

TEXTE

29/2018

Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoff- produktivität (DeteRess)

TEXTE 29/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3712 93 321
UBA-FB 002614

**Strukturelle und produktionstechnische
Determinanten der Ressourceneffizienz:
Untersuchung von Pfadabhängigkeiten,
strukturellen Effekten und technischen
Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung
der Rohstoffproduktivität (DeteRess)**

Abschlussbericht

von

Dr. Monika Dittrich, Claudia Kämper, Sabrina Ludmann, Birte Ewers, Jürgen
Giegrich
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg
Dr. Christian Sartorius, Torsten Hummen, Dr. Frank Marscheider-Weidemann
ISI, Karlsruhe
Dr. Karl Schoer
SSG, Wiesbaden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

ISI – Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

SSG – Sustainable Solutions Germany – Consultants GmbH (Karl Schoer)
Kleiststraße 7a
65187 Wiesbaden

Abschlussdatum:

April 2017

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und
Metallindustrie
Felix Müller

Publikationen als pdf:
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, April 2018

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

Kurzbeschreibung

Im Projekt „Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess)“ wurden die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Dematerialisierungspolitik mit Hilfe eines umweltökonomischen Modells untersucht, das über Szenarien die Veränderungen in den materialintensivsten Bereichen Energie, Bau und Verkehr abschätzt. Das Trendszenario „Anzunehmende zukünftige Entwicklung (AZE)“ zeigt den Rohstoffbedarf, der sich auf der Basis gegenwärtig bereits beschlossener Politiken und Maßnahmen im Jahr 2030 ergeben wird. Das Szenario „Technischer Wandel (TW)“ zeigt zusätzliche Rohstoffeinsparungen, wenn ausgewählte innovative Technologien in 2030 Anwendung finden.

Bereits im Trendszenario ist eine Verdopplung der Gesamtrohstoffproduktivität (BIP+Importe/ RMI-abiot+biot) bis 2030 gegenüber 1994 zu beobachten. Die in den Jahren 2000 - 2010 beobachtete jährliche Zunahme der Gesamtrohstoffproduktivität von 1,3 % wird mit 1,8 % in den Jahren 2010 – 2030 übertroffen. Die Ergebnisse zeigen ferner, dass der absolute Primärrohstoffbedarf der deutschen Volkswirtschaft im Trend rückläufig sein wird. „Große Hebel“ sind dabei insbesondere die Umsetzung der Energiewende und ferner auch der Trend der rückläufigen Erschließung neuer Siedlungsflächen. Im Vergleich dazu sind die Möglichkeiten, mit innovativen Technologien im Bereich Substitution, Materialeffizienzsteigerung und Recycling die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern, geringer aber deutlich vorhanden. Die im Projekt untersuchten Technologien decken zwar nicht das gesamte technologische Potenzial der Volkswirtschaft ab, aber es sind die Technologien, die besonders große Einsparpotenziale in den materialintensivsten Sektoren aufweisen. Würden diese Potenziale nach heutigem, optimistischem Ermessen erschlossen werden, würde dies zu einer Erhöhung der Gesamtrohstoffproduktivität um insgesamt 112 % gegenüber 1994 führen. Die Ergebnisse des Projekts zeigen damit, dass eine technikorientierte Dematerialisierungspolitik zur Senkung der Primärrohstofffinanzanspruchnahme und zur Erhöhung der Gesamtrohstoffproduktivität beitragen kann.

Abstract

The project "Structural and Technical Determinants of Resource Efficiency: Analysis of Path Dependencies, Structural Effects and Technological Potentials on the Future Development of Raw Material Productivity (DeteRess)" assessed the chances and limitations of a technology-oriented dematerialization policy in Germany using an environmental-economic model. Scenarios were developed to estimate the effect of changes in the material-intensive sectors of energy, construction and transport. The scenario "Expected Future Development (AZE)" estimates raw material use in 2030 based on known general developments and already adopted policies and measures to be implemented in the future. The scenario "Technological Change" (TW) shows the additional reduction potential resulting from the use of selected innovative technologies.

According to the trend scenario, total raw material productivity ($GDP + \text{imports} / \text{RMI}_{\text{abiot+biot}}$) is estimated to double until 2030 compared to 1994. The observed annual increase in total raw material productivity of 1.3 % between 2000 and 2010 is exceeded with 1.8 % for the years 2010 – 2030. The results show furthermore that total raw material use of the German economy is estimated to decline. Important levers are the transition to renewable energies and declining area sealing. In comparison, possibilities to increase raw material productivity with innovative technologies in the areas of substitution, material efficiency and recycling are smaller, but still significant. While the considered technologies do not cover the entire technological potential of the economy, they show the largest reduction potential in the most material intensive sectors. In total, their implementation would lead to an increase of total raw material productivity by 112 % compared to 1994. Hence, the results of the project show that a technology-oriented dematerialization policy can contribute to both: A reduction in primary raw material use and an increase in total raw material productivity.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	12
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	19
Zusammenfassung	21
Summary	33
1 Ausgangslage und Ziel	44
1.2 Politischer Hintergrund	44
1.3 Zielsetzung des Vorhabens	45
1.4 Aufbau des Berichts	46
2 Methodische Vorgehensweise	47
2.1 Das Umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD)	47
2.1.1 Konzeptioneller Hintergrund	47
2.1.1.1 Vorläufer von URMOD	47
2.1.1.2 Definition und Berechnung von gesamtwirtschaftlichen Materialflussindikatoren	47
2.1.1.3 Modifikation des Leontief-Modells	48
2.1.1.4 Adaption und Modifikation der Input-Output Tabelle	50
2.1.1.5 Matrix der Primärrohstoffinputs	52
2.1.1.6 Erweiterung des IOT Modells zur Abbildung der Substitution von Primärrohstoffen	55
2.1.2 Szenarien	55
2.1.2.1 Rechenmodell zur Ableitung der Szenarien	55
2.1.2.2 Überleitung externer Informationen in das Modell	57
2.2 Konsistenzprüfung	60
2.2.1 Szenario AZE	60
2.2.2 Szenario TW30 und in der Abschätzung TW30+	62
3 Status im Ausgangsjahr	62
3.1 Entwicklung des Rohstoffbedarfs in der Vergangenheit und Wahl des Basisjahres	62
3.2 Ergebnisse von URMOD für das Basisjahr 2010	64
3.2.1 Rohstoffarten	64
3.2.2 Gütergruppen	65
3.2.3 Kategorien der letzten Verwendung	70
3.2.4 Materialien und Energieträger zur Substitution von Primärrohstoffen	71
3.2.5 Vergleich mit der Umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes	73

4	Strategien zur Senkung des Materialinputs.....	74
4.1	Grundlegende Strategien: Effizienzsteigerung, Substitution und Recycling	75
4.2	Identifizierung relevanter Rohstoffeinsparpotenziale/-technologien.....	76
4.3	Darstellung ausgewählter Rohstoffeinsparszenarien.....	78
4.3.1	Effizienzsteigerung	79
4.3.1.1	Effizienterer Rohstoffeinsatz im Bausektor	79
4.3.1.2	Effizientere Herstellung von Baustoffen am Beispiel Zement	79
4.3.1.3	Energieeinsparung durch Wärmedämmung	80
4.3.1.4	Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft durch Precision Farming	81
4.3.2	Materialsubstitution.....	83
4.3.2.1	Erneuerbare anstelle von fossilen Energieträgern	83
4.3.2.2	Elektrische Leitungen: Aluminium anstelle von Kupfer	84
4.3.2.3	Leichtbau bei Straßen- und Luftfahrzeugen auf Basis von CFK	85
4.3.3	Recycling.....	86
4.3.3.1	Recycling von Verpackungskunststoffen	86
4.3.3.2	Ersatz chemischer Düngemittel durch Wirtschaftsdünger	88
4.4	Zusammenfassung: Vergleich der Potenziale.....	89
5	Einfluss relevanter Entwicklungstrends.....	91
5.1	Bevölkerung	91
5.1.1	Allgemeiner Trend und Datengrundlage für die Ausgestaltung der Szenarien	91
5.1.2	Überleitung der Daten in URMOD	92
5.2	Entwicklung des Bruttoinlandprodukts	92
5.2.1	Allgemeiner Trend und Datengrundlage für die Ausgestaltung der Szenarien	92
5.2.2	Überleitung der Daten in URMOD	93
5.3	Technischer Fortschritt	94
5.3.1	Allgemeine Trends.....	94
5.3.2	Überleitung der Daten in URMOD	95
5.3.2.1	Rohstoffintensität der inländischen Produktion	95
5.3.2.2	Rohstoffintensität der Importe	97
5.3.2.3	Rohstoffintensität im Inland TW30	97
5.4	Internationaler Handel	98
5.4.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage	98
5.4.2	Überleitung der Daten in URMOD	99
5.5	Kreislaufwirtschaft und stoffliche Verwertung.....	99
5.5.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage	99
5.5.2	Überleitung der Daten in URMOD	101

5.6	Metallgehalte in Erzen und Mengenrelevanz.....	101
5.6.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage	101
5.6.2	Überleitung der Daten in URMOD	104
5.7	Klimawandel und Mengenrelevanz	104
5.7.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage	104
5.7.2	Überleitung der Daten in URMOD	105
5.8	Sonstige Entwicklungstrends	105
5.8.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage	105
5.8.2	Überleitung der Daten in URMOD	106
6	Szenariengestaltung im Energiesektor	107
6.1	Status quo 2010 und Trends in der Vergangenheit.....	107
6.1.1	Energie: Erzeugung, Außenhandel und Nutzung	107
6.1.1.1	Primärenergiegewinnung und Außenhandel in der Vergangenheit	107
6.1.1.2	Materialbestand und -inputs im Energiesektor	109
6.1.1.3	Primär- und Endenergieverbrauch in der Vergangenheit und in 2010	111
6.1.2	Energie aus Strom: (nicht-) erneuerbar, Erzeugung und Verbrauch.....	112
6.1.2.1	Stromerzeugung in der Vergangenheit	113
6.1.2.2	Stromnutzung der Sektoren	114
6.1.3	Raumwärme, Erzeugung und Bedarf	115
6.1.3.1	Raumwärme in der Vergangenheit	115
6.1.3.2	Raumwärme: Stand 2010	116
6.2	Anznehmende zukünftige Entwicklung	116
6.2.1	Annahmen des Projektionsberichts	116
6.2.2	Annahmen für den Energieverbrauch.....	117
6.2.3	Annahmen für Stromerzeugung und -verbrauch	118
6.2.4	Annahmen zum Raumwärmebedarf.....	121
6.2.5	Überleitung der Daten in URMOD	122
6.3	Technologischer Wandel 2030	123
6.3.1	Höherer Anteil erneuerbarer Energien	124
6.3.2	Effizientere Elektromotoren.....	126
6.3.3	Effizientere Dampferzeuger	127
6.3.4	Überleitung der Daten in URMOD	128
6.4	Weitreichende Tendenz TW30+	129
6.4.1	Höherer Anteil erneuerbarer Energien	129
6.4.2	Effizientere Elektromotoren.....	129
6.4.3	Überleitung der Daten in URMOD	129

7	Szenariengestaltung im Bausektor	130
7.1	Allgemeine Trends	130
7.1.1	Hochbau: Trends in der Vergangenheit	130
7.1.2	Tiefbau: Trends in der Vergangenheit.....	131
7.1.2.1	Straßen und Wegebau	131
7.1.2.2	Ingenieursbauwerke	133
7.1.2.3	Gleisinfrastruktur	134
7.1.2.4	Wasserstraßen	136
7.1.2.5	Trinkwasserver- und -entsorgungsinfrastruktur	136
7.1.2.6	Kabelinfrastruktur und sonstige Infrastruktur	137
7.2	Anznehmende zukünftige Entwicklung	138
7.2.1	Allgemeine Trends und Datengrundlage für AZE: Hochbau	138
7.2.2	Allgemeine Trends und Datengrundlagen: Tiefbau	142
7.2.2.1	Straßen und Wegebau	143
7.2.2.2	Ingenieursbauwerke	145
7.2.2.3	Gleisinfrastruktur	146
7.2.2.4	Wasserstraßen	146
7.2.2.5	Trinkwasserver- und -entsorgungsinfrastruktur	147
7.2.2.6	Kabelinfrastruktur und sonstige Infrastruktur	148
7.2.3	Überleitung der Daten in URMOD	149
7.3	Technologischer Wandel 2030	150
7.3.1	Senkung der Materialintensität im Hochbau	150
7.3.2	Ersatz von Kupfer in Gebäudeelektroinstallationen	151
7.3.3	Einsparung von Rohstoffen bei der Wärmedämmung	152
7.3.4	Ressourceneffizienterer Beton.....	152
7.3.5	Recycling von Mauersteinen	153
7.3.6	Straßenverkehr: Asphalt-Recycling	153
7.3.7	Überleitung der Daten in URMOD	154
7.4	Weitreichende Tendenz TW30+	155
7.4.1	Senkung der Materialintensität im Hochbau	155
7.4.2	Ersatz von Kupfer in Gebäudeelektroinstallationen	155
7.4.3	Ressourceneffizienter Beton	155
7.4.4	Recycling von Mauersteinen	155
7.4.5	Straßenverkehr: Asphalt-Recycling	155
7.4.6	Überleitung der Daten in URMOD	156
8	Szenariengestaltung Verkehrssektor.....	156

8.1	Status quo 2010 und Trends in der Vergangenheit	157
8.1.1	Personenverkehr	157
8.1.2	Entwicklung Güterverkehr	164
8.1.3	Entwicklung Energieverbrauch.....	165
8.2	Anznehmende zukünftige Entwicklung	166
8.2.1	Auswahl geeigneter Szenarien	166
8.2.2	Annahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 und TREMOD 5.53	167
8.2.2.1	Personenverkehr	168
8.2.2.2	Güterverkehr	169
8.2.3	Entwicklung der Energieeffizienz in Fahrzeugen.....	169
8.2.4	Überleitung der Daten in URMOD	170
8.2.4.1	Verkehrsdiestleistungen	170
8.2.4.2	Fahrzeuge	170
8.3	Technologischer Wandel 2030	171
8.3.1	Pkw-Leichtbau: Herstellung	171
8.3.2	Pkw-Leichtbau: Betrieb	172
8.3.3	Flugzeug-Leichtbau: Betrieb.....	173
8.3.4	Schienengüterverkehr: effizientere Nutzung des Rollmaterials	175
8.3.5	Überleitung der Daten in URMOD	175
8.4	Weitreichende Tendenz TW30+	176
8.4.1	Pkw-Leichtbau: Herstellung	176
8.4.2	Pkw-Leichtbau: Betrieb	176
8.4.3	Flugzeug-Leichtbau: Betrieb.....	176
8.4.4	Schienengüterverkehr: effizientere Nutzung des Rollmaterials	176
8.4.5	Überleitung der Daten in URMOD	177
9	Ergebnisse der Szenarioberechnungen	177
9.1	Überblick über die allgemeinen Entwicklungstendenzen	177
9.2	Ergebnisse: AZE	181
9.2.1	Jahresdurchschnittliche Veränderungen	181
9.2.2	Dekompositionsanalyse	182
9.2.3	Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen	185
9.3	TW30 Szenario	187
9.4	Abschätzung TW30+	189
10	Schlussfolgerungen und offene Fragen	192
10.1	Korridore für Rohstoffeffizienz und mögliche Materialeinsparungen	192
10.1.1	Schlussfolgerungen hinsichtlich des Handlungskorridors.....	192

10.1.2	Schlussfolgerungen mit Blick auf die Annahmen	194
10.1.3	Schlussfolgerungen hinsichtlich der Methodik	195
10.2	Zusammenfassung	196
10.3	Offene Fragen und mögliche weitere Schritte.....	197
11	Quellenverzeichnis.....	200
12	Anhang.....	209

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Z-1:	Grundschema URMOD	25
Abbildung Z-2:	Rohstoffproduktivität in den Szenarien AZE und TW30.....	28
Abbildung Z-3:	Beitrag der Szenarien zur Veränderung des RMC und RMI gegenüber dem Basiswert für 2010.....	29
Abbildung Z-4:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die Veränderung des RMI im Szenario AZE, Veränderung 2030 gegenüber 2010 in Prozent.....	30
Abbildung Z-5:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die zusätzliche Veränderung des RMI im Szenario TW30 gegenüber AZE in 2030 in Prozent des Basiswertes für 2010	31
Abbildung Z-6:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die zusätzliche Veränderung des RMI in der Abschätzung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes für 2010	32
Figure S-1:	Basic structure URMOD	36
Figure S-2:	Raw material productivity according to the scenarios AZE and TW30.....	39
Figure S-3:	Contribution of the scenarios to the change in RMC and RMI compared to the base year 2010.....	40
Figure S-4:	Contribution of the different factors (c.p.) to the change of the RMI in percent, AZE 2030 compared to 2010	41
Figure S-5:	Contribution of the different factors (c.p.) to the additional change of the RMI in 2030 in percent, TW compared to AZE in per cent of value in 2010	42
Figure S-6:	Contribution of the different factors to the additional change of the RMI in 2030 in percent, TW30+ compared to TW in per cent of value in 2010	43
Abbildung 1:	Auswirkung der methodischen Mischung auf die Qualitätssteigerung der abgeschätzten RMEs der Importe	54
Abbildung 2:	Grundschema URMOD	56
Abbildung 3:	Entnahmen, Import- und Exportmassen nach Materialkategorie, 1994 - 2012	63
Abbildung 4:	Entwicklung der Rohstoffproduktivität und der abiotischen Rohstoffentnahmen und Importmassen, 1994 – 2013, indexiert.....	63
Abbildung 5:	RMI von Deutschland nach Rohstoffarten	65
Abbildung 6:	RME nach Gütergruppen aus Produktionssicht, 2010 – Rohstoffdurchsatz in Prozent	66
Abbildung 7:	RME nach Gütergruppen aus Verwendungssicht in Prozent.....	67
Abbildung 8:	Monetäre Ströme nach Gütergruppen aus Verwendungssicht in Prozent.....	68

Abbildung 9:	Rohstoffintensität nach Gütergruppen aus Verwendungsperspektive, 2010	70
Abbildung 10:	RMI von Deutschland nach Kategorien der letzten Verwendung	71
Abbildung 11:	Vergangene Entwicklung des BIP und aktuelle Projektionen.....	93
Abbildung 12:	Rohstoffpreise und -intensität für Metalle und Energieträger der EU, 2000-2012.....	97
Abbildung 13:	Ex- und Importquoten zwischen 1991 und 2015.....	98
Abbildung 14:	Anteil der Im- und Exporte am RMI: 2000, 2005 und 2010.....	99
Abbildung 15:	Entwicklung der Erzgehalte der australischen Minenproduktion	102
Abbildung 16:	Beziehung der Metalle in vergesellschafteten Erzen nach Hauptmetall	103
Abbildung 17:	Primärenergiegewinnung in Deutschland nach Energieträgern in PJ für die Jahre 1990-2010.....	108
Abbildung 18:	Außenhandelssaldo für Deutschland nach Primärenergieträgern in PJ für die Jahre 1990-2010.....	109
Abbildung 19:	Materialbestand der deutschen Kraftwerke in Mio. t und jährlicher Materialinput für Neubau und Instandhaltung in Mio. t/a, für die unterschiedlichen Kraftwerkstypen.....	110
Abbildung 20:	Input von Material zur Energieerzeugung in 2010 in Deutschland, nur Energieträger aus Kohle und Öl , innerdeutsche Gewinnung und Einfuhr nebeneinander in Mio. t/a.....	110
Abbildung 21:	Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ nach Anwendungsgebieten für Deutschland in 2010	112
Abbildung 22:	Anteil Strom am Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ für Deutschland in 2010	112
Abbildung 23:	Bruttostromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Quellen in TWh für die Jahre 1990-2010	114
Abbildung 24:	Stromverbrauch der Sektoren in TWh nach Anwendungsgebieten für Deutschland in 2010	115
Abbildung 25:	Nutzung von Endenergie für Raumwärme nach Energieträgern innerhalb der Sektoren in Deutschland in 2010	116
Abbildung 26:	Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ für Deutschland in 2010 und für das Szenario 2030 AZE	118
Abbildung 27:	Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen: Bruttostromverbrauchs in PJ, Anteil am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 2010 und AZE.119	
Abbildung 28:	Stromnutzung der Sektoren in Deutschland in TWh für die Jahre 2010 und AZE, einschließlich netto exportierter Strommenge (abzüglich Importe)	121
Abbildung 29:	Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in PJ: Raumwärme und Warmwasser für private Haushalte (Wohngebäude) und GHD (Nichtwohngebäude) für 2010 und AZE	122

Abbildung 30:	Marktdiffusion von Elektromotoren in den Industriesektor nach Effizienzklassen	127
Abbildung 31:	Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden, 1993-2013	130
Abbildung 32:	Entwicklung der Straßeninfrastruktur nach vers. Straßenkategorien	132
Abbildung 33:	Verteilung des Errichtungsjahres der Brücken im Bundesfernstraßennetz nach Teilbauwerken in Prozent	133
Abbildung 34:	Länge und Anzahl der Brücken und Tunnel nach Straßenkategorie	134
Abbildung 35:	Entwicklung der Gleislänge nach Stand der Elektrifizierung	135
Abbildung 36:	Alter des Abwasserkanalnetzes bezogen auf 2010	137
Abbildung 37:	Trends im Wohnungssektor, 2005 - 2050	139
Abbildung 38:	Siedlungsflächenentwicklung in der Vergangenheit, Ziel 2020 und angenommene Entwicklung bis 2030	144
Abbildung 39:	Materialeinsatz im Verkehrssektor	156
Abbildung 40:	Fahrzeudichte nach Anzahl und Masse in Deutschland 2010	157
Abbildung 41:	Entwicklung der Verkehrsmittelanteile an der Verkehrsleistung in Deutschland (1950-2010)	158
Abbildung 42:	Motorisierungsgrad Deutschlands im internationalen Vergleich (2010)	159
Abbildung 43:	Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen nach Größe (1960-2010)	160
Abbildung 44:	Vergleich Materialzusammensetzung Pkw-konventionell und Pkw-elektro (gegenwärtig)	162
Abbildung 45:	Energieaufwand für den Schienenbahnbetrieb nach Antriebsart in MJ (1960-2010)	163
Abbildung 46:	Entwicklung der Verkehrsmittelanteile an der Güterverkehrsleistung in Deutschland (1960-2010)	165
Abbildung 47:	Endenergieverbrauch nach Verkehrs- und Energieträger (1960-2010)	166
Abbildung 48:	Vergleich zukünftige Entwicklung der Transportleistung im Personen und Güterverkehr in verschiedenen Szenarien	167
Abbildung 49:	Angenommener Anteil der Pkw mit Leichtbau-Karosserie in CFK-Ausführung an allen Pkw-Neuzulassungen in den Szenarien TW30 und TW30+ in den Jahren 2016 bis 2030	173
Abbildung 50:	Entwicklung des spezifischen Durchschnittsverbrauchs der deutschen Flugzeugflotte	174
Abbildung 51:	Einsparpotenziale bzgl. Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen durch Maßnahmen in verschiedenen Bereichen der Luftfahrt	174

Abbildung 52:	Szenarienergebnisse: Veränderung des RMC und RMI ggü. dem Basiswert für 2010	177
Abbildung 53:	Zeitliche Entwicklung RMI und RMC gemäß Szenario AZE und TW30.....	178
Abbildung 54:	Zeitliche Entwicklung Rohstoffproduktivität gemäß AZE und TW30 Szenario	179
Abbildung 55:	Entwicklung der Rohstoffproduktivität und der Komponenten der Rohstoffproduktivität im Szenario AZE, 1994 - 2030	182
Abbildung 56:	Entwicklung des RMC 2010 bis 2030 nach Rohstoffarten im Szenario AZE - Komponentenzerlegung	184
Abbildung 57:	Entwicklung des RMI 2010 bis 2030 nach Rohstoffarten im Szenario AZE30 - Komponentenzerlegung	185
Abbildung 58:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf den RMC – Veränderung AZE30 gegenüber 2010 in Prozent	186
Abbildung 59:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf den RMI – Veränderung AZE30 gegenüber 2010 in Prozent	187
Abbildung 60:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die Veränderung des RMC – Veränderung TW30 gegenüber AZE30 in Prozent des Basiswertes für 2010	188
Abbildung 61:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMI – Veränderung TW30 gegenüber AZE30 in Prozent des Basiswertes für 2010	189
Abbildung 62:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMC – Veränderung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes in 2010	190
Abbildung 63:	Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMI - Veränderung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes für 2010	191
Abbildung 64:	Gesamtrohstoffproduktivität und BIP/RMI in den Szenarien AZE und TW30.....	193

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die bei der Aufstellung des AZE-Szenarios (2030) berücksichtigen Maßnahmen	58
Tabelle 2:	Überblick über die bei der Aufstellung der TW-Szenarien berücksichtigen Maßnahmen	59
Tabelle 3:	Kumulierter Rohstoffaufwand zur Herstellung von Gütern nach Gütergruppen in 2010	68
Tabelle 4:	Kumulierter Aufwand an erneuerbaren Energien und verwerteten Abfällen zur Herstellung von Gütern, 2010	72
Tabelle 5:	Ergebnisvergleich URMOD und UGR-Modell, 2010: Kumulierter Primärrohstoffaufwand zur Herstellung der Güter der letzten Verwendung und der Importe	73
Tabelle 6:	Vorauswahl der zu untersuchenden Materialien	76
Tabelle 7:	Liste der Rohstoffe mit den größten KRA-Werten und ihr Anteil an der jeweiligen Rohstoffgruppe	77
Tabelle 8:	Relevante Potenziale der Rohstoffeinsparung	77
Tabelle 9:	Sicherheitsbeiwerte für verschiedene Betonsorten nach DIN und wie theoretisch erforderlich.....	79
Tabelle 10:	Für die Wärmeisolierung von Gebäuden verwendete Dämmstärken	81
Tabelle 11:	Inlandsabsatz und KRA der Nährstoffe in Deutschland im Jahr 2010	82
Tabelle 12:	Spezifische KRA-Werte der Bruttostromerzeugung auf Basis verschiedener Energieträger	83
Tabelle 13:	KRA-Reduktionspotentiale verschiedener Szenarien der Stromerzeugung in Deutschland	84
Tabelle 14:	Technische Basisdaten für den Vergleich zwischen Kupfer und Aluminium	85
Tabelle 15:	Spezifische KRA-Reduktionen bei der Verwertung verschiedener Sorten von Kunststoffabfällen aus dem Verpackungs- und Baubereich (in kg/kg)	87
Tabelle 16:	Verwendung von Wirtschaftsdünger und ihr N-Gehalt in Deutschland im Jahr 2010.....	88
Tabelle 17:	Übersicht der ermittelten KRA-Reduktionspotenziale (Δ KRA).....	89
Tabelle 18:	Bevölkerungsentwicklung —Szenario Mittlere Bevölkerung, Obergrenze	92
Tabelle 19:	Stoffliche Verwertung von Abfällen und Verwendung von Umwandlungsfaktoren	101
Tabelle 20:	Nettostromerzeugung in TWh nach Energieträgern in 2010 und im Szenario AZE	120
Tabelle 21:	Energiebereiche mit hohem Rohstoffeinsparpotenzial im Szenario TW30 in Deutschland.....	123

Tabelle 22:	Berechnung der KRA-Werte für die Bruttostromerzeugung in Deutschland in 2010	124
Tabelle 23:	Verteilung der Nettostromerzeugung auf die verschiedenen Energieträger	125
Tabelle 24:	Wirkungsgrade der Kraftwerkstypen.....	125
Tabelle 25:	Spezifische Reduktion der Nachfrage nach fossilen Energieträgern von TW30 gegenüber 2010 mit gleicher Kraftwerkseffizienz und mit höherer Effizienz.....	126
Tabelle 26:	Durchschnittliche Wirkungsgrade in den Effizienzklassen von Elektromotoren.....	127
Tabelle 27:	Technisch ökologisches Potential der erneuerbaren Energieträger	129
Tabelle 28:	Gebäudebestand im Jahr 2010.....	131
Tabelle 29:	Länge und Materiallager Straßen	132
Tabelle 30:	Materialbestand und jährlicher Erneuerungsaufwand in der Schieneninfrastruktur	135
Tabelle 31:	Jährlicher Materialinput in die Wasserinfrastruktur (Ver- und Entsorgung).....	137
Tabelle 32:	Veränderungen im Wohn- und Nichtwohnbereich	140
Tabelle 33:	MFH und E/ZFH 2030, Anteile der Hauptbaustoffe und energetische Standards	141
Tabelle 34:	Relative Änderungen der Materialzusammensetzung im Hochbau 2030 gegenüber 2010.....	142
Tabelle 35:	Materialbedarf im Straßen- und Wegebau und Veränderungen in 2030 ggü. 2010	145
Tabelle 36	Materialbedarf für Ingenieursbauwerke 2030 ggü. 2010	145
Tabelle 37:	Materialaufwand für die Schieneninfrastruktur und Veränderungen 2030 ggü. 2010	146
Tabelle 38:	Materialaufwand für die Wasserinfrastruktur und Veränderungen 2030 ggü. 2010	147
Tabelle 39:	Materialaufwand für die Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur und Veränderungen 2030 gegenüber 2010.....	148
Tabelle 40:	Materialaufwand für die kabelbezogene Infrastruktur und Veränderungen 2030 gegenüber 2010.....	149
Tabelle 41:	Technologien mit Rohstoffeinsparpotenzial im Hochbau für TW2030.....	150
Tabelle 42:	Materialeinsatz (in Mio. t) im Hochbau im Jahr 2010	151
Tabelle 43:	Entwicklung der absoluten und spezifischen Verkehrsleistung in Deutschland (1960-2010)	157
Tabelle 44:	Straßenfahrzeugbestand am 1. Januar 2011 nach Kraftstoffarten ..	161
Tabelle 45:	Entwicklung der absoluten und spezifischen Güterverkehrsleistung im deutschen Binnenlandverkehr (1960-2010)	164

