerät und der Kühlungsaufwand in Prozent.

Tabelle 19: Daten der TCN-Hauptkomponenten in den Entwicklungsszenarien

Komponente	Einheit	2019	2019-2022	2023-2026	2027-2030
Switch Datenrate	Mbit/s	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000
Switch Leistung	W	1.000	980	960	941
Router Datenrate	Mbit/s	2.400.000	2.400.000	2.400.000	2.400.000
Router Leistung	W	1.500	1.470	1.441	1.412
Router/Gateway Datenrate	Mbit/s	3.200.000	3.200.000	3.200.000	3.200.000
Router/Gateway Leistung	W	2.000	1.960	1.921	1.882
Radio Network Controller Leistung	W/TRX	5	5	5	5
Core Network Server Leistung	W/TRX	5	5	5	5
Kühlungsaufwand	%	20	20	19	19
Energieeffizienz-Verbesserung (konventionell):	%		2	2	2

Detailliertere Daten zu den Bestandszahlen und der auslastungsabhängigen elektrischen Leistungsaufnahme finden sich in Tabelle 48 und Tabelle 49.

2.3.3 Berechnungsformeln und Konfiguration des TCN-Modells

Analog zur Beschreibung der grundlegenden Berechnungsformel des RAN-Modells werden an dieser Stelle die Berechnungsformeln für das TCN-Modell erläutert. Alle Parameter sind abhängig von dem jeweils betrachteten Entwicklungsszenario.

Diese Darstellung reduziert die Komplexität der tabellarischen Implementierung des Modells auf die wesentlichen Aspekte.

Der gesamte jährliche Stromverbrauch durch das TCN wird ähnlich zum RAN wie folgt berechnet:

$$P_{\text{Gesamt_Jahr}} \left[\frac{\text{TWh}}{\text{a}} \right] = P_{\text{Hardware}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} * 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} * 10^{-12}$$

$$P_{\text{Hardware}} [\text{W}] = \sum_{\text{Komp}} \{ \text{Anzahl}_{\text{Standorte}} * \text{Anzahl}_{\text{Komp pro Standort}} * P_{\text{Komp}} \}$$

Dabei bildet P_{Hardware} die Summe der individuellen Leistungsaufnahmen der Komponenten (P_{Komp}) über den gesamten Gerätebestand in allen Standorten und über alle Standorte ab. Es werden dabei zehn verschiedenen Hardwarekomponenten betrachtet, die in den in 2.3.1 beschriebenen Ringen eingesetzt werden. Die Hardwarekomponenten sind vier verschiedene Arten von Optical Network Units (ONU) und Switchen sowie drei verschiedene Arten von Routern, Radio Network Controllern (RNC) und Core Network Servern (CNS).

Die Leistungsaufnahme der ONU skaliert primär über die Leistungsaufnahme der Ports (P_{Port}), welche von dessen spezifischer Datenrate abhängig ist. Die Leistungsaufnahmen aller Ports der ONU im Up- und Downlink werden zusammengerechnet und mit Kühlungs- und Wandlungsverlusten beaufschlagt:

$$P_{\text{ONU}} [\text{W}] = (\text{Anzahl}_{\text{Ports Up}} * P_{\text{Port Up}} + \text{Anzahl}_{\text{Ports Down}} * P_{\text{Port Down}}) * \frac{\text{Kühlung}}{\eta_{\text{AC/DC}}}$$

Die Router und der Switch berechnen sich über eine definierte Leistungsaufnahme pro Gerät. Nur die Anzahl an Geräten pro Standort ist von dem Verhältnis der benötigten und der unterstützten Datenrate abhängig (für die Werte der jeweiligen Basisleistungsaufnahmen P_{KompB} siehe Tabelle 19):

$$P_{\text{Router}} [\text{W}] = P_{\text{RouterB}} * \frac{\text{Kühlung}}{\eta_{\text{AC/DC}}}$$

$$P_{\text{Switch}} [\text{W}] = P_{\text{SwitchB}} * \frac{\text{Kühlung}}{\eta_{\text{AC/DC}}}$$

Der RNC und der CNS werden über die Leistungsaufnahme pro Transceiverpfad ($P_{\text{Komp_TRX}}$) und die Gesamtanzahl an TRX im RAN skaliert, aufgeteilt auf die Anzahl der Geräte pro Standort. Auch hier wird ein Kühlungs- und Wandlungsverlust beaufschlagt:

$$P_{\text{RNC}} [\text{W}] = \frac{\text{Anzahl}_{\text{TRX gesamt}}}{\text{Anzahl}_{\text{RNCs pro Standort}}} * P_{\text{RNC_TRX}} * \frac{\text{Kühlung}}{\eta_{\text{AC/DC}}}$$

$$P_{\text{CNS}} [\text{W}] = \frac{\text{Anzahl}_{\text{TRX gesamt}}}{\text{Anzahl}_{\text{CNSs pro Standort}}} * P_{\text{CNS_TRX}} * \frac{\text{Kühlung}}{\eta_{\text{AC/DC}}}$$

Die Datenrate unterscheidet sich je nach Auslastung, Netzebene, Hardware und der Anzahl an Standorten der jeweiligen Hardware:

$$\text{Datenrate}_{\text{Hardware_Site}} = \text{Auslastung} * \frac{\sum_{\text{AS}} \{\text{Datenrate}_{\emptyset} * \text{Anzahl}_{\text{Standorte}}\}}{\text{Anzahl}_{\text{Ringe}} * \text{Anzahl}_{\text{Standorte/Ring}}}$$

2.4 Material- und CO2-Bilanz der Komponentenherstellung

2.4.1 Sachbilanz und Umweltbewertung der Herstellungsphase

Die folgenden Abschnitte beschreiben die prinzipielle Vorgehensweise bei der Erstellung der herstellungsbezogenen überschlägigen CO2-Bilanz sowie der dafür benötigten Sachbilanz.

Im ersten Schritt wurden auf Basis der Netzarchitektur der RCD-, RAN- und TCN-Modelle (siehe 2.1.1, 2.2.1 und 2.3.1) alle physischen Netzkomponenten identifiziert, für die aufgrund ihrer Materialkomposition, ihrer Masse und/oder ihrer Anzahl eine nicht zu vernachlässigende Umweltlast zu erwarten ist (auf Basis bisheriger Studien und Ökobilanzerfahrungen):

Funkzugangsnetz (RAN):

- ▶ Antennenmodul (antenna unit, AU)
- ▶ Funkmodul (radio unit, RU)
- ▶ Basisbandmodul (baseband unit, BU)
- ▶ Kabel (cable)
- ▶ Antennenmast (mounting)
- ▶ Servergestell (rack)

Transportkernnetz (TCN):

- ▶ Optische Netzeinheit (optical network unit, ONU)
- ▶ Switch
- ▶ Funknetz-Steuerung (radio network controller, RNC)
- ▶ Router/Gateway
- ▶ Kernnetz-Server (core network server, CNS)

Endgeräte:

- ▶ Smartphone
- ▶ Sensor

Dabei wurde für jeden Komponententyp eine generische Einheit angenommen, die in ihrer Konfiguration den Durchschnitt der Vielzahl an unterschiedlichen Variationen repräsentiert.

Im zweiten Schritt wurde die Materialkomposition aller Komponententypen analysiert und eine Liste an Materialien zusammengetragen, die aufgrund der großen Masse oder aufgrund der hohen relativen Umweltwirkung einen signifikanten Einfluss auf die Umweltlast haben werden. Dabei war auffällig, dass dies trotz der großen Materialvielfalt in Elektronikkomponenten nur eine kleine Auswahl an Materialien betrifft und diese dafür in fast allen elektronischen Geräten Verwendung finden. Dies ist damit begründet, dass Letztere unabhängig von Größe und Funktion im Grunde immer Halbleiterchips verwenden, die auf einer Leiterplatte aufgebracht sind, welche durch ein Gehäuse aus Aluminium oder Stahl geschützt werden muss.

Betrachtet man nun neben der soeben beschriebenen Komponentenebene auch die Netzebene, kommen Kupfer- oder Glasfaserkabel, die verschiedene Netzelemente verbinden und mitunter beträchtliche Mengen an Stahl und Beton für Montageelemente wie Antennenmasten und Infrastruktur hinzu.

Endgeräte verfügen oft zusätzlich über Displays und Akkus, die hier zusammen mit Leiterplatten (PCBs) und Halbleiterchips (ICs) vereinfacht ebenfalls als eine Art Verbundmaterial und weniger als physische Komponenten betrachtet werden. Im Gegensatz zu den eigentlichen Materialien werden diese aber nicht über die Masse, sondern über die Fläche bzw. im Falle der Akkus über

die Kapazität skaliert. Dies ist darin begründet, dass die Hauptumweltwirkung der ICs und PCBs nicht aus der Masse der darin enthaltenen Materialien, sondern aus dem hohen Bedarf an Energie und Chemikalien (welche als Betriebsmittel am Ende nicht Teil des Produkts sind) während der Produktion resultiert. Diese Bedarfe skalieren primär mit dem Durchsatz der Maschinen, also der in einer bestimmten Zeit verarbeiteten Stoffmenge. Diese wird wiederum aufgrund der flachen Geometrie der Werkstücke durch die zu prozessierende Fläche bestimmt. Im Falle der Akkus lässt sich aufgrund unterschiedlicher Bauformen und eingesetzter Materialien (insbesondere für die Ummantelung) kein direkter Zusammenhang zwischen der Masse und der Funktionserfüllung (Kapazität) ableiten. Letztere ist jedoch entscheidender für den Produktionsaufwand, der auch hier die Hauptumweltwirkung trägt.

Plastikkomponenten wie Kabelummantelungen und kleinere Gehäuseteile (Dichtungen, Schalter, Stecker, etc.) wurden aufgrund der vergleichsweise geringen erwartbaren CO2-Bilanz gegenüber anderen Materialien vernachlässigt, da sie weder eine große Masse noch eine hohe spezifische Umweltwirkung⁴⁷ aufweisen.

Passive elektronische Komponenten, seltene Erden, einige hochwertige Metalle und Halbmetalle wie Gallium und Germanium sowie Glasfaser(-verstärkter Kunststoff) konnten aufgrund nicht verfügbarer Daten hinsichtlich der Umweltlasten und/oder der verwendeten Mengen nicht berücksichtigt werden⁴⁸. Zudem kann in dieser Studie nicht nach unterschiedlichen Legierungen oder Herstellungsverfahren differenziert werden. Die daraus resultierende Unvollständigkeit der Umweltbewertung in dieser Studie ist jedoch nur ein Symptom des grundsätzlichen Problems der unzureichenden Datenverfügbarkeit bei der Ökobilanzierung von Elektronikkomponenten. Der rasante technologische Fortschritt, der in immer kürzeren Zyklen neue Produktionsprozesse, neue Materialkombinationen und neue Gerätekonfigurationen hervorbringt, die zusätzlich aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks in der Industrie unter Geheimhaltung stehen und im Rahmen einer zu veröffentlichten Studie nicht genutzt werden dürfen, behindert die Recherche zu komponentenbezogenen Daten zusätzlich.

Ausgehend von den oben genannten Limitationen ist nachfolgend eine Liste der untersuchten beziehungsweise untersuchbaren Materialien aufgeführt:

- ▶ Aluminium
- ▶ Beton
- ▶ Kupfer
- ▶ Gold
- ▶ Stahl
- ▶ Leiterplatte 1-lagig, 8-lagig, und 12-lagig (PCB)
- ▶ Halbleiterchip (IC)
- ▶ Liquid-Crystal-Display
- ▶ Akku (battery)

⁴⁷ In diesem Falle kg CO2e/kg Material.

⁴⁸ Für allgemeinere Informationen zur Kritikalität von Rohstoffen in der Informations- und Kommunikationstechnik sei an dieser Stelle auf das UBA-Projekt „Green Cloud Computing“ (Gröger et al. 2021) und den Bericht „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ 2021 der Deutschen Rohstoffagentur (Marscheider-Weidemann et al. 2021) verwiesen.

Für die identifizierten Materialien wurden dann entsprechende Umweltdatensätze aus Ökobilanz-Datenbanken (ecoinvent o. J.; thinkstep AG 2019), und vorangegangenen Ökobilanzstudien⁴⁹ verwendet und diese mit den jeweils in den Geräten enthaltenen Mengen eines Materials multipliziert, um die CO2-Bilanz zu berechnen. Die jeweiligen Datensätze werden für die Prognose bis 2030 nicht angepasst, da die Entwicklung der Umweltwirkung der Herstellung von Materialien und Komponenten zum derzeitigen Zeitpunkt nicht vorhersehbar ist. Gründe dafür sind etwa gegenläufige Trends (bspw. die Verbesserung der Energieeffizienz bei Herstellungsprozessen versus aufwendigere Förderung durch Rohstoffverknappung) und die unbekannte Entwicklung von technologischen Gegebenheiten und Strommixen in diversen Ursprungsländern.

Die Quantifizierung der benötigten Gesamtmenge an Material (Materialbilanz) ergibt sich aus der Multiplikation der Menge des jeweiligen Materials pro Komponente mit der Gesamtanzahl an Komponenten dieses Typs. Für die Leiterplatte und die Halbleiterchips wurden typische Materialzusammensetzungen angenommen. So enthält die Leiterplatte beispielsweise Kupferschichten und eine Goldbeschichtung, die Halbleiterchips bestehen zu einem großen Teil aus hochreinem Silizium und Gold für die Ankontaktierung.

Die Ermittlung der „typischen“ Konfigurationen für jeden Komponententyp und der daraus abzuleitenden Materialmengen stellte die größte Herausforderung dar, weil für die Komponenten wenige bis gar keine Datenblätter oder sonstige hilfreiche Informationen öffentlich verfügbar sind. Dies hatte zur Folge, dass die Sachbilanzen vor allem auf physischen Abmessungen basieren, die entweder aus maßstabsgetreuen Bildern oder Standardgrößen hergeleitet werden mussten. Die zusätzliche Schwierigkeit bestand darin, für jeden Komponententypen ein eigenes parametrisiertes geometrisches Modell zu entwickeln, aus dem sich die entsprechenden Mengen an Materialien und Elektronikkomponenten ableiten lassen. Diese skalieren über die physischen Abmessungen und sind auf die jeweils passende Referenzeinheit normiert (pro Stück, pro Meter, pro Basisstation).

Eine ausführlichere Herleitung der Sachbilanzdaten der einzelnen Komponenten finden sich in den jeweiligen Kapiteln 2.4.2CO2-Bilanz Herstellung RAN (2.4.2), CO2-Bilanz Herstellung TCN (2.4.3), und CO2-Bilanz Herstellung Endgeräte (2.4.4).

Ein entscheidendes Merkmal für die Nachhaltigkeit von physischen Geräten ist deren Lebensdauer. In der gesamten Studie wird der funktionale Nutzen der Netze als Bereitstellung von Mobilfunkdiensten einer bestimmten Dienstgüte für ein Jahr betrachtet. Dies bedeutet, dass die herstellungsbezogene CO2-Bilanz für eine Komponente anteilig pro Jahr im Einsatz gesehen werden muss. Dazu wird der initiale Herstellungsaufwand durch die Lebensdauer in Jahren geteilt (kg CO2e/a). Je länger die Lebensdauer, desto geringer der jährliche Herstellungsanteil, also die relative Umweltwirkung pro Jahr. Die absolute Umweltwirkung bleibt unverändert, jedoch müssen die Geräte bei einer längeren Lebensdauer seltener ausgetauscht werden, wodurch der Herstellungsaufwand weniger häufig zu einer Umweltbelastung führt.

Für die elektronischen Komponenten des Netzes (AU, RU, BU, TCN-Equipment) kann im Durchschnitt von ca. sieben Jahren Einsatzdauer ausgegangen werden, bevor diese im Zuge einer Modernisierung ausgetauscht werden. Kabel und Montagehilfen sind mit 10-20 Jahren bereits länger im Einsatz und Antennenmasten mit 40-100 Jahren noch deutlich länger. Die mobilen Endgeräte wie Smartphones und Sensoren werden dagegen aus diversen Gründen relativ häufig ausgetauscht und im Durchschnitt nur etwa zweieinhalb Jahre lang verwendet.

⁴⁹ z.B. GaBi-Datenbank, Ökobilanz der Fairphones 2 (Proske et al. 2016) und 3 (Proske et al. 2020) und von Mobilfunkmasten (LCEE Life Cycle Engineering Experts 2011)

Übersichtstabellen zu den untersuchten Materialien und Geräten sowie deren Sach- und CO2-Bilanzen finden sich in A.7, A.9 und A.10.

2.4.2 CO2-Bilanz Herstellung RAN

Antennenmodul (Antenna Unit, AU)

Die Antennenelemente (AE) bestehen aus Metallen und sind häufig auf Leiterplatten montiert. Größere Stabantennen (< 3 GHz) bestehen meist aus Aluminium (anodisierte Legierungen) und beispielsweise kleineren flächigen Antennen (Patch-Antennen) aus Kupfer. Die Leiterplatten dienen als Träger und bilden die Schnittstelle zwischen dem Kabelanschluss und dem Antennenelement.

Bei höheren Frequenzen (mm-Welle) werden zur Verdrahtung der Patch-Antennen neue Substratmaterialien benötigt, welche deutlich verbesserte Hochfrequenz-Eigenschaften gegenüber herkömmlichen FR-4 Leiterplatten haben und potenzielle Leitungsverluste minimieren. Bei Massive MIMO-Systemen sind Pfadverluste deutlich detaillierter in Link-Budget Berechnungen zu berücksichtigen, da sich bei der Vielzahl der Subarrays bereits 1 bis 2 dBi durchaus auswirken. Im Kontext eines definierten Link-Budgets einer Massive MIMO-Antennenarrays können sich Pfadverluste zwischen Beamforming-IC (Verstärker) und den Antennenelementen in Summe auf den Antennengewinn so negativ auswirken, dass beispielsweise eine Verdoppelung der Antennen-Subarrays mit entsprechend höherem Komponenten- und Energiebedarf notwendig wird.

Neben den Substratmaterialien kann auch die Materialzusammensetzung der Rahmen, Stecker bzw. Anschlüsse stark variieren. Für die strukturellen und mechanischen Baugruppen kommen je nach Produkt Eisenmetalle (Stahlbleche), Aluminium und teilweise Kunststoffe zur Anwendung. Das Gehäuse besteht aus einem stabilen Rahmen und einer Kunststoffabdeckung für die Antennenelemente. Die Rahmen sind seit Jahren auf Leichtbau ausgelegt. Daher werden vorwiegend Aluminium, glasfaserverstärkte Lamine und UV-beschichtete Kunststoffe wie beispielsweise ABS eingesetzt.

An einem Antennenstandort sind Stand 2019 üblicherweise 10 bis 16 Antennenmodule unterschiedlicher Frequenzbereiche installiert (siehe Tabelle 7). Für die Antennenmodule einzelner Frequenzbereiche konnten zum Zeitpunkt der Modellierung keine veröffentlichten Produktdatenblätter oder Demontagen gefunden werden, die ausreichende Hinweise zur Materialzusammensetzung liefern könnten. Daher wurde stattdessen eine Sachbilanz für ein modernes Heptaband-Antennensystem auf Basis einer Video-Demontage erstellt (Telekom Netz 2018). Die Heptaband-Antenne integriert Antennenmodule sieben verschiedener über das gesamte Mobilfunkspektrum verteilter Frequenzbereiche in ein Gehäuse. Solche Multiband-Antennen kommen aufgrund des geringeren Gewichts und Platzbedarfs mittlerweile und vor allem zukünftig vermehrt zum Einsatz.

Für die untersuchte Heptaband-Antenne wurden auf Basis der Video-Demontage die Abmessungen der Gehäuseteile (aus Glasfaserverstärktem Kunststoff und Stahl), Antennenelemente (aus Aluminium), der Kupferleitungen sowie die Leiterplattenflächen grafisch ermittelt und mithilfe geometrischer Berechnungen die jeweiligen Volumina und Massen der Materialien abgeleitet⁵⁰. Anschließend wurden diese durch die sieben Antennenmodule dividiert, um die Materialanteile pro Antennenmodul zu erhalten, welche dann wiederum mit der Gesamtzahl der an einem Antennenstandort befindlichen Antennenmodule

⁵⁰ Aus der Leiterplattenfläche und der für die jeweilige Lagenzahl typische Schichtdicke und -anzahl an Kupfer- und Goldschichten wird die Masse dieser Materialien abgeleitet. Diese geht in die Materialbilanz ein, doch die CO2-Bilanz wird auf Basis des vollständigen Leiterplattendatensatzes berechnet, der die Vorketten dieser Materialien bereits enthält.

multipliziert werden kann. Eine Unterscheidung nach einzelnen Frequenzbereichen ist damit nicht mehr möglich, was die Genauigkeit der Ergebnisse für die Bilanzierung der Antennenmodule weiter senkt. Dies hat nur geringe Auswirkungen auf das Gesamtergebnis, lässt aber eine detailliertere Auswertung hinsichtlich des Einflusses einzelner Frequenzbänder nicht mehr zu.

Nach den ersten überschlägigen Berechnungen war jedoch auffällig, dass die Herstellung der Antennenmodule mit etwa 5-10 % nur einen relativ kleinen Anteil zur gesamten CO2-Bilanz beiträgt. Eine weitere Detaillierung des Modells an dieser Stelle würde die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse nicht beeinflussen. Daher sollte der Fokus zunächst auf andere Komponenten gelegt werden. Nichtsdestotrotz besteht in Hinblick auf die tatsächliche Umweltwirkung der Antennenmodule weiterhin Forschungsbedarf.

Für die Modellierung der 5G-Antennenmodule (3.500, 26.000, 28.000 MHz) standen ebenfalls kaum reale Produktdaten zur Verfügung, sodass die verfügbaren, allerdings wenig aussagekräftigen Bilder einer Demontage um ein theoretisches Modell ergänzt werden mussten. In der Folge wurden die Abmessungen und die Anzahl der als Array angeordneten Antennenelemente auf Basis der für die jeweiligen Frequenzen typischen Antennenlängen berechnet. Die Fläche der Trägerleiterplatte und der ICs sowie die Masse des Gehäuses wurden anhand der von den Antennenelementen aufgespannten Fläche abgeleitet. Auch hier sollte die Genauigkeit der Modellierung überprüft werden, sobald Produkte dieser Art in größerer Stückzahl zum Einsatz kommen und eine entsprechende Datengrundlage verfügbar ist.

Funkmodul (Radio Unit, RU)

Die Modellierung der Sachbilanz des Funkmoduls wurde auf der Grundlage von Demontagebildern einer Huawei RRU5303-Einheit (Federal Communications Commission 2018) erstellt. Dieses Modell wurde ausgewählt, da es unter den Funkmodulen, zu denen solche Demontagen verfügbar waren, in seinen Abmessungen relativ gut den Durchschnitt abbildete. Alle untersuchten Funkmodule waren sich in ihren Abmessungen sehr ähnlich. Die Repräsentativität des Datensatzes wird als gut eingeschätzt. Dem ist jedoch entgegenzusetzen, dass viele dieser Geräte mittlerweile veraltet sind. Diese werden zwar teilweise noch eingesetzt, aber der erstellte Funkmodul-Datensatz kann möglicherweise nicht modernere oder zukünftige Gerätegenerationen hinreichend abbilden.

Das Funkmodul besteht hauptsächlich aus einem dickwandigen Aluminiumgehäuse, aus dem die Geometrie des Cavity Duplexers herausgefräst wurde, sowie einer flächenfüllenden und mit vielen ICs bestückten Leiterplatte.

Eine separate Modellierung der 5G-Funkmodule erfolgt nicht, da diese zumeist in die Antennenmodule integriert und somit bereits durch deren Sachbilanz abgedeckt sind.

Basisbandmodul (Baseband Unit, BU)

Für das Basisbandmodul konnten ebenfalls keine Produktdatenblätter oder Demontagen gefunden werden, die Aufschluss über die Materialzusammensetzung geben könnten. Da allerdings die Außenmaße ersichtlich waren, wurde das Basisbandmodul als ein standardmäßiges 19-Zoll-Rack-Gerät modelliert. Dadurch ist die Gehäusegröße vorgegeben, aus der sich unter Berücksichtigung der Blechstärke und Materialdichte (Stahl) die Masse des Gehäuses berechnen lässt. Aus der Grundfläche kann die Größe der Leiterplatte abgeleitet werden. Ebenso lässt sich wiederum die Chipfläche anteilig an der Leiterplattenfläche ermitteln.

Kabel (cable)

Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit konnten Glasfaserkabel innerhalb dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Im Folgenden bezieht sich der Begriff Kabel daher immer auf koaxiale Kupferkabel. Diese wurden über ein Querschnittsprofil modelliert, bestehend aus einem Kupferkern (5,75 mm Durchmesser) und einem ringförmigen Kupferschild (20 mm Durchmesser; 0,7 mm Dicke), die jeweils mit einem Isolator ummantelt sind.

Dieses Profil wurde anschließend mit der jeweiligen Kabellänge multipliziert, um die gesamte Kupfermasse zu erhalten.

Es wurden nur die Signalkabel erfasst, die vom Funkmodul zum Antennenmodul verlaufen. Da der Signalpfad in beide Richtungen verläuft, wurden pro angeschlossenem Antennenmodul zwei Kabel mit einer Länge von jeweils 2 m angenommen.

Antennenmast

Die an eine Basisstation angeschlossenen Antennenmodule werden zur Erreichung einer hohen Signalreichweite beziehungsweise eines hohen Antennengewinns in einer möglichst großen Höhe angebracht. Dazu werden in städtischen Gebieten (ASK 5-6) Antennenmasten auf vorhandenen Häuserdächern platziert. Diese etwa 5 m hohen Masten wurden als Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von 15 cm und einer Wandstärke von 1 cm modelliert.

In ländlichen flach oder gar nicht bebauten Gebieten (ASK 1-2) müssen hingegen freistehende Beton- oder Stahltürme eigens für den Mobilfunk errichtet werden.

Die Betontürme wurden angelehnt an eine Ökobilanz von Freileitungsmasten⁵¹ (LCEE Life Cycle Engineering Experts 2011) als abgestumpfte Hohlkegel mit einem Betonfundament modelliert. Die Durchmesser am Fuß und am Zopf entstammen der oben genannten Ökobilanz. Durch eine Rückrechnung aus der gegebenen Masse konnte eine durchschnittliche Wandstärke von ca. 20 cm ermittelt werden. Ausgehend von diesen Abmessungen wurde nun die Höhe des Masts den durchschnittlichen Antennenhöhen angepasst⁵² und die Masse berechnet. Das Volumen des Betonfundaments wurde entsprechend der geringeren Masse linear herunterskaliert.

Tabelle 20: Berechnung der Masse von Betontürmen

Beton-turm	Höhe	Durch-messer (Fuß)	Durch-messer (Zopf)	Wand-stärke	Volumen (Mast)	Masse (Mast)	Volumen (Fundament)	Masse (Fundament)	Masse (gesamt)
	m	m	m	m	m^3	t	m^3	t	t
Referenz ¹	52	1,7	0,7	n.a.	n.a.	68	110	220	287
urban	40	1,7	0,7	0,2	25	50	81	163	213
suburban	35	1,5	0,5	0,2	18	35	57	114	149

¹ Siehe (LCEE Life Cycle Engineering Experts 2011)

Die Stahltürme wurden als dreibeinige Stahlrohrgerüste betrachtet, die ebenfalls durch ein Betonfundament stabilisiert werden, welches jedoch aufgrund der geringeren Masse des Stahlturms ebenfalls entsprechend kleiner ausfällt. Die Gerüststruktur besteht aus übereinander

⁵¹ Freileitungsmasten dienen einem anderen Einsatzzweck als Antennenmasten und sind demnach auch anderen Belastungen ausgesetzt. Die Höhen und Bauformen sind jedoch vergleichbar. Zudem ist das Eigengewicht der Masten um ein Vielfaches größer als die Traglast, weshalb die Unterschiede in der Traglast (Kabel gegenüber Antennenmodulen) weitestgehend vernachlässigt werden können.

⁵² Siehe 2.1.4. Für die Höhe der Masten wird allerdings angenommen, dass diese größer ist als die Antennenhöhe, da die Antennenmodule nicht am obersten Punkt installiert werden.

gestapelten Segmenten mit drei gleichlangen Seiten, welche jeweils aus einem vertikalen, einem horizontalen und einem diagonalen Stahlrohr zusammengesetzt sind. Diese bilden zusammen ein rechtwinkliges Dreieck. Je nach Gesamthöhe des Turms variiert der Durchmesser, die Wandstärke und die Länge der Rohre sowie die Anzahl der Segmente.

Die jeweilige Dimensionierung der Stahlturmbauteile wurde anhand einer Vielzahl von Fotos grafisch ermittelt und musste teilweise geschätzt werden. Die unten aufgeführten Werte werden aber in ihrer Größenordnung als realistisch eingestuft.

Tabelle 21: Berechnung der Masse von Stahltürmen

Stahl-turm	Höh-e	Seite-n-länge	Segment-höhe	Rohrdurch-messer	Wand-stärke	Volume-n (Mast)	Masse (Mast)	Volumen (Fundamen-t)	Masse (Fundamen-t)
	m	m	m	m	m	m^3	t	m^3	t
urban	40	1,0	1,0	0,075	0,005	0,85	6,60	10,7	21
suburba-n	35	0,8	0,8	0,060	0,005	0,60	4,67	7,6	15

Für die Antennenstandortkategorien 1 und 2 wurde eine Verteilung von 50 % Stahl- und 50 % Betontürmen angenommen. Die Kategorien 3 und 4 repräsentieren die suburbanen Regionen, in denen teilweise vorhandene Häuserdächer, aber auch eigens dafür gebaute Türme genutzt werden, weshalb für beide Optionen ein Anteil von jeweils 50 % der Basisstationen geschätzt wurde. Eine detailliertere Unterscheidung kann aufgrund fehlender Daten nicht erfolgen.

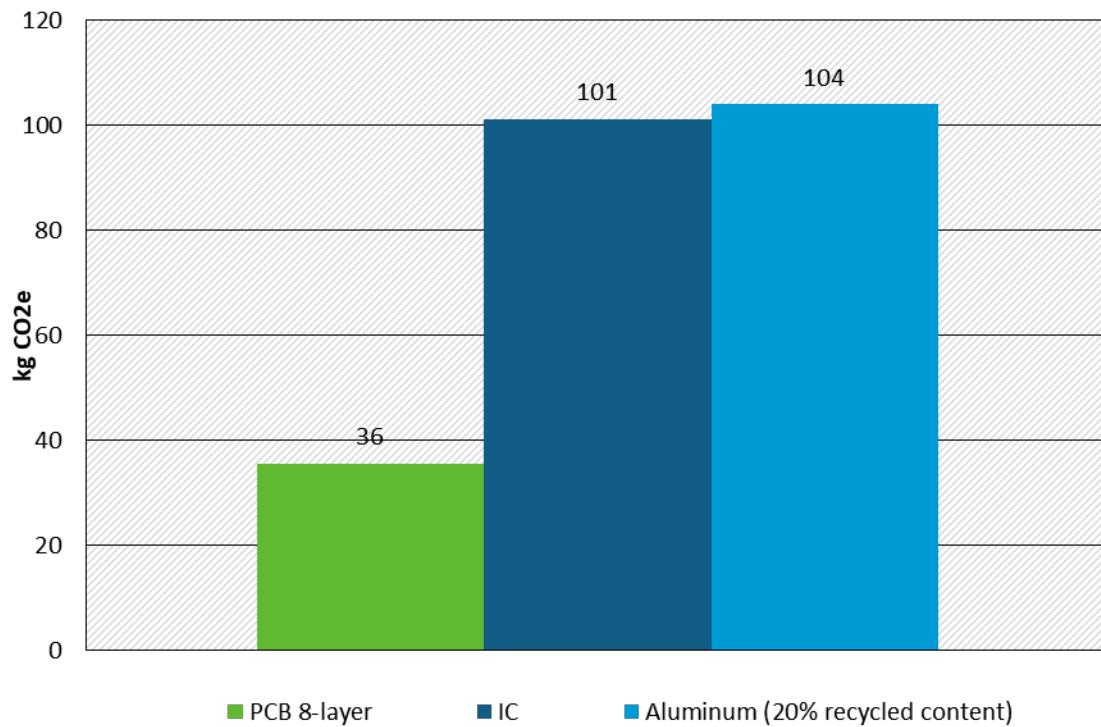
Servergestell (Rack)

Das Servergestell wurde anhand von Standardabmessungen für 19-Zoll-Racks modelliert und ist demnach 42 u hoch (u: Höheneinheiten, entspricht 44,45 mm; Gesamthöhe des Gestells 1,87 m), 24 Zoll breit (0,61 m) und 36 Zoll tief (0,91 m). Für die Dicke des Stahlblechs, aus dem das Gestell nahezu vollständig besteht, wurden 2 mm angenommen. Aussparungen für Lüfter und Geräteeinschübe wurden überschlägig berücksichtigt.

Die aggregierten Ergebnisse der Sachbilanzen finden sich in A.9.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Zwischenergebnisse der relativen Umweltwirkung⁵³ der Herstellungsphase aufgeführt.

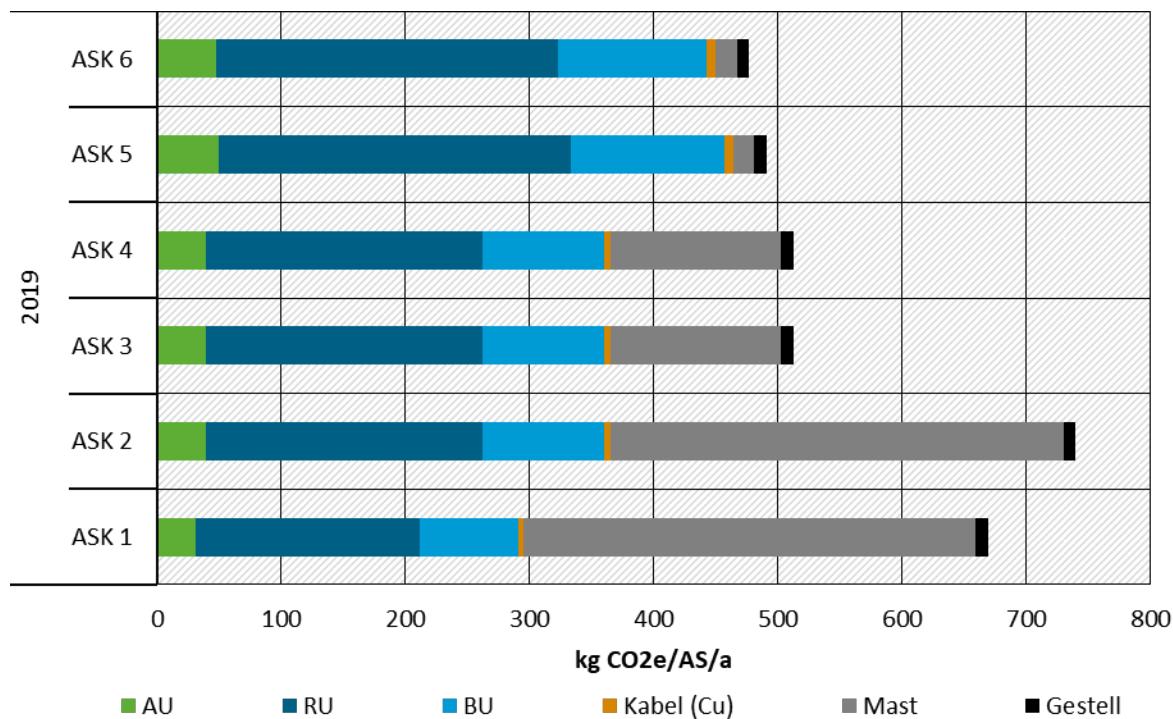
⁵³ Relative Umweltwirkung bedeutet hier pro Stück. Die absolute Umweltwirkung beschreibt die Hochrechnung auf die gesamte Stückzahl (siehe 3.1.1).

Abbildung 31: CO2-Bilanz der Hauptkomponenten eines Funkmoduls

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Wie in Abbildung 31 zu sehen, resultiert der Hauptanteil der Treibhausgasemissionen des Funkmoduls aus den verbauten Chips (ICs) und dem Aluminiumgehäuse. Für dieses wurde ein Anteil an recyceltem Aluminium von 20 % angenommen. Würde dieser erhöht werden, so könnte mehr Primärmaterial eingespart und die CO2-Bilanz deutlich gesenkt werden (bei 100 % Recyclinganteil nur rund 10 kg CO2e statt 104 kg CO2e).

Die folgende Abbildung 32 zeigt die Anteile an der jährlichen CO2-Bilanz der in den Antennenstandorten verbauten Komponenten unter Berücksichtigung der jeweiligen Stückzahlen und Einsatzdauern, aufgeteilt nach den Antennenstandortkategorien.

Abbildung 32: Jährliche CO2-Bilanz der Hauptkomponenten eines Antennenstandortes (2019)

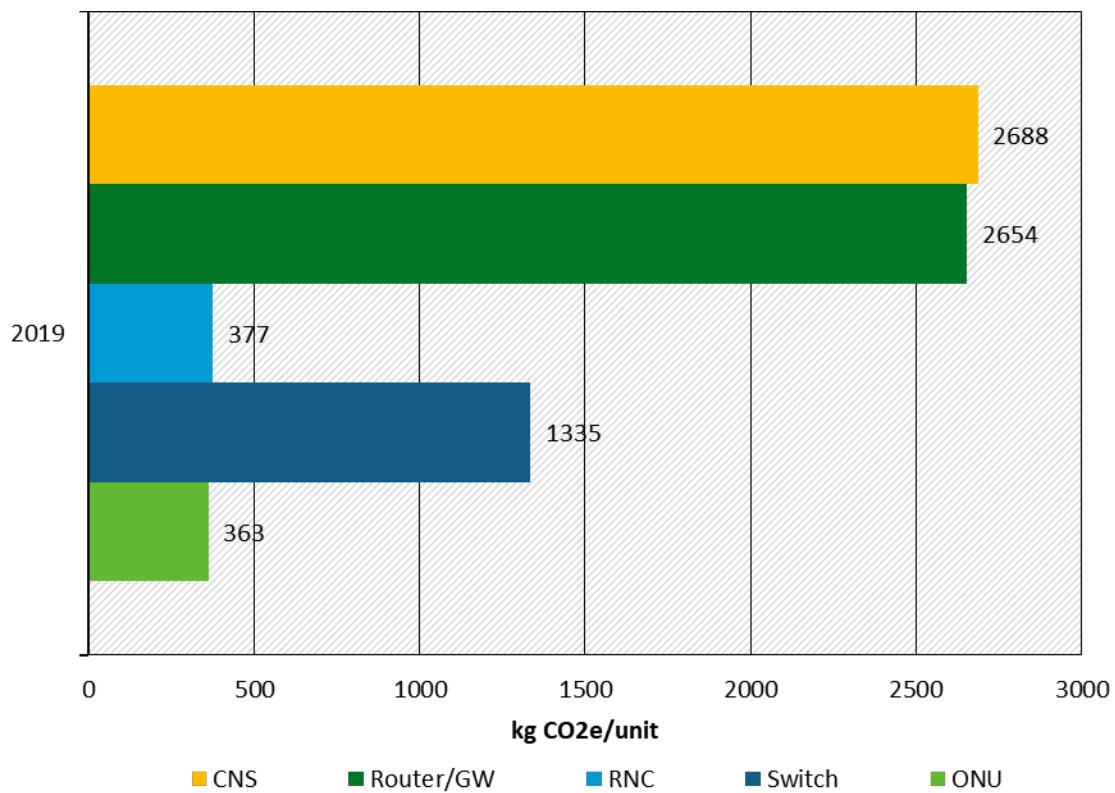
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Hierbei ist zu erkennen, dass die jährlichen CO2-Bilanzen pro Antennenstandort je nach Antennenstandortkategorie schwanken, von 477 kg CO2e pro Antennenstandort und Jahr in Kategorie 6 bis zu 740 kg CO2e in Kategorie 2.

Im ländlichen Bereich haben die Antennenmasten, im städtischen Bereich die Funkmodule den höchsten Anteil an der jährlichen herstellungsbezogenen CO2-Bilanz eines Antennenstandortes. Die Herstellung der Funk- und Basisbandmodule ist unabhängig von der Antennenstandortkategorie immer mit einer hohen Emission an CO2-Äquivalenten verbunden. Die Antennenmodule tragen einen geringeren, die Kabel und Gestelle einen fast vernachlässigbaren Anteil zur gesamten Umweltwirkung bei.

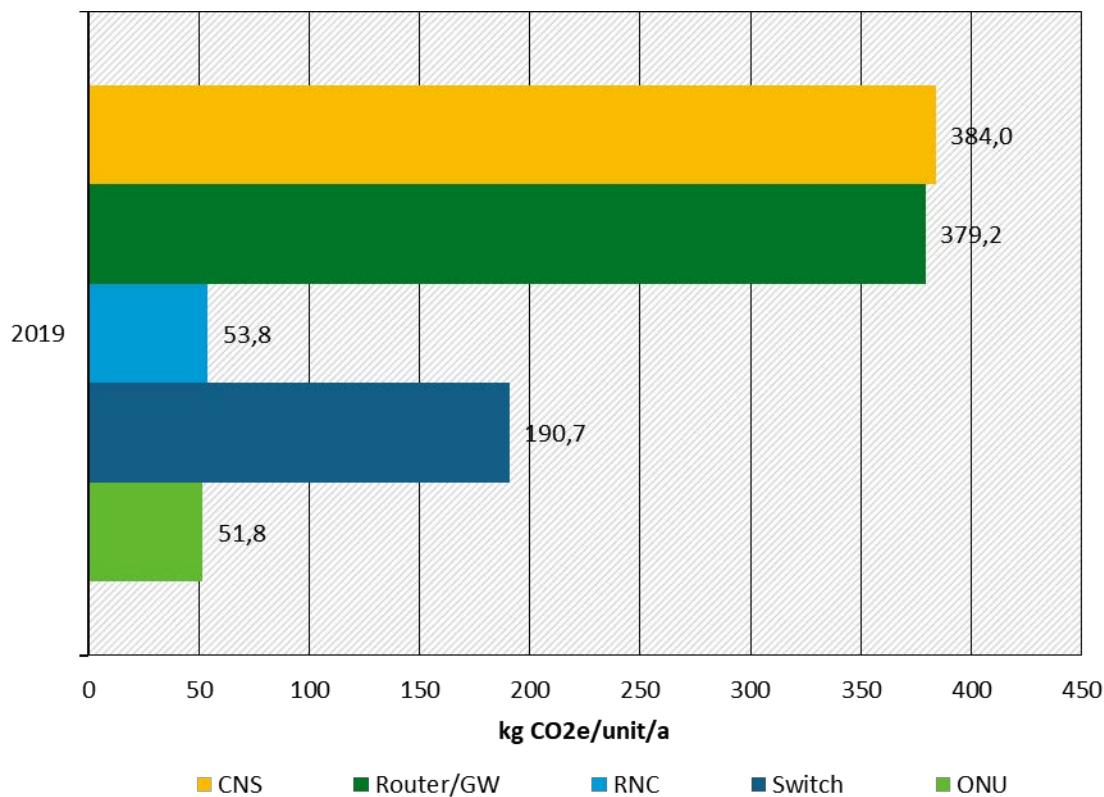
2.4.3 CO2-Bilanz Herstellung TCN

Die Netzwerkkomponenten des Transport- und Kernnetzes wie Switche, Router, Server, etc. wurden wie das Basisbandmodul (siehe Kap. 2.4.2) als 19-Zoll-Rack-Geräte modelliert. Die einzelnen Komponententypen werden dann aber jeweils durch die Festlegung der entsprechend verwendeten Höheneinheiten und Leiterplatten- bzw. Chipflächen unterschieden.

Abbildung 33: CO2-Bilanz Herstellung TCN-Komponenten (gesamt)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass die Kernnetzserver (CNS) und die Router/Gateways (die im Prinzip auch Servern ähneln) die höchste CO2-Bilanz in der Herstellung aufweisen. Dies liegt an der großen Leiterplatten- und Chipfläche, die sich aus den acht Höheneinheiten ergibt. Allerdings wird diese hohe relative Umweltwirkung durch die geringen Stückzahlen in gewissem Maße begrenzt (siehe Hochrechnungen für die Szenarien in Kap. 3). Die untenstehende Abbildung 34 zeigt den auf ein Jahr Einsatzdauer normierten Herstellungsaufwand. Da für alle TCN-Komponenten eine Einsatzdauer von sieben Jahren angenommen wurde, entsprechen die Verhältnisse zwischen den Komponenten denen in Abbildung 34.

Abbildung 34: CO2-Bilanz Herstellung TCN-Komponenten (anteilig pro Jahr)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

2.4.4 CO2-Bilanz Herstellung Endgeräte

Gegenstand und Zielstellung

In diesem Kapitel soll für zwei generische Endgerätetypen – ein Smartphone und ein Sensor mit Funkmodul – eine vereinfachte, orientierende Ökobilanz erstellt werden. Da die jeweiligen Gerätetypen für eine Vielzahl an unterschiedlichen Geräten stehen, diese aber nicht umfänglich abgebildet werden können, sollen für jeden Gerätetyp vereinfacht drei Klassen ermittelt werden, die eine minimale, durchschnittliche oder maximale Konfiguration repräsentieren.

Dazu soll ein parametrisiertes Modell zur Berechnung einer überschlägigen CO2-Bilanz der Herstellungsphase dieser Geräte entwickelt werden. Andere Wirkungskategorien und Lebensphasen sowie detailliertere Sachbilanzen können im Rahmen dieser Studie, deren Fokus weniger die Endgeräte und mehr der Energiebedarf der Netze ist, nicht berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Umweltbewertung der Smartphones und der Sensoren dargestellt.

2.4.4.1 Smartphone

Umfang und Struktur der Sachbilanz

Als mobile Endgeräte, über die sich der Endnutzer mit dem Mobilfunknetz verbinden und auf die darüber bereitgestellten Dienste wie Internetzugang und Telefonie zugreifen kann, sollten alle Smartphones die folgenden Charakteristika aufweisen:

- ▶ Gehäuse
- ▶ mobile Stromversorgung (Akku)

- ▶ Datenausgabe
 - Bildschirm (visuell)
 - Lautsprecher (auditiv)
- ▶ Dateneingabe
 - Knöpfe und/oder Touch-Bildschirm
 - Mikrofon
- ▶ Komponenten zur elektronischen Datenverarbeitung
 - Prozessor
 - Arbeitsspeicher
 - Massenspeicher
 - Leiterplatten zur Signalübertragung zwischen Komponenten
- ▶ Mobilfunkanbindung, bestehend aus
 - Basisband-Prozessor (Baseband Processing Unit)
 - Modem
 - Signalverarbeitungskomponenten (RF-Front-End)
 - Verstärker (Power Amplifier)
 - Antennenelementmodule
- ▶ weitere, für Smartphones optionale, aber übliche Komponenten:
 - Kameras
 - Wifi und Bluetooth
 - GPS
 - verschiedene Sensoren (Helligkeit, Neigung, etc.)

Methodik der Smartphone-Ökobilanz

Seit 2007 und der Einführung des iPhones als erstes Smartphone im heutigen Sinn, wurde dessen Design (flacher Quader mit einem die Vorderseite füllenden Touch-Bildschirm, im Englischen als „Slate Phone“ bezeichnet) zügig von konkurrierenden Herstellern übernommen. Damit bildet dieses Design heutzutage – mit sehr wenigen Ausnahmen – der dominante Formfaktor im Markt der mobilen Endgeräte (Sreeram 2019). Trotz der rapiden Verbreitung und technologischen Weiterentwicklung dieser Geräteart hat sich deren Form und Funktionalität abgesehen von tendenziell zunehmenden Bildschirmgrößen (Barredo 2014) nicht grundlegend verändert und herstellerübergreifend sowohl äußerlich als auch in der Auswahl der inneren Komponenten stark vereinheitlicht (Melling 2020).

Im Rahmen dieser Studie wurden die technischen Spezifikationen 19 ausgewählter Smartphones der letzten zwei Jahre ausgewertet. In A.7 findet sich eine Liste der untersuchten Smartphones mit ausgewählten Parametern. Ein Vergleich unterschiedlicher Modelle unterstreicht den Trend zunehmender Bildschirmgrößen deutlich. Das Hauptauswahlkriterium für die Auswahl der Geräte war die Unterstützung von 5G (Schwarten und Reinhardt 2020). Zum Vergleich wurden allerdings auch andere aktuelle Geräte ohne 5G-Unterstützung betrachtet. Da Apple regelmäßig Umweltinformationen (inklusive CO2-Fußabdruck) zu einzelnen Geräten veröffentlicht (Apple 2020), wurden acht iPhone-Modelle (siehe A.7) ebenfalls in die Analyse aufgenommen, auch wenn bisher keines davon 5G unterstützt.

Die Leiterplatten- und Package-Flächen wurden aufgrund mangelnder Daten bisher nur für fünf Geräte ausgewertet, indem Bilder dieser Komponenten maßstabsgetreu vermessen wurden (Lam 2019; Yang und Fontaine o. J.). Im Falle der Leiterplatten wurde das jeweils größte umschließende Rechteck als Fläche verwendet, da ohne spezifische Angaben zur Anordnung und eventueller Verschachtelung mehrerer Leiterplatten im Produktionsprozess vorerst davon ausgegangen werden muss, dass Aussparungen zu einem äquivalenten Abfall führen. Für die Ökobilanzierung müssen diese Verluste jedoch berücksichtigt werden, da sich deren Umweltwirkung anteilig im finalen Produkt niederschlägt.

Für die Chipfläche der SoCs wurden – soweit verfügbar – Angaben der Website WikiChip (WikiChip 2020a, 2020b, 2020c, 2020d) sowie Pressemitteilungen verwendet (Yang und Fontaine o. J.). Da sich der Arbeitsspeicher bei allen analysierten Modellen unter bzw. über dem SoC im gleichen Package befindet, wurde hier überschlägig die gleiche Chipfläche wie für den SoC angenommen. Da für die anderen ICs keine Daten gefunden werden konnten, wurden die Chipflächen aus den Package-Flächen berechnet. Der Faktor entspricht dem Mittelwert der Verhältnisse zwischen Package- und Chipfläche (die-to-package ratio) der Komponenten, für die beide Werte bekannt sind und liegt im Schnitt bei etwa 0,4.

Eine Analyse dieser Daten ergab folgende Erkenntnis, die sich mit der oben genannten Beobachtung der Vereinheitlichung des Marktes deckt:

Die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit und dem Funktionsumfang korrelieren teilweise mit dem Verkaufspreis, doch physikalische Eigenschaften wie Gewicht und Größe der einzelnen Komponenten und des gesamten Geräts bleiben davon relativ unberührt.

Frühere Ökobilanzen von Smartphones und anderen elektronischen Geräten haben gezeigt, dass die Flächen der Chips und Leiterplatten die Umweltwirkung des Gesamtgeräts am stärksten skalieren (Proske et al. 2016). Eine konsistente Korrelation dieser Werte mit anderen Eigenschaften wie Displaygröße, Leistung, Speicherkonfiguration, Masse, Volumen oder Preis konnte nicht festgestellt werden. Eine solche funktionale Beziehung hätte – so sie denn robust und reproduzierbar wäre – das Ökobilanzmodell für Smartphones erheblich vereinfacht und eine manuelle Auswertung der Flächen oder sogar Demontagen der Geräte für zukünftige Untersuchungen (teilweise) überflüssig machen können. Da dies jedoch nicht möglich ist, wurden folgende umweltrelevante Parameter identifiziert:

- ▶ Displaygröße [Zoll] bzw. -fläche [mm²]
- ▶ Fläche des Arbeitsspeichers [mm²]
- ▶ Fläche des Massenspeichers [mm²]
- ▶ Akkukapazität [mAh]
- ▶ Fläche der Leiterplatte [mm²]
- ▶ Fläche des SoCs [mm²]
- ▶ Fläche der restlichen ICs [mm²]
- ▶ Mehraufwand für Montage [%]
- ▶ Mehraufwand für restliche Komponenten [%]

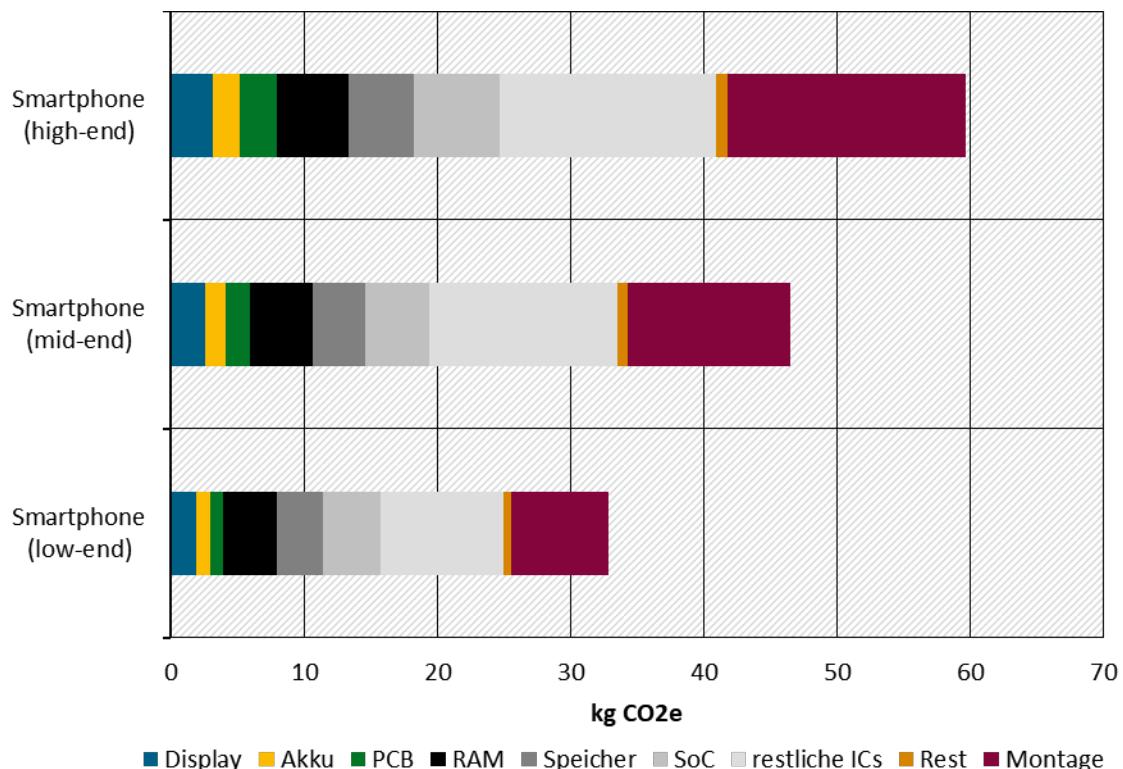
Die Datensätze für den CO₂-Fußabdruck in kg CO₂e pro jeweils oben in Klammern angegebener Bezugsgröße sowie die prozentualen Anteile für den Mehraufwand für Montage und die restlichen Komponenten basieren auf der Ökobilanz des Fairphone 2 (Proske et al. 2016).

Die oben genannten Parameter wurden für drei verschiedene Smartphone-Klassen angepasst:

- ▶ low-end: Einstiegsmodell (Wert unter 400 €, minimale Konfiguration)
- ▶ mid-end: Mittelklassemmodell (Wert 400-800 €, durchschnittliche Konfiguration)
- ▶ high-end: hochwertiges Modell (Wert mehr als 800 €, maximale Konfiguration)

Die entsprechenden Konfigurationen sind der Übersichtstabelle in A.7 zu entnehmen, auf deren Basis jeweils der Carbon Footprint der Herstellungsphase berechnet wurde.

Abbildung 35: CO2-Bilanz der Herstellung unterschiedlicher Smartphones



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In Abbildung 35 ist zu sehen, dass die low-end Smartphones mit rund 33 kg CO2e in der Herstellung etwa die Hälfte der CO2-Bilanz der high-end Geräte haben (rund 60 kg CO2e) und jeweils die Chips den größten Anteil zur Umweltlast beisteuern. Im Vergleich zu anderen elektronischen Geräten fällt der Anteil der Leiterplatten relativ klein aus, was mit dem hohen Miniaturisierungsgrad zu erklären ist, der eine effiziente Platznutzung erfordert.

Die Kommunikation über 5G-Millimeterwellentechnologie kann nicht mit den bisher üblicherweise in Smartphones verbauten Modem- und Antennensystemen realisiert werden und benötigt daher zusätzliche Komponenten. Neben dem Hauptprozessor (System-on-a-Chip / SoC), wird ein weiterer Chip als Modem sowie vier Millimeterwellen-Antennenmodule benötigt, die ebenfalls Chips beinhalten (Amadeo 2018). Die dadurch zusätzlich benötigte Chipfläche beträgt rund 294 mm². In der Folge ist die CO2-Bilanz für die Produktion der Millimeterwellenkomponenten (19,84 kg CO2e) rund fünfmal höher als bei der herkömmlichen Antennentechnologie (3,96 kg CO2e). Dies entspricht einer Erhöhung von bis zu 48 % im low-end-Bereich (bei den high-end-Geräten sind teilweise bereits mm-Wellen-Antennenmodule verbaut). Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass sich möglicherweise auch andere

Komponenten wie etwa die Leiterplatte oder der Akku in ihrer Größe anpassen müssten, was im Rahmen dieser Studie allerdings vernachlässigt werden musste.

Über die genaue Anzahl der in Deutschland verwendeten Smartphones ließen sich keine direkten Angaben finden, weshalb sowohl der Status Quo als auch die künftige Entwicklung indirekt aus folgenden Quellen abgeleitet werden mussten.

Laut einer Umfrage gab es im Jahr 2019 ca. 57,7 Mio. Smartphone-Nutzer in Deutschland (Statista 2021b), wobei die Geräteausstattung laut der BNetzA bei etwa 129 % (also ca. 1,3 aktiv genutzte Smartphones pro Nutzer) lag (Bundesnetzagentur 2020b). Daraus ergibt sich für 2019 eine Zahl vom ca. 74 Mio. Smartphones in Deutschland.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Personen, die jünger als 10 Jahre oder älter als 80 Jahre alt sind, einen deutlich geringeren Anteil an der Smartphone-Nutzung haben.

Schätzungsweise nutzen aus diesen demografischen Gruppen derzeit nur etwa 10 % der Personen ein Smartphone.

Daraus lässt sich mithilfe der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Entwicklung der „Bevölkerungspyramide“ (Statistisches Bundesamt o. J.) der Anteil der 10-80-Jährigen errechnen, die aktiv eines oder mehrere Smartphones nutzen.

Die deutsche Gesellschaft wird bis 2030 tendenziell im Durchschnitt älter werden. Gleichzeitig werden viele Menschen, die heutzutage und auch in Zukunft ein Smartphone nutzen, in die Gruppe der über 80-Jährigen hineinaltern. Zudem wird der Anteil an Kindern und Erwachsenen, die ein Smartphone besitzen, wahrscheinlich steigen. In Tabelle 22 ist der geschätzte Anstieg der Smartphone-Nutzer zu sehen.

Tabelle 22: Entwicklung der Anzahl an Smartphones

	2019	2022	2026	2030
% der unter 10-Jährigen ¹	10%	10%	15%	20%
% der 10-80-Jährigen ¹	81%	85%	90%	95%
% der über 80-Jährigen ¹	10%	40%	60%	80%
Smartphone-Nutzer	57.700.000 ²	62.324.200	67.489.200	72.215.850
Penetration	129% ³	129%	129%	129%
Smartphones	74.433.000	80.398.218	87.061.068	93.158.447

¹ die ein Smartphone nutzen (geschätzt)

² Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2020 (Statista 2021b)

³ Jahresbericht 2019 (Bundesnetzagentur 2020b)

Die Gesamtanzahl an Smartphones wird voraussichtlich bis 2030 steigen, sich aber auf lange Sicht aufgrund der endlichen Anzahl an Personen in Deutschland auf ein stabiles Niveau einpendeln, was auch an den stagnierenden Verkaufszahlen der letzten Jahre ersichtlich ist (Statista 2021a).

Die Anteile einzelner Smartphone-Klassen an den Gesamtverkaufszahlen wird gemäß Angaben der IDC relativ konstant bleiben (International Data Corporation 2020). Entsprechend werden die Anteile von 2019 bis 2030 – angepasst an die oben genannte Klasseneinteilung nach Preiskategorie – vereinfacht wie folgt als konstant angenommen:

- ▶ low-end: Einstiegsmodell (Wert unter 400 €): 76 % Marktanteil
- ▶ mid-end: Mittelklassemodell (Wert 400-800 €): 17 % Marktanteil
- ▶ high-end: hochwertiges Modell (Wert mehr als 800 €): 7 % Marktanteil

2.4.4.2 Sensor mit Funkmodul

Umfang und Struktur der Sachbilanz

Die Sachbilanz für die Umweltbewertung der Sensoren soll die Gehäusemasse, Leiterplatten- und Chipflächen sowie abgeschätzte Mehraufwände für weitere Komponenten und Montage für drei verschiedene Sensorgrößen beinhalten.

Methodik der Sensoren-Ökobilanz

Die zukünftig in das Mobilfunknetz eingebundenen Sensoren werden in ihrer Art und Bauweise voraussichtlich ebenso vielseitig sein wie die dafür vorgesehenen Anwendungen.

Diese sind bisher oft noch nicht klar definiert und selbst für in näherer Zukunft geplante Anwendungen lassen sich noch keine beispielhaften Sensoren, Szenarien oder öffentlich verfügbare Datenblätter finden.

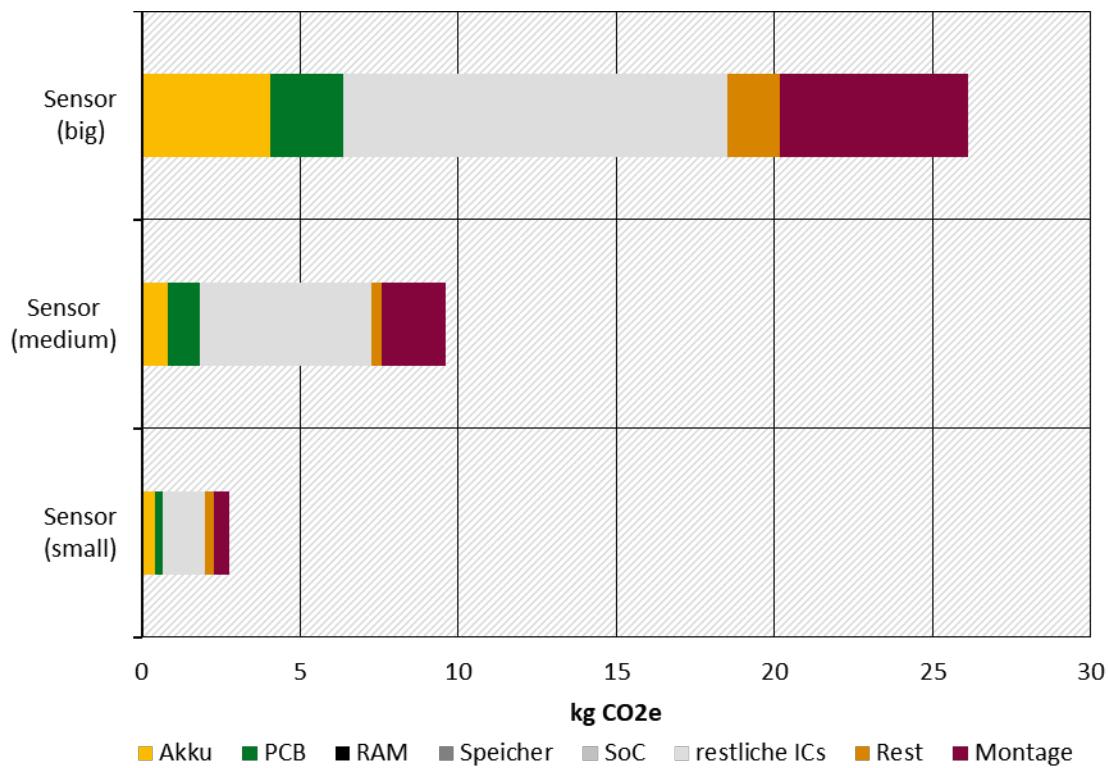
Somit sind zum Zeitpunkt dieser Studie alle für die Ökobilanzierung der Sensoren relevanten Parameter unbekannt. Dies umfasst unter anderem die verschiedenen Sensorentypen und deren Anzahl, Art und Größe der Komponenten, die Lebensdauer, die funktionelle Einheit (abgeleitet aus der Anwendung), etc.

Um dennoch Aussagen über die grobe Größenordnung der Umweltwirkung durch den prognostizierten massenhaften Einsatz von 5G-fähigen Sensoren treffen zu können, wird im Folgenden eine sehr stark vereinfachte CO₂-Bilanz erstellt.

Die mögliche Vielfalt der Sensoren wird nach der Baugröße und der damit einhergehenden Anwendung beziehungsweise Komplexität auf drei Klassen heruntergebrochen:

- ▶ kleine Sensoren: einfache Sensoren, die der Erfassung von Messwerten wie Druck, Temperatur, Helligkeit, etc. und deren drahtloser Übertragung dienen
- ▶ mittelgroße Sensoren: einzelne oder eine Kombination mehrerer kleiner Sensoren, die zusätzlich eine Vorverarbeitung der Daten vornehmen und daher mehr Rechenleistung benötigen
- ▶ große Sensoren: ausgereifte Sensorsysteme, die neben oder statt einfachen Messwerten Datenströme mit hohem Informationsgehalt (z.B. Audio und Video) erfassen, vorverarbeiten, auswerten (möglicherweise durch eine simple integrierte künstliche Intelligenz) und drahtlos übertragen

Die Ermittlung der Größe einzelner Bauteile und der Materialmengen erfolgt wie in 2.4.3 beschrieben proportional zur Dimensionierung der Außenabmessungen. Damit sind diese grob geschätzt und nicht unbedingt repräsentativ für künftig entwickelte Sensoren. Die in Abbildung 36 dargestellten Ergebnisse der CO₂-Bilanz sollen lediglich der Bestimmung von Größenordnungen dienen und lassen keine verlässlichen Aussagen über die tatsächliche zukünftige Umweltwirkung von Sensoren zu.

Abbildung 36: CO2-Bilanz der Herstellung unterschiedlicher Sensoren

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

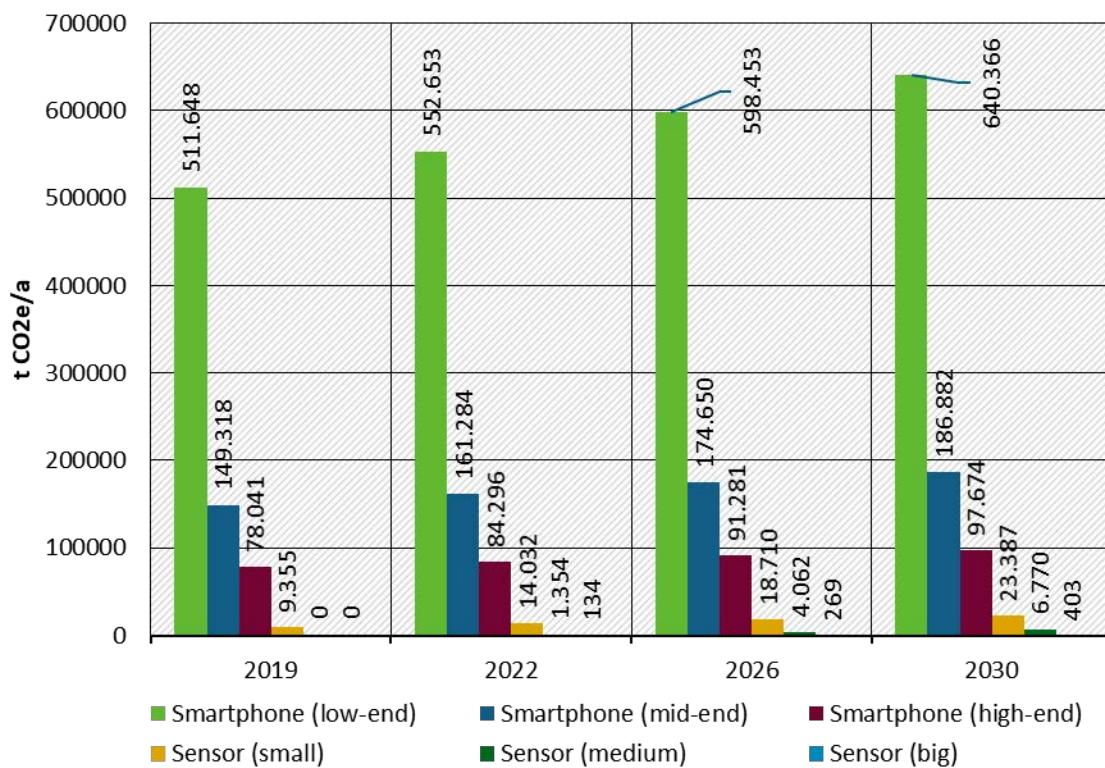
Die Stückzahl der kleinen Sensoren ergibt sich für das Jahr 2019 grob aus der Differenz der Anzahl an SIM-Karten und der genutzten Smartphones und liegt bei ca. 20 Mio. Einheiten. Zu der Entwicklung der Anzahl an kleinen, mittelgroßen und großen Sensoren gibt es derzeit keine Anhaltspunkte oder Daten, weshalb die Zahlen nur überschlägig geschätzt wurden.

Die Berechnung der CO2-Bilanz der einzelnen Sensoren sowie die Hochrechnung auf den Gesamtbestand an Sensoren soll lediglich der Veranschaulichung der Größenordnungen und als Rechenbeispiel dienen, welche Gesamtumweltwirkung potenziell von Sensoren ausgehen könnte. Die in Tabelle 23 aufgeführten Angaben zu den Stückzahlen spiegeln keine fundierten Prognosen wider.

Tabelle 23: Entwicklung der Anzahl an Sensoren

	2019	2022	2026	2030
kleine Sensoren	20.000.000	30.000.000	40.000.000	50.000.000
mittelgroße Sensoren	0	1.000.000	3.000.000	5.000.000
große Sensoren	0	50.000	100.000	150.000
Sensoren (gesamt)	20.000.000	31.050.000	43.100.000	55.150.000

In Abbildung 37 ist die CO2-Bilanz der Gesamtanzahl an Smartphones und Sensoren von 2019 bis 2030 dargestellt.

Abbildung 37: CO2-Bilanz der Gesamtanzahl an Smartphones und Sensoren (2019-2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Daraus lässt sich ableiten, dass unter den oben genannten Annahmen die Umweltwirkung der Sensoren im Vergleich zu den Smartphones sehr gering ausfällt. Die low-end Smartphones ziehen aufgrund ihres hohen Marktanteils die mit Abstand größte absolute Umweltwirkung nach sich.

Diese Annahmen und Ergebnisse sollten wie bereits erläutert mit Vorsicht betrachtet werden (insbesondere für die Sensoren). Die Parameter des zugrundeliegenden, generischen Bilanzierungsmodells können jedoch für spezifische Fälle angepasst werden, sobald konkretere Daten zu Geräten, Stückzahlen und Entwicklungen in diesem Bereich zur Verfügung stehen. Darüber hinaus können die in A.8 aufgeführten Teilergebnisse die Grundlage für die Berechnung alternativer Smartphone- oder Sensorkonfigurationen in künftigen Bilanzierungen bieten.

3 Umweltbewertung der Mobilfunknetze 2019 bis 2030

In diesem Kapitel wird die prognostizierende Umweltbewertung der Mobilfunknetze in Deutschland von 2019 bis 2030 dargestellt. Dazu werden in 3.1 zunächst die aktuellen und zukünftigen Trends hinsichtlich Technologieentwicklung, Frequenzspektrum und Datenbedarf ermittelt. Die Datengrundlage für die dafür benötigten Abschätzungen und Annahmen soll eine Delphi-Befragung von Mobilfunkexperten liefern. Im Abschnitt 3.1.7 werden verschiedene aus den Trends abgeleitete Szenarien erstellt. Diese sollen die Spannbreite der möglichen Entwicklungen und potenzieller Einsparmaßnahmen aufzeigen. Die Ergebnisse der Energie-, CO₂- und Materialbilanzen der einzelnen Szenarien mithilfe des in Kapitel 2 erläuterten Bilanzierungsmodells werden in 3.2 für die Makro- und in 3.3 für die Mikrozellen berechnet, in Diagrammen dargestellt und ausgewertet. Eine übergeordnete Interpretation der Erkenntnisse aus allen Szenarien sowie eine kritische Diskussion der Methodik und Datenlage erfolgt in 3.4.

3.1 Entwicklungstrends und Szenarien

Eine vorausschauende Modellierung der Entwicklung von Mobilfunknetzen bis zum Jahr 2030 ist mit Unsicherheiten behaftet. Es müssen viele Annahmen zur technischen Entwicklung, der Frequenzvergabe und Nutzung, sowie der spezifischen Marktentwicklung in Deutschland getroffen werden. Wichtige Daten im Kontext der technischen Entwicklung können auf Basis der Auswertung von Standardisierungsdokumenten, Technologie-Roadmaps, Whitepapern und Trendanalysen ermittelt werden. Die Annahmen zum verfügbaren Spektrum einzelner Netzbetreiber können teilweise den Dokumenten der Bundesnetzagentur zur Frequenzvergabe entnommen werden. Einige Entwicklungen der Frequenznutzung sind ab 2025 vollkommen spekulativ, wie noch ausführlich dargestellt wird. Das Nutzerverhalten und die Entwicklung des mobilen Datenvolumens können tendenziell abgeschätzt werden und geben Hinweise auf den theoretischen Kapazitätsbedarf künftiger Mobilfunknetze. Dennoch sind viele Aspekte der Marktentwicklung und des Netzausbau spekulativ. Gerade hinsichtlich des Ausbaus von mm-Wellen-Systemen (Mikrozellen) gibt es keine konkreten Daten.

3.1.1 Durchführen einer Delphi-Befragung zur Ermittlung relevanter Trends und Einflussfaktoren im Kontext der Entwicklung der Mobilfunknetze bis 2030

3.1.1.1 Delphi-Befragung

Um die Spannweite von Unsicherheiten etwas einzugrenzen und das „technisch Mögliche“ von dem „realistisch Umsetzbaren“ zu trennen, wurde neben der Literaturauswertung auch eine Experten-Umfrage initiiert. Diese Umfrage folgte dem ersten Workshop mit Vertretern aus Forschung, Industrie und Politik im Frühjahr 2020. Die Umfrage wurde als Delphi-Befragung konzipiert. Diese Form dient insbesondere der Schärfung von Prognosen und ist eine Expertenbefragung in zwei oder mehr Runden. Die Befragten erhalten einen Fragenkatalog, den es zu beantworten gilt. Dies erfolgt zumeist über ein gestuftes Bewertungssystem (zum Beispiel die Frage: „Wie wahrscheinlich wird Ereignis X eintreten?“ – mögliche Antworten: „unwahrscheinlich“, „wahrscheinlich“ oder „sehr wahrscheinlich“).

Kommentare zur Begründung der eigenen Position sind erwünscht. In einer zweiten Runde werden den Befragten die gleichen Fragen vorgelegt, allerdings mit der zusätzlichen Information, wie andere Teilnehmer geantwortet haben (meist in aggregierter Form). Dies soll dazu dienen, die eigenen Antworten zu reflektieren und möglicherweise subjektiv geprägte Einschätzungen korrigieren zu können. Dieser Prozess kann in mehreren Runden wiederholt werden, wodurch sich ursprünglich unterschiedliche Positionen der Befragten im besten Falle

annähern und sich eine Tendenz zu einer als realistischer anzunehmenden Gruppenmeinung abzeichnet, wobei die Spannweite an Einzelmeinungen weiterhin berücksichtigt werden sollte.