Tabelle 46:	Relevante Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrssektors	166
Tabelle 47:	Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2030 in der „Verkehrsprognose 2030“ in Mrd. pkm	168
Tabelle 48:	Entwicklung der Transportleistung 2010-2030 in der „Verkehrsprognose 2030“ in Mrd. tkm	169
Tabelle 49:	Entwicklung der Energieeffizienz im TREMOD Trendszenario bis 2030 für verschiedene Fahrzeuggruppen.....	169
Tabelle 50:	Verkehrsbereiche mit Rohstoffeinsparpotenzial im Szenario TW30 in Deutschland	171
Tabelle 51:	Kumulierter Rohstoffaufwand nach Rohstoffarten in AZE, TW30 und TW30+	179
Tabelle 52:	Klassifikation der Gütergruppen für URMOD	209
Tabelle 53:	Klassifikation der Kategorien der letzten inländischen Verwendung für URMOD	220
Tabelle 54:	Classification for use tables for physical inputs to the economy by input categories	222
Tabelle 55:	Kumulierter Primärrohstoffaufwand nach Rohstoffarten, 2010, in 1000 Tonnen RME	226
Tabelle 56:	RME nach 41 Kategorien der letzten Verwendung in Mio. Tonnen RME	228
Tabelle 57:	Kumulierter Rohstoffaufwand nach 274 Gütergruppen und Kategorien der letzten Verwendung, 2010	230

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgruppe Energiebilanzen
A-Matrix	Matrix der direkten Güterinputkoeffizienten URMOD
AZE	Anzunehmende zukünftige Entwicklung
BAU	Trend-/Kontinuitätsansatz (Business As Usual)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CIF	Preise inkl. Kost, Versicherung und Fracht (Cost, Insurance and Freight)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Destatis	Statistischen Bundesamtes
DMC	Inländischer Materialkonsum (Domestic Material Consumption)
DMI	Inländischer Materialinput (Domestic Material Input)
DTA	Produktion mit heimischer Technologie (Domestic Technology Assumption)
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
ELIAS	Electricity Investment Analysis (Modell)
EnEv	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
EW-MFA	Ökonomie-weite Materialflussrechnung (Economy wide material flow analysis)
EXP	Exporte
F-Matrix	Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten
GHD	Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GV	Güterverkehr
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IMP	Importe
IOT	Input-Output-Tabelle
Kfz	Kraftfahrzeug (Straße)
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis)
Lkw	Lastkraftwagen
LV	Letzte Verwendung
MFH	Mehrfamilienhaus
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mt	Megatonne

ÖV	Öffentlicher Verkehr
PH-Standard	Passivhaus Standard
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PowerFlex	Kraftwerkseinsatzmodell
ProgRess	Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen
PV	Personenverkehr
RME	Rohstoffäquivalent (Raw Material Equivalent)
RMI	Primärrohstoffeinsatz (Raw Material Input)
RMC	Inländische Primärrohstoffnutzung (Raw Material Consumption)
TW30	Szenario Technologischer Wandel 2030
TW30+	Abschätzung Technologischer Wandel 2030 +
SEEA	System der Umweltgesamtrechnungen (System of Environmentally Extended Accounts)
SNA	System der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (System of National Accounts)
Tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transportemissionsmodell (Transport Emission Model)
UGR	Umweltgesamtrechnungen
URMOD	Umweltökonomisches Rohstoffmodell
VIG	Vakuumisolationsverglasungen
VIP	Vakuumisolationspaneele
Y-Matrix	Endnachfragematrix URMOD

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel

Die Menschheit benötigt natürliche Ressourcen zum Leben. Würden jedoch alle Menschen auf der Erde im Durchschnitt die Menge Ressourcen in Anspruch nehmen, die Menschen gegenwärtig in Industrieländern wie Deutschland nutzen, wären die wirtschaftlichen Implikationen und die Auswirkungen auf die Umwelt unvorstellbar. Vor diesem Hintergrund hat der Ansatz, Ressourceneffizienz gezielt zu fördern, an Bedeutung gewonnen. Die Bundesregierung hat das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) in 2012 und die Fortentwicklung ProgRess II im März 2016 verabschiedet [BMUB, 2016]. Das deutsche Ressourceneffizienzprogramm formuliert als eines der ersten nationalen Programme weltweit ein konkretes Ziel für die Rohstoffeffizienz auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. So nennt ProgRess die Verdopplung der gesamtwirtschaftlichen Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994, gemessen als Bruttoinlandsprodukt pro abiotischen Materialinput (DMI_{abiot}). ProgRess II nennt zusätzlich die Trendfortschreibung der Gesamtrohstoffproduktivität bis 2030, gemessen als BIP plus Importe pro Einheit Primärrohstofffeinsatz ($RMI_{abiot+biot}$), der die heimische Rohstoffextraktion und die Importe, gemessen in Rohstoffäquivalenten, umfasst.

Seit 1994 konnte ein überwiegend kontinuierlicher Anstieg der Rohstoffproduktivität in Deutschland um insgesamt +48,8 % gemessen werden. Der Anstieg geht auf eine Vielzahl von Faktoren zurück, darunter die Reduktion der Nutzung von Braunkohle zur Energiegewinnung, der gesteigerte Fertigungsgrad der Importe, Effekte der Wiedervereinigung aber auch allgemeine Bestrebungen von Unternehmen, effizienter zu wirtschaften. Der Indikator Rohstoffproduktivität beinhaltet jedoch eine Asymmetrie, denn er bemisst Importe in ihrem Eigengewicht. Wenn rohstoffintensive Vorleistungen ins Ausland verlagert werden, zeigt der Indikator fälschlicherweise eine Erhöhung der Rohstoffproduktivität an. Diese Asymmetrie wird durch die Einbeziehung der Rohstoffäquivalente der Importe im Indikator Gesamtrohstoffproduktivität überkommen. Jedoch existieren bislang keine Trajektorien, wie sich dieser Indikator zukünftig entwickeln könnte. Darüber hinaus sind die Auswirkungen von anstehenden großen Veränderungen, wie dem demographischen Wandel oder der Umsetzung der Energiewende, auf den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf bislang kaum abschätzbar. Noch weniger sind konkrete Beiträge von Technologien oder Maßnahmenbündeln auf die gesamtwirtschaftlichen Einsparungen von Primärrohstoffen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit anderen Wirtschaftssektoren bekannt.

Vor diesem Hintergrund ist es von Interesse, Methoden zu entwickeln, um den zukünftigen Rohstoffbedarf so differenziert wie möglich abzuschätzen. Prognosen zum gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf können nicht nur die Politik bei konkreten Zielformulierungen im Bereich der Ressourceneffizienz unterstützen, sondern auch die Auswirkungen von politischen Strategien und Technologieförderungen auf den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf aufzeigen. Hier setzt das im Folgenden beschriebene Forschungsprojekt an.

Das Projekt „Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess)“ hat zum Ziel, die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Dematerialisierungspolitik in Deutschland zu untersuchen und dabei existierende Pfadabhängigkeiten, Trajektorien und Schranken zu berücksichtigen. Lebensstiländerungen oder drastische Eingriffe in das Konsumverhalten werden nicht einbezogen. Im Ergebnis soll ein Handlungskorridor erkennbar werden, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Material- und Rohstoffpolitik in Deutschland aufzeigt.

Zur Lösung der Aufgabe wurde im Rahmen des Projekts eine adäquate Methode entwickelt, mit der auf gesamtwirtschaftlicher Ebene sowohl die Auswirkungen von Pfadabhängigkeiten als auch von Technologieänderungen auf den zukünftigen deutschen Rohstoffbedarf abgeschätzt werden können. Um die

effektiven Rohstoffeinsparungen zu bewerten und nicht nur die realisierten Materialeinsparungen innerhalb der eigenen Landesgrenzen aufzuzeigen, wurde in diesem Projekt die Rohstoffnutzung in Rohstoffäquivalenten (RME) gerechnet. Das im Rahmen des Projekts entwickelte Umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD) baut auf Methoden, Daten und Prozeduren der umweltökonomischen Gesamtrechnung auf. Damit ist gewährleistet, dass sowohl die Situationsanalyse als auch die prognostizierten Rohstoffeinsparstrategien im Einklang mit den real erhobenen Daten der Materialströme in Deutschland stehen.

Der Handlungskorridor, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Rohstoffpolitik beschreibt, wurde mit Hilfe von Szenarien ausgelotet. Der Fokus der Szenarien liegt auf Entwicklungen in den materialintensiven Sektoren Energie, Verkehr und Bau. Das Prognosejahr ist 2030. Das Basisszenario beschreibt den Rohstoffbedarf, der sich aus bekannten bzw. gesetzten allgemeinen Entwicklungen und zusätzlich aus bereits beschlossenen Politiken und Maßnahmen, auch wenn sie erst in der Zukunft umgesetzt werden, ergeben. Das Basisszenario ist damit kein gewöhnliches „Business As Usual (BAU)“-Szenario, das gegenwärtige Trends nur forschreibt, sondern es geht bereits darüber hinaus. In Abgrenzung zu BAU-Szenarien wird das Basisszenario daher „Anzunehmende zukünftige Entwicklung (AZE)“ genannt. Das zweite Szenario namens „Technischer Wandel (TW30)“ bezieht zusätzliche Änderungen durch eine Vielzahl von innovativen Technologien ein, die berechenbare Auswirkungen auf den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf haben. Es beschreibt damit einen theoretischen, technisch ambitionierten Entwicklungspfad der deutschen Volkswirtschaft, der auf eine gezielte Verringerung des Rohstoffeinsatzes abstellt. Während das Szenario AZE die obere Grenze der anzunehmenden deutschen Rohstoffbedarfe abschätzt, beschreibt das Szenario TW30 die untere Grenze. Die Abschätzung „TW30+“ zeigt zusätzlich das theoretische Gesamtpotenzial der technischen Änderungen, wenn diese den Markt weitgehender oder vollständig durchdringen würden (mit Blick auf 2050).

Die methodische Grundlage: URMOD

Die wesentliche Anforderung an die Methodik bestand darin, dass die Im- und Exporte in Rohstoffäquivalenten erfasst werden. Dies ist erforderlich, um den in ProgRess II genannten neuen Rohstoffindikator Gesamtrohstoffproduktivität ($BIP + \text{Importe} / RMI$) ermitteln zu können. Der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität behebt eine Asymmetrie des Indikators Rohstoffproduktivität (BIP/DMI), die dadurch zustande kommt, dass die Importe nur mit ihrem Eigengewicht in den Indikator eingehen.

Im Umweltökonomischen Rohstoffmodell (URMOD) werden Angaben über den Rohstoffinput in die Ökonomie mit den wirtschaftlichen Produktions- und Konsumaktivitäten verknüpft. Grundlage ist eine gesamtwirtschaftliche Input-Output-Tabelle (IOT), welche alle Produktionsketten in einer Volkswirtschaft und ihre Querbeziehungen einbezieht. Die für URMOD entwickelte IOT für das Basisjahr 2010 hat eine Gliederungstiefe von 274x274 Gütergruppen und 41 Kategorien der letzten Verwendung.

Den Rahmen bilden die Angaben der von Destatis veröffentlichten IOT nach 72 Gütergruppen. Die Rohstoffextraktion, die primäre Verarbeitung von Rohstoffen (insbesondere im Bereich der Metalle und mineralischen Baustoffe) und die Stromerzeugung sowie materialintensive Aktivitäten (im Bereich Bau, Verkehr, Stromerzeugung und Kreislaufwirtschaft) wurden in der URMOD-IOT weiter disaggregiert. Hauptdatenquelle für die Disaggregation der URMOD-IOT sind die nach rund 2.600 Gütergruppen untergliederten Aufkommens- und Verwendungstabellen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) des Statistischen Bundesamtes. Daneben wurden für die Aufstellung des Modells zahlreiche weitere Quellen, wie z.B. eine tief gegliederte landwirtschaftliche Input-Output Tabelle (46 Produktionsprozesse) sowie Sektorstudien (Energiemarkt, Bauwirtschaft und Verkehr) genutzt.

Das technische Verfahren zur Zuordnung von Rohstoffen zu Gütern folgt dem sogenannten Leontief-Ansatz der Input-Output-Analyse. Mit diesem auf einer Abfolge von Matrizenoperationen beruhenden Verfahren werden die Primärinputs (in diesem Fall die Primärrohstoffe) in einer Volkswirtschaft den Gütern der letzten Verwendung und den Importgütern zugerechnet.

Der Primärrohstoffeinsatz (Raw Material Input, RMI) und die inländische Primärrohstoffnutzung (Raw Material Consumption, RMC) sind die beiden zentralen Rohstoffindikatoren, die mit Hilfe dieses Modells abgeleitet werden. Der RMI umfasst die biotischen und abiotischen Materialextraktionen in Deutschland und die Importe, die nicht nur mit ihrem Eigengewicht sondern mit den gesamten damit zusammenhängenden Primärrohstoffeinsätzen, sogenannte Rohstoffäquivalente, berücksichtigt werden. Der RMC verrechnet ferner auch die Exporte, wiederum gerechnet in Rohstoffäquivalenten. Durch die Verrechnung der international gehandelten Güter in Rohstoffäquivalenten werden Verlagerungen von rohstoffintensiven Verarbeitungsprozessen ins Ausland von den Indikatoren RMI und RMC nicht fälschlicherweise als Verbesserung der Rohstoffproduktivität angezeigt.

Die Angaben zur inländischen Entnahme von Rohstoffen beruhen weitgehend auf den Ergebnissen der Materialflussrechnungen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) des Statistischen Bundesamtes. Der Rohstoffgliederung liegt die Klassifikation der Liefertabelle für Eurostat (EW-MFA, Domestic Extraction) zugrunde. Die originären Angaben werden partiell durch zusätzliche Information erweitert und abgewandelt, z.B. tiefere Disaggregation nach Rohstoffarten.

Die Ermittlung der Rohstoffäquivalente der Importe beruht auf einem Drei -Regionen-Modell, das konzipiert wurde, um bei der Schätzung der Rohstoffäquivalente der importierten Güter unterschiedliche und ergebnisrelevante Produktionstechnologien von Herkunftsländern zu berücksichtigen. Nach dem Drei -Regionen-Modell werden die Regionen Deutschland, 27 EU-Länder und Nicht EU-Länder (einschließlich zusätzlicher regionaler Unterscheidungen) unterschieden.

Zur Ermittlung des Rohstoffgehalts der deutschen Importe aus Nicht EU-Ländern wird die Koeffizienten-Matrix für EU-Importe aus dem Eurostat RME-Modell für die EU herangezogen. Die Nutzung der EU Importkoeffizienten für die Schätzung der RME der deutschen Importe hat den Vorteil, dass wichtige länderspezifische Informationen der Importregion „Nicht-EU Länder“ in die Berechnung eingehen. Die Importkoeffizienten des EU-Modells werden auf der Grundlage eines zweistufigen Ansatzes ermittelt. In einem ersten Schritt wurde zunächst für alle Importe die inländische Produktionstechnologie unterstellt. Da aber die Produktionstechnologie der Lieferländer für die Importe von den EU Verhältnissen abweichen kann, wurde die ursprüngliche Schätzung in einer nächsten Stufe im Rahmen eines partiellen multi-regionalen Modells weitgehend ersetzt durch besonders relevante länderspezifische Informationen. Dies betrifft beispielsweise spezifische Erzgehalte, Anteile von Sekundärmetallen der direkten und indirekten Metallimporte sowie Gehalte der direkten und indirekten Stromimporte (Strommix) an fossilen Energieträgern. Ein wichtiges Instrument in dem Modell ist auch die Verwendung von physischen Verwendungsstrukturen, die es erlauben den Rohstoffgehalt der meisten direkt importierten Rohstoffe (insbesondere Öl und Gas) zuverlässig zu schätzen.

Bei der Schätzung des Rohstoffgehalts der deutschen Importe aus EU-Ländern wird ähnlich vorgegangen wie bei den Importen aus den Nicht-EU Ländern. Grundsätzlich liegen der Schätzung einer ersten Stufe die durchschnittlichen Rohstoffkoeffizienten für die EU zugrunde. Die Produktionstechnologie der einzelnen EU-Lieferländer weicht aber für viele Mitgliedsländern insbesondere bei der Stromerzeugung (Strommix) und dem Sekundärmetallanteil bei der Erzeugung der einzelnen Metalle signifikant vom EU-Durschnitt ab. Deshalb wurde in einer weiteren Stufe auch für die Euro-Region ein partielles multi-regionales Modell entwickelt, das auf länderspezifischen Informationen für 27 EU-Länder bezüglich der Faktoren Strommix und Sekundärmetalleinteil beruht. Mit dieser Differenzierung wird erreicht, dass die vermutlich bedeutsamsten Unterschiede der Produktionstechnologie innerhalb der EU berücksichtigt werden.

Es ist somit zu betonen, dass die Berechnungen für die beiden Regionen Nicht-EU Länder und EU Länder jeweils durch weitere spezifische Informationen zur Produktionstechnologie in den Lieferländern der Importe hinterlegt sind.

Das Szenario Modell von URMOD wird in der Abbildung Z-1 erläutert. Das Schaubild zeigt zunächst im oberen Teil den Ablauf des Leontief-Verfahrens als eine Abfolge bestimmter Matrizenoperationen.

Daran anknüpfend wird im unteren Teil der Abbildung das modelltechnische Grundschema für die Szenarioberechnung mit Hilfe von Parametervariationen dargestellt. Durch einen komparativ-statischen Ansatz können mit Hilfe der Parametervariation in transparenter Weise unterschiedliche Systemzustände (Szenarien) simuliert werden.

Die Abbildung zeigt, wie das Basismodell und das Szenario-Modell über folgende Parametertypen miteinander verknüpft sind (rote Pfeile):

- ▶ Endnachfragematrix (Konsum, Investitionen und Exporte), Y Matrix
- ▶ Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten, F Matrix
- ▶ Matrix der direkten Güterinputkoeffizienten, A Matrix

Die variierten Parameter Endnachfrage, Rohstoffinput und Güterinput werden folglich exogen ermittelt. Die übrigen Variablen des Szenario-Modells werden dagegen endogen bestimmt. Rechentechnisch erlaubt das Modell damit die Ableitung von Ergebnissen für einzelne Maßnahmen und Maßnahmenbündel durch multiplikative Verknüpfung der einbezogenen Parametervariationen.

Als Basisjahr wurde 2010 gewählt, das strukturell weniger untypische Ausschläge zeigte als die Jahre 2008 und 2009 und zum Projektbeginn das aktuellste angesichts der benötigten Daten war. Daten, die auf frühere Jahre zurückgehen, wurden von Destatis übernommen.

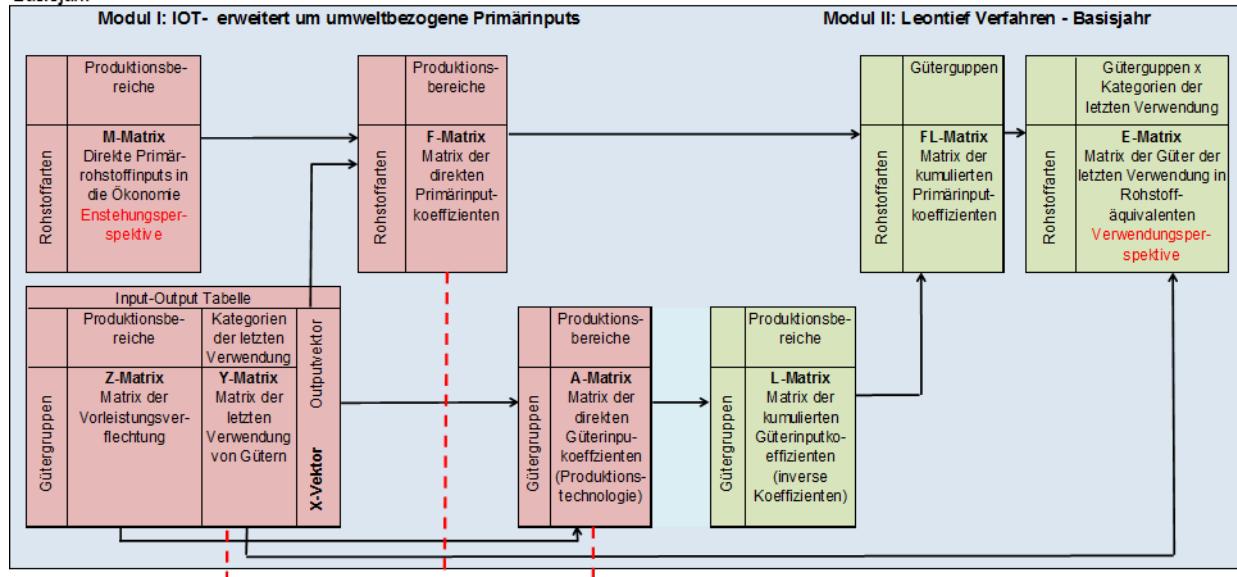
Das Basismodell liefert für das Basisjahr 2010 eine vollständige, konsistente und empirisch fundierte Beschreibung der Güter- und Rohstoffströme in der Volkswirtschaft auf der Grundlage einer relativ hoch aufgelösten IOT. Durch Parametervariationen werden neue Systemzustände simuliert. Die logische Kohärenz des Modells bleibt auch nach Parametervariation voll erhalten. Somit verkörpern die abgeleiteten Systemzustände jeweils konsistente Systembeschreibungen.

Abbildung Z-1: Grundschema URMOD

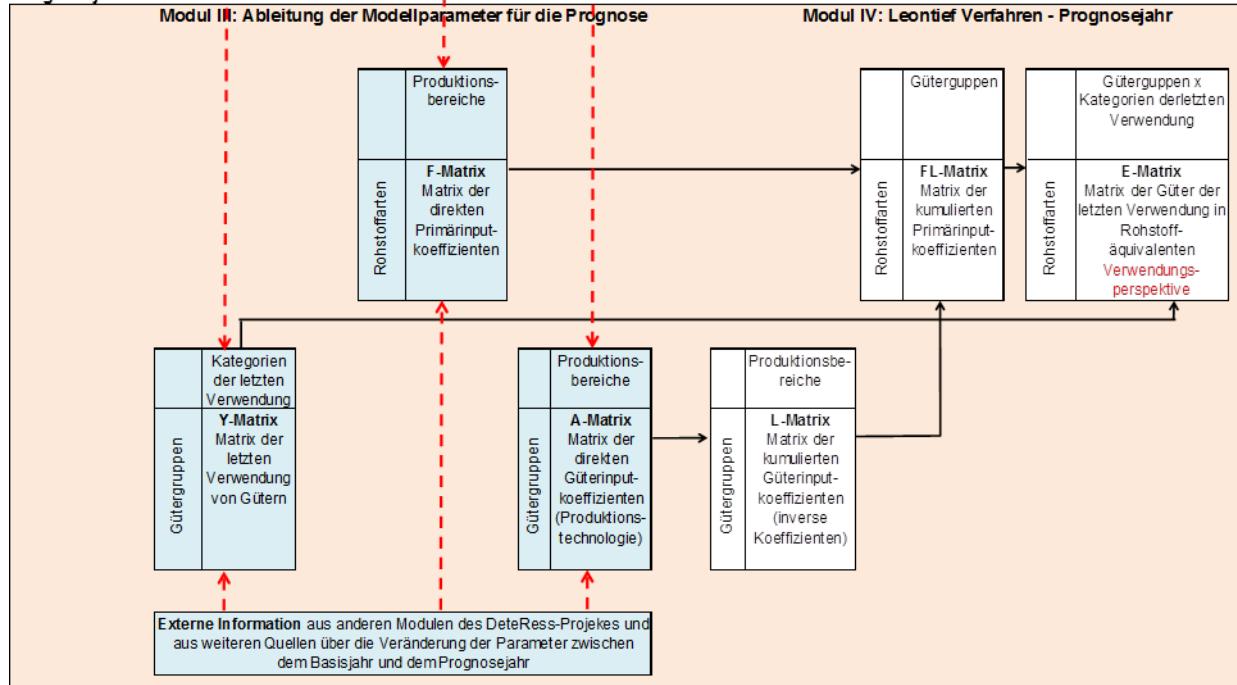
Grundschema Szenario Modell für URMOD

Umweltökonomisches Input-Output Modell zur Schätzung von Primärrohstoffäquivalenten

Basisjahr



Prognosejahr



Quelle: URMOD.

Die Szenarien AZE und TW30 sowie die Abschätzung TW30+

Der Handlungskorridor, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Rohstoffpolitik aufzeigen soll, wurde mittels der beiden Szenarien „Anzunehmende zukünftige Entwicklung (AZE)“ und „Technologischer Wandel (TW30)“ mit 2030 als Prognosejahr untersucht. Die beiden Szenarien beschreiben jeweils die untere und die obere Grenze des Handlungskorridors. Die zusätzliche Abschätzung „Technologischer Wandel Plus“ (TW30+) geht von einer stärkeren Marktdurchdringung der Technologien in TW30 aus und stellt damit eine Einschätzung des maximalen Potenzials der Technologien dar.

Für die Entwicklung der allgemeinen Rahmenbedingungen, die allen Szenarien zugrunde liegen, wurden folgende, wesentliche Annahmen getroffen:

- ▶ **Bevölkerung:** Es wurde die 12. Koordinierte Bevölkerungsvorausschau, mittlere obere Variante, zu Grunde gelegt [Destatis, 2009]. Demnach sinkt die Bevölkerung bis 2030 auf 79 Mio. Menschen gegenüber 81,8 Mio. in 2010.
- ▶ **Wirtschaftswachstum:** Es wurde in Anlehnung an die Wachstumsprognose, die das BMUB für die Energieverbräuche (siehe Energiesektor) angenommen hat, ein Wachstum von 1,2 % p.a. unterstellt. Der hier angenommene konstante Wert ist eine Vereinfachung der für einzelne Jahresabschnitte variablen Werte der BMUB-Studie.
- ▶ **Technische Entwicklung:** In allen Sektoren, außer den untersuchten Sektoren Energie, Verkehr und Bau, wurde unterstellt, dass die Inputintensität bei der inländischen Produktion in Anlehnung an die Vergangenheitsentwicklung sinkt. Dabei wurden niedrigere Werte im Szenario AZE (1 % p.a.) und höhere im Szenario TW30 (1,2 % p.a.) unterstellt. Die Rohstoffintensität der Importe vermindert sich, in Anlehnung an die Vergangenheitsentwicklung in der EU, um 0,9 % p.a.
- ▶ **Internationaler Handel:** Es wurde unterstellt, dass die Außenhandelsverflechtung weiter zunimmt (fortschreitende Intensivierung der internationalen Arbeitsteilung), wenn auch mit geringerem Tempo als es in der Vergangenheit zu beobachten war.
- ▶ **Rohstoffverfügbarkeit:** Es wurde unterstellt, dass weder inländisch noch weltweit Rohstoffknappheiten auftreten. Weiterhin wurde auf Grund der schweren Prognostizierbarkeit und der geringen Verfügbarkeit belastbarer Daten davon ausgegangen, dass sich die Metallkonzentration in den Erzen nicht ändert.
- ▶ **Stoffliche Verwertung:** Es wurden die quantitativ bedeutsamen Recyclingmaterialien Holz, Papier, Plastik, Metall (Eisen/Stahl, Kupfer, Aluminium) und mineralische Baurohstoffe berücksichtigt. Es wurden plausible Primärmaterialsubstitutionen mit entsprechenden Substitutionsfaktoren angenommen.

Die wesentlichen Annahmen zur **Stromerzeugung und zum Wärmebereich** in AZE (basierend auf dem Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525/2013/EU 2015 des BMUB) sind folgende:

- ▶ Die Entwicklung bezieht alle bis zum 31.8.2014 eingeführten oder geänderten klima- und energiepolitischen Maßnahmen ein.
- ▶ Nettostromerzeugung, Anteil 2010 auf Anteil 2030:
 - ▶ Gesamterzeugung: - 4 %
 - ▶ Anteil nicht erneuerbare Energien: von 86 % auf 41 % mit Kernenergie von 22 % auf 0 %, Kohle: Steinkohle von 18 % auf 11 %; Braunkohle von 23 % auf 21 % und Erdgas: von 15 % auf 7 %
 - ▶ Anteil Erneuerbare Energien: 14 % auf 59 % mit Onshore Wind von 6 % auf 28 %, Offshore Wind von 0 % auf 10 %, Photovoltaik von 2 % auf 10 % und Biomasse von 5 % auf 6 %
 - ▶ Exporte: Zunahme von 3 % auf 7 %
- ▶ Endenergiebedarf Wärmebereitstellung, Änderung von 2010-2030:
 - ▶ Nichtwohngebäude Gewerbe/Handel/Dienstleistungen: - 24 %
 - ▶ Private Wohngebäude: - 12 %

Die wesentlichen Annahmen im **Hoch- und Tiefbau** in AZE (basierend u.a. auf Deilmann et al. [2014a], Knappe et al. [n.d.] und Bergmann et al. [2015]) sind folgende:

- ▶ Die sinkende Anzahl von Personen pro Haushalt und der damit verbundene steigende Bedarf von Wohnraum pro Person führen trotz rückläufiger Bevölkerung zu steigenden Neubauaktivitäten im Wohnungsbau.