Die im UTAMO-Projekt erarbeitete Delphi-Umfrage wurde als Microsoft-Excel-Formular in englischer Sprache angelegt und diente der Erörterung von folgenden vier Teilespekten des Netzausbaus:

- ▶ Netzwerkentwicklung: Anzahl an Standorten von Makro- und Mikrobasisstationen, Aggregationsknoten und Rechenzentren (7 Fragen)
- ▶ Technologieentwicklung: Anzahl TX-Pfade in Basisstationen, Einsatzdauer unterschiedlicher Komponenten, Anteil von OpenRAN in zukünftigen Netzen (22 Fragen)
- ▶ Entwicklung des Energiebedarfs: Wirkungsgrade von Verstärkern und Netzteilen, Energiebedarf verschiedener Standorte (8 Fragen)
- ▶ Entwicklung der Auslastung: Datenbedarf und -raten (pro Nutzer/IoT-Gerät), Auslastung (5 Fragen)

Die insgesamt 42 Fragen bestehen jeweils aus einer qualitativen Antwortmöglichkeit (Trend: stark zunehmend, schwach zunehmend, konstant, schwach abnehmend, stark abnehmend) und einer Quantitativen (Eingabe von konkreten Zahlen). Darüber hinaus kann die eigene Position in einem Kommentarfeld begründet werden. Jede Frage sollte für drei Zeiträume beantwortet werden: kurzfristig (2019-2022), mittelfristig (2023-2026) und langfristig (2027-2030). Zu jedem der vier Teilespekte sollte der oder die Befragte auf einer Skala von eins bis zehn angeben, wie kompetent er oder sie sich auf diesem Gebiet fühlt. Dies ermöglicht eine bessere Einordnung und eine mögliche Gewichtung der Antworten. Die aggregierten Antworten der Teilnehmer sollen die Grundlage für die Schärfung der Szenarien liefern. Eine deutliche Konsistenz sollte demnach als das wahrscheinlichste Szenario angesehen werden, wohingegen die am stärksten voneinander abweichenden Meinungen den Rahmen für eine Sensitivitätsanalyse mit Minimal- und Maximal-Szenarien festlegen.

Unglücklicherweise wurden die Fragen in der ersten Runde nur von einem der zwanzig Befragten beantwortet. Es wurden mehrere Gründe für die fehlende Beantwortung der Umfrage angegeben. Die Fragen waren teilweise zu spezifisch und hätten vertrauliche Unternehmensstrategien betroffen. Die Befragten schätzten sich teilweise als nicht kompetent genug ein. Die Weiterleitung der Fragen an die Unternehmen führte nur teilweise und spät zu einem Feedback. Vor diesem Hintergrund wurden Ende 2020 und Anfang 2021 weitere Fachgespräche mit einem deutlich erweiterten Kreis an Industrievertretern sowie Fachleuten aus betroffenen Ministerien und Behörden durchgeführt. In diesen Workshops wurden die für die Szenarien getroffenen Annahmen ausführlich erläutert und mit den Teilnehmern diskutiert. Die Gespräche können als sehr produktiv beurteilt werden und stellten einen brauchbaren Ersatz für die mehr oder weniger gescheiterte Delphi-Befragung dar. Die Parametrisierung der spezifischen Entwicklung der Mobilfunknetze in Deutschland ist, wie alle Beteiligten realisiert haben, sehr komplex. Die Gespräche haben den Fokus der Szenarien geschärft und teilweise auch hilfreiche Informationen und Daten geliefert.

Im Folgenden werden unter anderem auf Basis der Erkenntnisse aus den Fachgesprächen wesentliche Trends skizziert sowie Daten und Annahmen für die Szenarien vorgestellt.

3.1.1.2 Vorgehen bei der Trendanalyse

Im Rahmen der Entwicklung des Mobilfunkes werden spezifische Mobilfunkstandards als Evolutionsstufen bzw. Mobilfunkgenerationen unterschieden. Jede neue Mobilfunkgeneration

beinhaltet konzeptionelle und technologische Neuerungen, um die funkbasierte Effektivität und Kapazität der Datenübertragung, d.h. die spektrale Effizienz, die Dienstgüte und andere Leistungsmerkmale einschließlich der Energieeffizienz zu verbessern. Die spektrale Effizienz einer definierten Funkzelle beschreibt das Verhältnis zwischen der Datenübertragungsrate als Wert in Bit pro Sekunde (bps) und der Bandbreite des Signals in Hertz. Die maximal mögliche spektrale Effizienz, bei welcher prinzipiell eine fehlerfreie Übertragung möglich ist, wird nach dem Shannon-Hartley-Theorem durch das Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal Noise Ratio, SNR*) begrenzt. Die spektrale Effizienz ist ein wesentliches Entwicklungsmerkmal in der Mobilfunkevolution. Neue Modulations- und Kodierungsverfahren sowie Technologien zur Kanalbündelung tragen zur Erhöhung der spektralen Effizienz bei. Die Verbesserung der spektralen Effizienz steht in enger Wechselwirkung mit dem Energiebedarf des Mobilfunk. Eine gute Darstellung dieses Zusammenhangs und prinzipieller Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz im Mobilfunk liefert das Buch „Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency“ von Emil Björnson et al. (2017).⁵⁴ Björnson benennt drei hauptsächliche Faktoren zur Erhöhung der Datenrate und Kapazität in eines Mobilfunkzugangsnetzes:

- ▶ spektrale Effizienz (bit/s/Hz/Zelle)
- ▶ breitbandiges Spektrum (Hz)
- ▶ Zelldichte bzw. die Verkleinerung der Funkzellen durch zusätzliche Antennenstandorte (Zellen/km²)

Die Annahmen zum Basisszenario für die Mobilfunkentwicklung in Deutschland reflektiert im Grundsatz diese drei Entwicklungsfaktoren. Das verfügbare Spektrum wird durch die existierende und künftige Frequenzvergabepolitik des Bundes beeinflusst. Hier stehen in den kommenden Jahren bis 2025 noch mehrere größere Entscheidungen an. Diese Entwicklung wird daher in der nachfolgenden Trendanalyse separat beleuchtet. Die Netzverdichtung wird unter anderem von der Frequenzvergabe beeinflusst. Die eigentliche Triebkraft für den Netzausbau ist aber die nutzerseitige Entwicklung des mobilen Datenvolumens. Die Netzbetreiber werden versuchen, die benötigte bzw. von den Kunden erwartete mobile Datentransportkapazität durch einen angepassten Netzausbau bereitzustellen. Vor diesem Hintergrund werden folgende Aspekte in der Trendanalyse untersucht und für die Bildung der Entwicklungsszenarien berücksichtigt:

- ▶ Die Entwicklung des mobilen Datenvolumens bzw. der nutzerseitigen Marktnachfrage als Datenvolumen pro Nutzer bzw. auch als maximale und durchschnittliche Datenrate pro Funkzelle.
- ▶ Die Entwicklung des verfügbaren Spektrums, d.h. die einzelnen Frequenzbänder und deren Bandbreite pro Netzbetreiber, sowie die laufende Frequenzvergabe einschließlich der Randbedingungen, die an die Vergabe geknüpft werden.
- ▶ Die Entwicklung der Anzahl und Transceiver-Konfiguration der Antennenstandorte in den einzelnen Standortkategorien unter Berücksichtigung der Anzahl der Netzbetreiber.

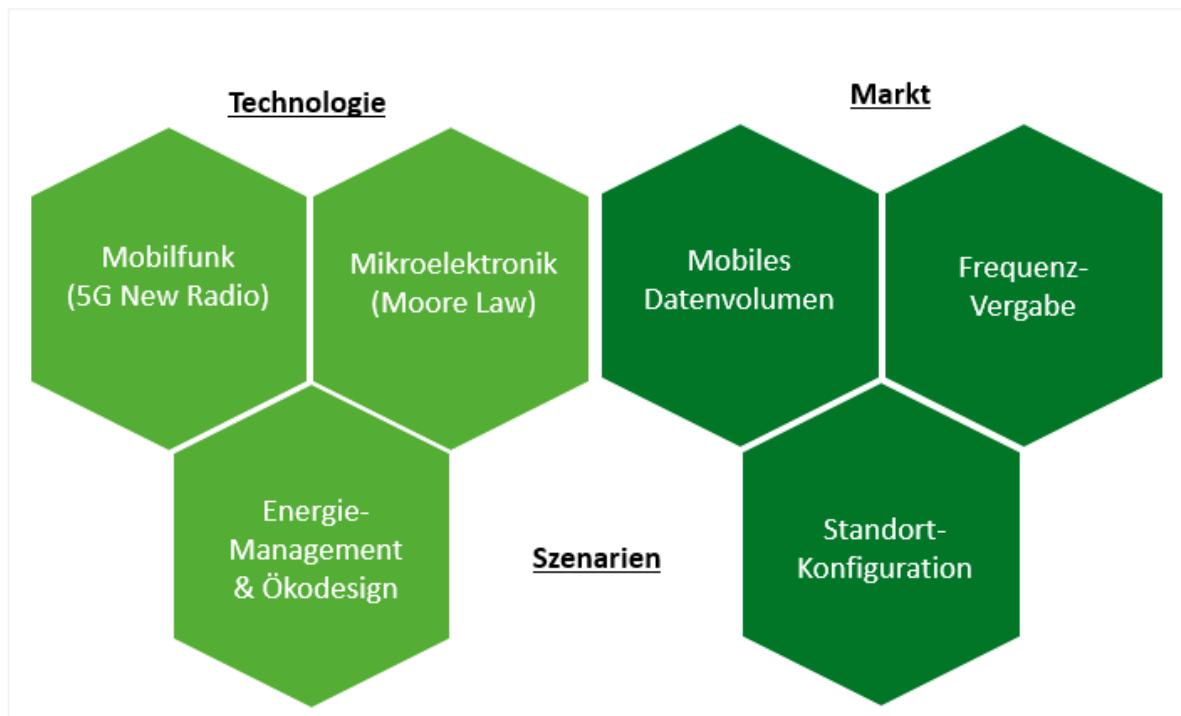
Damit werden Daten und Informationen zu zwei der von Björnson definierten Aspekte, das Spektrum und die Zelldichte, für die Parametrisierung der Szenarien erfasst. Hinsichtlich der spektralen Effizienz, dem dritten Aspekt, müssen wesentliche Technologien und technische Entwicklungen der fünften Mobilfunkgeneration in die Betrachtung einbezogen werden. Eine Herausforderung ist hierbei die zunehmende Komplexität der Technologie und Vielfalt der

⁵⁴ Das Buch ist online verfügbar: <https://massivemimobook.com/wp/>

kombinierbaren technischen Möglichkeiten. Die nachfolgende Trendanalyse konzentriert sich daher auf wesentliche Technologien, die theoretisch die spektrale Effizienz erhöhen. Es wird versucht, einen für die Umweltbewertung ausreichenden Detaillierungsgrad zu finden. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass die unterschiedlichen Mobilfunkgenerationen nicht mit den Technologiegenerationen der Hardware (insbesondere Halbleitertechnologie) gleichgesetzt werden dürfen. Hier besteht ein klarer Unterschied und daher werden Trends in der Hardwaretechnologie in einem weiteren Kapitel separat behandelt.

Abbildung 38 zeigt ausgewählte Entwicklungsfaktoren und Themen für die Bildung der Szenarien in den Dimensionen Technologie und Markt.

Abbildung 38: Ausgewählte Entwicklungsfaktoren für die Bildung der Szenarien



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

3.1.2 Trends in der Mobilfunktechnologie

3.1.2.1 Frequenzspektrum und Bandbreite

Der im Jahr 1992 beginnende digitale Mobilfunk umfasst in chronologischer Reihenfolge die folgenden Mobilfunkstandards:

- ▶ 2G: GSM, GPRS und EDGE
- ▶ 3G: UMTS, HSDPA und HSPA Evolution
- ▶ 4G: LTE und LTE Advanced
- ▶ 5G: Bislang wird in der Literatur zwischen zwei 5G-Implementierungen unterschieden. Die Erste betrifft die gerade im Ausbau befindliche Technologie auf Basis von Frequenzen < 6 GHz (NF-1) im Zentimeterwellenbereich und die Zweite noch in der Entwicklung befindliche Millimeterwellentechnik (NF-2) im Bereich > 24 GHz. Darüber hinaus wird zwischen 5G-

Non-Stand-Alone (NSA), welches auf dem 4G-Kernnetz aufsetzt, und 5G-Stand-Alone (SA) unterschieden.

Die Evolution der Mobilfunktechnik⁵⁵ ist von dem Bestreben gekennzeichnet, eine möglichst hohe durchgängige Bandbreite und ein vielfältiges Frequenzspektrum zu erreichen. Niedrige Frequenzen (< 1 GHz) verfügen über eine gute Flächenausbreitung (Reichweite) und Durchdringung (Indoor-Abdeckung), haben aber eine vergleichsweise geringe Bandbreite. Mittlere Frequenzen (1 bis 4 GHz) liefern zusätzliche Bandbreite, haben aber eine geringere Flächenausbreitung und Durchdringung. Bis einschließlich 4G wird aktuell ein Spektrum im cm-Wellenbereich von 800 MHz bis 2600 MHz genutzt. Hierbei stehen bislang kohärente Bandbreiten für einen Funkkanal von typischerweise 5 MHz, 10 MHz oder maximal 20 MHz zur Verfügung.

Mit 5G wird das Frequenzspektrum erweitert. Dabei werden zwei neue Frequenzbereiche (*Frequency Range, FR*) unterschieden:

- ▶ FR-1 (*Frequency Range*) umfasst ein erweitertes cm-Wellen-Spektrum im Bereich von 600 MHz bis 6 GHz. In Deutschland sind mit der Frequenzvergabe von 2019 bereits erste 5G Frequenzen im Band 700 MHz, 3.500 – 3.600 MHz, sowie für industrielle Anwendungen im Band 3.700 MHz bis 3.800 MHz vergeben worden (vgl. Kap. 2.1).
- ▶ FR-2 beinhaltet das zukünftige mm-Wellen-Spektrum. In Zuge der 5G-Standardisierung sind diverse, sogenannte Pionierbänder als brauchbar identifiziert worden. Letztlich entscheiden die nationalen Netzaufsichtsbehörden über die Frequenzvergabe. In Deutschland liegt ein potenzielles Spektrum im Bereich 26 bis 28 GHz. Mit einer Vergabe wird bis 2025 gerechnet (vgl. Kap. 3.1.4)

Mit höheren Bandbreiten verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und die höheren Frequenzen begrenzen die Reichweite des Funksignals, was in kleineren Funkzellen resultiert. Zur Optimierung des Funkkanals müssen daher bei höheren Frequenzen und Bandbreiten eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden, um diese negativen Effekte zu kompensieren. Dies führt zu komplexeren Schaltungen im Funkmodul und beispielsweise der Notwendigkeit des Einsatzes zusätzlicher Filter, Verstärker und Signalprozessoren. Diese zusätzlichen Maßnahmen benötigen Energie und Rohstoffe.

3.1.2.2 Trägermodulation und Kanalkodierung

Frequenz und Bandbreite charakterisieren einen wichtigen Aspekt der spektralen und Energieeffizienz eines Funkkanals im digitalen Mobilfunk. Wie viele Informationen über den Funkkanal übertragen werden können, wird durch die Architektur der Übertragungstechnologie mitbestimmt. Zum Datentransport wird das Frequenzband in viele kleine Ressourcenblöcke unterteilt, die wiederum aus kleinen Trägerfrequenzen bestehen, welche die kodierten Steuer- und Nutzdaten beinhalten (siehe auch Berechnung der Datenrate in 2.2.5). Der Teilträger (Sub-Carrier) ist der kleinste Baustein der funkbasierten Übertragungstechnologie und hat typischerweise eine Bandbreite von 15, 30, 60, 120 oder 240 kHz. Diese Blöcke werden durch sehr schmale Frequenzblöcke voneinander getrennt. Die digitalen Steuer- und Nutzdaten,

⁵⁵ Die folgenden Darstellungen von Trend im Bereich der Mobilfunktechnik basieren hauptsächlich auf wissenschaftlichen Artikeln, Standardisierungen, Whitepapern, Roadmaps sowie physikalischen Grundlagen der Nachrichtentechnik, beispielsweise: (Al-Dulaimi et al. 2018; Auer et al. 2011; Björnson et al. 2017; Bo 2016; Deruyck et al. 2010; Eramo et al. 2016; Ge und Zhang 2019; Ge et al. 2016; Ge et al. 2017; Granelli et al. 2018; Hofstetter und Tanner 2008; Huawei 2019, 2018; Keysight Technologies 2018; Wind River Systems 2017; Yan et al. 2016; Yan et al. 2019).

welche über Funk übertragen werden sollen, werden in der digitalen Signalbearbeitung kodiert und mittels Modulationsverfahren auf diese Teilträger in elektrische Signale umgewandelt.

Trägermodulationsverfahren sind Technologien, mit denen digitale Nutzsignale als elektrische Signale auf eine Teilträgerfrequenz aufgebracht werden. Um mehrere Ressourcenblöcke gleichzeitig oder gemeinsam über den Funkkanal zu übertragen, kommen Technologieverfahren des sogenannten Multiplexing zur Anwendung. Im Zusammenhang mit Multiplexverfahren wird auch von Multiple Access gesprochen. Im konventionellen cm-Wellen-Mobilfunk wurde bis einschließlich 4G das Frequenzmultiplexing (Frequency Division Multiplex Access, FDMA) genutzt. Das Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ist ein in 4G und 5G verwendetes Mehrträger-Multiplexverfahren, welches mehrere orthogonale Träger bündelt. Das OFDM-Verfahren verwendet zwei getrennte Wellenformen, das Orthogonal Frequency Division Multiplex Access (OFDMA) im Downlink und das Single Carrier Frequency Division Multiplex Access (SC-FDMA) im Uplink.

Künftige mm-Wellen-Systeme nutzen hingegen das Zeitmultiplexing (*Time Division Multiplex Access, TDMA*). Das Zeitmultiplexing ist insbesondere für Mehrfachantennensysteme (MIMO) von Vorteil, da im analogen Teil des Funkmoduls mikroelektronische Schalte zur Analyse der Eingangs- und Ausgangssignale genutzt werden können. Dies spart Platz und erlaubt den Bau relativ kompakter Massive MIMO-Antennenarrays. Das Zeitmultiplexing hat noch einen weiteren wichtigen Vorteil: Es gestattet ein lastbezogenes Energiemanagement, da theoretisch die Leistungsverstärker nur für das Senden und Empfangen aktiv geschaltet werden, aber auch Zeitintervalle (Zeitschlüsse) ohne Aktivität zum Energiesparen genutzt werden können. Die Funkkanäle können also, stark vereinfacht ausgedrückt, bis zu mehrere zehn Millisekunden abgeschaltet werden. Dieses An- und Ausschalten wird insbesondere bei mm-Wellen-Systemen zur Anwendung kommen und laut Whitepaper und Forschung deutliche Energieeinsparpotenziale realisieren (vgl. Kap. 4.1.5).

Die Modulation kann Signalamplitude, Frequenz oder Phase verändern. Im Jahr 2008 wurde mit HSPA+ das Quadratur-Amplituden-Modulation Verfahren (QAM) eingeführt, welches mit der damit erzielten Datenrate weit über das 8-PSK (*Phased Shift Key*) Verfahren von EDGE hinausgeht. Es nutzt neben der Phase auch die Amplitude als zusätzlichen Modulationsfaktor. Meist werden heute im Uplink und Downlink unterschiedliche QAM-Varianten eingesetzt. Aktuelle Entwicklungen beinhalten 16-QAM (16 Symbole für 4 Bit mit Amplituden 25 % und 75 %) sowie 6 Bit/64-QAM und 8 Bit/256-QAM. Ein Slot in 5G NR beinhaltet 7 oder 14 OFDM-Symbole für Teilkanäle (*Sub Channel*) kleiner 60 kHz und 14 OFDM-Symbole für Teilkanäle größer 120 kHz. Ein Slot kann auch durch Mini-Slots ergänzt werden. Dies ist insbesondere bei Anwendungen, welche kurze Reaktionszeiten benötigen (*low latency*) und flexible Anfangszeiten und Dauern haben, sehr hilfreich.

Technologien zur Kanalkodierung haben ebenfalls einen Einfluss auf die resultierende Energieeffizienz der Datenübertragung. Kodierungsverfahren wirken sich zunächst auf die Güte der Datenübertragung aus, da sie Redundanz und Steuerungsaufwand definieren und je nach Kanaleigenschaften anpassen. Die digitale Signalverarbeitung im Rahmen der Kanalkodierung benötigt für die Sicherstellung einer hinreichenden Kanalqualität entsprechende Rechenleistung und trägt damit zum elektrischen Energiebedarf bei. Die Datenübertragung bei 5G soll aus Effizienzgründen ein sehr schlankes Design haben und nicht nutzlastbezogene, dauerhafte Signal- bzw. Datenübertragungen vermeiden. Im Gegensatz zu LTE soll ein Referenzsignal nur dann übertragen werden, wenn es nötig ist. Wie diese grundlegenden technologischen Neuerungen von 5G zeigen, werden im neuen Mobilfunkstandard bereits wichtige Voraussetzungen für eine verbesserte Energieeffizienz verankert.

3.1.2.3 MIMO und Beamforming

Eine weitere Strategie zur Verbesserung der spektralen Effizienz und damit auch potenziell der Energieeffizienz besteht im Wesentlichen darin, die Anzahl der Antennen und Kanäle zu erhöhen. Massive MIMO ist eine Antennentechnologie für höhere Frequenzbänder und insbesondere für künftige mm-Wellen-Systeme, die durch den parallelen Einsatz von vielen aktiven Antennen-Subarrays pro Sektor nicht nur den Antennengewinn erhöht, sondern vor allem sehr hohe Datenübertragungsraten erzielt (vgl. Kap. 2.2.2). Ein Antennen-Subarray besteht dabei aus 2, 4 oder 8 Antennenelementen (AE). Aus diesen Antennen-Subarrays werden große Antennensysteme mit 32, 64, 128, 256, 512 oder mehr Antennenelementen und entsprechend vielen Antennenpfaden gebaut. Zusätzliche Antennen erzeugen mehr Kanäle und helfen, die Energie beim Senden und Empfangen von Signalen zu bündeln. Auf diese Weise wird die Sendeleistung reduziert und die Datenrate erhöht. Die Verbindungszuverlässigkeit wird ebenfalls verbessert, da Massive MIMO größere Freiheitsgrade bei der Auswahl von Uplink- und Downlink-Datenströmen zulässt.

Massive MIMO steht auch in unmittelbarer Wechselwirkung mit der Strahlformung. Durch Kombinieren und Synchronisieren der aktiven Antennen können fokussierte Funkwellen erzeugt werden, was zu einer effizienteren räumlichen Ausbreitung mit weniger Dämpfung führt. Die Strahlformung (Beamforming) unterstützt die spektrale Effizienz von Massive MIMO weiter und verringert auch den Sendeleistungsverlust (vgl. Kap. 2.2.2). Das Beamforming ist ein Verfahren, das individuelle Amplituden- oder Phasenänderungen am Sender erzeugt. Der für die Strahlformung verwendete Mechanismus (analog, hybrid oder vollständig digital) wirkt sich auf den Energieverbrauch aus. Abhängig vom Systemdesign und der Größe des Antennen-Arrays variiert der Energieverbrauch des Systems.

Dynamisches, schnelles Beamforming zur optimalen Ausrichtung einzelner Antennenelemente kann real erst durch Massive MIMO realisiert werden. Hierbei werden die einzelne AE Subarrays zum Beispiel phasengesteuert ausgerichtet. Der Winkel und die Richtgeschwindigkeit sind wichtige Leistungsparameter und abhängig von der technischen Realisierung. Die Ansteuerung der Antennenelemente kann analog, digital oder hybrid erfolgen. Diese unterschiedlichen Schaltungsdesigns für ein Beamforming benötigen verschiedene Arten und Mengen an elektronischen Komponenten. Es können drei prinzipielle Designoptionen für die Realisierung des horizontalen und vertikalen Beamforming unterschieden werden:

- ▶ Analoges Beamsteering: Bei der ersten Option wird das Signal eines Transceiver-Pfades auf mehrere Antennen verteilt, wobei der Phasenschieber für das Beamsteering im analogen Bereich vor der Antenne platziert wird. Dieses Design ist relativ einfach und energiesparend, erlaubt aber nur ein begrenztes Beamsteering. Daher ist dieses Design gut für eine begrenzte Anzahl von fest vordefinierten Beams geeignet. Anwendungen hierfür sind Fixed Wireless Access (FWA) und Richtfunk im Front- und Backhaul (X-Haul).
- ▶ Hybrides Beamforming: Bei dieser zweiten Option wird ein digitales Pre-Coding für mehrere Transceiver-Pfade mit einem analogen Phasenschieber kombiniert. Dieses Design erlaubt die aktive Steuerung mehrerer Sub-Antennen-Arrays und ist damit für Anwendungen wie Reichweitenverlängerung und Multi-user MIMO-Kommunikation in Umgebungen mit moderater Nutzerdichte und Mobilität geeignet. Da mehrere Transceiver-Pfade (einschließlich Verstärker) realisiert werden müssen, werden mehr Bauelemente benötigt, wodurch der Energiebedarf steigen kann.
- ▶ Digitales Beamforming: Diese vollständig digitale Architektur bedeutet, dass jedes Antennenelement einen separaten Transceiver-Pfad besitzt. Damit ist die höchstmögliche Beamforming-Funktionalität und eine extrem flexible, hoch dynamische Anwendung

erreichbar. Dieses Design ist sehr bauteil- und energieintensiv. Der Einsatz könnte sich aber bei hohem und mobilen Verkehrsaufkommen (z.B. bei innerstädtischen Hotspots, Verkehr, Logistik) ressourcenseitig lohnen.

Diese sehr vereinfachte Darstellung einiger Vor- und Nachteile einzelner Beamsteering-Lösungen kann nur ansatzweise andeuten, welche komplexen Abwägungsentscheidungen ein Designer bei der Auslegung von Antennenarrays mit Beamforming zu treffen hat. Es wird aber durchaus deutlich, dass ein energie- und ressourcensparendes Design eines Antennenarrays (Konfiguration) in direkter Wechselwirkung mit den konkreten Anwendungsbedingungen (Konditionen) steht. Es ist anzumerken, dass eine vertiefende Darstellung dieses Sachstandes den Rahmen des UTAMO-Projektes übersteigt.

Einen guten Überblick zu den drei unterschiedlichen Beamsteering-Optionen sowie deren primären Anwendungen liefert das Whitepaper von 5G Americas: „Understanding mmWave Spectrum for 5G Networks“ (2020), ein Beitrag von Infineon: „Overview about RF and PA Requirements for 5G NR and Challenges for Hardware Implementation“ (Dielacher et al. 2019), sowie das Technical Whitepaper von Samsung: „Massive MIMO for New Radio“ (2020). Diese Dokumente beschreiben detailliert die technischen Optionen und Leistungsparameter für MIMO-basiertes Beamforming. Samsung stellt zudem auch Stufen eines schrittweisen Netzausbau vor. Folgende drei Ausbauphasen (*Deployment Phases*) werden zeitlich unterschieden:

- ▶ Phase 1: *Fast Deployment* für kommerzielles 5G New Radio mit kompakten 32T32R Antennensystemen, 200 MHz unmittelbare Bandbreite (*Instantaneous Bandwidth, IBW*) und einer Sendeleistung von insgesamt 200 W. Es werden existierende Infrastrukturen genutzt.
- ▶ Phase 2 *Capacity Expansion* für Innenstädte (*Dense Urban Area*) mit 64T64R Antennensystemen, 280 MHz Bandbreite, hoher Kapazität mit DL 16 Layer und UL 8 Layer, sowie einer Sendeleistung von insgesamt 320 W
- ▶ Phase 3 *Higher Integration* für ein breites Spektrum mit > 400 MHz Bandbreite und 64T64R Antennensystemen. Diese Systeme könnten bei RAN-Sharing-Ansätzen zum Einsatz kommen.

3.1.2.4 Neue Netzarchitektur

Um die Flächenabdeckung und Kapazität des RAN zu erhöhen sowie die Latenz zu verringern, konzentrierte sich die 5G-Standardisierung nicht nur auf eine völlig neue Funktechnologie (*New Radio, NR*), sondern auch auf Mechanismen zur Integration verschiedener Funkzugangstechnologien (*Multi-RAT*) und verschiedener Transceiver in einem kooperierenden Netzwerk (*Coordinated Multi-Point, CoMP*). Diese Technologien haben das Potenzial einer erheblichen Leistungsverbesserung und könnten auch die immer benötigte Redundanz schaffen. Es muss aber auch davon ausgegangen werden, dass diese Technologien aufgrund des Aufwandes für die Koordinierung und Zusammenführung der Signale anteilig ggf. eine höhere Rechenleistung benötigen. In der Literatur konnten keine diesbezüglichen Energiedaten gefunden werden. Die Autoren empfehlen, diese koordinierungsbedingten Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf zu untersuchen.

Bis einschließlich 4G sind Antennen-, Funk- und Basisbandmodule an einem Standort nah beieinander positioniert. *Centralized RAN (C-RAN)* ist eine neue architektonische Option im 5G RAN-Design, bei der ein Großteil der Basisbandverarbeitung in der ersten Aggregationsebene

zentralisiert bzw. konzentriert wird.⁵⁶ Im 5G-Standard nennt man Basisbandmodule (BU), die direkt am Antennenstandort verortet sind, *Distributed Unit* (DU) und solche, die im Aggregationsnetz konzentriert werden, *Centralized Unit* (CU). Es gibt dabei verschiedene Varianten, wo die wesentlichen Funktionalitäten der digitalen Signalverarbeitung verortet werden (*Functional Split*). Die Verlagerung der BU als CU in einen größeren Standort (eine Art Rechenzentrum) im Aggregationsnetz hat den theoretischen Vorteil, die rechenintensiven Funktionen der BU in größeren Server-Clustern zu verarbeiten. Dieser Ansatz des sogenannten *Baseband-Poolings* kann im Gegensatz zu normalen Basisstationen (theoretisch) die benötigten Rechnerressourcen besser skalieren und auslasten. Dieser Theorie folgend wird im C-RAN energieeffizienter gerechnet. Zudem kann mit einer C-RAN-Architektur die Koordination zwischen Standorten (Zellen) verbessert und auch eine Virtualisierung einzelner Netzwerkfunktionen leichter realisiert werden. Eine Voraussetzung für eine C-RAN-Implementierung ist eine entsprechende Kapazität und Geschwindigkeit der Signalleitung zwischen dem Antennenstandort und dem Baseband-Pool (*Baseband Hotel*). Die energetischen Vorteile einer realen C-RAN-Implementierung sind nicht bekannt. Auch hier wird empfohlen, das Thema weiter zu untersuchen.

Open RAN ist eine Initiative der O-RAN Alliance und ein technisches Konzept, das die Interoperabilität von unterschiedlichen Zugangsnetzen erleichtern soll.⁵⁷ Diese Entwicklung richtete sich gegen die konventionelle Systemtechnik, die durch proprietäre Hardware und Software gekennzeichnet ist. Mit offenen Standards für Schnittstellen und Netzwerkelemente können Funktionalitäten in der digitalen Ebene z.B. auch auf generischer Hardware betrieben werden. Das 5G-Konzept von Software-basierten Netzen (*Software Defined Network*, SDN) und Netzwerk-Virtualisierung (*Virtual RAN*, V-RAN) stehen in einem engen Zusammenhang mit dem Thema *Open RAN* (aber nicht ausschließlich). Die energie- und ressourcenbezogenen Auswirkungen von *Open RAN* unterliegen einer Reihe von Randbedingungen und sind stark abhängig von konkreten Architekturen und Gerätekonfigurationen. Eindeutige Aussagen zu umweltseitigen Vorteilen können noch nicht getroffen werden. Die mit dem *Open RAN*-Konzept einhergehende verbesserte Interoperabilität hat sicherlich prinzipielle Vorteile im Sinne der Ressourceneffizienz. Allerdings hat eine Systemtechnik, bei der Hardware und Software optimal abgestimmt sind, zweifelsohne auch Effizienzvorteile. Die umweltseitigen Auswirkungen von *Open RAN* sollten genauer untersucht werden. Ein weiterer Aspekt, der die Marktdurchdringung von *Open RAN* beeinflussen könnte, ist die datentechnische Sicherheit, die hier allerdings nicht weiter untersucht wird.

3.1.3 Trends in der Hardwaretechnologie

3.1.3.1 Leistungssteigerung und Energieeffizienz in der Mikroelektronik

Die zunehmende Verkleinerung der Halbleiterstrukturen und die damit einhergehende Steigerung der Technologiekomplexität haben zu einer enormen Kostensteigerung der IC-Fertigung geführt. Die gleichzeitig damit verbundene ökonomische Regelmäßigkeit der Kostensenkung pro Transistor wurde durch Gordon Moore bereits im Jahre 1965 postuliert und führte zu für die damalige Zeit unvorstellbaren Entwicklungen in der Halbleitertechnik (Moore 2006). Bis zur 22 nm-Technologie war jeder Umstieg auf eine kleinere Technologiegröße (*Technology Node*) noch mit einer Leistungssteigerung von etwa 40% und einer

⁵⁶ Für die folgende Erläuterung des C-RAN sei verwiesen auf: (Perrin 2017; Sigwele et al. 2020; Rago et al. 2020).

⁵⁷ Für die weitere Darlegung zum Thema *Open RAN* wird Bezug genommen auf: (Lorca-Hernando et al. 2021; O-RAN Alliance 2020, 2021; Perrin 2017; RIMEDO Labs 2021; Singh et al. 2020).

Chipgrößenreduktion um etwa 50% verbunden. Die aktuelle Leistungssteigerung bei der 7-nm Technologie ist nicht genau zu beziffern. Zur weiteren Verbesserung der Leistungsparameter bei kleiner Grundfläche werden die neusten Transistoren in 3D-Architektur realisiert. Durch diese noch engere vertikale und horizontale Verschachtelung der Transistoren erhöht sich die Leistungsdichte pro Chip-Fläche und damit auch die erzeugte und abzuführende Wärmelast. In der Vergangenheit wurde diesem Problem durch eine Takt- und Spannungsanpassung begegnet. Bereits im Jahr 1974 formulierte Robert H. Dennard in Anlehnung an Gordon Moore eine zweite Skalierungstheorie für die halbleiterbasierte Mikroelektronik. Diese besagt, dass die elektrische Leistungsdichte⁵⁸ bei kleiner werdenden Transistoren konstant bleibt und mit der Taktfrequenz skaliert. Seit Erreichen der 22 nm-Technologie im Jahr 2012 kann mit herkömmlichen Transistordesigns, normaler Lithografie und Maßnahmen wie der Spannungsanpassung eine weitere Miniaturisierung nicht erzielt werden. Die Nachteile der steigenden Komplexität des IC-Designs und der Fehleranfälligkeit des IC-Entwurfs wirken sich immer deutlicher aus. Eine Herausforderung bleibt auch die wachsende Energiedichte in der Chip-Baugruppe (*IC Package*). Auch bei gutem thermischem Management wirken sich hohe thermische Lastwechsel nicht nur nachteilig auf den Energiebedarf, sondern auch auf die Langzeitzuverlässigkeit aus. Als Folge dieser Entwicklung muss angenommen werden, dass IC-Baugruppen schneller altern und in kürzeren Zyklen ausgetauscht werden müssen. Auch dieser Trend könnte zu einem deutlich wachsenden Bedarf an ICs und damit zu einer substanziellen Steigerung der Chip-Produktion mit steigenden herstellungsbezogenen Umweltlasten führen.

Seit 2012 besteht zur Verbesserung der Situation auch ein Trend zur Modularität sowohl im Design als auch der Fertigung von ICs. Bei den existierenden System-on-Chip-Ansätzen (SoC) werden alle Funktionsblöcke wie CPU- und GPU-Kerne, Caches, Speicher-Controller und andere Elemente in der gleichen Halbleitertechnik (*Technology Node*) auf einem Wafer hergestellt. Diese Teifunktionen (*Intellectual Property Cores, IP-Cores*) müssen bislang aus Kompatibilitätsgründen als monolithischer Chip mit derselben Fertigungstechnik produziert werden. Die SoC-Chips fallen damit trotz hoher Miniaturisierung noch immer recht groß aus. Die Design- und Fertigungskosten bleiben sehr hoch. Die Fertigungskosten werden stark von der Lithografie-Technik bestimmt. Um Strukturen im Bereich weniger Nanometer zu generieren, ist eine Belichtung mit extrem ultraviolettem Licht (EUV) mit enorm aufwendiger Optik nötig. Auch müssen Belichtungsprozesse zur Erzeugung einer Struktur mehrfach ausgeführt werden. Es sind u.a. diese Maßnahmen, welche die Kosten und den Ressourcenbedarf pro Chipfläche bei immer kleineren Strukturen negativ beeinflussen.

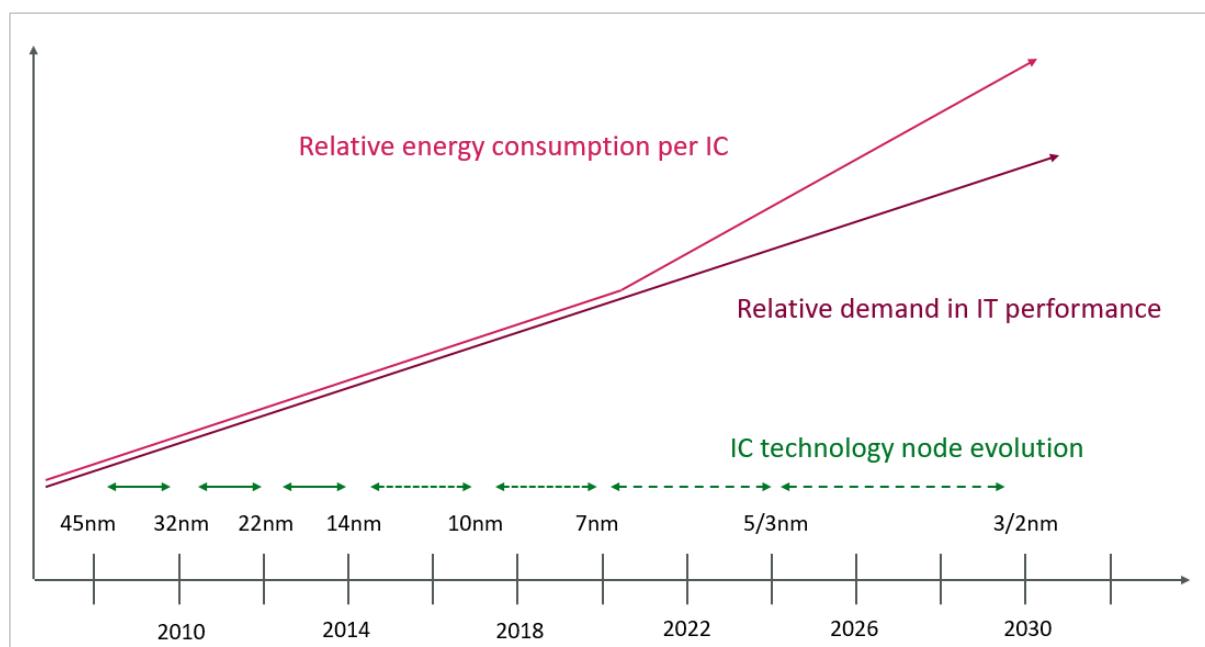
GLOBALFOUNDRIES gibt Entwicklungskosten für einen 14 nm-Chip mit 80 Mio. USD an, bei einem aktuellen 7 nm-Chip überschreiten diese die Marke von 300 Mio. USD. Die Milliardengrenze könnte bereits bei 3 nm-Chips überschritten werden. Eine aktuelle 7-nm-Halbleiterfabrik (Fab) kostet etwa 15 Milliarden USD und laut einer Pressemitteilung vom April 2021 plant der taiwanesische Halbleiterhersteller Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC), in den nächsten drei Jahren über 100 Milliarden USD in den Ausbau der Chip-Fertigungskapazität zu investieren. Die Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit der weiteren Miniaturisierung sind neben der Grenze der Physik daher ein Hauptgrund für das nahende Ende des Moore'schen Miniaturisierungsparadigmas (*Moore's Law*) bzw. der schrittweisen Verlangsamung der Leistungssteigerungs- und Energiespareffekte, die mit der kontinuierlichen Miniaturisierung einhergehen. Berücksichtigt man aber die 50 Jahre Entwicklungszeit und die damit verbundenen F&E-Kosten in der Halbleitertechnik, die die aktuelle 7 nm-Technologie erst

⁵⁸Die elektrische Leistungsdichte gibt an, viel Leistung in Watt pro Flächeneinheit umgesetzt wird.

ermöglicht haben, so werden neue „Beyond Moore“ Ansätze wie Quantencomputer sicher nicht schon in den nächsten zehn Jahren in Großserie und nutzbaren Formfaktoren verfügbar sein.

So muss die Frage gestellt werden, ob nicht der noch immer konstant steigende Bedarf an Rechen- und Speicherleistung (auch und gerade im Bereich des Mobilfunk) durch die sich zeitlich mehr und mehr verzögernde Miniaturisierung (*Limit of Moore*) und der damit ausbleibenden periodischen Performance- und Energieverbesserung (Koomey's Law) zu einer Effizienzkrise führt. Mit einer verzögerten Miniaturisierung muss der Bedarf an Rechen- und Speicherleistung durch mehr parallel eingesetzte ICs gedeckt werden. Hierfür muss das Volumen der Chipproduktion erhöht werden.⁵⁹ Mit der Zunahme an parallel eingesetzten ICs wird aber schlussendlich auch der absolute Energiebedarf der Rechnersysteme steigen. Beide Trends erhöhen die Umweltwirkung bezogen auf die Herstellungs- und Nutzungsphase von ICs. Die Abbildung 39 versucht, diesen Trend vereinfacht darzustellen. Gegenüber einer konstant steigenden Nachfrage an Rechenleistung (*Relative Demand in IT Performance*) steigen der herstellungs- und nutzungsseitige Energiebedarf aufgrund der verzögerten technischen Verbesserung (*Technology Node Evolution*).

Abbildung 39: Auswirkungen der Limitationen des Moore'schen Gesetzes auf den Energiebedarf der IKT



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Dem soeben dargestellten Entwicklungsszenario wird in der Mikroelektronikindustrie durch neuartige Technologieansätze begegnet. Vor dem Hintergrund der Limitation einer More Moore Entwicklung und des zeitlichen Abstandes zu einer kommerziell verfügbaren Beyond Moore Entwicklung (Quanten-Computing) werden in der Halbleiterindustrie seit etwa zehn Jahren alternative, sogenannte *More Than Moore* Technologieentwicklungen verfolgt.

Diese More-Than-Moore-Ansätze gehen in gewisser Weise ebenfalls auf Gordon Moore zurück. Bereits in seinem Bericht von 1965 hat er eine Lösung für das ökonomische Limit der Miniaturisierung angedeutet: Die Möglichkeit, kleine Funktionselemente so zu verbinden, dass

⁵⁹ Dieser Trend ist seit geraumer Zeit sichtbar. Vergleich u.a. die IC Insight Marktberichte zum Volumen der globalen Chipfertigung bzw. Waferstarts.

komplexe elektronische Systeme daraus entstehen: „*It may prove to be more economical to build large systems out of smaller functions, which are separately packaged and interconnected*“ (Moore 2006). Den Ansatz, einzelne Funktionsblöcke getrennt zu designen und als System-on-Chip (SoC) aufzubauen, ist die erste Stufe auf diesem Weg. Eine weitere Zwischenstufe bei der Systemintegration besteht darin, dass nur die Funktionsblöcke aus der nächsten Technologiegeneration gefertigt werden, die eine neue Funktion oder eine deutliche Leistungsverbesserung realisieren. Allerdings sind diese SoC-Aufbauten noch immer recht groß und die Fertigung, bedingt durch die große Fläche und hohe Lagenzahl, zeitaufwendig und komplex.

Die Fertigungsausbeute dieser vergleichsweise großen ICs ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht ein sehr entscheidendes Nachhaltigkeitskriterium. Um das finanzielle Risiko eines Totalverlustes bei geringer Ausbeute zu vermindern, geht der Trend zu kleineren ICs, die dann mittels eines hochdichten Verdrahtungsträgers miteinander verbunden werden. Als Beispiel sei hier der „Stratix 10“ von Intel (Altera) oder die „Radeon Fury X“ von AMD genannt. Bei diesen Konzepten werden mehrere integrierte Rechenkerne mit HBM-Speicher-Stacks (*High Bandwidth Memory, HBM*) auf einem Silizium-Substrat (*Si-Interposer*) aufgebaut. Diese heterogene Systemintegration ermöglicht es, kleinere und ökonomischer herzustellende ICs (Chips) in ein hoch effektives Rechen- und Speichersystem zu integrieren. Dabei werden ähnlich gute Leistungswerte erzielt wie bei der konventionellen, monolithischen Systemintegration. Die nächste Stufe ist der sogenannte „*Chiplet*-Ansatz“.

Der *Chiplet*-Ansatz besteht darin, *IP-Cores* aus verschiedenen Technologien zu einem aktiven Bauelement zu verbinden. Dieses Konzept wird stark von der DARPA in den USA favorisiert und durch Intel und AMD vorangetrieben. Bereits 2007 hat Intel ein Konzept zur 3D-Integration vorgelegt, über das in den letzten Jahren jedoch wenig publiziert wurde. Ende 2018 hat Intel die Foveros-Technologie angekündigt: Die verschiedenen Komponenten eines Mikroprozessors werden in einzelne *Chiplets* separiert, die mittels der optimalen Halbleitergrößentechnologie gefertigt werden. 10 nm-CPUs können dann 14 nm oder 22 nm-Chiplet-Module enthalten. Der große Vorteil liegt dann nicht in der Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten, sondern in der gesamten Geschwindigkeit des Systems unter optimalen Fertigungskosten. Wegen der oben angeführten ökonomischen und technischen Vorteile fördert die DARPA dieses Thema auch in ihrem „Common Heterogeneous Integration and IP Reuse Strategies“ (CHIPS) Programm.⁶⁰ Auch die „IEEE International Roadmap for Devices and Systems“ (IRDS™) greift diese Strategie der aktuellen Technologie-Roadmap (Edition 2020) auf.⁶¹

Mit Blick auf die Energie- und Ressourceneffizienz künftiger digitaler Rechnersysteme inklusive solcher in Mobilfunkanlagen sind diese auch als Hetero-System-Integration bezeichneten More-than-Moore-Ansätze von großer Bedeutung. Aufgrund der Verwendung flächenmäßig kleinerer Chips haben diese alternativen Technologieansätze einerseits das Potential, die Kosten der Chipfertigung zu senken, die Ausbeute zu verbessern, und damit den Ressourcenaufwand pro funktionaler Rechen- und Speichereinheit zu minimieren. Die Hetero-System-Integration bietet andererseits auch für das Energiemanagement und das damit direkt verbundene thermische Management vielfältigere Ansätze zur Optimierung. Die Energieeffizienz in der Nutzungsphase könnte durch integrierte Fluidik-Kühlungen und systemisches (*blockweises*) Energiemanagement noch verbessert werden. Damit könnte auch eine höhere Auslastung der

⁶⁰ Siehe Webseite von DARPA CHIPS: <https://www.darpa.mil/program/common-heterogeneous-integration-and-ip-reuse-strategies>

⁶¹ Siehe Webseite von IEEE IRDS™: <https://irds.ieee.org/>

vorhandenen Leistung und das steigende Problem ungenutzter Transistorkapazität (Dark Silicon) minimiert werden.

Wie diese kurze Darstellung aktueller Trends der Mikroelektronikindustrie andeutet, wächst einerseits die Limitation von *More Moore* und es entstehen andererseits neue heterogene Technologieansätze. So kann geschlussfolgert werden, dass auch in den kommenden zehn Jahren leistungs- und energiebezogene Effizienzsteigerungen durch die Chipindustrie realisiert werden können. Eine Verdoppelung der Performanz bei gleichbleibender Energieeffizienz ca. alle zwei Jahre, also der Situation der vergangenen vierzig Jahre, erscheint als Annahme jedoch nicht mehr zulässig. Für die Szenarien wird im Basisszenario von einer 3%-igen Verbesserung der Energieeffizienz alle drei Jahre und im Szenario „beschleunigte Technikmodernisierung“ von einer 15%-igen Verbesserung alle drei Jahre ausgegangen. Diese Annahmen berücksichtigen in den Szenarien auch den Umstand, dass die typische Lebensdauer der Gerätetechnik im Mobilfunk mit rund 7 Jahren vergleichsweise lang ist. Daher werden die realen Verbesserungspotenziale der Technologieentwicklung nie sofort im Markt umgesetzt, sondern immer erst zeitversetzt. Diese Situation wird im Sachbilanzmodell berücksichtigt. Im Falle einer beschleunigten Technikmodernisierung wird allerdings davon ausgegangen, dass die Geräte ausgetauscht werden, sobald die neueste Energieeffizienzverbesserung verfügbar ist (im Schnitt ca. alle drei Jahre). Detaillierte Ausführungen zu den Szenarien finden sich in 3.1.7.

3.1.3.2 Wirkungsgrad in der Leistungselektronik

Neben der fortlaufenden Miniaturisierung und den designbedingten Fortschritten in der Prozessor- und Datenspeichertechnik trägt die Halbleiterindustrie auch im Bereich der Leistungselektronik und Hochfrequenztechnik zur Steigerung der Energieeffizienz bei. Zur Steigerung der Energieeffizienz der Stromversorgung von Mobilfunkanlagen gibt es verschiedene Ansätze, die an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Ein generell in der Leistungselektronik verbreiteter Trend, der sich auch für diese Anwendung als sinnvoll erweist, ist der Austausch von siliziumbasierten Halbleitern gegen Bauelemente aus den Verbindungshalbleitern Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Aufgrund deren wesentlich geringeren Halbleiterkapazitäten und den daraus resultierenden höheren Schaltgeschwindigkeiten verursachen sie deutlich geringere Schaltverluste. Diese Eigenschaft von SiC- und GaN-Halbleitern wird nicht nur zur Reduzierung der halbleiterbedingten Verlustleistung, sondern auch zur Erhöhung der Schaltfrequenz genutzt. Dadurch können auch die passiven Komponenten des Leistungspfads bezüglich Effizienz optimiert und kleiner ausgeführt werden, müssen jedoch aufgrund der höheren Schaltgeschwindigkeiten eine höhere Qualität aufweisen.⁶² Die passiven Bauteile sind Kondensatoren sowie induktive Bauteile und dienen als Energiespeicher. Sie verstetigen die durch die schaltenden Halbleiter stark schwankenden Strom- und Spannungsverläufe.⁶³ Da aufgrund der höheren Taktfrequenzen und der damit kürzeren Periodendauer nicht mehr so viel Energie in ihnen zwischengespeichert werden muss, können sie kleiner und energieeffizienter designed werden.

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung des Wirkungsgrads ist die Parallelisierung von Wandlern und die damit verbundene Erhöhung des Teillastwirkungsgrads des Gesamtsystems. Ein leistungselektronischer Wandler hat grundsätzlich leistungsunabhängige sowie mit der Wandlerleistung linear oder quadratisch steigende Verluste. Aufgrund der leistungsunabhängigen Verluste, die vorrangig durch einen Teil der Schaltverluste in den

⁶² Dies gilt insbesondere für Kondensatoren.

⁶³ Hier muss man natürlich unterscheiden, ob die Kondensatoren der Glättung dienen oder wie die Spulen zur Energiespeicherung beim Umladen genutzt werden.

Halbleitern und durch die Kernverluste in den induktiven Bauteilen hervorgerufen werden, sind die unteren Teillastwirkungsgrade der Wandler mit 40 % bis 70 % sehr gering. Den Wirkungsgrad bestimmen die Leerlaufverluste (als konstante Größe) und die Leistungsverluste. Letztere primär durch ohmsche Verluste und Sättigung (lastabhängig). Je nach Design liegt der optimale Wirkungsgrad im oberen Teillastbereich bei 60 % bis 90 %. Die leistungsunabhängigen Verluste können bei Teillast gesenkt werden, wenn Wandler mit geringerer Leistung eingesetzt werden, weil die Halbleiter und passiven Bauteile entsprechend grösenskaliert werden können und dadurch verlustärmer sind. Um den Teillastwirkungsgrad des Gesamtsystems zu erhöhen, können folglich mehrere Wandler parallelgeschaltet werden, die je nach Lastzustand einzeln zu- bzw. abgeschaltet werden.

Diese Strategie kann nicht nur durch die Parallelisierung von Wählern, sondern auch durch die Schaltungstopologie innerhalb des Wandlers verfolgt werden. Innerhalb des Wandlers können mehrere kleinere Halbleiter und induktive Bauteile parallel zu mehreren Zweigen zusammengeschaltet werden und bei Teillast nur einzelne Zweige betrieben werden. Das hat gegenüber der Parallelisierung von gesamten Wählern den Vorteil, dass nicht alle Bauteile des Wandlers parallelisiert werden müssen.

Der Einsatz von Halbleitern, die in beiden Richtungen Sperrspannung aufnehmen können, ist ein sehr neuer und zukunftsweisender Ansatz, den Wirkungsgrad von Wählern zu erhöhen. Da GaN-Transistoren im Gegensatz zu Si- und SiC-Halbleitern einen horizontalen Halbleiterkanal aufweisen, können sie mit zwei Gates auch bidirektional sperrend aufgebaut werden, ohne andere Eigenschaften wie den Durchlasswiderstand negativ zu beeinflussen. Dadurch entstehen neue Freiheitsgrade in den möglichen Wandlertopologien, die wesentlich geringere Verluste aufweisen.

Das grösste Potenzial zur Verlustreduzierung tritt hierbei bei der Wandlerstufe auf, die an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossen ist. Aufgrund der sich ständig ändernden Eingangsgrößen (Strom und Spannung), die mit einer Frequenz von 50 Hz schwingen, verändern sich auch die Lastbedingungen und somit der Wirkungsgrad über eine Netzperiode ständig. Mit dem Einsatz von bidirektional sperrenden Halbleitern können diese Schwankungen besser ausglichen werden.

Wie diese kurze Darstellung der aktuellen Forschung und Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz der Stromversorgung von Mobilfunkanlagen andeutet, gibt es noch einige Verbesserungspotenziale, die in den kommenden Jahren realisiert werden können und welche in den Szenarien Berücksichtigung finden sollten. Eine genaue Quantifizierung dieser Potenziale ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da viele technische und betriebsdingte Faktoren die realen Wandlungsverluste bestimmen. Für das Referenzjahr 2019 wird der Wirkungsgrad der Stromwandlung in den einzelnen Stufen unter Berücksichtigung der Annahme, dass die Systeme nicht optimal ausgelegt und meist im Teillastbetrieb arbeiten, mit einem Wert von 85 % veranschlagt. Für die Szenarien werden Verbesserungspotenziale angenommen, die 2030 einen durchschnittlichen Wirkungsgrad der Stromwandlungsstufen von 90 % erreichen. Diese Annahme begründet sich neben den oben skizzierten technischen Verbesserungsansätzen auch mit den in der Europäischen Ökodesign-Richtlinie verankerten Mindestanforderungen für Netzteile in Rechenzentren (vgl. Tabelle 24). Auch wenn die Anforderungen dieser Verordnung nur in Teilbereichen den Mobilfunksektor betrifft, geben sie dennoch eine Orientierung für gute Praxiswerte (*Best Practice*).

Tabelle 24: Mindestanforderungen der Europäischen Kommission an die Effizienz von Netzteilen für Server

	Minimum PSU efficiency				100% Minimum power factor
% of rated load	10%	20%	50%	100%	50%
Multi output	-	90%	94%	91%	95%
Single output	90%	94%	96%	91%	95%

Quelle: „Commission Regulation EU 2019/424“ (OJ L 74, 2019, S. 46-66).

3.1.4 Frequenzvergabe

3.1.4.1 Überlegungen der Bundesnetzagentur

Im Kapitel 2.1.1 wurde mit der Tabelle 1 bereits ein Überblick zur Frequenzvergabe bzw. der spezifischen Frequenznutzung der Netzbetreiber gegeben. Ein großer Teil der Frequenzbänder kann von den Netzbetreibern bis über das Jahr 2030 hinaus genutzt werden. Allerdings laufen Ende 2025 die Nutzung der Frequenzen in den Bändern 800 MHz, 2.600 MHz und zum Teil auch 1.800 MHz aus. Darüber hinaus ist die Vergabe neuer cm-Wellen Frequenzen (FR-1) und mm-Wellen-Frequenzen (FR-2) mit Stand September 2021 noch weitgehend unklar. Entsprechend der internationalen Standardisierung liegt derzeit der Fokus auf den Frequenzbereichen 42 GHz und 66 GHz. Es wird auch über die Nutzung der 7 GHz-Frequenzen und 600 MHz-Frequenzen nachgedacht. Die Bundesnetzagentur unterstützt aktiv die zusätzliche Bereitstellung von auch zukünftig ausreichenden Frequenzen (Bundesnetzagentur 2020a).

Konkret werden ab dem 01.01.2026 folgende Frequenzen verfügbar gemacht:

- ▶ Frequenzen im Bereich 800 MHz: Derzeit sind diese Frequenzen im Umfang von 2 x 30 MHz (gepaart) im Bereich 791 MHz – 821 MHz / 832 MHz – 862 MHz zugeteilt.
- ▶ Frequenzen im Bereich 1.800 MHz: Dies betrifft Teilbereiche des Bandes im Umfang von insgesamt 2 x 25 MHz (gepaart) bei 1.710 MHz – 1.725 MHz / 1.805 MHz – 1.820 MHz sowie 1.740 MHz – 1.750 MHz / 1.835 MHz – 1.845 MHz. Weiteres Spektrum im 1.800-MHz-Band ist derzeit bis Ende des Jahres 2033 befristet zugeteilt, so dass in diesem Band unterschiedliche Laufzeiten bestehen.
- ▶ Frequenzen im Bereich 2,6 GHz: Derzeit ist gepaartes Spektrum im Umfang von 2 x 70 MHz (gepaart) im Bereich 2.500 MHz – 2.570 MHz / 2.620 MHz – 2.690 MHz zugeteilt. Darüber hinaus ist derzeit Spektrum im Umfang von 1 x 50 MHz (ungepaart) im Bereich 2.570 MHz – 2.620 MHz (FDD-Mittenlücke) zugeteilt.

Laut dem „Szenarienpapier für Projekt Mobilfunk 2025“ der Bundesnetzagentur (2021c) steht dabei die Verbesserung der Breitbandversorgung im Fokus der Frequenzvergabe, da sie die Voraussetzung für mobiles Arbeiten, Home-Schooling sowie E-Health schaffen.⁶⁴ Konkret geht es um das sehr wichtige Frequenzband 800 MHz, welches aufgrund der guten funktechnischen Wellenausbreitungseigenschaften einen besonderen Wert in der Versorgung ländlicher Gebiete hat. Die BNetzA betont, dass es bei (Zitat) „... der erneuten Bereitstellung von befristet zugeteilten Frequenzen nicht zu Versorgungsunterbrechungen oder gar einer Verschlechterung der Versorgungssituation kommen darf“. Gleichzeitig soll aber ein „nachhaltiger Wettbewerb“

⁶⁴ Alle nachfolgenden Ausführungen zur Frequenzvergabe basieren auf dem Szenarienpapier für Projekt Mobilfunk 2025.

gefördert und eine „Chancengleichheit bei der Frequenzvergabe“ auch für neue Netzbetreiber gewährleistet werden. Die BNetzA zielt bei der künftigen Frequenzvergabe zusammengefasst auf folgende Grundsätze:

- ▶ Bessere Verbindungsqualität und Versorgung in der Fläche für gleichwertige Lebensverhältnisse in Stadt und Land.
- ▶ Unterbrechungsfreie Versorgung entlang der Verkehrswege einschließlich einer Kooperation bei Netzausbau. Insgesamt bewertet die Bundesnetzagentur die Kooperationen dort, wo der Netzausbau an seine wirtschaftlichen Grenzen stößt, positiv.
- ▶ Die Stärkung des Wettbewerbs sowohl auf der Infrastrukturebene als auch auf der Dienstebene beispielsweise durch virtuelle Mobilfunknetzbetreiber.
- ▶ Ein chancengleicher Zugang für neue Wettbewerber, wobei die BNetzA betont, (Zitat) „dass auch dauerhaftes Roaming eine Möglichkeit sein kann, Zugang zu einem flächendeckenden Netz zu erhalten. Damit ist grundsätzlich weder ein Anspruch auf Zuteilung von Flächenfrequenzen noch ein Anspruch auf dauerhaftes Roaming verbunden“.
- ▶ Roaming als Motor für mehr Wettbewerb. Die BNetzA vermerkt hierzu (Zitat): „In Gebieten, in denen der Aufbau mehrerer paralleler Infrastrukturen mit unverhältnismäßig hohen Netzausbaukosten verbunden ist, kann Roaming dazu beitragen, Versorgungslücken in den Mobilfunknetzen zu schließen. Die Bundesnetzagentur steht einem Modell, bei dem ein Mobilfunknetzbetreiber die Versorgung in der Fläche durch nationales Roaming gewährleistet, grundsätzlich offen gegenüber.“.
- ▶ Effiziente Frequenznutzung und Wettbewerb. Die BNetzA geht hier nochmals auf den Aspekt des nationalen Roaming ein (Zitat): „Sofern ein Mobilfunknetzbetreiber über Flächenspektrum verfügt, ist dieses effizient für die Versorgung der Bevölkerung in der Fläche zu nutzen. Die wettbewerblichen Implikationen eines einseitigen dauerhaften nationalen Roamings sind zu prüfen.“

Bei der nächsten Frequenzvergabe im Jahr 2022/23 sollen vor diesem Hintergrund neue Versorgerauflagen geprüft und festgelegt werden. Um die Mobilfunkversorgung in der Fläche vor dem Hintergrund eines relativ knappen Frequenzspektrums zu gewährleisten, hat die BNetzA die folgenden fünf Vergabe-Szenarien erstellt:

- ▶ Szenario 1: Offenes Versteigerungsverfahren für sämtliche Frequenzen, deren Nutzungsrechte Ende 2025 auslaufen. Da nur ein begrenztes Flächenspektrum zur Verfügung steht (2 x 30 MHz), kann es zu einem erhöhten Bieterwettbewerb kommen.
- ▶ Szenario 2: Es werden die bestehenden Nutzungsrechte der drei Netzbetreiber für das 800 MHz-Frequenzband auf Antrag verlängert. Eine Verlängerung fixiert den Status quo und gewährt keinen chancengleichen Zugang zum Flächenspektrum für einen neuen Netzbetreiber.
- ▶ Szenario 3: Ein Betreiber oder Konsortium erhält das gesamte 800 MHz-Spektrum mit der Auflage, dieses bundesweit auf Nachfrage an die Wettbewerber zum Beispiel über Roaming zur Verfügung zu stellen.
- ▶ Szenario 4: Dieses Szenario stellt eine Kombination aus Elementen der Verlängerung und Versteigerung dar. Dabei erhalten bisherige Zuteilungsnehmer im 800 MHz-

Frequenzbereich eine Frequenzreserve von jeweils 5 MHz und die übrigen Frequenzen werden versteigert.

- ▶ Szenario 5: Sämtliche verfügbare Frequenzen werden in einem Ausschreibungsverfahren vergeben. Im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens können die 800-MHz-Frequenzen in drei Frequenzpaketen (jeweils 2 x 10 MHz) zur Verfügung gestellt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für einen flächendeckenden Ausbau eines breitbandigen Mobilfunknetzes von der Bundesnetzagentur auch kollaborative Ansätze bei Netzausbau und Roaming in Betracht gezogen werden. Gleichzeitig wird sehr stark eine Chancengleichheit für alle Wettbewerber und insbesondere auch neuer Netzbetreiber betont.

3.1.4.2 Mobilfunkstrategie der Bundesregierung

Im November 2019 hat die Bundesregierung die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vorgelegte Mobilfunkstrategie beschlossen (2019). Des Weiteren wurde im Juni 2021 die Förderrichtlinie für die Mobilfunkförderung bekanntgegeben (2021).

Die grundlegende Zielstellung der Mobilfunkstrategie und Förderrichtlinie ist die flächendeckende Versorgung der Bevölkerung mit mindestens 4G und der Ausbau des Mobilfunks als eine essenzielle Infrastruktur für Deutschland. Ein Bestandteil der Mobilfunkstrategie ist daher beispielsweise die Prüfung der Gewährleistung einer Notalarmierungsfunktion. Der besondere Fokus liegt auf Gebieten mit geringer Netzabdeckung, um im Katastrophenfall die gesamte Bevölkerung rechtzeitig alarmieren zu können. Ein konkretes Ziel der Mobilfunkstrategie ist die Schaffung von 5.000 neuen Standorten, um für einen lückenlosen Mobilfunkempfang in Deutschland zu sorgen. Das Fördervolumen für diese Maßnahme umfasst dabei 1,1 Milliarden Euro. Zudem möchte das BMVI im Rahmen der Mobilfunkstrategie mehr Transparenz über die tatsächliche Versorgersituation schaffen und den Ausbau überwachen. Die Mobilfunkstrategie beinhaltet zudem die Ermittlung von Beschleunigungspotenzialen bei der Genehmigung neuer Standorte, die gemeinsam mit den Ländern und Kommunen erarbeitet werden sollen. Ebenso sollen Infrastrukturen und geeignete Liegenschaften identifiziert werden, die der Bund zum Aufbau von Masten bereitstellen kann. Zur Koordination und Durchführung dieser Maßnahmen wurde eine bundeseigene Mobilfunkinfrastrukturgesellschaft gegründet (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2019).

Die im Rahmen der Mobilfunkstrategie gegründete staatliche Mobilfunkinfrastrukturgesellschaft (MIG) hat die Aufgabe, die Mobilfunkstrategie der Bundesregierung in der Praxis zu unterstützen. Die MIG organisiert den weiteren Ausbau des Mobilfunknetzes, um Funklöcher zu schließen. Dafür bietet die MIG Beratungs- und Unterstützungsleistungen an und will so aktuelle Ausbauhemmnisse beseitigen. Zudem soll ein einheitliches Geo-Informationsportal (GIS-Portal) eingerichtet und betrieben werden. Diese Plattform soll drei Funktionen erfüllen: Sie soll den Bürgern als Informationsportal, den am Mobilfunkausbau beteiligten Unternehmen beim Netzausbau als Planungsportal und der MIG als Unterstützung zur Identifizierung von geeigneten Fördergebieten dienen. An unwirtschaftlichen Standorten, wo heute die „weißen Flecken“ existieren, soll die MIG eigene Infrastrukturen für Mobilfunkstandorte errichten. Diese Standorte werden dann gegen geringe Nutzungsentgelte von den Mobilfunknetzbetreibern mit aktiver Mobilfunktechnik ausgestattet und eigenwirtschaftlich betrieben.⁶⁵

⁶⁵ Siehe Webseite der Mobilfunkinfrastrukturgesellschaft: <https://netzda-mig.de/>

3.1.5 Prognose des mobilen Datenvolumens

Für die Ausarbeitung von Entwicklungsszenarien werden Annahmen zur zukünftigen Transceiver-Konfiguration der heute bereits existierenden sowie der neu hinzukommenden Antennenstandorte benötigt. Hinweise hierfür kann eine Prognose des durchschnittlichen mobilen Datenvolumens pro Nutzer liefern, da das Mobilfunknetz diesen Bedarf theoretisch abdecken sollte. Um das mobile Datenvolumen abzuschätzen, werden zwei parallele Ansätze verfolgt:

- ▶ Annahme für einen Nutzungstrend: Hierbei wird eine Annahme zum typischen Umfang von mobilen Video-Streaming pro Nutzer und Tag getroffen.
- ▶ Fortschreibung der aktuellen Wachstumsrate: Hierbei wird der aktuelle Trend des durchschnittlichen, pro Nutzer abgerufenen, mobilen Datenvolumens fortgeschrieben.

Die Datenbasis für beide Ansätze liefern die BNetzA-Jahresberichte, welche das mobile Datenvolumen für die Jahre 2014 bis 2020 ausweisen.

3.1.5.1 Annahme für einen Nutzungstrend

Dieser Ansatz korreliert das mobile Datenvolumen für einen definierten Video-Stream (Dauer und Auflösung des Videos) pro Nutzer und Tag, und rechnet dieses auf das Jahr und eine Gesamtnutzerzahl hoch.

Ausgehend von der durchschnittlichen mobilen Datennutzung von 2.757.000 TB (TeraByte) bundesweit im Referenzjahr 2019 und einem monatlichen Datenvolumen von rund 3,2 GB pro Nutzer (Bundesnetzagentur 2021a) ergibt sich rechnerisch eine Nutzerzahl von rund 70,2 Millionen Personen. Da die Nutzerzahl für die Bildung der Szenarien eine notwendige Angabe ist, wird an dieser Stelle kurz die Plausibilität dieser Zahl geprüft. In Tabelle 25 ist die Prognose der demografischen Entwicklung laut des Statistischen Bundesamtes zusammengefasst.

Tabelle 25: Demografische Verteilung 2019-2030

Demografische Gruppe	2019	2022	2026	2030
unter 10 Jahre	7.674.000	7.927.000	7.962.000	7.693.000
zwischen 10 und 80 Jahren	69.862.000	69.502.000	69.695.000	69.251.000
über 80 Jahre	5.646.000	6.137.000	5.949.000	6.111.000
gesamt	83.182.000	83.566.000	83.606.000	83.055.000

Quelle: „Bevölkerungspyramide: Altersstruktur Deutschlands von 1950 – 2060“ (Statistisches Bundesamt o. J.).

Nimmt man an, dass Mobilfunknutzer beinahe das gesamte Bevölkerungsspektrum umfassen, jedoch kaum jünger als zehn oder älter als 80 Jahre alt sind, ergibt sich unter gewissen Annahmen eine Nutzerzahl von etwa 70,2 Millionen Personen. Die Tabelle 26 zeigt diese geschätzten Annahmen für die Anteile der demografischen Gruppen an der Mobilfunknutzung sowie die jeweilige Gesamtzahl der Nutzer für die einzelnen Szenarien.

Tabelle 26: Anzahl Mobilfunknutzer 2019-2030

Mobilfunknutzer	2019	2022	2026	2030
% der unter 10-Jährigen ¹	25%	30%	35%	40%
% der 10-80-Jährigen ¹	95%	96%	97%	98%

Mobilfunknutzer	2019	2022	2026	2030
% der über 80-Jährigen ¹	33%	50%	75%	90%
Mobilfunknutzer	70.150.580	72.168.520	74.852.600	76.443.080

¹Die einen Mobilfunkzugang besitzen (geschätzt).

Da sich die Mobilfunknutzung in den kommenden Jahren voraussichtlich noch etwas intensivieren wird – vor allem bei der älteren Generation, da die meisten Personen, die im Jahre 2030 zu den über 80-Jährigen zählen und bereits heutzutage ein mobiles Endgerät besitzen, dieses auch behalten und weiter nutzen werden – wird die Nutzerzahl insgesamt bis 2030 noch etwas steigen (siehe nochmals Tabelle 26).

Ausgehend von dieser Nutzerzahl und der durchschnittlichen mobilen Datennutzung im Jahr 2019 ergibt sich zunächst ein relativ geringes Datenvolumen. Setzt man den Wert von monatlich 3,2 GB pro Nutzer in Relation zur Dauer eines Videostreams (SD-Auflösung), so würde ein Nutzer pro Tag im Durchschnitt lediglich 0,1 Stunden Videos mobil streamen.

Tabelle 27: Bitraten und Datenvolumen Streaming

Bitraten Streaming	Video SD (720p)	Video HD (1080p)	Video UHD (2160p)	Musik (Standard)	Musik (hohe Qualität)
Bitrate (Bereich) Mbps	1,5 – 4,0	3,0 – 6,0	13,0 – 34,0	0,16	0,32
typische Bitrate (Mbps)	2,0	4,0	25,0	0,16	0,32
Datenvolumen pro Stunde (GB)	0,6 – 1,8	1,3 – 2,6	5,7 – 14,9	0,07	0,14
typisches Datenvolumen pro h (GB)	0,9	1,8	11,2	0,07	0,14

Quelle: Eigene Zusammenstellung Fraunhofer IZM

Bereits im Jahr 2020 hat sich das durchschnittliche monatliche Datenvolumen um 47% von 3,2 GB auf 4,7 GB erhöht. Vor diesem Hintergrund werden folgende Annahmen zur Entwicklung des monatlichen Datenvolumens pro Nutzer getroffen:

- ▶ 2020: 0,2h SD Video/Tag; 70,2 Mio. Nutzer; 4,7 GB/Monat bzw. 57 GB/Jahr
- ▶ 2022: 0,5h SD Video/Tag; 72,2 Mio. Nutzer; 13,7 GB/Monat bzw. 164 GB/Jahr
- ▶ 2026: 1,0h HD Video/Tag; 74,8 Mio. Nutzer; 54,8 GB/Monat bzw. 657 GB/Jahr
- ▶ 2030: 3,0h HD Video/Tag; 76,4 Mio. Nutzer; 164 GB/Monat bzw. 1.971 GB/Jahr

Auf den ersten Blick erscheinen diese Annahmen sehr hoch. Zum Vergleich, Ericsson (2021) prognostiziert für 2026, dass ein global durchschnittlicher Mobilfunknutzer 35 GB pro Monat benötigt. In Skandinavien, im Baltikum, in Nordamerika und Teilen Asiens betrug bereits 2020 das durchschnittliche Datenvolumen zwischen 20 und 40 GB pro Monat (tefficient 2021). Ein weiterer Aspekt sollte bei der Schätzung beachtet werden: Es sollte davon ausgegangen werden, dass der Mobilfunk längerfristig (2030) vermehrt auch zur direkten Breitbandversorgung (Fixed Wireless Access, FWA) sowohl für Haushalte als auch für die Maschinenkommunikation im öffentlichen Raum (z.B. Videoüberwachungssysteme) genutzt werden könnte. Ericsson (2021) schätzt den globalen Anteil des mobilen Datenverkehrs von FWA für das Jahr 2026 auf bereits 25 %.

3.1.5.2 Fortschreibung der aktuellen Wachstumsrate

Der hier dargestellte Trend des durchschnittlichen mobilen Datenvolumens kann auch als Wachstumsfaktor gegenüber dem Referenzjahr 2019 ausgedrückt werden. So ergibt sich für das Jahr 2022 eine Steigerung um den Faktor 5, für 2026 um den Faktor 16 und für 2030 um den Faktor 50. An dieser Stelle kann ein Vergleich mit der aktuellen Wachstumsrate des mobilen Datenverkehrs erfolgen. Die Tabelle 28 liefert eine Prognose der Entwicklung des mobilen Datenvolumens in Deutschland auf Basis realer Werte für die Jahre 2014 bis 2020. Für die Prognose wurde die mittlere Wachstumsrate des mobilen bundesweiten Datenvolumens der vergangenen Jahre mit 47% berechnet. Wird dieser Wert für die kommenden Jahre bis 2030 fortgesetzt, so erhöht sich das Datenvolumen gegenüber dem Referenzjahr 2019 um etwa vergleichbare Faktoren wie in der Berechnung anhand des Nutzungstrends. Die Entwicklung bis zum Jahr 2022 ist den linken drei Spalten und die Entwicklung von 2023 bis 2030 den rechten drei Spalten zu entnehmen. Die Werte für das Referenzjahr und das Stichjahr der Szenarien werden jeweils rot hervorgehoben.