- ▶ Die Neubautätigkeiten im Nicht-Wohnungsbau sind rückläufig.
- ▶ Die Flächenneuversiegung sinkt auf 30 ha / Tag in 2030; die Bauaktivitäten finden verstärkt in bereits erschlossenen Gebieten statt.
- ▶ Der Neubau der kommunalen Infrastruktur nimmt zwischen 2010 und 2030 linear ab. Materialinputs für Sanierung, Erhalt und Ertüchtigung werden basierend auf den Bestandsdaten über die Lebensdauer abgeschätzt.
- ▶ Der Neubau von übergeordneten Infrastrukturen wurde aus Planungswerken des Bundes bzw. zuständigen Institutionen abgeleitet, darunter insbesondere aus dem Bundesverkehrswegeplan.

Die wesentlichen Annahmen im **Verkehrssektor** im Szenario AZE basieren überwiegend auf [Intraplan, 2014] und [ifeu, 2014a] und sind folgende (Veränderung 2030 ggü. 2010):

- ▶ Entwicklung der Verkehrsleistung: Personenverkehr Eisenbahn: + 21 %, Straßenpersonenverkehr: + 9.9 %, Öffentlicher Nahverkehr: + 6 %, Flugverkehr: + 64,8 %, Güterverkehr Schiene: + 42.9 %, Güterverkehr Straße: + 38.9 %, Güterverkehr Schiff: + 22.8 %
- ▶ Entwicklung der Fahrzeugflotten: Pkw-alle: + 10 %, Busse: + 13 %, schwere Nutzfahrzeuge: + 6 %, leichte Nutzfahrzeuge: + 5 %
- ▶ Entwicklung der Elektromobilität: bis 2020 500.000 Elektrofahrzeuge, bis 2030 3 Mio. Elektrofahrzeuge. Bis zum Jahr 2030 haben Fahrzeuge mit externer Stromversorgung (BEV und PHEV) einen Anteil von 19 % an den Neuzulassungen. Der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselantrieb geht auf 52% zurück; die restlichen Fahrzeuge sind im wesentlichen Hybride (HEV).
- ▶ Entwicklung der Energieeffizienz (Energieeinsatz pro Verkehrsdiensleistung): Schienenfernverkehr: - 29 %, Personenstraßenverkehr: - 24 %, Öffentlicher Nahverkehr: - 26.1 %, Flugverkehr: - 21 %, Schienengüterverkehr: - 22 %, Straßengüterverkehr: - 21 %, Binnenschifffahrt: - 14 %

Aufbauend auf den Annahmen im Szenario AZE werden im Szenario Technischer Wandel zusätzliche technologische Veränderungen angenommen. Die Abschätzung TW30+ unterstellt für die betrachteten Technologien eine weitgehendere Marktdurchdringung.

Die untersuchten Technologien im **Energiebereich** sind:

- ▶ Strommix: Substitutionsprozesse zwischen Energieträgern und Erhöhung von Wirkungsgraden bei der Stromerzeugung
- ▶ Elektromotoren: zunehmender Einsatz von effizienteren Elektromotoren
- ▶ Dampfkessel: zunehmender Einsatz von effizienteren Dampferzeugern

Die untersuchten Technologien im **Baubereich** sind:

- ▶ Alternative Zemente: Substitution von Portlandzement durch innovative Zementarten am Beispiel Celitement
- ▶ Materialeffizienz im Hochbau: mehrere Einflussfaktoren wie ein verminderter Betoneinsatz durch bessere Planung/Technik und ein höherer Anteil von Holzhäusern
- ▶ Recycling von Baumaterialien: verstärktes Recycling von Kalksandsteinen und von Leichtbetonsteinen
- ▶ Kabelleitungen: Substitution von Kupferkabeln im Hochbau durch Aluminiumkabel
- ▶ Recycling von Straßenbaumaterialien: verstärktes Recycling von Asphalt

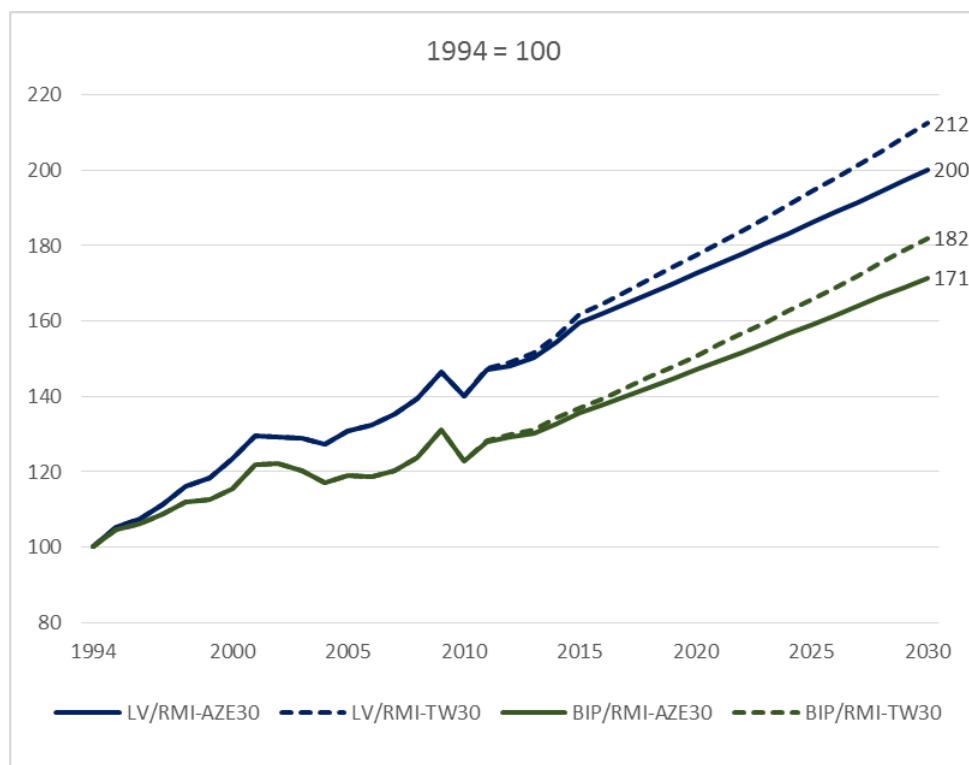
Die untersuchten Technologien im **Verkehrsbereich** sind:

- ▶ PKW, Leichtbau: Substitution von Stahl- durch CFK-Karosserien bei der Herstellung von PKW und resultierende Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch
- ▶ Luftfahrzeuge Leichtbau: Auswirkungen eines verstärkten Leichtbaus bei Luftfahrzeugen auf den Kraftstoffverbrauch
- ▶ Effizienz Schienengüterverkehr: effizientere Nutzung von Rollmaterial für den Eisenbahngüterverkehr

Ergebnisse der Szenarienberechnungen

Die Ergebnisse des Szenarios AZE zeigen, dass die Gesamtrohstoffproduktivität in den Jahren 2010 bis 2030 um durchschnittlich 1,8 % jährlich ansteigen wird (vgl. Abbildung Z-2). Dieser Anstieg ist höher als der durchschnittliche Anstieg von 1,3 %, der zwischen 2000 und 2010 beobachtet werden konnte. Bis 2030 verdoppelt sich demnach die Gesamtrohstoffproduktivität verglichen mit 1994 (+ 100 %). Unter technologisch optimistischeren Annahmen (TW30) steigt die Gesamtrohstoffproduktivität zusätzlich um 12 % gegenüber 1994 um insgesamt + 112 %).

Abbildung Z-2: Rohstoffproduktivität in den Szenarien AZE und TW30



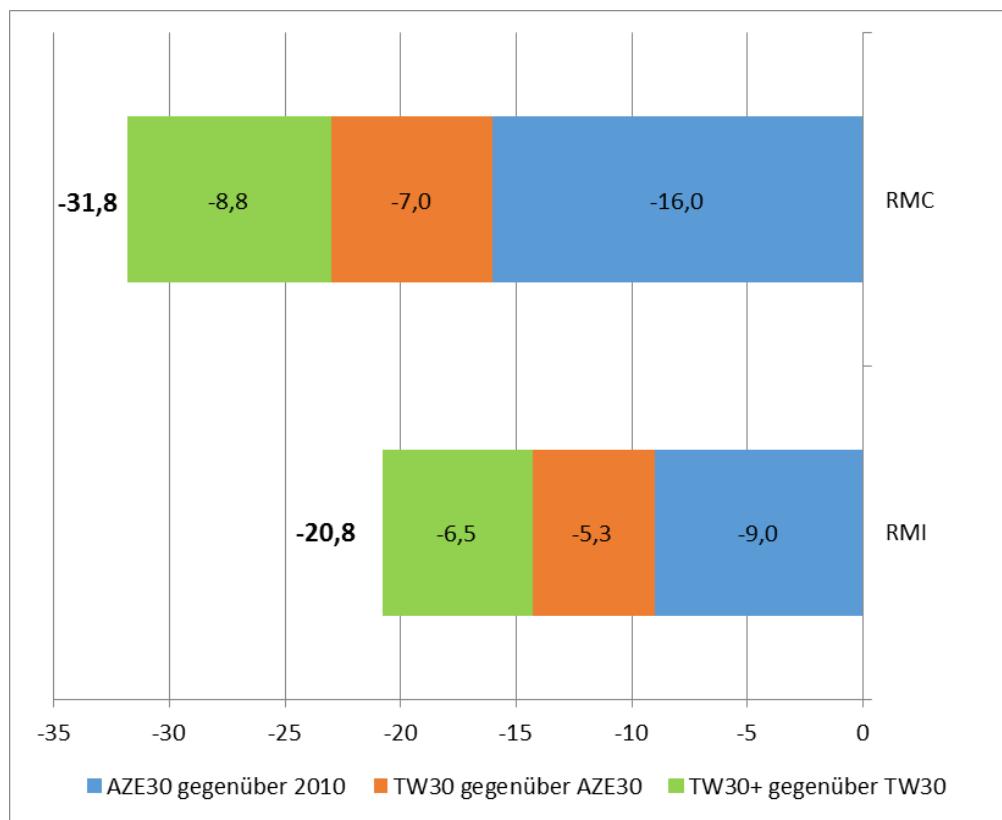
Quelle: URMOD für 2010 und 2030 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994 – 2010 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA). Ab 2011 lineare Interpolation.

Demgegenüber entwickelt sich die gesamtwirtschaftliche Produktivität, gemessen am BIP pro RMI, schwächer: Sie wird sich zwischen 1994 und 2030 im Trend (AZE-Szenario) um +71 % und unter technologisch optimistischeren Annahmen (TW-Szenario) um 82 % erhöhen.

Die Änderungen der gesamtwirtschaftlichen Produktivitätsabschätzungen sind auf den Rückgang der Primärrohstofffinanzspruchnahme in den Szenarien AZE, TW30 und TW30+ zurückzuführen. So sinken sowohl der RMI als auch der RMC. Die nachfolgende Abbildung Z-3 zeigt die jeweilige Veränderung gegenüber den Basiswerten von 2010. Bezogen auf den RMC führt der Gesamteffekt der drei berücksichtigten Szenarien zu einem Rückgang von - 31,8 %. Der Beitrag des Trendszenarios (AZE) beläuft sich auf - 16,0 %. Die Beiträge der in TW30 unterstellten Änderungen (- 7,0 %) und die in TW30+ unterstellten Änderungen (- 8,8 %) sind zusammen (- 15,8 %) annähernd gleich hoch.

Beim RMI ist im Vergleich zum RMC der Rohstoffaufwand zur Herstellung der Exportgüter eingeschlossen. Zugleich steigen die Exporte im betrachteten Zeitraum überproportional. Daher fällt der relative Rückgang des RMI im Vergleich zum RMC in allen Szenario-Varianten schwächer aus. Der Gesamteffekt aller drei Szenarien zum RMI beläuft sich auf - 20.8 %. Die Beiträge der einzelnen Szenarien sind ähnlich wie beim RMC.

Abbildung Z-3: Beitrag der Szenarien zur Veränderung des RMC und RMI gegenüber dem Basiswert für 2010



Quelle: URMOD.

Der zu erwartende Rückgang der Rohstofffinanspruchnahme umfasst im Trendszenario AZE bereits rund 50 % der über alle drei Szenarien betrachteten Reduktionspotenziale. Das Trendszenario wurde in diesem Projekt nicht wie ein Business-As-Usual-Szenario angelegt, in dem vergangene Trends fortgeschrieben wurden, sondern es wurde eine Vielzahl von bereits beschlossenen Politiken und Maßnahmen in dieses Szenario integriert. Insbesondere die vielfältigen Maßnahmen, die mit der Energiewende zusammenhängen und bereits im Szenario AZE integriert sind, haben erhebliche Auswirkungen auf die Inanspruchnahme von fossilen Brennstoffen. Darüber hinaus hat die in AZE übernommene Annahme, dass auf kommunaler Ebene die Flächenneuversiegelung weiter rückläufig ist, erhebliche Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf für die Neuinstallation der kommunalen Infrastruktur. Somit tragen bereits die Energiewende und die rückläufige Flächenneuversiegelung entscheidend zu den in AZE beobachtbaren Rückgängen der Primärrohstofffinanspruchnahme bei.

Das Szenario TW30 und die Abschätzung TW30+ zeigen, dass mithilfe von innovativen Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung die Primärrohstofffinanspruchnahme in Deutschland weiter gemindert werden könnte. Während die untersuchten Einzeltechnologien im Bereich Substitution (über die Substitution der fossilen Brennstoffe hinausgehend) und Materialeffizienzsteigerung jeweils überwiegend kleine Beiträge zur Primärrohstoffeinsparung aufweisen, zeigen die untersuchten Ansätze zur Erhöhung des Recyclings größere Minderungspotenziale. So trägt im Szenario TW30 beispielsweise

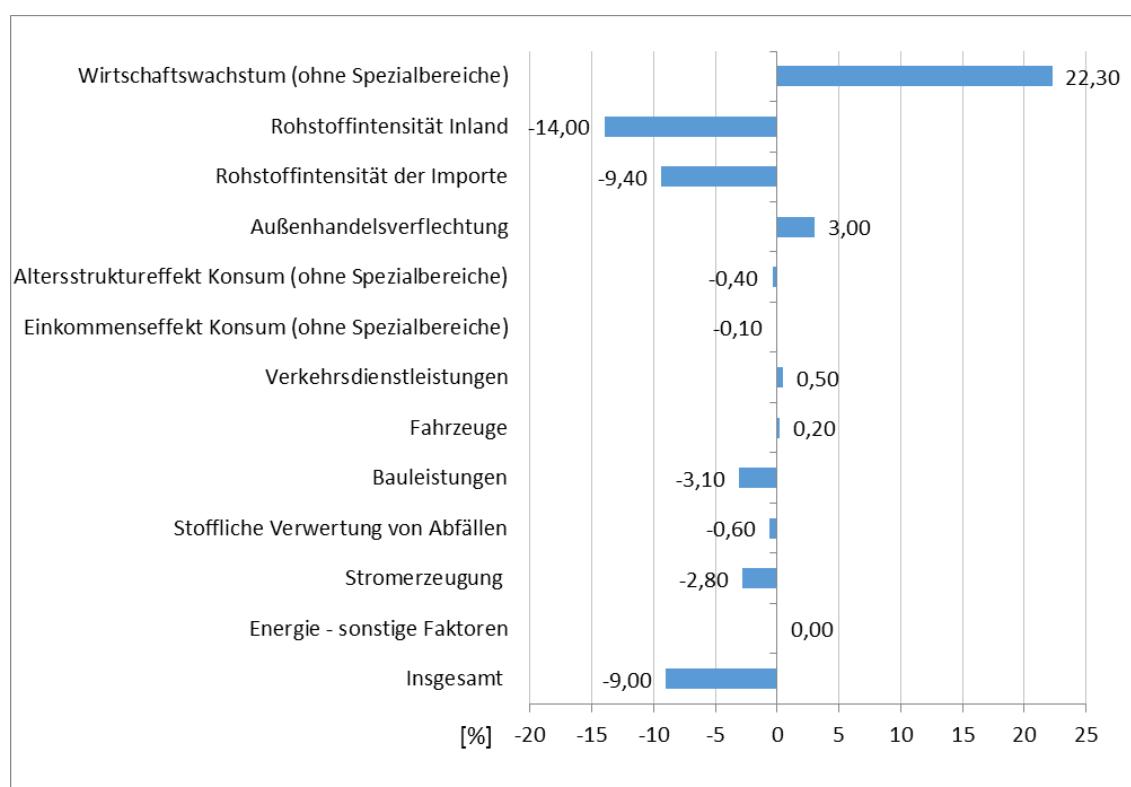
der PKW Leichtbau in Herstellung und Betrieb 0,03 % und 0,04 % zur Minderung des RMI bei, während ein Recycling von Kalksandstein einen Beitrag von 0,20 % aufweist. Insbesondere die Recyclingansätze bei Baustoffen haben insgesamt signifikante Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Rohstofffinanzspruchnahme. Angesichts der gegenwärtig hohen Materialinanspruchnahme in Deutschland mit den großen Anteilen von fossilen Energieträgern und mineralischen Baustoffen ist verständlich, dass auch in diesen beiden Rohstoffgruppen die höchsten gesamtwirtschaftlichen Einsparpotenziale liegen.

Spezifische Ergebnisse im Szenario AZE

Im Zeitraum zwischen 1994 bis 2010 verminderte sich der kumulierte Rohstoffaufwand für die Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC) um rund ein Viertel, während der RMI (gesamte letzte Verwendung) über den Gesamtzeitraum stagnierte. Im Szenario-Zeitraum setzt sich der in der Vergangenheit beobachtete Rückgang des RMC weiter fort, für 2030 wird der Umfang auf 1,169 Milliarden Tonnen geschätzt (gegenüber 1,391 Milliarden Tonnen in 2010). Auch für den RMI nach 2010 wird, anders als für den Beobachtungszeitraum 1994 bis 2010, ein Rückgang auf insgesamt 2,426 Milliarden Tonnen (gegenüber 2,667 Milliarden Tonnen in 2010) erwartet.

Den Einfluss der einzelnen Annahmen auf den RMI zeigt Abbildung Z-4. Die Angaben für die einzelnen Faktoren stellen die Effekte jeweils ceteris paribus dar, während die Angaben „Insgesamt“ das Ergebnis des simultanen Zusammenwirkens aller Faktoren repräsentieren. Ein nennenswert belastender Einfluss geht vom Wirtschaftswachstum aus. Die wesentlichen entlastenden Faktoren sind Verminde rung der Rohstoffintensität bei der Produktion im Inland, Verringerung der Rohstoffintensität der Importe, Rückgang der Bauaktivitäten und Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung.

Abbildung Z-4: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die Veränderung des RMI im Szenario AZE, Veränderung 2030 gegenüber 2010 in Prozent



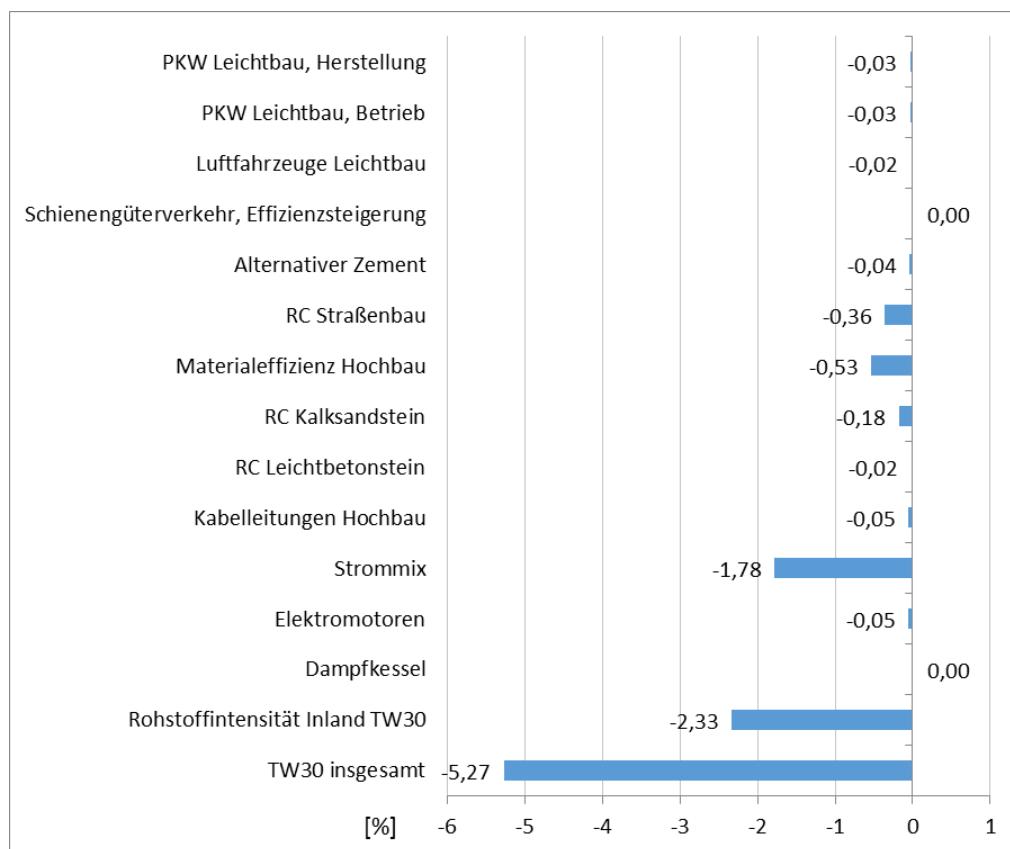
Quelle: URMOD.

Spezifische Ergebnisse im Szenario TW

Abbildung Z-5 bildet den Einfluss verschiedener Maßnahmen im Rahmen des TW30 Szenarios auf die Entwicklung des Indikators RMI ab. Die Darstellung knüpft an die einzelnen Maßnahmen an, die bei der Aufstellung der TW-Szenarios herangezogen wurden. Auch hier stellen die Angaben für die einzelnen Maßnahmen die Effekte jeweils ceteris paribus dar, während die Angaben „Insgesamt“ am Ende das Ergebnis des simultanen Zusammenwirkens aller genannten Faktoren repräsentieren.

Die berücksichtigten Faktoren haben allesamt einen entlastenden Einfluss. Die quantitativ wichtigsten Maßnahmen sind neben der Verminderung der Rohstoffintensität die Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung, die verbesserte Materialeffizienz beim Hochbau und das erhöhte Recycling von Baumaterialien.

Abbildung Z-5: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die zusätzliche Veränderung des RMI im Szenario TW30 gegenüber AZE in 2030 in Prozent des Basiswertes für 2010



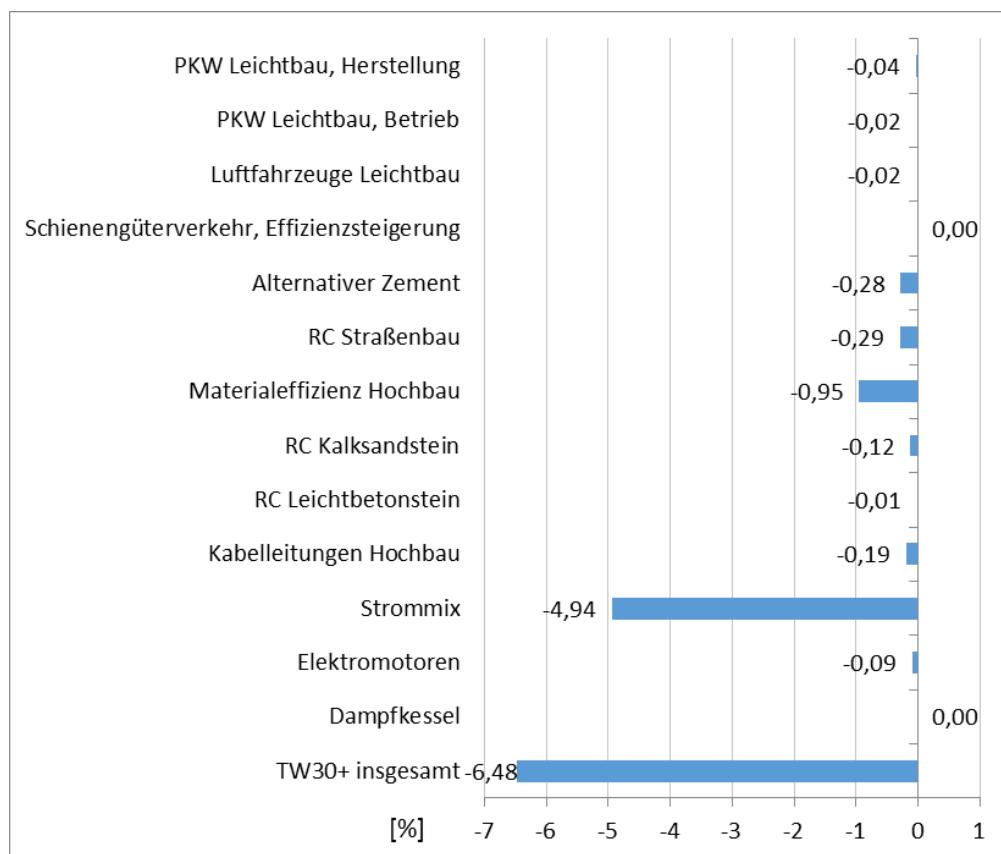
Quelle: URMOD.

Spezifische Ergebnisse in der Abschätzung TW30+

Abbildung Z-6 stellt den zusätzlichen entlastenden Einfluss verschiedener Maßnahmen im Rahmen der Abschätzung TW30+ auf die Entwicklung des Indikators RMI im Vergleich zum Szenario TW30 dar. Wieder stellen die Angaben für die einzelnen Maßnahmen die Effekte jeweils ceteris paribus dar, während die Angabe „Insgesamt“ am Ende das Ergebnis des simultanen Zusammenwirkens aller genannten Faktoren repräsentiert.

Insgesamt ergibt sich für die Entwicklung des RMI ein hoher entlastender Einfluss. Die mit Abstand bedeutendste Maßnahme ist die Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung, die auf die Annahme einer vollständigen Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger bei der Stromerzeugung zurückzuführen ist.

Abbildung Z-6: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die zusätzliche Veränderung des RMI in der Abschätzung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes für 2010



Quelle: URMOD.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass

- ▶ insgesamt ein erheblicher Rückgang der gesamtwirtschaftlichen Primärrohstoffanspruchsnahme bereits im Trendszenario AZE zu erwarten ist,
- ▶ eine technikorientierte Rohstoffpolitik, welche die Umsetzung ressourceneffizienter Innovationen fördern würde, zusätzliche Minderungspotenziale erschließen könnte.

ProgRess II hat als Ziel formuliert, den zwischen 2000 und 2010 beobachteten Rückgang der Gesamtrohstoffproduktivität (BIP+Importe/RMI) um jährlich 1,3 % bis 2030 fortzuschreiben. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen, dass das Ziel nicht nur erreicht, sondern auch übertroffen wird, wenn die bereits beschlossenen politischen Maßnahmen umgesetzt werden. Im jährlichen Durchschnitt wird die Gesamtrohstoffproduktivität um 1,8 % bereits im Szenario AZE zurückgehen. Die Gesamtrohstoffproduktivität wird sich zwischen 1994 und 2030, um 100 % im Szenario AZE und um 112 % unter technologisch optimistischeren Annahmen (Szenario TW30) erhöhen.

Summary

Background and objective

Raw material use is essential for human life. However, if all people were to use the same amount of resources as people in industrialized countries like Germany, economic as well as ecological impacts would be inconceivable. In this light, the promotion of resource efficiency has gained importance. The German Federal Government has adopted the German Program for Resource Efficiency (ProgRess) in 2012 and its continuation ProgRess II in March 2016 [BMUB, 2016]. ProgRess is one of the first national programs worldwide formulating a specific economy-wide target for resource efficiency. Its target is to double economy-wide raw material productivity, measured as GDP per abiotic raw material input (DMI abiotic). ProgRess II additionally sets the target of continuing the past trend of increasing total raw material productivity until 2030, measured as GDP plus imports per unit of primary raw material use (RMI abiotic + biotic). RMI is comprised of domestic raw material extraction and imports measured in raw material equivalents.

Since 1994, raw material productivity in Germany has been increasing almost continuously by a total of + 48.8 %. The increase can be attributed to a variety of factors, including a reduction of the use of lignite and hard coal for energy production, an increased degree of completion of imported products, the effects of the German reunification as well as general ambitions of companies to operate more efficiently. The raw material productivity indicator, however, contains an asymmetry as it measures imports in their own weight. When the production of raw material-intensive inputs is shifted abroad, the indicator incorrectly indicates an increase in raw material productivity. This asymmetry is overcome by the total raw material productivity indicator that includes raw material equivalents (RME) of imports. However, no estimates of the future development of the indicator exist. In addition, the effects of major changes on raw material use such as demographic change or the energy transition can hardly be estimated so far. Even less knowledge exists on the specific contribution of technologies or sets of measures to the reduction of raw material use taking into account interactions with other economic sectors.

Against this background, it is of interest to develop methods to estimate future raw material requirements in a manner as differentiated as possible. Possible scenarios of economy-wide raw material requirements can not only support policy makers to formulate specific objectives in the area of raw material efficiency but can also demonstrate potential impacts of political strategies and the promotion of certain technologies on raw material use.

The project "Structural and Technical Determinants of Resource Efficiency: Analysis of Path Dependencies, Structural Effects and Technological Potentials on the Future Development of Raw Material Productivity (DeteRess)" aims to assess the chances and limitations of a technology-oriented dematerialization policy in Germany considering existing path dependencies, trajectories and barriers. Changes in lifestyle or drastic interventions in consumer behavior are not included. As a result, a corridor of action is to be identified which highlights opportunities and limitations of a technology-oriented (raw) material policy in Germany.

In this project an appropriate method to estimate the impact of path dependencies as well as changes in technology on future German raw material requirements has been developed. In order to estimate actual raw material savings and not only material savings achieved within the country's own borders, the project calculated raw material use in raw material equivalents (RME). The environmental-economic model (URMOD) developed in the context of the project builds on methods, data and procedures of environmental economic accounting. This ensures that both the analysis of the current situation as well as the predicted raw material saving strategies are consistent with the actual data collected from material flows in Germany.

The corridor of action describing the chances and limitations of a technology-oriented raw material policy was explored with the help of scenarios. The focus of the scenarios lies on developments in the material-intensive sectors of energy, transport and construction. The scenario year is 2030. The baseline scenario describes the raw material requirements that result from known general developments and already adopted policies and measures to be implemented in the future. The baseline scenario is thus not an ordinary "business as usual" scenario based on the assumption of a continuation of current trends, but goes beyond it. To distinguish it from BAU scenarios, the baseline scenario is therefore named as "Expected Future Development (AZE)". The second scenario, called "Technological Change (TW30)," includes the assumption of additional changes through a variety of innovative technologies that have a predictable impact on economy-wide raw material demand. It thus describes a theoretical, technologically ambitious development path of the German economy aiming at a targeted reduction of raw material use. While the scenario AZE estimates the upper limit of German raw material requirements, the scenario TW30 estimates the lower limit. The estimate "TW30 +" additionally shows the theoretical potential of technological changes when they penetrate the market further or completely (with a perspective on 2050).

The methodological basis: URMOD

The essential methodological requirement was that imports and exports are recorded in raw material equivalents. This is necessary in order to be able to determine total raw material productivity ($GDP + \text{Imports} / \text{RMI}$) as indicated in ProgRess II. The indicator 'total raw material productivity' removes the asymmetry of the indicator 'raw material productivity' (GDP / DMI) caused by the fact that imports are included in terms of their own weight only.

In the environmental-economic raw material model (URMOD), data on raw material input into the economy is linked with the economic production and consumption activities. The basis is an economy-wide input-output table (IOT) including all production chains and cross-relations of an economy. The IOT for the base year 2010 developed for URMOD subdivided into 274x274 product groups and 41 categories of final use.

The underlying IOT of the model is the Destatis IOT differentiated by 72 product groups. For the URMOD-IOT, raw material extraction, primary processing of raw materials (especially in the field of metals and mineral construction materials) and generation of electricity as well as material-intensive activities (in the area of construction, traffic, power generation and recycling) were disaggregated further. The main data source for the disaggregation of the URMOD-IOT are the revenue and use tables of the national accounts of the Federal Statistical Office (Destatis), which are subdivided into 2,600 product groups. In addition, a large number of other sources, such as a highly differentiated agricultural input-output table (46 production processes) as well as sector studies (energy market, construction industry and transport) were used.

The procedure for the assignment of raw materials to products follows the so-called Leontief approach of input-output analysis. With a sequence of matrix operations, the primary inputs into the economy (in our case the primary raw materials) are allocated to the goods of final use and imported goods.

Raw material input (RMI) and Raw Material Consumption (RMC) are the two central raw material indicators derived using this model. The RMI covers the extraction of biotic and abiotic materials in Germany and imports, which are taken into account not only with their own weight but also with their entire primary raw material inputs (RME). The RMC further subtracts exports, also calculated in raw material equivalents. By offsetting internationally traded products in raw material equivalents, shifts of raw material-intensive production processes abroad are not incorrectly indicated as an improvement in raw material productivity by the indicators RMI and RMC.

The data on domestic extraction of raw materials is largely based on the results of the material flow calculations of the Environmental Economic Accounts (UGR) by the Federal Statistical Office. The raw

material classification is based on the classification of the delivery table for Eurostat (EW-MFA, Domestic Extraction). The original data is partially expanded and modified by additional information, e.g. a further disaggregation by raw materials.

The determination of the raw material equivalents of imports is based on a three-region model, which was designed to account for different production technologies in the countries of origin to estimate raw material equivalents of imports. The three-region model differentiates the regions Germany, 27 EU countries and non-EU countries (including further regional differentiations).

In order to calculate the raw material content of German imports from non-EU countries, the coefficient matrix for EU-imports is used. This matrix is developed for the Eurostat RME model [Eurostat, 2016]. The usage of the EU coefficients has the advantage that crucial national information on import-regions of non-EU countries is considered. The import-coefficients are estimated with a two-stage approach. Firstly, all imports are considered to be produced with national technology standards. Secondly, if imports from other countries differ significantly from European standards, a partial multi-regional model will be applied. This model considers central country-specific information such as ore-grades, secondary shares of imported metals (direct and indirect) and energy contents of imported electricity (direct and indirect). An important instrument within the model is the consideration of physical usage structures which allow a reliable estimation of raw material content of most of directly imported raw materials (especially oil and gas).

In order to estimate raw material contents of imports from EU-countries a similar approach is applied. The estimates of average coefficients are usually available for the EU (FL matrix). But for a lot of EU-countries the production technology largely differs from the EU average. This especially accounts for electricity generation and the share of secondary metal within the metal production. Thus, a partial multi-regional model was also applied for the EU-region. This model considers country-specific information for the 27 EU member states such as the energy mix and secondary metal share. This approach takes into account the most significant differences of production technology within the EU.

Figure S- illustrates the structure of the base model with the Leontief approach as a sequence of matrix operations. In the lower part of the figure, the model for the calculation of the scenarios using parameter variations is shown. The scenarios are essentially calculated according to a comparative-static approach. The figure shows how the baseline model and the scenario model are linked to each other by the following parameter types (red arrows):

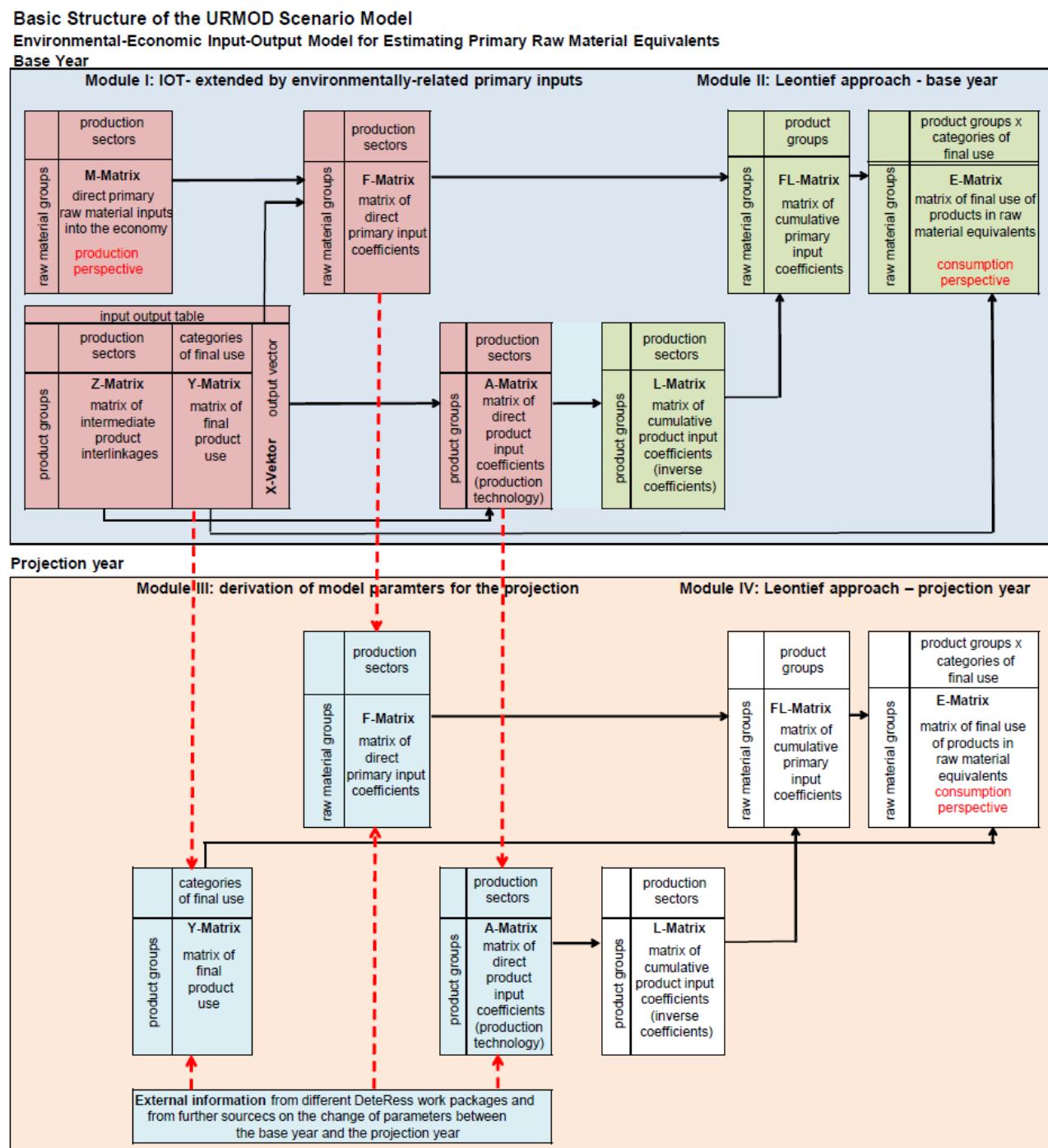
- ▶ Final demand matrix (consumption, investment and exports), Y matrix
- ▶ Matrix of the direct raw material coefficients, F matrix
- ▶ Matrix of direct commodity input coefficients, A matrix

The varied parameters final demand, raw material input and commodity input are thus determined exogenously, while the remaining variables are determined endogenously. Computationally, the model allows the derivation of results for individual measures and bundles of measures by multiplicative linking of the parameter variations.

2010 was chosen as the base year, as it was structurally less untypical than the years 2008 and 2009 and as it was the most current one for which all the required data was available at the start of the project. For earlier years, data from Destatis was used.

For the base year 2010, the base model provides a complete, consistent and empirically sound description of the flows of goods and raw materials in the economy based on a relatively high-resolution IOT. New system conditions are simulated by parameter variations. The logical consistency and coherence of the model is fully ensured even after parameter variations. Thus, the derived system states each embody consistent system descriptions.

Figure S-1: Basic structure URMOD



Source: URMOD.

The scenarios AZE and TW30 as well as the estimate TW30+

The corridor of action demonstrating the opportunities and limitations of a technology-oriented raw material policy was determined by means of the two scenarios "Assumed Future Development (AZE)" and "Technological Change (TW)". The scenarios describe the lower and upper limit of the corridor of action respectively. The additional estimate "Technological Change Plus" (TW30+) assumes a stronger market penetration of the technologies compared to TW30 and thus represents an assessment of the maximum potential of the technologies.

The following assumptions on the development of the general conditions underlying all scenarios were made:

- ▶ **Population:** The 12th Coordinated Population Survey, medium upper variant, was used [Destatis, 2009]. According to it, the population will fall to 79 million people by 2030 compared to 81.8 million in 2010.
- ▶ **Economic growth:** Based on the growth forecast on energy consumption (see energy sector) by the German Federal Ministry for the Environment (BMUB), an annual GDP growth rate of 1.2 % was assumed. The constant value assumed here is a simplification of the variable values of the BMUB forecast.
- ▶ **Technological development:** In all sectors, except for the explicitly analyzed sectors of energy, transport and construction, it was assumed that the input intensity for domestic production decreases in line with past developments. Lower values were assumed for the scenario AZE (1 % p.a.) and higher values for the scenario TW30 (1.2 % p.a.). The raw material intensity of imports was assumed to decrease by 0.9 % p.a., in line with past developments in the EU.
- ▶ **International trade:** It was assumed that global trade interdependence continues to grow (progressive intensification of the international division of labor), albeit at a slower pace than in the past.
- ▶ **Raw material availability:** It was assumed that raw material scarcity occurs neither domestically nor globally. Furthermore, it was assumed that the metal concentration of ores does not change as metal concentration is very difficult to predict and as there is hardly any reliable data available.
- ▶ **Material recycling:** The quantitatively important recycling materials wood, paper, plastic, metal (iron / steel, copper, aluminum) and construction minerals were taken into account. It was assumed that primary material is substituted according to plausible substitution factors.

The main assumptions on **electricity and heat generation** in AZE (based on the projection report 2015 of the BMUB according to regulation 525/2013/EU 2015) are as follows:

- ▶ The development covers all climate and energy policy measures introduced or modified until 31st of August, 2014.
- ▶ Net electricity generation, share 2010 to share 2030:
 - Total generation: - 4 %
 - Share of non-renewable energy: from 86 % to 41 % with nuclear energy from 22 % to 0 %, coal: hard coal from 18 % to 11 %; lignite from 23 % to 21 % and natural gas: from 15 % to 7 %
 - Share of renewable energy: 14 % to 59 % with onshore wind from 6 % to 28 %, off-shore wind from 0 % to 10 %, photovoltaics from 2 % to 10 % and biomass from 5 % to 6 %
 - Exports: increase from 3 % to 7 %
- ▶ Final energy requirement heat supply, change from 2010-2030:
 - Non-residential buildings industry/commerce services: - 24 %
 - Private residential buildings: - 12 %

The main assumptions on **building construction and civil engineering** in AZE (based among others on Deilmann et al. [2014a], Knappe et al. [n.d.] und Bergmann et al. [2015] are the following:

- ▶ The declining number of persons per household and the resulting increasing demand for living space per person lead to an increase in housing development, despite a decline in population.
- ▶ Non-residential construction is declining.

- ▶ Sealing of new surfaces decreases to 30 ha per day in 2030; construction activities are increasingly taking place in already developed areas.
- ▶ New construction of municipal infrastructure will decrease linearly between 2010 and 2030. Material inputs for refurbishment, maintenance and refurbishment over the lifetime are estimated based on life-cycle inventory data.
- ▶ The construction of municipal infrastructures has been derived from federal planning bodies and / or responsible institutions, in particular from the Federal Transport Route Plan.

The assumptions on the **transport sector** in the AZE scenario are mainly based on [Intraplan, 2014] and [ifeu, 2014a] and are as follows (change 2030 compared to 2010):

- ▶ Development of transport services: passenger transport: + 21 %, road passenger transport: + 9.9 %, public transport: + 6 %, air transport: + 64.8 %, rail cargo transport: + 42.9 %, road freight transport: + 38.9 %, cargo shipping: + 22.8 %
- ▶ Development of vehicle fleets: personal vehicles + 10 %, buses: + 13 %, heavy commercial vehicles: + 6 %, light commercial vehicles: + 5 %
- ▶ Development of electric mobility: by 2020, 500,000 electric vehicles, by 2030 3 million electric vehicles; by 2030, vehicles with an external power supply (BEV and PHEV) accounting for 19 % of new registrations. The share of conventional vehicles with petrol and diesel engines drops to 52 %; the remaining vehicles are essentially hybrid (HEV).
- ▶ Development of energy efficiency (energy use per traffic service): long-distance rail transport: - 29 %, passenger traffic: - 24 %, public transport: - 26.1 %, air traffic: - 21 %, rail transport: - 22 %, road transport: - 21 %, inland waterway transport: - 14 %

In addition to the inclusion of the AZE assumptions, the TW scenario entails assumptions about technological change. The estimate TW30+ furthermore assumes a far-reaching market penetration for the technologies under consideration.

The following technologies concerning the **energy sector** are considered:

- ▶ Power mix: further substitution of energy carriers and an increase in efficiency levels of power generation
- ▶ Electric motors: increasing use of more efficient electric motors
- ▶ Steam boilers: increasing use of more efficient steam generators

The following technologies concerning the **construction sector** are considered:

- ▶ Alternative cements: substitution of portland cement with innovative cement types, using Celitement as an example
- ▶ Material efficiency in building construction: several influencing factors such as a reduced use of concrete due to better planning/technology and a higher proportion of wooden houses
- ▶ Recycling of building materials: increased recycling of sand-lime and light-weight bricks
- ▶ Cables: substitution of copper cables in building construction by aluminum cables
- ▶ Recycling of road construction materials: increased recycling of asphalt

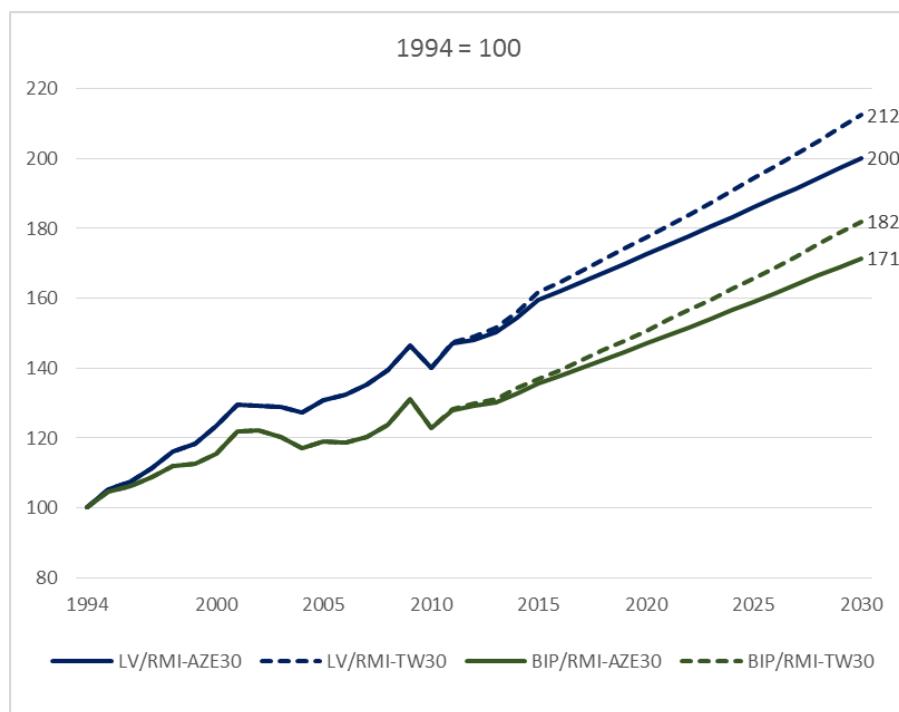
The following technologies concerning the **transport sector** are considered:

- ▶ Passenger car lightweight construction: substitution of steel with carbon fiber composite bodies in the production of passenger cars and resulting effects on fuel consumption
- ▶ Lightweight construction of aircrafts: The impact of increased lightweight construction of aircrafts on fuel consumption
- ▶ Efficiency of rail freight transport: more efficient use of rolling stock for rail freight transport

Results of the scenario calculations

The results of the AZE scenario show that the total raw material productivity is estimated to increase by an average of 1.8 % p.a. in the years 2010 to 2030 (see Figure S-2). This increase is higher than the average increase of 1.3 % p.a. observed between 2000 and 2010. By 2030, total raw material productivity is estimated to double compared to 1994 (+ 100 %). Under technologically more optimistic assumptions (TW30), total raw material productivity increases by an additional 12 % (compared to 1994 by a total of + 112 %).

Figure S-2: Raw material productivity according to the scenarios AZE and TW30

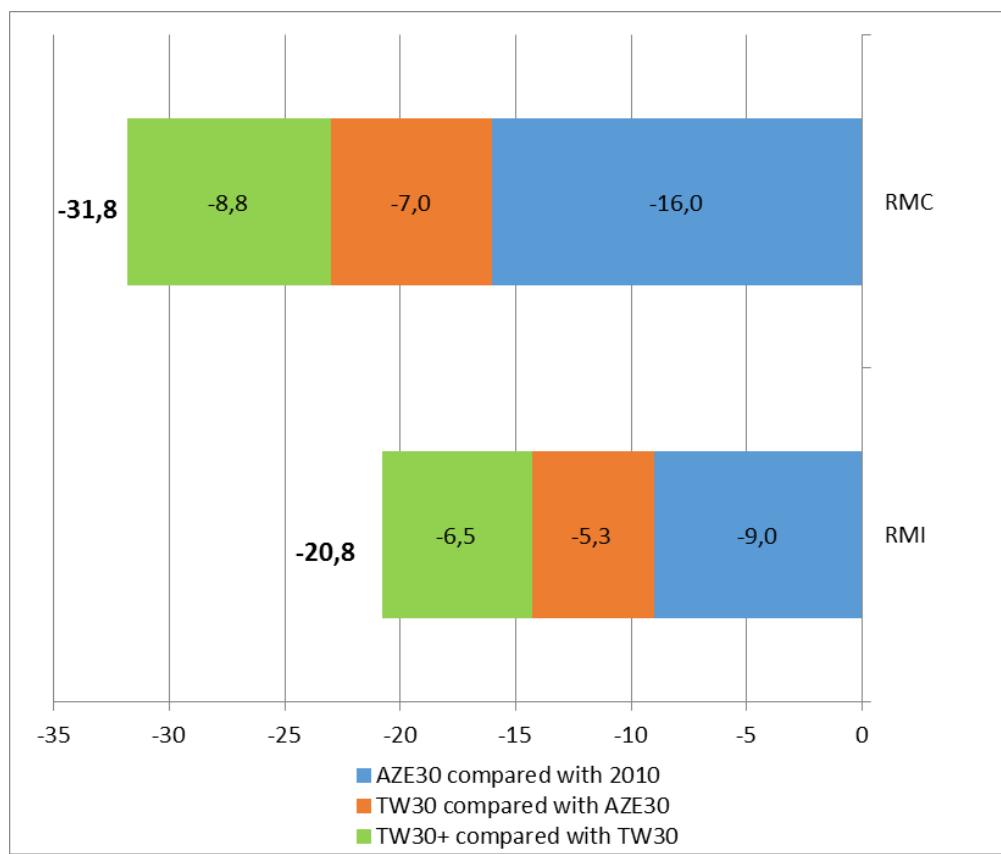


Source: URMOD for 2010 and 2030 concatenated with values of the UGR-RME model for 2000 and 2010 and a time series 1994 – 2010 from environmental-economic accounts (EW-MFA), from 2011 on linear interpolation. LV = last use; BIP = GDP; AZE = expected future development; TW30 = technological change; RMI = raw material input.

In comparison, raw material productivity, measured in GDP per RMI, is estimated to increase by 71 % between 1994 and 2030 (AZE scenario) and 82 % when technologically more optimistic assumptions are made (TW scenario). The change in the raw material productivity estimate can be accounted to the decline in primary raw material use in the scenarios of AZE, TW30 and TW30 +. Thus, both the RMI and the RMC decrease.

The following Figure S-3 below shows the respective change compared to the baseline values for 2010. With regard to the RMC, the overall effect of the three scenarios considered leads to a decline of 31.8 %. The contribution of the trend scenario (AZE) amounts to a decrease of 16.0 %. The contributions of the changes under TW (- 7.0%) and TW30 (- 8.8 %) are almost equal in sum (- 15.8 %).

Figure S-3: Contribution of the scenarios to the change in RMC and RMI compared to the base year 2010



Source: URMOD.

In contrast to the RMC, the RMI includes the raw material requirements for export goods. Since exports are increasing disproportionately over the period under review the relative decline of the RMI compared to the RMC is weaker in all scenarios. The overall effect of all three scenarios combined is a decrease of 20.8 % of the RMI. The contributions of the individual scenarios are similar to the ones of the RMC.

The anticipated decline in the use of raw materials in the trend scenario AZE already accounts for around 50 % of the total reduction potential across all three scenarios. In this project, the trend scenario was not created as a business-as-usual scenario but the implementation of a large number of already agreed policies and measures were integrated into the scenario. In particular, measures related to the energy transition that are integrated in the AZE scenario have a significant impact on the use of fossil fuels. In addition, the AZE assumption that the decline in sealing of land continues has a significant impact on the raw material requirements for the installation of municipal infrastructure. As a result, the energy transition and the reduction in land sealing contribute significantly to the decline in primary raw material use observed in AZE.

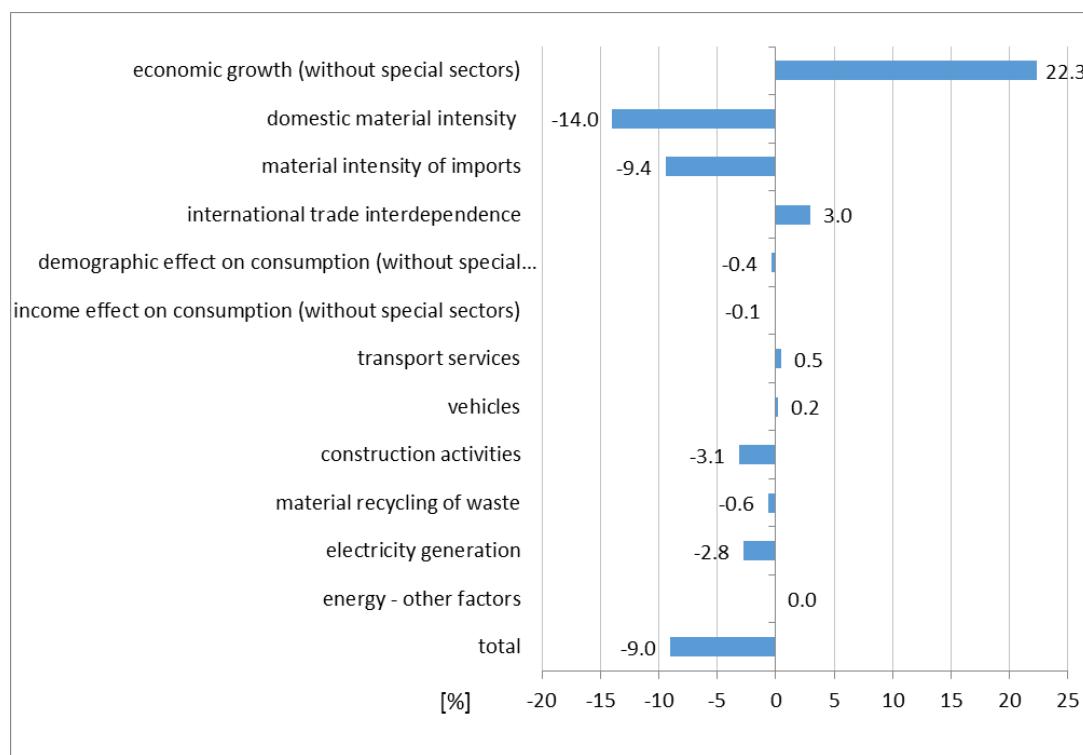
The TW30 scenario and the TW30 + estimate show that the use of innovative technologies to increase resource efficiency could further reduce primary raw material consumption in Germany. While individual technologies in the areas of substitution (beyond the substitution of fossil fuels) and material efficiency have only a modest effect on primary raw material use, the considered increases in recycling show greater reduction potential. For example, lightweight vehicles in production and operation contribute 0.03 % and 0.04 % to the reduction of the RMI in TW30, while recycling of sand-lime brick accounts for 0.2 %. In particular, recycling approaches for building materials have a significant overall impact on economy-wide raw material use. Given the current high material use in Germany with the

large share of fossil fuels and mineral building materials, it is obvious that these two groups of raw materials also have the highest potential for reduction.

Results specific to the AZE scenario

Between 1994 and 2010, the cumulative use of raw materials for the production of goods for final domestic use (RMC) decreased by about a quarter, while the RMI (total final use) stagnated over the total period. In the scenario period, the decline of the RMC observed in the past continues, and the volume is estimated to be 1.169 billion tonnes in 2030 (compared to 1.39 billion tonnes in 2010). The RMI is also expected to fall to a total of 2.426 billion tonnes (compared to 2.67 billion tonnes in 2010), unlike the trend in the observation period 1994 to 2010. The contribution of the individual assumptions on the RMI is shown in Figure S-4. The individual factors represent the effects *ceteris paribus*, while the "total" represents the result of the simultaneous interaction of all factors. Economic growth has a significant burdening effect on raw material use. The main relieving factors are reducing raw material intensity of domestic production and imports, decreasing construction activities and changing the energy carrier structure in power generation.