Tabelle 28: Prognose der Entwicklung des mobilen Datenvolumens in Deutschland

Jahr	Abgerufenes Datenvolumen	Wachstumsrate /Faktor	Jahr	Abgerufenes Datenvolumen	Wachstumsrate /Faktor
	[TB/a]	[%]		[TB/a]	[%]
2014	395.000	-	2023	11.877.544	47%
2015	575.000	46%	2024	17.111.936	47%
2016	913.000	59%	2025	24.653.104	47%
2017	1.388.000	52%	2026	35.517.638	47%
2018	1.933.000	39%	2026	44.112.000	16 (1h HD)
2019	2.757.000	43%	2027	51.170.134	47%
2020	3.972.000	44%	2028	73.720.629	47%
2021	5.722.446	47%	2029	106.209.045	47%
2022	8.244.308	47%	2030	153.014.990	47%
2022	13.785.000	5 (0,5h SD)	2030	137.850.000	50 (3h HD)

Quelle: Bundesnetzagentur Jahresberichte (2019, 2020b, 2021a) und eigene Prognose für Wachstumsfaktor (rot) vom Fraunhofer IZM

Die direkte Gegenüberstellung der Annahme zu einer durchschnittlichen Mediennutzung (x Stunden mobiles Video) und der Fortschreibung des aktuellen Entwicklungstrends des monatlichen Datenvolumens der Nutzer deutet auf durchaus vergleichbare Entwicklungen im langfristigen Trend:

- ▶ 2022: Faktor 3 (Wachstumstrend/schwarz) vs. Faktor 5 (Nutzungstrend/rot)
- ▶ 2026: Faktor 13 vs. Faktor 16
- ▶ 2030: Faktor 55 vs. Faktor 50

Die beiden Prognosen vermitteln Größenordnungen einer potenziellen Entwicklung des mobilen Datenvolumens, welche die Mobilfunknetze möglicherweise sicherstellen müssen. Die reale Entwicklung wird allerdings von sehr vielen Faktoren beeinflusst und Prognosen sind daher rein spekulativ. Problematisch ist hierbei der Umstand, dass seitens der Netzbetreiber keine Angaben zur maximalen und durchschnittlichen Auslastung ihrer aktuell existierenden Netzkapazität vorliegen. Was die Prognosen und auch der in den letzten zwei Jahren steigende Netzausbau aber durchaus andeuten, ist die Tatsache, dass zur Abdeckung des wachsenden Bedarfs der Nutzer sicherlich zusätzliche Kapazitäten durch einen forcierten Netzausbau geschaffen werden müssen. Unter Berücksichtigung der dargelegten Prognosen zur Entwicklung des mobilen Datenvolumens erscheint die Annahme gerechtfertigt, dass die Netzkapazität bis 2030 um zumindest einen Faktor 20 bis 30, eher jedoch um einen Faktor 40 bis 50 erhöht werden muss. Netzkapazität bedeutet in diesem Zusammenhang das theoretische Datenvolumen (Dienste wie mobiles Videostreaming und andere Webservices), welches jeder Mobilfunknutzer überall abrufen kann und ihm mit einer angemessenen Datenrate zur Verfügung gestellt wird.

3.1.6 Prognose Standortkonfiguration bis 2030

Um den erhöhten mobilen Datenverkehr flächendeckend sicherzustellen, werden ein breitbandiges Frequenzspektrum und Mobilfunktechnologien mit hohen Durchsatzraten (Bit pro Sekunde) benötigt. Beide Voraussetzungen werden vor dem Hintergrund der laufenden Modernisierung (4G und 5G) und durch die Frequenzvergabepolitik (cm-Welle und mm-Welle) grundlegend sichergestellt. Die Netzbetreiber müssen nun weitere Kapazitäten an existierenden Standorten sowie an neuen Standorten mittels folgender Maßnahmen aufbauen:

- ▶ Aufbau von Antennensystemen für das neue Frequenzspektrum (700 MHz Band und 3.5 – 3.6 GHz Band); diese Maßnahme betrifft auch mm-Wellen Mikrozellen, die punktuell eine sehr hohe Kapazität bereitstellen.
- ▶ Erhöhung der Anzahl von Antennen und Transceivern; diese Maßnahme beinhaltet die Umstellung bestehender cm-Wellen Bänder bis < 3 GHz auf 4x4 und 8x8 MIMO sowie Bänder > 3 GHz auf 16x16, 32x32 und 64x64 Massive MIMO.
- ▶ Erhöhung der Anzahl der Sektoren von bislang typischerweise 3 x 120° auf 6 x 60°; diese Maßnahme erhöht auch die Anzahl der Transceiver.
- ▶ Aufbau zusätzlicher Antennenstandorte; diese Maßnahme reduziert die Zellgrößen, unterstützt die verbesserte Flächenabdeckung und erhöht die Datenkapazität.

Zur Abschätzung des Netzausbau wird zunächst der Trend der aktuellen Entwicklung anhand von Daten der BNetzA-Jahresberichte analysiert. Laut BNetzA stieg die Anzahl der Mobilfunkanlagen von 175.976 im Jahr 2017 auf 224.554 im Jahr 2020. Der Zuwachs war in der Vergangenheit mit rund 4 % pro Jahr vergleichsweise gering, allerdings wurde für 2020 ein deutlicher Zuwachs um 18 % verzeichnet. Pressemitteilungen der Netzbetreiber unterstützen die Anzeichen eines beginnenden forcierten Netzausbau. Gründe für den aktuell verstärkten Netzausbau sind die Nutzbarmachung (Einführung) des neuen 5G Frequenzspektrums (700 MHz und 3.5/3.6 GHz) und die Umstellung der Mobilfunkanlagen von 3G (UMTS) auf 4G/5G Systemtechnik. Legt man die Entwicklung der vergangenen vier Jahre zu Grunde, ergibt sich eine durchschnittliche Wachstumsrate von 8 %. Die Tabelle 29 wird auf Basis einer 8 %-igen Wachstumsrate die Anzahl an Mobilfunkanlagen bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Gegenüber dem Referenzjahr 2019 wird unter dieser Annahme die Anzahl um einen Faktor 2,75 zunehmen. Die Tabelle 29 zeigt in den rechten Spalten eine Berechnung der durchschnittlichen Transceiver-Anzahl. Diese Berechnung basiert auf den Bestandszahlen des Referenzmodells (vgl. Kap.2.2),

welches wiederum auf der Auswertung der Standortdatenbank der Bundesnetzagentur basiert. Es wird hierbei die durchschnittliche Antennenkonfiguration der einzelnen Frequenzbänder berücksichtigt. Dementsprechend wird auch die durchschnittliche Anzahl an Transceivern pro Antennenstandort (TRX/AS) von 14 TRX/AS im Referenzjahr 2019 auf 27 TRX/AS im Jahr 2030 stark zunehmen.

Tabelle 29: Entwicklung der Anzahl von Mobilfunkanlagen und Transceiver (berechnet)

Jahr	Anzahl Mobilfunkanlagen	Wachstumsrate	Anzahl Transceiver (berechnet)	Anzahl Transceiver pro Antennenstandort (gerundet)
2017	175.976	-	1.055.856	
2018	181.640	3%	1.089.840	
2019	190.595	5%	1.143.570	14
2020	224.554	18%	1.347.324	
2021	242.554	8%	1.455.110	
2022	261.920	8%	1.571.519	17
2023	282.873	8%	1.697.240	
2024	305.503	8%	1.833.019	
2025	329.943	8%	1.979.661	
2026	356.339	8%	2.138.034	22
2027	384.846	8%	2.309.077	
2028	415.634	8%	2.493.803	
2029	448.884	8%	2.693.307	
2030	484.795	8%	2.908.771	27

Quelle: Bundesnetzagentur Jahresberichte (2019, 2020b, 2021a) und eigene Prognose vom Fraunhofer IZM

Die Zunahme der Transceiver korreliert wiederum mit dem prognostizierten Wachstum der benötigten mobilen Datenkapazität. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus der Art und Anzahl der Transceiver. Die Art des Transceivers wird definiert vom Frequenzband, d.h. insbesondere der Bandbreite und möglichen MIMO-Konfiguration. Des Weiteren wird dem Transceiver ein konkreter Mobilfunkstandard zugeordnet, der wiederum das Modulationsverfahren und andere technische Aspekte beinhaltet, die sich auf die theoretische Datenrate auswirken. Ein wesentlicher Aspekt ist zudem die Anzahl der einzelnen Frequenzbänder und entsprechenden Transceiver in den Antennenstandortkategorien.

Die Tabelle 30 zeigt die getroffenen Annahmen zur durchschnittlichen Transceiver-Konfiguration der sechs AS-Kategorien der Makrozellen.⁶⁶ Zum Vergleich der Ausgangslage im Referenzjahr 2019 dient die Tabelle 7 in Kapitel 2.1.4.

⁶⁶ Die Mikrozellen werden in Kap. 3.3 separat behandelt.

Tabelle 30: Durchschnittliche Transceiver-Konfiguration für das Jahr 2030

TRX [#] (2030)						
Trägerfrequenz [MHz]	ASK 1 [#]	ASK 2 [#]	ASK 3 [#]	ASK 4 [#]	ASK 5 [#]	ASK 6 [#]
700	6,00	5,00	4,00	2,00	1,00	1,00
800	4,50	4,50	3,50	3,00	2,50	2,50
900	4,50	4,50	3,50	3,50	2,50	2,50
1500	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
1800	4,00	4,00	4,50	4,50	5,00	5,00
2100	3,50	3,50	4,08	4,67	5,25	5,83
2600	1,00	1,50	3,00	4,50	5,00	5,00
3500	1,17	2,33	3,50	5,25	7,00	7,00
Summe:	26,17	26,83	27,58	28,92	29,75	30,33
jährliche Wachstumsrate:	7%	7%	7%	6%	6%	5%

Der Blick auf die angenommene Transceiver-Konfiguration im Jahr 2030 zeigt einen massiven Ausbau der Antennenstandorte mit neuen Mobilfunkanlagen. Dieser Trend wird durch die Angaben in Whitepaper der Netzausrüster bestätigt. Huawei (2019) geht künftig beispielsweise von 8 bis 10 genutzten Frequenzbändern mit entsprechend vielen Transceivern und einer Leistungsaufnahme von rund 10 kW pro Antennenstandort aus.

Natürlich könnte sich auch die Anzahl der Antennenstandorte deutlich erhöhen, allerdings sind die Kosten für die Anmietung bzw. den Erwerb neuer Standorte sehr hoch, sodass ein solches Ausbauszenario weniger realistisch erscheint. Daher wird für in der vorliegenden Modellierung nur von einem moderaten Zuwachs an Antennenstandorten von bundesweit lediglich 3.000 pro Jahr ausgegangen. So erhöht sich die Standortzahl im Modell von rund 81.000 im Referenzjahr 2019 auf 108.000 AS im Jahr 2030. Neue Mikrozellen-Standorte finden hierbei noch keine Berücksichtigung.

Die Tabelle 31 fasst die grundlegenden Annahmen für das Netzausbauzenario 2030 zusammen. Zum Vergleich wird die Tabelle 4 mit den Basisdaten des Referenzjahres 2019 herangezogen. Wichtig ist, die Zunahme der Antennenstandorte wahrzunehmen. Daraus resultiert der Effekt einer Verkleinerung der durchschnittlichen Zellgröße bzw. auch einer Abnahme der Nutzerzahl pro Funkzelle. Dies führt im Berechnungsmodell automatisch zur Reduzierung der durchschnittlichen Sendeleistung in Relation.

Tabelle 31: Basisdaten des Funkzellenverteilungsmodells für Szenario 2030

Standortkategorie	Einheiten	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6
Standortcharakterisierung		ländlich	ländlich	vorstädtisch	vorstädtisch	städtisch	städtisch

Standortkategorie	Einheiten	ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6
Zellart		Makro	Makro	Makro	Makro	Makro	Makro
min. Bevölkerungsdichte	Einwohner /km ² (>=)	0	150	300	750	1.200	2.700
max. Bevölkerungsdichte	Einwohner/ km ² (<)	150	300	750	1.200	2.700	20.000
Bevölkerungsanteil	Einwohner	15.798.542	13.219.248	17.117.836	10.157.649	17.963.494	8.762.444
Bevölkerungsanteil	%	19,03%	15,92%	20,62%	12,24%	21,64%	10,55%
Nutzer pro Provider	U	4.440.329	3.715.394	4.811.129	2.854.903	5.048.810	2.462.768
Flächenanteil	km ²	233.428	63.568	37.457	10.696	9.976	2.457
Flächenanteil	%	65,28%	17,78%	10,47%	2,99%	2,79%	0,69%
Zellen (120°)	C	20.552	17.197	22.269	13.214	23.369	11.399
Nutzer pro Zelle	U/C	216	216	216	216	216	216
Antennenstandorte	AS	6.851	5.732	7.423	4.405	7.790	3.800
Nutzer pro Antennenstandort	U/AS	648	648	648	648	648	648
Zellgröße	km	4,18	2,39	1,61	1,12	0,81	0,58

Die soeben dargestellten Trends und Annahmen bilden die Grundlage der im Anschluss folgenden Vorstellung der Entwicklungsszenarien.

3.1.7 Szenarien im Überblick

Die folgenden Szenarien betrachten jeweils die Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs der bundesweiten Mobilfunknetze im Zeitraum von 2019 bis 2030. In der Binnengliederung beinhalten die Prognosen auch Berechnungswerte für die Jahre 2022 und 2026. Insgesamt werden fünf Szenarien für Makrozellen und eines für Mikrozellen berechnet:

- ▶ Szenario 1: Basisszenario für den Netzausbau von Makrozellen (cm-Welle)
- ▶ Szenario 2: Szenario 1 mit beschleunigter Technikmodernisierung (Technikaustausch alle drei Jahre anstatt alle sieben Jahre)
- ▶ Szenario 3: Szenario 1 mit bundesweitem Roaming (theoretische Verkleinerung der Funkzellenfläche)
- ▶ Szenario 4: Szenario 1 mit konsequenter Energiemanagement (Abschaltung einzelner Trägerfrequenzen in Zeiten niedriger Auslastung)
- ▶ Szenario 5: Kombination der Szenarien 2, 3 und 4
- ▶ Szenario 6: Szenario für eine definierte Flächenabdeckung mit Mikrozellen (mm-Welle)

Da der Netzausbau von mm-Wellen-basierten Mikrozellen zum jetzigen Zeitpunkt (Ende 2021) sehr spekulativ ist, wurde die Entscheidung getroffen, im Basisszenario nur die cm-Wellen-basierten Makrozellen (700 MHz bis 3.600 MHz) zu erfassen und die neuartigen Mikrozellen (26 GHz bis 28 GHz) in einem exemplarischen Flächenbezugsszenario abzubilden.

Das Basisszenario hat die Zielstellung, den Netzausbau entsprechend den soeben dargestellten Randbedingungen (Marktsituation, Frequenzvergabe, Techniktrends) zu modellieren und dabei insbesondere die ökonomischen Aspekte wie Kosten für neue Standorte und modernste Anlagentechnik zu berücksichtigen. Gleichzeitig wird aber doch von einer substantiellen Erhöhung der Netzkapazität um den Faktor 45 ausgegangen (berechneter Wert anhand der Annahmen zur Antennenstandortkonfiguration), um zu zeigen, wie ein performantes Mobilfunknetz ausgestattet sein müsste. Im Basisszenario werden Marktentwicklungen wie beispielsweise der Rückbau von 3G (UMTS) berücksichtigt und der Markteintritt von United Internet (1&1 Drillisch) anteilig in das Modell eines generischen deutschen Netzbetreibers mit eingerechnet.

Das zweite Szenario (beschleunigte Technikmodernisierung) basiert in allen Grundnahmen auf dem Basisszenario und soll aber demonstrieren, welches Energieeinsparpotenzial modernste Hardware (Mikroelektronik) bei gleicher Netzkonfiguration hat. So wird eine beschleunigte Technikmodernisierung angenommenen, die auf der Annahme beruht, dass sich die Energieeffizienz der digitalen Halbleiterkomponenten alle drei Jahre durchschnittlich um 15 % verbessert und diese verbesserten Komponenten sukzessive zur Anwendung gebracht werden. Somit wird von einem konsequenten Technikaustausch alle drei Jahre anstatt alle sieben Jahre ausgegangen. Des Weiteren wird eine beschleunigte Implementierung modernster Stromwandlungstechnik mit immer besseren Wirkungsgraden angenommen. Das Szenario ist idealtypisch und damit nicht völlig realistisch, gibt aber eine gute Vorstellung darüber, welchen Hebel die modernste Halbleitertechnik hinsichtlich der Reduktion des Energiebedarfs hat.

Das dritte Szenario (bundesweites Roaming) basiert ebenfalls auf den Annahmen zum Netzausbau wie im Basisszenario, allerdings mit dem Unterschied, dass nicht von drei bundesweit flächendeckenden Einzelnetzen ausgegangen wird, sondern die Standorte aller drei generischen Einzelnetze gleichmäßig auf die Fläche Deutschlands verteilt werden. Der Effekt, der hiermit erzielt wird, ist eine theoretische Verkleinerung aller Funkzellen und damit prinzipiell eine Reduktion der Sendeleistung aller Funkmodule. In der Realität existiert allerdings keine solche Gleichverteilung und idealtypische Überlappung. Mit diesem Vorgehen (Szenario) wird ein kooperierendes Verhalten aller Netzbetreiber – ein bundesweit mögliches Roaming – simuliert. Jeder Nutzer kann theoretisch auf jeden Antennenstandort zugreifen, unabhängig vom jeweiligen Betreiber. Die insgesamt zur Verfügung stehende Netzkapazität könnte etwas besser ausgenutzt werden. Das Roaming kann zur Lastverteilung (*Load Balancing*) genutzt werden. Eine Reduktion der Antennenstandorte resultiert daraus aber nicht automatisch, da nicht von einer Überkapazität der existierenden drei Netze ausgegangen wird. Die energie- und ressourcensparenden Effekte eines bundesweiten Roamings kann das Szenario nur skizzieren, da die realen Effekte von der konkreten Verortung, Konfiguration und Auslastung eines jeden einzelnen Antennenstandortes abhängt.

Das vierte Szenario (konsequentes Energiemanagement) simuliert einen stärker lastadaptiven Betrieb der Mobilfunknetze durch Abschaltung von ausgewählten Transceivern in den Zeitintervallen mit niedriger Auslastung (Low Load).

Das fünfte Szenario (kombiniertes Szenario) soll das Zusammenwirken der beschleunigten Technikverbesserung, des bundesweiten Roamings und des konsequenten

Energiemanagements untersuchen. Damit soll das unter den vordefinierten Bedingungen größtmögliche Potenzial einer Energieoptimierung abgeschätzt werden.

Das sechste Szenario beleuchtet die neue Millimeterwellentechnik und wird aus mehreren Gründen getrennt dargestellt. Zwei grundsätzliche Herausforderungen ergeben sich: Erstens ist es noch unklar, welche genauen technischen Leistungsmerkmale die neuen, aktiven Antennensysteme aufweisen und wie sie konfiguriert sein werden. Die Technik ist derzeit noch in der Entwicklung. Zweitens ist es derzeit noch unklar, für welchen genauen Zweck und in welchem Umfang die neuen Systeme eingesetzt werden. Daher werden im Szenario 6 zur Illustration von Größenordnungen zwei flächenbezogene Einsatzszenarien berechnet. Ein Einsatzszenario beschreibt den Outdoor-Einsatz als Verdichtungszelle im urbanen Raum. Hierbei wird von einer Abdeckung von 1 % der Fläche Deutschlands ausgegangen. Zum Vergleich, Siedlungsflächen betragen etwa 11 % (davon Großstädte etwa 3 %) und Verkehrsflächen etwa 3 % der Grundfläche (vgl. Tabelle 2).

Das zweite Millimeterwellen-Einsatzszenario demonstriert einen Indoor-Einsatz, beispielsweise in der industriellen Fertigung und Logistik. In diesem Beispiel wird von 0,1 % der Fläche Deutschlands ausgegangen. Beide Szenarien dienen einer ersten Abschätzung von Größenordnungen des Energie- und Ressourcenbedarfs von Millimeterwellensystemen.

Mit dem UTAMO-Modell lassen sich durch gezielte Anpassung der Parameter auch viele andere Szenarien berechnen, sofern entsprechende Daten für die Abbildung realistischer oder auch experimenteller, rein informativer Modellierungen zugrunde liegen.

3.2 Szenarien für Makrozellen (cm-Welle)

Im Folgenden werden die in 3.1.7 beschriebenen Randbedingungen der fünf Szenarien für die Entwicklung der cm-Wellen-Makrozellen jeweils in Modellparameter übersetzt und in tabellarischer Form aufgeführt. Diese Parameter wurden für das entsprechende Szenario im UTAMO-Modell eingestellt, um damit Größen wie den Energiebedarf, die Datenrate sowie die Material- und CO2-Bilanz zu berechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in den folgenden Abschnitten ausgewertet und in Diagrammen dargestellt.

Das UTAMO-Modell erlaubt eine detaillierte Auswertung des Einflusses sämtlicher untersuchter Netzbereiche und Komponenten hinsichtlich der oben genannten Größen. Im Sinne einer verständlicheren und übersichtlicheren Darstellung werden in diesem Bericht jedoch nur jene ausgewählten und aggregierten Ergebnisse dargelegt, welche einen dem Ziel der Studie entsprechenden Erkenntnisgewinn liefern. So wird der Fokus auf die Netzbereiche und Komponenten mit einem hohen Einfluss auf die Gesamtumweltwirkung gelegt. Diese werden demnach detaillierter ausgewertet, um den Grund für diesen hohen Einfluss zu identifizieren. Umgekehrt bedeutet dies, dass Netzelemente mit einer geringen Umweltwirkung in der Auswertung eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Auswertung der CO2-Bilanz wird in die Herstellungs- und Nutzungsphase unterteilt, wobei Letztere mit dem Energiebedarf skaliert und für zwei unterschiedliche Strommixe ausgewiesen wird (Referenzszenario und Klimaschutzszenario des UBA, siehe 1.3.6).

Die Zeitabschnitte 2022 (short-term) und 2026 (mid-term) bilden eine relativ lineare Hinführung zur Prognose für das Jahr 2030 (long-term) und werden deshalb in einigen Darstellungen übersprungen, um den Vergleich zwischen dem Referenzszenario 2019 und dem Endpunkt der betrachteten Entwicklung übersichtlicher zu veranschaulichen.

Allgemeine Erkenntnisse, Trends und Hotspots werden am Beispiel des Basisszenarios in 3.2.1 ausführlich ausgewertet. Für die anderen Szenarien werden nur nennenswerte Abweichungen zum Basisszenario und deren Gründe beschrieben, um Wiederholungen zu vermeiden.

Detailliertere Abbildungen mit Teilergebnissen der anderen Szenarien finden sich in A.11.

Die Prognose der theoretischen Datenrate ist für alle Szenarien identisch. Gleches gilt für die CO2-Bilanz der Komponentenherstellung, hier allerdings mit Ausnahme der Szenarien „beschleunigte Technikmodernisierung“ und „kombiniertes Szenario“.

Alle Ergebnisse gelten für den Bezugsraum Deutschland und bilden die Summe aller Netzbetreiber ab.

3.2.1 Szenario 1: Basisszenario für den Netzausbau von Makrozellen

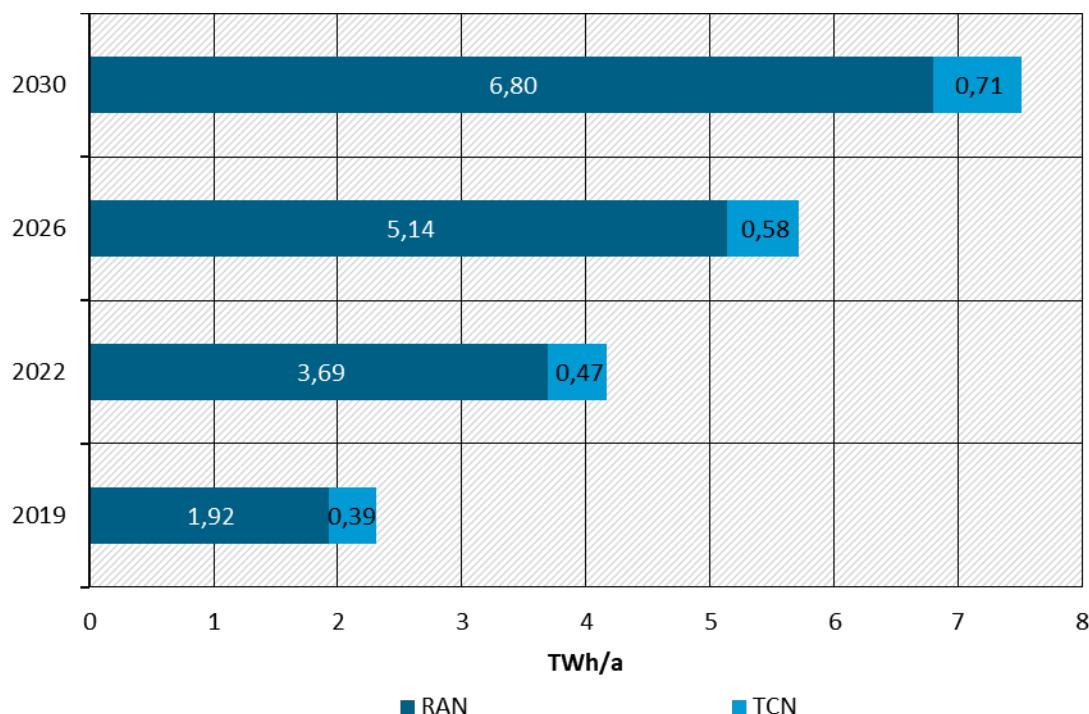
In der nachfolgenden Tabelle 32 sind die grundlegenden Annahmen beziehungsweise Modellparameter für das Basisszenario entsprechend der in 3.1 erläuterten Annahmen aufgeführt:

Tabelle 32: Annahmen zum Szenario 1 (Basisszenario)

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Modernisierung	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 4G, 5G (3G → 4G/5G)	2G, 4G, 5G (4G → 5G)
Netzverdichtung (Standorte)	gesamt: 81.000 AS	gesamt: 90.000 AS	gesamt: 99.000 AS	gesamt: 108.000 AS
Netzverdichtung (Transceiver)	ASK 1-3: 12 TRX ASK 4-6: 15 TRX	ASK 1-3: 16,5 TRX ASK 4-6: 19 TRX	ASK 1-3: 20 TRX ASK 4-6: 22,5 TRX	ASK 1-3: 23,5 TRX ASK 4-6: 25,5 TRX
Nutzungsprofil	Low-load: 6h Medium-load: 8h High-load: 10h			
Technik- modernisierung	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)
bundesweites Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming
Abschalten von Transceivern	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten
TCN	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring

Die untenstehende Abbildung 40 zeigt die Prognose des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Makrozellen in Deutschland von 2019 bis 2030 im Basisszenario. Dies umfasst die vollständige Infrastruktur von RAN und TCN aller Betreiber, die für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung mithilfe von Makrozellen notwendig ist.

Abbildung 40: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Basiszenario 2019-2030)



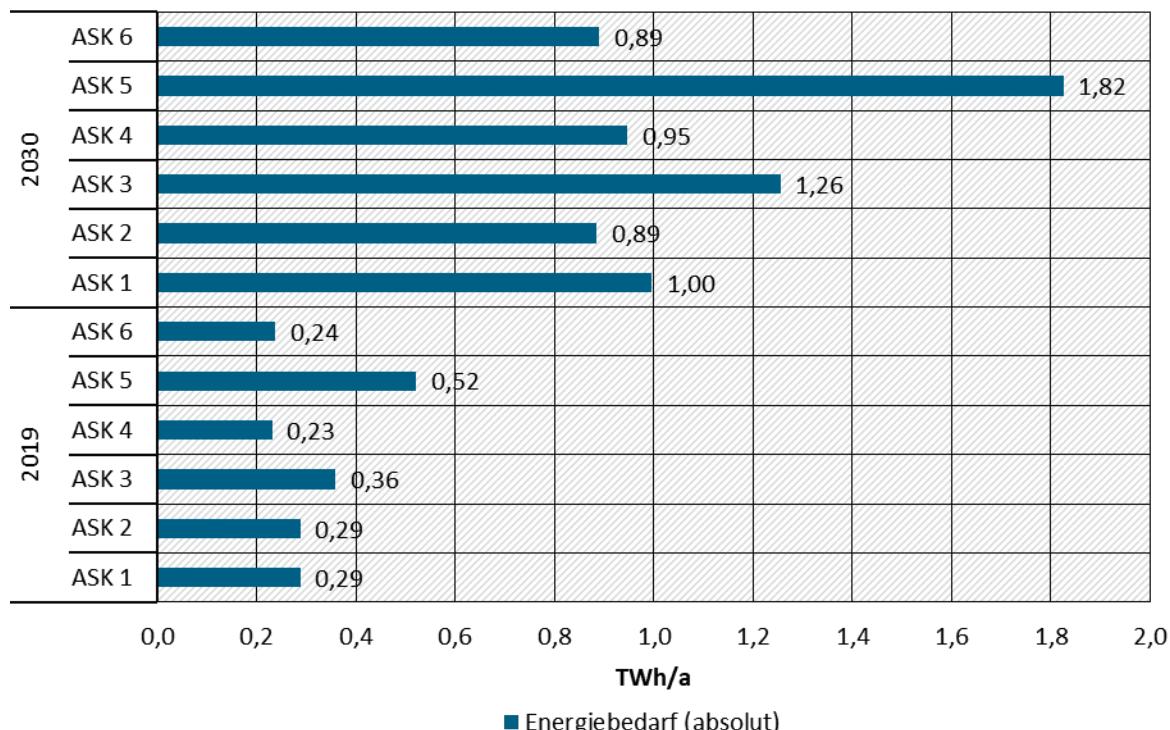
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der elektrische Energiebedarf der gesamten Mobilfunknetze in Deutschland wird demnach von 2,31 TWh im Jahr 2019 auf 7,51 TWh im Jahr 2030 ansteigen. Der modellierte Energiebedarf der Mobilfunknutzung für das Referenzjahr 2019 deckt sich ungefähr mit publizierten Angaben der drei Netzbetreiber, sodass das Modell als valide beurteilt werden kann. Der Anstieg des jährlichen Energiebedarfs um 325 % ist substanziel. Dieser Wert spiegelt aber auch die gestiegene relative Energieeffizienz wider, da sich mit dieser Verdreifachung des Energiebedarfs im gleichen Zuge die Netzkapazität theoretisch um einen Faktor 45 vervielfacht hat.

Der im Basiszenario errechnete Gesamtenergiebedarf von 2,31 TWh im Jahr 2019 deckt sich ungefähr mit den Angaben der Netzbetreiber hinsichtlich des elektrischen Energiebedarfs in den letzten Jahren. Vodafone Deutschland bilanzierte im Geschäftsjahr 2017/18 einen Strombedarf von insgesamt 1.039 GWh. Das Mobilfunknetz hat hiervon etwa einen Anteil von 65 %. Damit berechnet sich ein Energiebedarf von 675 GWh (Lefèvre 2019). Die Deutsche Telekom bilanzierte für Deutschland im Jahr 2019 einen Strombedarf von insgesamt 2.656 GWh (Telekom 2020). Es erfolgt jedoch keine Ausweisung der einzelnen Netze oder Technikbereiche. Unter der groben Annahme, dass die Mobilfunknetze einen Anteil von 33 % haben, berechnet sich ein Bedarf von 885 GWh. Telefónica Deutschland bilanziert für das Jahr 2019 einen Strombedarf von 668 GWh für ihre Netze und Rechenzentren (Telefónica 2021a). In der Summe ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf von 2,23 TWh/a für alle drei Betreiber, was einer Abweichung von unter 4 % gegenüber dem im Modell errechneten Wert von 2,31 TWh/a entspricht. Vor dem Hintergrund der Verwendung eines multivariablen bottom-up-Ansatzes des Modells mit zahlreichen Einflussfaktoren ist diese Abweichung sehr gering. Die iterative Kalibrierung und letztendliche Validierung des UTAMO-Modells für das Referenzjahr 2019 mit Realdaten wird demnach als erfolgreich eingestuft. Zudem wurde dieses Ergebnis von

Vertretern der jeweiligen Betreiber in den durchgeführten Workshops und Fachgesprächen als realistisch bestätigt.

Abbildung 41: Prognose des absoluten jährlichen elektrischen Energiebedarfs in Abh. der Standortkategorie (Basiszenario 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

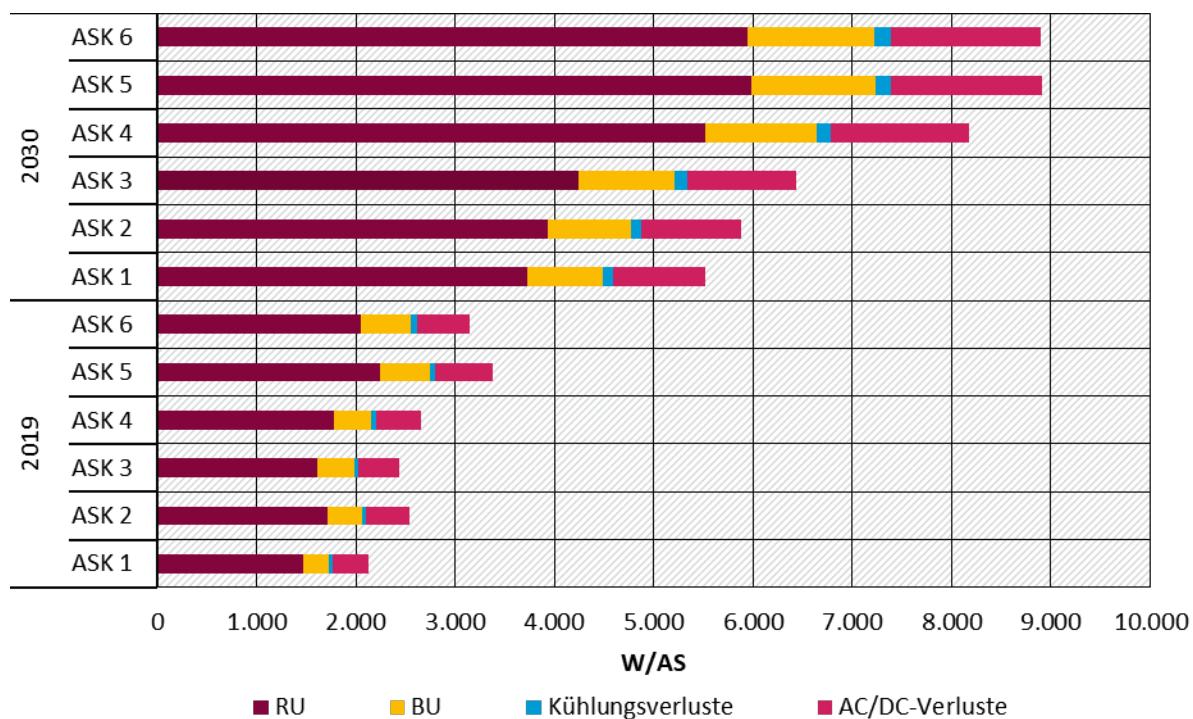
Der Abbildung 41 ist zu entnehmen, wie sich der Anstieg des Energiebedarfs auf die Standortkategorien aufteilt. Sie zeigt, dass die Antennenstandortkategorie 5 sowohl 2019 als auch 2030 am stärksten zum Gesamtenergiebedarf beiträgt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass dort mit fast 22 % der Nutzer die meisten Personen versorgt werden. Zum Vergleich werden durch die ASK 6 weniger als 11 % der Nutzer abgedeckt. Durch die hohe Nutzerdichte und die relativ kleinen Funkzellen auf der einen Seite und der im Vergleich großen Flächenabdeckung von 2,8 % (ASK 6: 0,7 %) auf der anderen Seite ergibt sich für die ASK 5 die höchste Gesamtanzahl an Standorten, was den hohen Energiebedarf erklärt. Die vollständigen Angaben zur Flächen- und Nutzerabdeckung der einzelnen Antennenstandortkategorien können Tabelle 4 entnommen werden.

Wie Abbildung 40 zeigt, entfällt der größte Anteil des Gesamtenergiebedarfs auf das Funkzugangsnetz, mit 83,3 % im Jahr 2019 und 90,5 % im Jahr 2030. Der Betrieb der Funkmodule, welche die Leistungsverstärker und Analog-Digital-Wandler beinhalten, haben mit über 60 % den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf. Insbesondere die Leistungsverstärker erzeugen starke energetische Verluste, die bei höheren Frequenzen noch steigen. Konventionelle Leistungsverstärker sind zudem auf feste Arbeitspunkte optimiert und kaum lastadaptiv. Ein weiterer Aspekt trägt zum steigenden Energiebedarf bei: Größere durchgängige Kanalbandbreiten (3,5 GHz-Band), eine Vervielfachung der Antennenpfade (Massive MIMO), neue Modulationsverfahren (z.B. 256 QAM) und andere 5G-Technologien tragen maßgeblich zu

den höheren Datenraten bei. Mit den höheren Datenraten steigt aber auch der Rechenaufwand der Analog-Digital-Wandlung und insbesondere die digitale Signalverarbeitung im Basisbandmodul. Dieser wachsende Rechenaufwand hat Auswirkungen auf den Energiebedarf. Er wird nur teilweise durch neue Rechnerarchitekturen und die noch anhaltende Hardware-Miniaturisierung kompensiert. Gerade längerfristig könnte sich die kompensierende Wirkung des sogenannten Mooreschen Gesetzes deutlich verlangsamen, sodass mehr parallele Hardwarestrukturen geschaffen werden müssen, um den Rechenbedarf zu decken. Damit nimmt aber der Energie- und Ressourcenbedarf anteilig zu.

Neben den Funkmodulen (RU) tragen auch die Basisbandmodule (BU) und die Wandlungsverluste der AC/DC-Netzteile einen nicht zu vernachlässigenden Anteil zum Gesamtenergiebedarf bei. Der Kühlungsaufwand spielt hingegen eine untergeordnete Rolle, wie die folgende Abbildung 42 als Darstellung der Leistungsaufnahme einzelner Komponenten eines einzelnen Antennenstandortes je nach Antennenstandortkategorie zeigt. Hierbei wird die jeweilige Anzahl an Komponenten pro Standort berücksichtigt, aber nicht die Gesamtanzahl der Standorte.

Abbildung 42: Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Basiszenario 2019 und 2030)



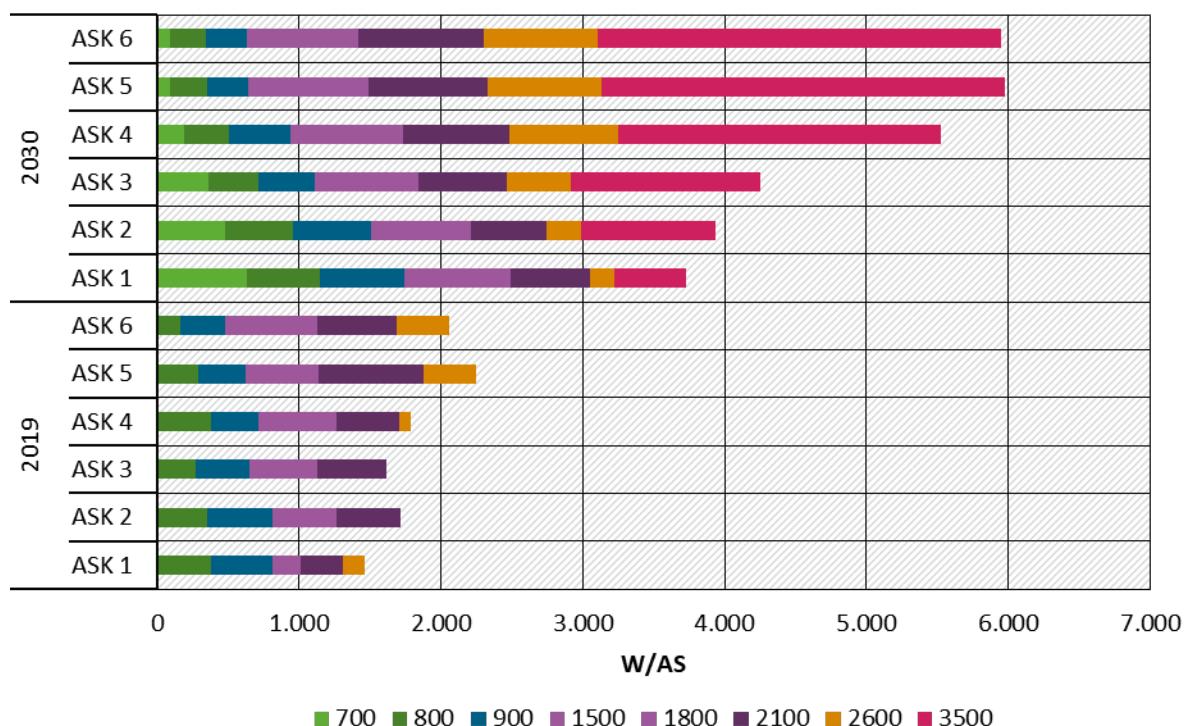
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Trotz der absoluten Zunahme der Leistungsaufnahme bleibt die prozentuale Verteilung der einzelnen Komponenten über die Jahre weitgehend gleich, was nicht zuletzt dem Umstand geschuldet ist, dass die Kühlungs- und Stromwandlungsverluste im Modell als prozentuale Anteile berechnet werden. Das von der BU zu verarbeitende Datenvolumen nimmt zwar stark zu, allerdings wird dies durch die angenommene erhöhte Computing-Effizienz der neuen Hardware-Generationen kompensiert.

Zudem ist zu erkennen, dass der Energiebedarf der Standorte mit dem Grad der Urbanisierung zunimmt (von ASK 1 im ländlichen Bereich bis ASK 6 als dicht besiedelte Innenstadt) und die Antennenstandortkategorien 5 und 6 unabhängig vom betrachteten Zeitfenster den höchsten

Energiebedarf aufweisen, was durch die größere Anzahl und die vergleichsweise höhere Sendeleistung der höherfrequenten Antennenmodule begründet ist (siehe Abbildung 42).

Abbildung 43: Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Basisszenario 2019 und 2030)



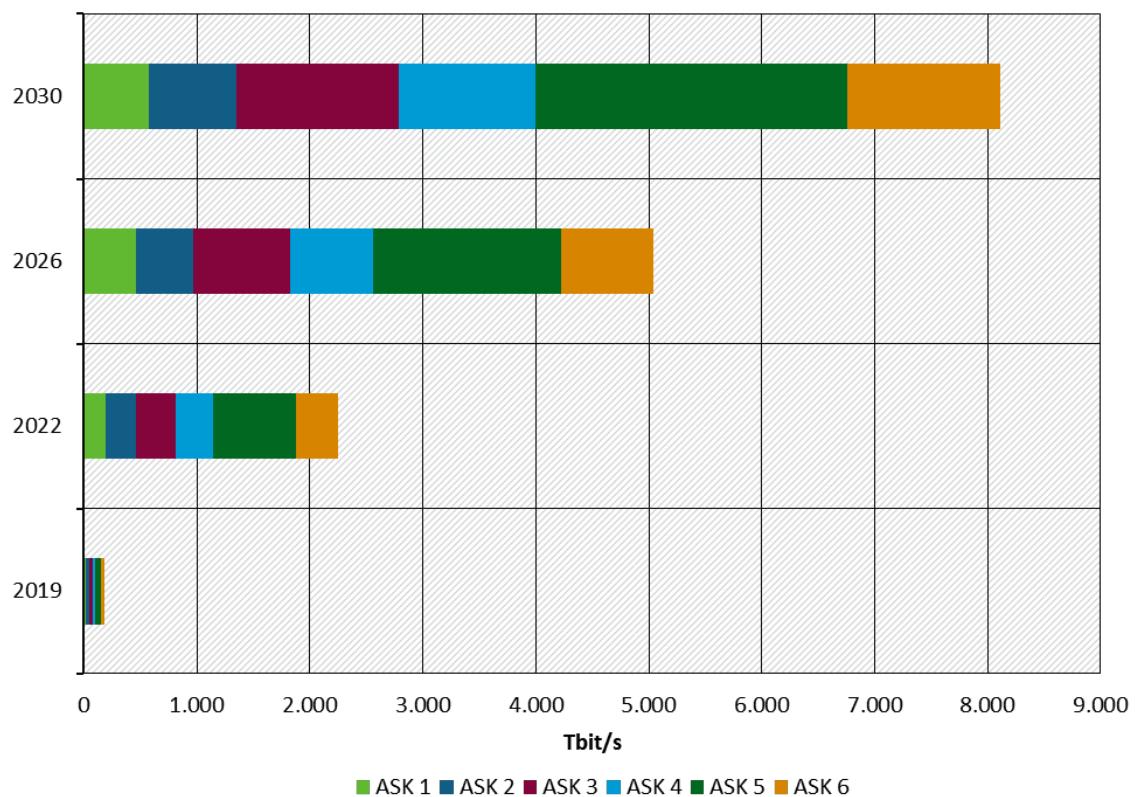
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die elektrische Leistungsaufnahme pro Standort steigt in ASK 1 von 1.467 auf 3.731 W/AS (254 % Zunahme) und in ASK 5 von 2.246 auf 5.978 W/AS (266 % Zunahme).

Der generelle Anstieg der Leistungsaufnahme ist mit der zunehmenden Bestückung der Antennenstandorte begründet. Insbesondere die 2.600 MHz und die neuen 700 und 3.500 MHz-Frequenzbänder tragen einen großen Anteil daran. Die hohe benötigte Sendeleistung der 3.500 MHz-Anlagen im urbanen Raum ergibt sich aus dem Zusammenspiel der physikalisch bedingten stärkeren Dämpfung höherfrequenter Signale und der zusätzlichen Umgebungsdämpfung durch die dichte Bebauung.

Dem höheren Energiebedarf steht allerdings auch eine überproportional höhere Datenrate gegenüber. Gleiches gilt auch insgesamt für die Entwicklung von 2019 bis 2030: Der funktionale Nutzen des Mobilfunknetzes in Form der übertragenen Datenmenge steigt deutlich stärker als der dafür benötigte Energiebedarf. Die folgende Abbildung 44 illustriert die Zunahme der theoretisch erreichbaren Datenrate deutlich.

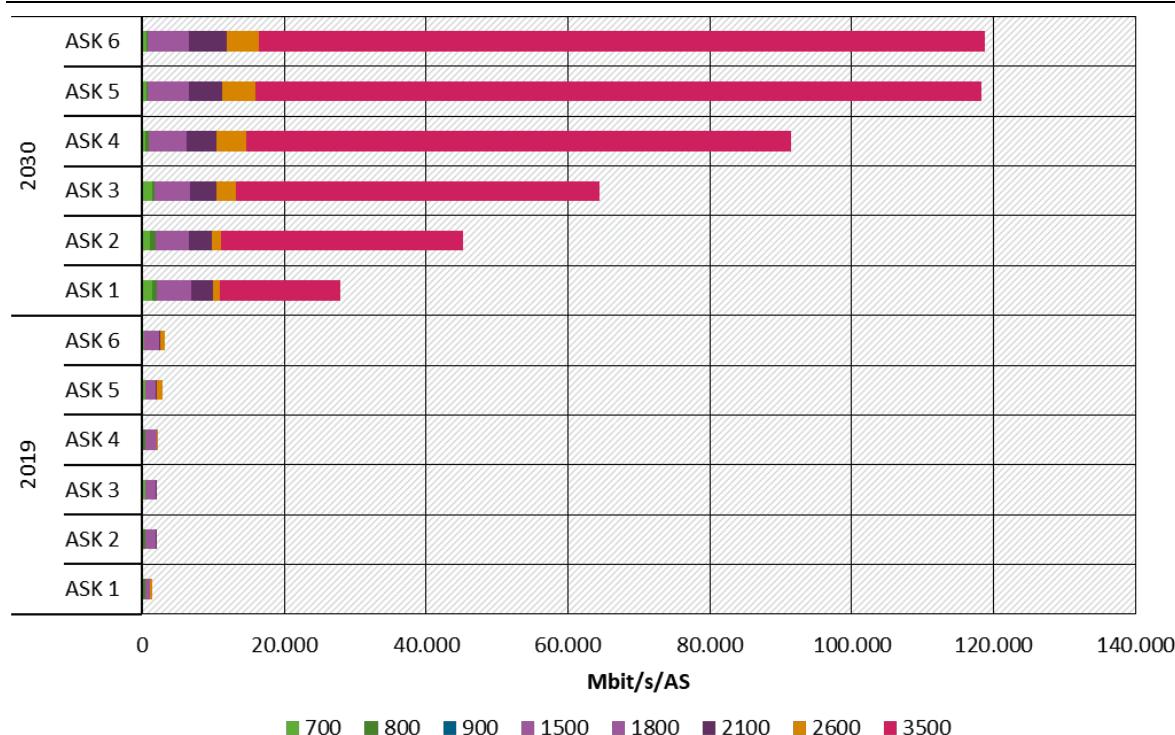
**Abbildung 44: Prognose der theoretischen Datenrate von Makrozellen in Deutschland
(Basiszenario 2019-2030)**



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die durch die Makrozellen für ganz Deutschland bereitgestellte theoretische Datenrate wird im Jahr 2030 voraussichtlich 45-mal höher sein als im Jahr 2019 (8.113 Tbit/s gegenüber 179 Tbit/s; siehe Abbildung 44). Den größten Beitrag dazu leistet die Antennenstandortkategorie 5 aufgrund ihrer vergleichsweise großen Anzahl an Standorten und hochfrequenten Antennenmodulen pro Standort.

Abbildung 45: Theoretische Datenrate der Funkmodule eines Standortes in Abhängigkeit der Frequenz und Standortkategorie (Basisszenario 2019 und 2030)



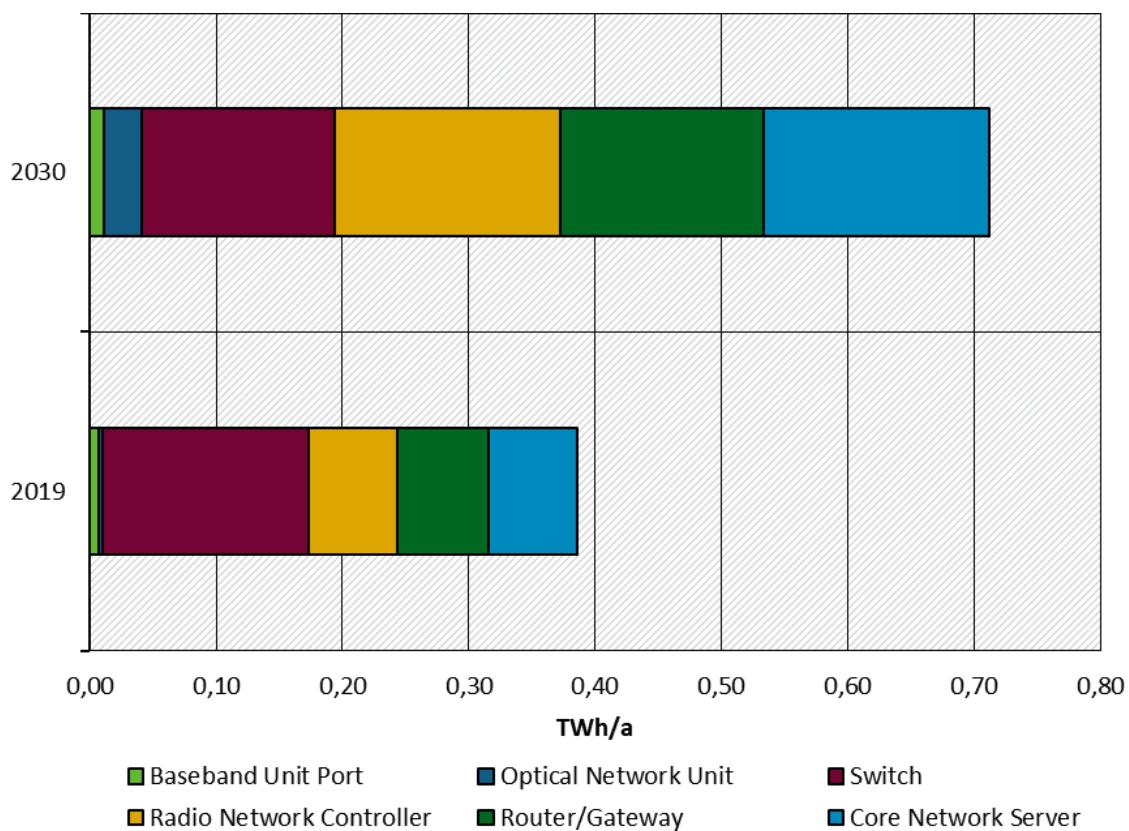
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 45 zeigt die theoretische Datenrate der einzelnen Funkmodule pro Standort. Hierbei ist zu beachten, dass die jeweilige Anzahl an Funkmodulen berücksichtigt wird. Der eindeutig größte Beitrag zur Erhöhung der Datenrate wird durch die 3,5 GHz-Module realisiert und ist in der Kombination aus großer Bandbreite (80 MHz), effizienten Modulationsverfahren (QAM 256) und Massive MIMO (32x32 Antennenarray) begründet.

Die Datenraten der anderen Frequenzen steigen aufgrund der höheren Anzahl an Mobilfunkanlagen pro Standort und der teilweisen Umstellung auf 4G und 5G mit den jeweiligen effizienteren Modulationsverfahren ebenfalls stark an, tragen allerdings im Vergleich zu 3,5 GHz nur einen geringen Anteil.

Das Ergebnis der Berechnung der theoretischen Datenrate ist für alle Szenarien gleich. Dadurch wird auch die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien gewährleistet, indem der funktionale Nutzen des Netzes gleichbleibt.

Abbildung 46: Prognose des elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Basiszenario 2019 und 2030)

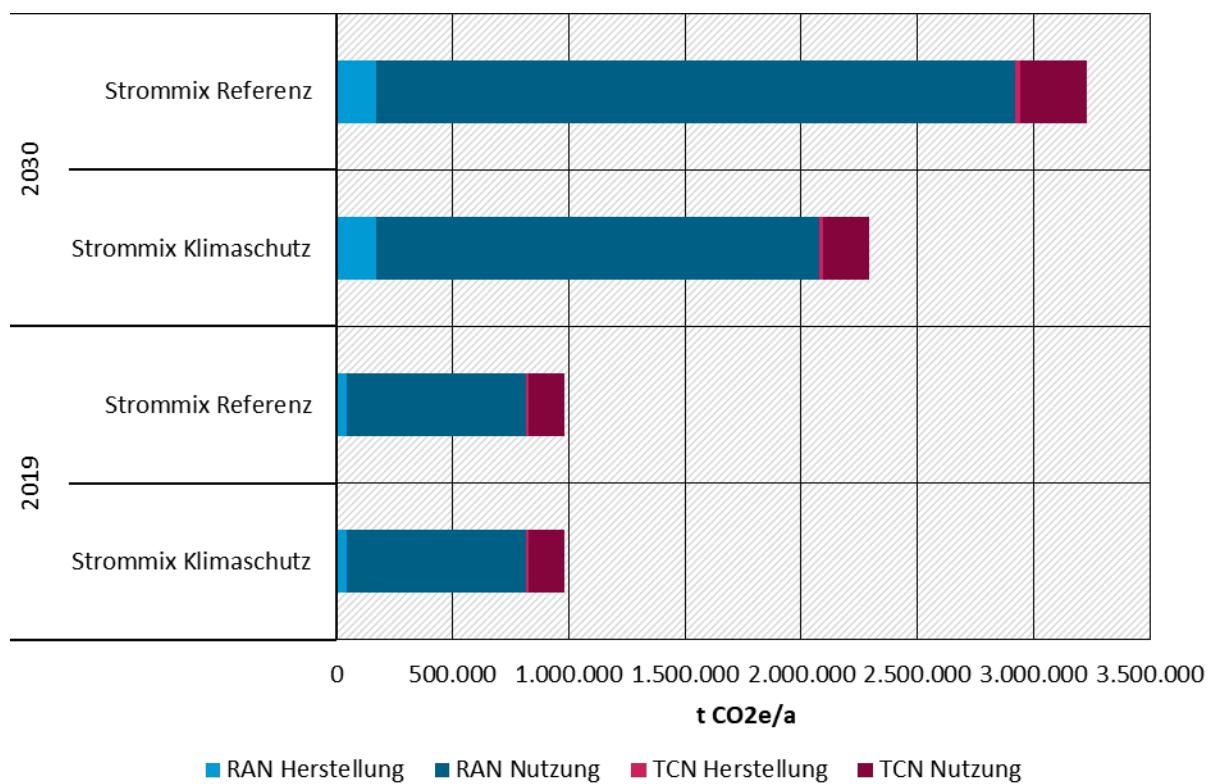


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Aufgrund der Zunahme des Datenvolumens bis zum Jahr 2030 verdoppelt sich der daran gekoppelte Energiebedarf der Komponenten des Transportkernnetzes (TCN) von 0,39 bis 0,71 TWh/a beinahe (siehe Abbildung 46). Dies gilt insbesondere für die datenverarbeitenden Komponenten wie die Optical Network Unit, die Radio Network Controller, die Router und die Core Network Server. Der Energiebedarf der Switches nimmt allerdings ab, was der Annahme geschuldet ist, dass deren Energieeffizienz stärker steigen wird als der von ihnen aufgebrachte Computing-Aufwand.

Die jährliche CO₂-Bilanz von RAN und TCN, jeweils aufgeteilt in die Nutzungs- und die anteilige Herstellungsphase, ist in Abbildung 47 dargestellt. Dabei werden beide vom UBA prognostizierten Strommixe miteinander verglichen (siehe auch 1.3.6).

Abbildung 47: Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Basiszenario 2019 und 2030)

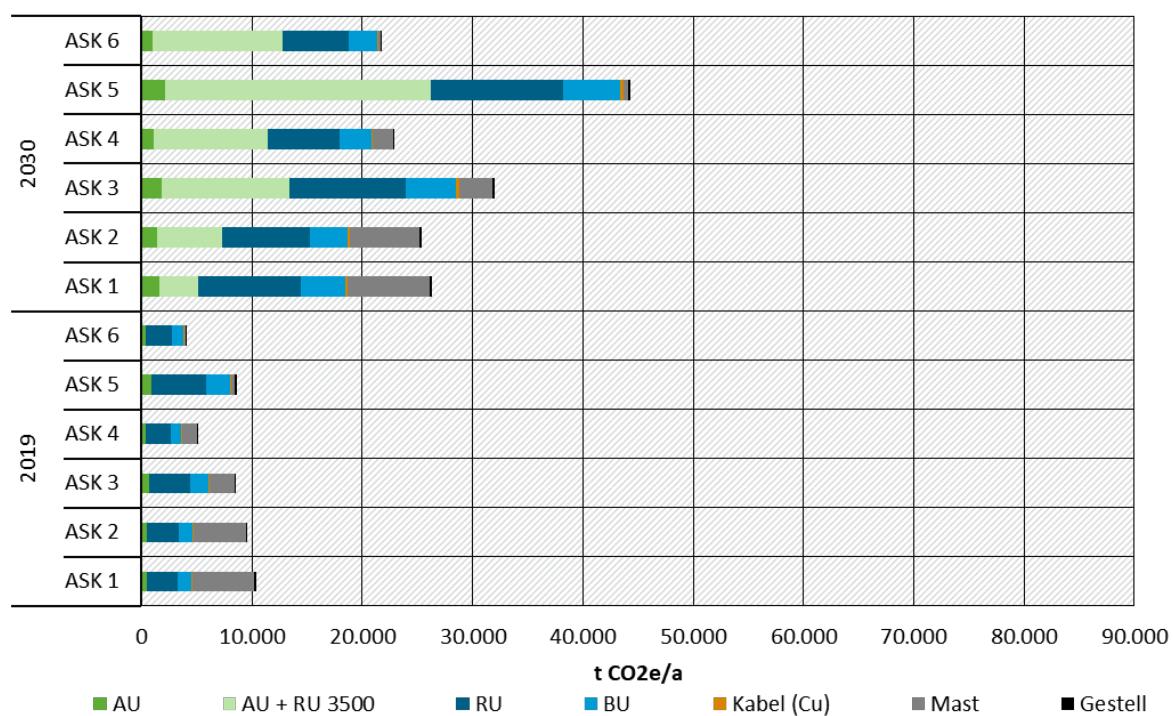


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Es ist zu erkennen, dass die jährliche Emission von Treibhausgasen in jedem dargestellten Teilespekt aufgrund des starken Zubaus von Mobilfunkanlagen stark zunehmen wird, von 981.590 bis 2.295.404 (Klimaschutz-Strommix) bzw. 3.230.222 (Referenzstrommix) Tonnen pro Jahr. Für das Jahr 2019 sind die Umrechnungsfaktoren für den Strommix gleich, daher ist dort kein Unterschied zu sehen. Für das Jahr 2030 ergibt sich jedoch eine deutliche Verringerung der Treibhausgasemissionen von 29 % durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzstrommix. Dennoch liegt die jährliche Gesamtemission um den Faktor 2,3 höher als 2019.

Die bei der Herstellung der Komponenten emittierten Treibhausgase sind nicht oder nur sehr bedingt vom deutschen Strommix abhängig und werden daher nicht angepasst. Weitere Informationen dazu wurden bereits in 2.4.1 erläutert.

Abbildung 48: Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Basisszenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In der Binnengliederung der Herstellungsphase in Abbildung 48 lässt sich erkennen, dass wieder die Antennenstandortkategorie 5 den größten Beitrag zur gesamten CO2-Bilanz liefert.

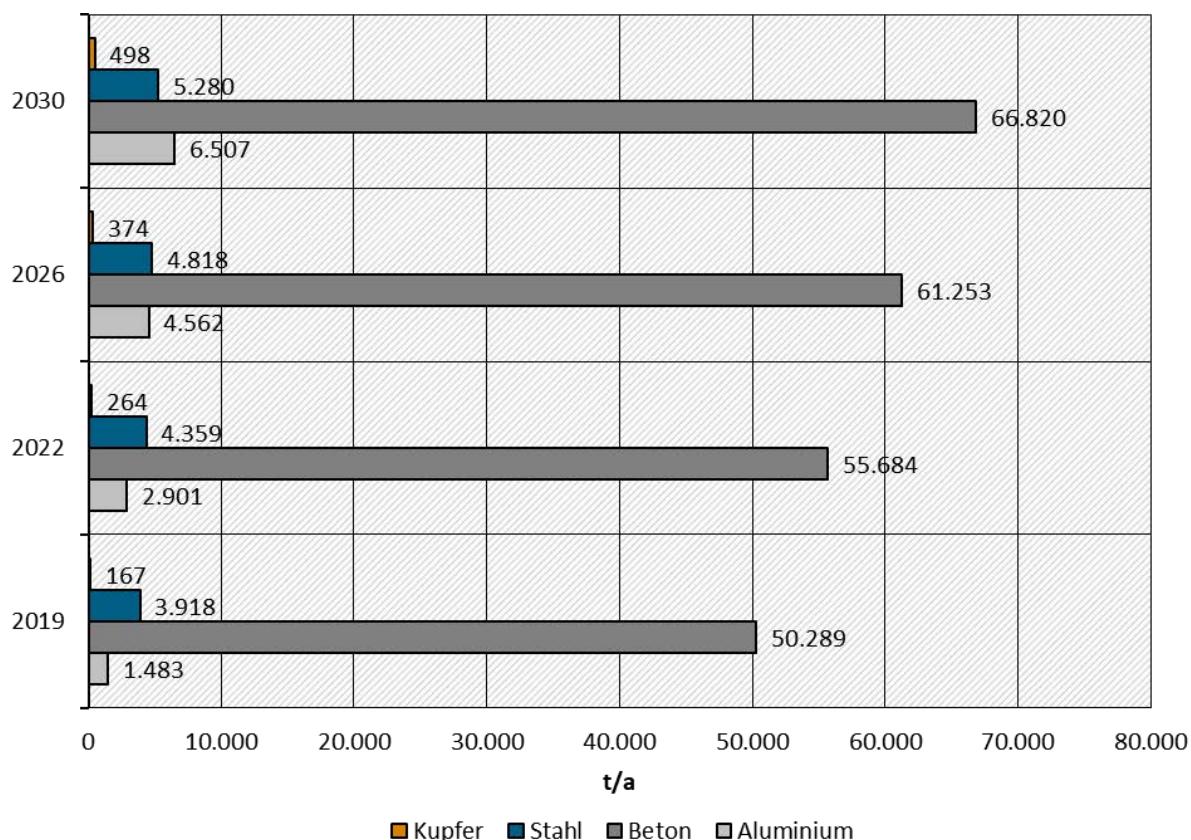
Wie bereits in 2.4.2 beschrieben haben die Antennenmasten trotz der langen Einsatzdauer und der Vernachlässigung von Instandhaltungsarbeiten in den ländlichen Regionen einen entscheidenden Anteil, wohingegen sie im urbanen Raum kaum ins Gewicht fallen.

Insbesondere die 3,5 GHz-Anlagen und generell die zunehmende Bestückung der Standorte mit Funkmodulen sind aufgrund der großen Menge an verbautem Aluminium, Chips und Leiterplatten für den starken Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase verantwortlich. Abbildung 48 steht stellvertretend für alle Szenarien, da sich die Stückzahlen, Art und Lebensdauer des Equipments nicht ändern. Somit ist der Herstellungsaufwand für die RAN-Komponenten über alle Szenarien gleich. Ausnahmen bilden die Szenarien „Technikmodernisierung“ und „Kombination“. Die Skalierung der x-Achse reicht bis 90.000 t CO2e/a, um die Vergleichbarkeit mit dem Technikmodernisierungsszenario zu visualisieren (3.2.2).

Im Folgenden wird die Materialbilanz, also die für den Betrieb des Mobilfunknetzes jährlich benötigte Gesamtmenge an den jeweils verwendeten Materialien, dargestellt. Zur besseren Skalierung der Diagramme wurden diese aufgeteilt in die Mengenmaterialien Aluminium, Beton, Stahl und Kupfer (Abbildung 49) sowie die für mikroelektronische Anwendungen in wesentlich kleineren Mengen eingesetzten Materialien Gold und Silizium (Abbildung 50).

Aufgrund der deutlich unterschiedlichen spezifischen CO2-Bilanzen (kg CO2e/kg Material) der einzelnen Materialien lassen sich aus den Mengenverhältnissen keine Aussagen über die absolute Umweltwirkung ableiten. Die Materialbilanz dient lediglich der Einordnung, wie viel Tonnen der jeweiligen Materialien im Netz verbaut sind oder jährlich hinzugebaut werden. Die Entsorgung und mögliche Recycling-Gutschriften wurden nicht berücksichtigt.

Abbildung 49: Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Mengenmaterialien, Basisszenario 2019-2030)



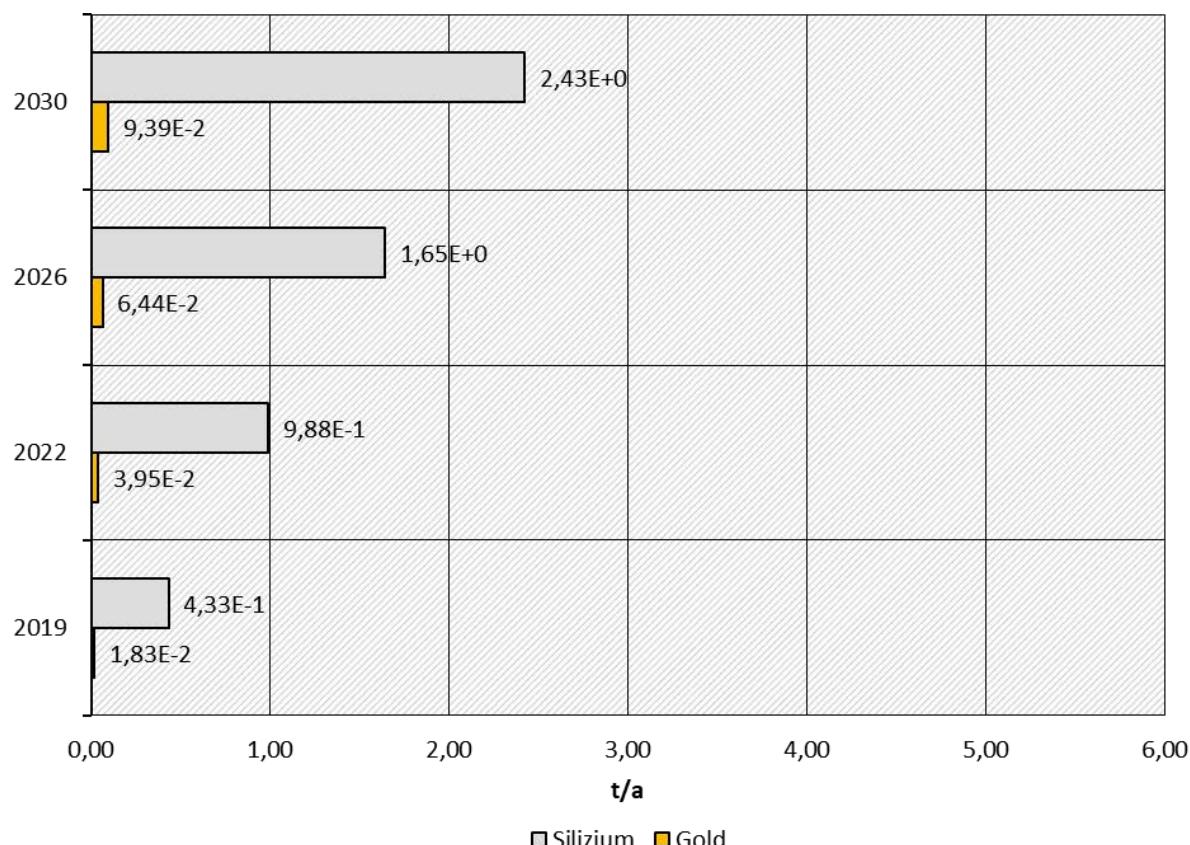
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In Abbildung 49 ist zu sehen, dass die benötigten Mengen aller Materialien bis 2030 ansteigen, allerdings in einem weniger starken Verhältnis als z.B. der Energiebedarf. Die Größenunterschiede zwischen einzelnen Materialien sind teilweise drastisch, insbesondere die großen Mengen an Beton (66.820 t/a im Jahr 2030) als jährlichen Anteil des Baus von Antennenmasten im ländlichen und suburbanen Raum. Auch die Stahlmengen ergeben sich hauptsächlich aus den Antennenmasten (auch im urbanen Raum) und zu einem sehr geringen Anteil aus den Servergestellen an den Standorten und zu einem noch geringeren Anteil aus Gehäuseteilen der Komponenten.

Das Aluminium stammt vor allem aus den Gehäusen der Funkmodule.

Es ist zu beachten, dass die Kupfermengen lediglich aus den Leiterplatten der verbauten Komponenten und den zwei Meter langen Kabeln zwischen Funk- und Antennenmodul stammen. Stromkabel sowie Verbindungen zwischen den Standorten oder im TCN sind nicht in die Sachbilanz eingeflossen.

Abbildung 50: Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Gold und Silizium, Basisszenario 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Auch die in Abbildung 50 dargestellten Mengen der Materialien Gold und Silizium⁶⁷ werden bis 2030 fast um den Faktor sechs und damit in einem stärkeren Maße steigen als die Mengenmaterialien. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Errichtung neuer Standorte weniger zunehmen wird als die Bestückung dieser mit Antennen-, Funk- und Basisbandmodulen. Diese Komponenten enthalten vergleichsweise große Mengen an Chips auf Siliziumbasis sowie Leiterplatten, Kontakten und Steckern mit Goldbeschichtungen. 2,4 Tonnen Silizium oder 93,9 kg Gold pro Jahr mag im Vergleich zu den Mengenmaterialien wenig erscheinen, doch angesichts der geringen Menge an global verfügbaren Reserven dieser Rohstoffe sind diese Mengen nicht zu vernachlässigen.

3.2.2 Szenario 2: Basisszenario mit beschleunigter Technikmodernisierung

In der nachfolgenden Tabelle 33 sind die grundlegenden Annahmen beziehungsweise Modellparameter für das Basisszenario mit beschleunigter Technikmodernisierung entsprechend der in 3.1 erläuterten Annahmen aufgeführt:

⁶⁷ Hier wird nur das für die Chipherstellung verwendete hochreine Silizium betrachtet. Silizium als Legierungselement in Aluminiumlegierungen oder als Bestandteil von Sand zur Betonherstellung muss nicht dieselben Reinheitsanforderungen erfüllen und ist daher in Bezug auf die Umweltwirkung und Ressourcenverknappung etwas weniger kritisch. Auch diese durchaus großen Mengen können angesichts der Verknappung der Ressource Sand und den damit einhergehenden Umweltschäden nicht vernachlässigt werden, allerdings ist eine dahingehende Kritikalitätsbewertung nicht Teil dieser Studie.

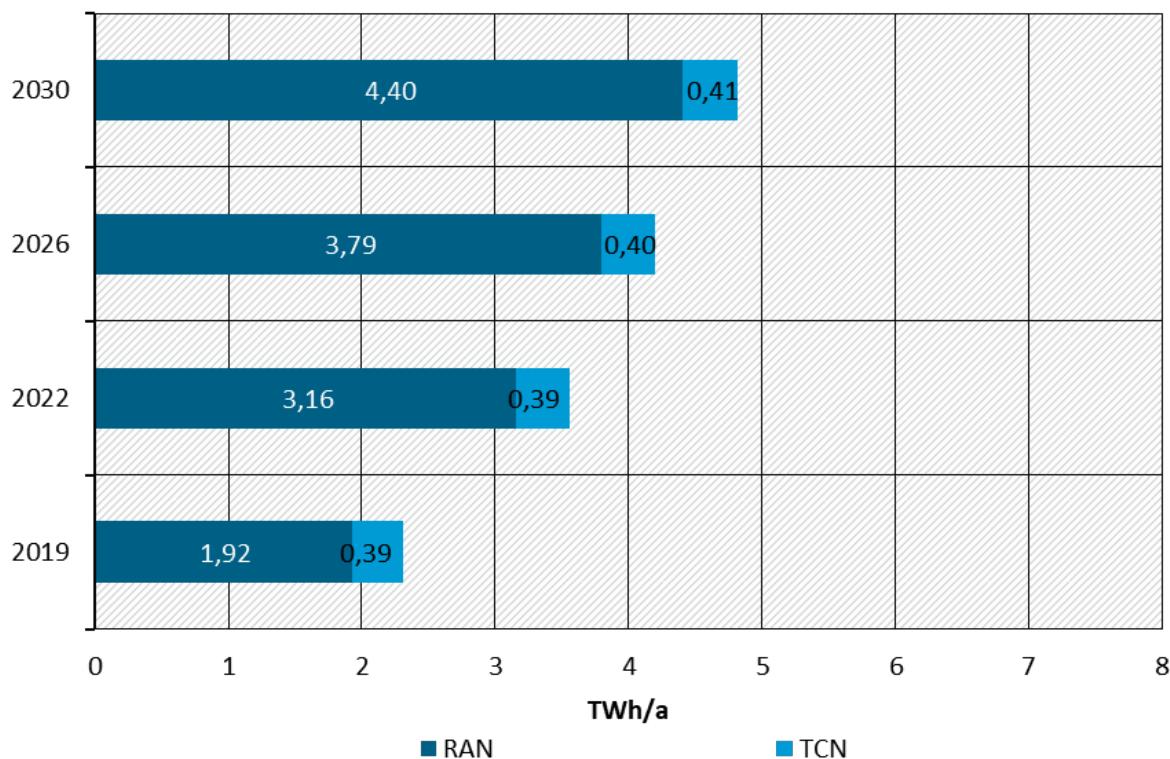
Tabelle 33: Annahmen zum Szenario 2 (Technikmodernisierung)

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Modernisierung	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 4G, 5G (3G → 4G/5G)	2G, 4G, 5G (4G → 5G)
Netzverdichtung (Standorte)	gesamt: 81.000 AS	gesamt: 90.000 AS	gesamt: 99.000 AS	gesamt: 108.000 AS
Netzverdichtung (Transceiver)	ASK 1-3: 12 TRX ASK 4-6: 15 TRX	ASK 1-3: 16,5 TRX ASK 4-6: 19 TRX	ASK 1-3: 20 TRX ASK 4-6: 22,5 TRX	ASK 1-3: 23,5 TRX ASK 4-6: 25,5 TRX
Nutzungsprofil	Low-load: 6h Medium-load: 8h High-load: 10h			
Technik- modernisierung	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)
bundesweites Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming
Abschalten von Transceivern	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten
TCN	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring

Das alternative Szenario 2 berechnet das hardwaretechnische Verbesserungspotenzial, welches insbesondere aus den noch immer kontinuierlichen Fortschritten der Halbleiterindustrie resultiert. Durch die Miniaturisierung verbessert sich in einem gewissen Umfang die Energieeffizienz. Es kann, vereinfacht ausgedrückt, mit einer definierten Energiemenge mehr Rechenleistung realisiert werden. Gleichwohl sich dieses Verbesserungspotenzial (Koomeys Law) möglicherweise in den kommenden Jahren verlangsamt, hat es derzeit noch immer eine sehr hohe Hebelwirkung zur Senkung des Energiebedarfs im operativen Betrieb, wie das Szenario zeigt. Unter der theoretischen Annahme, dass die Systemtechnik nicht alle sieben, sondern bereits alle drei Jahre auf die neuste Hardwaretechnologie umgestellt wird, reduziert sich der elektrische Energiebedarf beispielsweise im Jahr 2030 von 7,5 TWh auf 4,8 TWh. Diese Energieeinsparung von 36% gegenüber dem Basisszenario ist vergleichsweise groß, denn die Steigerung der hardwaretechnischen Energieeffizienz wirkt dreifach. Die energiesparenden Komponenten reduzieren nämlich auch die absoluten Wandlungsverluste der Stromversorgung und schlussendlich den absoluten Kühlungsaufwand.

Die untenstehende Abbildung 51 zeigt die Prognose des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Makrozellen in Deutschland von 2019 bis 2030 im Basisszenario mit beschleunigter Technikmodernisierung. Dies umfasst die vollständige Infrastruktur von RAN und TCN aller Betreiber, die für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung mithilfe von Makrozellen notwendig ist.

Abbildung 51: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Technikmodernisierung 2019-2030)

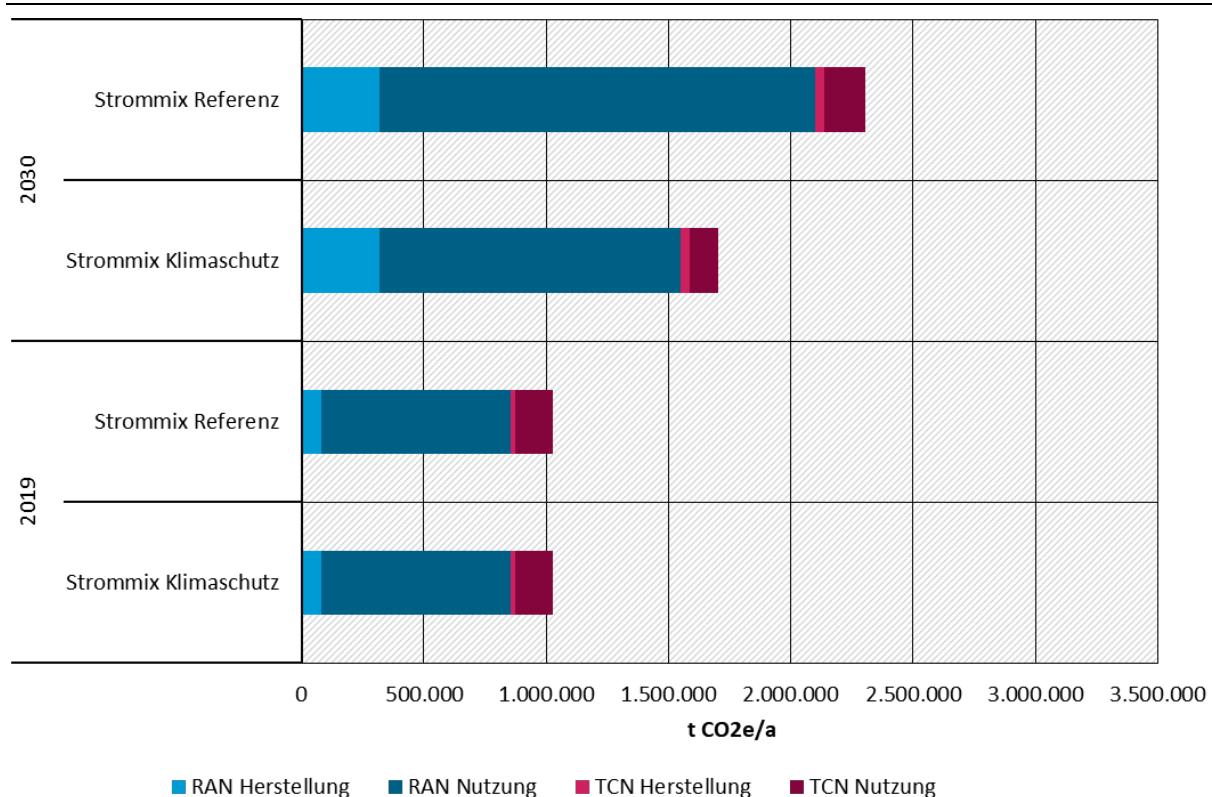


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Im Gegensatz zum Basisszenario (Abbildung 40) liegt der Gesamtenergiebedarf im Jahr 2030 unter Berücksichtigung einer beschleunigten Technikmodernisierung mit 4,82 TWh/a bzw. 64 % deutlich niedriger (Basisszenario: 7,51 TWh/a). Das RAN erfährt von 2019 bis 2030 ungefähr eine Verdopplung, das TCN bleibt fast konstant durch die Technikmodernisierung, da dort viel Routing und Computing betrieben wird, wo die Technikmodernisierung einen starken Einfluss hat. Die Gesamteinsparung ist mit 36 % höher als die 15 % mehr Energieeffizienz alle drei Jahre, denn Letztere wirkt wie oben beschrieben dreifach in der Kette aus energiesparenden Komponenten sowie den daraus resultierend reduzierten Kühlungs- und Wandlungsverlusten.

Aufgrund der verkürzten Einsatzdauer der Komponenten durch die beschleunigte Technikmodernisierung und den dadurch beschleunigten Austausch der Funk- und Basisbandmodule sowie des TCN-Equipments – alle drei statt alle sieben Jahre – ist der Materialbedarf sowie die CO₂-Bilanz der Herstellung der Komponenten pro Jahr Einsatzdauer fast doppelt so groß wie im Basisszenario. Dies ist in der Abbildung 52, Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55 zu sehen.

**Abbildung 52: Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix
(Technikmodernisierung 2019 und 2030)**

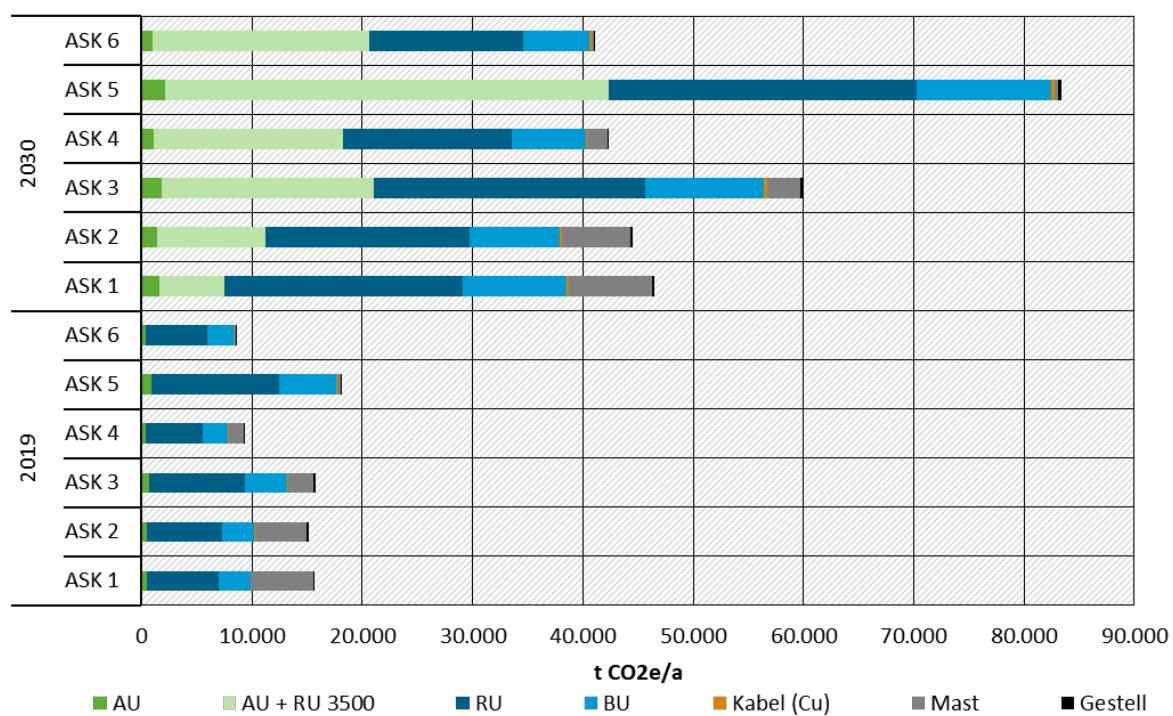


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Trotz der ungefähr doppelt so hohen jährlichen Treibhausgasemissionen des anteiligen Herstellungsaufwands der Komponenten überwiegt unter den angenommenen Bedingungen von 15 % Energieeffizienzverbesserung alle drei Jahre die Einsparung von Emissionen während der Nutzungsphase gegenüber dem Basisszenario. Die absolute Einsparung beträgt 591.582 t CO2e/a (1.703.822 ggü. 2.295.404 t CO2e/a) für den Klimaschutzstrommix und 926.459 t CO2e/a (2.303.763 ggü. 3.230.222 t CO2e/a) für den Referenzstrommix im Jahr 2030.

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Verbesserung der Energieeffizienz in diesem Szenario ein rein theoretischer Wert ist, um die Wirksamkeit potenzieller Maßnahmen in diesem Bereich darzustellen und zu quantifizieren. Aus den oben dargestellten Ergebnissen lassen sich keine allgemein gültigen Aussagen ableiten. Eine zu geringe Energieeinsparung oder ein zu häufiger Austausch der Komponenten könnte die absolute CO2-Bilanz sogar erhöhen. Der Einsparungseffekt in einem realen Anwendungsfall sollte daher unbedingt für jede Komponente anhand ihres spezifischen Verhältnisses von Herstellungs- zu Nutzungsphase neu quantifiziert werden. Dabei ist nicht nur die jährliche CO2-Bilanz von Interesse, sondern auch die kumulierten Treibhausgasemissionen über einen längeren Zeitraum und mehrere Austauschzyklen hinweg.

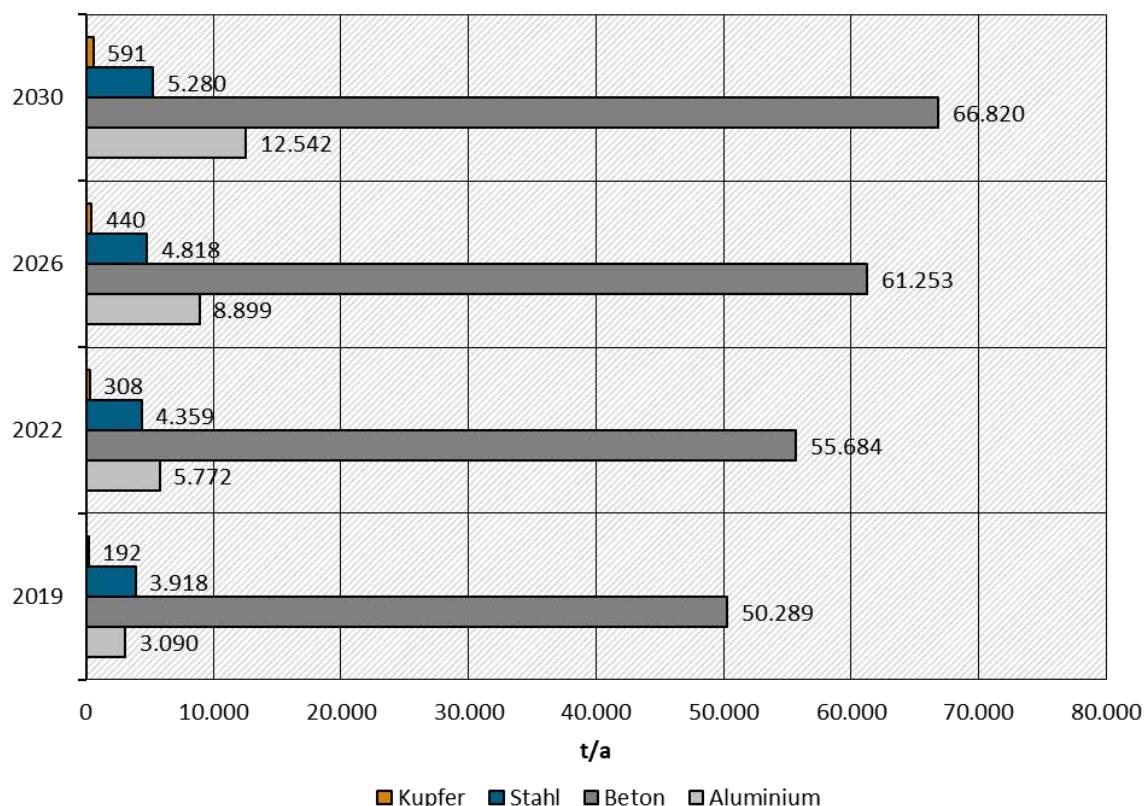
Abbildung 53: Prognose der absoluten CO2-Bilanz der Herstellung von Makrozellen-Komponenten in Deutschland (Technikmodernisierung 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Binnengliederung der Abbildung 53 zeigt, dass nur der anteilige Herstellungsaufwand der energiebezogenen Komponenten wie Funk- und Basisbandmodul durch deren häufigeren Austausch zunimmt. Dadurch nehmen diese im Vergleich zum Basisszenario einen größeren Anteil an der Gesamtemission von Treibhausgasen ein. Dieser Effekt ist an den urbanen Standorten besonders deutlich, da hier die Antennenmasten ohnehin eine untergeordnete Rolle spielen.

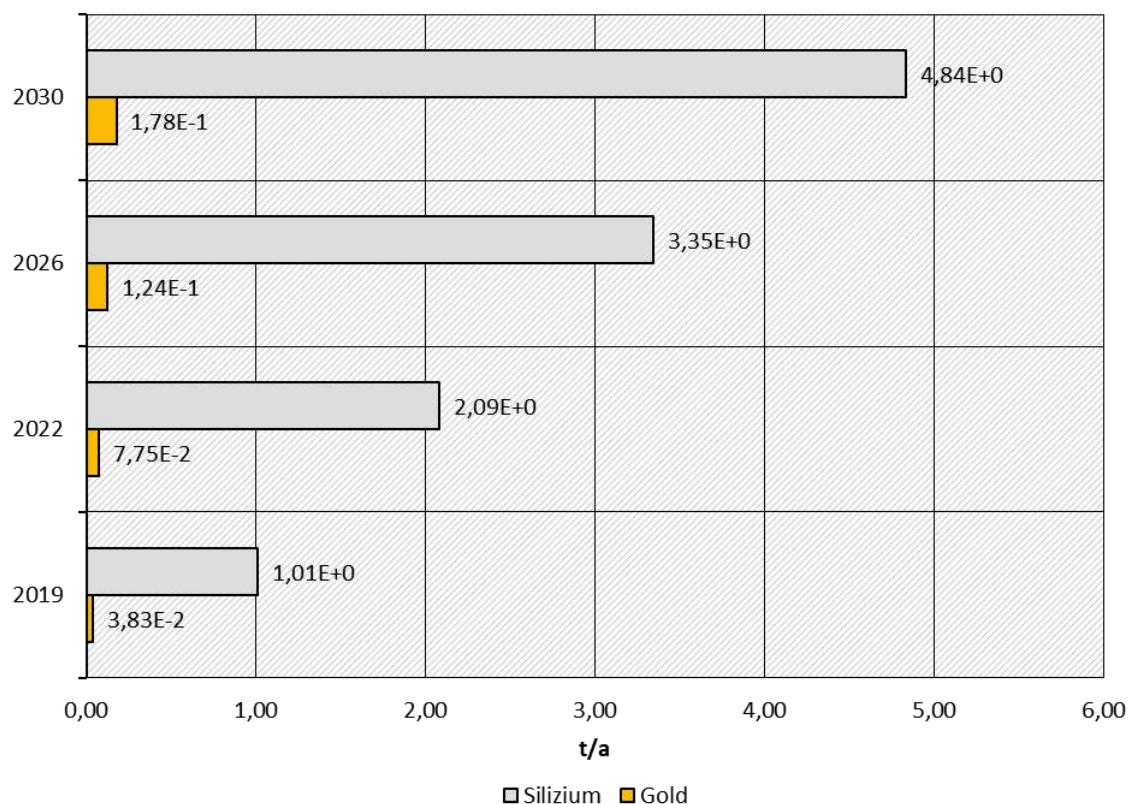
Abbildung 54: Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Mengenmaterialien, Technikmodernisierung 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der Bedarf an Beton ändert sich durch die beschleunigte Technikmodernisierung nicht, da die häufiger ausgetauschten Materialien keinen Beton enthalten. Sie enthalten mitunter geringe Mengen an Stahl, die aber im Verhältnis zum Gesamtbedarf nicht auffallen.

Der Bedarf an Kupfer steigt leicht aufgrund der verbauten Leiterplatten und der Bedarf an Aluminium verdoppelt sich ungefähr, da dieses vorrangig für die Gehäuse der Funkmodule eingesetzt wird. Im Falle einer modularen Bauweise dieser Komponenten wäre es denkbar, die internen elektronischen Bauteile im Sinne einer Energieeffizienzverbesserung zu modernisieren und die Aluminiumgehäuse zu bewahren. Solche Konzepte sind zum derzeitigen Zeitpunkt allerdings eher spekulativ und die Praktikabilität sowie das ökologische Aufwand-Nutzen-Verhältnis müsste für jeden speziellen Fall geprüft werden.

Abbildung 55: Jährlich benötigte Menge an Materialien für Makrozellen (Gold und Silizium, Technikmodernisierung 2019-2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die jährlich benötigten Mengen an Gold und hochreinem Silizium würden sich im Vergleich zum Basisszenario ebenfalls ungefähr verdoppeln (4,84 t Silizium und 0,18 t Gold pro Jahr für den Zeitabschnitt 2030), da diese Materialien in den energiebezogenen Komponenten verbaut werden, welche durch die beschleunigte Technikmodernisierung eine kürzere Einsatzdauer aufweisen.

3.2.3 Szenario 3: Basisszenario mit bundesweitem Roaming

In der nachfolgenden Tabelle 34 Tabelle 32 sind die grundlegenden Annahmen beziehungsweise Modellparameter für das Basisszenario mit bundesweitem Roaming entsprechend der in 3.1 erläuterten Annahmen aufgeführt:

Tabelle 34: Annahmen zum Szenario 3 (bundesweites Roaming)

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Modernisierung	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 4G, 5G (3G → 4G/5G)	2G, 4G, 5G (4G → 5G)
Netzverdichtung (Standorte)	gesamt: 81.000 AS	gesamt: 90.000 AS	gesamt: 99.000 AS	gesamt: 108.000 AS

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Netzverdichtung (Transceiver)	ASK 1-3: 12 TRX ASK 4-6: 15 TRX	ASK 1-3: 16,5 TRX ASK 4-6: 19 TRX	ASK 1-3: 20 TRX ASK 4-6: 22,5 TRX	ASK 1-3: 23,5 TRX ASK 4-6: 25,5 TRX
Nutzungsprofil	Low-load: 6h Medium-load: 8h High-load: 10h			
Technik- modernisierung	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)
bundesweites Roaming	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen
Abschalten von Transceivern	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten	kein Abschalten
TCN	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring	Redundanz im Metro- und Aggregationsring

In der Tabelle 35 sind die Größen der durch das bundesweite Roaming verkleinerten Funkzellen im Vergleich zum Basisszenario gelistet:

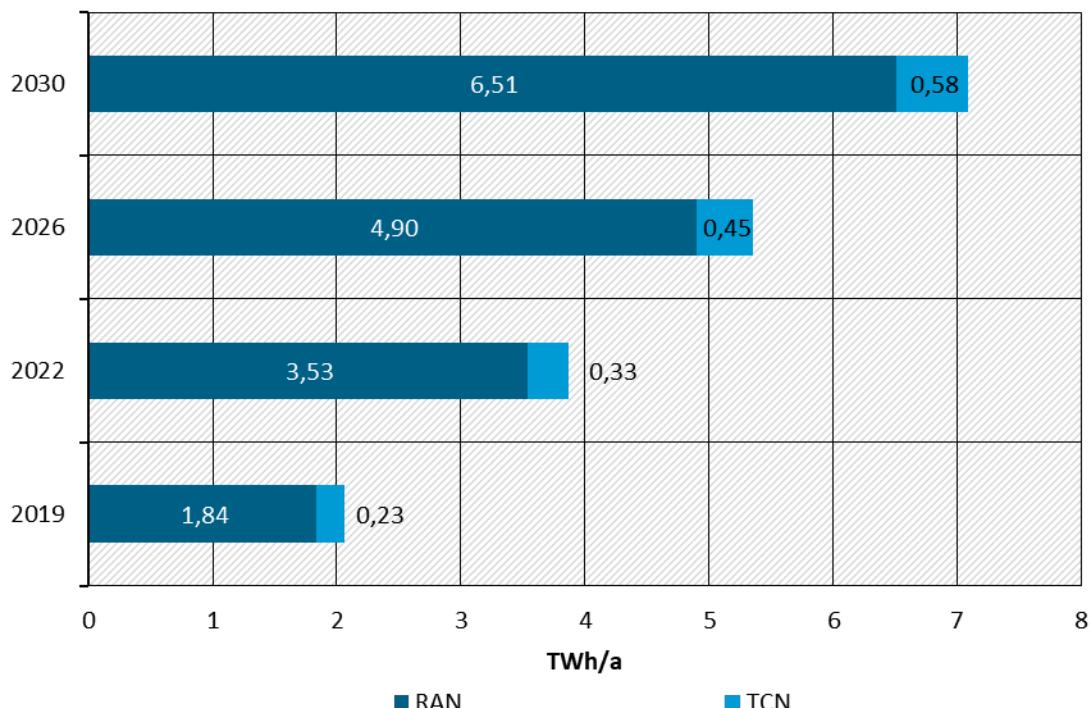
Tabelle 35: Vergleich der Zelldurchmesser zwischen Basis- und Roamingszenario (2019)

Szenario		ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6
Basis	Zelldurchmesser [km]	4,82	2,75	1,85	1,29	0,93	0,66
Roaming	Zelldurchmesser [km]	2,78	1,59	1,07	0,74	0,54	0,38

Der Durchmesser der Funkzellen würde im Falle der Einführung eines bundesweiten Roamings im Vergleich zum Basisszenario nur noch etwas mehr als die Hälfte betragen. Dies liegt daran, dass in diesem Szenario jeder Kunde jedes Betreibers jeden Antennenstandort nutzen kann. Dadurch liegen nicht mehr drei oder vier parallel betriebene Netze mit großen Funkzellen übereinander (siehe Abbildung 10), sondern es ergibt sich rein funktechnisch betrachtet ein einziges Netz mit kleineren Zellen. Dieses muss nun allerdings auch die Gesamtheit aller Kunden abdecken, wohingegen die einzelnen Netze der Betreiber ohne Roaming nur den Anteil ihrer Kunden versorgen können muss. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass das in diesem Szenario modellierte Roaming keinesfalls die einzelnen Betreiber durch einen einzigen Betreiber ersetzen soll, sondern lediglich von einer Kooperation im Sinne der betreiberübergreifenden Nutzung von Antennenstandorten ausgegangen wird, wie es im Falle des Roamings im Ausland bereits geschieht.

Die untenstehende Abbildung 56 zeigt die Prognose des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Makrozellen in Deutschland von 2019 bis 2030 im Basisszenario mit bundesweitem Roaming. Dies umfasst die vollständige Infrastruktur von RAN und TCN aller Betreiber, die für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung mithilfe von Makrozellen notwendig ist.

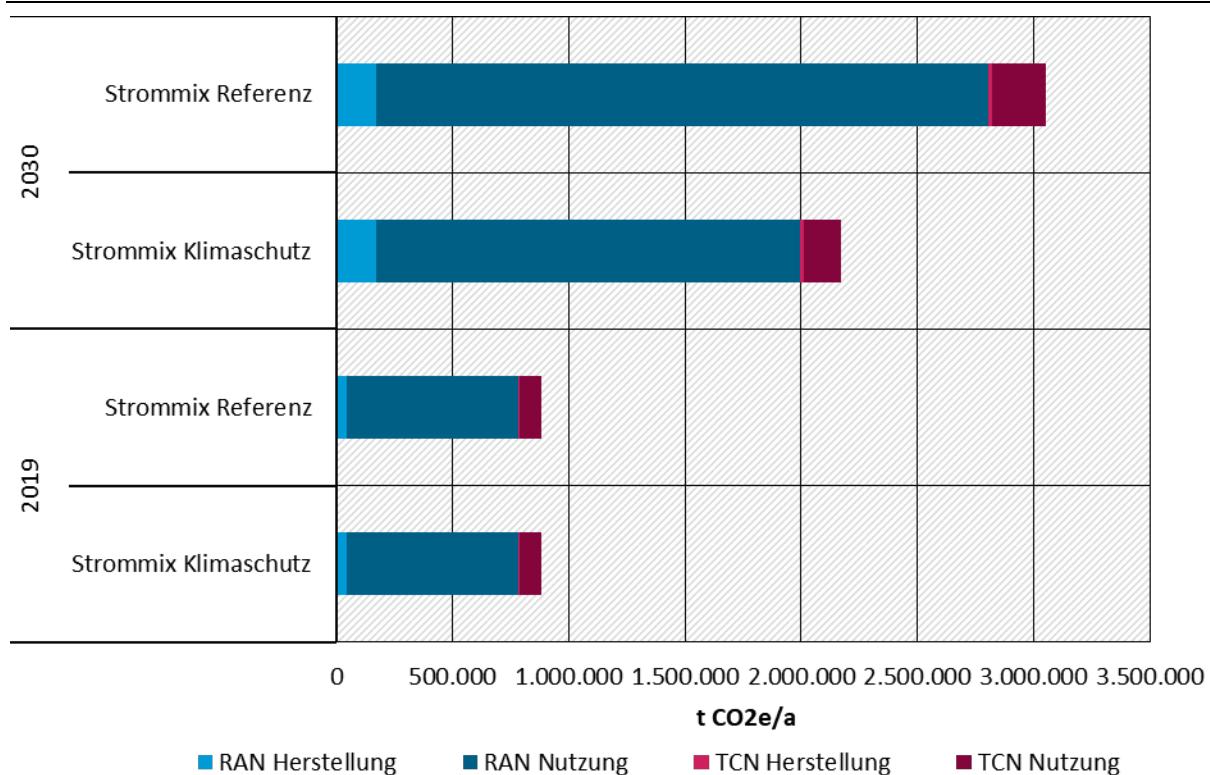
Abbildung 56: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Roaming 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Eine relativ geringe Einsparung von rund 6 % gegenüber dem Basiszenario entsteht dadurch, dass die Funkzellengröße durch die Neuverteilung kleiner wird und die Sendeleistung entsprechend sinkt. Die geringe Wirkung dieses Effekts ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Sendeleistung im UTAMO-Modell nicht adaptiv genug auf die verkleinerten Zellen reagieren kann. Dies liegt allerdings daran, dass heutige Leistungsverstärker nicht darauf ausgelegt sind, sich dermaßen last- bzw. reichweitenadaptiv zu verhalten. Eine neue Generation an Verstärkern bzw. Funkmodulen, die auf eine insgesamt geringere Sendeleistung ausgelegt sind, könnte das Einsparungspotenzial vergrößern. Allerdings müssten in diesem Falle auch sämtliche Funkmodule ausgetauscht werden. Im Zuge der üblichen Modernisierung könnte dies aber mit der Zeit erfolgen.

Die Berechnung dieses Szenarios für das Jahr 2019 ist rückwirkend natürlich nicht sinnvoll, doch kann daran verdeutlicht werden, dass eine solche rein organisatorische Maßnahme auch ohne zwangsläufigen Austausch der Netztechnik und ohne eine übergeordnete Standortneuplanung bereits zu Einsparungen führen kann (1,84 ggü. 1,92 TWh/a).

Abbildung 57: Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Roaming 2019 und 2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die in Abbildung 57 dargestellte CO2-Bilanz unterscheidet sich nur in geringem Maße von der im Basisszenario. Die Herstellungsphase der RAN-Komponenten bleibt gleich, die Nutzungsphase sinkt um ca. 4 %. Beim TCN hingegen sinken sowohl die Herstellungsphase um 12 % als auch die Nutzungsphase um 19 %. Hier tritt ein interessanter Effekt ein: Im Berechnungsmodell wird anstelle von drei separaten Aggregationsnetzen nun ab der Metroebene lediglich ein „gemeinsames“ Transportnetz angesetzt. Dieser Abbau redundanter Netzstrukturen und die damit einhergehende Auslastungssteigerung bewirken die Senkung. In der künftigen Praxis sollte diese Art von Effekten bei kooperierenden Netzen berücksichtigt werden.

3.2.4 Szenario 4: Basisszenario mit konsequenterem Energiemanagement

In der nachfolgenden Tabelle 36 sind die grundlegenden Annahmen beziehungsweise Modellparameter für das Basisszenario mit konsequenterem Energiemanagement entsprechend der in 3.1 erläuterten Annahmen aufgeführt:

Tabelle 36: Annahmen zum Szenario 4 (konsequentes Energiemanagement)

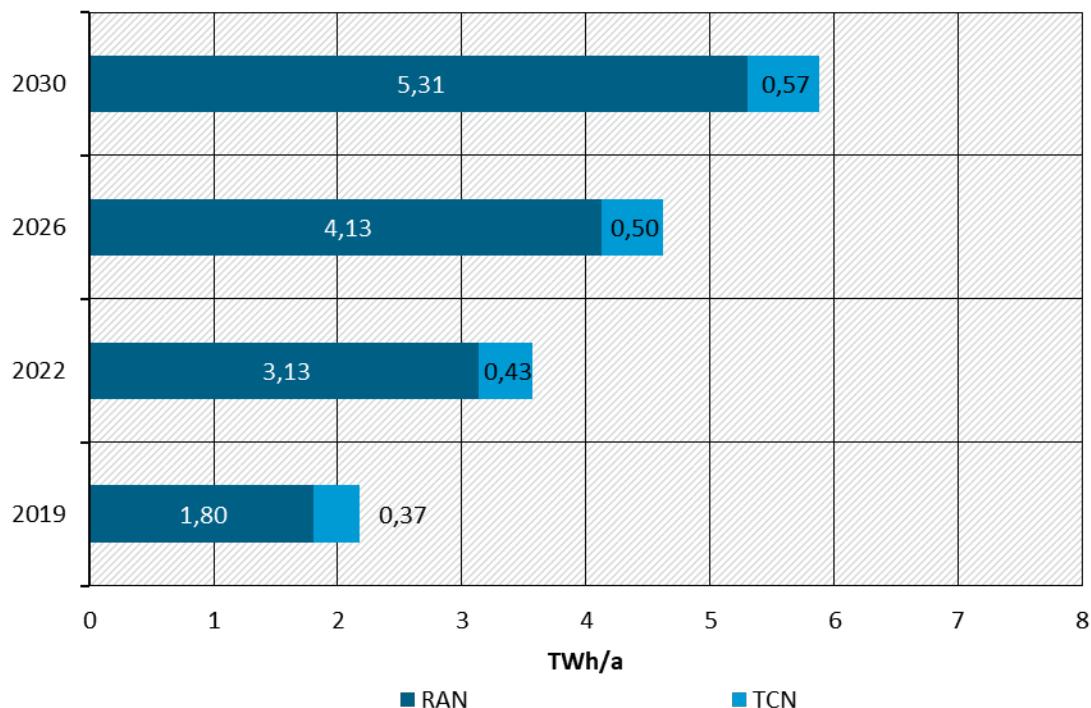
Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Modernisierung	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 4G, 5G (3G → 4G/5G)	2G, 4G, 5G (4G → 5G)
Netzverdichtung (Standorte)	gesamt: 81.000 AS	gesamt: 90.000 AS	gesamt: 99.000 AS	gesamt: 108.000 AS

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Netzverdichtung (Transceiver)	ASK 1-3: 12 TRX ASK 4-6: 15 TRX	ASK 1-3: 16,5 TRX ASK 4-6: 19 TRX	ASK 1-3: 20 TRX ASK 4-6: 22,5 TRX	ASK 1-3: 23,5 TRX ASK 4-6: 25,5 TRX
Nutzungsprofil	Low-load: 6h Medium-load: 8h High-load: 10h			
Technik- modernisierung	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)	konventionell (3% Verbesserung)
bundesweites Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming	kein Roaming
Abschalten von Transceivern	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load
TCN	keine Redundanz	keine Redundanz	keine Redundanz	keine Redundanz

Das alternative Szenario 4 beinhaltet ein konsequentes Energiemanagement mit einem bewussten Abschalten von ausgewählten Transceivern in den Zeitintervallen mit niedriger Auslastung (Low Load). Das Szenario simuliert einen stärker lastadaptiven Betrieb der Mobilfunknetze.

Die untenstehende Abbildung 58 zeigt die Prognose des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Makrozellen in Deutschland von 2019 bis 2030 im Basisszenario mit konsequentlichem Energiemanagement. Dies umfasst die vollständige Infrastruktur von RAN und TCN aller Betreiber, die für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung mithilfe von Makrozellen notwendig ist.

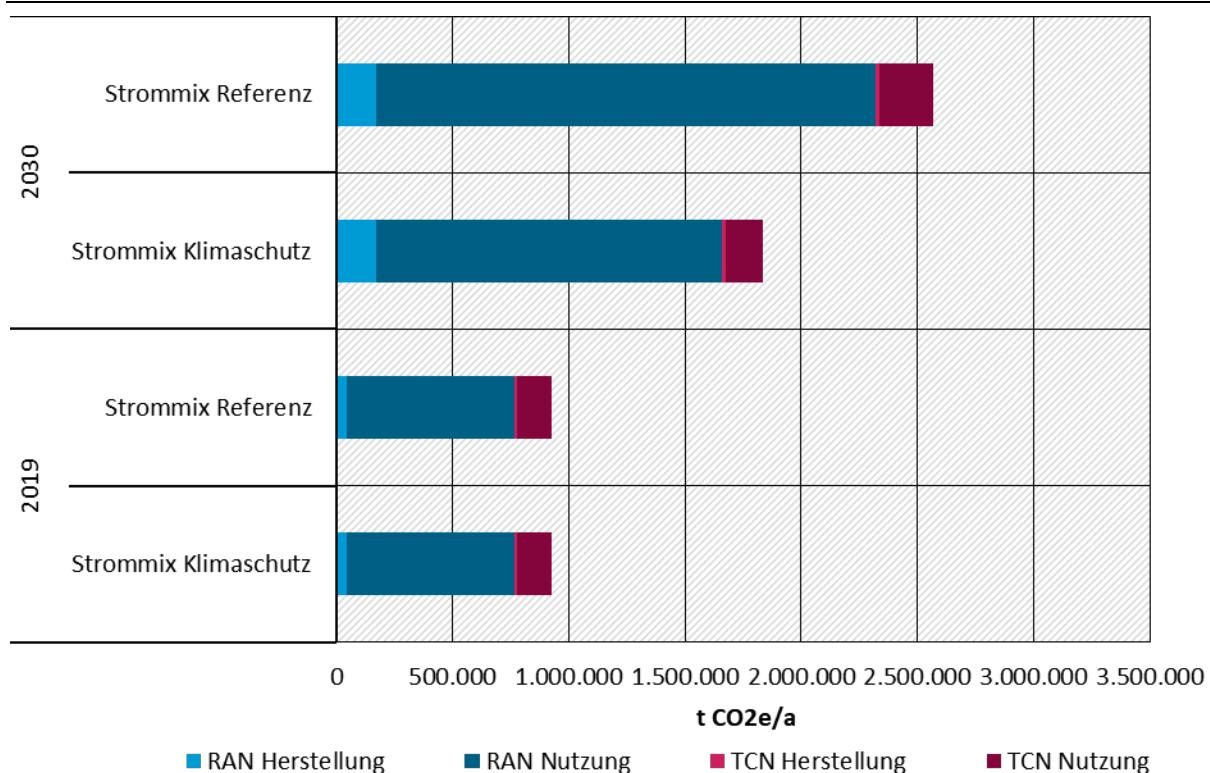
Abbildung 58: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (Energiemanagement 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Durch das temporäre Abschalten von Transceivern bei geringer Auslastung der Funkzelle können unter den oben genannten Bedingungen im Jahr 2030 ungefähr 1,49 TWh/a bzw. 22 % an elektrischer Energie eingespart werden. Je nach Praktikabilität und Umfang dieser Maßnahme kann dieser Wert in einem realen Anwendungsfall entsprechend kleiner oder größer ausfallen.

Auch hier dient die Berechnung des Szenarios für das Referenzjahr 2019 lediglich dem Zweck, zu verdeutlichen, dass Energieeinsparungen auf operativer Ebene und ohne Veränderung der physischen Netztechnik möglich sind. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die vorhandene Technik lastadaptive Ein- und Ausschaltzyklen ermöglicht und schnell genug auf eine Reaktivierung reagieren kann.

Abbildung 59: Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Energiemanagement 2019 und 2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der Abbildung 59 kann entnommen werden, dass die Gesamtmenge an jährlichen Treibhausgasemissionen durch das konsequente Energiemanagement um ca. 20 % abnehmen würde (1.837.069 t CO2e/a für den Klimaschutz-Strommix und 2.569.148 t CO2e/a für den Referenzstrommix im Jahr 2030). Die Emissionen der Herstellungsphase unterscheiden sich im Vergleich zum Basisszenario nicht, da die Stückzahlen der Komponenten unverändert bleiben und davon ausgegangen wird, dass Unterschiede in der Steuerung der Geräte keine substanziellen Änderungen im physischen Geräteaufbau und der Standortkonfiguration nach sich ziehen.

3.2.5 Szenario 5: Kombination der Szenarien 2, 3 und 4

In der nachfolgenden Tabelle 37 sind die grundlegenden Annahmen beziehungsweise Modellparameter für das Basisszenario mit beschleunigter Technikmodernisierung, bundesweitem Roaming und konsequentem Energiemanagement entsprechend der in 3.1 erläuterten Annahmen aufgeführt:

Tabelle 37: Annahmen zum Szenario 5 (kombiniert)

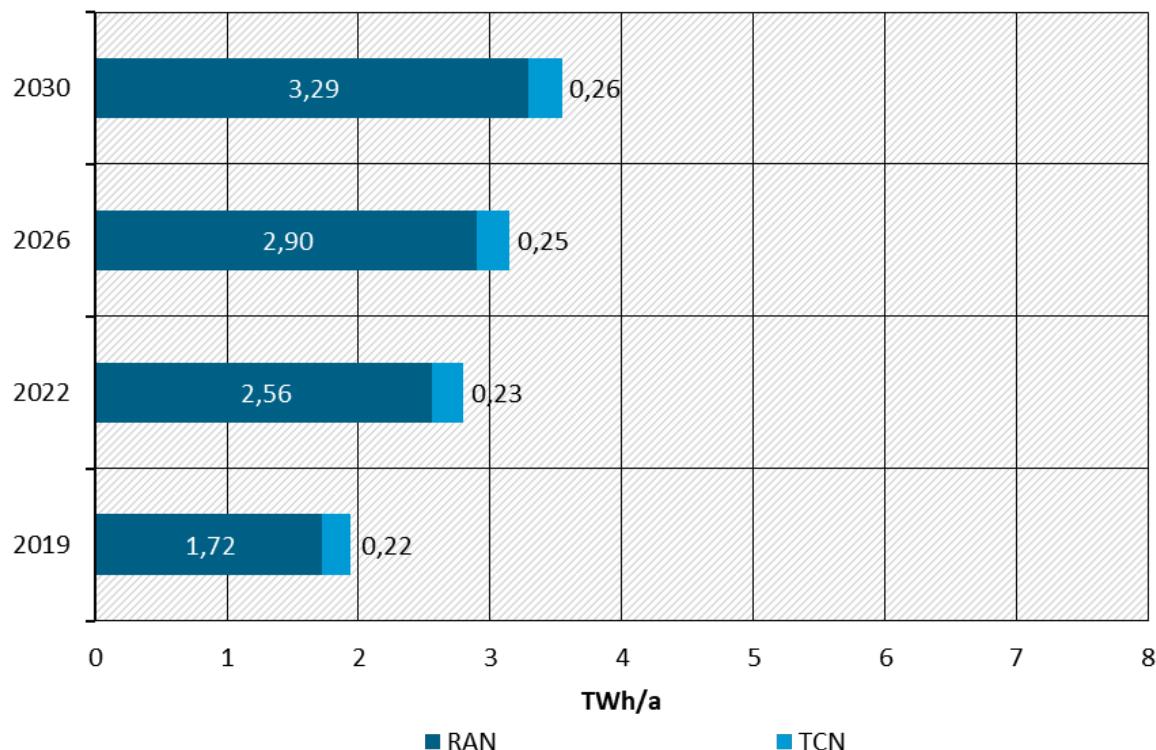
Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Modernisierung	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 3G, 4G, 5G	2G, 4G, 5G (3G → 4G/5G)	2G, 4G, 5G (4G → 5G)

Maßnahme	2019 (Referenz)	2022 (kurzfristiges Szenario)	2026 (mittelfristiges Szenario)	2030 (langfristiges Szenario)
Netzverdichtung (Standorte)	gesamt: 81.000 AS	gesamt: 90.000 AS	gesamt: 99.000 AS	gesamt: 108.000 AS
Netzverdichtung (Transceiver)	ASK 1-3: 12 TRX ASK 4-6: 15 TRX	ASK 1-3: 16,5 TRX ASK 4-6: 19 TRX	ASK 1-3: 20 TRX ASK 4-6: 22,5 TRX	ASK 1-3: 23,5 TRX ASK 4-6: 25,5 TRX
Nutzungsprofil	Low-load: 6h Medium-load: 8h High-load: 10h			
Technik- modernisierung	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)	beschleunigt (15% Verbesserung)
bundesweites Roaming	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen	reduzierte Sendeleistungen aufgrund kleinerer Zellen
Abschalten von Transceivern	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load	Abschalten von 700, 800, 2600 und 3500 MHz im medium- und low-load
TCN	keine Redundanz	keine Redundanz	keine Redundanz	keine Redundanz

Das alternative Szenario 5 kombiniert alle drei vorhergehenden Szenarien, um das kumulierte Einsparpotenzials von energieoptimierten Mobilfunknetzen anzudeuten. Mit der beschleunigten Technikmodernisierung, einem bundesweiten Roaming und einem konsequenten Energiemanagement können im Jahr 2030 erhebliche Einsparungen realisiert werden, wie die folgenden Ergebnisse zeigen werden.

Die untenstehende Abbildung 60 zeigt die Prognose des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Makrozellen in Deutschland von 2019 bis 2030 im kombinierten Szenario. Dies umfasst die vollständige Infrastruktur von RAN und TCN aller Betreiber, die für eine flächendeckende Mobilfunkversorgung mithilfe von Makrozellen notwendig ist.

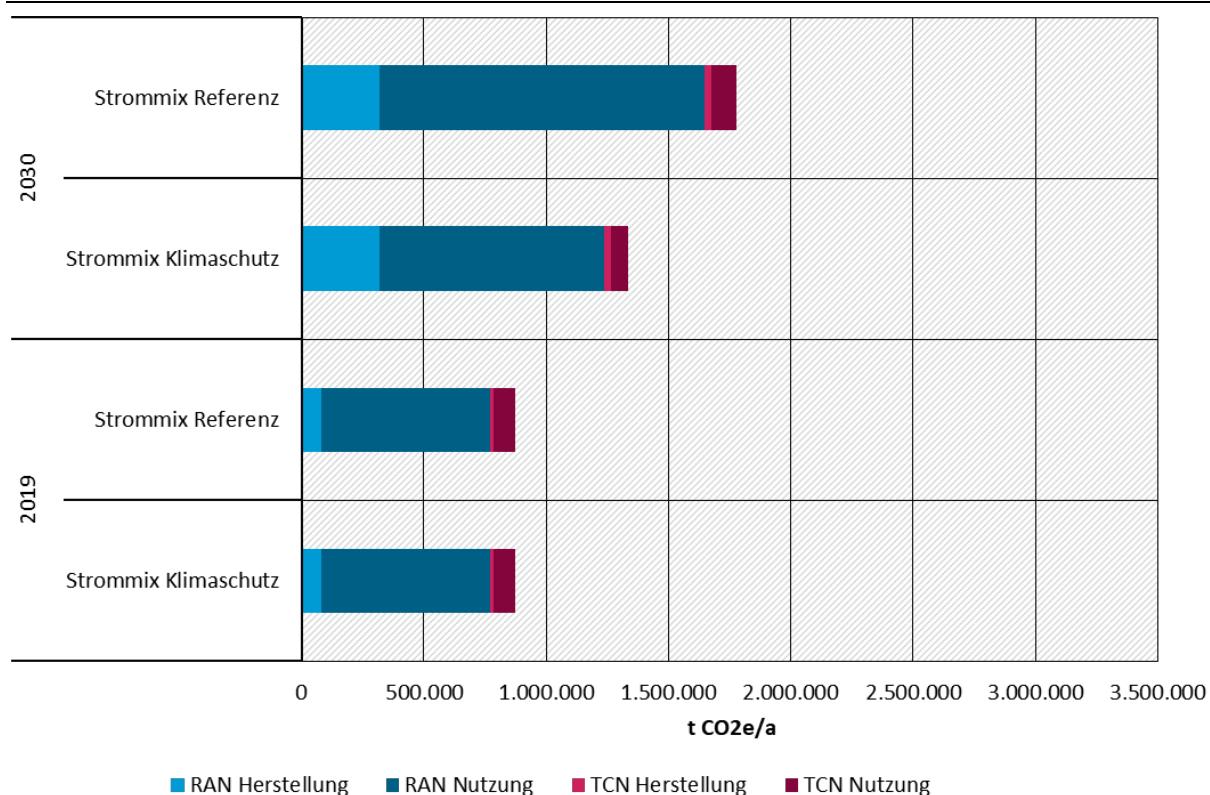
Abbildung 60: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von RAN und TCN (kombiniertes Szenario 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Das bundesweite Roaming, das konsequente Energiemanagement und die beschleunigte Technikmodernisierung erzielen jeweils – in aufsteigender Reihenfolge – ein geringes bis deutliches Energieeinsparpotenzial. Eine energetische und klimaorientierte Optimierung des Mobilfunknetzes ergibt sich jedoch erst aus der Kombination der einzelnen Maßnahmen. So können im Jahr 2030 unter den oben aufgeführten Annahmen Energieeinsparungen von 53 % gegenüber dem Basisszenario erreicht werden. Die Einsparungen wirken dabei sowohl im Funkzugangs- als auch im Transportkernnetz.

Abbildung 61: Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Diese Halbierung des Energiebedarfs spiegelt sich auch in der CO2-Bilanz der Nutzungsphase wider (siehe Abbildung 61). Die Herstellungsphase erfährt allerdings durch die in das Szenario einfließende Technikmodernisierung wieder ungefähr eine Verdopplung der jährlich anteiligen Treibhausgasemissionen. Die Gesamteinsparung von Emissionen überwiegt dennoch durch den höheren Anteil der Nutzungsphase. Hier wird jedoch deutlich, dass eine zunehmende Energieeffizienz die Herstellungsphase langfristig stärker in den Vordergrund rücken wird und eine Energieeinsparung während der Nutzung nicht in jedem Falle den häufigeren Austausch von Geräten rechtfertigt. Auch der klimafreundlichere Strommix führt zu einer Gesamteinsparung von Emissionen, aber hebt den Herstellungsaufwand im Verhältnis deutlicher hervor.

Es ist an dieser Stelle wichtig, zu erwähnen, dass die zugrundeliegenden Umweltdaten für die CO2-Bilanzierung der Herstellungsphase im UTAMO-Modell von 2019 bis 2030 unverändert bleiben, während sich die geräte- und umwelttechnischen Bedingungen der Nutzungsphase anpassen. Dies hat den Hintergrund, dass die Umweltwirkung der Herstellungsphase vielseitigen Einflüssen unterliegt und derzeit nicht abgeschätzt werden kann, ob die Emission von Treibhausgasen bei der Herstellung einzelner Komponenten und Materialien in Zukunft abnehmen, steigen oder konstant bleiben wird (siehe auch 2.4.1).

3.3 Szenarien für Mikrozellen (mm-Welle)

3.3.1 Anwendungsfälle für Mikrozellen

Ein wesentliches Merkmal der fünften Mobilfunkgeneration (5G) ist die Nutzbarmachung eines erweiterten Frequenzspektrums mit größerer (durchgängiger) Bandbreite. Dieses zusätzliche

Frequenzspektrum wird trotz effektiverer Datenübertragungsverfahren von 5G benötigt, um die Kapazität der Funkzugangsnetze zu erhöhen, da Dienste wie Videotelefonie, Videostreaming und AR/VR in der breiten Anwendung sehr datenintensiv sind.

Neben neuen Frequenzen im cm-Wellen-Bereich (FR-1) richtet sich ein Schwerpunkt auf höhere Frequenzen im mm-Wellen-Bereich (FR-2). Die Weltfunkkonferenz WRC19 hat die folgenden mm-Wellen-Frequenzen (jeweils unterteilt in spezifische Frequenzbänder) für den 5G-Einsatz vorgeschlagen (International Telecommunication Union 2019):

- ▶ 24.2-29.5 GHz
- ▶ 37.0-43.5 GHz
- ▶ 45.5-47.0 GHz
- ▶ 47.2-48.2 GHz
- ▶ 66.0-71.0 GHz

Die als 26-GHz-Band bezeichneten Spektren (n258: 24.25-27.5 GHz; n257: 26.5-29.5 GHz) und das als 28-GHz-Band bezeichnete Spektrum (n261: 27.5-28.35 GHz;) bilden den Fokus der aktuellen Technikentwicklung und Markterprobung (Global mobile Suppliers Association (GSA) 2021). Gleichwohl erste 26/28-GHz-Band-Chip-Sätze für 5G-Endgeräte ausgeliefert werden, ist die kommerzielle Nutzung der mm-Welle erst mit der Frequenzvergabe durch die nationalen Regulierungsbehörden möglich.

Der 5G-Millimeterwellenfunk befindet sich derzeit noch in einem frühen Stadium und es sollte angenommen werden, dass eine kommerzielle Nutzung frühestens ab 2023 beginnt. Vor diesem zeitlichen Hintergrund überrascht es kaum, dass die vorhandenen Technik- und Anwendungsdaten nur aus der Forschung und Standardisierung kommen. Sie ergeben kein eindeutiges Abbild der technischen und anwendungsspezifischen Auslegung künftiger mm-Wellensysteme. Allerdings sind die grundlegenden technischen Eigenschaften von mm-Wellensystemen durchaus klar und lassen sich theoretisch begründen. Sie bilden die Basis für die Spezifikation von Anwendungsszenarien.

Das neue mm-Wellen-Spektrum erlaubt aufgrund der großen durchgängigen Bandbreite von 100 MHz bis zu 1 GHz einerseits sehr hohe Datenraten, hat aber andererseits mit zunehmender Frequenz eine immer geringere theoretische Reichweite. Die Reichweite wird technisch durch das Antennendesign, die Sendeleistung und weitere Umgebungs faktoren wie das Wetter und eine direkte, nicht durch Vegetation oder Bebauung behinderte Sichtlinie (*Line of Sight, LOS*) beeinflusst. Die hohe Frequenz (mm-Welle) resultiert in entsprechend kleinen Abmessungen der Antennenelemente. Dieser Umstand erlaubt das Design von aktiven, phasengesteuerten Antennenarrays, welche aus mehreren Sub-Arrays bestehen und diese aus Dutzenden Antennenelementen (vgl. Kap. 2.2.2 und Kap. 3.1.2.3). Mit dieser großen Anzahl an Antennenelementen (Massive MIMO) können einzelne Beams mit vergleichsweise hoher Richtwirkung (Antennengewinn) und damit Reichweite erzielt werden.⁶⁸ Für das 26/28-GHz Band sind je nach Design des Antennensystems theoretische Reichweiten von etwa 300 m bis 500 m möglich. Für die Praxis gehen Experten jedoch von eher 100 m bis 200 m Reichweite aus, da auch ökonomische Gesichtspunkte (Kosten der Antennen) und die konkreten Umgebungsbedingungen (raumdefinierte Dämpfung) berücksichtigt werden müssen.

⁶⁸ Die Sendeleistung hat auch einen Einfluss auf die Reichweite, allerdings werden die Grenzen der Reichweite durch die höheren Frequenzen gesetzt.

Die Performanz der mm-Wellen-Antennensysteme steht also in enger Wechselwirkung mit dem technischen Design und dieses orientiert sich am konkreten Anwendungsfall. Daher wurde im Zuge der 5G-Standardisierung ein Fokus auf die Spezifikation von Anwendungsfällen (*Use Cases*) gelegt. Einen guten Überblick der aktuell angedachten Anwendungen für mm-Wellensysteme liefert die Studie „Stimulating demand for 26 GHz in Europe“ von Plum Consulting (Lavender et al. 2021), die im Auftrag von Qualcomm und Nokia erstellt wurde. Diese Studie beschreibt folgende Anwendungen für die 5G-mm-Welle:

- ▶ **Enhanced Mobile Broadband (eMBB):** Realisierung von hohen Datenvolumen für Videostreaming, Augmented Reality (z.B. bei Notfällen) und Navigation. Diese Dienste werden einer vergleichsweise großen Anzahl an Personen im öffentlichen Raum (z.B. in Fußgängerzonen, Bahnhöfen) zur Verfügung gestellt. Angaben zur Größe und Beschaffenheit der Funkzellen sowie technische Details zum Design bzw. zur Konfiguration potenzieller Antennensysteme werden nicht gemacht.
- ▶ **Fixed Wireless Access (FWA):** Realisierung von mehr oder weniger statisch gerichteten (*semi-static*) Funkstrecken zur Breitbandversorgung privater Haushalte und für die geschäftliche Nutzung. Datenraten im Downlink von bis zu 1 Gbps und 100 Mbps im Uplink über Entfernungen bis zu 500 m werden für möglich gehalten. FWA erfordert eine Sichtverbindung (LOS) oder kürzere Übertragungsstrecken und funktioniert am besten mit einer extern montierten Antenne beim Kunden (Repeater).⁶⁹
- ▶ **High Capacity Locations (Hotspots):** Dieser Anwendungsfall fokussiert auf Sportstadien und kommerzielle Räumlichkeiten mit Innen- und Außenbereichen sowie sehr hohen Personenaufkommen. Hier sollen Ultra HD (4K) Video und *Virtual/Augmented Reality* (VR/AR) mobil möglich sein. Es werden keine Angaben zur technischen Realisierung gemacht.
- ▶ **Industrial Use Cases (Enterprise Communication):** Die Anwendungen im industriellen Umfeld sind äußerst vielfältig, überscheiden sich aber von anderen industriellen Kommunikationslösungen. Der Einsatz von 5G-mm-Wellensystemen wird hier insbesondere für VR/AR Anwendungen und Navigation angedacht.

Die in der 5G-Standardisierung (3GPP Release 15) initial definierten Anwendungsfälle für einen industriellen Einsatz wie *Massive Machine-type Communication (mMTC)* und *Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC)* werden im Kontext des 26/28 GHz Bandes aktuell nicht erwähnt. Hier läuft die Entwicklung auf Basis der cm-Wellen-Bänder. Allerdings weisen Netzausrüster wie ZTE darauf hin, dass sich URLLC mit mm-Welle deutlich besser implementieren lässt als mit dem 3.5 GHz Band (Wenchong und Changxiao 2021).

3.3.2 Annahmen zum Szenario ASK 7 (Outdoor) und ASK 8 (Indoor)

3.3.2.1 Anwendung und Auslegung der Mikrozellen

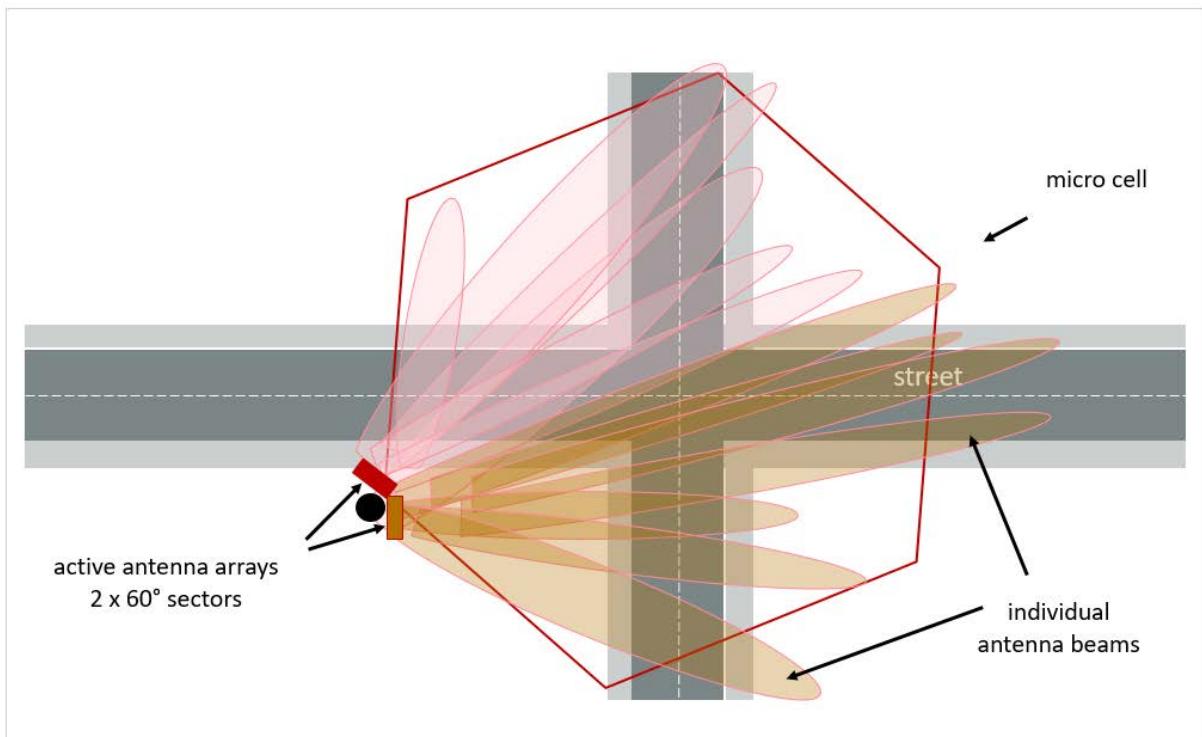
Für den Zweck der vorliegenden Studie werden auf Grundlage der oben dargestellten Anwendungsfälle zwei prinzipielle Implementierungen für Mikrozellen untersucht. Diese beiden Szenarien werden im Sachbilanzmodell als Antennenstandortkategorien ASK 7 und ASK 8 bezeichnet und sind wie folgt definiert:

⁶⁹ Das französische Unternehmen ORANGE hat mit Samsung und CISCO in den Jahren 2019 und 2020 in Rumänien Versuche zu FWA durchgeführt. Die Versuche wurden im n257-Band unter Verwendung von Innen- und Außenantennen (4x4 MIMO mit analogem Beamforming) durchgeführt.

- ▶ **ASK 7:** Außenbereichsanwendung (Outdoor) als Verdichtungszelle zur Versorgung von öffentlichen Räumen, Einkaufsstraßen, Bahnhöfen, etc. mit sehr hohen Datenraten (eMMB/Hotspot). Die Mikrozelle nutzt Frequenzen im 26/28 GHz-Band mit Kanalbandbreiten von 100 MHz bis 400 MHz. Die Funkzelle ist in zwei 60°-Sektoren aufgeteilt. Die Antennensysteme sind als Massive MIMO (2 x 32T32R) mit hybrider Beamforming-Architektur ausgelegt. Für den Kanal werden -120 dB bei LOS und -150 dB bei NLOS angenommen. Die durchschnittliche Sendeleistung pro Transceiver ist 300 mW. Die Antennensysteme haben unter dieser Annahme eine durchschnittliche Reichweite von rund 150 m. Diese Reichweite definiert die Größe der Funkzelle.
- ▶ **ASK 8:** Innenbereichsanwendung (Indoor) im industriellen oder gewerblichen Umfeld zur Sicherstellung von VR/AR Diensten, Navigation und hochauflösendem Videostreaming (Industrial/Campus). Die Mikrozelle nutzt ebenfalls Frequenzen im 26/28 GHz-Band mit Kanalbandbreiten von 100 MHz bis 400 MHz. Auch diese Funkzelle ist in zwei 60° Sektoren aufgeteilt, allerdings mit reduzierter Massive MIMO Konfiguration (2 x 16T16R). Die durchschnittliche Sendeleistung pro Transceiver beträgt 100 mW. Die Antennensysteme haben unter dieser Annahme eine durchschnittliche Reichweite von rund 30 Metern.

Bei beiden Szenarien werden die Funkzellen durch ähnlich designete Antennensysteme erzeugt, die einen Massive MIMO Ansatz mit hybrider Beamforming darstellen und im Frequenzbereich 26/28 GHz arbeiten. Die Mikrozellen werden im Berechnungsmodell als hexagonale Flächen abgebildet. Die Größe ergibt sich aus der Annahme einer durchschnittlichen Reichweite des Signals in guter Qualität in Kombination mit zwei 60°-Sektoren. Die Abbildung 62 zeigt das Konzept einer Outdoor-Mikrozelle (ASK 7) in einer schematischen Darstellung. Wie die Abbildung verdeutlicht, gibt es je nach Umgebungssituation unterschiedliche Anforderungen an die Sektorenbildung. Da mm-Wellensysteme einer hohen Signaldämpfung durch Wetter, Vegetation, Fenster und Wände unterliegen, wird für größere Reichweiten eine direkte Sichtachse (*Line-of-Sight, LOS*) benötigt.⁷⁰ Da in Städten aber beispielsweise meist eher engere Straßenzüge oder Verkehrstrassen existieren, die gezielt versorgt werden sollen, werden auch eher schmale und lange Funkzellen benötigt. 5G-mm-Wellensysteme eignen sich für die Bildung schmälerer Sektoren und Funkzellen sehr gut. Die Auslegung der Szenarien ASK 7 und ASK 8 mit entsprechenden Antennensystemen versuchen, diesen Trend abzubilden.

⁷⁰ Dies ist eine Vereinfachung. Da Millimeterwellen auch von Oberflächen reflektiert werden, kann es je nach Bebauung (Topologie) zu einer sehr unterschiedlichen Wellenausbreitung kommen. Dementsprechend entstehen auch sehr unterschiedliche geformte Funkzellen.

Abbildung 62: Schematische Darstellung einer Mikrozelle ASK 7

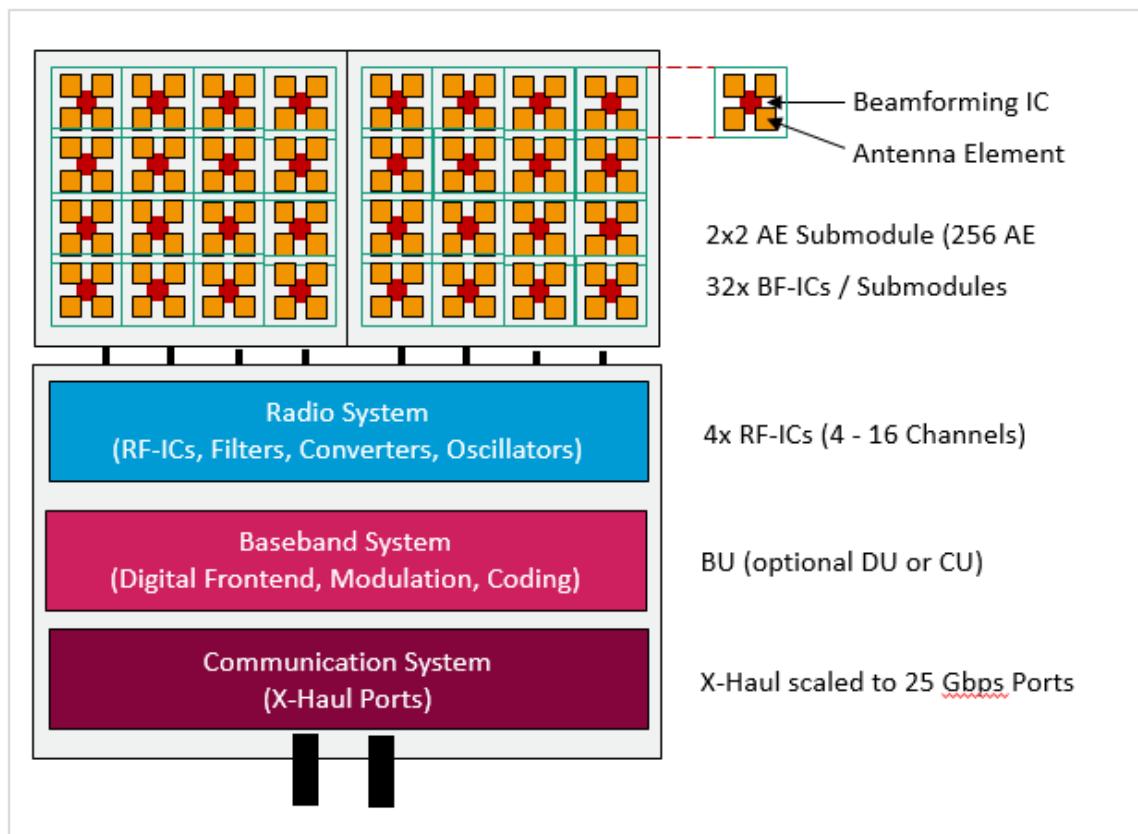
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Größe der Funkzelle sowie Annahmen zum Kanal (Linkbudget) werden als Ausgangsgröße angesetzt, um ein angemessenes Antennensystem zu konfigurieren. Entsprechend wurden Festlegungen zum Design der Antennenarrays und der Sektorenkonfiguration getroffen. Diese berücksichtigen Parameter wie die Sendeleistung, den benötigten Antennengewinn, Grad der Systemintegration und die Datentransportkapazität. Es werden für eine Mikrozelle in beiden Szenarien je zwei Antennensysteme mit einem Öffnungswinkel von je 60° benötigt (2 Sektoren). Da zum Zeitpunkt der Studie noch keine Massenprodukte und Anwendungsdaten aus einer kommerziellen Marktimplementierung vorlagen, mussten Annahmen für die Konfiguration der Antennensysteme getroffen werden. Hierbei stützt sich die Studie maßgeblich auf Informationen aus 5G-Forschungsprojekten unter Beteiligung des Fraunhofer IZM.⁷¹ Hinsichtlich eines exemplarischen Antennen- und Systemdesign wurden aber insbesondere auch Konzepte und Daten aus der Fachliteratur verwendet.⁷² Die Abbildung 63 zeigt in einer schematischen Darstellung den Aufbau des mm-Wellensystems am Beispiel der ASK 7.

⁷¹ Beispielsweise das europäische Forschungsprojekt SERENA und das Fraunhofer-interne Projekt TRAICT.

⁷² Die Annahmen zum Design des Antennensystems orientieren sich u.a. an folgender Literatur: (Chung et al. 2020; Nafe et al. 2019; Ma et al. 2019).

Abbildung 63: Prinzipielles Design eines mm-Wellenantennensystems für ASK 7



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

3.3.2.2 Konfiguration des Antennensystems ASK 7 (Outdoor)

Die Funkzelle wird durch zwei Antennensysteme mit je 32T32R (gesamt 64T64R) gebildet. Ein Antennensystem besteht aus 32 Sub-Antennenmodulen mit je 2x2 Antennenelementen und einem separat steuerbaren Beamforming-IC mit Leistungsverstärker. Die Sub-Antennenmodule werden durch zwei RF-ICs angesteuert, die insgesamt 8 Transceiver-Pfade erzeugen. Das Funkmodul beinhaltet alle funktionalen Komponenten für die Signalanpassung und Verteilung, die Analog-Digital-Wandlung und die Schnittstelle zum Basisbandmodul. Für die Grundfunktionalität bzw. den Bereitschaftszustand (*Idle*) des Funkmoduls wird eine konstante elektrische Leistungsaufnahme von 20 Watt angesetzt. Die Annahmen für die lastabhängige Leistungsaufnahme korrelieren mit Aspekten wie der Datenrate und Anzahl der Transceiver-Pfade.

Eine der wichtigsten Annahmen zur Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme betrifft die abgegebene Sendeleistung der Sub-Antennenmodule bzw. Leistungsverstärker sowie der durchschnittliche Wirkungsgrad. Für den ASK 7 mit insgesamt 64 Sub-Antennenmodulen wird eine äquivalente isotrope Strahlungsleistung (ERIP) von 43 dBm angenommen.⁷³ Daraus folgt, dass die Sendeleistung eines Submoduls 300 mW nicht überschreiten sollte. Dieser Wert passt noch zu CMOS Leistungsverstärkern in dem angedachten Frequenzbereich 26/28 GHz. Der

⁷³ 43 dBm entspricht 19,95 Watt

Wirkungsgrad wird mit 25 % angesetzt, wobei im Modell mit einem effektiven Wirkungsgrad von 22,5% gerechnet wird.⁷⁴

Auch bezüglich des Basisbandmoduls wird eine konstante und lastvariable elektrische Leistungsaufnahme angenommen. Die konstante Grundleistungsaufnahme wird mit 25 W angesetzt und berechnet sich aus Annahmen für die einzelnen funktionalen Komponenten (Systemboard). Die variable Leistungsaufnahme des Basisbandmoduls korreliert mit der Summe der Kanalbandbreiten der vier Transceiver-Pfade, dem angenommenen Modulationsverfahren (QAM256) und dem Betriebszustand (Auslastung). Diese Annahmen führen gegenüber den cm-Wellensystemen zu einer um etwa Faktor 5 höheren elektrischen Leistungsaufnahme bei gegenwärtiger Technikgeneration. In der Modellberechnung wirkt sich dieser Umstand sehr stark auf das Gesamtergebnis aus, wie in der Ergebnisdarstellung in 3.3.3 noch gezeigt wird. Annahmen zur Technikverbesserung der digitalen Signalverarbeitung zeigen entsprechend positive Effekte auf das Gesamtergebnis.

Das theoretische Datentransportvolumen bestimmt auch die elektrische Leistungsaufnahme der Kommunikationsschnittstellen. Dieser Energiebedarf ist gegenüber einem cm-Wellensystem mit in Summe rund 25 Watt ebenfalls deutlich höher, gleichwohl für die mm-Wellensysteme bereits sehr energieeffiziente Kommunikationsschnittstellen angenommen wurden.

Die Wandlungsverluste der Stromversorgung werden mit durchschnittlichen Wirkungsgraden von 86 % abgeschätzt. Für das Basisbandmodul wird in Abhängigkeit des Betriebszustandes eine zusätzliche Kühlleistung im Low Load von 5 %, im Mid Load von 10 % und High Load von 15 % der BU-Leistungsaufnahme beaufschlagt.

3.3.2.3 Konfiguration des Antennensystems ASK 8 (Indoor)

Das Antennensystem für die Innenanwendung (ASK 8) ist im Prinzip gleich aufgebaut wie für die Außenanwendung (ASK 7). Der Unterschied besteht in der MIMO-Konfiguration aus zwei 16T16R Antennensystemen mit vier Transceiver-Pfaden und einer Sendeleistung von lediglich 100 mW pro Sub-Antennenmodul. Die sonstigen Annahmen zum Funkmodul, Basisbandmodul, den Kommunikationsschnittstellen und zu den Wandlungsverlusten der Stromversorgung erfolgen analog zum ASK 7, skalieren jedoch mit der geringeren Anzahl der Transceiver-Pfade und der sich daraus ergebenden Datentransportkapazität.

3.3.2.4 Bestand und Nutzungsmuster

Da unklar ist, in welchem Umfang diese Art von Mikrozellen (oder auch andere potenzielle mm-Wellen-Anwendungen wie FWA) zum Einsatz kommen könnten, wird anstelle von Daten aus dem Funkzellenverteilungsmodell ein einfaches Flächenszenario mit folgenden Annahmen berechnet:

- ▶ 1% der Fläche Deutschlands für ASK 7; bei einem Funkzellendurchmesser von 150 m werden hierfür insgesamt rund 245.000 Antennenstandorte benötigt
- ▶ 0,1% der Fläche Deutschlands für ASK 8: bei einem Funkzellendurchmesser von 30 m werden hierfür insgesamt rund 612.000 Antennenstandorte benötigt

Beide Szenarien dienen der Zielstellung, einen Eindruck von der möglichen Größenordnung des Energie- und Ressourcenbedarfs von mm-Wellensystemen zu erhalten. Die Flächenannahmen

⁷⁴ Annahmen zum Leistungsverstärkerwirkungsgrad sind sehr schwierig. Gegenwärtige Produkte haben Wirkungsgrade von teilweise unter 15 %. Berücksichtigt man aber den verbleibenden Zeitraum bis zur Implementierung von mm-Wellensystemen (ab etwa 2023/2014), könnten bereits deutlich bessere Technologien am Markt sein.

wurden so gewählt, dass sie von der benötigten Anzahl an Standorten und Antennensystemen her in einem wirtschaftlich akzeptablen Rahmen bleiben.

Schließlich haben die Annahmen zum Nutzungsprofil – d.h. die Dauer eines Betriebszustandes in Stunden pro Tag – eine nicht unerhebliche Auswirkung auf die Berechnung des absoluten Energiebedarfs. Folgende Annahmen werden für die Szenarien getroffen:

- ▶ ASK 7: Das Antennensystem dient als zusätzliche Verdichtungszelle und wird 10 Stunden pro Tag aktiv mit hoher Auslastung betrieben. Dieser Ansatz soll bereits ein aktives Energiemanagement im Sinne eines bedarfsgerechten Zu- und Abschaltens abbilden.
- ▶ ASK 8: Das Antennensystem wird im industriellen oder gewerblichen Umfeld dauerhaft 24 Stunden lang mit einer mittleren Auslastung (Mid Load) betrieben. Hier wird exemplarisch angenommen, dass einerseits dauerhafte Datenstreams (z.B. von Kamera- oder Robotersystemen) eine „Grundlast“ erzeugen und in periodischen Abständen die mobile Datentransportkapazität von zusätzlichen Anwendungen wie ein zeitweiser Betrieb von VR/AR-Systemen (z.B. bei Wartungs- und Routinearbeiten) oder Besucherverkehr hinzukommen.

Die Annahmen zum Basisszenario Millimeterwelle zeigt die Tabelle 38 nochmals im Überblick.

Tabelle 38: Annahmen Basisszenario Mikrozellen

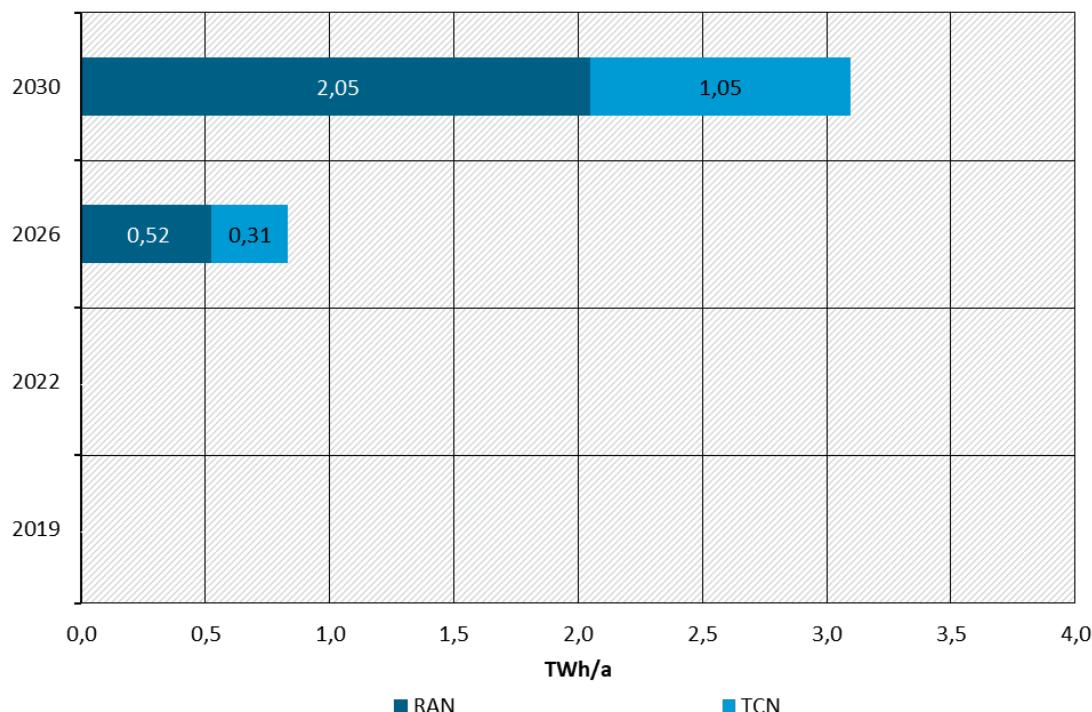
Maßnahme	Mikrozelle Outdoor (ASK 7) Szenario 2030	Mikrozelle Indoor (ASK 8) Szenario 2030
Frequenzband:	26 GHz	28 GHz
Flächenabdeckung:	1,0% Fläche Deutschland (0,33% pro Netzbetreiber)	0,1% Fläche Deutschland (0,03% pro Netzbetreiber)
Durchmesser Funkzelle:	150m	30m
Anzahl Standorte:	245.000	612.000
Nutzungsprofil:	<i>Low-load: 0h</i> <i>Medium-load: 0h</i> <i>High-load: 10h</i>	<i>Low-load: 0h</i> <i>Medium-load: 24h</i> <i>High-load: 0h</i>
Konventionelle Technikmodernisierung	3% Verbesserung	3% Verbesserung
Anteil der theoretischen Datentransportkapazität als Eingangsgröße im TCN-Modell	10%	10%

3.3.3 Berechnungsergebnisse

Die Abbildung 64 zeigt den jährlichen Energiebedarf für das Szenario ASK 7 (Mikrozelle Outdoor) für die Jahre 2026 und 2030. Für eine Abdeckung von 1 % der Fläche Deutschlands im Jahr 2030 entsteht ein elektrischer Strombedarf von insgesamt 3,1 TWh. Im Vergleich zu den Makrozellen, welche das gesamte Bundesgebiet abdecken und hierfür 7,51 TWh im Jahr 2030 benötigen, erscheint der Wert recht hoch. Zieht man jedoch in Betracht, dass die Mikrozellen gegenüber den Makrozellen bei vergleichbarer Energiemenge eine 16-fach höhere mobile

Datentransportkapazität haben, wird zumindest in der Größenordnung das funktionale Potenzial und die relative Energieeffizienz der Millimeterwelle deutlich.