Figure S-4: Contribution of the different factors (c.p.) to the change of the RMI in percent, AZE 2030 compared to 2010



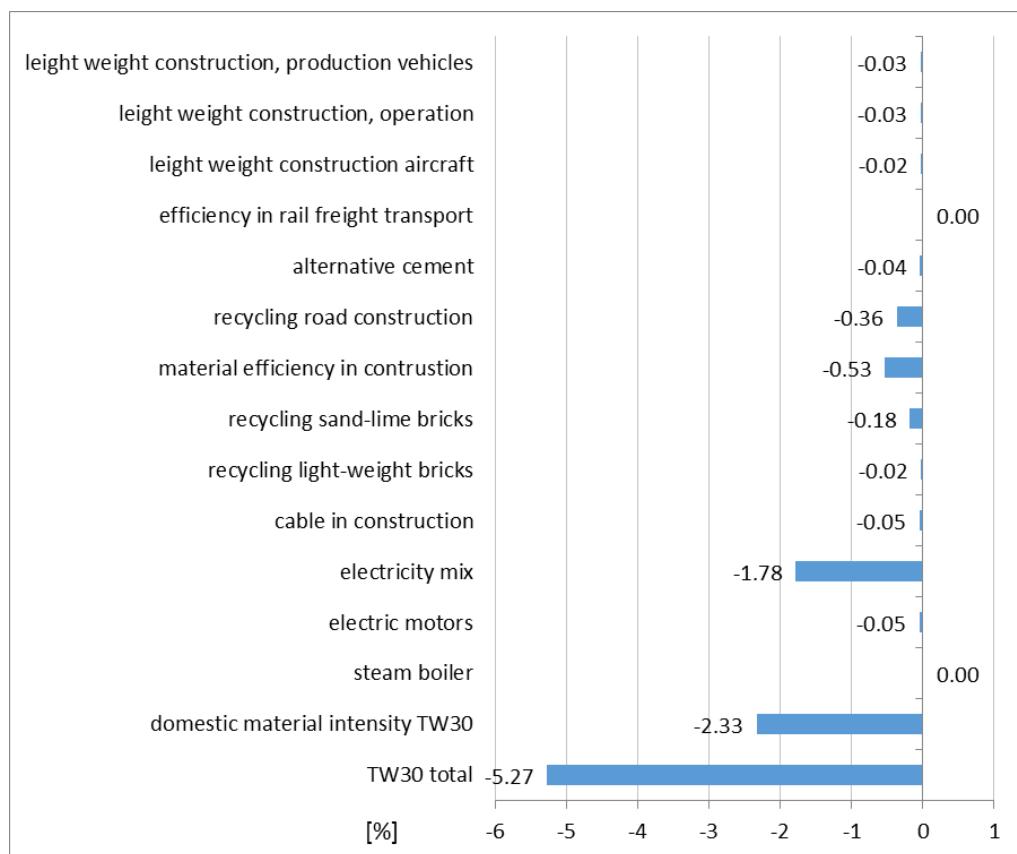
Source: URMOD.

Results specific to the TW scenario

Figure S-5 shows the influence of various measures under the TW30 scenario on the development of the RMI indicator. The presentation is based on the individual measures used in the preparation of the TW scenarios. Here too, the data for the individual measures represent the effects *ceteris paribus*, while the data "total" represents the result of the simultaneous interaction of all the factors mentioned.

The factors taken into account all have a relieving effect. The quantitatively most important measures are reduction of raw material intensity, change in the energy carrier structure for electricity generation, improved material efficiency in building construction and increased recycling of building materials.

Figure S-5: Contribution of the different factors (c.p.) to the additional change of the RMI in 2030 in percent, TW compared to AZE in per cent of value in 2010



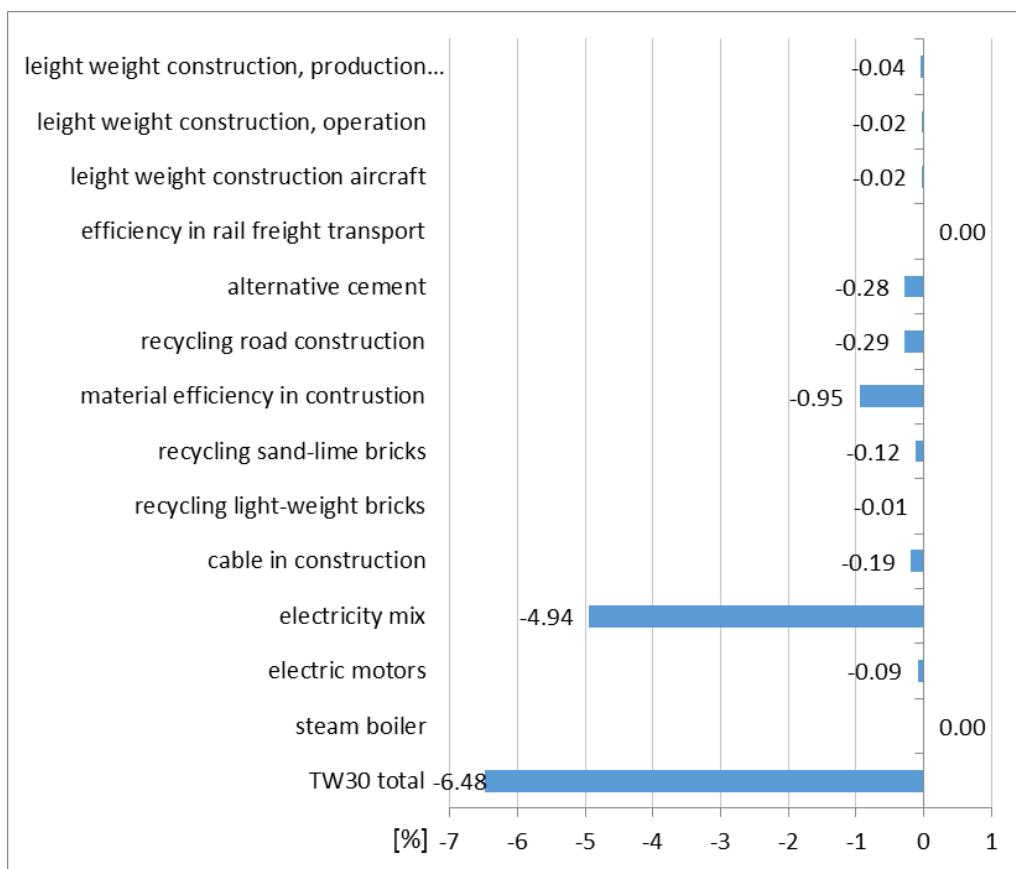
Source: URMOD.

Results specific to the estimate TW30 +

Figure S-6 shows the additional influence of different measures under the TW30 + estimate on the development of the indicator RMI compared to the scenario TW30. Again, the data for the individual measures show the effects ceteris paribus, while the "total" represents the result of the simultaneous interaction of all the aforementioned factors.

Overall, the measures have a highly positive impact on the RMI. By far, the most significant measure is the change in the energy carrier structure for electricity generation resulting from the assumption of a complete substitution of fossil fuels for electricity generation.

Figure S-6: Contribution of the different factors to the additional change of the RMI in 2030 in percent, TW30+ compared to TW in per cent of value in 2010



Source: URMOD.

Conclusion

The results show that

- ▶ a significant decline in economy-wide primary raw material consumption can already be expected according to the trend scenario AZE,
- ▶ a technology-oriented raw material policy promoting the implementation of resource-efficient innovations could tap additional reduction potential,

ProgRess II has set the goal of continuing the decline of 1.3 % p.a. in total raw material productivity (GDP + imports / RMI), observed between 2000 and 2010, annually until 2030. The results of this project show that the target is not only achieved, but also exceeded if the already agreed policy measures are implemented. On average, total raw material productivity will decline 1.8 % p.a. according to the scenario AZE. Total raw material productivity will increase by 100 % in the scenario AZE and by 112 % in the scenario TW30 (scenario TW30) between 1994 and 2030.

1 Ausgangslage und Ziel

1.2 Politischer Hintergrund

Die Menschheit benötigt zum Leben und zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse natürliche Ressourcen. Würden jedoch alle Menschen auf der Erde im Durchschnitt die Menge Ressourcen in Anspruch nehmen, die Menschen gegenwärtig in entwickelten Ländern wie Deutschland nutzen, wären die wirtschaftlichen Implikationen und die Auswirkungen auf die Umwelt unvorstellbar.

Bereits der wirtschaftliche Aufstieg Chinas sowie weiterer bevölkerungsreicher Schwellenländer führte nach der Jahrtausendwende zu einem Anstieg der Nachfrage nach einer Vielzahl von natürlichen Ressourcen und verschärfte die internationale Konkurrenz um eben diese. Mit der wachsenden Nachfrage nach Ressourcen stiegen auch Umweltprobleme, die mit der Nutzung der Ressourcen verbunden sind, darunter die Zunahme von Treibhausgasemissionen, der Verlust von Ökosystemen und die Degradation von fruchtbaren Böden. Vor diesem Hintergrund gewinnt der Ansatz, Ressourceneffizienz gezielt zu fördern, international an Bedeutung. Ein Fokus liegt dabei auf der Förderung einer effizienteren Nutzung von Rohstoffen, womit ein Beitrag geleistet werden soll, Primärrohstoffentnahmen zu mindern und die unternehmerische Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

Verschiedene Staaten und supranationale Organisationen haben auf die veränderten internationalen Rahmenbedingungen nach der Jahrtausendwende reagiert und Politiken formuliert, um Rohstoffproduktivität bzw. Rohstoffeffizienz auf gesamtwirtschaftlicher bzw. unternehmerischer Ebene gezielt zu fördern. Die Europäische Union hat im Jahr 2011 im Rahmen der Europäischen Wachstumsstrategie für diese Dekade die Leuchtturminitiative „Resource Efficient Europe“ formuliert [EU KOM, 2011]. Die Bundesregierung hat das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) in 2012 und die Fortentwicklung ProgRess II im März 2016 verabschiedet [BMUB, 2012]. Inzwischen fördern nahezu alle europäischen Länder und darüber hinaus auch viele asiatische Länder Ressourcenproduktivität bzw. -effizienz [EEA, 2016]. Die Förderung von Ressourceneffizienz ist indessen sogar ein Schwerpunkt im Umweltbereich auf der Ebene der G7 und wird als notwendige Bedingung angesehen, um die Pariser Beschlüsse und damit die Einhaltung des 1,5°-Zieles zu erreichen [G7, 2016].

Im deutschen Ressourceneffizienzprogramm hat die Bundesregierung für Deutschland als eines der ersten Länder ein konkretes Ziel für die Rohstoffeffizienz auf gesamtwirtschaftlicher Ebene formuliert. So nennt ProgRess die Verdopplung der gesamtwirtschaftlichen Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1994 als Ziel. Die Rohstoffproduktivität wird dabei gemessen als Bruttoinlandsprodukt pro abiotischen Materialinput (DMI_{abiot}). ProgRess II nennt zusätzlich die Trendfortschreibung der Gesamtrohstoffproduktivität bis 2030, gemessen als BIP plus Importe pro $RMI_{abiot+biot}$. In der Vergangenheit konnte ein kontinuierlicher Anstieg der Rohstoffproduktivität in Deutschland gemessen werden, zurückgehend auf eine Vielzahl von Faktoren, darunter allgemeine Bestrebungen von Unternehmen effizienter zu wirtschaften, die rückläufige Nutzung von Kohle zur Stromproduktion und wiedervereinigungsbedingte Entwicklungen. Der beobachtete Trend ist jedoch nicht ausreichend, um das politisch formulierte Ziel der Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis 2020 zu erreichen. Mit ProgRess und ProgRess II werden daher vielfältige Anstrengungen zur Erhöhung der Rohstoffeffizienz entlang der ganzen Wertschöpfungskette aufgezeigt.

Insgesamt ist jedoch unklar, welchen Bedarf die deutsche Volkswirtschaft an einzelnen Rohstoffen und insgesamt zukünftig haben wird. Auf der einen Seite ist der Rohstoffbedarf abhängig von allgemeinen und politisch wenig steuerbaren Faktoren wie der Bevölkerungsentwicklung. Der Bedarf ist ferner auch abhängig von Entscheidungen, die in der Vergangenheit getroffen wurden und in absehbarer Zeit nicht reversibel sind; beispielsweise ist materielle Infrastruktur errichtet worden, für deren Unterhaltung bestimmte Rohstoffe in einem bestimmten Umfang eingesetzt werden müssen. Auf der an-

deren Seite werden neue Technologien gefördert, die erhebliche Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf haben werden, und darunter fallen insbesondere alle Technologien, die die Umstellung der Ökonomie auf erneuerbare Energien unterstützen.

Vor diesem Hintergrund ist es von Interesse, Methoden zu entwickeln um den zukünftigen Rohstoffbedarf so differenziert wie möglich abzuschätzen. Prognosen zum gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf können nicht nur die Politik bei konkreten Zielformulierungen im Bereich der Ressourceneffizienz unterstützen, sondern auch die Auswirkungen von Entscheidungen anderer Politikbereiche auf den Rohstoffbedarf, wie beispielsweise im Bereich Verkehr, aufzeigen. Darüber hinaus ist es wichtig, die Beiträge von Technologien, Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln auf den Rohstoffbedarf quantifizieren zu können, um realistische Ziele in der Ressourcenpolitik setzen und verfolgen zu können. Hier setzt das im Folgenden beschriebene Forschungsprojekt an: Es stellt fundierte Methoden bereit, um den zukünftigen Rohstoffbedarf abzuschätzen.

1.3 Zielsetzung des Vorhabens

Dieses Vorhaben hat das Ziel, die Beiträge einer technikorientierten Dematerialisierungspolitik in Deutschland zu untersuchen und dabei existierende Pfadabhängigkeiten, Trajektorien und Schranken zu berücksichtigen. Lebensstiländerungen oder drastische Eingriffe in das Konsumverhalten sollen bei dieser Betrachtung nicht einbezogen werden. Im Ergebnis soll ein Handlungskorridor erkennbar werden, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Material- und Rohstoffpolitik in Deutschland aufzeigt. Die Aufgabenstellung ist damit eng an die Erreichbarkeit beziehungsweise die Weiterentwicklung von Zielen der Rohstoffproduktivität auf nationaler Ebene geknüpft.

Zur Lösung der Aufgabe muss im Rahmen des Projekts eine adäquate Methode entwickelt werden, mit der auf gesamtwirtschaftlicher Ebene sowohl die Auswirkungen von Pfadabhängigkeiten als auch von Technologieänderungen auf den zukünftigen deutschen Rohstoffbedarf abgeschätzt werden können. Eine Voraussetzung zur sinnvollen Beantwortung der Fragestellung besteht darin, dass effektive Rohstoffeinsparungen zu bewerten sind und nicht nur die realisierten Materialeinsparungen innerhalb der eigenen Landesgrenzen. Daher werden in diesem Projekt die Rohstoffnutzungen in Rohstoffäquivalente (RME) gerechnet. Die im Rahmen des Projekts zu entwickelnde Methodik soll ferner auf die Methoden, Daten und Prozeduren der umweltökonomischen Gesamtrechnung aufbauen. Damit soll gewährleistet sein, dass sowohl die Situationsanalyse als auch die prognostizierten Rohstoffeinsparstrategien im Einklang mit den real erhobenen Daten der Materialströme in Deutschland entwickelt werden.

Der Handlungskorridor, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Rohstoffpolitik beschreibt, wird mit Hilfe von Szenarien ausgelotet. Der Fokus der Szenarien liegt auf Entwicklungen in den materialintensiven Sektoren Energie, Verkehr und Bau. Das Prognosejahr ist 2030. Das Basisszenario beschreibt den Rohstoffbedarf, der sich aus bekannten bzw. gesetzten allgemeinen Entwicklungen und zusätzlich aus bereits beschlossenen Politiken, auch wenn sie erst in der Zukunft umgesetzt werden, ergibt. Das Basisszenario ist damit kein gewöhnliches „Business As Usual (BAU)“-Szenario, das gegenwärtige Trends nur fortschreibt, sondern es geht bereits darüber hinaus. In Abgrenzung zu BAU-Szenarien wird das Basisszenario daher „Anzunehmende zukünftige Entwicklung (AZE)“ genannt. Das zweite Szenario namens „Technischer Wandel (TW)“ bezieht zusätzliche Änderungen einer Vielzahl von innovativen Technologien ein, die berechenbare Auswirkungen auf den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf haben. Es beschreibt damit einen technisch ambitionierten Entwicklungspfad der deutschen Volkswirtschaft, der in der Realität auch umsetzbar wäre. Während das Szenario AZE also die obere Grenze des anzunehmenden deutschen Rohstoffbedarfs abschätzt, beschreibt das Szenario TW30 die untere Grenze des Handlungskorridors. Die Abschätzung „TW30+“ zeigt zusätzlich das theoretische Gesamtpotenzial der technischen Änderungen, wenn diese den Markt vollständig durchdringen würden.

1.4 Aufbau des Berichts

Ein wesentlicher Inhalt des Projekts lag in der methodischen Entwicklung eines Modells, mit dem der zukünftige Rohstoffbedarf von Deutschland abgeschätzt werden kann. Daher wird im methodischen Kapitel 2 sehr ausführlich das Umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD) beschrieben, indem der konzeptionelle Hintergrund zunächst bezogen auf den IOT-Ansatz (Input-Output-Tabellen) und dann bezogen auf die Szenarienmodellierung erläutert wird. Weiterhin werden die Konsequenzen für das methodische Vorgehen bei der Beschaffung der Daten für URMOD erläutert.

Im folgenden Kapitel 3 wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung des Rohstoffbedarfs der deutschen Volkswirtschaft gegeben. Im Anschluss wird der Rohstoffbedarf im Basisjahr 2010 mit Blick auf die Rohstoffarten und Gütergruppen ausführlich erläutert.

Kapitel 4 legt die theoretischen Grundlagen zu den Strategien, mit welchen zukünftig Materialinputs gesenkt werden können. Diese sind Materialeffizienzsteigerung, Substitution und Recycling. Für diese werden relevante Technologien und deren Rohstoffeinsparpotenziale identifiziert.

Mit Kapitel 5 beginnt der Blick in die Zukunft. Relevante übergeordnete Entwicklungstrends werden beschrieben, die Auswirkungen auf den deutschlandweiten Rohstoffbedarf haben. Dabei wird zunächst jeweils der Trend beschrieben, und im nächsten Schritt wird erläutert wie der Trend in URMOD übernommen wurde. Als Trends werden die Bevölkerungsentwicklung, die Entwicklung des Bruttoinlandprodukts, der technische Fortschritt, der internationale Handel und die Kreislaufwirtschaft detailliert beschrieben. Die Veränderungen der Metallgehalte in Erzen und der Klimawandel werden als Trends ebenfalls aufgezeigt, allerdings fehlte eine ausreichend fundierte Datenbasis, um die Trends in URMOD mit dem Zieljahr 2030 zu übernehmen.

Die Kapitel 6, 7 und 8 beschreiben die Szenariengestaltung der ausgewählten Bereiche Energie, Bauwirtschaft und Verkehr. Jeweils bezogen auf den Bereich werden wesentliche Trends in der Vergangenheit und die relevanten Annahmen für die zukünftige Fortentwicklung der Trends dargestellt.

Diese bilden die Grundlage für das Trendszenario AZE. Im Weiteren werden jeweils die zusätzlichen Annahmen dargestellt, die in das Szenario Technologischer Wandel (TW30) und in das Szenario Technologischer Wandel plus (TW30+) eingeflossen sind. Im Anschluss wird jeweils erläutert, wie die Annahmen in URMOD übernommen wurden.

Kapitel 9 stellt die Ergebnisse der Szenarienberechnungen dar. Zunächst wird ein Überblick über die allgemeinen Entwicklungstendenzen gegeben. Es folgen die Ergebnisse für das Trendszenario einschließlich einer Dekompositionsanalyse, die die Auswirkungen von Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündeln unter sonst gleichbleibenden (*ceteris paribus*) Bedingungen auf den Rohstoffbedarf aufzeigt. Daraufhin werden die Ergebnisse für das Szenario Technologischer Wandel (TW30) und für Technologischer Wandel plus (TW30+) präsentiert.

Das abschließende Kapitel 10 fasst die Schlussfolgerungen und offenen Fragen zusammen. Dabei beantwortet es die Ausgangsfrage, von welchem Mindestrohstoffbedarf in Deutschland unter den angenommenen Trendveränderungen ausgegangen werden muss und welche zusätzlichen Einsparungen aufgrund technisch ambitionierter, aber möglicher Veränderungen möglich sind. Die Ergebnisse von TW30+ zeigen dann, welche Einsparpotenziale unter Bedingungen der vollständigen Marktdurchdringung der jeweiligen Technologie theoretisch möglich wären.

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Das Umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD)

Grundlage des im Rahmen des Projekts entwickelten Modells ist eine hoch aufgelöste, umweltökonomische Input-Output-Tabelle (IOT), welche darauf ausgerichtet ist, die Rohstoffströme in der Volkswirtschaft vollständig und überschneidungsfrei abzubilden. Das entwickelte Modell wurde **Umweltökonomisches Rohstoffmodell**, kurz URMOD, genannt.

2.1.1 Konzeptioneller Hintergrund

2.1.1.1 Vorläufer von URMOD

Das hoch aufgelöste IOT-Modell für DeteRess ist konzeptionell voll mit dem Eurostat-RME-Modell harmonisiert. Dieses wird auf europäischer Ebene bereits seit mehreren Jahren für die Berechnung der Indikatoren RMC und RMI eingesetzt. Das Modell für Deutschland, das in DeteRess angewendet wird, ist aber entsprechend den Anforderungen für die Aufstellung von Szenarien im Projekt DeteRess tiefer gegliedert (274 Gütergruppen) als das Eurostat-Modell (182 Gütergruppen). Beide Gliederungstiefen gehen über die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichte IOT mit einer Gliederungstiefe von 72 Gütergruppen deutlich hinaus.

Eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Eurostat-RME-Modells waren die Vorarbeiten im Statistischen Bundesamt. Die erste Version des RME-Modells der UGR des Statistischen Bundesamtes wurde im Jahr 2009 veröffentlicht [Buyny et al., 2009; Buyny / Lauber, 2009; Schoer, 2006a; b; Schoer / Schweinert, 2005]. Während das Eurostat- und das DeteRess-Modell auf einer hochauflösenden IOT beruhen, deren Verwendung aufgrund von Fortschritten bei der verfügbaren Software wesentlich erleichtert wurde, verwendet das UGR-Modell noch die Standard-IOT des Statistischen Bundesamtes nach 72 x 72 Produktionsbereichen. Diese Information wird durch eine Reihe von tiefer gegliederten Materialstromtabellen ergänzt, die in Kombination mit der IOT ebenfalls den Zweck verfolgen, die Rohstoffströme möglichst detailliert abzubilden.

2.1.1.2 Definition und Berechnung von gesamtwirtschaftlichen Materialflussindikatoren

Die inländische Primärrohstoffnutzung (RMC) und der Primärrohstoffeinsatz (RMI) sind die beiden zentralen Rohstoffindikatoren, die mit Hilfe von URMOD abgeleitet werden. RMC und RMI korrespondieren mit den traditionellen Materialflussindikatoren inländischer Materialkonsum (DMC) und inländischer Materialinput (DMI) der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnungen (EW-MFA). DMC und DMI stellen die Materialflüsse in Tonnen Eigengewicht dar. Um die Ergebnisse der EW-MFA Größen zu ermitteln, werden lediglich Angaben über die inländische Entnahme von Rohstoffen in Tonnen sowie Angaben über Importe und Exporte in Tonnen Eigengewicht benötigt. Das Konzept dieser Indikatoren weist aber eine Asymmetrie auf, da das Eigengewicht der Importe und Exporte die zur Herstellung dieser Güter aufgewendeten Rohstoffe nur zu einem Teil und in unterschiedlichem Umfang repräsentiert. Dies gilt für den Einsatz von Energieträgern, die abgesehen vom stofflichen Einsatz bei der Produktion verbraucht werden und ihr Gewicht nicht an das Produkt weitergeben. In vergleichbar hohem Umfang gilt dies auch für die Metallerzeugung, bei der ein großer Teil des ursprünglichen Erzgewichtes nicht berücksichtigt wird. Auch wenn die Rohstoffansprüche der Volkswirtschaft aus einer Nachfragesicht unverändert bleiben, können die Werte der Indikatoren DMC und DMI zurückgehen, indem energieintensive Grundstoffindustrien ins Ausland verlagert werden oder die Substitution von inländischer Erzentnahme durch importierte Metalle erfolgt.

Das Konzept der Messung des Rohstoffgehalts von Gütern in Rohstoffäquivalenten (RME) stellt einen Ansatz dar, diese Asymmetrie zu beheben. Statt des tatsächlichen Gewichtes wird den Gütern ein virtuelles Rohstoffgewicht zugeordnet, das alle bei der Herstellung des Gutes über die gesamte Produktionskette hinweg aufgewendeten Primärrohstoffe (kumulierter Rohstoffaufwand) umfasst. Da eine sol-

che Zuordnung des Rohstoffaufwands nicht nur für Rohstoffe oder Halbwaren, sondern auch für Fertigwaren mit komplexen, interdependenten Produktionsketten benötigt wird, kann eine Zurechnung von Rohstoffäquivalenten in methodisch zufriedenstellender Weise nur mit einem Input-Output-Modell erreicht werden.

Ein gesamtwirtschaftliches Input-Output-Modell bildet die Produktionsverflechtungsbeziehungen in einer Volkswirtschaft vollständig ab. D.h. alle Produktionsketten in einer Volkswirtschaft und ihre Querbeziehungen sind einbezogen. Dieses Modell erlaubt es, z.B. den Input eines Rohstoffs über das gesamte Produktionskettengeflecht hinweg bis zu den Endprodukten zu verfolgen.

2.1.1.3 Modifikation des Leontief-Modells

In URMOD werden Angaben über den Rohstoffinput in die Ökonomie in konsistenter Weise auf detaillierter Ebene mit den wirtschaftlichen Produktions- und Konsumaktivitäten verknüpft.

Das technische Verfahren zur Zuordnung von Rohstoffen zu Gütern folgt dem sogenannten Leontief-Ansatz [EC, 2008] der Input-Output-Analyse. Mit diesem auf einer Abfolge von Matrizenoperationen beruhenden Verfahren werden die Primärinputs (z.B. primäre Rohstoffe) in eine Volkswirtschaft den Gütern der letzten Verwendung und — je nach Modelltyp — auch den Importgütern zugerechnet. Auf dieser Grundlage können dann z.B. die aggregierten Rohstoffindikatoren RMC und RMI gebildet werden.

Die Input-Output-Analyse wurde ursprünglich von Wassily Leontief in den dreißiger Jahren entwickelt. Für seinen Beitrag wurde Leontief im Jahr 1973 mit dem Ökonomie-Nobelpreis ausgezeichnet. Ursprünglich als Methode zur Betrachtung der Wirtschaftsentwicklung konzipiert, ist dieser Ansatz inzwischen die am weitesten verbreitete Methode zur Analyse umweltökonomischer Fragestellungen. Das Modell beruht auf einer Input-Output-Tabelle (IOT), welche die Produktionsverflechtungsbeziehungen in einer Volkswirtschaft abbildet, und einer Abfolge von Matrizenoperationen. Die Grundlagen werden im Folgenden dargestellt:

Es wird unterstellt, dass die Ökonomie durch n Sektoren (Gütergruppen) repräsentiert wird. Die intersektoralen Ströme in einer Ökonomie lassen sich als eine $n \times n$ Matrix Z abbilden. Der gesamte Output für jeden Sektor ist durch einen $n \times 1$ Vektor x gegeben. Wenn jedes Element der Z Matrix durch den Output des jeweiligen Sektors, d.h. durch den korrespondierenden Wert von x dividiert wird, ergibt sich die $n \times n$ Matrix der direkten Inputkoeffizienten A , die auch als Technologiematrix bezeichnet wird:

$$A = Z \times (Ix)^{-1}$$

Die direkten Inputkoeffizienten (d.h. die Elemente der Matrix A) bezeichnen die Beträge an Inputs, die erforderlich sind, um eine Einheit Output eines Sektors zu produzieren.

Bei gegebenem $n \times 1$ Vektor der Endnachfrage y kann der benötigte Output unter Verwendung der Leontief-Inverse $L = (I - A)^{-1}$ berechnet werden:

$$x = (I - A)^{-1} \times y.$$

Die Leontief-Inverse L repräsentiert den Aufwand an Inputgütern um eine Einheit Endnachfrage zu erzeugen (kumulierte sektorale Inputkoeffizienten).

Während sich die klassische IOT auf die Abbildung der monetären intersektoralen Ströme beschränkt, ist es möglich IOTs, je nach Verwendungszweck, zu erweitern. Für umweltökonomische Analysen [UN, 2014] wird das Modell z.B. durch Angaben über Rohstoffnutzung und/oder Emissionen erweitert.

Im Falle von URMOD wird die IOT um Angaben zu den Primärrohstoffen erweitert. Dafür wird der Input nach Primärrohstoffarten m und n Gütergruppen differenziert, um eine $m \times n$ Rohstoffmatrix M zu erzeugen. Die Primärrohstoffmatrix beruht auf den Konzepten der physischen Stromrechnung des internationalen Systems der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (SEEA-CF [UN, 2014]). Die

Matrix der Primärrohstoffinputs entspricht der im SEEA beschrieben Verwendungstabelle für „natural resource input“.¹

Analog zur Transaktionsmatrix \mathbf{Z} , kann die \mathbf{M} -Matrix transformiert werden in eine Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten \mathbf{F} indem der Rohstoffinput durch den Output des jeweiligen Sektors x dividiert wird:

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \times (\mathbf{I}\mathbf{x})^{-1}.$$

Wenn die Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten \mathbf{F} mit der Leontief-Inversen multipliziert wird, ergibt sich die Matrix der kumulierten Rohstoffkoeffizienten \mathbf{FL} .

$$\mathbf{FL} = \mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}.$$

Da die Zielsetzung ist, die Rohstoffinputs auf die Güter der Endnachfrage zu beziehen, wird in einem abschließenden Schritt die \mathbf{FL} Matrix mit dem Endnachfragevektor \mathbf{y} multipliziert:

$$\mathbf{E} = \mathbf{FL} \times \mathbf{y}$$

Die Matrix \mathbf{E} zeigt die kumulierten Primärrohstoffaufwände der Endnachfragegüter nach Sektoren (Gütergruppen).

Der Rohstoffaufwand der Endnachfrage kann nach weiteren Endnachfragekategorien wie Konsum, Bruttoinvestitionen und Exporte anhand der monetären Relationen differenziert werden. Der Rohstoffaufwand zur Herstellung der Importgüter wird im Leontief-Modell analog zum Rohstoffaufwand für die Endnachfragegüter unter der Annahme geschätzt, dass die Importgüter mit inländischer Produktionstechnologie hergestellt wurden (DTA: domestic technology assumption). Dazu wird die \mathbf{FL} Matrix mit dem Importvektor multipliziert.

Für Zwecke von URMOD wird, ähnlich wie beim Eurostat RME-Modell [Eurostat, 2016; Schoer et al., 2012], nicht die vereinfachende DTA-Methode für die Ermittlung des Rohstoffgehalts der Importe verwendet. Stattdessen werden externe Informationen für die Schätzung herangezogen, die auf einem Drei-Regionen-Modell beruhen. Mit der Nutzung der externen Informationen wird das Ziel verfolgt, den Rohstoffgehalt der importierten Güter möglichst weitgehend auf der Grundlage der Produktionstechnologie der Herkunftsländer der Importe zu schätzen. Für den Einbau dieser externen Informationen in das Modell wurde ein spezieller Ansatz des Leontief Modells [Weinzettel / Kovanda, 2009] entwickelt. Bei diesem Ansatz wird neben der inländischen Rohstoffmatrix zusätzlich die extern ermittelte Matrix des kumulierten Rohstoffaufwandes der importierten Güter in das Modell eingeführt.

Für diesen Zweck wird das Standard-Leontief-Modell modifiziert. Bei dem erweiterten Ansatz werden die Importgüter internalisiert, d.h. diese werden technisch wie zusätzliche im Inland hergestellte Güter behandelt. Es wird unterstellt, dass die Importgüter als Vorleistungen in die korrespondierenden inländischen Gütergruppen eingehen. Den im Inland produzierten Gütern wird die inländische Entnahme von Rohstoffen zugeordnet. Analog dazu wird den importierten Gütern die Matrix des kumulierten Rohstoffaufwandes zur Herstellung der Importe zugeordnet. Technisch bedeutet dies, dass sowohl die \mathbf{Z} als auch die \mathbf{M} Matrix erweitert werden. Die Zeilen und Spalten der \mathbf{Z} Matrix werden erweitert um die zusätzlichen Gütergruppen (Importgüter). Die Spalten der \mathbf{M} Matrix werden ebenfalls um die zusätzlichen Gütergruppen ergänzt. Diese zusätzlichen Spalten der \mathbf{M} Matrix enthalten die Information zum kumulierten Rohstoffaufwand für die Herstellung der Importgüter. Das Format der im Rechengang nachfolgenden Matrizen wird entsprechend angepasst.

¹ Der Leontief -Ansatz rechnet die Inputs von Primärrohstoffen in die Ökonomie den Gütern der letzten Verwendung zu. Analog zu Primärrohstoffen können grundsätzlich auch entsprechend gegliederte Aufkommens- oder Verwendungstabellen für andere Materialien oder Inputfaktoren, wie zum Beispiel Aufkommenstabellen für Treibhausgasemissionen, Verwendungstabellen für Sekundärrohstoffe oder Verwendungstabellen für Arbeitsstunden im Leontief-Modell mit der IOT gekoppelt und den Gütern der letzten Verwendung zugerechnet werden.

2.1.1.4 Adaption und Modifikation der Input-Output Tabelle

2.1.1.4.1 Schätzung einer disaggregierten Input-Output-Tabelle

Für Zwecke von URMOD wurde eine hoch aufgelöste Input-Output-Tabelle für das Basisjahr 2010 mit einer Gliederungstiefe von 274x274 Gütergruppen und 41 Kategorien der letzten Verwendung entwickelt. Teilweise wurden monetäre Verwendungsstrukturen durch physische Angaben ersetzt (hybride IOT) mit dem Ziel, die Schätzung von Rohstoffäquivalenten zu verbessern.

Den Rahmen für die Aufstellung dieser Input-Output-Tabelle bilden die Angaben der von Destatis veröffentlichten IOT nach 72 Gütergruppen. Die Disaggregation der DeteRess-IOT gegenüber dieser Standard-IOT bezieht sich insbesondere auf die Bereiche Rohstoffextraktion, primäre Verarbeitung von Rohstoffen (z.B. Nahrungsmittelherstellung, Metallerzeugung oder Baustoffherstellung) und auf die Darstellung einiger besonders materialrelevanter Produktionsaktivitäten (z.B. Bauproduktion, Verkehr, Stromerzeugung sowie Abfallverarbeitung). Mit der erweiterten Gliederung wird vor allem das Ziel verfolgt, Rohstoffflüsse durch die Ökonomie möglichst differenziert abzubilden. Dies soll eine verlässliche Schätzung der zentralen Indikatoren RMI und RMC ermöglichen.

Hauptdatenquelle für die Disaggregation der IOT in URMOD sind die nach rund 2.600 Gütergruppen und 64 Wirtschaftsbereichen untergliederten Aufkommens- und Verwendungstabellen der VGR des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2010 sowie die entsprechende, noch tiefer gegliederten Tabelle für das Jahr 2000 (ca. 3.000 Gütergruppen x 120 Produktionsbereiche). Diese Tabellen sind für interne Abstimmzwecke konzipiert und werden deshalb nicht veröffentlicht. Alle aus diesen Tabellen zur Projektbearbeitung relevanten Informationen wurden daher durch das Statistische Bundesamt zur Verfügung gestellt. Daneben wurden für die Aufstellung des Modells zahlreiche weitere Quellen, wie z.B. eine tief gegliederte landwirtschaftliche Input-Output Tabelle (46 Produktionsprozesse)² sowie Sektorstudien (z.B. Bauwirtschaft und Verkehr) genutzt.

2.1.1.4.2 Anpassungen des IOT-Konzeptes

Insbesondere im Hinblick auf die Ableitung von auf den Verkehr bezogen Szenarien musste das bestehende Konzept der IOT abgewandelt werden. Eine umfassende Darstellung aller Verkehrsaktivitäten in der IOT für das Basisjahr und die Szenarien erfordert zwei wichtige Abänderungen des IOT-Konzeptes:

- ▶ Funktionale Darstellung aller Verkehrsaktivitäten
- ▶ Explizite Berücksichtigung der Verkehrsleistungen beim internationalen Transport der importierten Güter

Funktionale Abgrenzung: In der Energiebilanz und in TREMOD³ sind die Verkehrsleistungen funktional abgegrenzt. Jedem (berücksichtigten) Verkehrsträger werden eine Transportleistung und ein Energieverbrauch zugerechnet. Das Abgrenzungskonzept der IOT folgt mit der Verwendung homogener Gütergruppen und homogener Produktionsbereiche grundsätzlich dem Funktionalkonzept. So werden auch die meisten Transportaktivitäten durch eigene Gütergruppen/Produktionsbereiche dargestellt.

Das reine Funktionalprinzip wird aber in der IOT bei der Abbildung des Werk- und des Individualverkehrs durchbrochen. Diese Transportleistungen werden nämlich nach institutionellen Gesichtspunk-

² Diese wird regelmäßig vom Thünen-Institut im Auftrag der UGR ermittelt.

³ Transport Emission Model. Das Modell wurde am ifeu basiert auf dem UBA-Vorhaben "Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1960 bis 2030" von 1993. Es wurde seit seiner Entwicklung weiter fortgeschrieben und liegt seit 2014 in der aktuellen Version 5.53 vor. TREMOD bildet den Verkehr mit seinen Verkehrsleistungen, Energieverbräuchen und Emissionen für Deutschland seit 1960 und über Szenarien bis 2030 ab.

ten zugeordnet. Der Werkverkehr wird nicht als eigenständige Produktionsaktivität behandelt, sondern wird als eine sogenannte Hilfaktivität [EC, 2008] für den jeweiligen Produktionsbereich, der die Fahrzeuge betreibt, angesehen. Hilfaktivitäten wird in der IOT kein Output zugerechnet (d.h. es gibt keinen expliziten Nachweis der Produktionsleistung in der IOT); vielmehr werden die Inputs (insbesondere Kraftstoffe) für diese Hilfaktivitäten der Hauptaktivität zugeordnet. Dies gilt analog auch für den Individualverkehr der privaten Haushalte. Die Kraftstoffeinsätze und sonstigen Inputs werden dem Konsum der privaten Haushalte zugerechnet. Es wird ebenfalls kein Output nachgewiesen.

Durch diese „institutionelle Abgrenzung“ des Werkverkehrs und des Individualverkehrs in der IOT wird ein Teil der Verkehrsaktivitäten ausgeblendet (kein Nachweis von Outputs und Inputs). Dieser Ansatz schränkt die Nutzbarkeit des Modells für die Aufstellung von Verkehrsszenarien erheblich ein. Darüber hinaus wird auch die Überleitung von Angaben aus TREMOD, der wesentlichen externen Quelle für die Aufstellung von Verkehrsszenarien, und der Energiebilanz in das IOT-Modell erschwert. Aus diesem Grunde wurde das bestehende IOT-Konzept für die Zwecke von URMOD so abgeändert, dass die Aktivitäten des Werkverkehrs und des Individualverkehrs mit Hilfe von eigenständigen Gütergruppen/Produktionsbereichen mit eigenständigen Inputs und Outputs nach dem Funktionalkonzept dargestellt werden.

Die erforderlichen Informationen über die Outputs (gemessen in Tonnen- bzw. Personenkilometern) wurde aus TREMOD übernommen. Für die Ausgliederung der Energieinputs für den Werk- und Individualverkehr konnte auf Überleitungstabellen der UGR zur Zuordnung der Angaben der funktional abgegrenzten Energiebilanz zum Werk- und Individualverkehr zurückgegriffen werden. Nicht-energetische Inputs, die allerdings aus Rohstoffsicht relativ unbedeutend sind, konnten wegen fehlender Daten nicht entsprechend umgesetzt werden.

Aufgrund dieser durchgehenden Realisierung des Funktionalkonzepts stehen somit für alle Verkehrsaktivitäten und deren Inputs Koeffizienten der A-Matrix zur Verfügung, die für die Aufstellung von Szenarien variiert werden können.

Internationale Transporte: Ferner wurde die Gliederung der IOT um 15 Verkehrsträgertypen (Gütergruppen/Produktionsbereiche) erweitert für solche Transportaktivitäten, die sich auf den Transport der importierten Güter zwischen dem Ort der Herstellung und deutschen Zollgrenze beziehen. Diese Erweiterung des Modells um „spezielle Gütergruppen“ folgt dem Zweck, den Rohstoffgehalt dieses Teils der Importe abzuleiten.

Für diese Berechnungen wurde mit dem „**Transportmodell**“ ein spezielles Werkzeug entwickelt. Die Methode zur Aufstellung des Transportmodells lehnt sich an frühere Arbeiten des Statistischen Bundesamtes und des ifeu an [Buyny et al., 2009; Lansche et al., 2007]. Zweck dieses Modells ist die Schätzung von a) Verwendungsstrukturen für die zusätzlichen Gütergruppen für die Erweiterung der IOT und von b) kumulierten Transportleistungen sowie kumulierten Energieaufwänden für die Erweiterung der Matrix des kumulierten Rohstoffgehalts der Importe (siehe nachstehender Abschnitt).

Das Transportmodell beruht auf folgenden Daten, die miteinander kombiniert werden:

- ▶ **Entfernungsmatrix:** Matrix der durchschnittlichen Entfernungen zwischen Herkunftsland der Importe und deutscher Zollgrenze nach Verkehrsträgerarten (ifeu)
- ▶ **Außenhandelsstatistik:** deutsche Importe nach Gütergruppen, Herkunftsländern und Verkehrsträgerarten (Comext)
- ▶ **Packdichte nach Güterarten:** Durchschnittliche Packdichte nach Güterarten (ifeu)
- ▶ **Energieintensität:** Energieeinsatz je Tonnenkilometer nach Verkehrsträgerarten und Packdichte

Als Ergebnis werden für die speziellen Verkehrsträgertypen das Aufkommen und die Verwendungsstruktur (15 Gütergruppen x 274 Produktionsbereiche) sowie die Matrix der kumulierten Rohstoffaufwände (fossile Energieträger x 15 Gütergruppen) für Deutschland ermittelt.

2.1.1.5 Matrix der Primärrohstoffinputs

Die Matrix der direkten Rohstoffinputs in die Ökonomie (M) setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen, der Rohstoffsmatrix für inländische Entnahmen und der Rohstoffsmatrix für Importe.

Inländische Entnahme: Die Angaben zur inländischen Entnahme von Rohstoffen beruhen weitgehend auf den Ergebnissen der Materialflussrechnungen der UGR des Statistischen Bundesamtes. Der Rohstoffgliederung liegt die Klassifikation der Liefertabelle für Eurostat (EW-MFA, Domestic Extraction) zugrunde. Die originären Angaben wurden partiell durch zusätzliche Information erweitert und abgewandelt, z.B. tiefere Disaggregation nach Rohstoffarten.

Die externe Ermittlung der Matrix des Rohstoffgehalts der Importe beruht auf einem Drei-Regionen-Modell, das konzipiert wurde, um bei der Schätzung des Rohstoffgehalts der importierten Güter möglichst weitgehend die Produktionstechnologie der Herkunftsländer zu berücksichtigen.

Nach dem Drei-Regionen Modell werden die Regionen Deutschland, EU-Länder und Nicht-EU-Länder unterschieden. Das originäre RME-Modell für die EU ist nach 182 Produktionsbereichen gegliedert. Für Zwecke des DeteRess-Projektes wurde ein erweitertes EU-Modell aufgestellt, welche die DeteRess-IOT für Deutschland (274 Produktionsbereiche) nahezu spiegelt.

Schätzansätze wurden für folgende Importkomponenten entwickelt:

- ▶ EU-Intra-Handel
- ▶ EU-Extra-Handel
- ▶ Internationaler Transport der Importgüter

Importe EU-Extra-Handel: Zur Ermittlung des Rohstoffgehalts der deutschen Importe aus Nicht EU-Ländern wird die Koeffizienten-Matrix für EU-Importe aus dem Eurostat RME-Modell [Eurostat, 2016] für die EU herangezogen (FL-Matrix).

Aus einer rein konzeptionellen Perspektive betrachtet wäre eine multi-regionalen Input-Output Modells (MRIO) die ideale Lösung für die Schätzung der Importkoeffizienten für ein Land. Die mit Hilfe eines hoch aufgelösten MRIO Ansatzes abgeleiteten Importkoeffizienten würden die Produktionsbedingungen der einzelnen Lieferländer voll repräsentieren. In der Praxis ist allerdings zu bedenken, dass die Implementierung eines für die Rohstoffrechnung adäquaten MRIO Modells äußerst schwierig und aufwändig ist. Die Genauigkeit der derzeit verfügbaren MRIO Modelle ist erheblich eingeschränkt durch die niedrige sektorale und teilweise auch regionale Auflösung und /oder die eingeschränkte Qualität der verfügbaren Ausgangsdaten [Schoer et al., 2013].

Deshalb wurde für die Zwecke des Eurostat RME Berechnungen mit der Entwicklung des so genannten ADTA-IO Modells (adapted domestic technology assumption input output model) ein pragmatischer Ansatz verfolgt, der sehr weitgehend auf den amtlichen Angaben des EU Statistikamtes Eurostat beruht [Eurostat, 2016]

Die Importkoeffizienten des ADTA-IO Modells der EU wurden auf der Grundlage eines zweistufigen Ansatzes ermittelt. In einem ersten Schritt wurde zunächst für alle Importe die inländische Produktionstechnologie unterstellt. Da aber die Produktionstechnologie der Lieferländer für die Importe von den EU Verhältnissen abweichen kann, wurde die ursprüngliche Schätzung in einer nächsten Stufe im Rahmen eines partiellen multi-regionalen Modells weitgehend ersetzt durch besonders relevante länderspezifische Informationen, wie der Erzgehalt und der Anteil von Sekundärmetallen der direkten und indirekten Importe von Metallen und der Gehalt fossilen Energieträgern bei den direkten und indirekten Stromimporten (Strommix). Ein wichtiges Instrument in dem Modell ist auch die Verwendung von physischen Verwendungsstrukturen, die es erlauben den Rohstoffgehalt der meisten direkt importierten Rohstoffe (insbesondere Öl und Gas) zuverlässig zu schätzen.

Zu dem im partiellen multi-regionalen Modell verwendeten diesen Informationen zählen im Einzelnen:

- ▶ physische Verwendungsstrukturen für importierte Rohstoffe (Biomasse, nicht-metallische Mineralien und Energieträger)⁴
- ▶ Rohstoffkoeffizienten der importierten Metalle (entscheidend sind hier Informationen über den Metallgehalt der Erze und den Primärmetallgehalt der importierten Basismetalle)⁵
- ▶ Primärmetallgehalt der indirekten Metallimporte
- ▶ Energieträgermix zur Erzeugung des direkten und indirekten Stromgehalts der Importe
- ▶ Bewertung der Importe zu Inlandspreisen⁶.

Zur Ermittlung der absoluten Rohstoffgehalte der Importe werden die jeweiligen Importkoeffizienten mit dem Importvektor multipliziert. Entsprechend der Abgrenzung der Koeffizienten wurde ein hybrider Importvektor ermittelt, der an den Wert bei der Herstellung der importierten Güter anknüpft. Der Wert wird entweder in monetären oder physischen Einheiten gemessen. Die nicht-monetären Werte beziehen sich auf die jeweilige physische Einheit; die monetäre Bewertung richtet sich wie dargelegt nach den Preisen im Bestimmungsland.

Beide Ansätze zielen darauf ab, die Produktionsbedingungen in den Herkunftsländern der Importgüter möglichst gut zu approximieren. Die dabei benötigten Abgrenzungskonzepte für den Importvektor stellen eine Abweichung vom Standard-IOT-Modell dar, demzufolge ausschließlich der monetäre Wert der Importe beim Grenzübergang in die inländische Ökonomie gemessen wird („Cost Insurance and Freight“-Konzept (CIF)).

Die Importe im EU-Extrahandel werden, gemessen in Rohstoffäquivalenten, deutlich durch Rohstoffe und Halbwaren (insbesondere fossile Energieträger und Metalle) dominiert. Dies hat zur Folge, dass die Schätzung des RME-Gehalts der Importe im EU-Extra Handel zu 80 % auf physischen Relationen und nur zu 20 % auf monetären Relationen beruht.

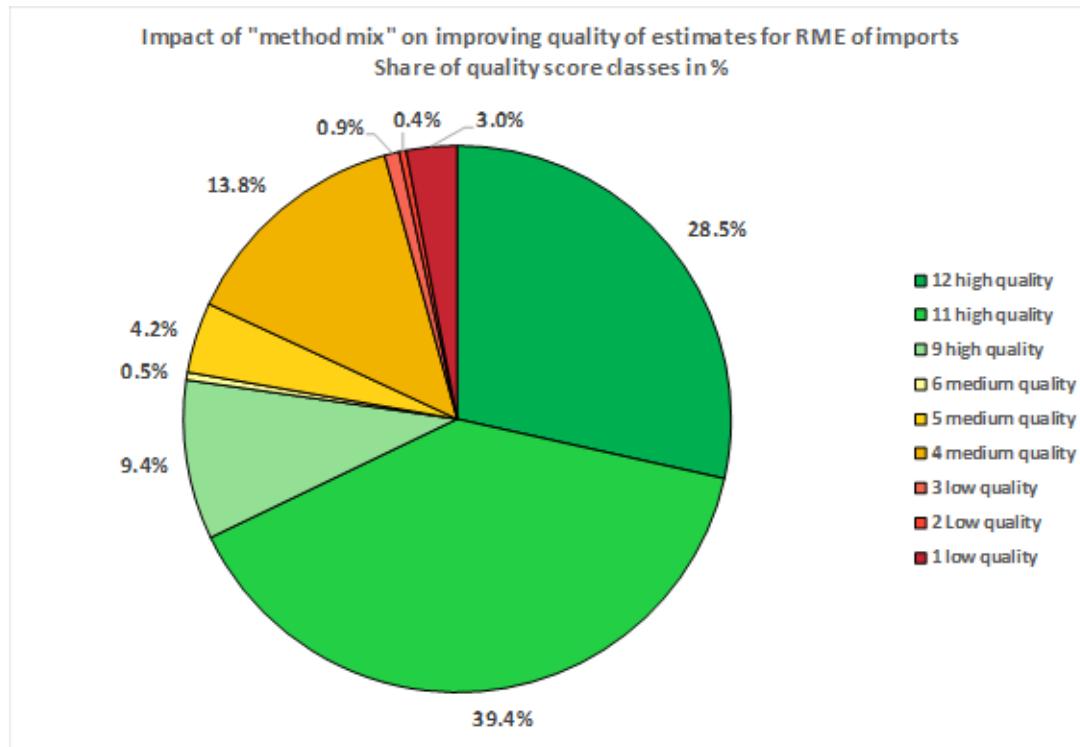
Eine im Rahmen der methodischen Beschreibung des EU-Modell durchgeföhrte Einschätzung der Qualität der Berechnungen kommt zu dem Ergebnis, dass mit dem zum Einsatz kommenden Methodenmix erreicht wird, dass die Produktionsbedingungen der Herkunftsländer der Importe gut abgeschätzt werden können. Abbildung zeigt, dass die Schätzung von gut drei Viertel aller RME der Importe auf Methoden beruht, deren Qualität als hoch eingeschätzt wird. Bei weniger als 5 % der Schätzung liegen Methoden mit geringerer Qualität zugrunde.

⁴ Die Methode, den kumulierten Rohstoffgehalt der Importe von Rohstoffen mit Hilfe der DTA auf der Grundlage von physischen Verwendungsstrukturen zu messen, dürfte zu relativ zuverlässigen Ergebnissen führen. Für Rohstoffe – mit Ausnahme von Metallen – gilt, dass die in Gewichts- oder Energieeinheiten gemessenen Importmengen den kumulierten Rohstoffgehalt recht gut repräsentieren, weil die große Masse des Rohstoffgehalts der Importe von Rohstoffen durch den jeweiligen Rohstoff determiniert wird. Schätzgenauigkeiten reduzieren sich damit weitgehend auf den übrigen Rohstoffrucksack, dessen Anteil aber gering ist. Der Anteil des kumulierten Rohstoffgehalts dieser Rohstoffgüter am Gesamtlohstoffgehalt aller EU-Importe beläuft sich auf rund 40%.

⁵ Die Schätzung des kumulierten Rohstoffgehalts der importierten Metalle beruht auf dem ifeu „Metal Model“, das u.a. Informationen über den Metallgehalt von Erzen aus ca. 500 Geschäftsberichten von Bergbauunternehmen aus den wichtigsten Herkunftsländern der Metallimporte berücksichtigt [ifeu et al., 2012]. Für die Schätzung der Primärmetallgehalte der Importe wurden länderspezifische Angaben der Herkunftsländer (Eisen, Kupfer, Aluminium, Blei Zink) oder Weltdurchschnitte (übrige Metalle) herangezogen. Der Anteil des kumulierten Rohstoffgehalts der Metalle am Gesamtlohstoffgehalt aller EU- Importe beläuft sich auf rund 30 %.

⁶ Eine Umbewertung der originär in der IOT zu CIF-Preisen dargestellten Importe zu Inlandspreisen ist geeignet, die Konsistenz und damit die Schätzgenauigkeit des DTA-Ansatzes erheblich zu verbessern. Unter der DTA werden die Importwerte mit den inländischen Rohstoffkoeffizienten bewertet. Der Nenner dieser Koeffizienten beruht aber auf Inlandspreisen. Eine entsprechende Bewertung der Importe zu Inlandspreisen ist somit aus Konsistenzgründen erforderlich.

Abbildung 1: Auswirkung der methodischen Mischung auf die Qualitätssteigerung der abgeschätzten RMEs der Importe



Quelle: [Eurostat, 2016].

Internationaler Transport der Importgüter: Der Aufwand für den Transport der importierten Güter zwischen dem Ort der Herstellung und der Zollgrenze des Bestimmungslandes wird im Rechenmodell für den EU-Extra-Handel nicht berücksichtigt. Diese Datenlücke muss deshalb durch ein Zusatzmodul, nämlich das im vorangegangenen Abschnitt bereits dargestellte Transportmodell, geschlossen werden.

Das Modell liefert Angaben zum Transport der importierten Güter zwischen dem Ort der Herstellung und der Zollgrenze des Bestimmungslandes, die in die kumulierte Rohstoffmatrix für Importe einfließen (fossile Energieträger x 15 Gütergruppen).

Importe EU-Intra-Handel:

Bei der Schätzung des Rohstoffgehalts der deutschen Importe aus EU-Ländern wird ähnlich vorgegangen wie bei den Importen aus den Nicht-EU Ländern. Grundsätzlich liegen der Schätzung einer ersten Stufe die durchschnittlichen Rohstoffkoeffizienten für die EU zugrunde (FL Matrix). Die Produktions-technologie der einzelnen EU-Lieferländer weicht aber für viele Mitgliedsländer insbesondere bei der Stromerzeugung (Strommix) und dem Sekundärmetallanteil bei der Erzeugung der einzelnen Metalle signifikant vom EU-Durschnitt ab. D.h., je nach Lieferland können sich die Rohstoffgehalte der direkten und indirekten Importe von Strom und Metallen nach Deutschland erheblich unterscheiden. Deshalb wurde in einer weiteren Stufe auch für diese Region ein partielles multi-regionales Modell entwickelt, das auf länderspezifischen Informationen für 27 EU-Länder bezüglich der Faktoren Strommix und Sekundärmetalleinteil (nur Massenmetalle) beruht. Mit dieser Differenzierung wird erreicht, dass die vermutlich bedeutsamsten Unterschiede der Produktionstechnologie innerhalb der EU berücksichtigt werden.

Es ist anzumerken, dass sich die Schätzergebnisse für die RME der deutschen Importe durch die Anpassung nur relativ geringfügig verändern (ca. 1%). Es ist daher nicht damit zu rechnen, dass eine Berücksichtigung weiterer länderspezifischer Unterschiede in der Produktionstechnologie die Ergebnisse spürbar verändern würde.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, dass die Berechnungen für die beiden Regionen Nicht-EU Länder und EU Länder jeweils durch weitere spezifische und ergebnisrelevante Informationen zur Produktionstechnologie in den Lieferländern der Importe hinterlegt sind und somit das Drei-Regionen-Modell de facto eine Vielzahl zusätzlicher länderspezifischer Informationen berücksichtigt.

2.1.1.6 Erweiterung des IOT Modells zur Abbildung der Substitution von Primärrohstoffen

Zur Abbildung von Prozessen der Substitution von Primärrohstoffen durch erneuerbare Energien und durch stoffliche und energetische Verwertung von Abfällen in Rahmen der Szenarien ist es erforderlich, die Gliederung der Gütergruppen und die Gliederung der physischen Inputs in die Ökonomie entsprechend zu erweitern. So werden die einzelnen Arten der erneuerbaren Energieträger und verwerteten Abfälle als gesonderte Gütergruppen dargestellt (siehe Tabelle 52 im Anhang). Darüber hinaus wird die Gliederung der physischen Inputs in die Ökonomie ebenfalls um diese Elemente erweitert (siehe Tabelle 54 im Anhang). Damit wird erreicht, dass die Ströme der erneuerbaren Energien und der verwerteten Abfälle durch die Ökonomie in analoger Weise wie die Primärrohstoffe (kumulierter Aufwand je Gütereinheit) abgebildet werden können⁷ (siehe auch Kapitel 3.2 zur Ergebnisdarstellung). Aus Datengründen konnten bei der stofflichen Verwertung von Abfällen noch nicht alle Materialien berücksichtigt werden.

2.1.2 Szenarien

2.1.2.1 Rechenmodell zur Ableitung der Szenarien

Neben dem Basisjahr 2010 werden zwei Zukunftsszenarien und eine Abschätzung gerechnet:

- ▶ das Trendszenario „Anzunehmende zukünftige Entwicklung“ für das Jahr 2030 (AZE)
- ▶ das Szenario „Technologischer Wandel“ für das Jahr 2030 (TW30)
- ▶ die Abschätzung „Technologischer Wandel Plus“ (TW30+), welche das Potenzial bei einer weitgehenden Umsetzung von Maßnahmen liefert

In den mit URMOD berechneten Szenarien werden Ergebnisse zu Einzelentwicklungen, die im Zuge des DeteRess-Projektes erarbeitet wurden, zu einem konsistenten Gesamtbild für die Wirtschaftsentwicklung und die damit verbundene Rohstoffnutzung zusammengeführt. Der Aufstellung der Szenarien liegt ein komparativ-statistisches Input-Output-Modell zugrunde. Ausgangspunkt für die Aufstellung von Szenarien ist die URMOD-IOT für das Basisjahr 2010. Die Szenarien werden abgeleitet durch Variation bestimmter Parameter von URMOD.