Abbildung 64: Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 7 Outdoor-Mikrozellen in Deutschland (Basisszenario 2019-2030)

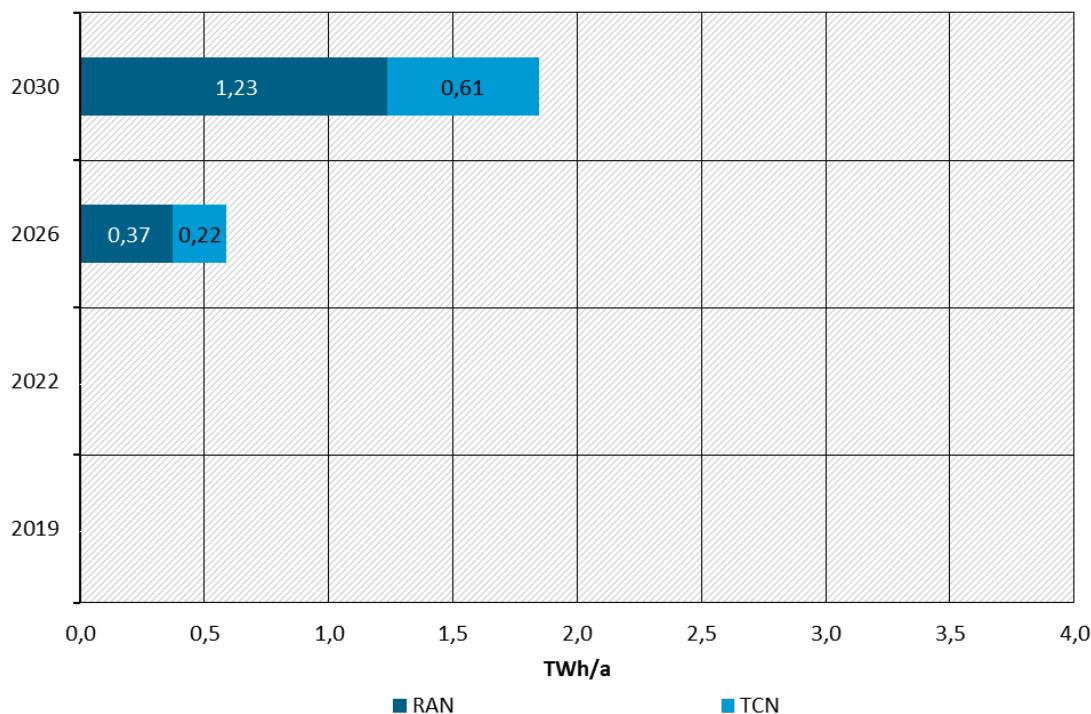


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Binnengliederung des Energiebedarfs unterscheidet sich relativ stark von den Makrozellen. Im Szenario ASK 7 hat das Funkzugangsnetzes (RAN) mit 2,16 TWh/a und rund 67 % zwar auch den größten Anteil, allerding ist der Energiebedarf des Transportkernnetzes (TCN) mit 1,05 TWh/a (rund 33 %) anteilig viel höher. Die Ursache hierfür liegt im deutlich höheren Datentransportvolumen. Damit steigt nicht nur der Energiebedarf der optischen Netztechnik, sondern insbesondere der Daten- und Signalverarbeitungsaufwand und damit der Energiebedarf der Vermittlungs- und Netzsteuerungstechnik.

Das hohe Datenvolumen zeigt sich noch gravierender im massiv steigenden Energiebedarf der digitalen Signalverarbeitung im Funkzugangsnetz. Der Energiebedarf des Basisbandmodules (BU) nimmt im mm-Wellen-Szenario überproportional zu und ist um etwa einen Faktor 1,5 größer als das Funkmodul (RU). Im Vergleich zu den cm-Wellensystemen der Makrozellen, bei denen die RU anteilig mit einem Faktor 4,5 gegenüber der BU deutlich mehr Energie benötigt, dreht sich hier das Verhältnis um. Die Ursache hierfür ist der mit der Datenrate und dem Datenvolumen massiv steigende digitale Signalverarbeitungsbedarf. Da die Annahmen im Basisszenario für den Energieaufwand pro Bitrate auf einer einfachen Progression aktueller Leistungsdaten mit einer jährlichen Verbesserung um 3 % aufsetzen, könnte der Energiebedarf doch deutlich überschätzt sein. Daher wird zum Vergleich das Szenario mit beschleunigter Technikverbesserung in Abbildung 65 gezeigt, welches von einer jährlichen Verbesserung der Prozessor-Hardware von 15 % ausgeht.

Abbildung 65: Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 7 Outdoor-Mikrozellen in Deutschland (Technikmodernisierung 2019-2030)

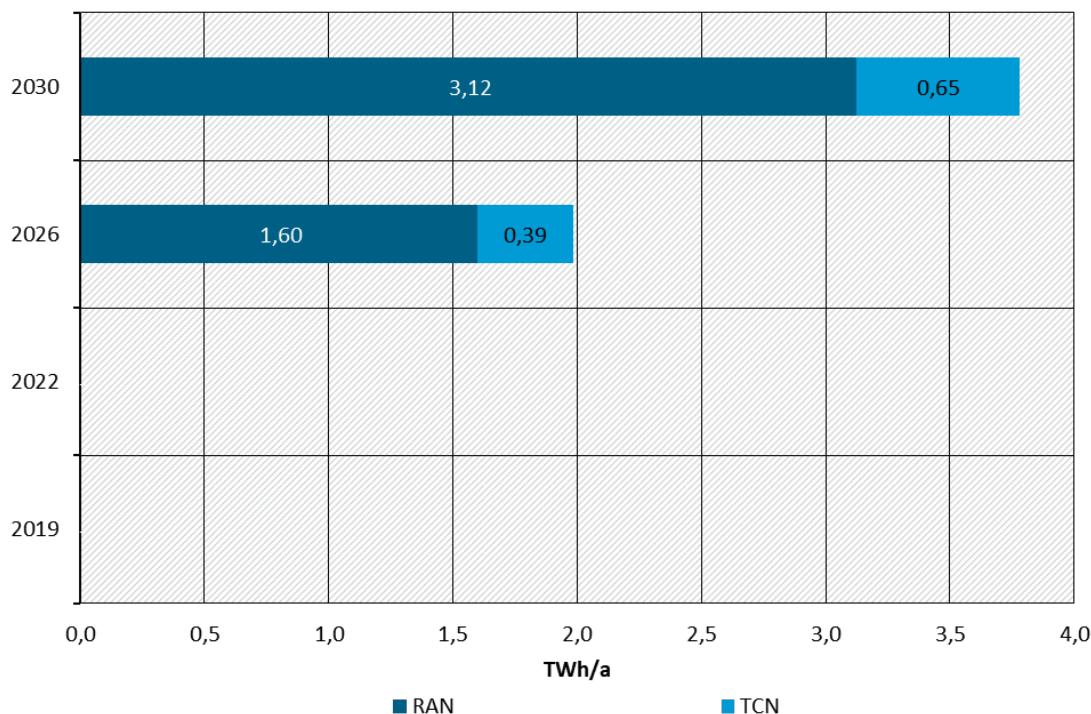


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der direkte Vergleich des elektrischen Energiebedarfs des RAN im Jahr 2030 zeigt einen sehr großen Unterschied. Hauptsächlich aufgrund der deutlich effizienteren Signalverarbeitung sinkt der Energiebedarf von 2,16 TWh/a im Basisszenario auf 1,28 TWh/a im Technikverbesserungsszenario. Der gleiche Effekt entsteht im TCN, wo der Energiebedarf von 1,05 TWh/a auf 0,61 TWh/a abnimmt. In Summe wird 41 % weniger Energie benötigt, da auch die kühlungsbedingten Aufschläge und Stromwandlungsverluste sinken. Das anteilige Verhältnis zwischen rund zwei Dritteln RAN und ein Drittel TCN ändert sich aber kaum.

Eine etwas andere Situation zeigt sich im zweiten mm-Wellen-Szenario ASK 8 (Indoor-Mikrozellen). Die Abbildung 66 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Jahre 2019 und 2030, welche ebenfalls einen hohen Energiebedarf prognostizieren. Für das Jahr 2030 werden demnach insgesamt 3,87 TWh benötigt, um 0,1% der Fläche Deutschlands zu versorgen.

Abbildung 66: Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 8 Indoor-Mikrozellen in Deutschland (Basisszenario 2019-2030)



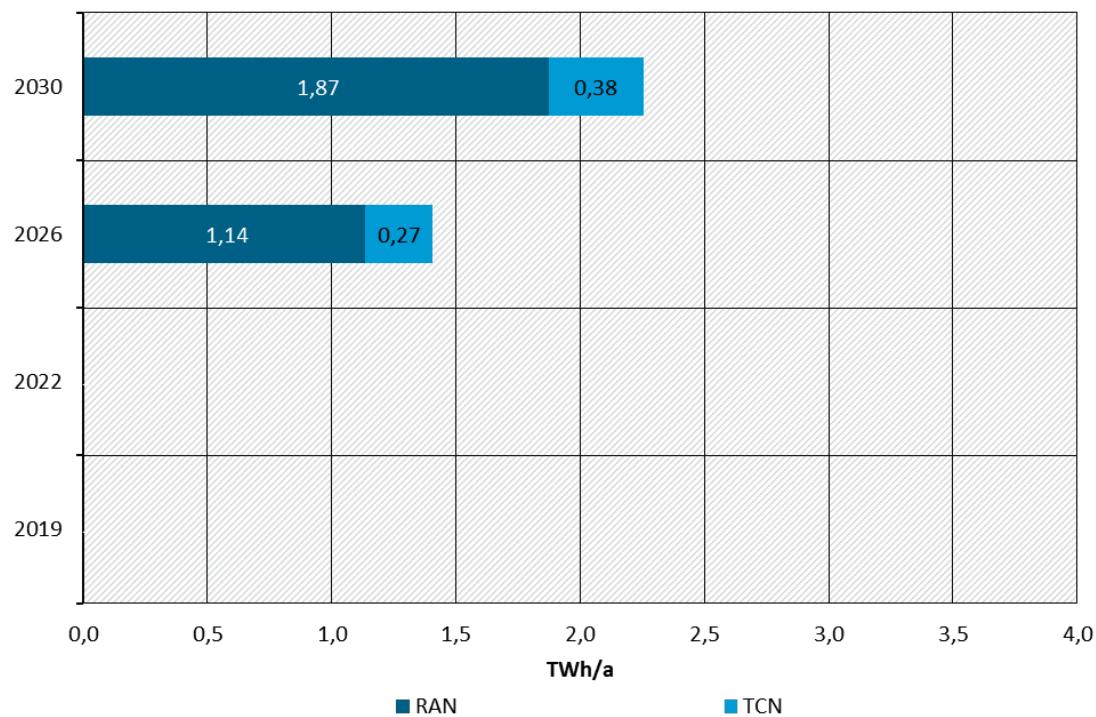
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Gegenüber dem Szenario ASK 7 gibt es einige bemerkenswerte Unterschiede. Das theoretisch realisierte Datenvolumen von ASK 8 beträgt gegenüber ASK 7 nur etwa 63 %. Dieser geringere Wert ist einerseits auf die Antennen- bzw. Transceiver-Konfiguration und andererseits auf das deutlich andere Nutzungsmuster von 24 Stunden durchgängig mittlere Last zurückzuführen.

Auffällig sind zunächst der um über eine 1 TWh/a deutlich höhere Energiebedarf des RAN und der gleichzeitig um 0,4 TWh/a geringere Energiebedarf des TCN. Hier sieht man den Effekt des Dauerbetriebes über 24 Stunden bei mittlerer Last in der ASK 8, was in Summe ein geringeres Datentransportvolumen erzeugt als die 10 Stunden bei hoher Last und 14 Stunden im abgeschalteten Zustand in der ASK 7. Der Vergleich des TCN zeigt sehr klar, wie das absolute Datenvolumen den Energiebedarf der rechenintensiven Netzelemente des TCN beeinflussen. Hingegen wird im RAN deutlich, dass die 14 Stunden Aus-Zustand in der ASK 7 zu einer Energieeinsparung führen. Dieser Vergleich ist nicht ganz aussagekräftig, da sich die Antennensysteme in der Konfiguration und Performanz unterscheiden. Dennoch sollte der über das unterschiedliche Nutzungsmuster dargestellte Effekt eines Energiemanagements in der ASK 7 durchaus zur Kenntnis genommen werden.

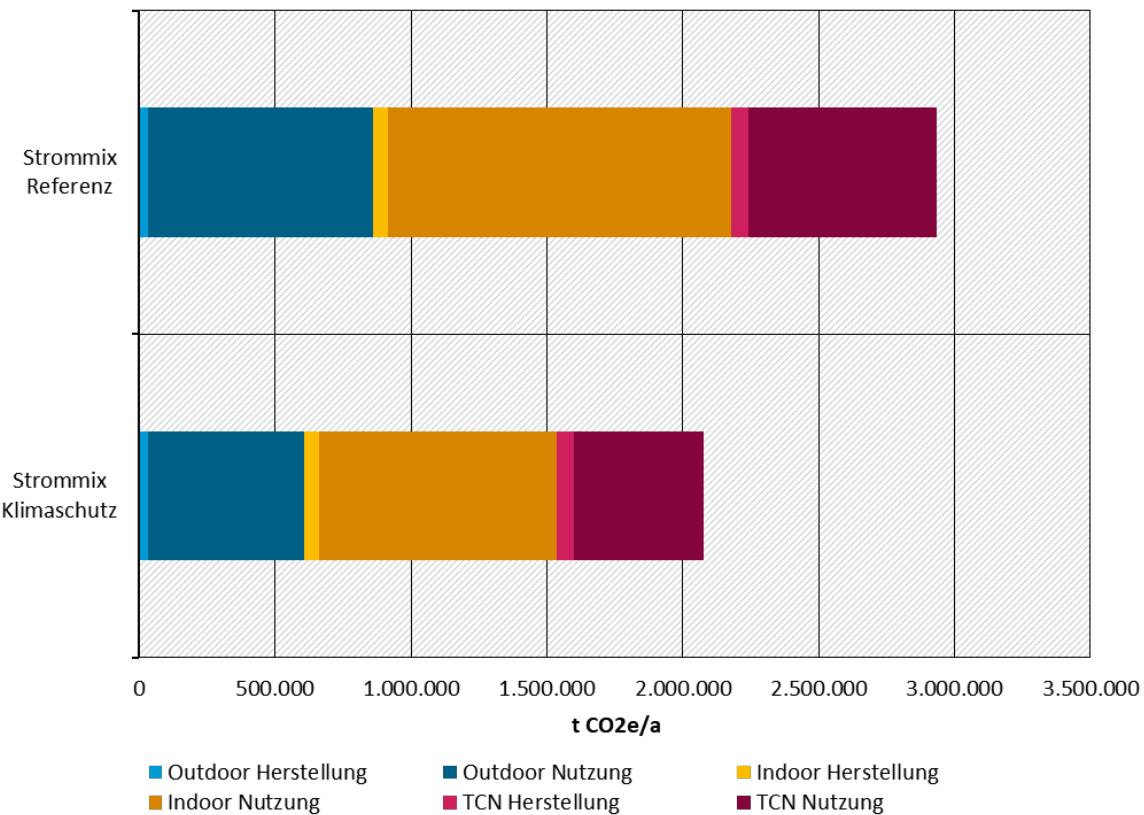
Die Abbildung 67 zeigt analog zur ASK 7 für die ASK 8 die Energieeinsparung durch eine beschleunigte Technikverbesserung. Diese fallen in ähnlichen Größenordnungen aus und beruhen auf den gleichen Mechanismen.

Abbildung 67: Prognose des elektrischen Energiebedarfs von ASK 8 Indoor-Mikrozellen in Deutschland (Technikmodernisierung 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der Energiebedarf in der Nutzungsphase ist auch hinsichtlich der gesamten CO2-Bilanz für beide mm-Wellen-Szenarien substanzial. Die Abbildung 68 zeigt die Prognosen der CO2-Bilanz für die beiden unterschiedlichen Strommix-Annahmen sowohl für ASK 7 als auch ASK 8 mit Ausweisung der anteiligen Herstellungs- und Nutzungsphase.

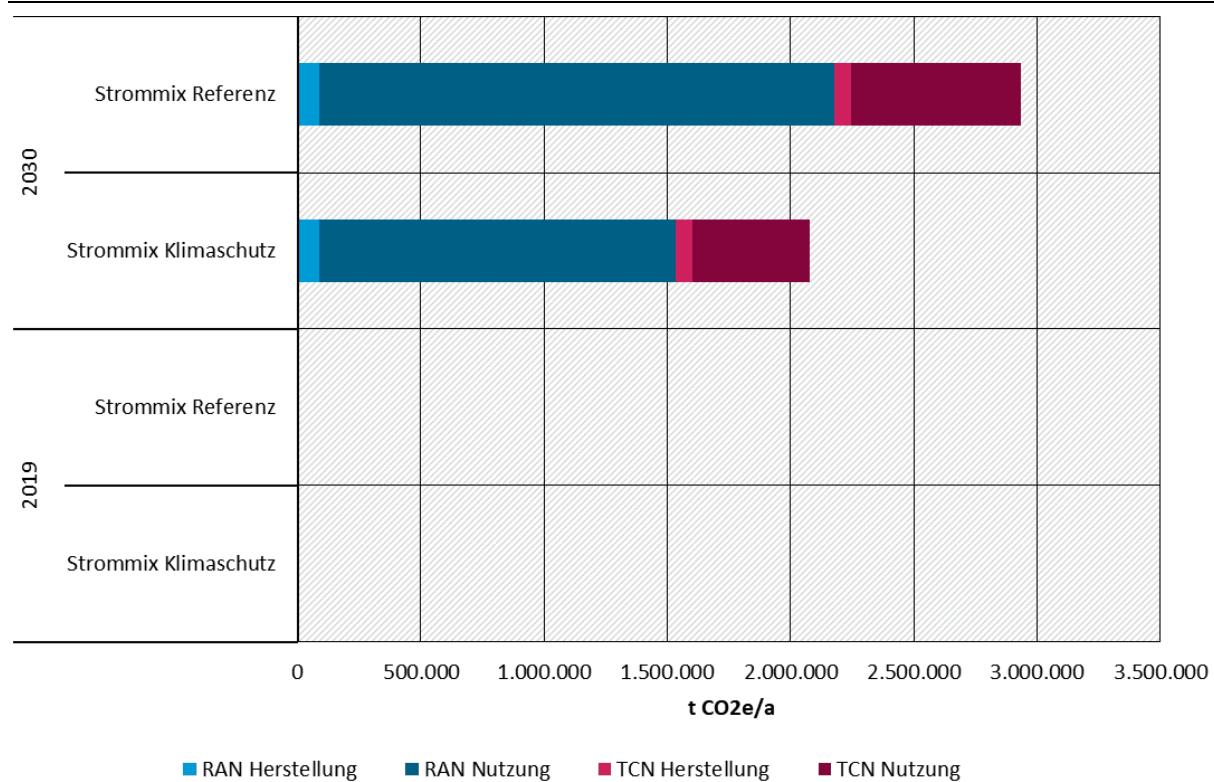
Abbildung 68: Vergleich CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, 2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Herstellungsphase der mm-Wellensysteme ist trotz der hohen Anzahl an ICs mit etwa 3 % am gesamten Carbon Footprint sehr gering. Die Abschätzung der Herstellungsphase stellt besondere Herausforderungen an die Datenbasis. Hier unterliegt die UTAMO-Studie starken Limitationen. Die Abschätzung der Herstellungsphase wird als sehr rudimentär beurteilt. Sie zeigt den Bedarf für weitere Projekte und Untersuchungen zur Ökobilanzierung von Mobilfunksystemen.

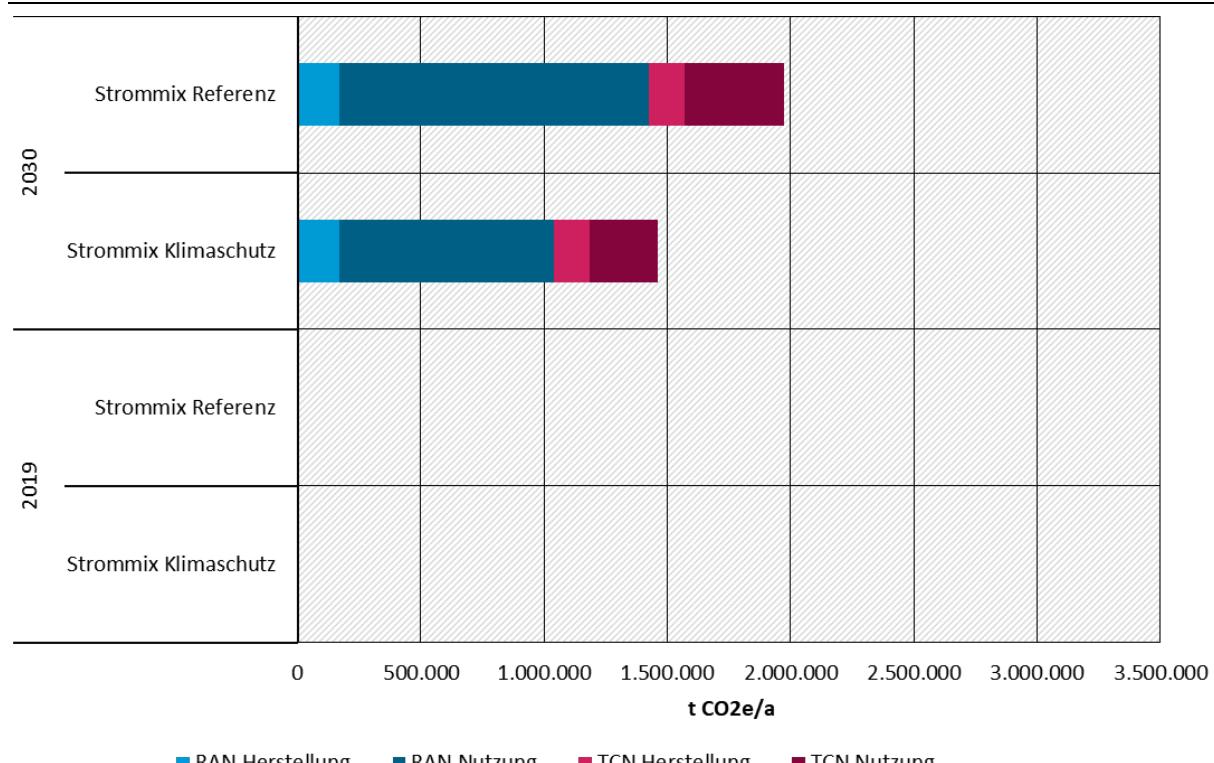
Auch in Hinblick auf die CO2-Bilanz (siehe Abbildung 69) lässt sich erkennen, dass die absoluten jährlichen Treibhausgasemissionen der Mikrozellen trotz der geringen Flächenabdeckung in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die der Makrozellen (2,3 Mio. t CO2e/a für die Makrozellen im Basisszenario 2030 mit Klimaschutzstrommix und 2,1 Mio. t CO2e/a für die Mikrozellen). Der Herstellungsanteil ist etwas geringer und das TCN nimmt insgesamt einen größeren Anteil an.

Abbildung 69: Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, Basisszenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 70: Vergleich der CO2-Bilanz von Klimaschutz- und Referenzstrommix (Mikrozellen, Technikmodernisierung 2019 und 2030)

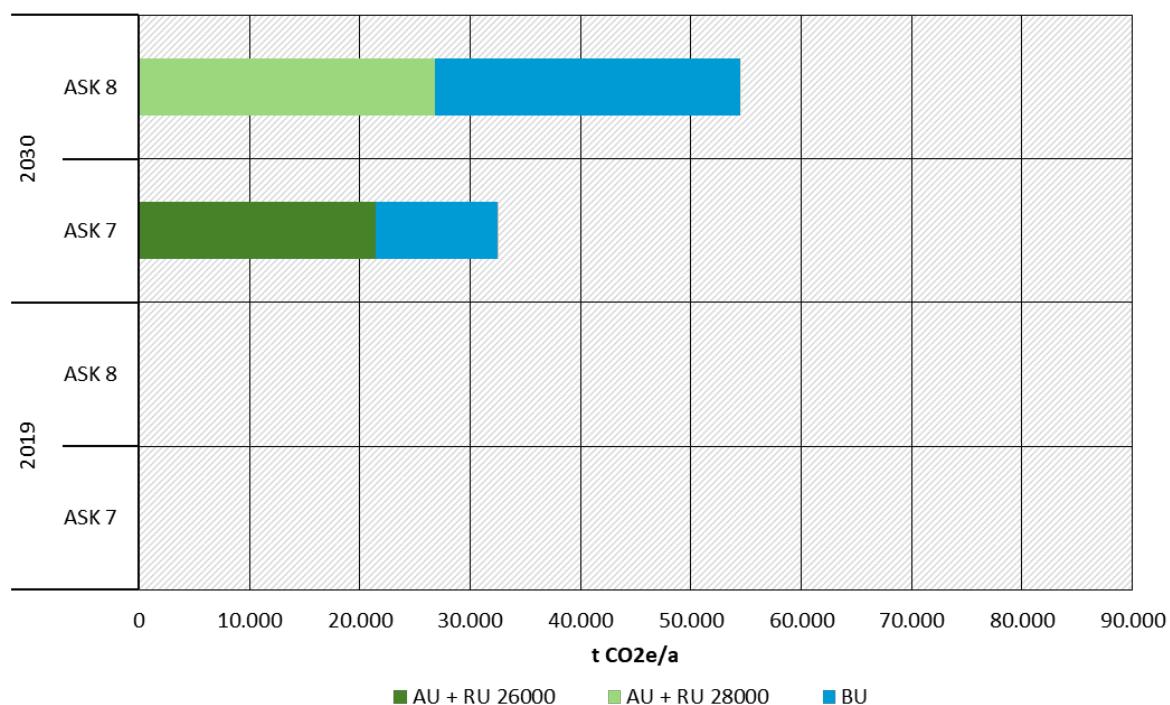


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Die Emissionseinsparung durch die Technikmodernisierung beträgt rund 30 % (siehe Abbildung 70). Damit wirkt sich diese Maßnahme bei den Mikrozellen ähnlich stark aus wie bei den Makrozellen (36 %).

Die Mikrozellen bestehen aus einem kombinierten Antennen-/Funkmodul und einem Basisbandmodul und damit aus deutlich weniger Komponenten als die Makrozellen. In Abbildung 71 ist zu erkennen, dass die 28 GHz-Module der Indoor-Mikrozellen unter Berücksichtigung der Gesamtanzahl eine höhere Umweltwirkung haben als die 26 GHz-Module der Outdoor-Mikrozellen. Der größere Unterschied liegt jedoch in den Basisbandmodulen, wodurch die Indoor-Mikrozellen eine ungefähr anderthalbmal so hohe CO₂-Bilanz aufweisen.

Abbildung 71: Prognose der absoluten CO₂-Bilanz der Herstellung von Mikrozellen-Komponenten in Deutschland (2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Zwischenfazit

Der elektrische Energiebedarf von mm-Wellensystemen wird maßgeblich durch folgende Aspekte beeinflusst:

- ▶ Eine relativ geringe Reichweite auf Grund der hohen Frequenz im 26/28 GHz Band: Die geringe Reichweite wird zwar teilweise über eine Erhöhung der Antennenzahl kompensiert (Massive MIMO), führt aber zu einer Vervielfachung der Antennenpfade mit entsprechend vielen Hardware-Komponenten (RF-Chains).
- ▶ Ein vergleichsweise geringer Wirkungsgrad der Leistungsverstärker von deutlich unter 25 % in den vorgesehenen Leistungsstufen, was zu sehr hohen energetischen Verlusten führt.
- ▶ Ein steigender Rechenbedarf für die analog-digital Wandlung (ADC/DAC) sowie für die digitalen Funktionalitäten des Beamforming im Funkmodul.

- ▶ Ein deutlich steigender Rechenbedarf für die digitale Signalverarbeitung im Basisbandmodul: Der Grund hierfür ist das substanziell höhere Datentransportvolumen. Dieses wird durch Maßnahmen wie der Verwendung von um Faktor 10 größeren Kanalbandbreiten (400 MHz), hoch performanten Modulationsverfahren (QAM 256) und kooperierenden Datenübertragungsverfahren (CoMP) realisiert.
- ▶ Ein steigender Energiebedarf für den weiteren Datentransport (X-Haul): Je nach Verortung der digitalen Signalverarbeitung als Distributed Unit (DU) nahe am Funkmodul oder als Centralized Unit (CU) weiter im Aggregationsnetz (Cloud) muss der Front- und Backhaul ausgelegt werden. Das theoretisch sehr hohe Datenvolumen erfordert entsprechende Datentransportkapazität (Glasfaserkabel oder auch Richtfunk).

Dem erhöhten elektrischen Energiebedarf kann wie folgt begegnet werden:

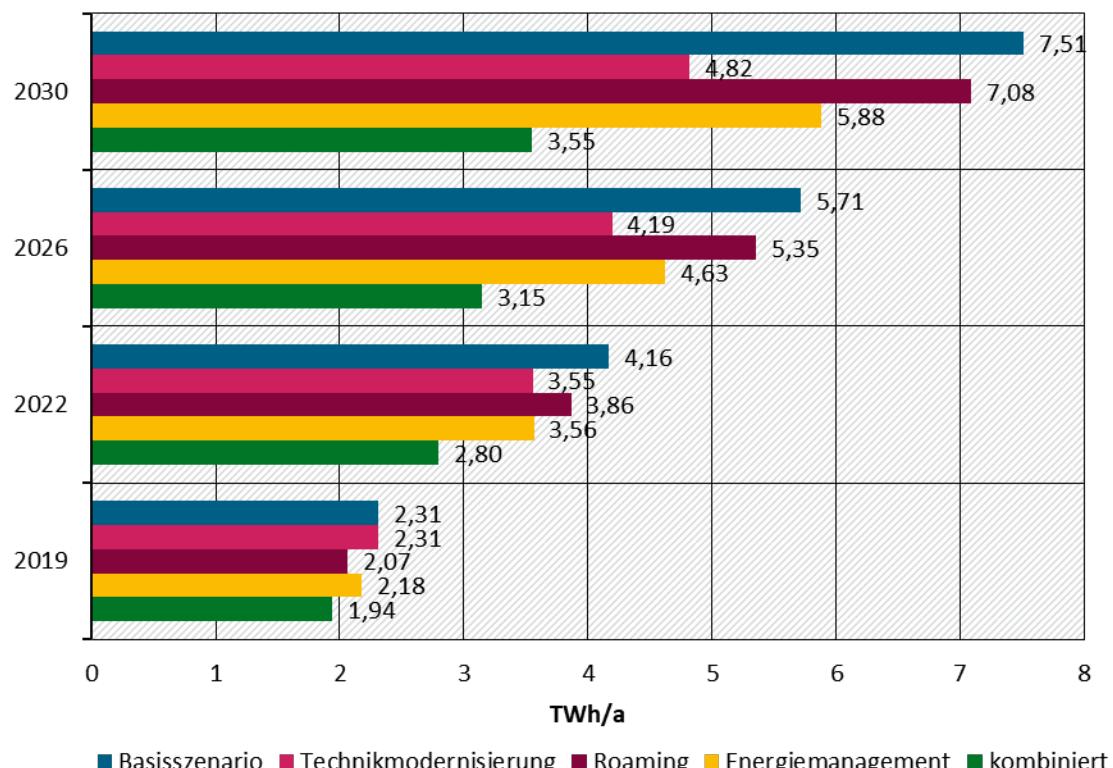
- ▶ Die bedarfsgerechte Dimensionierung der Funkzelle: Dies ist ein Maßnahmenpaket, welches die Auslegung der Sektoren (z.B. mehrere schmale Sektoren mit höherer Reichweite), die Auslegung des Antennenmoduls (Anzahl der aktiven Antennenpfade), Auslegung des Beamforming (analog, hybrid, digital) und die Anzahl und Bandbreite der Kanäle betreffen. Diese Konfiguration beeinflusst die flächenbezogene Datentransportkapazität, was wiederum den Aufwand und damit den Energiebedarf für die digitale Signalverarbeitung bestimmt.
- ▶ Ein beschleunigter Einsatz modernster Technologien: Ein technologisches Energieeinsparpotenzial ist auch in den kommenden Jahren noch gegeben und sollte voll ausgeschöpft werden. Der Fokus sollte sich hardwareseitig auf drei Schwerpunkte konzentrieren. Erstens, effektive Leistungsverstärker mit guten Wirkungsgraden wie z.B. neuartige Doherty-Leistungsverstärker mit drei oder mehr Leistungsstufen, oder Verstärker mit Leistungstransistoren aus Gallium und anderen Materialien mit breitem Bandabstand. Zweitens, neue Prozessoren für die digitale Signalverarbeitung, welche sich durch anwendungsspezifische Architekturen und funktionale Systemdesigns sowie durch fortschrittlichste Fertigungstechnik und Systemintegration auszeichnen. Drittens, effektive Stromwandler und mehrstufige Stromversorgungsdesigns, die eine hohe Wandlungseffizienz auch in Teillast- und Niedrigenergiezuständen aufweisen.
- ▶ Ein dem Lastverlauf folgendes latenzarmes Energiemanagement: Das Zeitmultiplexverfahren (TDM), welches bei den 5G mm-Wellensystemen zur Anwendung kommen wird, schafft neue Möglichkeiten für ein Energiemanagement, da es ein kurzzeitiges Abschalten von Funkressourcen im Betrieb zulässt. Auch das Massive MIMO Konzept erlaubt neue Verfahren zum Umgang mit vorhanden Funkressourcen. So können einzelne Sub-Antennenmodule beispielsweise für die Flächenabdeckung genutzt werden und andere nur bei Bedarf als "Kapazitäts-Booster" hinzugenommen werden. Alle technischen Maßnahmen zur Anpassung der Datenübertragungskapazität an den realen Bedarf der Funkzelle spart Energie.

3.4 Auswertung der Umweltbewertung und Diskussion

3.4.1 Vergleich und Interpretation der Szenarien

Im Folgenden werden die aggregierten Ergebnisse der verschiedenen Szenarien miteinander verglichen. Diese Ergebnisauswertung vergleicht die Höhe der Umweltwirkung bezogen auf den absoluten jährlichen Energiebedarf, der aus dem operativen Betrieb aller Mobilfunknetze in Deutschland resultiert. Zweitens wird die absolute jährliche CO₂-Bilanz unter anteiliger Berücksichtigung der Geräteherstellung und eines jahresspezifischen Energiemixes analysiert. Schließlich wird die Energie- und CO₂-Effizienz betrachtet, d.h. wie sich die Umweltlast bezogen auf den funktionalen Nutzen unter den getroffenen Annahmen zum Netzausbau entwickelt.

Abbildung 72: Gegenüberstellung der Energiebedarfsprognose aller fünf Szenarien (2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

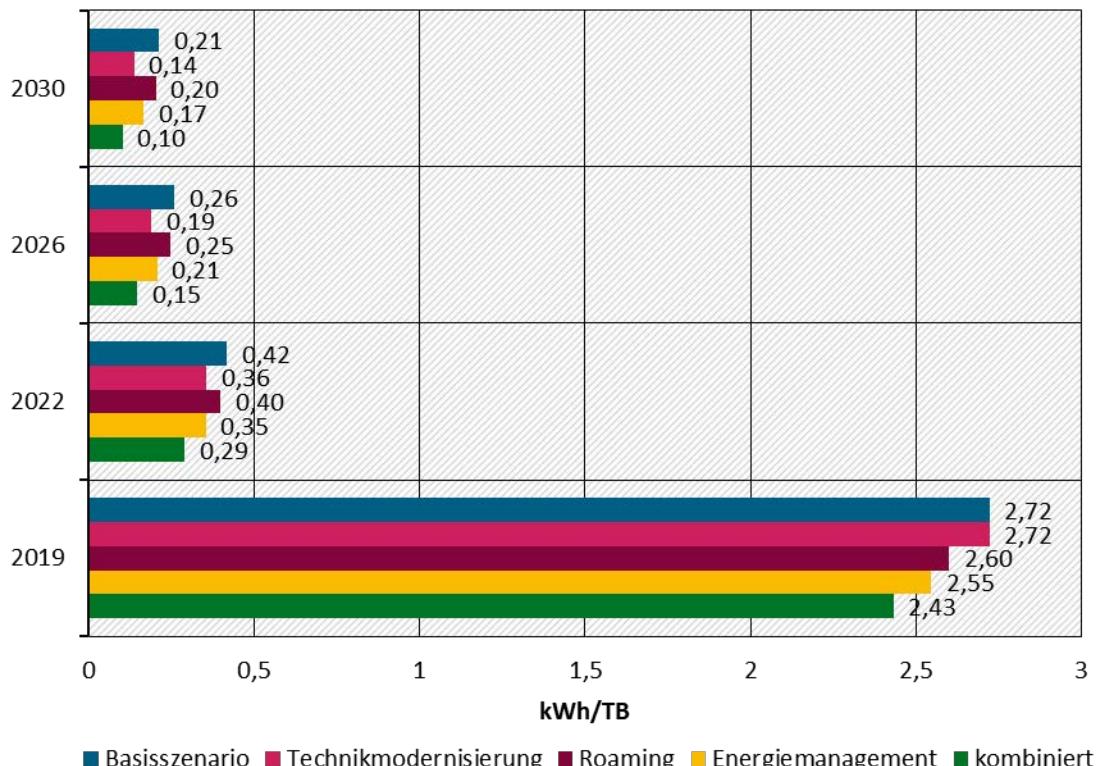
Die Abbildung 72 zeigt die Energiebedarfsprognose aller Szenarien für die Entwicklung der Makro-Antennenstandorte in einem Überblick.⁷⁵ Das Basisszenario bildet die wesentliche Datengrundlage für alle übrigen Szenarien. Es wird für den Zeitraum von 2019 bis 2030 von einem substanziellen Netzausbau in Deutschland ausgegangen, der eine Zunahme von insgesamt 27.000 Standorten und fast eine Verdoppelung der Antennensysteme pro Antennenstandort beinhaltet. Dieser Ausbau wird im Basisszenario von einer sukzessiven Umstellung der Trägerfrequenzen auf 4G und 5G Technologie (2G wird als Grundversorgung beibehalten und 3G komplett substituiert), einer Umstellung der > 1GHz Antennensysteme auf größere MIMO-Konfigurationen und andere Modernisierungsmaßnahmen begleitet. Damit wird der in Kap. 1.3.5 hergeleiteten Prognose der im Jahr 2030 benötigten mobilen Datentransportkapazität

⁷⁵ In dieser und den folgenden Abbildungen werden die einzelnen Szenarien auch rückwirkend für das Referenzjahr 2019 ausgewiesen. Dies ist zwar unlogisch, zeigt aber die Größenordnungen der unterschiedlichen Szenarien im direkten Vergleich.

Rechnung getragen. Diese Annahme definiert somit den Umfang des Netzausbau. Im Basisszenario werden moderne, mm-Wellen-basierte Mikrozellen nicht berücksichtigt. Diese, zum jetzigen Zeitpunkt sehr spekulative, Entwicklung wurde in einem separaten sechsten Szenario analysiert (vgl. Kap. 3.3).

Unter den getroffenen Annahmen zum Netzausbau im Basisszenario erhöht sich der jährliche elektrische Energiebedarf der Makrozellen (AS-1 bis AS-6) von 2,3 TWh im Referenzjahr 2019 um einen Faktor 3,25 auf 7,5 TWh im Jahr 2030. Dieser Anstieg des Energiebedarfs ist substanzIELL. Er sollte aber zunächst in Relation zur realisierten Netzkapazität betrachtet werden. Die theoretische Netzkapazität wurde im Basisszenario um einen Faktor 45 gesteigert. Die Energieeffizienz hat sich damit fast um einen Faktor 14 verbessert. Die nachstehende Abbildung 73 zeigt die Entwicklung der Energieeffizienz in den Szenarien. Auffällig ist der Effekt, der durch den frühen Ausbau der neuen Trägerfrequenzen im 3,6 GHz Band und die Umstellung von Bestandsantennensystemen auf größere MIMO Konfigurationen in den städtischen Antennenstandorten (AS-4 bis AS-6) bereits im Jahr 2022 erzielt wird. Die Energieeffizienz steigt sprunghaft. Um dieses Potenzial bis 2030 aber in die gesamte ländliche Fläche zu bringen (AS-1 bis AS-3), ist ein massiver Standortausbau nötig. Die Energieeffizienz verbessert sich daher in Summe deutlich langsamer, hingegen steigt der absolute Energiebedarf von 2022 bis 2030 linear an (vgl. nochmals mit Abbildung 72).

Abbildung 73: Gegenüberstellung der Energieeffizienz aller fünf Szenarien (2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Es stellt sich die Frage, ob die Energieeffizienz noch höher ausfallen und damit der absolute Energiebedarf weiter gesenkt werden könnte. Wie in Kap. 3.2.1 ausführlich erläutert wurde, steigt der Energiebedarf primär im Funkzugangsnetz und ist die Folge des massiven Ausbaus der Trägerfrequenzen > 2 GHz, die mit 5G über eine sehr hohe mobile Datentransportkapazität verfügen. Im Berechnungsmodell wirkt sich insbesondere die Einführung des 3,6 GHz-Bandes

aus. Der Energiebedarf dieser Funkmodule steigt durch die höhere Anzahl an Transceivern (Massive MIMO) einerseits und durch die abnehmende Effektivität der Leistungsverstärker andererseits. Zudem nimmt der Energiebedarf für die deutlich steigende digitale Signalverarbeitung weiter zu.

Vor diesem Hintergrund wurden vier alternative Szenarien berechnet, die unterschiedliche Maßnahmen zur Reduktion des nutzungsbedingten Energiebedarfs zum Gegenstand haben. Das alternative Szenario 2 berechnet das hardwaretechnische Verbesserungspotenzial, welches insbesondere aus den noch immer kontinuierlichen Fortschritten der Halbleiterindustrie resultiert. Gleichwohl sich dieses Verbesserungspotenzial möglicherweise in den kommenden Jahren verlangsamt (vgl. Kap.3.1.3), hat es eine sehr hohe Hebelwirkung, wie das Szenario zeigt. Unter der theoretischen Annahme, dass die Systemtechnik nicht alle sieben, sondern bereits alle drei Jahre auf die neuste Hardwaretechnologie umgestellt wird, reduziert sich der elektrische Energiebedarf beispielsweise im Jahr 2030 von 7,5 TWh auf 4,8 TWh. Diese Energieeinsparung von 36 % gegenüber dem Basisszenario ist vergleichsweise groß, denn die Steigerung der hardwaretechnischen Energieeffizienz wirkt dreifach. Die energiesparenden Komponenten reduzieren auch die absoluten Wandlungsverluste der Stromversorgung und schlussendlich den absoluten Kühlungsaufwand.

Das dritte Szenario (Roaming) dient der Darstellung eines kollaborierenden Zusammenwirkens aller Netzbetreiber. Es ist ebenfalls ein theoretisches Szenario, was im Endeffekt durch die angenommene Gleichverteilung der Antennenstandorte zu einer rechnerischen Verkleinerung der Funkzellen führt. Dieser Maßnahme liegt die Idee zugrunde, die bundesweiten Mobilfunknetze koordiniert auszubauen und optimal zu dimensionieren. Auch wird angenommen, dass die Sendeleistung an den Antennenstandorten mit den durchschnittlich in der Fläche etwas kleineren Funkzellen etwas zurückgehen kann. Das Roaming-Szenario resultiert im Jahr 2030 in einer jährlichen Energieeinsparung von 0,43 TWh. Das Potenzial des Roamings könnte bei einem koordinierten Netzausbau, der sich an den realen lokalen Bedarf anpasst, durchaus höher sein und sollte weiter untersucht werden (vgl. Kap. 4.2.1 und Kap. 4.3.3).

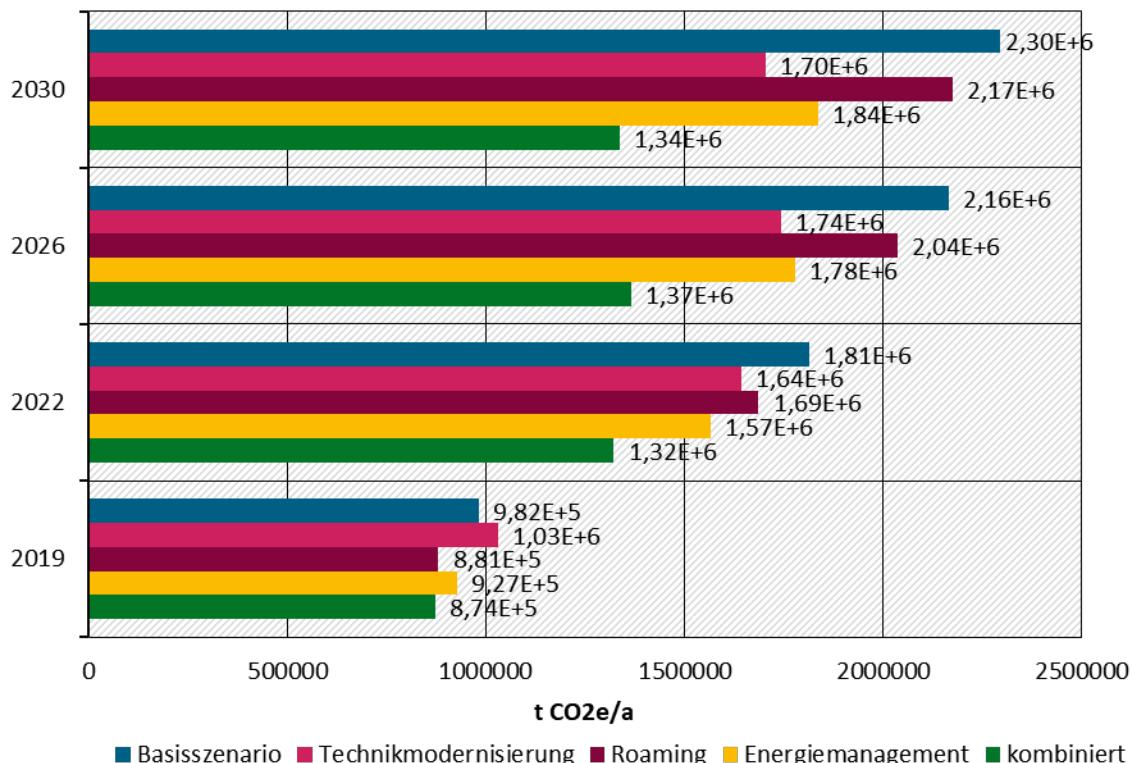
Im vierten Szenario wird ein aktives Energiemanagement, d.h. ein Abschalten von nicht benötigten Transceivern in Phasen geringer Auslastung exemplarisch modelliert. Unter den getroffenen Annahmen kann im Jahr 2030 der elektrische Energiebedarf gegenüber dem Basisszenario um 1,63 TWh oder 22 % gesenkt werden. Dieses Szenario kann leider nur andeuten, welches Einsparpotenzial ein dynamisches, lastorientiertes Energiemanagement hat. Das reale Einsparpotenzial wird durch eine enge Umhüllung der Lastbedarfskurve erreicht. Es steht in Relation zur Netzdimensionierung. Mit einer potenziell zunehmenden Differenz zwischen Spitzenlast und Grundlast gewinnt ein Energiemanagement noch mehr an Bedeutung. Gleichzeitig müssen Randbedingungen geschaffen bzw. berücksichtigt werden. So müssen bei einem häufigen Zu- und Abschalten von Komponenten beispielsweise auch zusätzliche Energiebedarfe für die Reaktivierung und Synchronisierung des Netzes mitbilanziert werden⁷⁶. Das Energiemanagement beinhaltet auch Aspekte des thermischen Managements und darüber indirekt auch der Langzeitzuverlässigkeit der Technik. Schließlich muss unter Umständen auch eine Abwägung zwischen Energieersparnis und Gewährleistung einer definierten Dienstgüte erfolgen.

⁷⁶ Dieser Aspekt konnte in dieser Studie allerdings nicht berücksichtigt werden, weil dazu keine Daten verfügbar waren.

Das fünfte Szenario kombiniert die drei Alternativszenarien. Es realisiert in der Prognose rein rechnerisch für das Jahr 2030 eine hohe Energieersparnis von 3,96 TWh oder 47 % gegenüber dem Basisszenario. Allerdings wird diese durch einen häufigen Austausch der Gerätetechnik und damit einer Erhöhung des anteiligen Herstellungsaufwands realisiert.

In der Realität würde eine solche häufige Umrüstung zu hohen Anschaffungskosten und Logistikaufwänden führen. Zudem muss die gesamte CO₂-Bilanz berücksichtigt werden, da mit der beschleunigten Hardwaremodernisierung ein Anstieg des absoluten Ressourcenverbrauchs durch das wachsende Herstellungsvolumen einhergeht. Zweitens wirkt sich der lokale Energiemix sowohl in der Nutzung als auch in der Herstellung auf die CO₂-Bilanz aus. Die Abbildung 74 zeigt die komplette CO₂-Bilanz für das Basisszenario im Vergleich zu den alternativen Szenarien. Die CO₂-Bilanz des Technikverbesserungsszenarios reduziert sich gegenüber dem Basisszenario nicht mehr um 36 %, wie bei der nutzungsbezogenen Energiebilanz, sondern nur noch um 26 %. Hier wird der steigende auf ein Jahr normierte Herstellungsaufwand sichtbar. An dieser Stelle möchte das Autorenteam nochmals anmerken, dass die Datenlage für die Berechnung der gerätetechnischen CO₂-Bilanz der Herstellungsphase als unzureichend eingeschätzt wird. Daher könnte die Umweltwirkung der Herstellung der Geräte- und Anlagen unterbewertet sein. Da die begründete Annahme besteht, dass die Rohstoffkritikalität längerfristig steigt und auch der Energie- und Ressourcenbedarf aufgrund der Komplexität neuer Herstellungsverfahren zunimmt, muss künftig ein deutlicher Fokus auch auf die exakte Umweltbewertung der Herstellungsphase gelegt werden.

Abbildung 74: Gegenüberstellung der CO₂-Bilanzprognose aller fünf Szenarien (Strommix Klimaschutzszenario 2019-2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

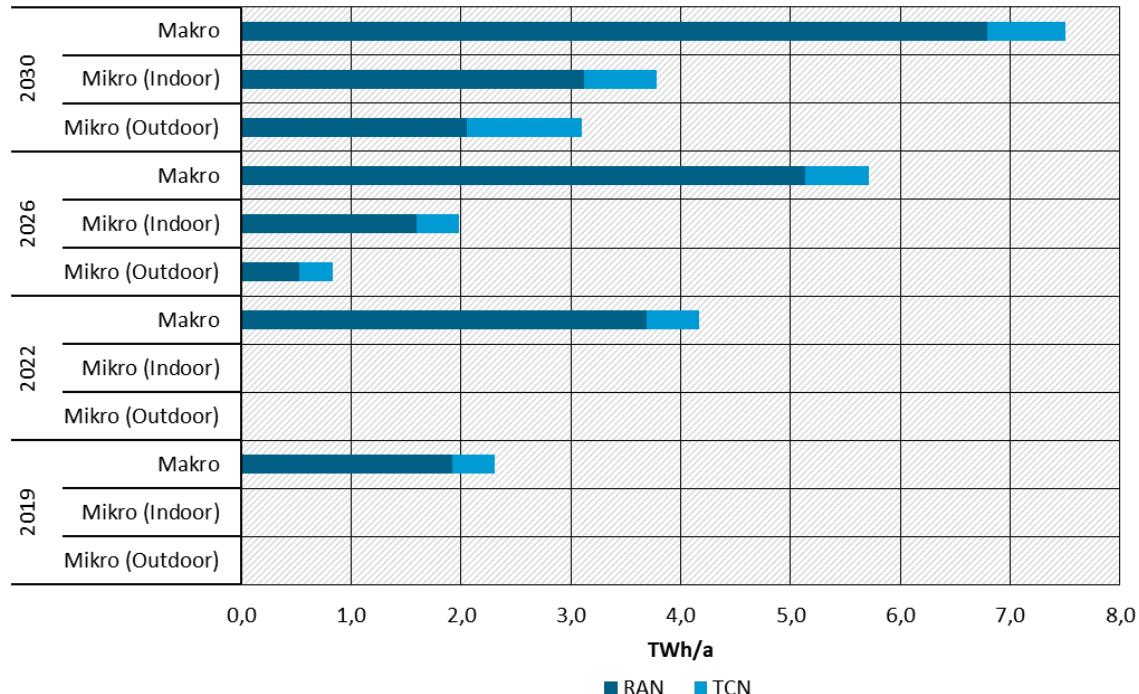
Das kombinierte Szenario vermittelt einen ersten Eindruck von kumulierten Effekten, die durch Ökodesign- und Umweltschutzmaßnahmen erzielt werden könnten. Es zeigt – unter den getroffenen Annahmen – das maximale Einsparpotenzial, welches sich jedoch nicht zwingend

auf die Realität übertragen lässt. Als Erkenntnis sollte aber festgehalten werden, dass der Energiebedarf und die CO2-Bilanz durch folgende Prinzipien optimiert werden können:

- ▶ ein auf den realen Bedarf der Nutzer ausgelegter Netzausbau (Dimensionierung auf Netzebene und Konfiguration auf Standortebene),
- ▶ eine starke Abstimmung des Netzausbaus zwischen den Netzbetreibern einschließlich der Realisierung von Roaming-Möglichkeiten (kollaborierendes Verhalten und Öffnung von Schnittstellen),
- ▶ eine stetige Modernisierung von Mobilfunknetz- und Infrastrukturtechnik (wenn die neuen Systeme deutlich energieeffizienter sind und unter Berücksichtigung der Herstellungsphase eine Nettoersparnis erwirken),
- ▶ ein aktives Energiemanagement (soweit dies technisch möglich ist).

Diese grundlegenden Anforderungen treffen auch auf künftige Millimeterwellensysteme bzw. Mikrozellen zu. Im Szenario 6 wurde die Umweltwirkung eines exemplarischen Ausbaus von Outdoor-Mikrozellen (ASK-7) für 1 % der Fläche Deutschlands und Indoor-Mikrozellen (ASK-8) für 0,1% der Fläche berechnet. Die Abbildung 75 zeigt den direkten Vergleich der Mikrozellen mit den Makrozellen (die 100% der Fläche Deutschlands abdecken) im Basisszenario für den elektrischen Energiebedarf in der jährlichen Nutzung.

Abbildung 75: Vergleich des Energiebedarfs von Makro- und Mikrozellen (Basisszenario 2019-2030)

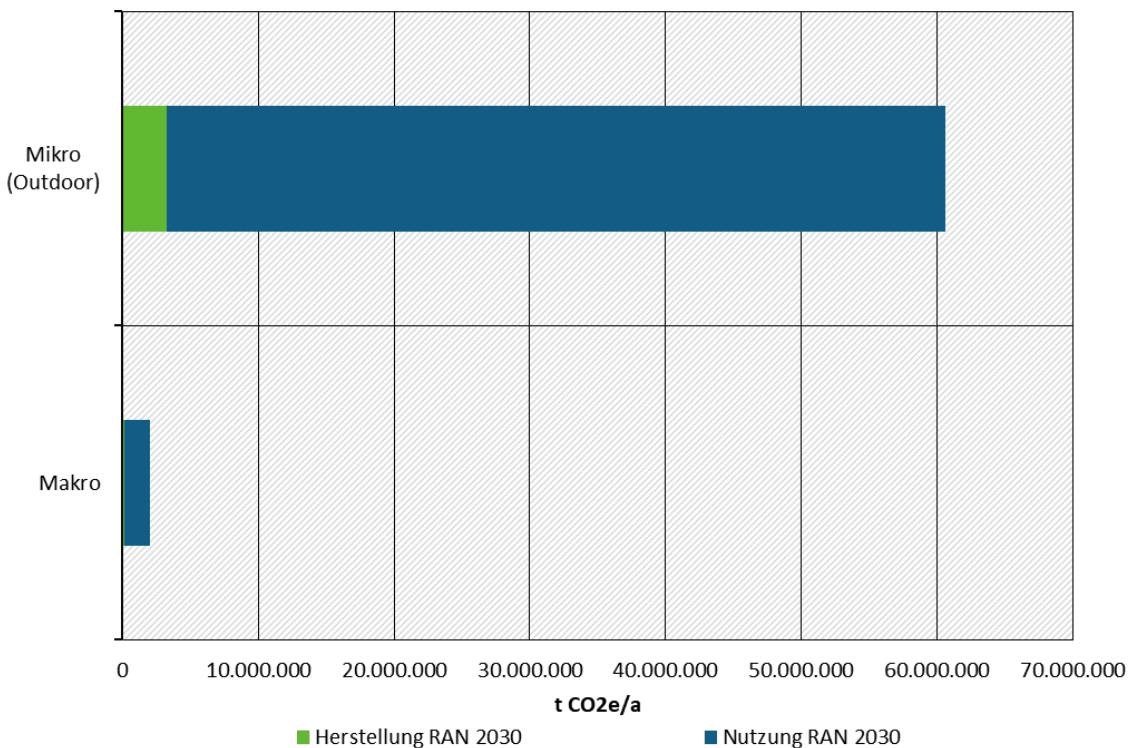


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Auf den ersten Blick ist der absolute Energiebedarf der Mikrozellen im Vergleich zu den Makrozellen recht hoch, wenn man bedenkt, dass nur eine kleine Fläche abgedeckt wird. Würde man in einem fiktiven Szenario das gesamte Bundesgebiet mit Outdoor-Mikrozellen versorgen, so ergäbe sich im Funkzugangsnetz ein Energiebedarf von 204,8 TWh im Jahr 2030 sowie eine

CO2-Bilanz von 60,6 Mio. t CO2e. Dies entspricht einer Steigerung des Energiebedarfs um einen Faktor 30. Die Abbildung 76 zeigt dieses fiktive Szenario.

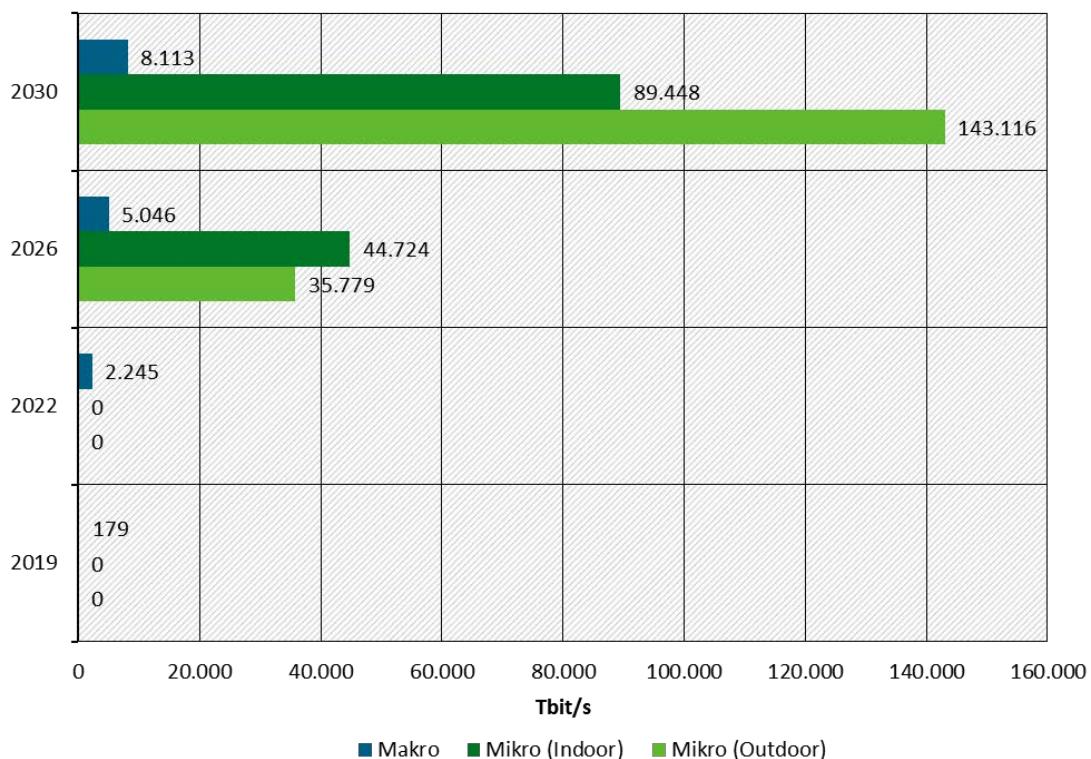
Abbildung 76: 100 % Flächenabdeckung mit Makro- vs. Outdoor-Mikrozellen (Basisszenario, 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

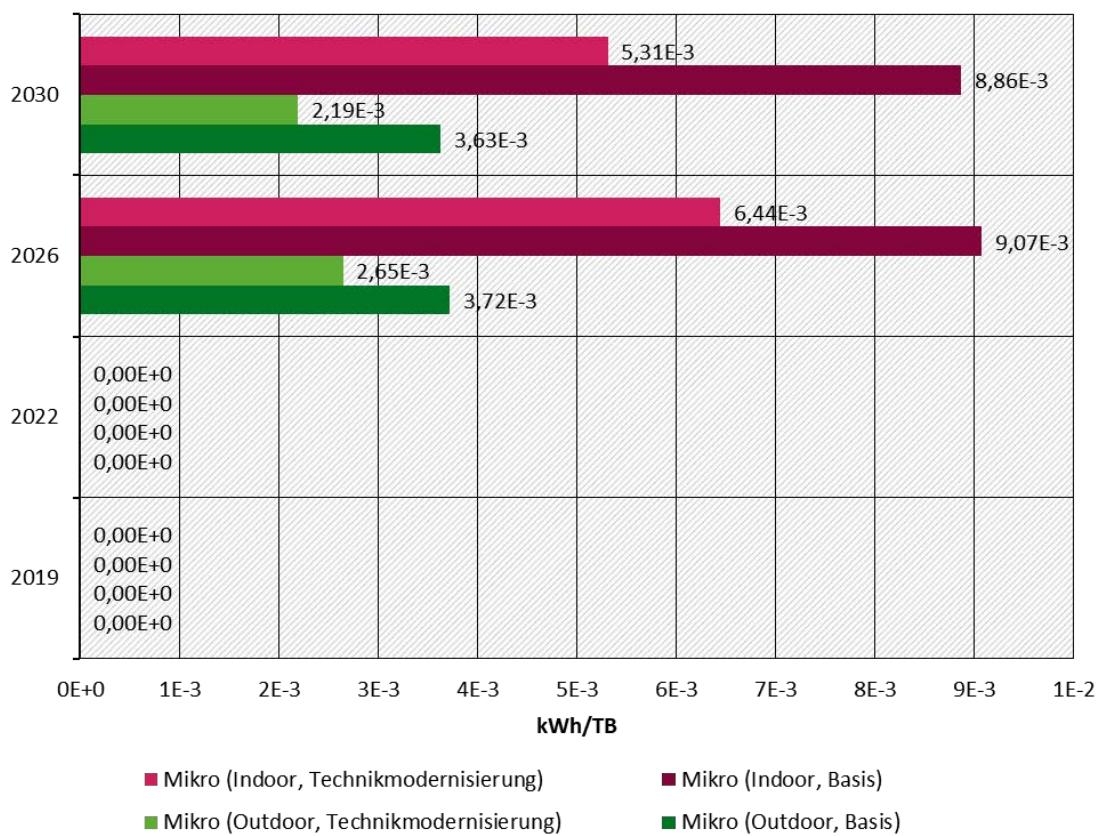
Diese Betrachtungsweise ist jedoch irreführend, da mit einem solchen Ausbau eine vielfache Überkapazität geschaffen würde. Der Energiebedarf der Mikrozellen – und damit auch der Einsatz der Mikrozellen – muss daher zunächst in Relation zur bereitgestellten Datentransportkapazität in der Fläche beurteilt werden.

Die Mikrozellen sind aufgrund der hohen verfügbaren Bandbreite, der vielen Transceiver und anderer Faktoren äußerst performant und den Zentimeterwellensystemen überlegen. Sie erzeugen im freien Raum eine extrem große Datentransportkapazität, wie die theoretische Berechnung der Datenraten für die Mikro- und Makrozellen in Abbildung 77 andeutet. Betrachtet man beispielsweise die Werte für das Jahr 2030, so wird der große Unterschied mit einem Faktor 18 zwischen den Makrostandorten ASK 1 bis ASK 6 mit 100 % Flächenabdeckung und den Outdoor-Mikrostandorten ASK 7 mit 1 % Flächenabdeckung deutlich.

Abbildung 77: Vergleich der Datenrate von Makro- und Mikrozellen (2019-2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Auch dieser Vergleich ist nicht ganz passend, da auch hier die Flächenabdeckung unterschiedlich ist. Daher sollte die relative Energieeffizienz verglichen werden. Im Basisszenario für die Makrozellen im Jahr 2030 beträgt die Energieeffizienz 0,21 kWh/TB (vgl. Abbildung 73). Zum Vergleich zeigt die untenstehende Abbildung 78 die berechneten Energieeffizienzwerte für die Mikrozellen. Im Basisszenario für Outdoor-Mikrozellen beträgt die Energieeffizienz 0,00363 kWh/TB. Gegenüber der Makrozelle ist dies ein Unterschied mit dem Faktor 58. Dieser Vergleich zeigt die deutlich höhere Energieeffizienz der mm-Wellen-basierten Mikrozellen gegenüber den cm-Wellen-basierten Makrozellen.

Abbildung 78: Gegenüberstellung der Energieeffizienz der Mikrozellszenarien (2019-2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

In der Realität gibt es aber gute Gründe für den Einsatz von sowohl cm-Wellensystemen als auch mm-Wellensystemen. Die Limitation der mm-Welle liegt sicherlich in der Reichweite. Durch neuartige Antennendesigns mit einem sehr hohen Antennengewinn kann die Reichweite im freien Raum (mit *Line of Sight*) teilweise stark erhöht werden. Problematisch bleibt jedoch die Limitation hinsichtlich der Durchdringung von Vegetation und Bauwerken. Hier kann die mm-Welle nicht wirklich mit niedrigeren Frequenzen im cm-Wellenbereich konkurrieren. Größere Reichweiten, die Durchdringung von Vegetation und die direkte Versorgung von Innenräumen (ohne Repeater) bleibt die Domäne der cm-Wellen-basierten Makrozellen.

Mikrozellen werden daher Makrozellen in der Fläche nicht ersetzen, sondern lediglich ergänzen. Sie sollten dort gezielt zum Einsatz kommen, wo sie zur Versorgung effektiv und unverzichtbar sind. Aus diesem Grund müssen Makrostandorte mit unterstützenden Mikrozellen koordiniert ausgebaut werden, da sonst die Gefahr einer Überdimensionierung besteht.

An dieser Stelle richtet sich der Blick nochmals auf das Gesamtbild. Um die Größenordnung der Umweltwirkung der Mobilfunknetze zu verdeutlichen, zeigt die Tabelle 39 den Anteil des Energiebedarfs der Mobilfunknetze (nur Makrozellen) am Bruttostrombedarf in Deutschland. Im Referenzjahr 2019 hatte der Mobilfunk einen Anteil von 0,4 %. Dieser wird in der Prognose 2030 auf 1,14 % steigen, wobei auch ein Anstieg des Bruttostrombedarfs um rund 100 TWh jährlich berücksichtigt wird. Sollte der Bruttostrombedarf weniger stark wachsen, würde der Anteil des Mobilfunks sogar steigen. Gleichzeitig zeigt das Energiemanagement-Szenario, hier beispielhaft für eine durchschnittliche Energieoptimierung, das Potenzial, unter 1 % des Bruttostrombedarfs zu bleiben.

Tabelle 39: Energiebedarf Mobilfunk im Vergleich zu Bruttostrombedarf Deutschland 2019 und 2030

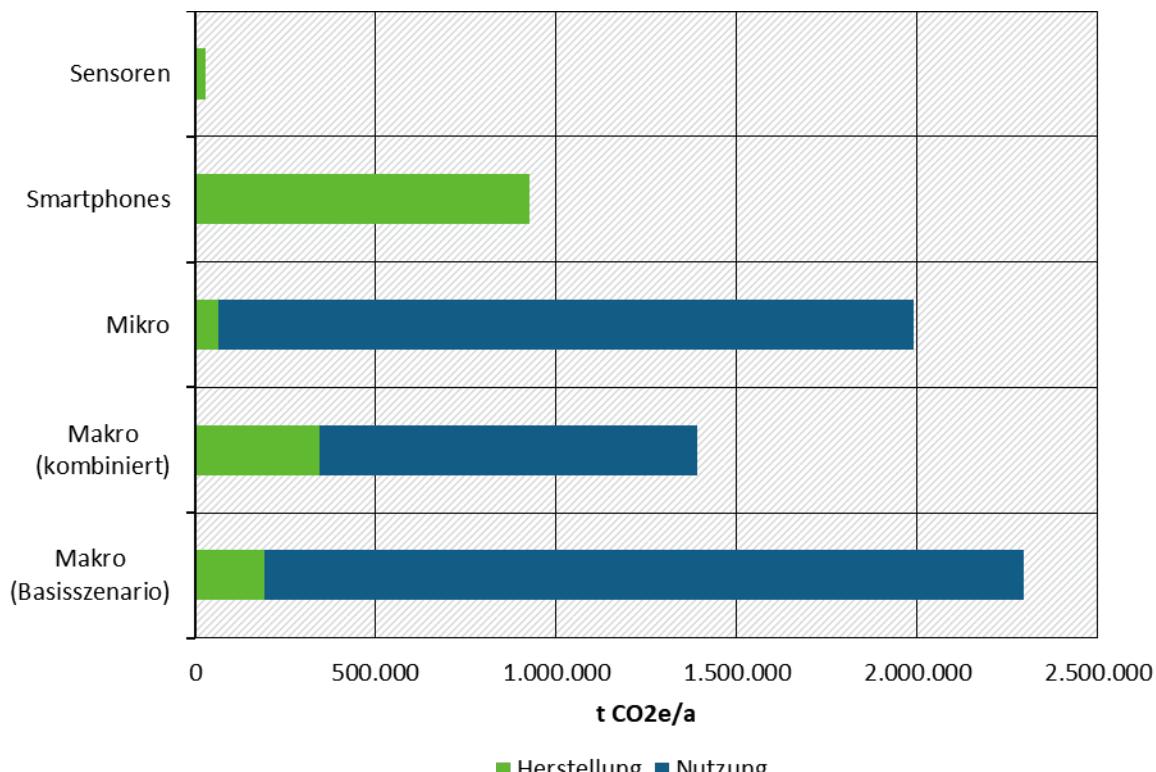
Jahr	Bruttostrombedarf Deutschland	Basisszenario	Anteil	Energiemanagement-Szenario	Anteil
2019	575 TWh/a ¹	2.31 TWh/a	0.40%	1.66 TWh/a	0.29%
2030	655 TWh/a ²	7.51 TWh/a	1.14%	5.88 TWh/a	0.90%

¹ Quelle: „Bundesregierung bleibt bei Prognose zum Stromverbrauch 2030“ (Stahl 2020).

² Quelle: „Altmaier legt erste Abschätzung des Stromverbrauchs 2030 vor“ (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2021).

Die Abbildung 79 zeigt die Gegenüberstellung der absoluten jährlichen CO₂-Bilanz von Makrozellen (kombiniertes Szenario als Minimal- und Basisszenario als Maximalwert), Mikrozellen (Indoor und Outdoor) sowie der Endgeräte (Smartphones und Sensoren) für Deutschland. Hierbei ist zu beachten, dass dies die absoluten jährlichen Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der jeweiligen Stückzahlen umfasst, aber die einzelnen Aspekte mit Ausnahme der beiden Makroszenarien nicht miteinander vergleichbar sind, sondern die Gesamtheit des Mobilfunknetzes abbilden sollen.

Es wird darauf hingewiesen, dass der Energiebedarf bzw. die CO₂-Bilanz der Nutzungsphase der Endgeräte (Smartphone und Sensoren) in der orientierenden Ökobilanz nicht berücksichtigt wurde. Die Umweltwirkung der Nutzungsphase dieser Geräte ist allerdings im Vergleich zu deren Herstellung relativ gering. Publizierte Ökobilanzen beispielsweise von Apple oder Fairphone bemessen den Anteil der Nutzungsphase auf etwa 10 % und weniger.

Abbildung 79: Gegenüberstellung der jährlichen CO₂-Bilanz von Makrozellen, Mikrozellen und Endgeräten (Basis- bzw. kombiniertes Szenario, 2030)

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Der Vergleich zeigt die Umweltwirkung der Herstellung der Millionen Endgeräte im Vergleich zu den wenigen Hunderttausend Mobilfunkanlagen und sonstiger Netztechnik. Vergleicht man die Umweltwirkung der Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase, so hat bei einem „konventionellen“ Strommix die Nutzungsphase mit Abstand den größten Anteil. Die verstärkte Verfügbarkeit erneuerbarer Energien verbessert die CO2-Bilanz. Deutschland hat hier gegenüber anderen Staaten, deren Stromerzeugung stärker auf fossilen Brennstoffen beruht, einen Vorteil. In den Szenarien verändert sich daher mit dem verbesserten Strommix (Klimaschutz vs. Referenz) die Nutzungsphase. Die Herstellungsphase bleibt langfristig aber problematisch.

3.4.2 Diskussion der Methodik und Datenlage

Das UTAMO-Projekt hatte die Aufgabenstellung, die lebenszyklusbezogene Umweltwirkung der bundesweiten Mobilfunknetze für das Referenzjahr 2019 zu bilanzieren und in Szenarien die Entwicklung des Energie- und Ressourcenbedarfs bis zum Jahr 2030 zu prognostizieren. Für diesen Zweck wurde ein methodischer Ansatz gewählt, der sich prinzipiell an etablierten Ökobilanzstandards orientiert. So wurde die Zielstellung der Bewertung, der Bezugsrahmen, die Wirkungskategorien und funktionelle Einheit definiert. Im Kern des Projektes stand die Entwicklung eines aus mehreren Ebenen bestehenden Sachbilanzmodells zur eigentlichen Bilanzierung des Energie- und Ressourcenbedarfs. Dieses Berechnungsmodell muss die komplexen, technischen und anwendungsbezogenen Aspekte heutiger und künftiger Mobilfunknetze ganzheitlich abbilden können. Die Ganzheitlichkeit ist durch den Rahmen der Studie allerdings eingeschränkt und bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die absolute Umweltwirkung in Bezug auf den Treibhauseffekt einschließlich der Herstellung und Nutzung der Geräte- und Anlagentechnik bilanziert wird.

Mit der 5K-Methode wurde im UTAMO-Projekt ein Ansatz zur Strukturierung dieser Komplexität entwickelt. Die Abbildung 80 zeigt diese grundlegende Struktur und damit die Ebenen, die das Sachbilanzmodell abbilden muss. Die fünf Ebenen reflektieren die 5Ks des initialen methodischen Ansatzes.

Abbildung 80: Fünf Ebenen des Sachbilanzmodells entsprechend der 5K Methode

	Task	Measures	
Capacity	Use case / performance characterization	Define: user/application, throughput, latency, area coverage, QoS, load profile	
Condition	Link / cell / area characterization	Define: space, frequency, bandwidth, main technology, channel / link budget, etc.	
Configuration	System architecture / equipment design	Define: network architecture, functional split, equipment configuration, component technology	
Component	Material and energy footprint	Production phase: IC, PCB, Ports, Housing	Use phase: Power out (ERP), PAE, power draw, AC/DC & DC/DC losses, cooling overhead, modes, etc.
Control	Energy sources, power management	Dimensions, Materials, Tech. Generation	

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Im Gegensatz zu existierenden Energiemodellen für Mobilfunkanlagen, die meist nur auf die Basisstation fokussieren (vgl. Kap. 1.4) wurde im UTAMO-Projekt der Bezugsrahmen auf die Netzwerkebene und auf die Komponentenebene ausgeweitet. Mit dem ersten Aspekt wurde dem Anspruch einer absoluten Quantifizierung der Umweltwirkung Rechnung getragen. Mit dem zweiten Aspekt wurde die Grundlage für eine lebenszyklusorientierte Bewertung geschaffen. Eine weitere Ebene, die in der grafischen Darstellung nicht explizit abgebildet wird, ist der Zeithorizont. Im UTAMO-Projekt wurden Prognosen mit einem Zeithorizont von mehr als zehn Jahren erstellt, welche die technische und marktbezogene Entwicklung des Mobilfunks auf Basis von begründeten Annahmen quantifizierend abbilden.

Um diese erweiterte Komplexität orientierungssicher (überschlägig, aber wissenschaftlich belastbar) abbilden zu können, wurden methodische Ansätze zur Vereinfachung der Zusammenhänge benötigt, welche auch die Verfügbarkeit von spezifischen Daten reflektiert. So wurden im Verlauf des Projekts stetige Anpassungen des Modells entsprechend der Datenverfügbarkeit vorgenommen. Durch den Zugang zur EMF-Datenbank der BNetzA beispielsweise konnten die Antennenstandortkonfiguration deutlich präzisiert werden. Andererseits waren die Angaben dieser Datenbank bezüglich der Sendeleistung nicht eindeutig und wurden als Datenbasis verworfen und durch eine auf Basis physikalischer Prinzipien hergeleiteten Datenmatrix ersetzt. Durch ein iteratives Vorgehen, bei dem verfügbare Daten in das Modell eingegeben und die Berechnungsergebnisse anschließend auf Plausibilität geprüft wurden, konnte der Fokus der Datenrecherche fortlaufend präzisiert werden. Gleichzeitig wurden Anpassungen am Modell vorgenommen, wenn sich beispielsweise die Möglichkeit zu einer Datenaggregation ergab, oder aber, wenn sich die Notwendigkeit zu einer stärkeren Ausdifferenzierung abzeichnete. Beispiele für eine Ausdifferenzierung war die explizite Unterscheidung der einzelnen Trägerfrequenzen und von drei Lastzuständen.

Bezüglich der Datenlage ergibt sich ein heterogenes Bild. Für die modellbasierte Berechnung des Energiebedarfs der Mobilfunknetze im Referenzjahr 2019 konnte auf diverse Bundesstatistiken, Produktdatenblätter und öffentliche Information der Netzbetreiber zurückgegriffen werden. Das Berechnungsergebnis deckt sich weitgehend mit Literaturangaben und verifiziert das Modell. Die Modellierung der Funkzugangsnetze ist deutlich höher ausdifferenziert. Sie verfügt über eine ausreichende Datenbasis, sowohl hinsichtlich der Bestands- und Konfigurationsdaten als auch der umweltbezogenen Produkt- und Infrastrukturdaten. Die Modellierung der Transportkernnetze ist weniger detailliert, da viele notwendige Informationen und Daten in der benötigten Form nicht vorlagen. Die Fachgespräche konnten hierbei auch kaum zur Verbesserung beitragen. Aus dem gleichen Grund fanden Installation, Wartung (inkl. Anfahrt, Baumaßnahmen, Kräne, Verbrauchsmittel), Verwaltungsinfrastruktur wie Büros, Lagerflächen, etc. keine Berücksichtigung im Sachbilanzmodell.

Grundsätzlich könnte die Datenbasis deutlich besser sein. Die energiebezogenen Daten in Produktdatenblättern sind teilweise sehr rudimentär und beinhalten beispielsweise keine Spezifikation, was eine „typische Konfiguration, Nutzung oder Auslastung“ ist. Das mit Abstand größte Datendefizit besteht im Bereich von Produktökobilanzen und Ökobilanzdaten für wesentliche Komponenten wie Leistungsverstärker und andere Halbleiterbauelemente. Die in Datenbanken verfügbaren Datensätze sind häufig nicht spezifisch genug, intransparent und/oder veraltet. Hierdurch entstehen Allokationsprobleme bzw. komplett Datenlücken.

Für die Prognosen war die Datenbasis im Vergleich zum Referenzjahr noch deutlich begrenzter und so basieren die Annahmen häufig auf einer Kombination unterschiedlichster Daten. Als primäre Quellen wurden Daten aus wissenschaftlichen Publikationen, der Standardisierung und diversen Whitepaper verwendet. Des Weiteren wurden aktuelle Trends fortgeschrieben. So wurden die Bestandszahlen in den Prognosen und die Annahmen zum Ausbau der

Antennenstandorte anhand der aktuellen Trends bestimmt. Das prinzipielle Funkzellenverteilungsmodell des Basisszenarios wurde in allen Szenarien verwendet. Variationen der zugrundeliegenden Annahmen, z.B. mehr Standorte und weniger Mobilfunkanlagen pro Standort, oder ein Mix von Makro- und Mikrozellen, der in Summe eine ähnliche Netzkapazität bereitstellt, wurden bislang noch nicht modelliert. Diese alternativen Szenarien haben sich erst im Verlauf des Projektes als sinnvoll herausgestellt, konnten aber rückwirkend nicht mehr berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, die Netzbetreiber für die Berechnung neuer Netzausbauzenarien direkt in ein Projekt einzubinden.

Eine weitere Herausforderung bei der Erstellung der Prognosen ergibt sich aus der dynamischen Technologieentwicklung. So fehlen systematische Daten zum Energiebedarf der digitalen Signalverarbeitung. Die elektrische Leistungsaufnahme pro Bitrate ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Hierzu zählen beispielsweise die Architektur und Spezifik des Rechnersystems, der Integrationsgrad der Hardwarekomponenten (IC), die Auslegung von Schnittstellen sowie Software- und Nutzungsaspekte. All diese Faktoren unterliegen einer fortlaufenden Weiterentwicklung. Im Modell wurde diese Verbesserung über die Zeit anhand aktueller und historischer Daten prognostiziert. Die möglicherweise sprunghafte Verbesserung konkreter, neuer Technologien konnte nicht beurteilt werden und wurde daher nicht berücksichtigt. Dies kann ein Grund für den deutlich sichtbaren Anstieg des Anteils der digitalen Signal- und Datenverarbeitung im Modell sein.

Viele Daten zu Produkten, wie beispielsweise den mm-Wellensystemen und deren Einsatzweise waren nicht direkt verfügbar. Hier musste mit diversen Einzelinformationen und Experteneinschätzungen gearbeitet werden. Neue Trends im Kontext *Software Defined Network*, wie C-RAN, Open RAN oder vRAN konnten in den Szenarien noch nicht abgebildet werden, da z.B. wichtige Daten zur genauen Verortung einzelner Funktionalitäten (*Functional Split*), zur Auslegung der Edge-Computing Hardware und zum Einsatz dieser neuen Verfahren nicht vorhanden bzw. sehr spekulativ sind. In diesem Zusammenhang werden Daten zu standorttypischen Lastprofilen und Angaben zur realen Auslastung der Mobilfunksysteme benötigt. Diese Angaben können nur Netzbetreiber bereitstellen.

Weitere technische Trends, die ein gutes Potenzial zur Reduktion des Energiebedarfs der Datenübertragung haben, konnten ebenfalls aufgrund einer begrenzten Datenlagen nicht im Modell berücksichtigt werden. Hierzu zählen u.a. neuartige Leistungsverstärker und Wandler mit guten Wirkungsgraden in Teilstrecken, die einen lastadaptiven Betrieb unterstützen, neue Kompressionsverfahren (inkl. des Rechenaufwandes für Kompression und Dekompression), neue optische Netzwerktechnik, oder auch ein Energiemanagement im Transportkernnetz auf Basis eines lastbezogenen Routings. Diese Themen sind wichtig und sollten in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

Die Berechnung des funktionellen Nutzens auf Basis der theoretischen Datentransportkapazität bzw. der Datenrate ist anspruchsvoll. Die Berechnung der Datenrate berücksichtigte zwar die Trägerfrequenz, Bandbreite, MIMO-Konfiguration, Modulationsverfahren, etc. nach etablierten Modellen, aber wie sich die tatsächliche Nutzung, die realen Funkbedingungen und die Netzauslastung auswirken, konnte nicht berücksichtigt werden. Diese Faktoren sind jedoch für die Ermittlung von realistischen Leistungskennzahlen eine wichtige Voraussetzung. In weiteren Studien sollte dieser Themenkomplex vertieft werden.

4 Maßnahmenempfehlungen zur Reduzierung des Energie- und Ressourcenbedarfs der Mobilfunkinfrastruktur

In diesem Kapitel werden vor dem Hintergrund der im UTAMO Projekt gewonnenen Erkenntnisse wesentliche Handlungsbedarfe erläutert und Empfehlungen formuliert. Die Empfehlungen richten sich natürlich primär an die betroffenen Stakeholder in der Industrie und Politik. Das Hauptaugenmerk dieses Kapitels besteht in einer möglichst umfassenden Auflistung von Themenstellungen, die zur Verbesserung der Situation beitragen könnten. Zwar werden auch konkrete Inhalte und Maßnahmen benannt, allerdings nicht mit vertiefenden Erläuterungen unterlegt. Viele Vorschläge erschließen sind aber vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Umweltbewertung und den dargestellten Trends.

4.1 Empfehlungen zur Schaffung einer umweltbezogenen Datenbasis

4.1.1 Daten in den Umweltberichten der Mobilfunknetzbetreiber

Die Mobilfunknetzbetreiber in Deutschland messen den Energiebedarf und bilanzieren den Energieeinsatz in jährlichen Berichten. Dabei orientieren Sie sich an existierenden Standards wie dem „Global Standards for Sustainability Reporting“ (GRI)⁷⁷ und der DIN EN ISO 50001 Norm für Energiemanagementsysteme. Auch werden Leistungskennzahlen zur Beurteilung des funktionalen Nutzens des Energieeinsatzes bzw. der Energieeffizienz und Klimawirkung des operativen Betriebes in diesem Zusammenhang veröffentlicht. Typischerweise werden diese Werte als Wattstunde/Byte oder CO2-Äquivalente/Byte angegeben. Bei genauerer Betrachtung fallen allerdings methodische Unterschiede und eine gewisse Intransparenz bei dieser Berichterstattung auf.

Analysiert man die Umweltberichterstattung der Deutschen Telekom, Telefónica, Vodafone, oder auch anderer europäischer Netzbetreiber wie A1 Telekom Austria, Swiss Telekom, Orange, British Telecom, Telecom Italia oder Koninklijke KPN so unterscheiden sich die Ausweisung der Energiedaten teilweise erheblich.⁷⁸ Die nachstehende Tabelle 40 zeigt eine qualitative Auswertung der energiebezogenen Angaben in Umweltberichten ausgewählter Netzbetreiber.

Tabelle 40: Vergleich von energiebezogenen Angaben von Netzbetreibern

Firma	Angabe des Strombedarfs	Angabe des Anteils erneuerbarer Energien	Umrechnung in CO2 Äquivalente	Ausweisung nationaler Netze	Unterscheidung von Netzbereichen	Energie Effizienz KPI
Deutsche Telekom	ja	ja	ja	ja	nein	ja (kWh/TB)
Vodafone	ja	ja	ja	teilweise	nein	ja (tCO2/PB)
Telefónica Deutschland	ja	ja	ja	ja	ja	ja (GWh/PB)
Telekom Italia	ja	ja	ja	ja	nein	ja (Bit/Joule)

⁷⁷ Global Reporting Initiative: <https://www.globalreporting.org/standards/>

⁷⁸ Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte sind auf den Webseiten der Netzbetreiber in unterschiedlicher Form und Ausprägung zu finden.

Firma	Angabe des Strombedarfs	Angabe des Anteils erneuerbarer Energien	Umrechnung in CO2 Äquivalente	Ausweisung nationaler Netze	Unterscheidung von Netzbereichen	Energie Effizienz KPI
A1 Austria	ja	ja	ja	ja	nein	ja (MWh/TB)
KPN	ja (aber in Joule)	ja	ja	ja	nein	ja (GWh/Gb/s) (Unlogisch)
Swisscom	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Orange	ja	ja	ja	ja	nein	nein
BT Group	ja	ja	Ja	ja	nein	nein

Quelle: Auswertung von Jahresberichten der Bundesnetzagentur (2019, 2020b, 2021a).

Alle betrachteten Netzbetreiber weisen den jährlichen elektrischen Strombedarf insgesamt auf das Unternehmen bezogen aus. Nur Teilweise werden Angaben zum Anteil der Netzinfrastruktur am Gesamtenergiebedarf gemacht. Einzelne Netzbereiche wie die Mobilfunknetze werden hingegen nicht ausgewiesen.

Mit dem Energiebedarf werden des Weiteren bereits seit Jahren auch die klimarelevanten Emissionen in CO2-Äquivalenten angegeben. Diese CO2e-Angabe ist nicht immer vollständig nachvollziehbar. Meist wird von den Unternehmen der Anteil an erneuerbaren Energien prozentual mit angegeben. Mit Stand 2021 beziehen fast alle betrachteten Unternehmen zu 100% erneuerbare Energien. Die Deutschen Telekom und Telefónica Deutschland weisen in Fußnoten zusätzlich darauf hin, dass der Anteil von erneuerbaren Energien sich auf den Kauf von Zertifikaten und einen Direktbezug stützt. Der Anteil der Eigenerzeugung bzw. des Direktbezuges ist aktuell noch sehr klein. Hinsichtlich der Ausweisung der CO2-Emissionen ist allerdings problematisch, wie der Anteil erneuerbarer Energien verrechnet wird. Die beispielsweise über Zertifikate erworbene Wind- und Solarenergie sollte nicht unbedingt mit dem reinen Erzeugungswert (je nach Berechnung meist <50gCO2e/kWh), sondern dem nationalen Energiemix angerechnet werden. Eine Angabe zumindest des Umrechnungsfaktors (X gCO2e/kWh) wäre sinnvoll. Koninklijke KPN geht soweit, mit dem 100% Einkauf erneuerbarer Energien, die CO2-Emission auf null zu setzen und damit nur Scope 1 auszuweisen. Dieser methodische Ansatz hat Schwächen und wird in Fachkreisen unterschiedlich beurteilt. Fakt ist, dass auch die Herstellung der Stromerzeugungs- und Transportsysteme, also der Windenergie- und Photovoltaikanlagen, der Umspannwerke und Unterverteilungen ressourcenintensiv ist und je nach Einsatzdauer anteilig in die Ökobilanz eingerechnet werden müsste. Eindeutige Regeln oder Standards zur Ausweisung der erneuerbaren Energienutzung in Carbon Footprints wären wünschenswert.

Die Interpretation der Energieeffizienz von Telekommunikationsnetzen wird in der aktuellen Praxis durch einen weiteren Umstand erschwert. Da die meisten Netzbetreiber sowohl Kabel- als auch Mobilfunknetze unterhalten, wäre eine Unterscheidung der einzelnen Netzbereiche gerade für die Beurteilung der Energieeffizienz sehr hilfreich. Alle betrachteten Unternehmen bilanzieren jedoch lediglich die Gesamtheit aller eigenen Telekommunikationsnetze mit Ausnahme von den Unternehmen, die wie Telefónica in Deutschland nur ein Mobilfunknetz inklusive Aggregation und Transport betreibt.

Ein weiterer Aspekt schränkt die Transparenz ein. Große Netzbetreiber unterhalten Netze in verschiedenen Ländern mit sehr unterschiedlichen Topographien, Ausbaugraden und

Stromversorgungen. Manche Netzbetreiber wie die Deutsche Telekom unterscheiden daher in der Berichterstattung die Aktivitäten in den einzelnen Ländern. Dieses Vorgehen ist hilfreich, da es deutliche Unterschiede zwischen einzelnen nationalen Netzen aufzeigt.

Bezüglich der Energieeffizienz-Kennzahlen (*Energy Effectiveness Indicators, EEI*) sind ebenfalls unterschiedliche Vorgehensweisen festzustellen. Ein großer Teil der Unternehmen macht Energieeffizienzangaben in kWh/TB oder einer vergleichbaren Metrik (z.B. MWh/TB, MWh/PB oder GWh/PB). Die Telekom Italia gibt aber beispielsweise die Energieeffizienz in bit/Joule an, was absolut korrekt, aber für einen Laien eher schwer verständlich ist und einen gewissen Umrechnungsaufwand bedeutet. Da wie bereits erwähnt, meist keine Unterscheidung einzelner Netze vorgenommen wird, ist ein direkter Vergleich einzelner Unternehmen und Netze kaum möglich. Mobilfunknetze sind aufgrund der stark verlustbehafteten Luftschnittstelle grundsätzlich etwas energieintensiver als beispielsweise kabelgebundene VDSL-, HFC- oder GPON-Zugangsnetze. Die über den gesamten Datenverkehr alle Netzbereiche und den Gesamtenergiebedarf eines Unternehmens gemittelte Energieeffizienzkennzahl ist je nach Ausprägung der Netzbereiche (Kabelarten und Mobilfunk) im Wert sehr unterschiedlich. Eine detaillierte Ausweisung des jährlichen Energiebedarfs der unterschiedlichen Netzarten wird empfohlen.

4.1.2 Detailliertes Messen bzw. Monitoring des Energiebedarfs

Vor dem Hintergrund des sehr unterschiedlichen Detaillierungsgrades von Energiedaten in der Außendarstellung, können zunächst keine Aussagen zu Art und Umfang der realen Messaktivitäten der Unternehmen getroffen werden. In den im Rahmen von UTAMO organisierten Fachgesprächen wurde von Unternehmensvertretern der drei in Deutschland aktiven Netzbetreiber jedoch angegeben, dass die Messaktivitäten in den vergangenen Jahren deutlich ausgeweitet wurden. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Im Vordergrund steht die Umsetzung eines Energiemanagementsystems nach DIN 50001 und damit auch der Wunsch Verbesserungspotenziale zu ermitteln. Diese positive Entwicklung bei den Netzbetreibern kann durch folgende Maßnahmen noch weiter unterstützt werden:

- ▶ Ausweitung der Messung an Antennenstandorten hinsichtlich des funktionsbezogenen Energiebedarfs. Das bedeutet, dass in Anlehnung an heutige Energiemodelle die einzelnen Funkmodule und Basisbandmodule separat gemessen werden. Auch könnten Antennenstandorte entsprechend den Standortbedingungen und Transceiver-Konfiguration klassifiziert werden.
- ▶ Harmonisierte Anforderungen an standortbezogene Energiemessungen müssen eingeführt werden. So könnte beispielsweise über standardisierte Messpunkte, Schnittstellen und Zeitintervalle eine höhere Transparenz und Vergleichbarkeit im Reporting geschaffen werden. In diesem Zusammenhang sollten die Messvorschriften der gerade aktualisierten Norm ETSI ES 202 706-1 V1.6.0: „Metrics and Measurement Method for Energy Efficiecy of Wireless Access Network Equipment“ zur Kenntnis genommen werden. Gleichwohl diese Norm auf die Bestimmung der Energieeffizienz ausgelegt ist (siehe unten), kann sie als Basis für eine allgemeine Messvorschrift dienen.
- ▶ Eine Voraussetzung für das detaillierte Messen beispielsweise der antennennahen Funkstation (Remote Radio Head), ist die Entwicklung von geeichten Gleichstrom-Messgeräten. Überraschenderweise wurde in einem Fachgespräch aber von der Industrie darauf hingewiesen, dass es derzeit keine geeichten Messgeräte zur direkten Gleichstrommessung kommerziell zu kaufen gebe, da kein Marktbedarf an dieser Art Messgeräte existiere. Mit zunehmender Gleichstromtechnik (u.a. auch bedingt durch

Elektromobilität) sollte ein entsprechender Marktbedarf allerdings entstehen und in diesem Zuge geeignete Messtechnik entwickelt werden.

- ▶ Den Netzbetreibern wird empfohlen [falls sie dies nicht schon tun], Lastprofile zu erfassen und diese mit den Energiemessdaten abzugleichen. Die Korrelation der Systemauslastung (reale Performanz) zum Energiebedarf liefert wichtige Daten nicht nur in Hinblick auf die relative Energieeffizienz, sondern auch mit Blick auf ein konsequenteres Energiemanagement (siehe weiter unten). Die Daten können in Simulationsmodelle einfließen oder auch mit Mitteln des maschinellen Lernens ausgewertet werden. Ein feingranulares Energie- und Lastmonitoring zeigt frühzeitig Entwicklungstrends auf und kann mit Planungszahlen abgeglichen werden. All diese Informationen können für die energieseitige Optimierung des operativen Netzbetriebes, die weitere Netzplanung und die künftige Gerätebeschaffung durch Entscheidungsträger genutzt werden.
- ▶ Feingranulare Messungen der Energie- und Lastprofile bilden zudem die Datengrundlage für funktionale Digitale Zwillinge von Mobilfunkstandorten bzw. Mobilfunknetzen. Die Daten sind vielfach nutzbar. Sie erlauben beispielsweise die indirekte Zustandsüberwachung der Geräte und Anlagen. Lastprofile, entsprechende elektrische Leistungsaufnahme und thermische Wirkenergie können mittels Ausfall- und Alterungsmodellen unmittelbar ausgewertet und in Prognosen überführt werden. Die Berechnungen können automatisiert Steuerungs- und Wartungsmaßnahmen auslösen und so dauerhaft eine hohe Dienstgüte (Quality of Service, QoS) sicherstellen.

4.1.3 Transparente und nützliche Leistungskennzahlen

Wie eingangs des Kapitels schon ausgeführt wurde, werden energiebezogene Leistungskennzahlen (Key Performance Indicator, KPI) und Maßzahlen (Metrics) im unternehmerischen Kontext u.a. dazu genutzt, um einen spezifischen Energieaufwand oder die klimarelevanten Emissionen zum erzeugten funktionalen Nutzen ins Verhältnis zu stellen. Damit soll die Effizienz des Betriebes quantifiziert werden. So kommen in der TK-Branche mit Bezug auf die Energieeffizienz von Telekommunikationsnetzen KPIs zur Anwendung, die prinzipiell die Datenrate bzw. das übertragene Datenvolumen mit dem Energieaufwand korrelieren (vgl. Kap. 4.2.1). Diese Kennzahlen werden allerdings oft mit sehr unterschiedlichen Bezugsgrößen ausgewiesen, sodass die Aussagefähigkeit und Vergleichbarkeit meist limitiert bleiben.

Unter Berücksichtigung dieser Ist-Situation werden nachfolgend erweiterte Ansätze für transparente und nützliche Leistungskennzahlen vorgestellt. Bei diesen Vorschlägen kann zwischen generischen Kennzahlen und spezifischen Kennzahlen unterschieden werden:

- ▶ **Generische Kennzahlen:** Diese sind höher aggregiert und eignen sich für das Reporting und für die vergleichende Außendarstellung.
- ▶ **Spezifische Kennzahlen:** Diese sind sehr detailliert bzw. themenspezifisch. Ihre Nutzung erfolgt im Rahmen interner Managementprozesse.

Alle Leistungsindikatoren sollten verständlich und transparent sein⁷⁹, Aussagekraft besitzen und Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten liefern. Es werden folgende Vorschläge für Leistungskennzahlen mit unmittelbarem Bezug zum Mobilfunk gemacht:

- ▶ **Jährlicher Energiebedarf des Mobilfunkzugangsnetzes einschließlich des unmittelbaren Aggregationsnetzes:** Diese Leistungskennzahl ist deutlich spezifischer als

⁷⁹ Prozentuale Angaben ohne Bezugsgröße (oder nicht prüfbarer Bezugsgröße) haben de facto keinen Wert.

ein allumfassender Wert zum Energiebedarf der Netze, da viele Netzbetreiber neben den Mobilfunknetzen auch Festnetze betreiben.

- ▶ **CO2-Bilanz des Mobilfunknetzes:** Hier erfolgt die Ausweisung des Treibhausgaspotenzials ermittelt durch einen Umrechnungsfaktor des verwendeten Energiemixes. Diese Leistungskennzahl erfordert möglicherweise eine sehr detaillierte Datenbasis hinsichtlich der kommerziell bezogenen Energie und der eigenerzeugten Energie.
- ▶ **Anteil und Art der eingesetzten erneuerbaren Energien:** Die Angabe des Anteils der Nutzung von erneuerbaren Energien unterstreicht die Bemühungen von Unternehmen, aktive Maßnahmen zum Klimaschutz zu ergreifen. Es wird empfohlen, in der Umweltberichterstattung zusätzliche Daten mit anzugeben. Diese Daten beinhaltet eine Aufschlüsselung nach Art und Menge der Energieträger, sowie des CO2-bezogenen Umrechnungsfaktors, die in der Bilanz verwendet wurden.
- ▶ **Jährlicher Energiebedarf pro transportiertem Datenvolumen:** Diese Kennzahl sollte sich auf ein definiertes Mobilfunknetz beziehen (da Netzentreiber häufig in mehreren Ländern/Regionen Mobilfunknetze betrieben und diese sich in der Architektur, verfügbaren Frequenzspektrum und anderen Konditionen deutlich unterscheiden). Die funktionelle Einheit kann bei dieser Kennzahl unterschiedlich sein. Wichtig ist, dass entweder eine elektrische Leistungsaufnahme pro Datenrate (z.B. Watt pro Bit pro Sekunde) oder eine Energiemenge pro Datenvolumen (z.B. Wattstunde pro Bytes) ausgewiesen wird. Diese Kennzahlen könnte mit weiteren Kennzahlen (siehe nachstehend) kombiniert werden, um eine noch höhere Aussagekraft zu erzielen.
- ▶ **Jährlicher Energiebedarf pro Nutzer:** Diese Bezugsgröße reflektiert in gewisser Weise die Wettbewerbsfähigkeit, da flächendeckende Mobilfunknetze für eine geringe Nutzerzahl deutlich energie- und ressourcenaufwendiger sind.
- ▶ **Jährlicher Energiebedarf pro versorgter Fläche:** Die Beurteilung der Effektivität der Flächenabdeckung ist vielschichtig. Generell kann der netzbezogene Energiebedarf der gesamten Fläche auf eine definierte Einheit (z.B. Watt pro km^2 bzw. Wattstunde pro km^2 pro Jahr) ausgewiesen werden. Weitere Binnengliederungen sind möglich. So können ähnlich des Ansatzes im UTAMO Sachbilanzmodell, die Fläche auf klar definierte Standortkategorien aufgeteilt und die AS-spezifische Kennzahlen berechnet werden. Dies hat den Vorteil, dass Bebauungsgrade, Vegetationsbedingungen etc. stärker berücksichtigt werden. Auch könnte beispielsweise die durchschnittliche Bevölkerungsdichte als zusätzliche Bezugsgröße für die Fläche herangezogen werden. Für die interne Verwendung, wie beispielsweise der energiebezogenen Standortoptimierung, kann der Energiebedarf pro Trägerfrequenz (eine definierte Transceiver-Konfiguration) in Abhängigkeit zur Zellabdeckung (Fläche/Reichweite) ermittelt werden. Ein Vergleich kann Anhaltspunkte für neue Planungszahlen etc. liefern.
- ▶ **Jährlicher Energiebedarf in Abhängigkeit der Auslastung:** Eine solche Kennzahl wäre interessant. Sie existiert nicht und müsste zunächst spezifiziert werden. Eine grundlegende Voraussetzung ist die Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Messung der Auslastung. Der potenzielle Nutzen der Kennzahl liegt in der Identifizierung der durchschnittlichen Auslastungshöhe der existierenden Technik. Diese Information kann Hinweise für verbesserte Konfiguration des Antennenstandortes geben. Zweitens, die Kennzahl gibt Hinweise auf das lastadaptive Verhalten der Systemtechnik. Dieser Aspekt steht in enger Wechselwirkung mit der Auslastung und kann unter Umständen auch Zielkonflikte erzeugen (vgl. Kap. 4.1.3).

- **Wirkungsgrad der Netzteile:** Gerade im Mobilfunkbereich ist die Energieeffizienz abhängig vom Wirkungsgrad der Netzteile und generell der Effektivität der Stromversorgung. Daten bzw. Kennzahlen zu Wirkungsgraden sollten im internen Management konsequent erfasst und ausgewertet werden. Gerade die Berechnung von Nettowirkungsgraden für definierte Systemgrenzen zeigen die verbleibenden Verbesserungspotenziale. In der Außendarstellung können Netzteilwirkungsgrade beispielsweise mit Verweis auf die Ökodesign-Richtlinie ausgewiesen werden. Diese Angabe kann sich auf die aktuellen Vorgaben der Beschaffung oder auch auf den Anteil der Umstellung auf neue Netzteile beziehen.

Ein standardisiertes Reporting von Energieverbräuchen und Leistungskennzahlen sollte zur allgemeinen Praxis der Unternehmen gehören. Eine Harmonisierung der Berichtstätigkeit bzw. entsprechender Vorgaben zu Art und Form der Veröffentlichungen wäre wünschenswert. Darüber hinaus sollten neue Kennzahlen auch zur Abbildung der Ressourceneffizienz und Kreislaufführung etabliert werden. Denkbare wären Kennzahlen zu Art und Güte des materialspezifischen Recyclings, des Einsatzes (Verwendung) von recycelten Materialien in der Technik (z.B. Recyclinganteil bei Aluminium für Gehäuse) und Beurteilung der Demontage- und Reparaturfähigkeit. Zu diesen Themen beginnt gerade erst die Forschung. Sie sollte sektor- und produktspezifisch weitergeführt werden.

4.1.4 Energie- und Materialangaben in Produktdatenblättern

Informationen und Daten zum elektrischen Energiebedarf von Geräten und Anlagen sind sowohl aus technischer als auch betriebswirtschaftlicher Sicht sehr nützlich. Sie liefern Planungszahlen für die Auslegung der Stromversorgung und Kühlung von Technikstandorten, den operativen Betrieb und ein konsequentes Energiemanagement. Gerade Daten zu den energetisch komplexen Wechselwirkungen von Frequenzband, Sendeleistung und Verstärkereffizienz, oder auch zur auslastungsabhängigen elektrischen Leistungsaufnahme der digitalen Technikelemente (Prozessoren) werden von den Autoren als zukünftig wichtige Planungszahlen angesehen. Energiedaten unterstützen maßgeblich die energieeffiziente Konfiguration der Anlagentechnik unter Berücksichtigung standortspezifischer Randbedingungen. Informationen zur elektrischen Leistungsaufnahme in einzelnen Betriebszuständen (Power Mode) geben Hinweise zu den Möglichkeiten eines lastbezogenen Energiemanagements. So sind Daten zum Bereitschaftszustand (Idle oder Networked Standby) oder anderen Niedrigenergiezuständen (Low Power Modes) grundsätzlich von Wert, sollten aber um weitere Informationen wie beispielsweise die Reaktivierungsdauer (Latenz) zur Rückkehr in den vollen (oder einen gestuften) aktiven Nutzungszustand ergänzt werden. Zum Beispiel werden bei der Möglichkeit eines kaskadierten Energiemanagements Daten zu den an- und abgeschalteten Baugruppen und Schnittstellen benötigt, ähnlich wie dies im Bereich von Computern seit zwanzig Jahren mit dem existierenden Industriestandard ACPI (Advanced Configuration and Power Interface) erfolgt.

Es wird Netzausrüster bzw. Equipment-Herstellern empfohlen, folgende Aspekte zum Energiebedarf in Produktdatenblätter und Webseiten zu berücksichtigen:

- Daten zu elektrischen Leistungsaufnahme in unterschiedlichen Betriebszuständen mit Angabe von Reaktivierungszeiten und dem verbleibenden Funktionsspektrum.
- Daten zu elektrischen Leistungsaufnahme in unterschiedlichen Auslastungszuständen (Teillastbereichen) mit Angaben ggf. zum Wirkungsgrad der Stromversorgung und Auslegung der Kühlung.
- Daten zur angemessenen Dimensionierung der Stromversorgung und Netzteile, deren Wirkungsgrade und Redundanzauslegung.

- Sonstige Hinweise zum lastbezogene Energiemanagement und thermischen Management, da hier oftmals eine direkte Wechselwirkung besteht. Starke Lastwechsel können zu thermisch induziertem Stress bei den elektronischen und photonischen Baugruppen führen, welcher die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Technikelemente negativ beeinflussen kann.

4.1.5 Technologiespezifische Ökobilanzdaten für Umweltbewertungen

Die Genauigkeit der vorliegenden Ökobilanz der Mobilfunknetze wird als hinreichend eingestuft. Diese Einschätzung reflektiert den Umstand, dass der herstellungsbezogene CO2-Fußabdruck gegenüber dem nutzungsbezogenen anteilig in der Gesamtökobilanz relativ gering ausfällt und das Energiemodell der Nutzungsphase als gut eingeschätzt wird.⁸⁰ Diese Situation ist aber nicht optimal und sollte durch eine zukünftige Fokussierung auf herstellungsbezogene Ökobilanzdaten verbessert werden. Im Bericht wurde daher mehrfach darauf hingewiesen, dass die Datengrundlage zur Erstellung der herstellungsbezogenen CO2-Bilanz mangelhaft ist. Aktuelle Technologietrends und deren Umweltwirkung, wie beispielsweise der Einsatz von III-V Halbleitermaterialen für neue Leistungsverstärker und andere HF-Komponenten, konnten nicht quantifiziert werden. Generell bestand keine ökobilanzielle Datengrundlage für die komponentenseitige Bewertung der neuen 5G Mobilfunksysteme. So wurde die Mobilfunktechnik mit Ökobilanzdatensätzen abgeschätzt, die sich teilweise auf 10 bis 15 Jahre alte Technologiegenerationen beziehen.

Aus diesem Grund konnten insbesondere solche Komponenten und Baugruppen nicht bewertet werden, die auf Fertigungstechnologien basieren, die insbesondere auch kritische Rohstoffe beinhalten. Die Tabelle 41 zeigt die sogenannte *Critical Raw Materials* Liste der Europäischen Kommission, welche derzeit 30 Rohstoffe umfasst, die als umwelt- und versorgungskritisch eingeschätzt werden. Die Beurteilung der Rohstoffverfügbarkeit berücksichtigt u.a. die Lage, Größe und Konzentration der Erzreserven, den energetischen Aufwand der Rohstoffgewinnung, die Abbaubedingungen und geopolitische Marktverfügbarkeit, sowie gegenwärtige Recyclingraten.

Tabelle 41: Die 30 kritischen Rohstoffe für die EU 2020

Kritische Rohstoffe für die EU 2020			
Antimon	Germanium	Natürlicher Grafit	Titan
Baryt	Hafnium	Niob	Wolfram
Bauxit	Indium	Phosphor	Vanadium
Beryllium	Kobalt	Phosphorit	Metalle der Platingruppe
Bismut	Kokskohle	Scandium	Schwere Seltene Erden
Borat	Lithium	Siliziummetall	Leichte Seltene Erden
Flussspat	Magnesium	Strontium	

⁸⁰ Die dieser Studie zugrundeliegende Methodik folgt dem Grundsatz, dass die Granularität und Qualität von Datensätzen mit deren Einfluss auf das Endergebnis skalieren. Dies bedeutet, dass die Datensätze, die nach einer ersten überschlägigen Hochrechnung eine größere Umweltwirkung nach sich ziehen, detaillierter modelliert und mit einer stabileren Datenbasis versehen werden als solche, die unabhängig von Granularität und Qualität ohnehin keinen bedeutenden Einfluss haben.

Hierbei wurde beachtet, dass Komponenten mit geringer Umweltwirkung pro Stück in großer Stückzahl einen erheblichen Anteil am Gesamtergebnis tragen können.

Kritische Rohstoffe für die EU 2020

Gallium

Naturkautschuk

Tantal

Quelle: Eigene Darstellung nach (Europäische Kommission 2020).

Da diese Rohstoffe, wie beispielsweise Gallium, Germanium, Wolfram, Hafnium, oder auch Scandium voraussichtlich in weit größerem Umfang in der Hochfrequenztechnik und damit auch den neuen Mobilfunksystemen zum Einsatz kommen, werden dringend neue Ökobilanzdatensätze benötigt. Diese Datensätze müssen technologiespezifisch sein. Sie müssen die notwendige Veredelung der Rohstoffe, den mengenmäßigen Einsatz, sowie die konkreten Herstellungsprozesse für spezifische Bauelemente der Mikroelektronik und Optoelektronik nach neuestem Stand der Technik abbilden.

Die Erhebung dieser Ökobilanzdaten zieht sich durch die gesamte Wertschöpfungskette. Die Netzbetreiber müssen mit den Geräteherstellern (Netzausrüster) und diese mit den Chip- und Baugruppenproduzenten kooperieren, um die benötigten Ökobilanzdaten zu ermitteln. Die Erhebung von Ökobilanzdaten solle dabei strukturiert erfolgen. Die Industrie und Forschung werden aufgefordert, in einem gemeinsamen Vorgehen den Datenbedarf zu präzisieren. Ausgehend von einer Analyse der Qualität und Anwendbarkeit existierenden Datensätze, müssen Datenlücken identifiziert und spezifiziert werden. Die Erfassung der Daten sollte nach einem harmonisierten Verfahren erfolgen und das Vorgehen der Industrie bestmöglich koordiniert werden.

Diese Verfahren zur können sicherlich durch Aktivitäten in Deutschland vorbereitet werden. Allerdings muss man klar feststellen, dass die schlussendliche Erarbeitung einer ausreichenden Ökobilanzdatenbasis im Endeffekt eine internationale Aufgabe ist, da die meisten Stakeholder nicht in Deutschland ansässige Unternehmen sind. Um schnell eine internationale Arbeitsbasis zu schaffen, wäre es vorstellbar, die Integration der Thematik in das Technologie-Roadmapping (z.B. als Bestandteil der IEEE IRDS), oder in den Code-of-Conduct Broadband Equipment (EC JRC) zu integrieren. Die notwendigen Abstimmungsprozesse für den Aufbau einer neuen Ökobilanzdatenbasis für Mikroelektronik und Optoelektronik könnten auf einen internationalen Kongress initiiert werden. Hierbei sollten alle Stakeholder zunächst zu dem Verständnis gelangen, das präzise und komponentenspezifische Ökobilanzdaten auf verschiedenen Ebenen Mehrwerte erzeugen, von denen alle profitieren. Die Ökobilanzdaten bilden nicht nur die Basis von Umweltbewertungen. Die genaue Bilanzierung des Energie- und Ressourceneinsatzes unterschiedlicher Baugruppen und Gerätedesigns, liefert wertvolle Hinweise für die Optimierung der technischen Systeme, für die Reduktion des Energie- und Rohstoffeinsatzes und verbundene Kosten für die Unternehmen. Gleichwohl es heute noch keine ausreichende Beweislage gibt, zeigen die Erfahrungen konkreter Projekte, das Umweltentlastung langfristig keine Mehrkosten erzeugen, sondern vielmehr bei guter Planung eine Kostensparnis darstellen.

Zusammenfassend wird der Mobilfunkbranche dringend empfohlen, sich am Aufbau einer neuen Datenbasis für die Ökobilanzierung moderner Mobilfunksysteme aktiv zu beteiligen. Folgende Daten und Informationen bilden hierfür die Grundlage:

► Halbleiter-/Komponentenindustrie:

- Ökobilanzdaten für HF-Komponenten, Prozessoren und sonstige ICs.
- Ökobilanzdaten zur Aufbau- und Verbindungstechnik kompletter Baugruppen
- Daten zur Produktionsausbeute und intern Materialrecycling

► Geräte-/Anlagenausrüster:

- Ökobilanzdaten zur Leiterplattenherstellung und Geräteassemblierung
- Daten zum mengenmäßigen Einsatz von Rezyklaten
- Stücklisten und Produktdatenblätter, welche Daten zur Komponenten- und Materialzusammensetzung beinhalten
- Daten zur technischen(theoretischen) Einsatzdauer der Geräte
- Daten zur Demontage du Recyclingfähigkeit der Geräte

► Netzbetreiber:

- Daten zu Stückzahlen der im Einsatz befindlichen Geräte
- Daten zur durchschnittlichen (realen) Einsatzdauer der Geräte
- Daten zur Art und Menge der verbauten Materialien in Standortinfrastrukturen
- Daten zur Sammlung und Behandlung von Altgeräten inkl. Recycling

4.2 Empfehlungen an die Netzbetreiber und Netzausrüster

Die Ausführungen in Kapitel 4.1 richteten sich allgemein an Industrie, Politik und Wissenschaft zur Schaffung einer ausreichenden Datenbasis zur Umweltoptimierung des Mobilfunks. Das nun folgende Kapitel konkretisiert die Handlungsempfehlungen für die Industrie. Viele dieser Maßnahmen stehen in natürlich enger Wechselwirkung mit der Datenbasis und sollten daher auch im Folgenden berücksichtigt werden.

4.2.1 Netzplanung und Standorte

Die effektive Bereitstellung einer definierten Netzkapazität und Flächendeckung erfordert eine gute Planung. Das Ziel ist die optimale Dimensionierung des Mobilfunknetzes entsprechend den Anforderungen des Marktes und des Umweltschutzes. Natürlich sollten Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit Hand in Hand gehen. Teilweise entstehen jedoch Zielkonflikte, die aktiv gestaltet werden müssen.

Eine Unterdimensionierung kann kosten- und energiesparend sein, aber eine geringe Dienstgüte und zu wenig Kapazität aufweisen. Eine Überdimensionierung ist ressourcenseitig ineffizient und teuer. Diese Aspekte sind allen verständlich, in der Praxis aber nicht immer leicht in Einklang zu bringen. Im Detail sind eine optimale Netzddimensionierung sowie die beste Standort- und Technikauswahl sehr komplexe Planungsaufgaben mit hoher Tragweite. Standorte sollten funktechnisch gut gewählt und für den realen Kundenbedarf der Funkzelle konfiguriert werden. Der Nutzerbedarf muss im Fokus stehen. Eine kundenorientierte Planung (*user-centric planning*) muss darüber hinaus das Thema Energieeffizienz als Ganzes verstehen und in der Planung beispielsweise das Zusammenwirken mehrerer Funkzellen und ganzer Netzbereiche über den Tagesverlauf berücksichtigen.

Um diese Aspekte noch einmal etwas zu versinnbildlichen, nehmen wir das Beispiel einer „normalen“ Verkehrsinfrastruktur wie einem Flussübergang in einer Stadt. Es würde keinen Sinn ergeben, über einen großen Fluss viele kleine Brücken zu bauen. Vielmehr sucht man im Interesse der Gemeinschaft und Ökonomie die günstigsten Übergangspunkte und baut, mit guter Straßenanbindung, lediglich zwei bis drei große Brücken über einen Fluss. Dieser Ansatz gestattet hinsichtlich der Bau- und Betriebskosten eine vergleichsweise gute Wirtschaftlichkeit. Gleichzeitig ist ausreichend Redundanz vorhanden, um im Falle eines Ausfalls oder von Wartungsarbeiten den Bürgern genügend Restkapazität mit leichten Umwegen zur Verfügung zu stellen.

Dieses Beispiel verdeutlicht als Analogie wesentliche Faktoren, die auch im Ausbau bzw. der Planung von Mobilfunknetzen relevant sind und berücksichtigt werden sollten. Zu bedenken ist auch, dass in Deutschland die Telekommunikationsnetze als kritische Infrastrukturen gelten.⁸¹ Der Staat fordert in diesem Zusammenhang eine verstärkte Selbstverpflichtung und Zusammenarbeit aller relevanten Akteure bei der Prävention und Bewältigung von Ereignissen, wie Naturkatastrophen oder Sicherheitskrisen. Dies bedeutet auch den konstanten Erhalt einer Versorgungssicherheit.

Im Folgenden werden Ideen zur Planung von technisch funktionalen, aber gleichzeitig auch energie- und ressourcenschonenden Mobilfunknetzen skizziert. Funktionalität, Ökonomie und Ökologie bilden dabei eine Einheit, die ganz im Sinne des Konzepts einer nachhaltigen Entwicklung gut ausbalanciert gestaltet werden sollte.

4.2.1.1 Empfehlungen zum Themenkomplex Netzplanung

- ▶ **Monitoring der Technologieentwicklung:** Eine systemische, auf Energie- und Ressourceneinsparung ausgerichtete Optimierung der Mobilfunknetze erfordert ein umfangreiches technologisches und interdisziplinäres Wissen. Das Monitoring der Technologieentwicklung muss daher durch entsprechend aufgestellte Teams abgesichert werden. Das Monitoring der Technologieentwicklung sollten nicht nur technologiespezifisch ausgerichtet sein. Es sollte methodische Elemente eines systematischen Ökodesigns (*EcoDesign Thinking*) fortlaufend abprüfen.
- ▶ **Informationsaustausch zwischen Planung, Beschaffung und Standortpraxis:** Es muss eine gut funktionierende Informationsschnittstelle zwischen Netzplanung und Standortpraxis entwickelt werden, um Trends und Anforderungen aus der Praxis gegenüber der Technikentwicklung abprüfen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Ansatz bereits fest in der industriellen Praxis verankert ist. Allerdings wächst die Komplexität der Technologieentwicklung. Daher sollten organisatorische Strukturen für ein effektives Monitoring stetig angepasst und auch die Nutzung technischer Hilfsmittel (Datenanalyse, KI) verstärkt werden.
- ▶ **Mitwirkung an der technischen Standardisierung:** Standardisierungsmaßnahmen sind wichtig, aber gleichzeitig auch finanziell aufwendig. Die Verankerung von umweltrelevanten Anforderungen und spezifischen Ökodesign-Maßnahmen in der Standardisierung von Mobilfunktechnik hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. ITU-T und ETSI kollaborieren und haben zielführende Arbeitsgruppen geschaffen. Eine verstärkte Mitwirkung an diesen Arbeitsgruppen wird empfohlen.

4.2.1.2 Empfehlungen zum Themenkomplex Standortplanung

- ▶ **Identifizierung und Nutzung optimaler Standorte:** Die umgebungsspezifische Wellenausbreitung an einem Antennenstandort beeinflusst die Kanalqualität und schlussendlich den Energieaufwand. Daher sollten Standorte mit optimalen funktechnischen Bedingungen identifiziert und akquiriert werden. In der Realität ist diese gezielte Auswahl eines Standortes aus verschiedenen Gründen leider oftmals nicht möglich. Es wird

⁸¹ Definition laut der *Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS)* (Bundesministerium des Innern 2009): „Kritische Infrastrukturen sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“

empfohlen, Energiemodelle und funktechnische Standortanalyse für die Akquisition neuer Antennenstandorte zu nutzen.

- ▶ **Kollaboration an optimalen Standorten:** Aus Kostengründen werden bereits heute, meist auf dem Land, große Funktürme und Funkmasten von mehreren Anbietern genutzt. Eine gemeinsame Nutzung von Standorten bzw. Standortinfrastrukturen wird empfohlen. Zudem sollten die Netzbetreiber bei der strategischen Planung des Netzausbaus, der Akquisition und dem Aufbau neuer Antennenstandorte zusammenarbeiten, um optimale Funkzellen in der Fläche zu schaffen. Ein abgestimmtes Vorgehen unterstützt zudem ein effektives Roaming in Notfällen oder bei der gemeinsamen Versorgung von Flächen.
- ▶ **Schlanke Netzwerkstrukturen (Lean Design):** Es sollte der Versuch unternommen werden, Antennenstandorte so zu konfigurieren, dass Funkzellen bei niedriger Auslastung in geplanter Weise abgeschaltet oder in einen Ruhezustand (*Sleep Mode*) versetzt werden können und benachbarte Funkzellen die Abdeckung übernehmen. Schlanke Netzwerkstrukturen sind „nutzerorientiert“. Funkressourcen werden bedarfsgerecht bereitgestellt. Bei dieser Netzplanung kommt es auf die richtige Balance an, da sonst ggf. sogar Überkapazitäten aufgebaut werden. Diese Aspekte sollten eine stärkere Berücksichtigung finden.
- ▶ **Netzsimulationen und Methoden der Künstlichen Intelligenz:** Neue Algorithmen können dabei helfen, die zeitlichen und räumlichen Muster der Datennutzung zu verstehen und vorherzusagen. Sie können u.a. witterungs- und saisonbedingte Einflüsse auswerten. Im Zusammenwirken mit neuesten Technologien können auf dieser Basis einzelne Systemkomponenten, Funkzellen und ganze Antennenstandorte flexibel und dynamisch für einen optimalen und energieeffizienten Betrieb konfiguriert werden. Technologische Stichworte in diesem Zusammenhang sind C-RAN bzw. Baseband Pooling, Cooperative Multi-Point (CoMP) Systems, Transmission on Demand, Network Slicing, V-RAN, etc.
- ▶ **Einbindung von Ökobilanzmethoden und -Daten in Netzplanungs-Tools:** Vor dem Hintergrund existierender Netzplanungs-Tools und Daten zu realen Netzen wird empfohlen, Ökobilanzmethoden und -Daten direkt oder indirekt in die Simulationen und Werkzeuge einzubinden. Dies umfasst Umrechnungsfaktoren für die CO2-Bilanzierung des Energiebedarfs sowie eine Skalierung von generischen oder spezifischen Umwelt- und Materialdatensätzen der Herstellung und Entsorgung von Komponenten anhand der in der Simulation vorliegenden Anzahl an Komponenten. Die in dieser Studie angefertigten Datensätze und Umrechnungsfaktoren können als Grundlage für eine erste Hochrechnung dienen.

4.2.2 Stromversorgung und Infrastruktur

Dieser Themenkomplex betrifft drei große Maßnahmenpakete. Der erste Komplex beinhaltet die verlustarme Stromversorgung und direkte Nutzung von erneuerbaren Energien. Der zweite Komplex adressiert das thermische Management bzw. eine effektive Anlagenkühlung. Der dritte Komplex umfasst Aspekte der Montage, des Betriebs und der Wartung der technischen Anlagen an einem Antennenstandort.

4.2.2.1 Empfehlungen zum Themenkomplex Stromversorgung

- ▶ **Auslegung der Stromversorgung für Lastadaptivität:** Bei der Ausstattung neuer und der Modernisierung bestehender Antennenstandorte ist auf eine angemessen ausgelegte Stromversorgung zu achten. Bei der Dimensionierung sollte auch berücksichtigt werden,

dass moderne Mobilfunkanlagen eine höhere Dynamik bei der elektrischen Leistungsaufnahme aufweisen (lastadaptive Verhalten, dynamic range between idle and maximum power) und stromsparende Betriebszustände mit einer vergleichsweise niedrigen Leistungsaufnahme unterstützen. Diese Spanne kann dazu führen, dass die Stromversorgung suboptimale Wirkungsgrade in niedrigen Teillastbereichen und in sehr hohen Vollastbereichen aufweist.⁸² Es wird empfohlen, der Modernisierung der Stromversorgung Priorität einzuräumen, da damit noch immer ein großes Energieeinsparpotenzial verbunden ist.

- ▶ **Reduktion der Wandlungsverluste durch hoch effiziente Netzteile:** Der Wirkungsgrad der Stromversorgung und Unterverteilung (USV, PDU, PSU) haben einen substanziellen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf der Mobilfunkanlagen. Die Modernisierung einer bereits sehr effizienten Stromversorgung von beispielsweise 88% Wirkungsgrad hat immer noch ein Verbesserungspotenzial. Für eine gute Praxis (*Best Practice*) wird empfohlen, sich an den Vorgaben der Europäischen Kommission zur Netzteileffizienz von Servern zu orientieren. Die Wandlungseffizienz sollte in allen Teillastbereichen 90% erreichen und möglichst darüber liegen (vgl. Tabelle 24).
- ▶ **Optimierung der Gleichstromversorgung der Funkmodule:** Die mit dem 5G-Standard zunehmende Dynamik der Ansteuerung von Mehrfachantennensystem (MIMO) und neuen aktiven Antennenarrays (*Massive MIMO*) wird durch sehr komplexe Funkmodule realisiert, die wiederum auf einer flexiblen Gleichspannungsversorgung der vielfältigen RF-Komponenten und insbesondere der Leistungsverstärker basiert. Die Netzausrüster sollten Forschung und Entwicklung auf neue Stromversorgungsarchitekturen, ggf. in Kaskaden und unter Ausnutzung neuster Komponenten konzentrieren.
- ▶ **Integrierte Strommessgeräte:** Implementierung von Energiemesstechnik (*Metering*) in den Funkmodulen und Basisbandmodulen. Für die gleichstromversorgten Funkmodule muss eine entsprechende, geeichte Messtechnik ggf. erst entwickelt werden (vgl. Kap. 3.1.3).
- ▶ **Direkte Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien:** Neben dem heute bereits üblichen Einkauf von Grünstrom (unter Verwendung von CO2-Zertifikaten) wird empfohlen, dass die Netzbetreiber immer mehr erneuerbare Energien direkt beziehen und nutzen. Beispielsweise hat Vodafone ein Pilotprojekt mit dem Start-up Mowea angekündigt, um an einem Antennenstandort mit kleinen, modularen Windkraftanlagen direkt Strom zu erzeugen (Baumann 2020). Auch werden in diesem Zusammenhang kombinierte Windkraft- und Photovoltaik-Systeme mit komplexer Sensorik und Steueralgorithmen vorgeschlagen. Hierbei wird empfohlen, die Standortbedingungen und die Gesamteffizienz einer solch komplexen Stromerzeugungsanlage unter Berücksichtigung einer lebenszyklusbezogenen Ökobilanz zu prüfen.

Der Standard Rec. ITU-T L.1380: „Smart energy solution for telecom sites“ gibt konkrete Hinweise zur **richtigen Auslegung der Leistung, Sicherheit, Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit**, wenn Standorte mit verschiedenen Energiequellen wie Photovoltaik, Windenergie und Brennstoffzellen gespeist werden. Die Empfehlungen beinhalten auch Aspekte einer intelligenten Energiesteuerung, wenn zum Beispiel alternative Stromversorgungssysteme zu- oder abgeschaltet werden. Die Empfehlungen des Standards sollten Berücksichtigung finden.

⁸² Eine Vertiefung des Themas findet sich beispielsweise im Whitepaper „5G Network Energy Efficiency“ von Nokia (2016a.)

- ▶ **Brennstoffzellen zur Substitution von Dieselgeneratoren:** Dieselgeneratoren werden sowohl zur Notstromversorgung an großen Standorten als auch zur regulären Stromversorgung an Standorten mit schlechter Anbindung an das Stromnetz (off-grid areas), sowie bei temporären Standorten (Events) eingesetzt. Diese Systeme können auch durch Brennstoffzellen ersetzt werden. Vorteile gegenüber den Dieselaggregaten sind eine vergleichsweise lange Betriebsdauer und verlängerte Wartungszyklen. Energierelevante Transporte werden mitunter reduziert. Beispielsweise testet die Deutsche Telekom AG den Einsatz von Methanol-Brennstoffzellen mit Dauerlasten von 5 kW und Spitzenlasten von 7 kW. Eine Tankfüllung soll eine Mobilfunkzelle ein dreiviertel Jahr wartungsarm im Dauerbetrieb versorgen. Ein klassischer Dieselgenerator muss im Dauerbetrieb laut der deutschen Telekom AG alle 2 Wochen gewartet werden. Der geringe Wartungsaufwand sorgt laut der Deutschen Telekom AG für einen wirtschaftlichen Einsatz einer Methanol-Brennstoffzelle. Ein weiter Vorteil ist der vibrationslose und geräuscharme Betrieb. Für die CO2 Neutralität soll Bio-Methanol zum Einsatz kommen (Jodl 2019; Telekom Netz 2019).
- ▶ **Alternative Notstrombatteriesysteme:** Eine schrittweise Substitution von konventionellen Bleibatterien durch Lithiumbatterien wird empfohlen. Ökobilanzen zeigen leichte Vorteile der Lithiumsysteme (Decken 2017). Lithiumsysteme haben gegenüber Blei-Säure-Batterien deutlich verbesserte Lade- und Entladekapazitäten, dabei eine höhere Lebensdauer und benötigen weniger Platz. Sie können nicht nur als Back-Up Batterie eingesetzt werden, sondern auch zeitweise die Stromversorgung ersetzen oder als zusätzlicher Spannungs-Booster Verwendung finden. Intelligente Mess-, Steuer- und Regelungstechnik ist notwendig, um dieses Effizienzpotenzial sicher zu erschließen.

4.2.2.2 Empfehlungen zum Themenkomplex Kühlung

- ▶ **Aktive Konvektionskühlung und Flüssigkeitskühlung:** Die effektive Kühlung von Servern, Routern und sonstiger Netztechnik hat für die Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Energieeffizienz der Anlagentechnik eine sehr hohe Bedeutung. Herkömmliche Konvektionskühlung mit Lüftern kann hier schnell ans Limit geraten. Die Auslegung der Lüfter einschließlich Größe, Antriebsart und sensorbasierter Steuerung sollte spezifisch an die zu erwartenden Lastprofile angepasst werden. Eine Unter- und Überdimensionierung ist zu vermeiden. Modulare Ansätze und Kaskaden erhöhen die Effektivität von Lüftern bei lastadaptiven Rechnersystemen, bei denen eine große Differenz zwischen der Grundlast und der Spitzenlast besteht (high Dynamic Range). Mittel- bis langfristig werden möglicherweise auch Flüssigkeitskühlungen zum Einsatz kommen, welche die Entwärmung effektiver und energieeffizienter realisiert. Flüssigkeitskühlungen bilden auch die technische Grundlage für eine ökonomische Abwärmenutzung. Solche Konzepte werden im Kontext der Energieeffizienz größerer Rechenzentren erforscht. Es wird empfohlen, die technischen Entwicklungen im Bereich der Flüssigkeitskühlung intensiv zu beobachten und wenn zuverlässige Systeme zur Verfügung stehen, einen Einsatz in Betracht zu ziehen.
- ▶ **Verwendung von recyceltem Aluminium:** Diese Empfehlung bezieht sich nicht auf die passive Kühlung an sich, sondern auf den Materialeinsatz für diese Funktionalität. Separate Funkmodule (RRH) und aktive Antennen Arrays (AAA) müssen vergleichsweise leicht, robust und über lange Zeit gegenüber der Witterung geschützt sein. Daher kommen geschlossene Aluminiumgehäuse zum Einsatz, die den notwendigen Schutz bieten und deren Oberfläche eine passive Konvektionskühlung ermöglicht. Da Bauxit-basiertes neues Aluminium eine relativ hohe Umweltwirkung hat (vgl. Kapitel 2.4.2), wird der Einsatz von recyceltem Aluminium empfohlen, welches nur etwa ein Zehntel der Umweltwirkung aufweist.

4.2.3 Mobilfunktechnik und Energiemanagement

Die Modernisierung der Mobilfunktechnik muss mit Blick auf die gesamte Ökobilanz geplant und implementiert werden. Die lebenszyklusbezogene Umweltbewertung in Kapitel 2.4 verdeutlicht, dass der elektrische Energiebedarf in der Nutzungsphase noch immer die mit Abstand größte Umweltlast in einem Mobilfunknetz darstellt (zumindest in Bezug auf den Beitrag zum Klimawandel). Diese Aussage trifft sowohl auf cm-Wellensysteme als auch mm-Wellensysteme zu. Dennoch muss die Umweltwirkung der Herstellungsphase bei der Modernisierung der Anlagentechnik immer berücksichtigt werden. Eine Energieeinsparung beispielsweise durch den Einsatz einer neuen Baugruppe oder eines neuen Gerätes sollte gegenüber dem ressourcenseitigen Herstellungsaufwand dieser neuen Hardware genau quantifiziert werden. Berechnungsmodelle können helfen, den ökologisch optimalen Zeitpunkt einer Modernisierungsmaßnahme (Gerätetausch) zu bestimmen. Energie- und Ressourceneffizienz müssen gleichermaßen weiterentwickelt werden.

Ein weiterer Themenkomplex ist die schon mehrfach angesprochene Dimensionierung und Konfiguration der Gerätetechnik selbst. Die Konfiguration der Anlagen sollten individueller auf den realen Bedarf der Funkzelle abgestimmt werden. Monitoring und Analysen des Datenverkehrs sind für die Netzplanung und Auslegung der Gerätetechnik wichtig. Damit wird auch eine Grundlage für ein aktives Energiemanagement gelegt

Das aktive Energiemanagement betrifft die bedarfsgerechte Zu- und Abschaltung von Funk- und Rechnerressourcen. Diese Möglichkeiten bestehen bei älteren Technologien meist nicht. Das mit dem 5G Standard zum Einsatz kommende Zeitmultiplexing (TDM) ermöglicht heute die Implementierung eines aktiven Energiemanagements. Diese Verfahren sollten intensiv untersucht und erprobt werden, um im späteren Einsatz optimale Energieeinsparergebnisse zu erzielen.

4.2.3.1 Empfehlungen zum Themenkomplex spektrale Effizienz

- ▶ **4T4R MIMO für sub-3 GHz Bänder:** Die Umrüstung von Antennensystemen der sub-3 GHz Bänder von 2T2R auf 4T4R erhöht die spektrale Effizienz und kann damit auch zur Verbesserung der Energieeffizienz beitragen.⁸³ Netzausrüster wie Huawei schlagen hoch kompakte *All-In-One Passive Antenna* bzw. *Passive Antenna Multi-Band* Systeme vor, die platzsparend sind und Raum für weitere Antennensysteme schaffen (Huawei 2017b, 2017a).
- ▶ **Massive MIMO Beamforming Design:** Massive MIMO Antennensysteme für höhere Frequenzbänder im Spektrum >3 GHz und insbesondere für künftige mm-Wellen-Systeme >26 GHz haben ein hohes Potenzial für eine energieeffiziente mobile Kommunikation (vgl. Kap. 3.1.2.3). Dieses Effizienzpotenzial muss im Kontext einer Gesamtökobilanz validiert werden. Dabei hat das Systemdesign aufgrund der Anzahl der benötigten Bauelemente pro Transceiver-Pfad (*RF-Chain*) einen Einfluss auf den Energie- und Rohstoffbedarf dieser aktiven *Phased-Array*-Antennen. Energiemodelle können helfen, optimale Konfigurationen zu finden.
- ▶ **Neuartige Verstärker:** Die Leistungsverstärker in den Funkmodulen haben singulär betrachtet einen hohen Anteil am Gesamtenergiebedarf. Daher ist die Entwicklung und schnelle Einführung neuer Leistungsverstärker eine äußerst wichtige Maßnahme zur

⁸³ Eine Sammlung alten Antennensysteme und konzentrierte Zuführung zum Recycling ist dabei eine notwendige Maßnahme, um den durch den Austausch der Anlagen entstehenden Umweltaufwand zu kompensieren.

Senkung des Energiebedarfs. Leistungsverstärker mit guten Wirkungsgraden bei vergleichsweise geringer Sendeleistung sind eine Voraussetzung für ein dynamisches Energiemanagement, d.h. der Anpassung der Sendeleistung (Energiebedarf) an den Verkehr der Funkzelle (Lastadaptivität). Da in diesem Zusammenhang auch neuartige Halbleiter und komplexe Fertigungsprozesse zum Einsatz kommen, wird empfohlen, auch diese Entwicklung umweltseitig weiter zu untersuchen sowie Ökobilanzdaten zu diesen Bauelementen zu ermitteln.

- ▶ **Mehrstufige Stromversorgung:** Eine weitere Voraussetzung, um Energie zu sparen, ist eine flexible mehrstufige Spannungsversorgung der Funkmodule bzw. aktiven Antennenmodule (vgl. Kap. 3.1.3.2). Nur so können unnötige Verluste minimiert werden, die bei einem lastadaptiven Betrieb entstehen, wenn durch das Energiemanagement häufig zwischen einem hohen und niedrigen Teillastbetrieb gewechselt wird.

4.2.3.2 Empfehlungen zum Themenkomplex Energiemanagement⁸⁴

- ▶ Symbol/Slot Shutdown: Der 5G Standard erlaubt bei mittlerem Verkehrsaufkommen, den Leistungsverstärker kurzzeitig abzuschalten. Zusätzlich können im Vorhinein die Nutzerdaten in Sub-Slots konzentriert werden, sodass mehr Sub-Slots ohne Nutzerdaten abgeschaltet werden können.
- ▶ Channel/TRX Shutdown: Bei niedrigem Verkehr können ungenutzte Kanäle (Leistungsverstärker und Transceiver im RF-Frontend) abgeschaltet werden. Dabei sollte jedoch die spektrale Leistungsdichte der anderen Kanäle erhöht werden, um die gleiche Abdeckung zu erreichen.
- ▶ Carrier Shutdown: Bei niedrigem Verkehr können insbesondere die höheren Trägerfrequenzen komplett abschaltet werden. Die hohen Frequenzen sollten im Wesentlichen nur zur Erhöhung der Kapazität in Spitzenzeiten eingesetzt werden.
- ▶ Monitoring und Analyse des Datenverkehrs: Um das Ein- und Ausschalten einzelner Systemelemente (Träger, Verstärker, etc.) bzw. den Wechsel in unterschiedliche Betriebszustände zu realisieren, muss das System wissen, zu welchen Zeitpunkt die Maßnahme erfolgen soll. Die Auswertung historischer Lastprofile soll tageszeitbezogene Verhaltensmuster erkennen und Schwellwerte bestimmen. Auf dieser Basis können Vorhersagen getroffen werden, wann typischerweise ein höherer Kapazitätsbedarf entsteht. Die Identifizierung, Festlegung und periodische Anpassung von Schwellwerten (Initialwert oder Zeitpunkt einer Energiesparmaßnahme) ist eine wichtige Voraussetzung für das Energiemanagement.
- ▶ Dynamic Spectrum Sharing: Dieses Konzept wird teilweise schon praktiziert. Hierbei werden je nach Datenverkehr (Bedarf) einzelne Trägerfrequenzen flexibel im 4G oder 5G Modus genutzt. Ziel ist es, das beste Verhältnis von Kapazität (Datenrate, Abdeckung) und elektrischer Leistungsaufnahme zu realisieren. Da hohe Datenraten (5G) sowohl bei der Analog-Digital-Wandlung als auch in der Basisband-Verarbeitung rechenintensiv sind, kann ein Wechsel zu 4G den Rechenaufwand reduzieren und Energie sparen.

4.2.3.3 Empfehlungen zum Themenkomplex Interoperabilität:

- ▶ **Interoperabilität:** Proprietäre Schnittstellen (Hardware und Software) können technische Vorteile haben. Allerdings limitieren sie die Interoperabilität von Geräten unterschiedlicher

⁸⁴ Die ersten drei Empfehlungen folgten dem 3-stufigen Energiemanagementsystems „PowerPilot“ von ZTE (2020)

Hersteller oder Technikgenerationen. Damit wird die allgemeine Ressourceneffizienz minimiert und frühe Obsoleszenz befördert. Die Kompatibilität von Geräten oder Baugruppen hingegen erlaubt eine verlängerte Nutzung existierender Anlagen und kann zu einer höheren Auslastung insbesondere der digitalen Rechenressourcen beitragen. Die technischen und umweltseitigen Vorteile offener Standards (z.B. Open RAN) sollten noch umfangreicher untersucht und in Testbeds demonstriert werden. Es wird empfohlen, auch die technischen Voraussetzungen (Interoperabilität) für ein Roaming zu schaffen.

- ▶ **Modularität für Reparatur, Funktionserweiterung und Recycling:** Modularität erhöht prinzipiell die Anzahl an Schnittstellen, hat Einfluss auf die Zuverlässigkeit und damit die Komplexität von Systemen. Gleichzeitig unterstützt eine erhöhte Modularität die Wartung, die Reparaturfähigkeit sowie die Auf- und Umrüstung der Gerätetechnik. Modularität schafft Flexibilität und unterstützt die bedarfsgerechte Konfiguration von Anlagen. Diese Vorteile der Modularität sollten näher untersucht (inkl. Ökobilanzen) und spezifische Designziele für neue Gerätetechnik formuliert werden.
- ▶ **Modernisierung der digitalen Datenverarbeitung:** Neueste Prozessorhardware kann substanziell den Energiebedarf in der Nutzung senken. Es ist empfehlenswert die umweltseitigen Vor- und Nachteile von applikationsspezifischen, frei programmierbaren und sonstigen generischen Prozessoren zu prüfen. Längerfristig sind Ökobilanzen nötig, um den generellen Vorteil einer fortlaufenden Modernisierung in kurzen Zeitintervallen zu bestätigen und den ökologisch optimalen Zeitpunkt einer Modernisierungsmaßnahme zu bestimmen.

4.2.4 Kontinuierliche Verbesserung und Nachhaltigkeitsmanagement

Maßnahmen zur Reduktion des Energie- und Ressourcenbedarfs sowie zur Verbesserung der rohstofflichen Kreislauffähigkeit von Geräten und Anlagen sind keine einmaligen Aktivitäten. Technische und wirtschaftliche Randbedingungen unterliegen gerade im Bereich der IKT und dem Mobilfunk einer hohen Dynamik. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen liefern kontinuierlich Verbesserungsoptionen. Die Systemausrüster entwickeln neue modulare Produkte, die vielfältig konfiguriert werden können. Die Netzbetreiber haben teilweise die „Qual der Wahl“ und teilweise – bei proprietären Technologien – keine Wahl. Alle Planungsentscheide unterliegen wirtschaftlichen Gesichtspunkten und regulativen Anforderungen. Unter diesen „fließenden“ Bedingungen sind die Netzbetreiber und deren Systemausrüster aufgefordert, Strategien mit konkreten Maßnahmen zu erarbeiten, um technisch leistungsstarke, flächendenkende und zuverlässige Mobilfunknetze bereitzustellen, die gleichzeitig ökologisch und sozial verträglich als auch wirtschaftlich tragfähig sind. Eine in diesem Sinne „Nachhaltige Entwicklung“ kann nur praktisch umgesetzt werden, wenn dieser Aufgabe ein zielführendes methodisches Vorgehen und ganzheitlich denkendes Management zugrunde liegt.

Im Folgenden wird nochmals kurz auf die 5K-Methode eingegangen (vgl. Kap.1.3.3). Dieser vereinfachte Leitfaden gliedert das technisch komplexe Nachhaltigkeitsmanagement eines Mobilfunknetzes in fünf Themenblöcke. Die 5Ks (Konditionen, Kapazität, Konfiguration, Komponenten und Kontrolle) helfen bei der Analyse der technischen und marktwirtschaftlichen Entwicklung. Sie unterstützen durch Hinweise auf Wechselwirkungen die Identifizierung von guten Lösungen und liefern eine Struktur zur Überprüfung erzielter Ergebnisse.

Das Nachhaltigkeitsmanagement unter Anwendung der 5K-Methode ist fortlaufend und stellt eine fachliche Ergänzung dar, die sich in etablierte Managementmethoden zur kontinuierlichen Verbesserung (KVP/KAIZEN) einbetten lässt. Einen thematischen Schwerpunkt bildet die

Beobachtung (*Monitoring*) der technologischen und produkttechnischen Entwicklung unter Gesichtspunkten des Ökodesigns. Diese Analysen neuer Technik (Hardware und Software) sollten durch Ökobilanzen unterlegt werden, um Umweltwirkungen und Einsparpotenziale frühzeitig zu identifizieren.

Im Folgenden werden einige Stichwörter aus der 5K-Checkliste als eine weitere Orientierung kurz vorgestellt.

4.2.4.1 Konditionen

- ▶ **Monitoring:** Kontinuierliche Beobachtung und strukturierte Erfassung der technischen Entwicklung, marktökonomischer und gesetzlicher Randbedingungen. Ableitung von Strategien und konkreten Maßnahmen zur Verbesserung der CO2-Bilanz (Klimaschutz) und rohstofflichen Kreislaufführung (Recycling).
- ▶ **Ökobilanzen:** Nutzbarmachung von Produkt- und Systemökobilanzen zum Zweck der Identifizierung bestmöglicher Produkte und Systemkonfigurationen. Ökobilanzen können auf unterschiedlichen Technikebenen durchgeführt werden. Bekannt sind Ökobilanzen auf Produktebene (Komponente). Für Endgeräte wie Smartphones, Tablets oder Laptops werden erfreulicherweise immer häufiger Ökobilanzen (meist vereinfachte Ökobilanzen wie beispielsweise eine CO2-Bilanz) durch die herstellenden Unternehmen erstellt. Treiber dieser Entwicklung sind sicherlich auch die Europäische Ökodesign-Richtlinie sowie die IKT-orientierten Umweltlabel wie beispielsweise EPEAT und der Blaue Engel. Ökobilanzen für kommerzielle Rechen- und Netzwerktechnik existieren hingegen jedoch kaum, ein Manko, das auch die vorliegende Studie limitierte. Hier besteht starker Nachholbedarf und die Forderung, dass Ökobilanzen für alle Gerätekategorien im Bereich der Telekommunikationstechnik einschließlich Server und Datenspeicher erstellt werden. Diese Maßnahmen sollten auch die umweltseitige Bewertung der Rohstoffkritikalität beinhalten. In Kapitel 4.3.2 wird nochmals ausführlich auf den Themenkomplex „Ökobilanzdaten und Umweltbewertung“ eingegangen.
- ▶ Zielkonflikte: Frühzeitige Identifizierung von Zielkonflikten, die z.B. durch die Frequenzvergabe, proprietäre Technik, neues Nutzerverhalten, neue Dienste, oder auch Konditionen der optimalen Standortfindung oder eines Standort-Sharings entstehen. Der Fokus sollte bei der Lösung auf die längerfristige Reduktion des absoluten Energie- und Ressourcenbedarf gelegt werden. Da natürlich auch immer Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeit eine Rolle spielen, sind Szenarien auf Basis langfristiger Lebenszykluskosten mit einem Zeithorizont von etwa 10 Jahren zu berechnen.
- ▶ Produktlebenszyklus: Ein angemessen langer Produktlebenszyklus erfordert auch die langfristige Planung von Wartung, Reparatur und Aufrüstung. Vor dem Hintergrund von zunehmenden Versorgungsgängen mit Komponenten (Mikroelektronik) und der allgemeinen Verfügbarkeit von Technologien, Produkten und Ersatzteilen wird das Thema „technologische Souveränität“ und damit die regionale Befähigung zur Sicherstellung dieser Marktbedürfnisse immer wichtiger. Es sollte daher auch von den Netzbetreibern und Systemausrüstern noch stärker adressiert werden. Da dieses Thema auch einen volkswirtschaftlichen Charakter trägt, wird es in Kap. 4.3.4 noch einmal behandelt.
- ▶ **Energiemix:** Die Verfügbarkeit und direkte Nutzung erneuerbarer Energien hat aus Sicht des Klimaschutzes für die Telekommunikationsbranche einen äußerst hohen Stellenwert, da die Umweltwirkung derzeit maßgeblich vom elektrischen Energiebedarf der Geräte- und

Anlagentechnik bestimmt wird. Eine effektive Nutzbarmachung erneuerbarer Energien ist ein fortlaufender Optimierungsprozess.