Abbildung zeigt zunächst im oberen Teil den bereits in Abschnitt 2.1.1.3 beschriebenen Ablauf des Leontief-Verfahrens als eine Abfolge bestimmter Matrizenoperationen. Daran anknüpfend wird im unteren Teil der Abbildung das modelltechnische Grundschema für die Szenarioberechnung mit Hilfe von Parametervariationen dargestellt.

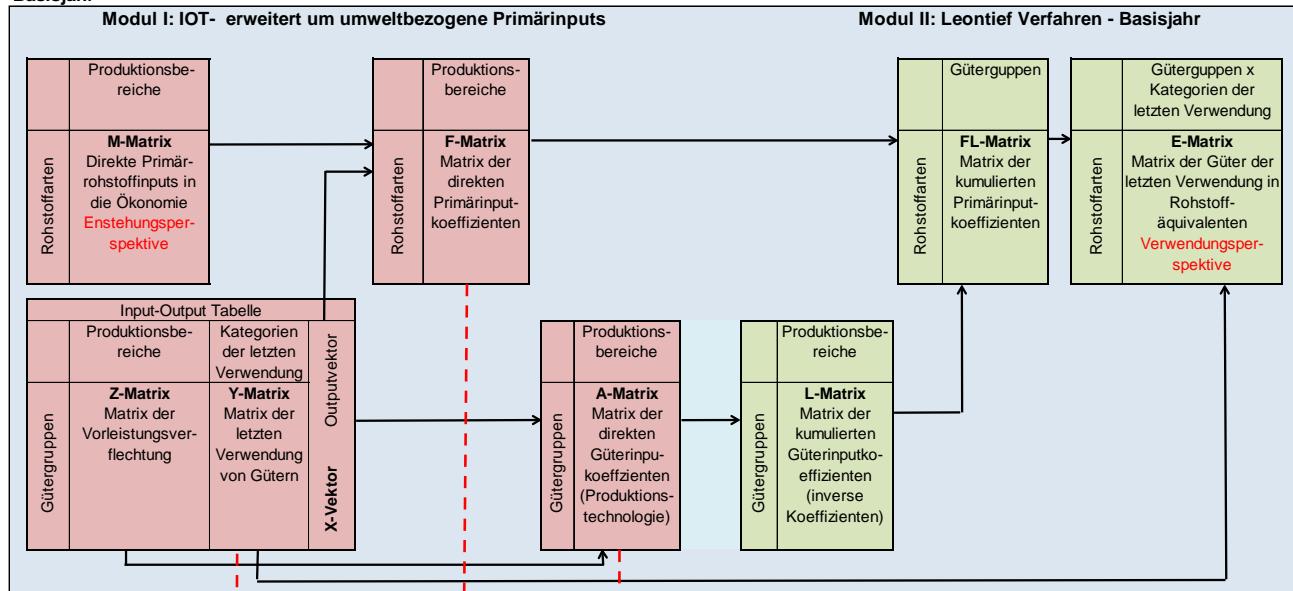
⁷ Modelltechnisch bedeutet diese Ergänzung, dass die im Leontief-Modell zur Berechnung des kumulierten Primärrohstoffaufwandes verwendete Matrix der Primärrohstoffe (M) um die zusätzlichen Kategorien erneuerbare Energien und stofflich und energetisch verwertete Abfälle erweitert wird.

Abbildung 2: Grundschema URMOD

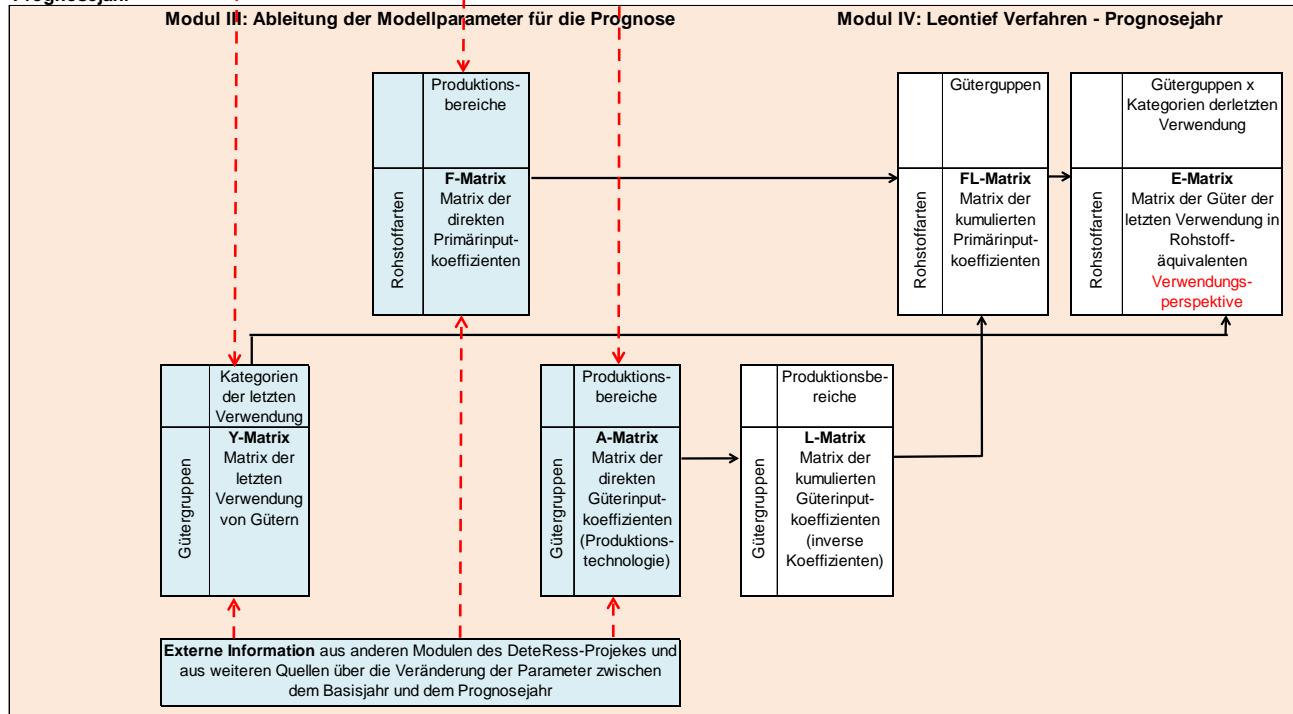
Grundschema Szenario Modell für URMOD

Umweltökonomisches Input-Output Modell zur Schätzung von Primärrohstoffäquivalenten

Basisjahr



Prognosejahr



Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist ersichtlich, dass das Basismodell und das Szenario-Modell über folgende Parametertypen miteinander verknüpft sind (rote Pfeile):

- Endnachfragematrix (Konsum, Investitionen und Exporte), Y Matrix
- Matrix der direkten Rohstoffkoeffizienten, F Matrix
- Matrix der direkten Güterinputkoeffizienten, A Matrix

Dies bedeutet, dass die varierten Modellparameter exogen ermittelt werden. Die übrigen Variablen des Szenario-Modells werden dagegen endogen bestimmt.

Rechentechnisch erlaubt das Modell die Ableitung von Ergebnissen für einzelne Maßnahmen und Maßnahmenbündel durch multiplikative Verknüpfung der einbezogenen Parametervariationen. Das Basismodell liefert für das Bezugsjahr eine vollständige, konsistente und empirisch fundierte Beschreibung der Güter- und Rohstoffströme in der Volkswirtschaft auf der Grundlage einer relativ hoch aufgelösten IOT.

Durch Parametervariationen werden neue Systemzustände simuliert. Die logische Kohärenz des Modells bleibt auch nach Parametervariation voll erhalten. D.h. die abgeleiteten Systemzustände verkörpern jeweils konsistente Systembeschreibungen.

2.1.2.2 Überleitung externer Informationen in das Modell

Konzeptanpassungen: Externe Informationen für die Variation von Modellparametern stammen aus verschiedenen Quellen, wie gesamtwirtschaftlichen ökonomischen Szenarien oder Prognosen, Bevölkerungsvorausberechnungen, verschiedenen sektoralen Studien sowie plausiblen Setzungen.

Zumeist entsprechen die verfügbaren originären Informationen nicht exakt den Abgrenzungen der zu variierenden Parameter. D.h. in diesen Fällen können Ergebnisse der Sektorstudien nicht unmittelbar in das Modell eingespeist werden. Als besonders aufwändig erweist sich die Aufstellung von Indikatoren zur Anpassung der A-Matrix, da die Sektorstudien und andere Ausgangsinformationen häufig keine unmittelbaren Informationen zur Fortschreibung dieser Technikparameter bereithalten.

Damit die externen Angaben als Indikator für die Parametervariationen nutzbar sind, müssen diese in einem Zwischenschritt durch möglichst weitgehende Anpassung an die Konzepte der Bezugsparameter im IOT-Modell umgeformt werden. In einigen Fällen ist diese Umformung relativ einfach durchzuführen. So wird zum Beispiel angenommen, dass die Veränderung des Bruttoinlandprodukts die Veränderung der letzten inländischen Verwendung repräsentiert.

In anderen Fällen sind dagegen mehr oder weniger umfangreiche Schätzmodelle aufzustellen, um geeignete Indikatoren für die Parametervariation abzuleiten. So wird z.B. der Einfluss der aus der Bevölkerungsprognose entnommenen Veränderung der Altersstruktur der Bevölkerung auf die Endnachfrage nach Konsumgütern durch ein eigenes, an URMOD angegliedertes Modell geschätzt, das u.a. zusätzliche Informationen über das Konsumverhalten nach Altersgruppen einbezieht.

Die Ableitung von Indikatoren für die Variation der Parameter der A-Matrix aus Sektorstudien erfordert in der Regel eine Bereinigung um den Skaleneffekt. Die Variation der Parameter der A-Matrix bildet Änderungen der Produktionstechnik ab. Demgegenüber zeigen die Informationen der Sektorstudien zumeist den Gesamteffekt aus Technik- und Produktionsmengenänderung.

Konsistenz: Die interne Konsistenz des URMOD Szenarien selbst ist gewährleistet. Dies trifft aber nicht zwangsläufig in Bezug auf die verwendeten sektoralen Untersuchungen zu.

Ein wichtiger Aspekt ist, dass die Mengengerüste unterschiedlich sein können. Das Mengengerüst von URMOD geht im Wesentlichen auf die monetäre IOT des Statistischen Bundesamtes und den dahinterstehenden sehr detaillierten Aufkommens- und Verwendungstabellen sowie den Angaben der UGR über die gesamtwirtschaftliche Rohstoffextraktion zurück, die zu einem lückenlosen und überschneidungsfreien gesamtwirtschaftlichen Modell verbunden und darüber hinaus auch in Zeitreihenform verfügbar sind. Innerhalb dieses Rahmens sind das Aufkommen und die Verwendung aller Güter und Rohstoffe in der Volkswirtschaft voll aufeinander abgestimmt. Sektorstudien stützen sich dagegen häufig auf andere Datenquellen, d.h. die Mengengerüste im Basisjahr können unterschiedlich sein. Die Informationen aus den Sektorstudien werden als relative Änderungen an die relevanten Parameter in URMOD angelegt. Folglich können die absoluten Änderungen abweichen.

Hinzu kommt, dass für URMOD jeweils nur selektiv solche Informationen berücksichtigt werden, die für die einzelnen Parametervariationen (wie z.B. die Änderung der Produktionstechnik) benötigt werden und nicht das Gesamtbild der jeweiligen Einzelstudien. So ist es zum Beispiel denkbar, dass die in

einer Sektorstudie als Rahmenbedingung angenommene Nachfrage- oder Produktionsentwicklung nicht voll mit dem entsprechenden Ansatz in URMOD übereinstimmt, da diese Größen dort aus dem Gesamtzusammenhang des Modells abgeleitet werden. Auch kann es Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Sektorstudien geben.

Trendszenario AZE 2030

Die Szenarien setzen sich aus einzelnen Maßnahmen bzw. Bündeln von Maßnahmen zusammen. Die Gesamtszenarien ergeben sich durch Verknüpfung der Einzelmaßnahmen. Die Maßnahmenkonstellationen für das AZE- und das TW30-Szenario und die TW30+-Abschätzung sind unterschiedlich.

Tabelle 1 liefert einen zusammenfassenden Überblick über die berücksichtigten Einflussfaktoren für das AZE-Szenario. Weitere Details zur Überleitung zwischen externen Informationen und URMOD finden sich in den Abschnitten 5-8.

Grundsätzlich wird zwischen generellen Faktoren/ Generalbereichen (1 bis 6) und speziellen Faktoren/ Spezialbereichen (7-12) unterschieden. Modelltechnisch werden Parametervariationen aufgrund der generellen Faktoren wie insbesondere dem Wirtschaftswachstum und dem technischen Fortschritt nur auf die Bereiche angewandt, die nicht von den Spezialbereichen abgedeckt sind. Die entsprechenden Einflüsse für die Spezialbereiche werden aus den Sektorstudien abgeleitet. Zum Beispiel schlägt sich der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung sowohl allgemein bei der Konsumnachfrage als auch speziell in der Nachfrage nach Wohnungen nieder. Die Entwicklung der Wohnungsnachfrage wird für die Zwecke des Modells aber aus den entsprechenden Spezialstudien übernommen.

Tabelle 1: Überblick über die bei der Aufstellung des AZE-Szenarios (2030) berücksichtigten Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Erläuterung
Generelle Maßnahmen ohne Spezialbereiche		
1	Wirtschaftswachstum	In URMOD gibt es keinen Parameter, der die generelle <u>Entwicklung des BIP</u> unmittelbar abbildet. Vereinfachend wurde deshalb die externe Setzung über die Veränderung des BIP im Szenariozeitraum als Veränderung auf die Zellen der Y-Matrix (Letzte inländische Verwendung und Exporte) übertragen.
2	Rohstoffintensität der inländischen Produktion	Der Faktor <u>Rohstoffintensität im Inland</u> beschreibt die Veränderung des kumulierten Rohstoffaufwandes bei der inländischen Produktion aufgrund des autonomen technischen Fortschritts. Die Faktoren für die Veränderung der Rohstoffkoeffizienten wurden mit Hilfe eines externen Modells abgeleitet, das sich auf Daten zur Vergangenheitsentwicklung der Rohstoffintensität stützt.
3	Rohstoffintensität der Importe	Der Faktor <u>Rohstoffintensität der Importe</u> beschreibt die Veränderung des kumulierten Rohstoffaufwandes zur Herstellung der importierten Güter.
4	Außenhandelsverflechtung	Der Faktor <u>Außenhandelsverflechtung</u> beschreibt das zunehmende relative Gewicht der Exporte und Importe im Vergleich zur letzten inländischen Verwendung. Abgebildet wird dieser Effekt innerhalb des Modells durch die Entwicklung des Anteils der Exporte an der letzten Verwendung (Exportanteil). Die Importe werden endogen abgeleitet.
5	Altersstrukturreffekt Konsum	Die <u>Altersstruktur der Bevölkerung</u> ändert sich im Szenario-Zeitraum. Zugleich unterscheidet sich <u>die Struktur der Nachfrage nach Konsumgütern</u> nach Altersgruppen. Der Altersstrukturreffekt quantifiziert den Einfluss der geränderten Alterszusammensetzung auf die künftige Nachfrage nach Konsumgütern.

6	Einkommenseffekt Konsum	Das <u>Pro-Kopf-Einkommen</u> der Bevölkerung ändert sich aufgrund des Wirtschaftswachstums und der Bevölkerungsentwicklung. Die <u>Struktur der Nachfrage nach Konsumgütern</u> ändert sich mit der Höhe des Einkommens. Der „Einkommenseffekt“ quantifiziert diesen Einfluss.
Spezielle Sektoren		
7	Verkehrs-dienstleistungen	Der Faktor <u>Verkehrsdienstleistungen</u> fasst zwei unterschiedliche Einzelfaktoren zusammen, die Entwicklung der Energieeffizienz (Energieaufwand je Einheit Transportleistung) der einzelnen Verkehrsträger und die Nachfrage nach Transportleistungen.
8	Fahrzeuge	Der Faktor <u>Fahrzeuge</u> berücksichtigt die Bruttoinvestitionen in Transportausrüstung und den laufenden Erhaltungsaufwand für Fahrzeuge.
9	Bauleistungen	Der Faktor <u>Bauleistungen</u> berücksichtigt den kumulierten Rohstoffaufwand für die Herstellung der Bauinvestitionen sowie für den laufenden Erhaltungsaufwand für Bauten nach Bauarten.
10	Stoffliche Verwertung von Abfällen	Der Faktor <u>stoffliche Verwertung von Abfällen</u> (Recycling) schlägt sich im Modell zweifach als Änderung der Produktionstechnik nieder, nämlich beim Input von Recyclingmaterial in die relevanten Produktionsprozesse und als Gegenbuchung bei den eingesparten Materialien.
11	Stromerzeugung	Der Faktor <u>Stromerzeugung</u> fasst zwei Einzelfaktoren zusammen: die Entwicklung der Struktur des Energieträgereinsatzes bei der Stromerzeugung (Strommix) und die Entwicklung der Effizienz des Stromeinsatzes.
12	Energie – sonstige	Der Faktor <u>sonstige Energie</u> fasst folgende Einzelfaktoren (jeweils ohne Stromeinsatz) zusammen: die energetische Verwertung von Abfällen und primärer Biomasse sowie sonstige erneuerbare Energieträger.

Szenario zum technologischen Wandel TW30 und die Abschätzung TW30+

In diesem Abschnitt werden die dem TW30-Szenario und der TW30+-Abschätzung zugrundeliegenden Maßnahmen erläutert. Tabelle 2 liefert einen zusammenfassenden Überblick über die berücksichtigten Einflussfaktoren. Weitere Details zur Überleitung zwischen externen Informationen und URMOD finden sich in den Abschnitten 5-8.

Tabelle 2: Überblick über die bei der Aufstellung der TW-Szenarien berücksichtigen Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Erläuterung
Verkehr		
13	PKW Leichtbau, Herstellung	Gegenstand dieser Maßnahme ist der Effekt <u>der Substitution von Stahl- durch CFK-Karosserien</u> bei der <u>Herstellung</u> von PKW.
14	PKW Leichtbau, Betrieb	Gegenstand dieser Maßnahme ist die Auswirkung der <u>Substitution von Stahl- durch CFK-Karosserien</u> auf den <u>Kraftstoffverbrauch</u> der PKW
15	Luftfahrzeuge Leichtbau, Betrieb	Der Faktor verstärkter <u>Leichtbau bei Luftfahrzeugen</u> betrachtet die dadurch erzielten Kraftstoffeinsparungen.
16	Verbesserung der Effizienz beim Schienengüterverkehr	Der Faktor <u>Schienengüterverkehr</u> stellt den Einfluss einer effizienteren Nutzung von Rollmaterial für den Eisenbahngüterverkehr dar.

17	Recycling von Straßenbaumatieralien	Der Faktor <u>Recycling von Straßenbaumatieralien</u> betrachtet die Substitution von Asphalt durch Sekundärmaterial beim Straßenbau (verstärktes Recycling).
----	-------------------------------------	---

Baustoffe und Bauleistungen

18	Ressourceneffizienterer Beton	Ressourceneffizienterer Beton bezieht sich auf weniger materialintensive Ansätze der Zementherstellung.
19	Materialeffizienz im Hochbau	Der Faktor <u>Materialeffizienz im Hochbau</u> berücksichtigt mehrere Einflussfaktoren, wie verminderter Betoneinsatz durch bessere Planung/Technik und einen höheren Anteil von Holzhäusern.
20	Recycling von Kalksandsteinen	Der Faktor <u>Recycling von Kalksandsteinen</u> betrachtet die Substitution von Sand durch Sekundärmaterial beim Produktionsbereich Herstellung von Mauersteinen.
21	Recycling von Leichtbetonsteinen	Der Faktor <u>Recycling von Leichtbetonsteinen</u> betrachtet die Substitution von Ton durch Sekundärmaterial beim Produktionsbereich Betonherstellung.
22	Kabelleitungen Hochbau	Der Faktor <u>Kabelleitungen Hochbau</u> betrachtet die Substitution von Kupferkabeln im Hochbau durch Aluminiumkabel.

Energie

23	Strommix	Der Faktor <u>Strommix</u> bündelt zwei verschiedene Typen von Maßnahmen die sich auf die Stromherstellung beziehen: a) Substitutionsprozesse zwischen Energieträgern und b) Erhöhung von Wirkungsgraden bei der Stromerzeugung.
24	Elektromotoren	Der Faktor <u>Elektromotoren</u> bildet den zunehmenden Einsatz von effizienteren Elektromotoren ab.
25	Dampfkessel	Der Faktor <u>Dampfkessel</u> bildet den zunehmenden Einsatz von effizienteren Dampferzeugern ab, die zu einem verminderten Gasbedarf führen. Ansatzpunkt: A-Matrix

Sonstige

26	Rohstoffintensität Inland TW30	Der Faktor <u>Rohstoffintensität Inland TW30</u> deckt weitere, bei den ausgewählten Faktoren 13-25 nicht berücksichtigte Verbesserungen der Rohstoffintensität ab. Es wird damit unterstellt, dass auch in den nicht untersuchten Bereichen weitere über AZE hinausgehende, bisher nicht spezifizierte Produktivitätsverbesserungen zu erwarten sind.
----	--------------------------------	--

2.2 Konsistenzprüfung

Der oben aufgeführte methodische Ansatz hat Konsequenzen auf das Vorgehen bei der Datenbeschaffung. Im Wesentlichen ist zu vermeiden, dass die Eingangsdaten zu Widersprüchen führen.

2.2.1 Szenario AZE

Die konkrete Ausgestaltung des Szenarios AZE umfasste in einem ersten Schritt die Auswahl der wesentlichen Trends und Maßnahmen in den drei Sektoren bis 2030. Dazu wurden sektorspezifische Studien gesichtet. Im Rahmen des Fachgesprächs am 24./ 25. März 2015 in Berlin wurden die Studien identifiziert, die die zukünftige Entwicklung im jeweiligen Sektor basierend auf wesentlichen Trends und beschlossenen Maßnahmen am plausibelsten beschreiben. Die wesentlichen Studien sind:

- ▶ Im Energiesektor: BMUB [2015] „Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525 / 2013 / EU“.
- ▶ Im Bausektor: Deilmann et al. [2014a], „Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau – Endbericht“ und Knappe et al. [Knappe et al., n.d.] (noch unveröffentlicht):

- „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung“, sowie VDI-ZRE [2015]: „Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau“ für die anderen Bereiche des Tiefbaus.
- Im Verkehrssektor: Intraplan et al. [2014]: „Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht“ und ifeu [2014a]: „Aktualisierung „Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030“ (TRE-MOD) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013)“. Die Auswahl der Studien wurde mit dem Projektionsbericht 2015 des BMUB abgeglichen, der sich auch überwiegend auf die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 stützt.

In einem zweiten Schritt wurden die ausgewählten Studien hinsichtlich ihrer Konsistenz zueinander überprüft. Alle ausgewählten Studien basieren auf Modellierungen, die eigene Rahmendaten zu allgemeinen gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen enthalten. Diese mussten auf ihre Übereinstimmungen und Abweichungen hin überprüft werden. Dazu wurden die in den Studien angenommenen allgemeinen Rahmendaten zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung vergleichend analysiert. Auch die Einbeziehung allgemeiner und übergeordneter Trends, wie bspw. die Urbanisierung oder die Klimaerwärmung, wurde vergleichend überprüft. Weiterhin wurden die Studien hinsichtlich spezifischer Annahmen verglichen, die für zwei der Sektoren oder nur einzelne Aspekte innerhalb der Sektoren relevant sind, darunter insbesondere die Wohnflächenentwicklung (relevant für den Energiesektor, Teilbereich Wärme, und den Hochbau) und die Verkehrsentwicklung (relevant für den Verkehrssektor und den Energiesektor, Teilbereich Kraftstoffe, und den Tiefbau, Teilbereich Straßen). Der Vergleich zeigte, dass die Annahmen zwar nicht hinsichtlich jedes Details exakt übereinstimmen, was beispielsweise auf das Zurückgreifen auf unterschiedliche Bevölkerungsprognosen zurückzuführen ist. Das generelle Zukunftsbild war in allen gewählten Studien aber sehr ähnlich: Die Bevölkerung geht bis 2030 leicht zurück, während die Bruttoinlandsproduktion leicht ansteigt. Die internationale Integration eines politisch stabilen Deutschlands in einem politisch stabilen Europa nimmt weiterhin zu, und die Nachfrage nach verschiedenen Gütern, darunter die Wohnfläche oder die Verkehrsleistung, nimmt bis 2030 zu. Soweit berücksichtigt, gehen alle genutzten Studien von kontinuierlich steigenden Energiepreisen jedoch keinen anderen auf die Wirtschaft durchschlagenden Rohstoffverknappungen aus.

Wesentliche Inhalte der Studien wurden ferner hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die anderen Sektoren analysiert. Da viele relevante Annahmen und Ausgangsüberlegungen ähnlich sind und entsprechende Auswirkungen in den unterschiedlichen Studien bereits berücksichtigt wurden, wurde auf die Nutzung eines ausführlichen und umfangreichen Instrumentariums wie der Cross-Impact-Bilanzanalyse [Weimer-Jehle et al., 2011] verzichtet. Anstelle dessen wurden relevante Verbindungen und Auswirkungen von Veränderungen eines Sektors auf den anderen einzeln überprüft, beispielsweise inwiefern der angenommene rückläufige Bedarf an Heizwärmeenergie im Energiebereich mit dem zusätzlichen Bedarf an zusätzlichen Dämmstoffen im Hochbau konsistent einhergehen, basierend auf den jeweiligen Annahmen zum energetischen Stand im Neubau und bei Sanierungen. Im Falle, dass wichtige Annahmen in einem Sektor keine konsistente Entsprechung in einem anderen Sektor zeigten, wurden wichtige Auswirkungen der Annahmen in einer Studie auf die entsprechenden anderen Bereiche übertragen. Als ein Beispiel sei an dieser Stelle die Annahme der rückläufigen Flächenneuversiegelung genannt, die in der Studie zur Entwicklung des Massebedarfes im kommunalen Straßenbau [Knappe et al., n.d.] angenommen wurde, jedoch nicht den ermittelten Materialmengen in der Studie zum Rohstoffbedarf im Tiefbau [VDI-ZRE, 2015] enthalten sind. Daher wurde die Annahme der rückläufigen Flächenneuversiegelung auf entsprechende Bereiche des Tiefbaus (Wasser- und -entsorgung, sowie die Verlegung von kommunalen IKT- und Stromleitungen) übertragen und der Materialbedarf neu abgeschätzt. Im Kapitel 6 werden die Anpassungen detailliert aufgeführt.

2.2.2 Szenario TW30 und in der Abschätzung TW30+

Bezugspunkte für die reduzierten Rohstoffverbräuche im Szenario TW30 und der Abschätzung TW30+ sind jeweils die Annahmen des Szenarios AZE. Ausgehend von der Inanspruchnahme verschiedener Rohstoffe in diesem Referenzszenario werden die relativen Einsparpotenziale berechnet, die sich durch den Einsatz ausgewählter Technologien mit effizienterem Rohstoff-einsatz ergeben. Die Einsparpotenziale ergeben sich unmittelbar aus den technischen Parametern der eingesetzten Produktionsverfahren und dem Anteil der jeweiligen Rohstoffe, die insgesamt in diesen Verfahren zum Einsatz kommen. Die für die Effizienzsteigerung verantwortlichen Technik-Parameter sind anwendungsspezifisch und in den entsprechenden Unterkapiteln der Kapitel 4 und 6 bis 8 im Detail beschrieben. Die Menge der Rohstoffe, auf welche die Ressourceneffizienztechnologien angewendet werden, ergibt sich i.d.R. entweder aus einer entsprechenden Aufgliederung der Inputs der relevanten Wirtschaftszweige direkt in URMOD (z.B. die Herstellung eines effizienter produzierten Substituts für Portlandzement im Wirtschaftszweig "Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips") oder aus konkreten Mengenangaben in anderen Studien. Werden, wie im Fall des Asphalt-Recyclings, solche Studien Dritter zugrunde gelegt, so erfolgt ein Abgleich zwischen den Annahmen dieser und der vorliegenden Studie und ggf. eine Korrektur.