4.2.4.2 Kapazität

- ▶ **Planungsgrößen:** Die richtige Dimensionierung und ggf. flexible Auslegung der Netzkapazität ist eine sehr komplexe Ausgabe. Wie in den vorangestellten Empfehlungen bereits detailliert ausgeführt wurde, hat eine präzise, bedarfsgerechte Planung eine sehr hohe ökologische Hebelwirkung. Planungsentscheide müssen daher auf Fakten basieren. Durchschnittliche Werte werden zwar als Planungsgröße benötigt, jedoch ist die Praxis weitaus individueller, und daher sollten die Datenbasis immer standortspezifischer und damit feingranularer werden.
- ▶ **Digitaler Zwilling:** Mobilfunkstandorte sind teure Immobilien in denen teure Technik steht. Sie haben im operativen Betrieb einen substanzialen elektrischen Energiebedarf und erzeugen hohe Stromkosten. Ausfälle der Systemtechnik führen nicht nur zum zeitweisen Verlust des Mobilfunkdienstes, sondern können unter Umständen zu weiteren Folgekosten und Schadensereignissen führen. Vor diesem Hintergrund sollte die Realisierung von digitalen Zwillingen eruiert werden, die standortspezifische Daten entlang des gesamten Lebenszyklus systematisch sammeln, verwalten und analysieren (Kritzinger et al. 2018). Digitale Zwillinge sind "eine digitale Repräsentation eines aktiven, einzigartigen Produkts (reales Gerät, Objekt, Maschine, Dienstleistung oder immaterieller Vermögenswert) oder eines einzig-ähnlichen Produkt-Service-Systems, das seine ausgewählten Merkmale, Eigenschaften, Zustände und Verhaltensweisen mittels Modellen, Informationen und Daten innerhalb einer einzelnen oder auch über mehrere Lebenszyklusphasen hinweg umfasst" (Stark und Damerau 2019). Intelligent verknüpfte umweltrelevante Daten in einem Digitalen Zwilling haben das Potential, automatisierte LCA-Daten und -Auswertungen zu generieren und einen stetigen Optimierungsprozess in der Produktion, der Nutzungsphase und dem End-of-Life zu etablieren (z.B. durch dynamische Reportings zu Energie, Material und Lieferwegen). Einsparpotentiale entlang der Wertschöpfungskette, Szenarien für Hochrechnungen nach Verbreitung einer Technologie und die Berücksichtigung von Wartungs- und Remanufacturing-Ansätzen mit Hilfe der LCA-Modellierung und auch umweltseitige Amortisationsrechnungen können auf diese Weise automatisiert durchgeführt werden. Digitale Zwillinge mit Umweltinformationen erlauben einen ganzheitlichen Blick entlang des gesamten Lebenszyklus von Mobilfunkstandorten und sollten für ein nachhaltiges Energie- und Ressourcenmanagement weiter erforscht werden.
- ▶ **Bilanzierung des funktionalen Nutzens:** Ökobilanzen beinhalten für die Ergebnisinterpretation immer auch eine funktionelle Einheit, welche den Energie- und Rohstoffaufwand und die damit verbundenen Umweltwirkungen in Relation zu einem funktionalen Nutzen stellen. Der Mobilfunk ist eine kritische Infrastruktur mit einem sehr hohen funktionalen Nutzen. Doch wie begründet sich diese qualitative Aussage? Welche messbaren Einheiten eignen sich, um den objektiven und teilweise eher subjektiven Nutzen zu bilanzieren. In diesem Zusammenhang steht auch das Thema „Green by ICT“ und die Herausforderung einer wissenschaftlich belastbaren Quantifizierung und Bewertung des Einsatzes von IKT (Mobilfunknetze).

4.2.4.3 Konfiguration

- ▶ **Systemökobilanzen:** Die Telekommunikationsbranche hat mit Blick auf Ökobilanzen eine Besonderheit. Die Telekommunikationstechnik (Komponenten) ist teilweise sehr individuell konfiguriert und an Standortbedingungen und deren Verlinkung (Vernetzung) angepasst.

Diese „Konfiguration“ kann einen Einfluss auf die Ökobilanzen haben, wenn ein System nicht entsprechend der Betriebsbedingungen dimensioniert, d.h. über- oder unterkonfiguriert ist. Es wird empfohlen, komplexere Sachbilanzmodelle z.B. für einzelne Standortkategorien, Netzbereiche etc. zu entwickeln. Hierbei kann auf UTAMO aufgesetzt werden.

- ▶ **Konfiguration auf Netzebene:** Energie und Ressourcen können nur eingespart werden, wenn die Dimensionierung der einzelnen Antennensysteme und sonstige Netzelemente auf die realen betrieblichen Bedingungen ausgelegt wird. Da mit dem 5G Standard neue Architekturen und softwaregestützte Konfigurationsoptionen angeboten werden, sind die umweltseitigen Vorteile dieser Lösungen zu prüfen. Dieser Themenkomplex bezieht sich beispielsweise auf die potenziellen umweltseitigen Vorteile von C-RAN und dem Baseband Pooling.
- ▶ **Konfiguration auf Standortebene:** Auch diese Ebene sollte periodisch auf Verbesserungspotenziale hin geprüft werden. Die Infrastrukturtechnik wie Stromversorgung und Klimatisierung sollten auf die elektrischen Lastprofile der Telekommunikationstechnik stetig optimal abgestimmt werden. Hohe Wirkungsgrade von >90% bei der AC/DC und DC/DC Wandlung sollten angestrebt werden, da der Energiebedarf der Antennenstandorte durch zusätzliche Antennensysteme mittelfristig steigt. Für eine optimale Spannungsversorgung der Funkmodule (insbesondere, wenn diese stärker lastadaptive betrieben werden könnten) sollte die Auslegung der Gleichspannungsversorgung auf Standortebene einen Optimierungsschwerpunkt bilden.
- ▶ **Konfiguration auf Geräteebene:** Mittel- und langfristig kann eine hohe Energieeinsparung nur erzielt werden, wenn die Funk- und Anlagentechnik auf die realen Betriebs- und Standortbedingungen individuell abgestimmt sind. Bei der Beschaffung neuer Technik sollte auf Energiemanagementoptionen, dynamische Lastanpassung und beste Wirkungsgarde auch in Teillastbereichen geachtet werden. Im Betrieb sollten einzelne Anlage hoch ausgelastet und bei geringem Betrieb bedarfsgerecht in Niedrigenergiezustände (*Sleep Modes*) wechseln oder zeitweise abgeschaltet werden. Das Energiemanagement ist durch Erfassung und Auswertung von Betriebsdaten, sowie durch Lastprognosen zu unterstützen. Hier können auch Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz zu Einsatz kommen.

4.2.4.4 Komponente

- ▶ **Nachhaltiger Rohstoffeinsatz:** Die Herstellung der Gerätetechnik hat eine nicht zu vernachlässigende Umweltwirkung, die leider auf Grundlage heute existierender Ökobilanzdaten noch viel zu ungenügend bewertet werden kann. Doch die schon heute existierenden Daten deuten darauf hin, dass der Rohstoffeinsatz im Bereich der Telekommunikationstechnik einem Wandel unterliegt, der aus im Wesentlichen höheren Schalt- und Sendefrequenzen resultiert. Für Leistungsverstärker, Filter, Laserdioden und sonstige ICs werden vermehrt Gallium, Germanium, Indium, Scandium, Niob, Wolfram und Seltene Erden benötigt.⁸⁵ Neben diesen kritischen Rohstoffen sollte auch sorgsam mit Mengenmaterialien wie Aluminium und Kupfer sowie Baumaterialien wie Beton und Stahl umgegangen werden.
- ▶ **Design und Fertigung:** Die Höhe der Umweltwirkung der Herstellung von Komponenten steht in einer Wechselwirkung mit dem Design der Komponenten. Wie die Ausführungen zur

⁸⁵ Einen vertieften Einblick der Problematik „kritische Rohstoffe in der IKT“ bieten u.a. die von der DERA beauftragte Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021“: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Laufende-Projekte/Rohstoffwirtschaft/Zukunftstechnologien/lp-zukunftstechnologien_node.html und die vom UBA beauftragte Studie „Green Cloud Computing“ (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/green-cloud-computing>).

Technologieentwicklung in der Mikroelektronikindustrie (vgl. Kap. 3.1.3.1) andeuten, wirken sich Form, Anordnung und Materialien nicht nur auf die Betriebseigenschaften, sondern auch auf die Fertigungsausbeute und Qualitätsgüte der Komponenten aus. Modularer Design erzeugen oft eine verbesserte Reparaturfähigkeit (*Reworking*) bereits in der Fertigung und vermeiden so übermäßigen Ausschuss.

- ▶ **Nutzungsphase:** Die Auswahl der Komponenten sollte sich immer an realen Nutzungsprofilen orientieren. Wirkungsgrade, Miniaturisierungsgrad und andere Leistungsmerkmale sollten dem modernsten Stand der Technik entsprechen. Deren Umweltvorteile sollten frühzeitig bewertet und bei der Beschaffung entsprechend berücksichtigt werden.
- ▶ **End-of-Life:** Die Kreislaufwirtschaft einschließlich des produktbezogenen und rohstofflichen Recyclings gewinnt vor dem Hintergrund begrenzter natürlicher Ressourcen einen immer höheren Stellenwert. Im Bereich der IKT und des Mobilfunkes kommt es darauf an, nach dem Produktlebensende die Altgeräte zu sammeln, zu entstücken (Demontage) und in recyclingfähige Wertstofffraktionen aufzuteilen. Dieses prinzipielle Vorgehen sollte immer weiter verfeinert werden. Es wird empfohlen, dies bereits beim Gerätedesign zu berücksichtigen und gemeinsam mit der Recyclingindustrie und in periodischen Abständen, die Demontage, Materialtrennung und Zuordnung zu Werkstofffraktionen zu überprüfen, da der technische Fortschritt die Materialzusammensetzung der Produkte mit der Zeit verändert.

4.2.4.5 Kontrolle

- ▶ **Integriertes Energiemanagement:** Die bisherigen Ausführungen zu stromsparenden Technologien, den Einsatz von erneuerbaren Energien und das noch folgende Kapitel zum Energiemonitoring und Leistungskennzahlen verdeutlichen, dass der absolute Schwerpunkt der umweltseitigen Optimierung des Mobilfunkes derzeit das Energiemanagement ist. Die kontinuierliche Verbesserung des Energiemanagements muss Priorität haben.
- ▶ **Green Procurement:** Die Beschaffung der „richtigen“ Technik zum „richtigen“ Zeitpunkt kann die Umweltwirkung eines Mobilfunknetzes beeinflussen. Wie in den bisherigen Ausführungen mehrfach betont wurde, können Energie und Rohstoffe nur eingespart werden, wenn die Gerätetechnik optimal konfiguriert und auf die konkreten Einsatzbedingungen abgestimmt wird. Auch der umweltseitig optimale Zeitpunkt einer Modernisierungsmaßnahme (Gerätetausch) kann theoretisch berechnet werden. Vor diesem Hintergrund erhöht sich die Komplexität der Beschaffung neuer Technik. Es wird empfohlen, die Umweltbewertung in die Geschäftsbereiche Netzplanung und Technikbeschaffung zu integrieren.
- ▶ **Zustandsüberwachung:** Die Zustandsüberwachung ist ein weiterer Aspekt des Themenkomplexes „Kontrolle“ mit Implikationen für eine Reduktion der Umweltwirkung von Mobilfunkanlagen. Die feingliedrige Überwachung der Leistungsmerkmale der Systemtechnik hat das Potenzial, anhand der Detektion von Anomalien, frühzeitig Ausfälle zu detektieren. Das Konzept einer bedarfsgerechten Wartung nutzt auch datengestützte Prädiktionsverfahren. Der Einsatz zusätzlicher Sensorik bzw. die noch bessere Nutzbarmachung bereits in den Systemen integrierter Sensorik wird empfohlen.

4.3 Empfehlungen an die Politik und Gesellschaft

4.3.1 Europäische Ökodesign Richtlinie

Die Richtlinie 2009/125/EG (OJ L 285, 2009, S. 10-35) ist eine Rahmenrichtlinie, welche die umweltgerechte Gestaltung von elektrischen und elektronischen Produkten adressiert und deren Umsetzung regelt. Produktspezifische Mindestanforderungen werden in einzelnen, produktbezogenen Verordnungen geregelt. Darüber hinaus gibt es produktübergreifende Verordnungen wie die zum Thema Standby und Netzwerk Standby. In Deutschland setzen das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) und produktspezifische Verordnungen (VO) die Ökodesign-Richtlinie in nationales Recht um (BGBl. I, 2011, S. 2224). Die EU-Rahmenverordnung 2017/1369/EU (OJ L 198, 2017, S. 1-23) (vormals 2010/30/EU) ist die Rahmenrichtlinie zur Energieverbrauchskennzeichnung, welche den Verbraucher über die Energieeffizienz von Produkten mittels eines Energielabels und Zusatzinformationen aufklärt. Die produktspezifische Energieverbrauchskennzeichnung (Energielabel mit Ausweisung von Energieeffizienzklassen) wird durch einzelne Verordnungen geregelt. In Deutschland wurde die EU-Rahmenrichtlinie mit der Neufassung des Energieverbrauchskennzeichnungsgesetzes (EnVKG) vom 10. Mai 2012 (BGBl. I, 2012, S. 1070) umgesetzt. Es wurde durch Artikel 10a des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl I, 2021, S. 3026) geändert.

In diesem rechtlichen Rahmen der europäischen Umweltgesetzgebung gibt es außer für Server und Datenspeichersysteme keine konkreten produktbezogenen Durchführungsmaßnahmen (*Implementing Measures*) für Telekommunikationstechnik. In vergangenen Arbeitsplänen zur Ökodesign-Richtlinie wurden allerdings Basisstation und andere Netztechnik schon thematisiert, sodass nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch diese Produktgruppen im Rahmen von Vorstudien auf Ökodesign-Maßnahmen hin untersucht werden. Sollte es dazu kommen, sollten vor dem Hintergrund der hier vorliegenden Studie, folgende thematische Schwerpunkte in die Richtlinie einfließen:

- ▶ **Informationspflichten in Produktdatenblättern:** Ausweisung der elektrischen Leistungsaufnahme in einzelnen Betriebszuständen und für verschiedene, typische Gerätekonfigurationen. Hinweis zu Optionen eines optimalen Energiemanagements und Ausweisung von Schnittstellen für Energiemessungen.
- ▶ **Integrierte Energiemessung:** Da insbesondere die Funkmodule eine Gleichstromversorgung haben, sind integrierte Messpunkte (Sensorik) und Schnittstellen zu schaffen.
- ▶ **Wirkungsgrad der Stromversorgung:** Mindestanforderungen zum Wirkungsgrad von Netzteilen und ggf. zum Nettowirkungsgrad von gleichstrombetrieben Gerätearten. Definition und Berücksichtigung anwendungstypische Teillastbereiche.
- ▶ **Energiemanagement:** Anforderungen an ein mehrfach gestuftes Energiemanagement, welches Energiesparzustände mit definierten Verfügbarkeitsparametern (z.B. Reaktivierungszeiten) beinhalten. Es sind zusammen mit den Anforderungen auch entsprechende Testverfahren zu entwickeln.
- ▶ **Modulares Design für Reparier- und Recyclingfähigkeit:** Hier sollten insbesondere Analysen zu typischen Schwachstellen vorausgehen (z.B. Alterung von Komponenten, mechanische Design).
- ▶ **Angemessen Interoperabilität:** Dieser Aspekt dient der Vermeidung verfrühter Obsoleszenz.

4.3.2 Datenbasis zum Energiebedarf der Mobilfunknetze

Energiebezogene Daten sind betriebswirtschaftlich wichtig. Sie ermöglichen die Berechnung von operativen Stromkosten und Leistungskennzahlen. In Abstimmung mit den Netzplanern und Standortverantwortlichen können Energiedaten gezielt bei der Beschaffung von neuer Technik genutzt werden, soweit dies nicht schon prinzipiell geschieht. Im Kontext des Marktzuganges und der Beschaffung gibt es aktuell (Ende 2021) keine gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich solcher Informationspflichten. Im Rahmen der Europäischen Ökodesign-Richtlinie werden zwar bereits mobile Endgeräte, Server und Datenspeichersysteme reguliert, aber aufgrund der technischen Vielfalt und komplexen Einsatzbedingungen von Telekommunikationstechnik, sind diese Produktgruppen bislang von der Regulierung ausgenommen. Einzig der „EU Code of Conduct Energy Consumption of Broadband Equipment“ (Version 8.0) (Bertoldi und Lejeune 2021) kann als eine halboffizielle Anforderung verstanden werden, ist aber für den Bereich des Mobilfunk nicht detailliert genug.

Zu Verbesserung der Datenlage, sowohl zum Zweck der Verbesserung der Energienutzung im operativen Betrieb als auch zur Verbesserung der gesamten lebenszyklusbezogenen Umweltwirkung der Mobilfunknetze, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- ▶ Die EMF-Standortdatenbank der Bundesnetzagentur bildet eine sehr gute Basis für die Erfassung standortspezifischer Energiedaten. Wie die Auswertung exemplarischer Datensätze aufzeigte, sind die Angaben zur maximalen Sendeleistung nicht zielführend. Es wird ein harmonisiertes Reporting gefordert, welches spezifische Vorgaben an die Ausweisung realistischer Werte zur Sendeleistung macht. Die Vorgaben sollten auch die Prüfung der Datenplausibilität beinhalten.
- ▶ Neben der Angabe (a) des maximalen Wertes sollten (b) abgeschätzte typische Werte und im Zeitverlauf (c) real gemessene Werte der Sendeleistung erfasst werden. Auch können berechnete Leistungskennzahlen erfasst werden.
- ▶ Ein methodischer Ansatz zur konkreten Datenerfassung, der Datenaufbereitung und der Darstellung der Energiedaten sollte, wie bereits erwähnt, vorab erarbeitet werden. Aspekte der Datenerfassung beinhalten z.B. die Messpunkte, Messintervalle und funktionalen Einheiten. Die Datenaufbereitung adressiert Aspekte der Datenaggregation, Mittelung und Gewichtung. Die Darstellung kann beispielsweise Kennzahlen mit beinhalten oder auch einen gestuften Zugang für ausgewählte Personen zu spezifischen Daten. Da Energiedaten als vertrauliche Unternehmensdaten einzustufen sind, muss geklärt werden, in welchen Umfang diese Information der Öffentlichkeit bzw. einem definierten Personenkreis zugänglich gemacht wird.
- ▶ Der methodische Ansatz sollte vor dem eben dargestellten Hintergrund unter Beteiligung von Experten aus den betroffenen Behörden, den Unternehmen und einem wissenschaftlichen Begleitteam erarbeitet werden. Empfohlen wird auch, sich international zu vernetzen, um eine globale Harmonisierung (Standardisierung) zu erleichtern bzw. auf aktuelle Trends reagieren zu können.

4.3.3 Frequenzvergabe und nachhaltiger Netzausbau

Leistungsstarke Mobilfunknetze sind eine kritische Infrastruktur für unsere Volkswirtschaft und sie haben eine hohe Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft. Der Netzausbau wird aktuell von der Notwendigkeit getrieben, durchschnittlich steigende mobile Datenvolumen immer und überall in der Fläche sicherzustellen. Dieser Anspruch beinhaltet insbesondere in ländlichen Gebieten mit sporadischen Nutzerverhalten einen Zielkonflikt. Hier müssen große

Netzkapazitäten aus Gründen der Flächendeckung vorgehalten werden, die nur teilweise eine Auslastung finden.

Aus Sicht des Energie- und Ressourcenbedarfs ist dies problematisch. Akzeptiert man, dass die Flächen- und Kapazitätsabdeckung eine funktionale und volkswirtschaftliche Notwendigkeit ist, und akzeptiert man in diesem Zusammenhang auch, dass konventionelle Lösungen mit vielen parallelen aber gleichzeitig unterdimensionierten Einzelnetzen suboptimal sind, kann nur ein geplanter, auf Kollaboration basierender Netzausbau den oben benannten Zielkonflikt lösen. Die Frequenzvergabe und Netzpolitik kann durch Anforderungen und festlegen von Rahmenbedingungen einen großen Einfluss auf die nachhaltige Gestaltung der Mobilfunknetze nehmen. Ziel muss es hierbei sein, dass die Netze an die längerfristigen Erfordernisse aller Nutzer sehr gut angepasst werden, d.h. nicht über- oder unterdimensioniert sind, keine zu gering ausgelasteten Netze entstehen, und dass die bundesweite Netzinfrastruktur (aller Betreiber) über Mechanismen wie Roaming verfügt, damit eine ausreichende Ausfallsicherheit gewährleistet wird.

Prinzipielle Anforderungen an den Netzausbau:

- ▶ Eine Überdimensionierung der Mobilfunkinfrastruktur in Deutschland durch viele parallele Mobilfunknetze erscheint zumindest aus Sicht des Energie- und Ressourcenbedarfs suboptimal. Andererseits gibt es immer noch größere Gebiete mit unterdimensionierten Netzen. Es wird empfohlen, ohne eine zu starke Beeinträchtigung des Wettbewerbs, einen koordinierten Netzausbau insbesondere im ländlichen Bereich durch eine gezielte Frequenz- oder Flächenvergabe weiter zu befördern. Die Rolle und ggf. direkte Einbindung der Mobilfunkinfrastrukturgesellschaft (MIG) in diese Planungsaufgabe ist zu prüfen.
- ▶ Benötigt wird eine angemessene Redundanz in der nationalen Mobilfunkinfrastruktur. Die derzeit drei parallel in der Fläche ausgebauten Netze bilden hierfür eine gute Grundlage. Hierbei ist zu bedenken, dass jedes dieser drei Netze derzeit zwar fast die gesamte Fläche Deutschland abdeckt, die Kapazität aber die eigene Nutzerzahl ausgelegt ist (aktuell etwa immer nur auf ein Drittel aller Nutzer). Beim zukünftigen Netzausbau sollte unter Berücksichtigung der Kapazitäten aller Netzbetreiber (3+1, oder noch mehr) ein bundesweites Redundanzkonzept für die Mobilfunkinfrastruktur erarbeitet werden. Damit ist gemeint, dass zu viele parallele Netzinfrastrukturen, die dann sehr gering ausgelastet sein würden, aufgrund des dauerhaften Energie- und Ressourcenbedarfs eine unnötig hohe Umweltlast darstellen. Auch die Kosten für den Netzausbau und den Betrieb sind zu berücksichtigen. Hingegen würde ein mit den Netzbetreibern abgestimmter und damit koordinierter Netzausbau zu einer schlanken und dennoch performanten Netzlösung führen und sogar Kostenvorteile sowohl für Betreiber als auch Nutzer haben. Eine Voraussetzung auch in diesem Fall wäre die Befähigung der Mobilfunknetze zum Roaming. Auch Open-RAN Konzepte sind für lokale Lösungen zu prüfen.
- ▶ Ein stärker abgestimmter Netzausbau ist, wie schon mehrfach angedeutet wurde, insbesondere für eine bessere Ausfallsicherheit erforderlich. Um hier noch ressourceneffizienter zu werden, sollten funktechnisch optimale Antennenstandorte, die noch über Kapazität verfügen, mehreren Netzbetreibern zugänglich gemacht, bzw. solch optimale Antennenstandorte gezielt identifiziert und erschlossen werden. Das Roaming über alle Netze sollte insbesondere aus dem Gesichtspunkt der Grundversorgung und Ausfallsicherheit, sowie einer Vermeidung der Überdimensionierung einzelner Betreiber netze möglich gemacht werden. Es wird empfohlen, aufbauend auf den Erkenntnissen des UTAMO-Projektes, die planerischen Möglichkeiten, wirtschaftlichen

Implikationen und umweltseitigen Vorteile eines bundesweit koordinierten Netzausbau wissenschaftlich zu präzisieren.

- Ein standardisiertes Reporting von Energieverbräuchen und Leistungskennzahlen sollte zur allgemeinen Praxis der Unternehmen gehören und auch Gegenstand der Netzpolitik werden. Eine Harmonisierung der Berichtstätigkeit bzw. entsprechender Vorgaben zu Art und Form der Veröffentlichungen wird empfohlen.

4.3.4 Technologische Souveränität

Mit dem Begriff technologische Souveränität wird auf die marktwirtschaftliche Verfügbarkeit von Technologie und Produkten hingewiesen. Der Begriff wird sowohl im volkswirtschaftlichen als auch betriebswirtschaftlichen Kontext verwendet. Mit Volkswirtschaftlich ist die Einflussnahme auf die Technologie- und Produktentwicklung gemeint. Um Ökodesign-Maßnahmen umsetzen zu können, ist der Zugang beispielsweise zu einem Komponentendesign oder die Schaffung einer offenen oder standardisierten Schnittstelle notwendig.

Technologische Souveränität betrifft des Weiteren die Befähigung zur regionalen Fertigung eines Produktes oder essentieller Komponenten. Dieser Anspruch steht nicht im Widerspruch zur Globalisierung und Liberalisierung von Märkten. Vielmehr reduziert eine Regionalisierung, d.h. eine größere regionale Verteilung der Produktion, das Versorgungsrisiko am Markt. Gerade auch das Thema Komponenten- und Ersatzteilverfügbarkeit bzw. die frühzeitige Abkündigung von Komponenten, Baugruppen und Produkten (Obsoleszenz) kann aus ökologischer Sicht vielfältige Folgen haben. Schon heute ist Obsoleszenz ein ernstes betriebswirtschaftliches Thema für die deutsche Industrie, welches die Abhängigkeit regional fokussierter Zulieferketten als wirtschaftliches Risiko beschreibt. Einen Schwerpunkt bildet hier die Mikroelektronik.

Technologische Souveränität betrifft auch das Thema Software. Viele Softwareprodukte sind ineffizient designt und benötigen unnötig viele Rechen- und Speicherressourcen. Auch wird die Netzkapazität durch Push-Funktion wie z.B. Pop-up Videos unnötig belastet. Andererseits wurden viele positive Softwareentwicklungen wie Datenkompressionsverfahren gerade auch durch deutsche Forschungsinstitute und Universitäten entwickelt. Diese können aber nicht forciert in den Markt gebracht werden, da es an deutschen und europäischen Marktführern mangelt. Eine Stärkung dieser Marktbereiche ist wichtig.

Es wird empfohlen, für Deutschland bzw. im Rahmen der Europäischen Union den Aufbau neuer Produktionskapazitäten für ausgewählte Mikroelektronik und kritische Komponenten der Telekommunikationstechnik zu erwägen, entsprechende Planungsstudien durchzuführen und strategische Allianzen zu bilden. Auch muss noch viel stärker als bisher der Bereich der „grünen“ Softwareentwicklung gestärkt werden. Green IT muss mit vielen Facetten in den Universitäten und Fachhochschulen etabliert werden. Die Themenkomplexe sind insbesondere auch didaktisch aufzubereiten, damit die interdisziplinären Inhalte einem breiteren Kreis von Fachleuten und Entscheidungsträgern effektiv vermittelt werden können. Gerade aus Sicht der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Verträglichkeit ist die Schaffung von regionaler, technologischer Souveränität eine Nachhaltigkeitsaufgabe.

4.3.5 Weiterer Forschungsbedarf

Das UTAMO-Projekt wurde mit der Intention gestartet, eine erste ganzheitliche Bilanz des Energie- und Ressourcenbedarfs der Mobilfunknetze in Deutschland zu erstellen. Im Laufe des Projektes wurde methodische Vorgehensweisen entwickelt, Daten ermittelt und neue Themenstellungen identifiziert. Gleichzeitig wurde die Komplexität der Thematik deutlich sowie der Bedarf an interdisziplinärem Fachwissen und insbesondere an umweltspezifischen Daten.

Somit liefert das UTAMO Projekt erste orientierungssichere Ergebnisse und identifiziert weiteren Forschungsbedarf.

Die erfolgte Auswertung der Modellierung hat wichtige Zusammenhänge zwischen der Technikgestaltung und Nutzung einerseits, und der daraus resultierenden Umweltwirkung bezogen auf den Energie- und Rohstoffeinsatz andererseits identifiziert. Es wird empfohlen, diese Auswertungen zu vertiefen und weitere Szenarien zu berechnen. Des Weiteren sollte das Sachbilanzmodell bezüglich des technischen Detaillierungsgrades durch ein breiter aufgestelltes, interdisziplinäres Team weiterentwickelt werden. Schwerpunkte sind auch Daten zu neuen Technologien und Komponenten. Viele Neuerungen der 5G Standardisierung konnten nur kurz und oberflächlich betrachtet werden. Gerade die Themen C-RAN, Open-RAN sollten mit Bezug auf das Energie- und Ressourcenmanagement weiter untersucht werden.

Das Projekt hat mehrfach auf den informativen und planerischen Wert von Umweltbewertungen (Ökobilanzen) hingewiesen. Der Vorteil einer Lebenszyklusanalyse in den Frühphasen einer Produkt- oder Systementwicklung (auch Netzausbau) liegt in der längerfristigen Perspektive und der Möglichkeit verschiedene Gestaltungsoptionen gegeneinander abzuprüfen. Die Integration von Umweltbewertungen in Design- und Planungsprozesse stellt methodische Herausforderungen, gerade weil ein sehr heterogenes interdisziplinäres Team schnell zusammenarbeiten muss und dieser Prozess didaktisch gut gestaltet werden muss, um effektiv zu sein. Diese Themenstellungen und die Integration von Umweltbewertungen in Mobilfunkprojekte sollten gefördert werden.

Wie im Kapitel 4.1 ausgeführt wurde, werden deutlich mehr und aktualisierte Ökobilanzdaten für die Erstellung von lebenszyklusbezogenen Umweltbewertungen benötigt. Gerade für die Bewertung der immer komplexeren Chip-Fertigung, der produktbezogenen Rohstoffkritikalität, oder auch der Recyclingfähigkeit ist die aktuelle Datenbasis (zudem meist kommerziell) nicht ausreichend. Die Erarbeitung von Ökobilanzdaten wird dringend empfohlen. Hierbei ist Folgendes noch zu bedenken. Ähnlich der Problematik hinsichtlich der unternehmensbezogenen Energiedaten sind auch Ökobilanzdaten in bestimmten Feinheitsgraden als vertraulich einzustufen, da sie Rückschlüsse auf konkrete Prozesse, Rezepturen oder anderen, meist patentrechtlich geschützte, Informationen zulassen. Aus diesem Grund sollte, analog zu dem Umgang mit den Energiedaten, auch für die zentrale Erfassung von Ökobilanzdaten ein methodisches Vorgehen unter Einbindung von relevanten Behörden, betroffen Unternehmen und einer wissenschaftlichen Begleitung erarbeitet werden.

4.3.6 Schlussbemerkung

Das UTAMO-Projekt hat erstmals den Energie- und Ressourcenbedarf der bundesweiten Mobilfunknetze bilanziert und in Entwicklungsszenarien mögliche Größenordnungen der Umweltwirkung in Zukunft aufgezeigt. Der herstellungs- und nutzungsbezogenen CO₂-Emissionen sind substanziell und werden in allen Szenarien deutlich ansteigen. Es existiert aber viele Einsparpotenzial, wenn Ökodesign-Konzepte in die Netzplanung und Technologieentwicklung sowie ein aktives Energiemanagement in den Betrieb integriert werden. Mit dem Netzausbau wird eine volkswirtschaftlich wichtige Infrastruktur geschaffen. Deutschland benötigt einen strategischen Netzausbau für abgesicherte Kapazität und Energieeffizienz. Die Planung und Modernisierung von Standorten sollte unter Heranziehung von Ökobilanzen erfolgen. Eine längerfristige Perspektive für die Erfordernisse des Netzausbaus im Rahmen einer umfassende Digitalisierung ist zwingend erforderlich. Dies setzt voraus, dass nicht nur die technischen, sondern auch die ökologischen Potenziale vorausschauend bewertet werden. Die UTAMO-Studie kann nur einen Überblick verschaffen. Die detaillierte Bewertung einzelner Technologien und Ausbauoptionen, sowie die Ausarbeitung von Ökodesign-Strategien

und konkreten operativen Maßnahmen ist eine weitaus größere Aufgabe. Diese Aufgabe ist gekennzeichnet von hoher Interdisziplinarität, da Mobilfunktechnik und alle damit verbundenen Technologien immer komplexer werden.

5 Quellenverzeichnis

5G Americas (2020): Understanding mmWave Spectrum for 5G Networks. Online verfügbar unter <https://www.5gamerica.org/wp-content/uploads/2020/12/InDesign-Understanding-mmWave-for-5G-Networks.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Abbas, Waqas Bin; Gomez-Cuba, Felipe; Zorzi, Michele (2017): Millimeter Wave Receiver Efficiency: A Comprehensive Comparison of Beamforming Schemes With Low Resolution ADCs. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16 (12), S. 8131–8146. DOI: 10.1109/TWC.2017.2757919.

Abdulkhaleq, Ahmed Maan; Yahya, Maan; Al-Yasir, Yasir; Parchin, Naser Ojaroudi; McEwan, Neil; Rayit, Ashwain et al. (2019): Doherty Power Amplifier for LTE-Advanced Systems. In: *Technologies* 7 (3), 60. DOI: 10.3390/technologies7030060.

Agilent Technologies (2009): Power Amplifier Design For LTE. 4th of 6 "How-To-Design" GENESYS seminar series. Online verfügbar unter <https://dokumen.tips/documents/power-amplifier-design-for-lte-amplifier-design-for-using-agilent-genesys.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Al-Dulaimi, Anwer; Wang, Xianbin; I, Chih-Lin (2018): 5G Networks. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management. Piscataway (NJ), Hoboken: IEEE; Wiley.

Alhumaima, Raad (2017): Evaluation of Power Consumption and Trade-offs in 5G Mobile Communications Networks. Dissertation. Brunel University London. Online verfügbar unter <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/15605>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ali, Sheikh Nijam; Agarwal, Pawan; Gopal, Srinivasan; Mirabbasi, Shahriar; Heo, Deukhyoun (2019): A 25–35 GHz Neutralized Continuous Class-F CMOS Power Amplifier for 5G Mobile Communications Achieving 26% Modulation PAE at 1.5 Gb/s and 46.4% Peak PAE. In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 66 (2), S. 834–847. DOI: 10.1109/TCSI.2018.2860019.

Amadeo, Ron (2018): Don't buy a 5G smartphone - at least, not for a while. Ars Technica. (12.14.2018). Online verfügbar unter <https://arstechnica.com/gadgets/2018/12/dont-buy-a-5g-smartphone-at-least-not-for-a-while/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ampleon (2017): 24/7 RF. Reference Book for High Performance RF Products. (Version 2). Online verfügbar unter https://www.rfmw.com/data/ampleon_reference_cat.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2020): Statistischer Bericht. Einwohnerinnen und Einwohner im Land Berlin am 31. Dezember 2019. (3. korrigierte Ausgabe). Online verfügbar unter https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/publikationen/stat_berichte/2020/SB_A01-05-00_2019h02_BE.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Andrae, Anders; Edler, Tomas (2015): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. In: *Challenges* 6 (1), S. 117–157. DOI: 10.3390/challe6010117.

Apple (2020): Umweltschutz. Online verfügbar unter <https://www.apple.com/de/environment/>, zuletzt geprüft am 28.09.2020.

Auer, Gunther; Giannini, Vito; Desset, Claude; Godor, Istvan; Skillermark, Per; Olsson, Magnus et al. (2011): How much energy is needed to run a wireless network? In: *IEEE Wireless Communications* 18 (5), S. 40–49. DOI: 10.1109/MWC.2011.6056691.

Barredo, Álex (2014): A comprehensive look at Smartphone Screen Size Statistics and Trends. Medium. (28.05.2014). Online verfügbar unter <https://medium.com/@somospstpc/a-comprehensive-look-at-smartphone-screen-size-statistics-and-trends-e61d77001ebe>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Baumann, Janette (2020): Tempo bei der GigaGreen-Strategie: 100 Prozent grüner Strom und Klimaneutralität bis 2025 bei Vodafone Deutschland. Inside Vodafone. (03.12.2020). Online verfügbar unter <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/tempo-bei-der-gigagreen-strategie-100-prozent-gruener-strom-und-klimaneutralitaet-bis-2025-bei-vodafone-deutschland/#/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Beltran, Ramon (2017): High-efficiency and flat-gain Doherty type transmitter using a 180-degree hybrid-combiner. In: 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Honolulu. IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1726–1729.

Benson, Keith (2017): GaN Breaks Barriers - RF Power Amplifiers Go Wide and High. In: *Analog Dialogue* 51 (3), S. 1–3. Online verfügbar unter <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/rf-power-amplifiers-go-wide-and-high.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bertoldi, Paolo; Lejeune, Andre (2020): Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment: (Version 7.1). Ispra: Joint Research Centre.

Bertoldi, Paolo; Lejeune, Andre (2021): Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment. (Version 8.0). Ispra: Joint Research Centre.

Björnson, Emil; Hoydis, Jakob; Sanguinetti, Luca (2017): Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. In: *Foundations and Trends® in Signal Processing* 11 (3-4), S. 154–655. DOI: 10.1561/2000000093.

Bo, Yang (2016): Equipment in the LTE Network. China Academy of Information and Communications Technology. Online verfügbar unter https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2016/Oct-Candi2016/CAICT2016/Session%206-4%20Equipment_in_LTE_network_noNote%20%E6%9D%A8%E6%B3%A2-final.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesministerium des Innern (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Online verfügbar unter https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019): Überall und jederzeit surfen und telefonieren - die Mobilfunkstrategie. (18.11.2019). Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mobilfunkstrategie.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Bekanntmachung der Förderrichtlinie „Mobilfunkförderung“ vom 8. Juni 2021. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/mobilfunkfoerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Altmaier legt erste Abschätzung des Stromverbrauchs 2030 vor. Erste Schätzung Stromverbrauch 2030. (13.07.2021). Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/07/20210713-erste-abschaetzungen-stromverbrauch-2030.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2019): Jahresbericht 2018. 20 Jahre Verantwortung für Netze. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2019/JB2018.pdf;jsessionid=63E1665544A1140700AD6E4749F0D316?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2020a): Frequenzkompass 2020. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehme>

n_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2020b): Jahresbericht 2019. Netze für die digitale Welt. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2021a): Jahresbericht 2020. Märkte im digitalen Wandel. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2020.pdf;jsessionid=F683A9790C44430EC7AD7E3CF4E7C829?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2021b): Mobilfunkteilnehmer. (Stand 09.09.2021). Online verfügbar unter <https://www.breitband-monitor.de/marktbeobachtung/mobilfunkteilnehmer>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Bundesnetzagentur (2021c): Szenarienpapier für Projekt Mobilfunk 2025. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Szenarienpapier2021.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cadence Design Systems (2020): AWR Software for the Design of a High- Efficiency Broadband GaN HEMT Doherty Amplifier for Cellular Transmitters. Application Note. Online verfügbar unter <https://www.awr.com/resource-library/design-high-efficiency-broadband-gan-hemt-doherty-amplifier-new-generation>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Camarchia, Vittorio; Quaglia, Roberto; Oldoni, Matteo (2016): Power Amplifier Design Challenges and Solutions for mm-wave Radios. European Microwave Week (EuMW); 46th European Microwave Conference (EuMC); 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). Online verfügbar unter <https://intranet.birmingham.ac.uk/eps/documents/public/emuw2/WW04.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Rec. ITU-T G.8300, 2020: Characteristics of transport networks to support IMT-2020/5G. Online verfügbar unter <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8300>.

Chung, Hyunchul; Ma, Qian; Yin, Yusheng; Gao, Li; Rebeiz, Gabriel (2020): A 25-29 GHz 64-Element Dual-Polarized/Dual-Beam Small-Cell with 45 dBm 400 MHz 5GNR Operation and High Spectral Purity. In: 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Los Angeles. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1267–1270.

CLEAResult (o. J.): 80 PLUS. Online verfügbar unter <https://www.clearesult.com/80plus>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cybenetics (o. J.): Efficiency Level Certifications. Online verfügbar unter <https://www.cybenetics.com/index.php?option=database¶ms=1,1,0>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Debaillie, Bjorn; Dessel, Claude; Louagie, Filip (2015): A Flexible and Future-Proof Power Model for Cellular Base Stations. In: 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC). Glasgow. Institute of Electrical and Electronics Engineers; Vehicular Technology Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–7.

Decken, Klaus (2017): Zur Ökobilanz von Blei- und Lithium-Ionen-Stromspeichern. Energyload. (26.04.2017). Online verfügbar unter <https://energyload.eu/stromspeicher/oekobilanz-stromspeicher/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Deruyck, Margot; Joseph, Wout; Martens, Luc (2014): Power consumption model for macrocell and microcell base stations. In: *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 25 (3), S. 320–333. DOI: 10.1002/ett.2565.

- Deruyck, Margot; Tanghe, Emmeric; Joseph, Wout; Vereecken, Willem; Pickavet, Mario; Martens, Luc; Dhoedt, Bart (2011): Model for power consumption of wireless access networks. In: *IET Science, Measurement & Technology* 5 (4), S. 155–161. DOI: 10.1049/iet-smt.2010.0094.
- Deruyck, Margot; Vereecken, Willem; Tanghe, Emmeric; Joseph, Wout; Pickavet, Mario; Martens, Luc; Demeester, Piet (2010): Power consumption in wireless access network. In: 2010 European Wireless Conference (EW). Lucca. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 924–931.
- Desset, Claude; Debaillie, Bjorn; Giannini, Vito; Fehske, Albrecht; Auer, Gunther; Holtkamp, Hauke et al. (2012): Flexible power modeling of LTE base stations. In: 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Paris. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 2858–2862.
- Dielacher, Franz; Papananos, Yannis; Singerl, Peter; Tiebout, Marc; Dal Mastro, Daniele; Thomas, Christos (2019): Overview about RF and PA Requirements for 5G NR and Challenges for Hardware Implementation. Infineon Technologies Austria AG. In: 2019 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Boston. IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE.
- ecoinvent (o. J.): ecoinvent Database. Online verfügbar unter <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.
- DIN EN ISO 50001, 2018: Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-50001/289820323>.
- ETSI ES 202 706-1 V1.6.0, 2021: Environmental Engineering (EE); Metrics and measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment Part 1: Power consumption - Static Measurement Method. Online verfügbar unter https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/202700_202799/20270601/01.05.00_50/es_20270601v010500m.pdf.
- ETSI ES 202 706-1 V1.5.0, 2016: Environmental Engineering (EE); Metrics and measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment Part 1: Power Consumption - Static Measurement Method. Online verfügbar unter https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/202700_202799/20270601/01.05.00_50/es_20270601v010500m.pdf.
- ISO 14040, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- ISO 14044, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- Eramo, Vincenzo; Listanti, Marco; Lavacca, Francesco Giacinto; Iovanna, Paola; Bottari, Giulio; Ponzini, Filippo (2016): Trade-Off Between Power and Bandwidth Consumption in a Reconfigurable Xhaul Network Architecture. In: *IEEE Access* 4 (4), S. 9053–9065. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2639578.
- Ericsson (2021): Ericsson Mobility Report. Online verfügbar unter <https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.
- Europäische Kommission (2020): 421/21 Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.
- European Commission (2018): Critical raw materials. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

3GPP TR 36.814 V9.0.0, 2010: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9). Online verfügbar unter <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2493>.

Federal Communications Commission (2018): FCC ID QISRRU5303. Huawei. Online verfügbar unter <https://fccid.io/QISRRU5303>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Freescale Semiconductor (2011): 50V RF LDMOS. An ideal RF power technology for ISM, broadcast and commercial aerospace applications. Online verfügbar unter <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/50VRFLDMOSWP.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Fuhrmann, Jörg (2016): A digital power amplifier in 28 nm CMOS for LTE applications. Dissertation. Erlangen: FAU University Press (FAU Studien aus der Elektrotechnik, 6).

Ge, Xiaohu; Tu, Song; Mao, Guoqiang; Wang, Cheng-Xiang; Han, Tao (2016): 5G Ultra-Dense Cellular Networks. In: *IEEE Wireless Communications* 23 (1), S. 72–79. DOI: 10.1109/MWC.2016.7422408.

Ge, Xiaohu; Yang, Jing; Gharavi, Hamid; Sun, Yang (2017): Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks. In: *IEEE Communications Magazine* 55 (5), S. 184–191. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600788.

Ge, Xiaohu; Zhang, Wuxiong (2019): 5G Green Mobile Communication Networks. Singapur: Springer.

Global mobile Suppliers Association (GSA) (2021): Market Report: Global Progress to Voice over New Radio (VoNR). Online verfügbar unter <https://gsacom.com/paper/global-progress-to-voice-over-new-radio-vonr-october-2021/>, zuletzt geprüft am 28.10.2021.

Granelli, Fabrizio; Bassoli, Riccardo; Di Renzo, Marco (2018): Energy-Efficiency Analysis of Cloud Radio Access Network in Heterogeneous 5G Networks. In: European Wireless 2018. 24th European Wireless Conference. Catania. Università degli Studi di Catania; Consorzio nazionale interuniversitario per le telecomunicazioni. Berlin: VDE-Verlag, S. 20–25.

Gröger, Jens; Liu, Ran; Stobbe, Lutz; Druschke, Jan; Richter, Nikolai (2021): Green Cloud Computing Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Texte, 94). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Hofstetter, Rolf; Tanner, Rudolf (2008): Das Core-Netzwerk von LTE: Teil 3 der Artikelserie über den neuen Mobilfunkstandard. In: *Bulletin.ch* 99 (21), S. 22–25. DOI: 10.5169/seals-855905.

Holtkamp, Hauke; Auer, Gunther; Giannini, Vito; Haas, Harald (2013): A Parameterized Base Station Power Model. In: *IEEE Communications Letters* 17 (11), S. 2033–2035. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.091213.131042.

Hu, Song; Wang, Fei; Wang, Hua (2019): A 28-/37-/39-GHz Linear Doherty Power Amplifier in Silicon for 5G Applications. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 54 (6), S. 1586–1599. DOI: 10.1109/JSSC.2019.2902307.

Huawei (2017a): Huawei Antenna & Antenna line 2017 (Products Catalogue 2017, 1). Online verfügbar unter <http://www.jemsdata.com/wp-content/uploads/2019/01/HuaweiAAUAntennaLineProductsCatalogue2017-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Huawei (2017b): Target Networks in 5G Era. Online verfügbar unter https://www.huawei.com/minisite/hwmbbf17/assert_25/files/Target_Network_in_5G_Era.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Huawei (2018): Huawei Launches Full Range of 5G End-to-End Product Solutions. (26.02.2018). Online verfügbar unter <https://www.huawei.com/en/news/2018/2/Huawei-Launches-Full-Range-of-5G-End-to-End-Product-Solutions>, zuletzt geprüft am 17.09.2019.

Huawei (2019): 5G Power Whitepaper. Online verfügbar unter <https://carrier.huawei.com/~/media/CNBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Icha, Petra; Lauf, Thomas; Kuhs, Gunter (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid - Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Climate Change, 45). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

International Data Corporation (2020): Low- to Mid-Range Smartphones Dominate Worldwide Smartphone Forecast with the Fastest Growth Expected in \$400-600 Price Band, According to IDC. (17.09.2020). Online verfügbar unter <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46865120>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

International Telecommunication Union (2019): Resolution 242 - 244. In: World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19). Final Acts. Scharm El-Scheich. Geneva: ITU Publications, S. 351–360.

Jang, Haedong; Wilson, Richard (2018): A 225 Watt, 1.8-2.7 GHz Broadband Doherty Power Amplifier with Zero-Phase Shift Peaking Amplifier. In: 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Philadelphia. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 797–800.

Jodl, Markus (2019): Mit klimaneutralem Mobilfunk-Standort gegen Funklöcher. Telekom. (24.07.2019). Online verfügbar unter <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/mit-klimaneutralem-mobilfunk-standort-gegen-funkloecher-577432>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Kang, Jongchan; Yu, Daekyu; Min, Kyoungjoon; Kim, Bumman (2006): A Ultra-High PAE Doherty Amplifier Based on 0.13- μ m CMOS Process. In: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 16 (9), S. 505–507. DOI: 10.1109/LMWC.2006.880703.

Kerkmann, Christof; Scheuer, Stephan (2021): United Internet sichert sich Zugriff auf Telefónica-Netz – Meilenstein bei 5G-Ausbau. Handelsblatt. (15.02.2021). Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/mobilfunk-united-internet-sichert-sich-zugriff-auf-telefnica-netz-meilenstein-bei-5g-ausbau/26916750.html?ticket=ST-6663756-kNJDB7rlk1hxpgPTAthh-cas01.example.org>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Keysight Technologies (2018): First Steps in 5G: Overcoming New Radio Device Design Challenges Series - Part 1: 5G New Radio Standard. Online verfügbar unter <https://www.keysight.com/de/de/assets/7018-05995/white-papers/5992-2707.pdf>, zuletzt geprüft am 17.09.2019.

Kritzinger, Werner; Karner, Matthias; Traar, Georg; Henjes, Jan; Sihn, Wilfried (2018): Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), S. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

Lam, Wayne (2019): In 5G smartphone designs, RF Front-End graduates from traditional supporting role to co-star with modem. Analyst Opinion. Omdia. (28.08.2019). Online verfügbar unter <https://omdia.tech.informa.com/OM004560/In-5G-smartphone-designs-RF-FrontEnd-graduates-from-traditional-supporting-role-to-costar-with-modem>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Lavender, Tony; Jervis, Val; Schoentgen, Aude; Wilkinson, Laura (2021): Stimulating demand for 26 GHz in Europe. Plum Consulting, Nokia, Qualcomm. Online verfügbar unter <https://www.nokia.com/sites/default/files/2021-08/stimulating-demand-for-26-ghz-in-europe.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

LCEE Life Cycle Engineering Experts (2011): Ökobilanz von Freileitungsmasten. Ein ökologischer Vergleich von Stahlvollwandmasten und Schleuderbetonmasten. Europoles. Online verfügbar unter

<http://docplayer.org/21849797-Oekobilanz-von-freileitungsmasten-ein-okeologischer-vergleich-von-stahlvollwandmasten-und-schleuderbetonmasten.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Lefèvre, Jérôme (2019): Wie grün sind die deutschen Mobilfunkbetreiber? [handytarife.de](https://www.handytarife.de/news/mobilfunk/wie-gruen-sind-die-deutschen-mobilfunkbetreiber_222473.html). (27.02.2019). Online verfügbar unter https://www.handytarife.de/news/mobilfunk/wie-gruen-sind-die-deutschen-mobilfunkbetreiber_222473.html, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Li, Tso-Wei; Wang, Hua (2018): A Continuous-Mode 23.5-41GHz Hybrid Class-F/F-I Power Amplifier with 46% Peak PAE for 5G Massive MIMO Applications. In: 2018 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). Philadelphia. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium; IEEE Microwave Theory and Techniques Society; IEEE Solid-State Circuits Society; IEEE Electron Devices Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 220–230.

Li, Yan; Lie, Donald Yu-Chun; Li, Chaojiang; Zhao, Dixian; Fager, Christian (2018): RF Front-End Circuits and Architectures for IoT/LTE-A/5G Connectivity. In: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018, S. 1–2. DOI: 10.1155/2018/1438060.

Lie, Donald Yu-Chun; Mayeda, Jill; Li, Yan; Lopez, Jota (2018): A Review of 5G Power Amplifier Design at cm-Wave and mm-Wave Frequencies. In: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2018, S. 1–16. DOI: 10.1155/2018/6793814.

Lie, Donald Yu-Chun; Mayeda, Jill; Lopez, Jota (2017a): A short survey on recent highly efficient cm-Wave 5G linear power amplifier design. In: 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Boston. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Circuits and Systems Society; Tufts University. Piscataway (NJ): IEEE, S. 13–16.

Lie, Donald Yu-Chun; Mayeda, Jill; Lopez, Jota (2017b): Highly efficient 5G linear power amplifiers (PA) design challenges. In: 2017 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). Hsinchu. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–3.

Liu, Chih-Yun; Chen, Yi-Jan Emery; Heo, Deukhyoun (2005): Impact of Bias Schemes on Doherty Power Amplifiers. In: 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Kobe. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Circuits and Systems Society; Denki Gakkai. Piscataway (NJ): IEEE, S. 212–215.

Lorca-Hernando, Javier; Serna Santiago, Elena; Aparicio Peña, Maite; Chassaigne Ricciulli, Alexander; Esplá Gutiérrez, Jose Luis (2021): Telefónica views on the design, architecture, and technology of 4G/5G Open RAN networks. Telefónica. Online verfügbar unter <https://www.telefonica.com/documents/737979/145981257/Whitepaper-OpenRAN-Telefonica.pdf/3a160ca9-c325-a3d6-a6da-f9453616144d>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Lozhkin, Alexander; Maniwa, Toru; Shimizu, Masahiko (2018): RF Front-End Architecture for 5G. In: 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Bologna. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–6.

Ma, Qian; Chung, Hyunchul; Yin, Yusheng; Kanar, Tumay; Zihir, Samet; Rebeiz, Gabirel M. (2019): A 5G 24-30 GHz 2x32 Element Dual-Polarized Dual-Beam Phased Array Base-Station for 2x2 MIMO System. In: 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–5.

Maksimovic, Dragan; Zhang, Yuanzhe; Rodriguez, Miguel; Zai, Andrew; Sardin, David; Popovic, Zoya (2014): Integration of GaN Supply Modulators and RF Power Amplifiers. University of Colorado Boulder. Online verfügbar unter <http://pwrsocevents.com/wp-content/uploads/2014-presentations/ts/S1.1%20Systems%20and%20Applications%20Maksimovic.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Eberling, Elisabeth; Erdmann, Lorenz; Haendel, Michael; Kral, Michael et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Fraunhofer-Institut für System- und

Innovationsforschung, Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA Rohstoffinformationen, 50). Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=E5B0ED308284C4A0423082F0A409B8E1.2_cid292?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Melling, Jack (2020): From the ‘Brick’ to New Foldable Phones: The History of the Mobile Form Factor. Architectures and Processors blog. Arm Community. (21.01.2020). Online verfügbar unter <https://community.arm.com/developer/ip-products/processors/b/processors-ip-blog/posts/history-of-the-mobile-form-factor>, zuletzt geprüft am 28.09.2020.

Memmler, Michael; Lauf, Thomas; Schneider, Sven (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Climate Change, 37). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Micallef, Gilbert (2013): Energy Efficient Evolution of Mobile Broadband Networks. Dissertation. Aalborg University. Online verfügbar unter <https://vbn.aau.dk/da/publications/energy-efficient-evolution-of-mobile-broadband-networks>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Moore, Gordon E. (2006): Cramming more components onto integrated circuits. Reprinted from Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965, pp. 114 ff. In: *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter* 11 (3), S. 33–35. DOI: 10.1109/N-SSC.2006.4785860.

Moreno Rubio, Jorge; Angarita Malaver, Edison; Fernández González, Herman (2015): A 25 W 70% Efficiency Doherty Power Amplifier at 6 dB Output Back-Off for 2.4 GHz Applications with VGS, PEAK Control. In: *Inge CUC* 11 (1), S. 48–52. DOI: 10.17981/ingecuc.11.1.2015.04.

Mushtaq, Mubashar Sajid; Fowler, Scott; Mellouk, Abdelhamid (2017): Power saving model for mobile device and virtual base station in the 5G era. In: David Gesbert, Mérouane Debbah und Abdelhamid Mellouk (Hg.): 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–6.

Nafe, Ahmed; Sayginer, Mustafa; Kibaroglu, Kerim; Rebeiz, Gabirel M. (2019): 2x64 Dual-Polarized Dual-Beam Single-Aperture 28 GHz Phased Array with High Cross-Polarization Rejection for 5G Polarization MIMO. In: 2019 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Boston. IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 484–487.

Neuhetzki, Thorsten (2021): Vodafone Netzausbau: Alles zu LTE und 5G. (19.11.2021). Online verfügbar unter <https://www.inside-digital.de/ratgeber/vodafone-netzausbau-ausbau-lte-5g>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Niknejad, Ali (2014): Integrated Circuits for Communication. Power Amplifiers for Communication. University of California. Online verfügbar unter http://rfic.eecs.berkeley.edu/ee242/pdf/Module_6_1_PA_Sys.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Nissen, Nils; Stobbe, Lutz; Richter, Nikolai; Zedel, Hannes; Lang, Klaus-Dieter (2019): Between the User and the Cloud: Assessing the Energy Footprint of the Access Network Devices. In: Allen Hu, Mitsutaka Matsumoto, Tsai Chi Kuo und Shana Smith (Hg.): Technologies and eco-innovation towards sustainability. Singapur: Springer, S. 49–64.

Nokia (2016a): 5G Network Energy Efficiency - Nokia White Paper. Online verfügbar unter <https://gsacom.com/paper/5g-network-energy-efficiency-nokia-white-paper/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

O-RAN Alliance (2020): O-RAN Use Cases and Deployment Scenarios. Towards Open and Smart RAN. Online verfügbar unter

<https://static1.squarespace.com/static/5ad774cce74940d7115044b0/t/5e95a0a306c6ab2d1cbca4d3/1586864301196/O-RAN+Use+Cases+and+Deployment+Scenarios+Whitepaper+February+2020.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

O-RAN Alliance (2021): O-RAN Minimum Viable Plan and Acceleration towards Commercialization. Online verfügbar unter <https://static1.squarespace.com/static/5ad774cce74940d7115044b0/t/60f9b144abdc902712f43475/1626976585796/O-RAN+Minimum+Viable+Plan+and+Acceleration+towards+Commercialization+White+Paper+29+June+2021.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Perrin, Sterling (2017): Evolving to an Open C-RAN Architecture for 5G. A Heavy Reading white paper produced for Fujitsu. Heavy Reading, Fujitsu. Online verfügbar unter <https://www.fujitsu.com/ca/en/Images/FNC-Fujitsu-Evolving-to-an-Open-C-RAN-Architecture-for-5G-White-Paper.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Pham, Anh-Vu; Nguyen, Duy; Darwish, Mohammad (2017): High efficiency power amplifiers for 5G wireless communications. In: Ka Fai Chan (Hg.): 10th Global Symposium on Millimeter-Waves (GSSM). Hong Kong. City University of Hong Kong; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Microwave Theory and Techniques Society. Piscataway (NJ): IEEE, S. 83–84.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2011): Bundesregierung beschließt Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022. (19.12.2011). Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/bundesregierung-beschliesst-ausstieg-aus-der-kernkraft-bis-2022-457246>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Proske, Marina; Clemm, Christian; Richter, Nikolai (2016): Life Cycle Assessment of the Fairphone 2. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Fairphone. Online verfügbar unter https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2016/11/Fairphone_2_LCA_Final_20161122.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Proske, Marina; Sánchez, David; Clemm, Christian; Baur, Sarah-Jane (2020): Life Cycle Assessment of the Fairphone 3. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Fairphone.

Rago, Arcangela; Ventrella, Pasquale; Piro, Giuseppe; Boggia, Gennaro; Dini, Paolo (2020): Towards an Optimal Management of the 5G Cloud-RAN through a Spatio-Temporal Prediction of Users' Dynamics. In: 2020 Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). Arona. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–4.

Rathi, Sonia; Malik, Nisha; Chahal, Nidhi; Malik, Sukhvinder (2014): Throughput for TDD and FDD 4 G LTE Systems. In: *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 3 (12), S. 73–77. Online verfügbar unter <https://citeseerv.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.676.6159&rep=rep1&type=pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

RIMEDO Labs (2021): The O-RAN Whitepaper 2021. Overview, Architecture, and Traffic Steering Use Case. Online verfügbar unter <https://www.rimedolabs.com/blog/the-o-ran-whitepaper/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Sajedin, Maryam; Elfergani, Issa Tamer; Rodriguez, Jonathan; Abd-Alhameed, Raed; Fernandez-Barciela, Monica (2019): A Survey on RF and Microwave Doherty Power Amplifier for Mobile Handset Applications. In: *Electronics* 8 (6), 717. DOI: 10.3390/electronics8060717.

Samsung (2020): Massive MIMO for New Radio. Online verfügbar unter https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/1208_massive-mimo-for-new-radio/MassiveMIMOforNRTechnicalWhitePaper-v1.2.0.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Schwarten, Marcus; Reinhardt, Andre (2020): 5G Smartphones. Welche 5G-Handys gibt es schon in Deutschland und von wem? 5g-anbieter.info. Online verfügbar unter <https://www.5g-anbieter.info/smartphones/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Sigwele, Tshiamo; Hu, Yim Fun; Susanto, Misfa (2020): Energy-efficient 5G cloud RAN with virtual BBU server consolidation and base station sleeping. In: *Computer Networks* 177, 107302. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107302.

Singh, Sameer Kumar; Singh, Rohit; Kumbhani, Brijesh (2020): The Evolution of Radio Access Network Towards Open-RAN: Challenges and Opportunities. In: 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference workshops (WCNCW). Seoul. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–6.

Rec. ITU-T L.1380, 2019: Smart energy solution for telecom sites. Online verfügbar unter <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1380-201911-I>.

Son, Kyuho; Kim, Hongseok; Yi, Yung; Krishnamachari, Bhaskar (2011): Base Station Operation and User Association Mechanisms for Energy-Delay Tradeoffs in Green Cellular Networks. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 29 (8), S. 1525–1536. DOI: 10.1109/JSAC.2011.110903.

Sreeram, Sudarshan (2019): The Form Factor of Modern Smartphones. Revolutionary Shifts in Modern Smartphone Design. Felix Online. (18.07.2021). Online verfügbar unter <https://old.felixonline.co.uk/articles/2019-10-18-form-factor-modern-smartphones/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Stahl, Alexander (2020): Bundesregierung bleibt bei Prognose zum Stromverbrauch 2030. energate messenger+. (23.03.2020). Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/201197/bundesregierung-bleibt-bei-prognose-zum-stromverbrauch-2030>.

Stark, Rainer; Damerau, Thomas (2019): Digital Twin. In: Sami Chatti und Tullio Tolio (Hg.): CIRP encyclopedia of production engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–8.

Statista (2021a): Absatz von Smartphones in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77637/umfrage/absatzmenge-fuer-smartphones-in-deutschland-seit-2008/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Statista (2021b): Anzahl der Smartphone-Nutzer* in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Statistisches Bundesamt (o. J.): Bevölkerungspyramide: Altersstruktur Deutschlands von 1950 - 2060. Online verfügbar unter <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/#!y=2030>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Statistisches Bundesamt (2019a): Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland. (Stand 31.12.2017). Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html>, zuletzt geprüft am 12.11.2019.

Statistisches Bundesamt (2019b): Gemeindeverzeichnis. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 04.11.2019.

Stobbe, Lutz; Nissen, Nils; Druschke, Jan; Zedel, Hannes; Richter, Nikolai; Lang, Klaus-Dieter (2021): Methodology for Modeling the Energy and Material Footprint of Future Telecommunication Networks. In: Yusuke Kishita, Mitsutaka Matsumoto, Masato Inoue und Shinichi Fukushige (Hg.): EcoDesign and Sustainability II. Social Perspectives and Sustainability Assessment. Singapur: Springer (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management), S. 223–238.

Stobbe, Lutz; Proske, Marina; Beucker, Severin; Hintemann, Ralph; Lang, Klaus-Dieter (2016): Energy efficiency of ICT: Further improvement through customized products. In: Electronics Goes Green 2016+ (EGG). Berlin. Electronics Goes Green; Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration; Technische Universität Berlin. Piscataway (NJ): IEEE, S. 1–7.

Stobbe, Lutz; Proske, Marina; Zedel, Hannes; Hintemann, Ralph; Clausen, Jens; Beucker, Severin (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Streicher, Florian (2020): Über 20.000 4G-Mobilfunkstandorte: O2 Netzausbau-Offensive macht große Fortschritte. Telefónica. (07.09.2020). Online verfügbar unter <https://www.telefonica.de/news/corporate/2020/09/ueber-20-000-4g-mobilfunkstandorte-o2-netzausbau-offensive-macht-grosse-fortschritte.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Tataria, Harsh; Haneda, Katsuyuki; Molisch, Andreas F.; Shafi, Mansoor; Tufvesson, Fredrik (2021): Standardization of Propagation Models for Terrestrial Cellular Systems: A Historical Perspective. In: *International Journal of Wireless Information Networks* 28 (1), S. 20–44. DOI: 10.1007/s10776-020-00500-9.

tefficient (2021): Industry analysis #1 2021. Mobile data – full year 2020. (13.04.2021). Online verfügbar unter <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2021/04/tefficient-industry-analysis-1-2021-mobile-data-usage-and-revenue-FY-2020-per-operator-13-April-2021.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Telefónica (2021a): Kennzahlen 2017 – 2020. Online verfügbar unter <https://www.telefonica.de/verantwortung/daten-und-fakten/kennzahlen.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Telefónica (2021b): Mobilfunk und Festnetz. Online verfügbar unter <https://www.telefonica.de/netze.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Telekom (2020): Corporate Responsibility Bericht 2019. Online verfügbar unter <https://www.crm-bericht.telekom.com/site20/steuerung-fakten/umwelt/energieverbrauch-effizienz#atn-534-538>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Telekom Netz (2018): Die neue Mobilfunkantenne der Telekom, Teil 1/2. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=uiABs3rjsFw>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Telekom Netz (2019): Klimaneutraler Mobilfunk-Standort gegen Funklöcher. (24.07.2019). Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=fUq1hOmNcdQ>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

thinkstep AG (2019): GaBi and industry based, official LCI datasets form thinkstep. Environmental Footprinting (EF) implementation. Version EF 2.0. Online verfügbar unter <https://gabi.sphera.com/deutsch/datenbanken/ef-datenbank-v20/>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Trojer, Elmar; Skogman, Viktor; Olsson, Andreas; Thyni, Tomas; Forsman, Mats; Österling, Jacob et al. (2021): Packet fronthaul – design choices towards versatile RAN deployments. Ericsson. Online verfügbar unter https://www.ericsson.com/4a3788/assets/local/reports-papers/white-papers/08162021_packet_fronthaul.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2021.

Umweltbundesamt (2019): Ist Atomstrom wirklich CO2-frei? (27.11.2019). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-atomstrom-wirklich-co2-frei>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Vasjanov, Aleksandr; Barzdenas, Vaidotas (2018): A Review of Advanced CMOS RF Power Amplifier Architecture Trends for Low Power 5G Wireless Networks. In: *Electronics* 7 (11), 271. DOI: 10.3390/electronics7110271.

Vodafone (2020): Annual Report 2020. We connect for a better future. Online verfügbar unter https://www.vodafone.com/content/dam/vodcom/files/vdf_files_2020/pdfs/vodafone-annual-report-2020.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Vodafone (2021): Vodafone baut die Netze für Deutschland. (Stand: 30.06.2021). Online verfügbar unter <https://www.vodafone.de/unternehmen/netz-infografik.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Wenchong, Yuan; Changxiao, Li (2021): Technologies for Ultra-Reliable Low-Latency Communication. (26.05.2021). ZTE. Online verfügbar unter <https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2021/3-en/Special-Topic/5.html>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

WikiChip (2020a): A13 Bionic - Apple. Online verfügbar unter <https://en.wikichip.org/wiki/apple/ax/a13>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

WikiChip (2020b): Kirin 990 4G - HiSilicon. Online verfügbar unter https://en.wikichip.org/wiki/Kirin_990_4G, zuletzt geprüft am 28.09.2020.

WikiChip (2020c): Kirin 990 5G - HiSilicon. Online verfügbar unter https://en.wikichip.org/wiki/Kirin_990, zuletzt geprüft am 28.09.2020.

WikiChip (2020d): Snapdragon 855 - Qualcomm. Online verfügbar unter https://en.wikichip.org/wiki/qualcomm/snapdragon_800/855, zuletzt geprüft am 28.09.2020.

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2021): Delphi-Methode. (Bearbeitungsstand: 1. August 2021). Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Delphi-Methode&oldid=214402284>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Wind River Systems (2017): vRAN: The Next Step in Network Transformation. Online verfügbar unter <https://resources.windriver.com/whitepapers/vran-the-next-step-in-network-transformation>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Wolff, Nikolai (2019): Wideband GaN Microwave Power Amplifiers with Class-G Supply Modulation. Dissertation. Göttingen: Cuvillier Verlag (Innovationen mit Mikrowellen und Licht. Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, 48).

Yan, Ming; Chan, Chien Aun; Gygax, André.; Yan, Jinyao; Campbell, Leith; Nirmalathas, Ampalavanapillai; Leckie, Christopher (2019): Modeling the Total Energy Consumption of Mobile Network Services and Applications. In: *Energies* 12 (1), 184. DOI: 10.3390/en12010184.

Yan, Ming; Chan, Chien Aun; Li, Wenwen; I, Chih-Lin; Bian, Sen; Gygax, André et al. (2016): Network Energy Consumption Assessment of Conventional Mobile Services and Over-the-Top Instant Messaging Applications. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34 (12), S. 3168–3180. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2611978.

Yang, Daniel; Fontaine, Ray (o. J.): Samsung Galaxy S20 Ultra 5G Teardown Analysis. Tech Insights. Online verfügbar unter <https://www.techinsights.com/blog/samsung-galaxy-s20-teardown-analysis>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Zhang, Zhiwei; Cheng, Zhiqun; Liu, Guohua (2020): A Power Amplifier with Large High-Efficiency Range for 5G Communication. In: *Sensors* 20 (19), 5581. DOI: 10.3390/s20195581.

ZTE (2020): PowerPilot 5G energy saving in coordination with 4G. Online verfügbar unter https://www.zte.com.cn/mediaries/zte/Files/PDF/white_book/202011271651.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Produktdatenblätter

Aruba (2020): Aruba CX 8325 Switch Series. 07.02.2020. (07.02.2020). Online verfügbar unter http://stoneleigh.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/Aruba_8325_Series_Switches.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Baicells Technologies (2018): Spectra LTE-U Outdoor FDD eNB. (v1.11, 10/2018). Online verfügbar unter <https://baicells.zendesk.com/hc/en-us/articles/360001047734-Spectra-LTE-U-OD-FDD-eNB-Data-Sheet>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Baicells Technologies (2019): Nova-243 Outdoor TDD eNodeB. (v1.8, 01/2019). Online verfügbar unter <https://baicells.zendesk.com/hc/en-us/articles/360001027213-Nova-243-OD-TDD-eNB-Data-Sheet>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Caltta (2019): ZilTE Base Station Base Band Unit (BBU). Online verfügbar unter <http://www.caltta.com/uploadfiles/files/2019/8/20190805040553722.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cisco Systems (2013): Cisco Network Convergence System der Serie 4000. (08/2013). Online verfügbar unter <https://silo.tips/download/cisco-network-convergence-system-der-serie-4000>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cisco Systems (2019): Cisco Nexus 9500 Classic Line Cards and Fabric Modules. (04/2019). Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/nexus-9000-series-switches/datasheet-c78-741336.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cisco Systems (2020a): Cisco Catalyst 9500 Series Switches. (10/2020). Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-9500-series-switches/nb-06-cat9500-series-data-sheet-cte-en.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cisco Systems (2020b): Cisco Catalyst 9600 Series Switches. (11/2020). Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-9600-series-switches/nb-06-cat9600-series-data-sheet-cte-en.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Cisco Systems (2021a): Cisco Catalyst 9400 Series Switch. (08/2021). Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-9400-series-switches/nb-06-cat9400-series-data-sheet-cte-en.pdf>, zuletzt geprüft am 30.08.2021.

Cisco Systems (2021b): Cisco Nexus 9500 Series Switches. (01/2021). Online verfügbar unter <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/nexus-9000-series-switches/datasheet-c78-729404.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2018): Antenna Integrated Radio Unit Description. AIR 6468. (12.03.2018). Online verfügbar unter <http://www.1com.net/wp-content/uploads/2019/02/Ericsson-AIR-6468-Manual-Datasheet.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019a): Router 6273. (Rev G). Online verfügbar unter <https://mediabank.ericsson.net/deployedFiles/ericsson.com/Router%206273%20Datasheet%20rev%20G.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019b): Router 6274. (Rev T). Online verfügbar unter <https://mediabank.ericsson.net/deployedFiles/ericsson.com/Router%206274%20Datasheet%20Rev%20T.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019c): Router 6371. (Rev J). Online verfügbar unter <https://mediabank.ericsson.net/deployedFiles/ericsson.com/Router%206371%20Datasheet%20Rev%20J.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019d): Router 6471. (Rev K). Online verfügbar unter <https://mediabank.ericsson.net/deployedFiles/ericsson.com/Router%206471%20Datasheet.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019e): Router 6672. (Rev L). Online verfügbar unter <https://www.ericsson.com/4a6681/assets/global/eridoc/405880/09004cffc4959f54.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019f): Router 6675. (Rev M). Online verfügbar unter <https://www.ericsson.com/4a645c/assets/global/eridoc/405880/09004cffc4958193.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2019g): TDM 1001. (Rev J). Online verfügbar unter <https://www.ericsson.com/4a667d/assets/global/eridoc/405880/09004cffc495e04e.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Ericsson (2020): Router 6673. (Rev D). Online verfügbar unter <https://mediabank.ericsson.net/deployedFiles/ericsson.com/Router%206673%20Datasheet%20Rev%20D.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Fujitsu (2018): Datasheet. ExtremeSwitching VDX6940. (04.10.2018). Online verfügbar unter https://sp.ts.fujitsu.com/dmsp/Publications/public/ds_brocade_vdx_6940_apac.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Hegarty, Timothy (2019): Improving RF power amplifier efficiency in 5G radio systems using an adjustable DC/DC buck regulator. Texas Instruments. Online verfügbar unter https://www.ti.com/lit/an/snva802/snva802.pdf?ts=1634049667094&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.

Huawei (2016a): 3900 Series Base Station Configuration Principles. (01.08.2016, Issue 05). Online verfügbar unter <https://www.huaweicup.ru/upload/iblock/164/1.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Huawei (2016b): CloudEngine 7800 Series Data Center Switches. Online verfügbar unter <https://www.router-switch.com/media/upload/product-pdf/huawei-ce7800-series-switches-datasheet.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Huawei (2017c): RRU3958 Description. (30.03.2017, Issue 03). Online verfügbar unter <https://actfornet.com/ueditor/php/upload/file/20200526/1590433718319953.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Huawei (2020): Huawei CloudEngine 6870 Switch Datasheet. Online verfügbar unter <https://cdn.competec.ch/documents2/7/1/5/186703517/186703517.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Juniper Networks (2019a): EX4300 Line Of Ethernet Switches. (11/2019). Online verfügbar unter <https://www.axians.co.uk/assets/pdfs/network-modernisation/EX4300-LINE-OF-ETHERNET-SWITCHES.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Juniper Networks (2019b): EX4600 Ethernet Switch. (07/2019). Online verfügbar unter <https://www.netctrl.com/wp-content/uploads/2019/07/EX4600-Ethernet-Switch.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Juniper Networks (2019c): QFX5100 Ethernet Switch. (06/2019). Online verfügbar unter <https://www.axians.co.uk/assets/pdfs/network-modernisation/QFX5100.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Juniper Networks (2019d): SRX5400, SRX5600, and SRX5800 Services Gateways. (10/2020). Online verfügbar unter <https://www.juniper.net/assets/mx/es/local/pdf/datasheets/1000254-en.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Motorola Solutions (2018): RBS 6000 Series Macro Base Stations. (03/2018). Online verfügbar unter https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/business/solutions/business_solutions/mission_critical_communications/lte_for_government_and_public_safety/_documents/_static_files/rbs_6000_series_product_spec_sheet_1104-1.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Netgear (2015): ProSAFE Intelligent Edge Managed Switches. M4100 series. Online verfügbar unter <https://www.downloads.netgear.com/files/GDC/datasheet/en/M4100.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Netgear (2016): ProSAFE® Intelligent Edge Managed Switches. M4300 series. Online verfügbar unter <https://www.netgear.com/images/datasheet/switches/M4300-24X-48X.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Nokia (2016b): LTE Radio Access, Rel. FDD- LTE16, Operating Documentation, Issue 02, Documentation Change Delivery 2 (Flexi Multiradio BTS RF Module and Remote Radio Head Description - DN0951745, 19). Online verfügbar unter <http://www.cosconor.fr/GSM/Divers/Equipment/Nokia/Nokia%20Flexi%20RRU%202016.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Nokia (2016c): Nokia AirScale Base Station. Online verfügbar unter https://kupdf.net/download/nokia-air-scale-bts-datasheet_59a45a7fdc0d608f17568ee0_pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

NXP Semiconductors (2020): Power Amplifier Module for LTE and 5G. Online verfügbar unter <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/AFSC5G26F38.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Skyworks Solutions (2017): SKY66293-21. 3400 to 3800 MHz High-Efficiency 4 W Power Amplifier. (31.05.2017). Online verfügbar unter https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/2601-2700/SKY66293_21_203905D.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Skyworks Solutions (2018): SKY66296-11. 700 to 800 MHz High-Efficiency 4 W Power Amplifier. (27.02.2018). Online verfügbar unter https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/2601-2700/SKY66296_11_203931D.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

Wolfspeed (2021): CMPA1C1D080F. 90 W, 12.75 - 13.25 GHz, GaN MMIC, Power Amplifier. (Rev 0.0). Online verfügbar unter <https://eu.mouser.com/datasheet/2/90/cmpa1c1d080f-2399960.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2015): ZXSDR BS8922 TD-LTE Integrated eNodeB - Product Description. Hardware Version: HV2.1. (R1.0). Online verfügbar unter <https://fcc.report/FCC-ID/Q78-BS8922T2600/2846784.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2016a): ZXSDR R8872A Macro Remote Radio Unit - Product Description. (R1.4). Online verfügbar unter <https://www.manualslib.com/manual/1371593/Zte-ZxsdR-R8872a.html?page=2#manual>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2016b): ZXSDR R8978 TDD 8 Path Remote Radio Unit - User Manual. (R1.2). Online verfügbar unter <https://fccid.io/Q78-R8978S2600L/User-Manual/User-Manual-3455345.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2017): ZXSDR R8872A Product Description. UniRAN 16/GUL Multi-Mode. (v1.10). Online verfügbar unter <https://usermanual.wiki/ZTE/R8872AS1900-3335738.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2018a): ZXSDR R8854 Product Description. UniRAN 18. Online verfügbar unter <https://fccid.io/Q78-R8854S1700/User-Manual/Product-Description-4282579.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

ZTE (2018b): ZXSDR R8854 S2600 - Product Description. UniRAN 16/LTE single-mode. Online verfügbar unter <https://fccid.io/Q78-R8854S2600/User-Manual/User-manual-part-3-3787010.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2021.

A Anhang

A.1 Sendeleistung in Abhängigkeit von Frequenz und Zellgröße (ASK 1-3)

Frequenzband [MHz]	700	800	900	1500	1800	2100	2600	3500	26000	28000
Zellgröße [m]	Sendeleistung [W]									
5000	28	28	35	32	32	32	35	50	0,3	0,1
4250	28	28	35	32	32	32	35	50	0,3	0,1
3613	28	28	35	28	32	32	35	50	0,3	0,1
3071	25	28	32	28	28	32	35	45	0,3	0,1
2610	25	25	32	28	28	32	32	45	0,3	0,1
2219	25	25	32	25	28	28	32	45	0,3	0,1
1886	22	25	28	25	28	28	32	45	0,3	0,1
1603	22	22	28	25	25	28	28	40	0,3	0,1
1362	22	22	28	22	25	28	28	40	0,3	0,1
1158	20	22	25	22	25	25	28	40	0,3	0,1
984	20	20	25	22	22	25	28	40	0,3	0,1
837	20	20	25	20	22	25	25	35	0,3	0,1
711	18	20	22	20	22	25	25	35	0,3	0,1
605	18	18	22	20	20	22	25	35	0,3	0,1
514	18	18	22	18	20	22	25	35	0,3	0,1
437	16	18	20	18	20	22	25	35	0,3	0,1
371	16	16	20	18	18	22	25	32	0,3	0,1
316	14	16	20	16	18	20	22	32	0,3	0,1
268	14	14	18	16	18	20	22	32	0,3	0,1
228	13	14	18	14	16	18	20	28	0,3	0,1
194	11	13	16	14	16	18	20	28	0,3	0,1
165	10	11	16	13	14	16	18	25	0,3	0,1

A.2 Sendeleistung in Abhängigkeit von Frequenz und Zellgröße (ASK 4-6)

Frequenzband [MHz]	700	800	900	1500	1800	2100	2600	3500	26000	28000
Zellgröße [m]	Sendeleistung [W]									
5000	35	35	45	40	40	40	45	63	0,3	0,1
4250	35	35	45	40	40	40	45	63	0,3	0,1
3613	35	35	45	35	40	40	45	63	0,3	0,1
3071	32	35	40	35	35	40	45	56	0,3	0,1
2610	32	32	40	35	35	40	40	56	0,3	0,1
2219	32	32	40	32	35	35	40	56	0,3	0,1
1886	28	32	35	32	35	35	40	56	0,3	0,1
1603	28	28	35	32	32	35	35	50	0,3	0,1
1362	28	28	35	28	32	35	35	50	0,3	0,1
1158	25	28	32	28	32	32	35	50	0,3	0,1
984	25	25	32	28	28	32	35	50	0,3	0,1
837	25	25	32	25	28	32	32	45	0,3	0,1
711	22	25	28	25	28	32	32	45	0,3	0,1
605	22	22	28	25	25	28	32	45	0,3	0,1
514	22	22	28	22	25	28	32	45	0,3	0,1
437	20	22	25	22	25	28	32	45	0,3	0,1
371	20	20	25	22	22	28	32	40	0,3	0,1
316	18	20	25	20	22	25	28	40	0,3	0,1
268	18	18	22	20	22	25	28	40	0,3	0,1
228	16	18	22	18	20	22	25	35	0,3	0,1
194	14	16	20	18	20	22	25	35	0,3	0,1
165	13	14	20	16	18	20	22	32	0,3	0,1

A.3 Datenbasis für das RAN-Modell

RU-Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Standortkategorie, der Frequenz, der Technologie und MIMO-Konfiguration, der Sendeleistung und des entsprechenden Wirkungsgrades des Leistungsverstärkers:

Tabelle 42: Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der RU (Referenzjahr 2019)

Auslastung		Frequenz	Elektrische Leistungsaufnahme					
			ASK 1	ASK 2	ASK 3	ASK 4	ASK 5	ASK 6
High load	100%	700	121,59	111,05	104,37	111,05	111,05	104,37
High load	100%	800	134,35	123,80	117,12	134,35	123,80	117,12
High load	100%	900	152,37	142,31	133,36	142,31	142,31	133,36
High load	100%	1500	141,81	132,86	122,32	132,86	122,32	122,32
High load	100%	1800	147,74	138,79	128,25	147,74	138,79	128,25
High load	100%	2100	158,98	158,98	149,65	158,98	158,98	149,65
High load	100%	2600	168,07	157,00	147,67	168,07	157,00	157,00
High load	100%	3500	521,46	490,70	459,94	521,46	490,70	490,70
	[%]	[MHz]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]
Mid load	50%	700	120,60	110,06	103,38	110,06	110,06	103,38
Mid load	50%	800	132,86	122,32	115,64	132,86	122,32	115,64
Mid load	50%	900	151,39	141,32	132,37	141,32	141,32	132,37
Mid load	50%	1500	141,07	132,12	121,58	132,12	121,58	121,58
Mid load	50%	1800	144,04	135,09	124,54	144,04	135,09	124,54
Mid load	50%	2100	155,02	155,02	145,70	155,02	155,02	145,70
Mid load	50%	2600	165,11	154,03	144,71	165,11	154,03	154,03
Mid load	50%	3500	489,84	459,07	428,31	489,84	459,07	459,07
	[%]	[MHz]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]
Low load	20%	700	120,01	109,46	102,78	109,46	109,46	102,78
Low load	20%	800	131,97	121,43	114,75	131,97	121,43	114,75
Low load	20%	900	150,79	140,73	131,78	140,73	140,73	131,78
Low load	20%	1500	140,63	131,68	121,13	131,68	121,13	121,13
Low load	20%	1800	141,81	132,86	122,32	141,81	132,86	122,32
Low load	20%	2100	152,65	152,65	143,32	152,65	152,65	143,32
Low load	20%	2600	163,33	152,26	142,93	163,33	152,26	152,26
Low load	20%	3500	470,86	440,10	409,34	470,86	440,10	440,10
	[%]	[MHz]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]	[W/RU]

BU-Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Technologiegeneration:

Tabelle 43: Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der BU (Referenzjahr 2019)

Auslastung		Frequenz	Technologiegeneration	Elektrische Leistungsaufnahme
High load	100%	700	5G	76,88
High load	100%	800	4G	70,16
High load	100%	900	2G	60,08
High load	100%	1500	4G	60,08
High load	100%	1800	4G	100,40
High load	100%	2100	3G	90,32
High load	100%	2600	4G	90,32
High load	100%	3500	5G	157,52
	[%]	[MHz]		[W/BU]
Mid load	50%	700	5G	63,44
Mid load	50%	800	4G	60,08
Mid load	50%	900	2G	55,04
Mid load	50%	1500	4G	55,04
Mid load	50%	1800	4G	75,20
Mid load	50%	2100	3G	70,16
Mid load	50%	2600	4G	70,16
Mid load	50%	3500	5G	103,76
	[%]	[MHz]		[W/BU]
Low load	20%	700	5G	55,38
Low load	20%	800	4G	54,03
Low load	20%	900	2G	52,02
Low load	20%	1500	4G	52,02
Low load	20%	1800	4G	60,08
Low load	20%	2100	3G	58,06
Low load	20%	2600	4G	58,06
Low load	20%	3500	5G	71,50
	[%]	[MHz]		[W/BU]

Tabelle 44: Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der BU (Szenario 2030)

Auslastung		Frequenz	Technologiegeneration	Elektrische Leistungsaufnahme
High load	100%	700	5G (sub-6)	52,12
High load	100%	800	4G	50,85
High load	100%	900	2G	48,96
High load	100%	1500	5G (sub-6)	49,59
High load	100%	1800	5G (sub-6)	59,71
High load	100%	2100	5G (sub-6)	57,18
High load	100%	2600	5G (sub-6)	57,18
High load	100%	3500	5G (sub-6)	67,30
High load	100%	26000	5G (mmWave outdoor)	97,66
High load	100%	28000	5G (mmWave indoor)	97,66
	[%]	[MHz]		[W/BBU]
Mid load	50%	700	5G (sub-6)	59,71
Mid load	50%	800	4G	56,55
Mid load	50%	900	2G	51,80
Mid load	50%	1500	5G (sub-6)	53,38
Mid load	50%	1800	5G (sub-6)	78,68
Mid load	50%	2100	5G (sub-6)	72,36
Mid load	50%	2600	5G (sub-6)	72,36
Mid load	50%	3500	5G (sub-6)	97,66
Mid load	50%	26000	5G (mmWave outdoor)	173,56
Mid load	50%	28000	5G (mmWave indoor)	173,56
	[%]	[MHz]		[W/BBU]
Low load	20%	700	5G (sub-6)	72,36
Low load	20%	800	4G	66,03
Low load	20%	900	2G	56,55
Low load	20%	1500	5G (sub-6)	59,71
Low load	20%	1800	5G (sub-6)	110,31
Low load	20%	2100	5G (sub-6)	97,66
Low load	20%	2600	5G (sub-6)	97,66
Low load	20%	3500	5G (sub-6)	148,26
Low load	20%	26000	5G (mmWave outdoor)	300,05

Auslastung		Frequenz	Technologiegeneration				Elektrische Leistungsaufnahme			
Low load	20%	28000	5G (mmWave indoor)				300,05			
	[%]	[MHz]					[W/BBU]			

A.4 Berechnung der Datenrate (2019)

frequency	unit	700	800	900	1.500	1.800	2.100	2.600	3.500	26.000	28.000
technology		5G (sub-6)	4G	2G	4G	4G	3G	4G	5G (sub-6)	5G (mm)	5G (mm)
subcarrier spacing	MHz	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
resource block width	MHz	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180
bandwidth per subcarrier	MHz	10	10	5	10	25	20	20	40	100	100
carrier aggregation	n	2	2	4	1	2	2	2	2	4	4
bandwidth, total	MHz	20	20	20	10	50	40	40	80	400	400
bandwidth, effective (-10%)	MHz	18	18	18	9	45	36	36	72	360	360
subcarriers	n	1.200	1.200	1.200	600	3.000	2.400	2.400	4.800	24.000	24.000
resource blocks	n	100	100	100	50	250	200	200	400	2.000	2.000
symbols per second	Sym/s	1,7E+7	1,7E+7	1,7E+7	8,4E+6	4,2E+7	3,4E+7	3,4E+7	6,7E+7	3,4E+8	3,4E+8
modulation type		QAM 256	QAM 64	GMS K	QAM 64	QAM 64	QPSK	QAM 64	QAM 256	QAM 256	QAM 256
bits per symbol	bits/Sym	8	6	1	6	6	2	6	8	8	8
data rate per antenna module	Mbit/s	134	101	17	50	252	67	202	538	2.688	2.688
MIMO type		2x2	2x2	1x1	2x2	2x2	2x2	2x2	32x32	64x64	32x32
I/Os		4	4	1	4	4	4	4	1.024	4.096	1.024

frequency	unit	700	800	900	1.500	1.800	2.100	2.600	3.500	26.000	28.000
throughput per antenna module, incl. overhead	Mbit /s	269	202	17	101	504	134	403	17.203	172.032	86.016
RFU CPRI data rate	Mbit /s	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	25.000	400.000	100.000
control overhead	%	15%	25%	75%	25%	25%	75%	25%	15%	15%	15%
throughput per antenna module, excl. overhead	Mbit /s	228,5	151,2	4,2	75,6	378,0	33,6	302,4	14.623	146.227	73.114

A.5 Datenbasis für das TCN-Modell

Tabelle 45: Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Switchen

Name	Marke	Jahr	Datenrate	Typische Leistungsaufnahme	Maximale Leistungsaufnahme
CX 8325	aruba	2020	6400		550
Catalyst C9404R	Cisco	2019	480	2100	3200
Nexus 9500 Series	Cisco	2019	10	3,5	
Nexus 9500 Series	Cisco	2019	40	14	
Nexus 9500 Series	Cisco	2019	100	22	
VDX 6940-36Q	Fujitsu	2018	2880	215	282
VDX 6940-144S	Fujitsu	2018	2880	327	512
CloudEngine 7850-32Q-EI	Huawei	2016	2560		431
CloudEngine 6870 48T6CQ EI	Huawei	2019	2160	280	405
CloudEngine 6870 48S6CQ EI	Huawei	2019	2160	159	333
CloudEngine 6875 48S4CQ EI	Huawei	2019	1760	273	407
QFX5100-48S	Juniper	2019	1440	150	
QFX5100-24Q-AA	Juniper	2019	2560	175	
M4100-D12G	Netgear	2015	24		18,8
M4100-26G	Netgear	2015	52		31,6
M4100-50G	Netgear	2015	100		49,5
M4300-8X8F	Netgear	2019	320		49

Name	Marke	Jahr	Datenrate	Typische Leistungsaufnahme	Maximale Leistungsaufnahme
M4300-12X12F	Netgear	2019	480		97
M4300-24X24F	Netgear	2019	960		161
M4300-96X	Netgear	2019	1920		566

[Gbit/s] [W] [W]

Quellen: Aruba, CX 8325 Switch series (Aruba 2020), Cisco, Nexus 9500 Classic Line Cards and Fabric Modules (Cisco Systems 2019), Fujitsu, Datasheet ExtremeSwitching VDX6940 (Fujitsu 2018), Huawei, CloudEngine 6870 Switch Datasheet (Huawei 2016b), Juniper, QFX5100 ETHERNET SWITCH (Juniper Networks 2019c), Netgear, Intelligent Edge Managed Switches Data Sheet M4300 series (Netgear 2016).

→ Ableitung des Stromverbrauchs eines Switches

Tabelle 46: Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Routern

Name	Marke	Jahr	Datenrate	Typische Leistungsaufnahme	Maximale Leistungsaufnahme
Router 6273 (high-end)	Ericsson	2019	2400	1070	1470
Router 6273 (low-end)	Ericsson	2019	320	560	900
Router 6274	Ericsson	2019	100	760	1500
Router 6371	Ericsson	2019	10	31	52
Router 6471	Ericsson	2019	10	35	60
Router 6672	Ericsson	2019	10	110	165
Router 6675	Ericsson	2019	100	150	225
Router 6673	Ericsson	2020	400	517	823

[Gbit/s] [W] [W]

Quelle: Ericsson, Router 6273 (Ericsson 2019a).

→ Ableitung des Stromverbrauchs eines Routers

Tabelle 47: Beispiele für die elektrische Leistungsaufnahme von Gateways

Name	Marke	Jahr	Datenrate	Typische Leistungsaufnahme	Maximale Leistungsaufnahme
SRX5400	Juniper	2019	270	1540	4100
SRX5600	Juniper	2019	480	2440	4100
SRX5800	Juniper	2019	1000	5015	8200
Nokia 7750	Nokia	2016	100		470

[Gbit/s] [W] [W]

Quelle: Juniper, SRX5400, SRX5600, and SRX5800 Service Gateways (Juniper Networks 2019d).

Tabelle 48: Gerätbestand im TCN-Modell für das Referenzszenario 2019

Netzwerkebene	Netzwerk-level	Anzahl an Ringen	Anzahl an Standorten pro Ring	Anzahl an Standorten pro Provider	Komponenten
Radio Access Network	1	-	-	5.156,00	Baseband Unit ASK 1
Radio Access Network	1	-	-	4.314,00	Baseband Unit ASK 2
Radio Access Network	1	-	-	5.587,00	Baseband Unit ASK 3
Radio Access Network	1	-	-	3.315,00	Baseband Unit ASK 4
Radio Access Network	1	-	-	5.863,00	Baseband Unit ASK 5
Radio Access Network	1	-	-	2.860,00	Baseband Unit ASK 6
Local Aggregation Ring	2	512	4	2.048,00	Optical Network Unit
Local Aggregation Ring	2	512	8	4.096,00	Switch
Metro Aggregation Ring	3	64	8	512,00	Optical Network Unit
Metro Aggregation Ring	3	64	8	512,00	Radio Network Controller
Metro Aggregation Ring	3	64	16	1.024,00	Router
Metro Aggregation Ring	4	64	1	64,00	Optical Network Unit
Metro Aggregation Ring	4	64	2	128,00	Router/Gateway
Core Route	5	8	1	8,00	Core Network Server
Core Route	5	8	1	8,00	Optical Network Unit
Core Route	5	8	1	8,00	Router

Tabelle 49: Auslastungsabhängige elektrische Leistungsaufnahme der TCN-Gerätetechnik

Auslastung	Netzwerkebene	Anzahl an Standorten pro Provider	Komponenten	Elektrische Leistungsaufnahme pro Standort
High load 100%	Radio Access Network	5.156,00	Baseband Unit ASK 1	8,00

Auslastung		Netzwerkebene	Anzahl an Standorten pro Provider	Komponenten	Elektrische Leistungsaufnahme pro Standort
High load	100%	Radio Access Network	4.314,00	Baseband Unit ASK 2	8,00
High load	100%	Radio Access Network	5.587,00	Baseband Unit ASK 3	8,00
High load	100%	Radio Access Network	3.315,00	Baseband Unit ASK 4	8,00
High load	100%	Radio Access Network	5.863,00	Baseband Unit ASK 5	8,00
High load	100%	Radio Access Network	2.860,00	Baseband Unit ASK 6	8,00
High load	100%	Local Aggregation Ring	2.048,00	Optical Network Unit	20,00
High load	100%	Local Aggregation Ring	4.096,00	Switch	1.000,00
High load	100%	Metro Aggregation Ring	512,00	Optical Network Unit	24,00
High load	100%	Metro Aggregation Ring	512,00	Radio Network Controller	3.598,10
High load	100%	Metro Aggregation Ring	1.024,00	Router	1.500,00
High load	100%	Metro Aggregation Ring	64,00	Optical Network Unit	134,00
High load	100%	Metro Aggregation Ring	128,00	Router/Gateway	2.000,00
High load	100%	Core Route	8,00	Core Network Server	230.278,44
High load	100%	Core Route	8,00	Optical Network Unit	700,00
High load	100%	Core Route	8,00	Router	7.500,00
					[W]
Mid load	50%	Radio Access Network	5.156,00	Baseband Unit ASK 1	8,00
Mid load	50%	Radio Access Network	4.314,00	Baseband Unit ASK 2	8,00
Mid load	50%	Radio Access Network	5.587,00	Baseband Unit ASK 3	8,00
Mid load	50%	Radio Access Network	3.315,00	Baseband Unit ASK 4	8,00
Mid load	50%	Radio Access Network	5.863,00	Baseband Unit ASK 5	8,00
Mid load	50%	Radio Access Network	2.860,00	Baseband Unit ASK 6	8,00
Mid load	50%	Local Aggregation Ring	2.048,00	Optical Network Unit	20,00
Mid load	50%	Local Aggregation Ring	4.096,00	Switch	1.000,00
Mid load	50%	Metro Aggregation Ring	512,00	Optical Network Unit	24,00
Mid load	50%	Metro Aggregation Ring	512,00	Radio Network Controller	3.418,20
Mid load	50%	Metro Aggregation Ring	1.024,00	Router	1.500,00
Mid load	50%	Metro Aggregation Ring	64,00	Optical Network Unit	73,00
Mid load	50%	Metro Aggregation Ring	128,00	Router/Gateway	2.000,00
Mid load	50%	Core Route	8,00	Core Network Server	218.764,52

Auslastung		Netzwerkebene		Anzahl an Standorten pro Provider	Komponenten		Elektrische Leistungsaufnahme pro Standort
Mid load	50%	Core Route		8,00	Optical Network Unit		350,00
Mid load	50%	Core Route		8,00	Router		4.500,00
	[%]						[W]
Low load	20%	Radio Access Network		5.156,00	Baseband Unit ASK 1		8,00
Low load	20%	Radio Access Network		4.314,00	Baseband Unit ASK 2		8,00
Low load	20%	Radio Access Network		5.587,00	Baseband Unit ASK 3		8,00
Low load	20%	Radio Access Network		3.315,00	Baseband Unit ASK 4		8,00
Low load	20%	Radio Access Network		5.863,00	Baseband Unit ASK 5		8,00
Low load	20%	Radio Access Network		2.860,00	Baseband Unit ASK 6		8,00
Low load	20%	Local Aggregation Ring		2.048,00	Optical Network Unit		20,00
Low load	20%	Local Aggregation Ring		4.096,00	Switch		1.000,00
Low load	20%	Metro Aggregation Ring		512,00	Optical Network Unit		24,00
Low load	20%	Metro Aggregation Ring		512,00	Radio Network Controller		3.058,39
Low load	20%	Metro Aggregation Ring		1.024,00	Router		1.500,00
Low load	20%	Metro Aggregation Ring		64,00	Optical Network Unit		49,00
Low load	20%	Metro Aggregation Ring		128,00	Router/Gateway		2.000,00
Low load	20%	Core Route		8,00	Core Network Server		195.736,67
Low load	20%	Core Route		8,00	Optical Network Unit		150,00
Low load	20%	Core Route		8,00	Router		1.500,00
	[%]						[W]

A.6 Berechnung der Datenrate (2030)

frequency	unit	700	800	900	1.500	1.800	2.100	2.600	3.500	26.000	28.000
technology		5G (sub-6)	4G	2G	5G (sub-6)	5G (mm)	5G (mm)				
subcarrier spacing	MHz	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
resource block width	MHz	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180
bandwidth per subcarrier	MHz	10	10	5	10	25	20	20	40	100	100

frequency	unit	700	800	900	1.500	1.800	2.100	2.600	3.500	26.000	28.000
carrier aggregation	n	2	2	4	1	2	2	2	2	4	4
bandwidth, total	MHz	20	20	20	10	50	40	40	80	400	400
bandwidth, effective (-10%)	MHz	18	18	18	9	45	36	36	72	360	360
subcarriers	n	1.200	1.200	1.200	600	3.000	2.400	2.400	4.800	24.000	24.000
resource blocks	n	100	100	100	50	250	200	200	400	2.000	2.000
symbols per second	Sym/s	1,7E+7	1,7E+7	1,7E+7	8,4E+6	4,2E+7	3,4E+7	3,4E+7	6,7E+7	3,4E+8	3,4E+8
modulation type		QAM 256	QAM 64	GMSK	QAM 256						
bits per symbol	bits/Sym	8	6	1	8	8	8	8	8	8	8
data rate per antenna module	Mbit/s	134	101	17	67	336	269	269	538	2.688	2.688
MIMO type		2x2	2x2	1x1	2x2	4x4	4x4	4x4	32x32	64x64	32x32
I/Os		4	4	1	4	16	16	16	1.024	4.096	1.024
throughput per antenna module, incl. overhead	Mbit/s	269	202	17	134	1.344	1.075	1.075	17.203	172.032	86.016
RFU CPRI data rate	Mbit/s	1.000	1.000	1.000	1.000	10.000	10.000	10.000	25.000	400.000	100.000
control overhead	%	15%	25%	75%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
throughput per antenna module, excl. overhead	Mbit/s	228,5	151,2	4,2	114,2	1.142	913,9	913,9	14.623	146.227	73.114

A.7 Liste der untersuchten Smartphones

manufacturer	model	released	display [in]	RAM [GB]	min. storage [GB]	price [\$]	battery [mAh]	weight [g]
Oppo	Reno 3 Pro 5G	2019/12	6,55	8	128	568,13	4025	171
Huawei	Mate 30 Pro 5G	2019/09	6,53	8	256	864,99	4400	198
Samsung	Galaxy S20 Ultra 5G (USA) ¹	2020/03	6,9	12	256	1119	5000	222

manu-facturer	model	released	display [in]	RAM [GB]	min. storage [GB]	price [\$]	battery [mAh]	weight [g]
Samsung	Galaxy S20 Ultra 5G (global)	2020/03	6,9	12	256	1119	5000	222
Oppo	Find X2	2020/03	6,7	8	128	969,99	4200	209
LG	V50 THinQ 5G	2019/04	6,4	6	128	429,98	4000	183
Oppo	Reno 5G	2019/05	6,6	8	256	990	4065	215
Xiaomi	Mi Mix 3 5G	2019/05	6,39	6	64	680	3800	225
OnePlus	7 Pro 5 G	2019/09	6,67	6	128	900	4000	206
Samsung	Galaxy S10+ 5G (global)	2019/04	6,7	8	256	669,95	4500	198
Samsung	Galaxy S10+ 5G (USA)	2019/04	6,7	8	256	669,95	4500	198
Apple	iPhone X ¹	2017/09	5,8	3	64	549	2716	174
Apple	iPhone XR ¹	2018/09	6,1	3	64	749	2942	194
Apple	iPhone XS ¹	2018/09	5,8	4	64	999	2659	177
Apple	iPhone XS Max	2018/09	6,5	4	64	1099	3179	208
Apple	iPhone 11	2019/09	6,1	4	64	699	3142	194
Apple	iPhone 11 Pro	2019/09	5,8	6	64	999	3079	188
Apple	iPhone 11 Pro Max	2019/09	6,5	6	64	1099	3969	226
Apple	iPhone SE (2020) ¹	2020/04	4,7	3	64	399	1821	148

1 Die Demontagebilder dieser Modelle wurden detaillierter ausgewertet.

A.8 Sachbilanzdaten und Carbon Footprint der Smartphones und Sensoren

device			Smartphone (low-end)	Smartphone (mid-end)	Smartphone (high-end)	Sensor (small)	Sensor (medium)	Sensor (big)
characterist	price	\$	400.00	819.63	1,200.00	n.a.	n.a.	n.a.
	length	mm	135	150	170	25	50	75
	width	mm	65	75	80	25	50	75
	depth	mm	7	8	9	10	20	40

device			Smartphone (low-end)	Smartphone (mid-end)	Smartphone (high-end)	Sensor (small)	Sensor (medium)	Sensor (big)
electronics	weight	g	140	198	230			
	area	mm ²	8,775	11,250	13,600	625	2,500	5,625
	display	inch	6	6	7	0	0	0
	display area	mm ²	8,339	11,059	13,508	0	0	0
	battery	mAh	2,500	3,737	5,000	1,000	2,000	10,000
	PCB area	mm ²	1,800	3,630	5,400	500	2,000	4,500
	RAM area	mm ²	75	87	100	0	0	0
	storage area	mm ²	65	73	90	0	0	0
	SoC area	mm ²	80	89	120	0	0	0
	rest IC area	mm ²	170	261	300	25	100	225
GWP	electronics	%	77%	73%	69%	79%	77%	73%
	assembly	%	11%	13%	16%	10%	11%	13%
	rest	%	12%	14%	15%	11%	12%	14%
	display	kg CO ₂ e	21.06	27.53	32.94	1.35	5.40	12.15
	battery	kg CO ₂ e	1.95	2.59	3.17	0.00	0.00	0.00
	PCB	kg CO ₂ e	1.01	1.51	2.02	0.40	0.81	4.05
	RAM	kg CO ₂ e	0.93	1.88	2.80	0.26	1.04	2.33
	storage	kg CO ₂ e	4.05	4.67	5.40	0.00	0.00	0.00
	SoC	kg CO ₂ e	3.51	3.93	4.86	0.00	0.00	0.00
	rest ICs	kg CO ₂ e	4.32	4.83	6.48	0.00	0.00	0.00
GWP (total)	rest + assembly	kg CO ₂ e	10.83	17.10	23.94	1.16	3.17	11.65
	total	kg CO ₂ e	32.82	46.51	59.67	2.77	9.60	26.13
	2019	units	5,67E+7	1,24E+7	5,33E+6	2,00E+7	0,00E+0	0,00E+0
	2022	units	6,13E+7	1,33E+7	5,76E+6	3,00E+7	1,00E+6	5,00E+4
	2026	units	6,64E+7	1,45E+7	6,23E+6	4,00E+7	3,00E+6	1,00E+5
GWP (total)	2030	units	7,10E+7	1,55E+7	6,67E+6	5,00E+7	5,00E+6	1,50E+5
	2019	t CO ₂ e/a	511.648	149.318	78.041	9.355	0	0
	2022	t CO ₂ e/a	552.653	161.284	84.296	14.032	1.354	134
	2026	t CO ₂ e/a	598.453	174.650	91.281	18.710	4.062	269
GWP (total)	2030	t CO ₂ e/a	640.366	186.882	97.674	23.387	6.770	403

A.9 Sachbilanzdaten aller Komponenten

component	service life	PCB 1-layer	PCB 8-layer	PCB 12-layer	IC	Aluminum	Concrete	Copper	Gold	Steel	Display	Battery	Production
unit	a	m ²	m ²	m ²	kg	kg	kg	kg	kg	kg	m ²	mAh	kg
AU heptaband ¹	7.0	3.87E-1	-	-	1.23E+1	-	7.92E-1	-	2.34E+0	-	-	-	-
AU + RFU 3500 ¹	5.0	1.02E-1	3.07E-1	-	7.68E-3	2.67E+1	-	-	-	-	-	-	-
AU + RFU 26000 ¹	5.0	-	3.00E-2	-	1.77E-3	3.64E-1	-	-	-	-	-	-	-
AU + RFU 28000 ¹	5.0	-	3.00E-2	-	1.77E-3	3.64E-1	-	-	-	-	-	-	-
RFU ¹	7.0	-	9.36E-2	-	1.87E-3	1.43E+1	-	-	-	-	-	-	-
BBU ¹	7.0	-	-	1.85E-1	3.69E-3	2.83E+0	-	-	-	-	-	-	-
Cable (Cu) ²	15	-	-	-	-	-	-	4.36E-1	-	-	-	-	-
Mounting (rural, concrete) ³	100	-	-	-	-	2.13E+5	-	-	-	-	-	-	-
Mounting (rural, steel) ³	40	-	-	-	-	2.14E+4	-	-	6.60E+3	-	-	-	-
Mounting (suburban, concrete) ³	100	-	-	-	-	1.49E+5	-	-	-	-	-	-	-
Mounting (suburban, steel) ³	40	-	-	-	-	1.51E+4	-	-	4.67E+3	-	-	-	-
Mounting (urban) ³	20	-	-	-	-	-	-	-	1.72E+2	-	-	-	-
Rack ³	15	-	-	-	-	-	-	-	4.24E+1	-	-	-	-
Smartphone (low-end) ¹	2.5	-	-	1.80E-3	3.90E-4	-	-	-	1.50E-5	5.00E-3	8.34E-3	2.50E+3	7.32E+0
Smartphone (mid-end) ¹	2.5	-	-	3.63E-3	5.10E-4	1.00E-2	-	-	2.00E-5	5.00E-3	1.11E-2	3.74E+3	1.22E+1
Smartphone (high-end) ¹	2.5	-	-	5.40E-3	6.10E-4	2.00E-2	-	-	2.00E-5	5.00E-3	1.35E-2	5.00E+3	1.79E+1
Sensor (small) ¹	4.0	-	-	5.00E-4	2.50E-5	1.00E-2	-	-	5.00E-6	5.00E-3	-	1.00E+3	4.97E-1
Sensor (medium) ¹	5.0	-	-	2.00E-3	1.00E-4	2.00E-2	-	-	5.00E-6	5.00E-3	-	2.00E+3	2.02E+0
Sensor (big) ¹	6.0	-	-	4.50E-3	2.25E-4	2.00E-1	-	-	5.00E-6	5.00E-3	-	1.00E+4	5.96E+0
Optical Network Unit ¹	7.0	-	-	1.74E-1	4.76E-3	-	-	-	7.97E+0	-	-	-	-
Switch ¹	7.0	-	-	6.97E-1	1.78E-2	-	-	-	5.96E+0	-	-	-	-
Radio Network Controller ¹	7.0	-	-	1.74E-1	5.16E-3	-	-	-	4.02E+0	-	-	-	-
Router/Gateway ¹	7.0	-	-	1.39E+0	3.55E-2	-	-	-	8.55E+0	-	-	-	-
Core Network Server ¹	7.0	-	-	1.39E+0	3.61E-2	-	-	-	8.55E+0	-	-	-	-

reference unit: ¹ per piece ² per meter ³ per antenna site

A.10 CO2-Bilanz der Herstellung aller Komponenten

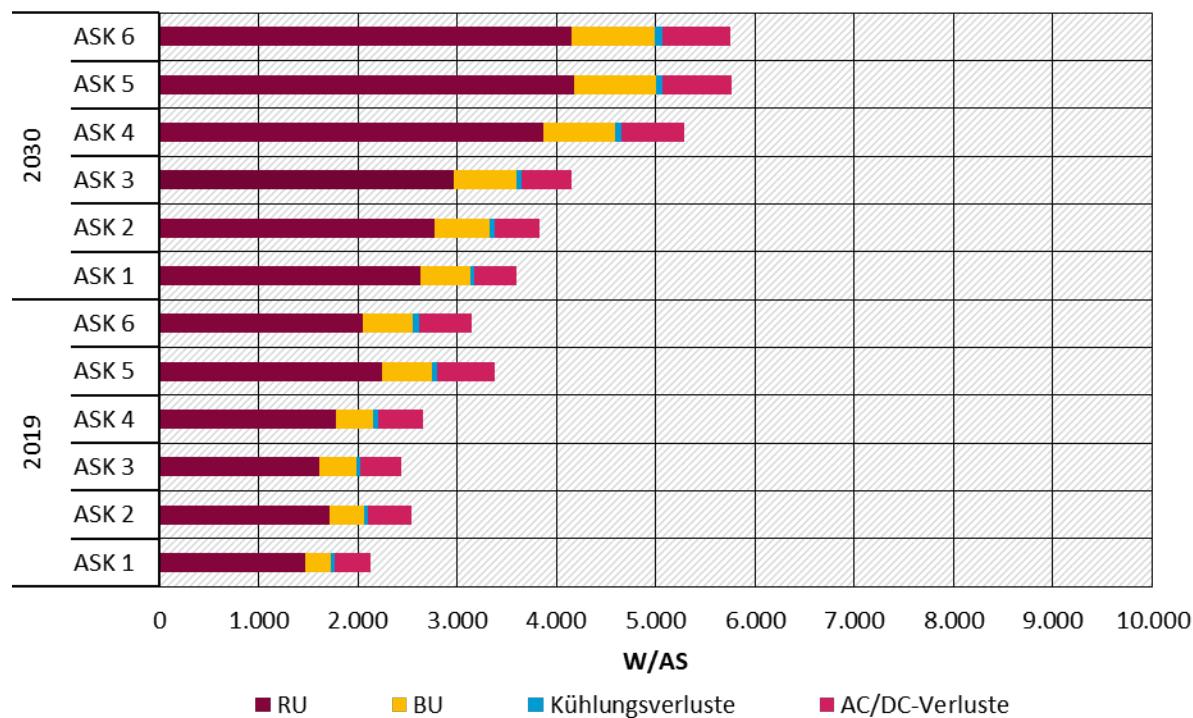
component	PCB 1-layer	PCB 8-layer	PCB 12-layer	IC	Aluminum	Concrete	Copper	Gold	Steel	Display	Battery	Production	Total	Total per year
unit	kg CO2e													
AU heptaband ¹	-	-	-	9.0E+1	-	2.9E+0	-	4.7E+0	-	-	-	1.5E+2	2.1E+1	4.9E+1
AU + RU 3500 ¹	1.2E+2	-	4.1E+2	1.9E+2	-	-	-	-	-	-	-	7.4E+2	1.5E+2	1.3E+1
AU + RU 26000 ¹	1.1E+1	-	9.6E+1	2.6E+0	-	-	-	-	-	-	-	1.1E+2	2.2E+1	-
AU + RU 28000 ¹	1.1E+1	-	9.6E+1	2.6E+0	-	-	-	-	-	-	-	1.1E+2	2.2E+1	-
RU ¹	3.6E+1	-	1.0E+2	1.0E+2	-	-	-	-	-	-	-	2.4E+2	3.4E+1	-
BU ¹	-	9.6E+1	2.0E+2	2.1E+1	-	-	-	-	-	-	-	3.2E+2	4.5E+1	-
Cable (Cu) ²	-	-	-	-	-	1.6E+0	-	-	-	-	-	1.6E+0	1.1E-1	-
Mounting (rural, concrete) ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mounting (rural, steel) ³	-	-	-	-	3.2E+4	-	-	-	-	-	-	3.2E+4	3.2E+2	-
Mounting (suburban, concrete) ³	-	-	-	-	3.2E+3	-	-	1.3E+4	-	-	-	1.6E+4	4.1E+2	-
Mounting (suburban, steel) ³	-	-	-	-	2.2E+4	-	-	-	-	-	-	2.2E+4	2.2E+2	-
Mounting (urban) ³	-	-	-	-	2.3E+3	-	-	9.3E+3	-	-	-	1.2E+4	2.9E+2	-
Rack ³	-	-	-	-	-	-	-	3.4E+2	-	-	-	3.4E+2	1.7E+1	-
Smartphone (low-end) ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smartphone (mid-end) ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smartphone (high-end) ¹	-	-	-	-	-	-	-	1.5E+2	-	-	-	1.5E+2	9.9E+0	-
Sensor (small) ¹	-	9.3E-1	2.1E+1	-	-	-	5.4E-1	1.0E-2	2.0E+0	1.0E+0	7.3E+0	3.3E+1	9.0E+0	-
Sensor (medium) ¹	-	1.9E+0	2.8E+1	7.3E-2	-	-	7.2E-1	1.0E-2	2.6E+0	1.5E+0	1.2E+1	4.7E+1	1.2E+1	-
Sensor (big) ¹	-	2.8E+0	3.3E+1	1.5E-1	-	-	7.2E-1	1.0E-2	3.2E+0	2.0E+0	1.8E+1	6.0E+1	1.5E+1	-
Optical Network Unit ¹	-	2.6E-1	1.4E+0	7.3E-2	-	-	1.8E-1	1.0E-2	-	4.0E-1	5.0E-1	2.8E+0	4.7E-1	-
Switch ¹	-	1.0E+0	5.4E+0	1.5E-1	-	-	1.8E-1	1.0E-2	-	8.1E-1	2.0E+0	9.6E+0	1.4E+0	-
Radio Network Controller ¹	-	2.3E+0	1.2E+1	1.5E+0	-	-	1.8E-1	1.0E-2	-	4.0E+0	6.0E+0	2.6E+1	2.7E+0	-
Router/Gateway ¹	-	9.0E+1	2.6E+2	-	-	-	-	1.6E+1	-	-	-	3.6E+2	5.2E+1	-
Core Network Server ¹	-	3.6E+2	9.6E+2	-	-	-	-	1.2E+1	-	-	-	1.3E+3	1.9E+2	-

reference unit:

¹ per piece² per meter³ per antenna site

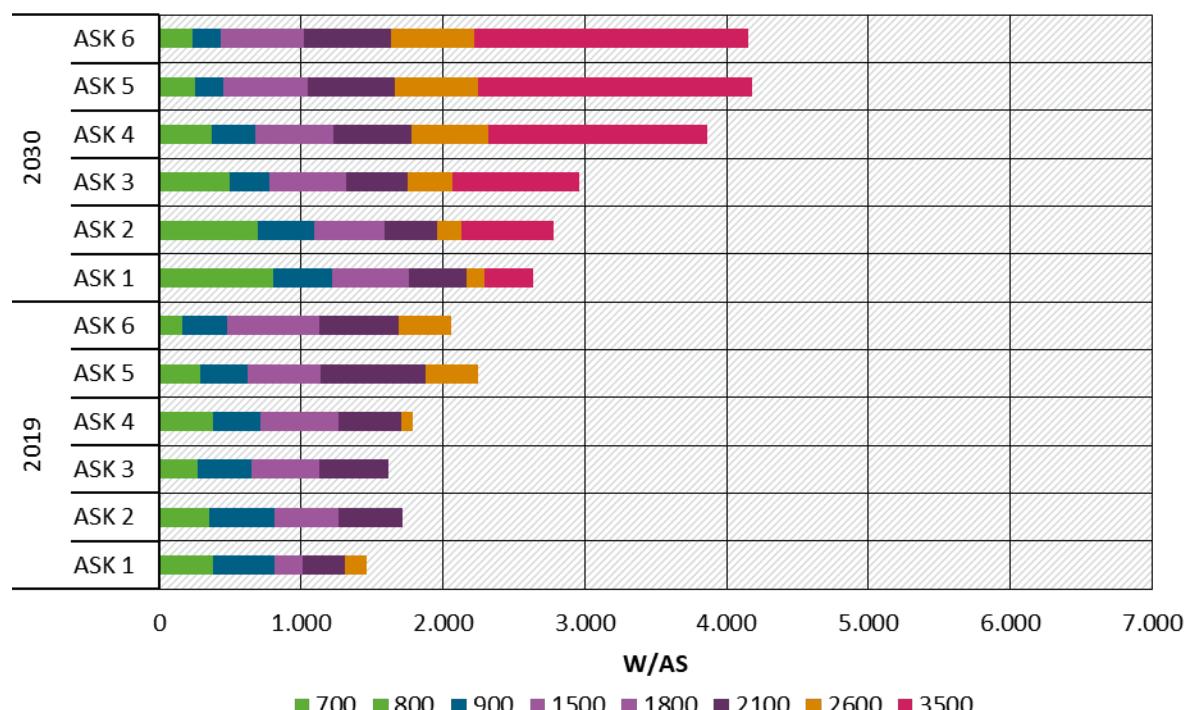
A.11 Weitere Ergebnisdiagramme der Szenarien

Abbildung 81: Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Technikmodernisierung 2019 und 2030)



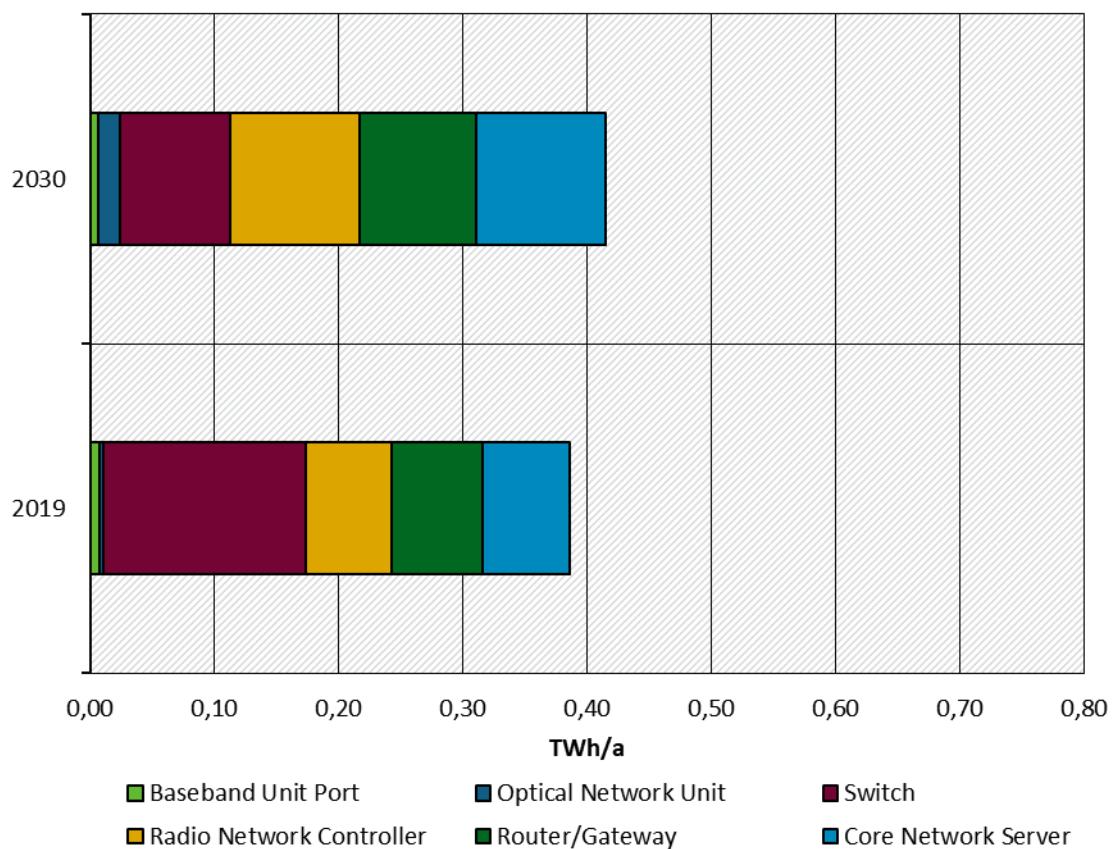
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 82: Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Technikmodernisierung 2019 und 2030)



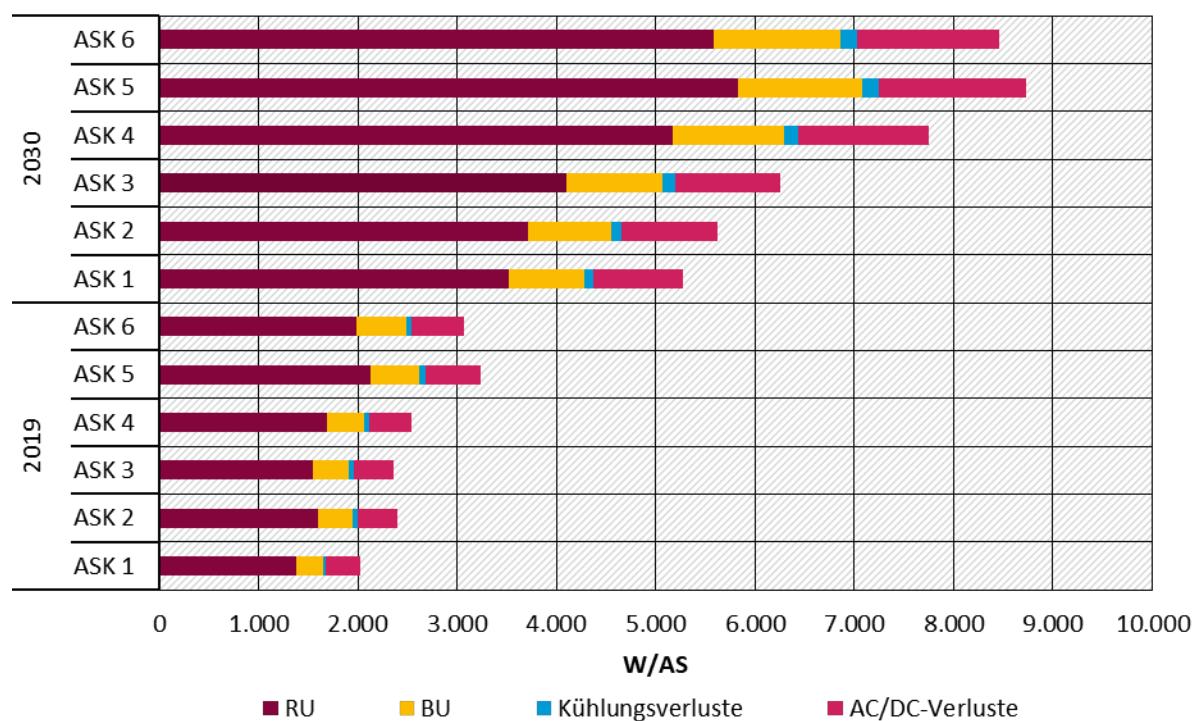
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 83: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Technikmodernisierung 2019 und 2030)



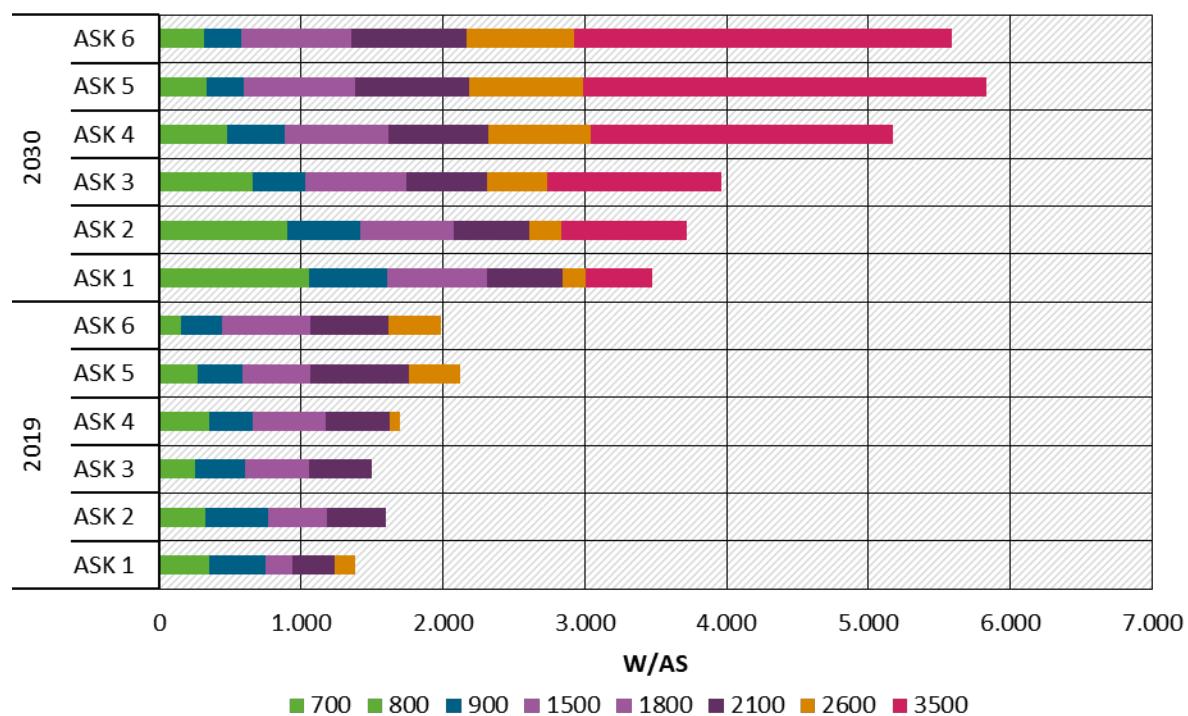
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 84: Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Roaming 2019 und 2030)



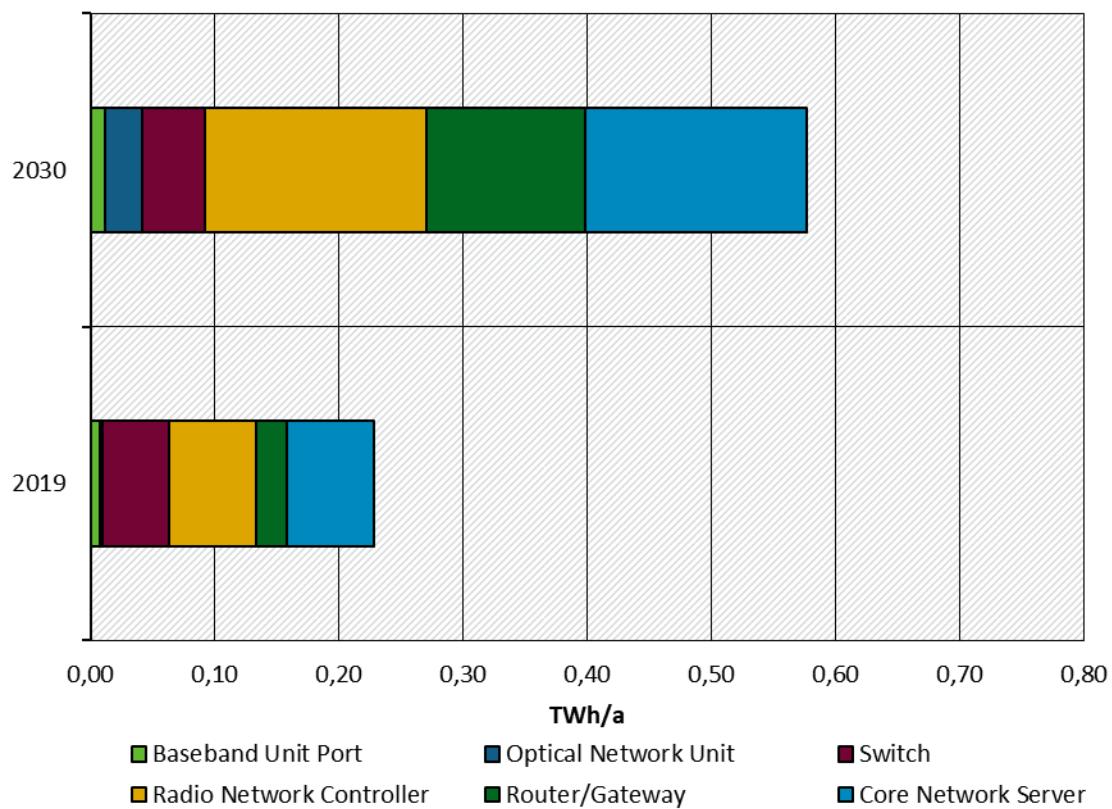
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 85: Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Roaming 2019 und 2030)



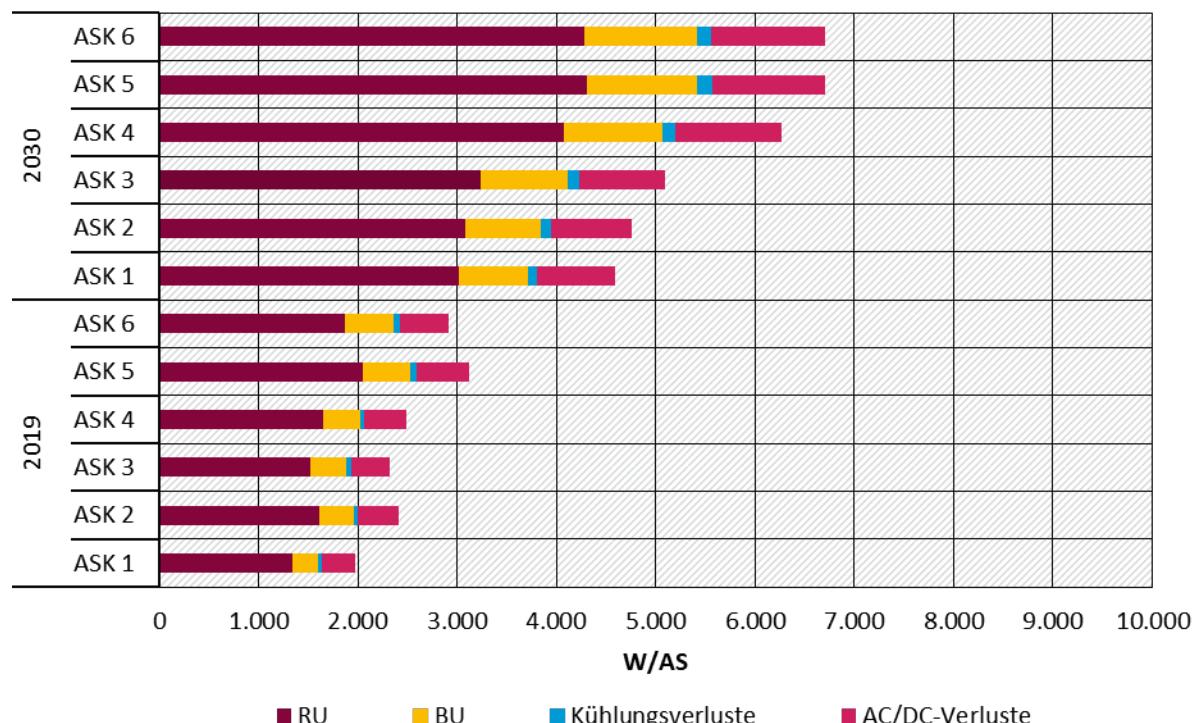
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 86: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Roaming 2019 und 2030)



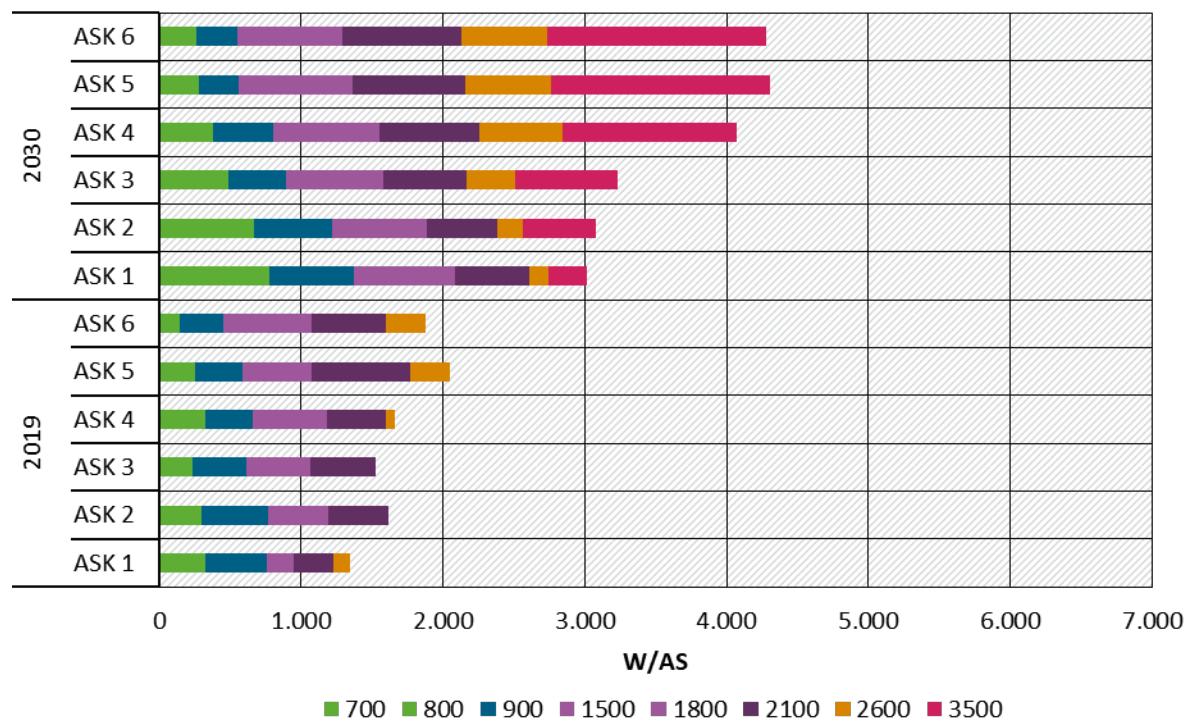
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 87: Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (Energiemanagement 2019 und 2030)



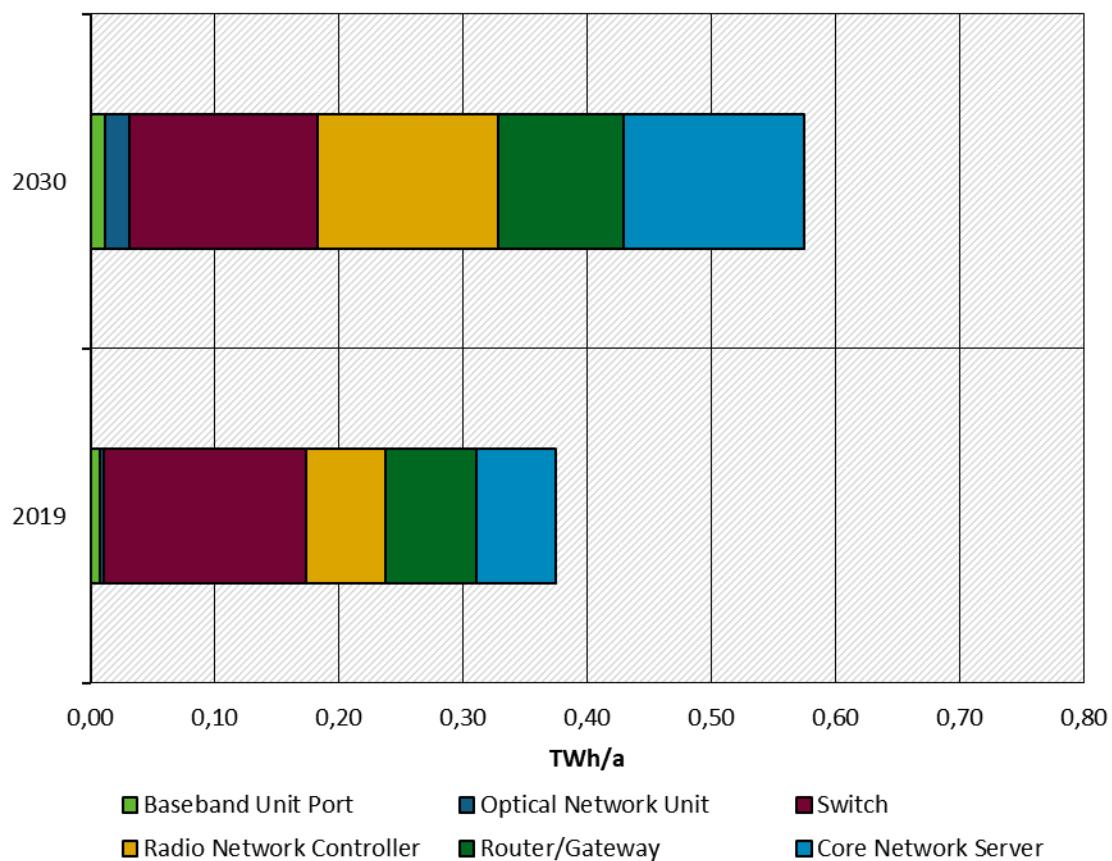
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 88: Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (Energiemanagement 2019 und 2030)



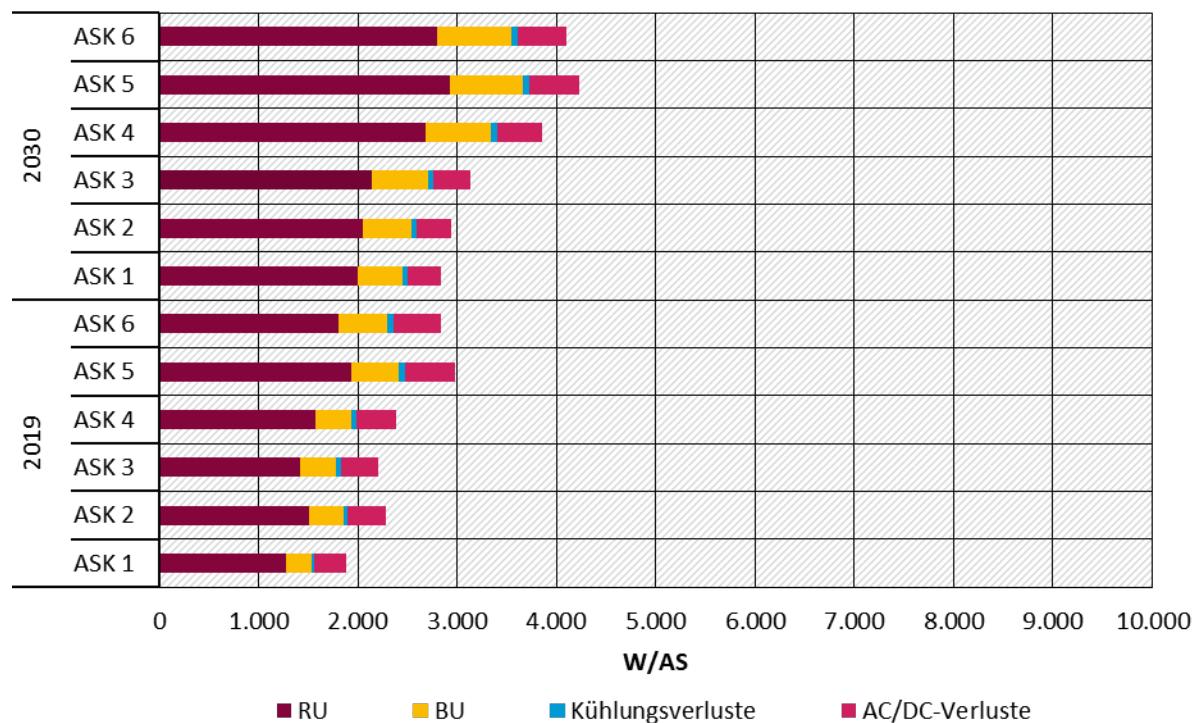
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 89: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (Energiemanagement 2019 und 2030)



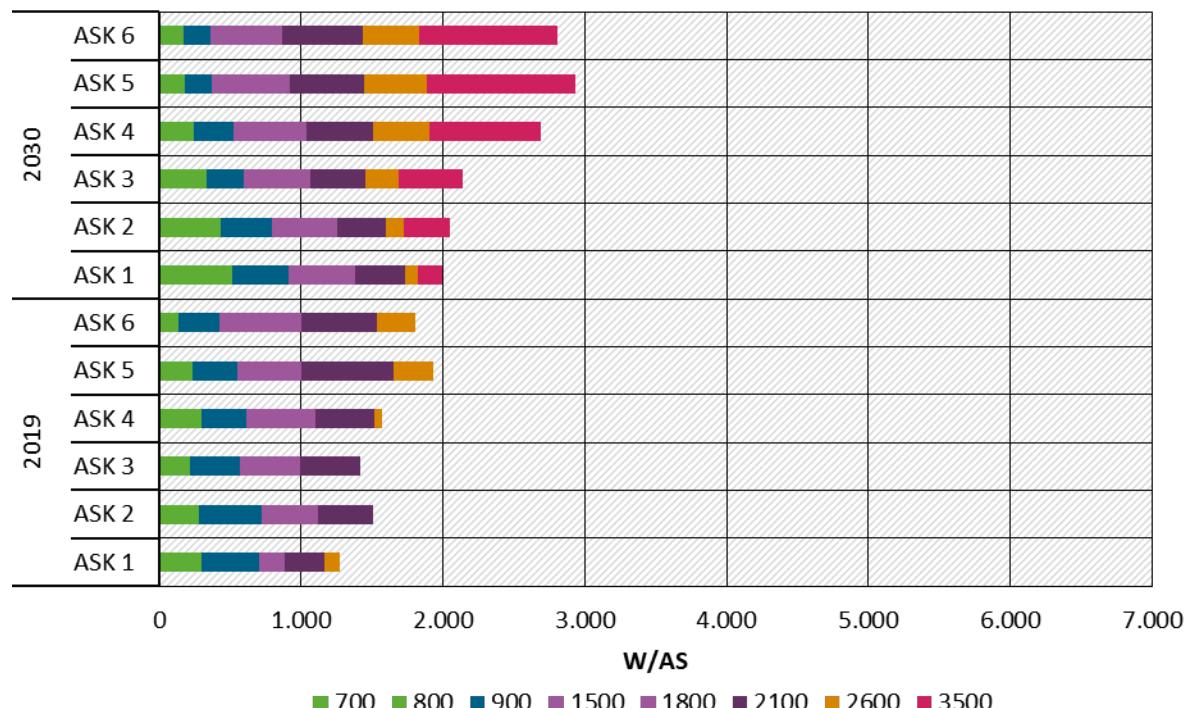
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 90: Elektrische Leistungsaufnahme der Komponenten eines Standortes in Abh. der Standortkategorie (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)



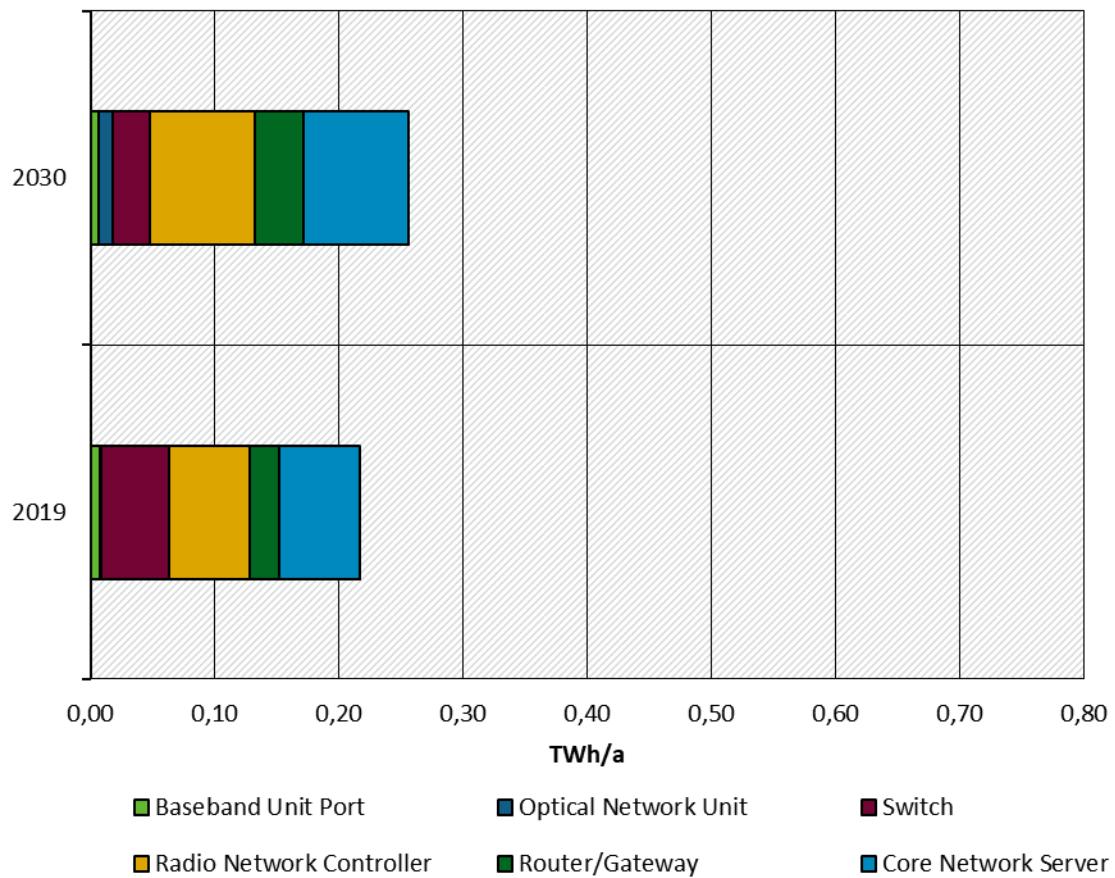
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 91: Elektrische Leistungsaufnahme der Funkmodule eines Standortes in Abh. der Frequenz und Standortkategorie (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

Abbildung 92: Prognose des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von TCN-Komponenten in Deutschland (kombiniertes Szenario 2019 und 2030)



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer IZM

A.12 Weitere Tabellen

Tabelle 50: Übersichtstabelle der ausgewerteten Mobilfunkanlagen

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Bandbreite	Transceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	60	669	943
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	40	510	673
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMA)	Nokia	2016	800	30	3	20	374	450

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Trans-ceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMD)	Nokia	2016	800	15	3	60	621	826
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMD)	Nokia	2016	800	15	3	40	486	616
Flexi RF Module 3TX 800 (FRMD)	Nokia	2016	800	15	3	20	369	435
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDA)	Nokia	2016	900	20	3	60	700	932
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDA)	Nokia	2016	900	20	3	40	533	672
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDA)	Nokia	2016	900	20	3	20	447	523
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDJ)	Nokia	2016	900	12,5	3	60	700	932
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDJ)	Nokia	2016	900	12,5	3	40	533	672
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDJ)	Nokia	2016	900	12,5	3	20	447	523
Flexi RFM 3-pipe 1500 180 W (FRKA)	Nokia	2016	1500	10	3	60	640	880
Flexi RFM 3-pipe 1500 180 W (FRKA)	Nokia	2016	1500	10	3	40	460	605
Flexi RFM 3-pipe 1500 180 W (FRKA)	Nokia	2016	1500	10	3	20	385	480
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEA)	Nokia	2016	1800	30	3	60	679	909

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Transceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEA)	Nokia	2016	1800	30	3	40	565	719
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEA)	Nokia	2016	1800	30	3	20	466	555
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGP)	Nokia	2016	2100	20	3	55	557	759
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGP)	Nokia	2016	2100	20	3	40	427	553
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGP)	Nokia	2016	2100	20	3	20	317	384
Flexi RF Module 3TX 2600 (FRHA)	Nokia	2016	2600	20	3	60	806	1130
Flexi RF Module 3TX 2600 (FRHA)	Nokia	2016	2600	20	3	40	622	825
Flexi RF Module 3TX 2600 (FRHA)	Nokia	2016	2600	20	3	20	462	580
Flexi RF Module 3TX 1700/2100 (FRIE)	Nokia	2016	2100	20	3	55	590	805
Flexi RF Module 3TX 1700/2100 (FRIE)	Nokia	2016	2100	20	3	40	465	610
Flexi RF Module 3TX 1700/2100 (FRIE)	Nokia	2016	2100	20	3	20	345	420
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	3	20	460	460
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	6	20	473	586

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Trans-ceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	12	15	629	930
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	3	20	665	916
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	3	40	787	1223
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	3	60	983	1661
Flexi RF Module 3TX 900 (FXDB)	Nokia	2016	900	35	3	80	1098	1939
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	35	3	20	438	438
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	35	6	15	454	601
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	35	12	13	596	957
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	35	24	12	998	1869
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	50	3	20	657	891
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	50	3	40	770	1226
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	50	3	60	915	1589
Flexi RF Module 3TX 1800 (FXEB)	Nokia	2016	1800	50	3	80	1022	1900
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGT)	Nokia	2016	2100	60	3	20	580	796

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Trans-ceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGT)	Nokia	2016	2100	60	3	40	711	1117
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGT)	Nokia	2016	2100	60	3	60	818	1427
Flexi RF Module 3TX 2100 (FRGT)	Nokia	2016	2100	60	3	80	976	1803
Flexi RF Module 6TX 700 (FRPA)	Nokia	2016	700	35	3	20	399	568
Flexi RF Module 6TX 700 (FRPA)	Nokia	2016	700	35	3	40	576	934
Flexi Remote Radio Head 2TX 850 (FHCA)	Nokia	2016	800	25	2	20	200	240
Flexi Remote Radio Head 2TX 1800 (FHEA)	Nokia	2016	1800	75	2	40	303	397
Flexi Remote Radio Head 2TX 1800 (FHEA)	Nokia	2016	1800	75	2	20	225	275
Flexi Remote Radio Head 2TX 2100 (FRGQ)	Nokia	2016	2100	60	2	40	292	382
Flexi Remote Radio Head 2TX 2100 (FRGQ)	Nokia	2016	2100	60	2	30	265	334
Flexi Remote Radio Head 2TX 2100 (FRGQ)	Nokia	2016	2100	60	2	20	212	259
Flexi Remote Radio Head 2TX 2600 (FRHB)	Nokia	2016	2600	70	3	20	597	873

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Trans-ceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
Flexi Remote Radio Head 2TX 2600 (FRHB)	Nokia	2016	2600	70	3	40	797	1263
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	900	25	2	20	490	490
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	900	25	4	20	650	920
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	900	25	6	20	755	1205
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	900	25	3	20	475	515
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	900	25	6	20	530	650
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	2	20	510	600
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	4	20	690	960
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	45	6	20	785	1235
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	1800	10	3	20	660	750
DBS3900 (configured with the RRU3959)	Huawei	2018	2100	60	6	20	545	655

Model	Marke	Jahr	Frequenz	Band-breite	Trans-ceiver	ERP	Typische Leistungs-aufnahme	Maximale Leistungs-aufnahme
ZXSDR R8854 S2600	ZTE	2018	2600	20	4	20	315	560
LTE Radio Base Station	CoC	2020	2600	20	6	20	565	790
WCDMA/HS DPA Radio Base Station	CoC	2020	2100		6	20	505	725
GSM/EDGE Radio Base Station	CoC	2020	900/ 1800		12	20	520	760
			[MHz]	[MHz]		[W]	[W]	[W]