3 Status im Ausgangsjahr

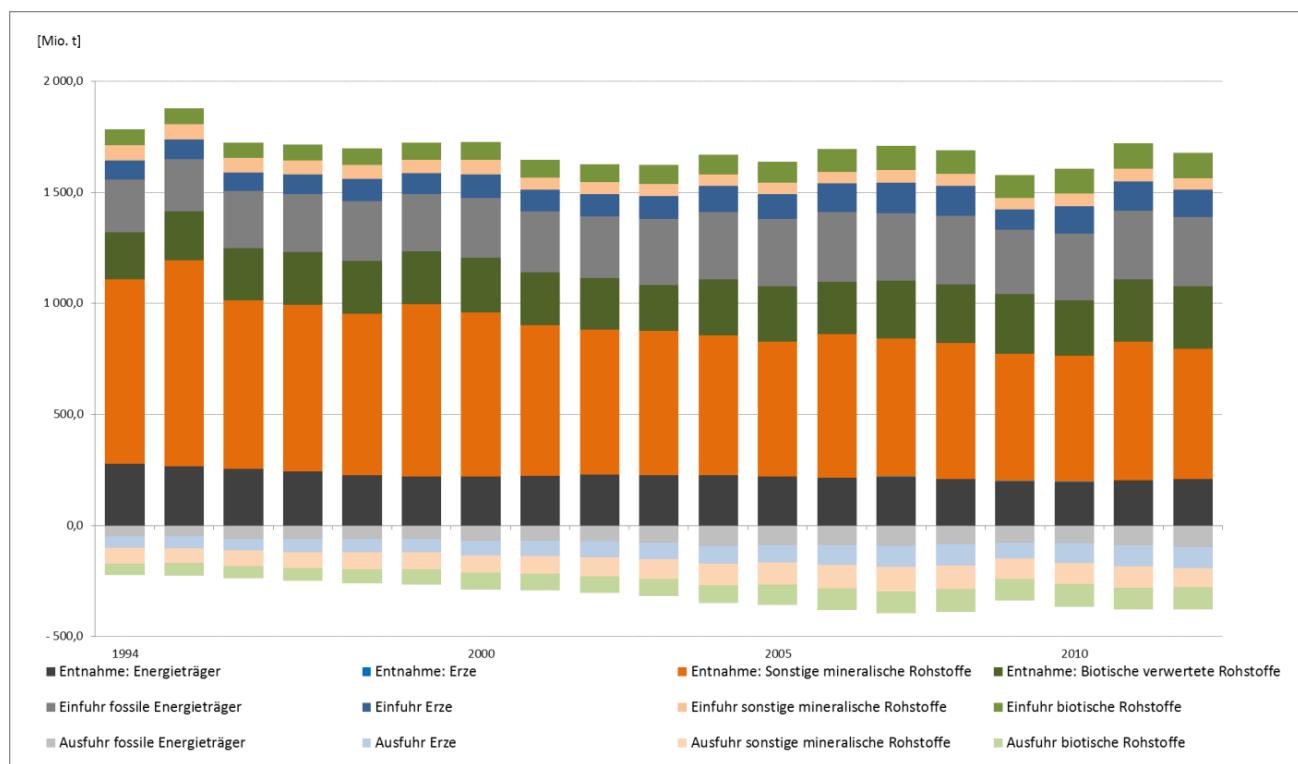
3.1 Entwicklung des Rohstoffbedarfs in der Vergangenheit und Wahl des Basisjahres

Die in diesem Abschnitt dargestellte langfristige Entwicklung des Rohstoffbedarfs für den Zeitraum 1994 bis 2012 beruht auf Angaben der Materialflussrechnung (EW-MFA) der UGR des Statistischen Bundesamtes (Destatis). Die EW-MFA legt bei den Importen und Exporten grundsätzlich Eigengewicht der Materialien zugrunde. Dagegen werden die Angaben im nachstehenden Abschnitt, der auf den Ergebnissen von URMOD beruht, in Rohstoffäquivalenten dargestellt (siehe Abschnitt 2.1.1.2).

Deutschland ist eines von wenigen Ländern im internationalen Vergleich, das in den vergangenen Dekaden einen rückläufigen inländischen Materialinput und -konsum (DMI und DMC) aufweist (vgl. Abbildung 3). Allerdings wird als Ausgangsjahr der Rohstoffdaten das Jahr 1994 verwendet, in dem in Folge der Wiedervereinigung umfangreiche Bauaktivitäten in Ostdeutschland stattfanden. Den Angaben von Destatis [Destatis, 2014a] folgend, ging die verwertete inländische Entnahme zwischen 1994 und 2012 um 18 % (-242 Mio. t) zurück. Während die Entnahme von biotischen Rohstoffen anstieg (+33 %, 69 Mio. t), sank die Entnahme abiotischer Rohstoffe um 28 % (-311 Mio. t). Rückläufig war insbesondere die Entnahme von Bausanden, gefolgt von der Entnahme von Steinkohle. Im selben Zeitraum stiegen die Einfuhren um 30 % (141 Mio. t). Während die Einfuhren der sonstigen mineralischen Stoffe (Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren) rückläufig waren (-22 %, -15 Mio. t), stiegen die Einfuhren von biotischen, metallischen und fossilen Rohstoffen (einschl. Halb- und Fertigwaren) um 61 %, 39 % und 32 % (+43, +34 und +76 Mio. t). Die Ausfuhren nahmen stärker zu als die Einfuhren (+89 %, +154 Mio. t). Dabei stiegen insbesondere die Ausfuhren von Roh-, Halb- und Fertigwaren von Energieträgern (insg. +97%, +48 Mio. t), gefolgt von Ausfuhren von Roh-, Halb- und Fertigwaren biotischer Rohstoffe (insg. +86%, +46 Mio. t).

Insgesamt sank in dem betrachteten Zeitraum der DMI (Summe Entnahmen plus Summe Importmassen) um 6 %, während der DMC (DMI minus Summe Exportmasse) um 17 % abnahm. Der Anteil der biotischen Rohstoffe am DMC stieg zugleich von 15 % auf 23 % und am DMI von 16 % auf 24 %.

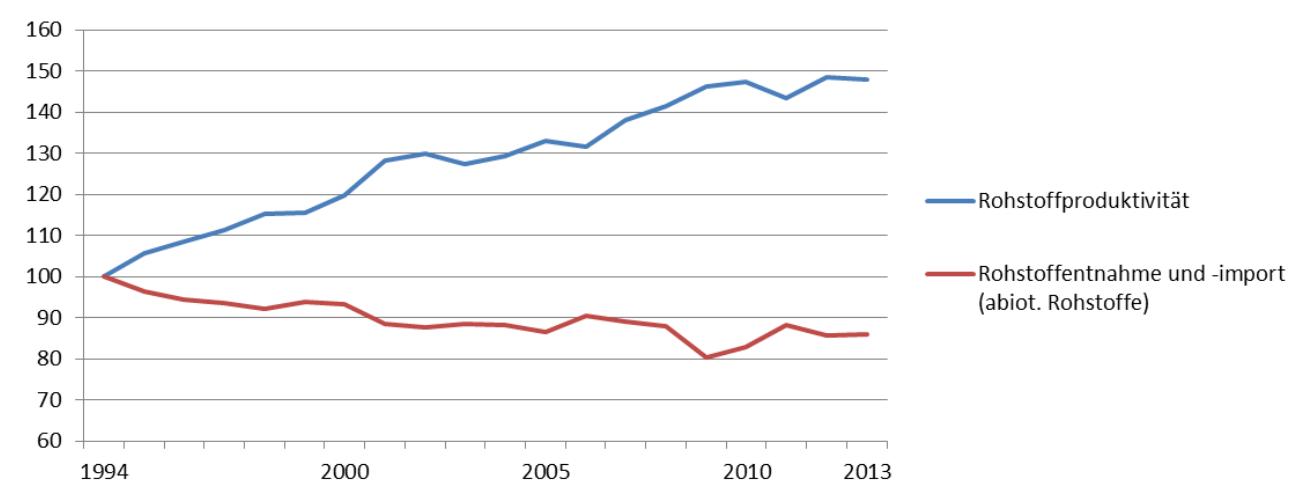
Abbildung 3: Entnahmen, Import- und Exportmassen nach Materialkategorie, 1994 - 2012



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von [Destatis, 2014a].

Die Rohstoffproduktivität, die in Deutschland als BIP pro Einheit entnommener und importierter abiotischer Rohstoffe (einschl. Halb- und Fertigwarenimporte) definiert ist, stieg zwischen 1994 und 2013 um 48 % (vgl. Abbildung 4). Die Steigerungen gehen zu einem erheblichen Anteil auf den Anstieg des BIP zurück; die Entnahmen und Importe der abiotischen Stoffe sanken um nur 14 %.

Abbildung 4: Entwicklung der Rohstoffproduktivität und der abiotischen Rohstoffentnahmen und Importmassen, 1994 – 2013, indexiert



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von [Destatis, 2014a].

Abbildung 12 und Abbildung 13 verdeutlichen den Einfluss der globalen Finanzkrise auf die Jahre 2009 und 2010. Entnahmen und Einfuhren, aber auch die Ausfuhren liegen noch etwas unter dem

Trend, der in den vorhergegangenen 15 Jahren insgesamt zu beobachten ist. Umfangreiche volkswirtschaftliche Daten, wie sie für die Einstellung der URMOD Basisbetrachtung benötigt wurden, lagen zum Beginn der Projektphase zunächst für 2008 und später auch für 2009 und 2010 vor, jedoch noch nicht für die nachfolgenden Jahre. Ein Vergleich der strukturellen Konjunkturdaten zeigte, dass das Jahr 2010 insgesamt typischer, das heißt einem „Normaljahr“ ähnlicher, war als die Jahre 2008 und 2009. Die meisten Quellen für die Szenariengestaltung beziehen sich zudem auf das Betrachtungsjahr 2010, weshalb letztlich aus Gründen der Datenverfügbarkeit und der Repräsentativität 2010 als Basisjahr festgelegt wurde.

3.2 Ergebnisse von URMOD für das Basisjahr 2010

3.2.1 Rohstoffarten

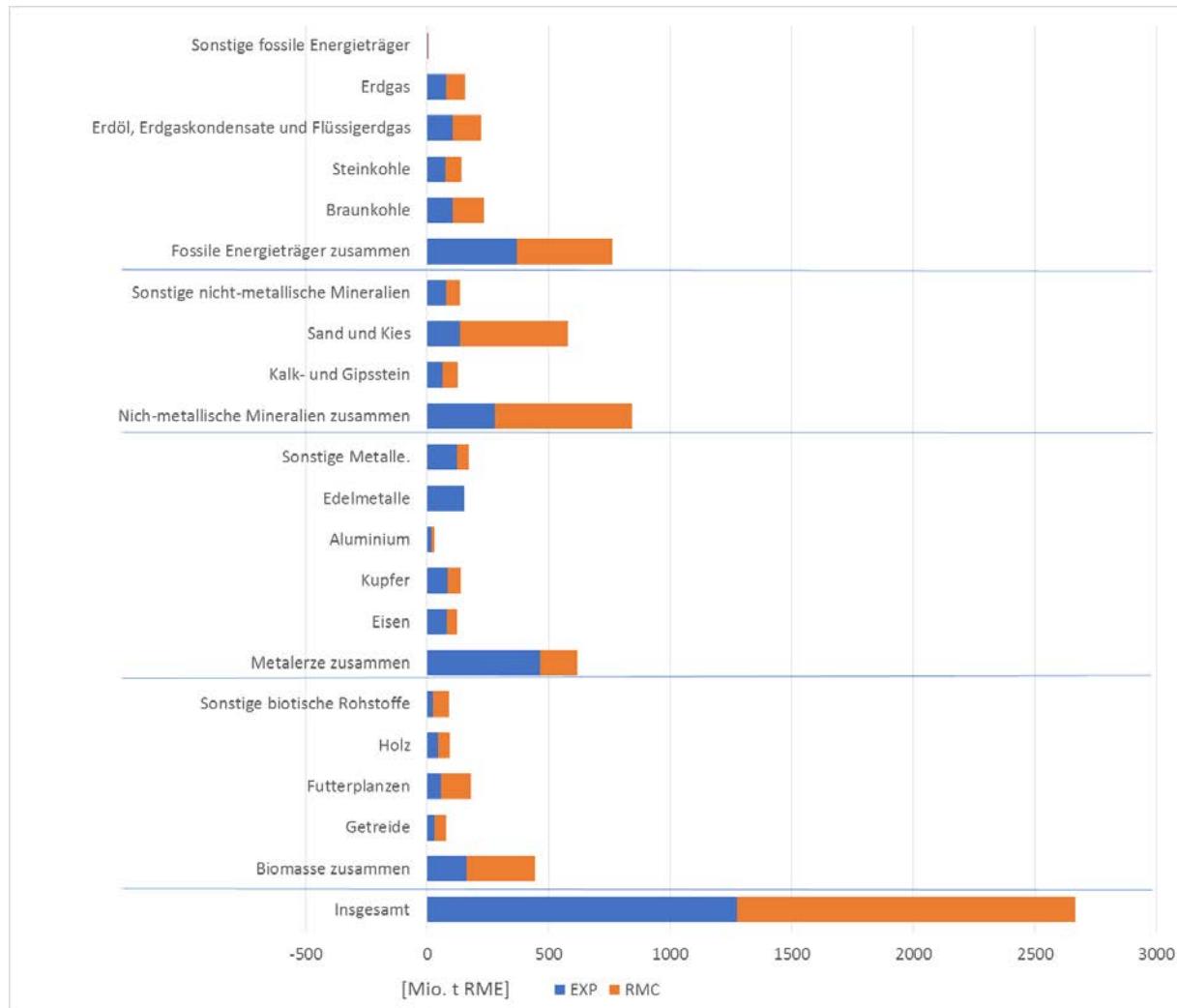
Die nachstehenden Tabellen und Schaubilder zeigen die Verteilung des kumulierten Rohstoffaufwands für Deutschland nach Rohstoffkategorien und Gütergruppen für das Basisjahr 2010.

Der kumulierte Rohstoffaufwand wird nach verschiedenen Darstellungskonzepten verwendet, welche die Rohstoffströme unter unterschiedlichen Perspektiven betrachten (Güterverwendungskategorien). Die Beziehung zwischen diesen monetären Aggregaten wird bezogen auf den korrespondierenden kumulierten Primärrohstoffaufwand durch folgende Identitätsgleichung beschrieben:

$$\begin{aligned}
 & \text{Inländische Entnahme (DE)} \\
 + \text{Importe (in Rohstoffäquivalenten, RME}_{\text{IMP}}\text{)} \\
 = & \text{Primärrohstoffeinsatz (RMI)} \\
 - \text{Exporte (in Rohstoffäquivalenten, RME}_{\text{EXP}}\text{)} \\
 = & \text{inländische Primärrohstoffnutzung (RMC)}
 \end{aligned}$$

Die verwendeten Darstellungskonzepte entsprechen den Konzepten der monetären volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (Zeile monetäre Bezugszahlen). Die Angaben dieser Tabelle in nicht-monetären Einheiten sind somit mit den monetären Angaben der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen kompatibel. Der kumulierte Primärrohstoffaufwand wird in Abbildung 5 nach zusammengefassten Rohstoffarten dargestellt (siehe auch Tabelle 55, Anhang).

Abbildung 5: RMI von Deutschland nach Rohstoffarten



Quelle: URMOD

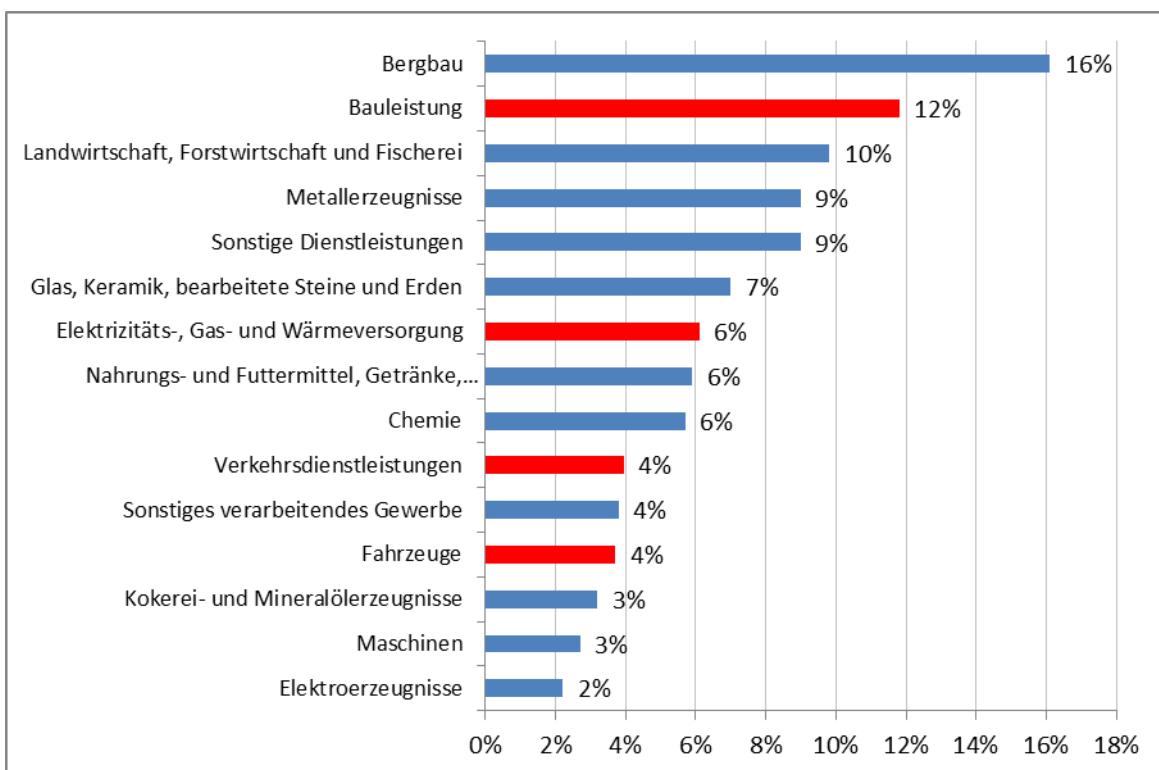
39 % des Aufkommens an Primärrohstoffen entstammt aus inländischer Entnahme. Bei der inländischen Entnahme haben die nicht-metallischen Mineralien und die Biomasse den höchsten Anteil. 61 % des Aufkommens an Primärrohstoffen stammt aus Importen (kumulierter Rohstoffaufwand zur Herstellung der importierten Güter). Bei den Importen dominieren die Metalle und die fossilen Energieträger. Rund drei Viertel des Metallaufkommens in RME (RMI) sind in den exportierten Gütern enthalten. Auch fossile Energieträger werden fast zur Hälfte für die Herstellung von Exportgütern aufgewendet.

3.2.2 Gütergruppen

Mit Hilfe von Ergebnissen zum kumulierten Rohstoffaufwand (RME) nach Gütergruppen kann der Wirtschaftsprozess grundsätzlich aus zwei Blickwinkeln dargestellt werden, nämlich Rohstoffaufwand, der zur Herstellung des Güteraufkommens aus inländischer Produktion und aus Importen verursacht wird, und Rohstoffaufwand, der durch die Verwendung von Gütern ausgelöst wird.

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Verteilung der RME nach Gütergruppen aus der Produktions- und aus der Verwendungssicht.

Abbildung 6: RME nach Gütergruppen aus Produktionssicht, 2010 – Rohstoffdurchsatz in Prozent



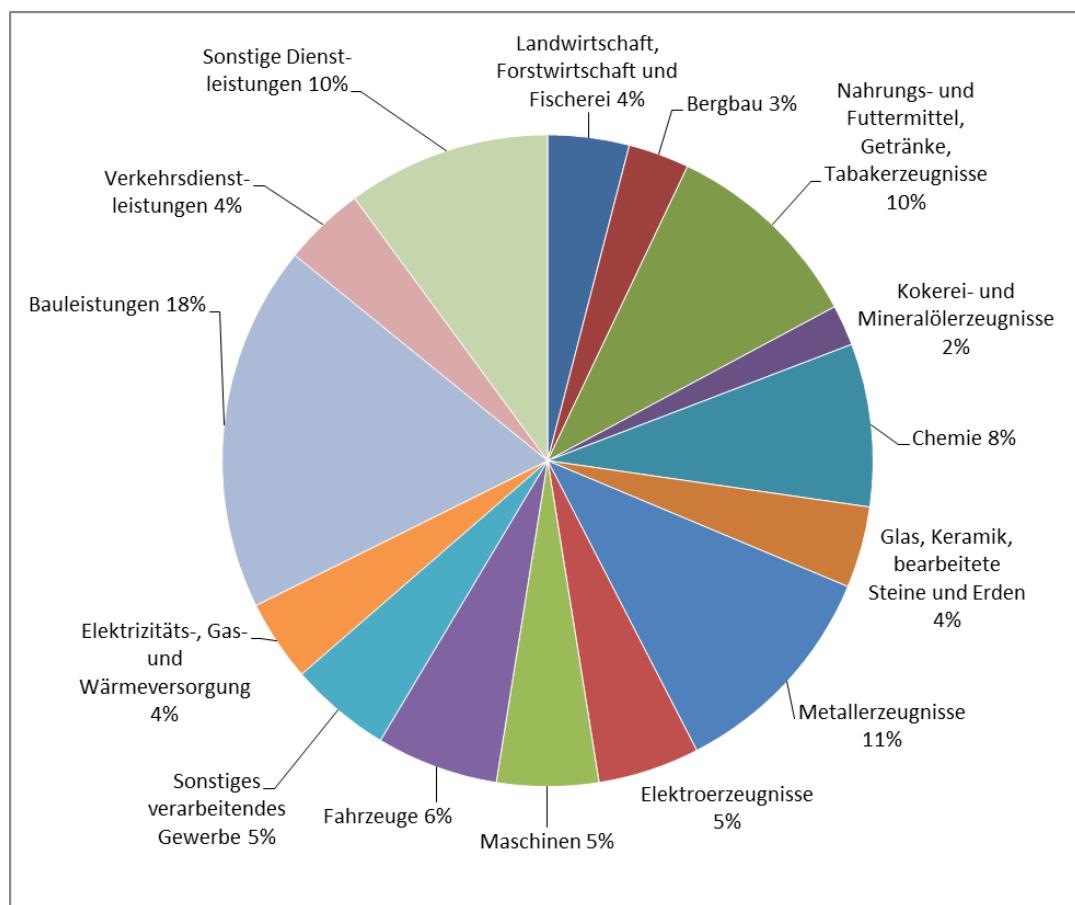
Quelle: URMOD; Mehrfachzählungen enthalten.

Die Betrachtung des Produktionswertes (Output) in t RME in Abbildung 6 richtet den Fokus auf den Rohstoffdurchsatz für die einzelnen Produktivitätsaktivitäten der inländischen Produktion. Bei dem hier betrachteten Rohstoffdurchsatz ist zu beachten, dass es sich bei dieser Größe, anders als bei den Aggregaten, die sich auf die letzte Verwendung beziehen, um eine Bruttogröße handelt, die Mehrfachzählungen enthält. Sofern der Output eines Produktionsbereichs nicht unmittelbar in die letzte Verwendung von Gütern eingeht, sondern als Vorleistung an nachfolgende Produktionsstufen weitergegeben wird, bedeutet dies, dass es zu einer erneuten Zählung des Rohstoffrucksacks in der nachgelagerten Produktionsstufe kommt. In der Summe ist der aggregierte Rohstoffdurchsatz des Outputs in RME nahezu doppelt so hoch wie der aggregierte RME der Güter der letzten Verwendung.

Die Anteile der einzelnen Produktionsbereiche am gesamten Rohstoffdurchsatz deuten auf das jeweilige Rohstoffeinsparungspotential durch technische Verbesserungen wie Effizienzsteigerungen oder Substitutionsprozesse hin⁸. Bei der Betrachtung der Durchsatzmengen ist zu berücksichtigen, dass Einsparpotentiale weniger bei der Rohstoffextraktion (Landwirtschaft, Bergbau), die naturgemäß einen hohen Rohstoffdurchsatz aufweisen, sondern eher bei den nachgelagerten Bereichen zu erwarten sind. Gut ein Viertel des gesamten Rohstoffdurchsatzes entfällt auf in URMOD näher untersuchten „Spezialbereiche“ Bau, Verkehr und Elektrizität. Ohne Berücksichtigung des Rohstoffdurchsatzes der Extraktionsbereiche erhöht sich der Anteil der Spezialbereiche auf gut ein Drittel. Somit können sich Einspareffekte bei diesen ausgewählten Produktionsbereichen erheblich auf den Gesamtrohstoffbedarf der Volkswirtschaft auswirken.

⁸ Weitere Hinweise zu Einsparpotentialen nach Gütergruppen liefern die Angaben zu den Rohstoffintensitäten nach Gütergruppen (siehe Abbildung 13).

Abbildung 7: RME nach Gütergruppen aus Verwendungssicht in Prozent

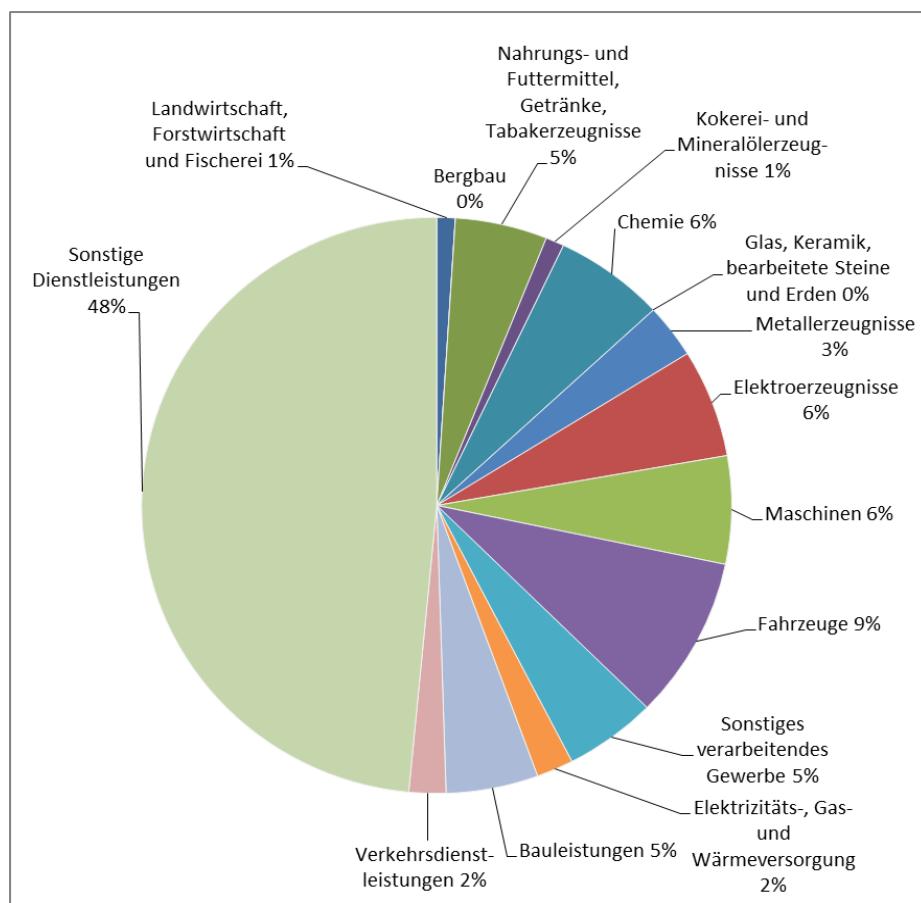


Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

Das RME der letzten Verwendung (Abbildung 7) betrachtet den Rohstoffaufwand aus der Perspektive der Endnachfrage nach Gütern. Der Rohstoffaufwand für die gesamte letzte Verwendung von Gütern ist breit über die verschiedenen Gütergruppen gestreut. Relativ hoch ist der Anteil für Bauleistungen (18 %), Metalle (11 %), Nahrungsmittel (10 %) und sonstige Dienstleistungen (10 %).

Abbildung 8 zeigt ergänzend die Güterstruktur der letzten Verwendung in monetären Einheiten. Die Anteile der Gütergruppen der letzten Verwendung, gemessen in monetären Anteilen offenbaren ein vollkommen anderes Bild im Vergleich zur Darstellung nach Rohstoffäquivalenten. Bei monetärer Betrachtungsweise zeigt sich nämlich eine klare Dominanz der sonstigen Dienstleistungen mit einem Anteil von 48 %.

Abbildung 8: Monetäre Ströme nach Gütergruppen aus Verwendungssicht in Prozent



Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

Tabelle 3 liefert detailliertere Angaben zum Rohstoffaufwand nach Gütergruppen, untergliedert nach Aufkommens- und Verwendungskategorien (siehe auch Tabelle 56 im Anhang).

Tabelle 3: Kumulierter Rohstoffaufwand zur Herstellung von Gütern nach Gütergruppen in 2010

CPA	Gütergruppen	Rohstoff-durch-satz Produktions-wert	Kumulierter Rohstoffaufwand (RME)							Nachrichtlich		
			Im-porte	Letzte Verwendung			Letzte inländische Verwendung			Letzte Ver-wen-dung von Gü-ttern	Rohstoff-intensität der Güter der letz-ten Ver-wen-dung	
				Mio. Tonnen							Mrd. Euro	Tonnen/ 1.000 Euro
	Insgesamt	4.846	1.621	2.667	1.276	1.390	773	617	3.295	0,8		
	Insgesamt	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %		
01-03	Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei	10 %	3 %	4 %	3 %	5 %	7 %	3 %	1 %	3,4		
05-09	Bergbau	16 %	27 %	3 %	5 %	2 %	4 %	-1 %	0 %	6,0		

10-12	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabak- und Erzeugnisse	6 %	4 %	10 %	6 %	13 %	24 %	0 %	5 %	1,8
19	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	3 %	4 %	2 %	3 %	1 %	3 %	0 %	1 %	1,5
20-22	Chemie	6 %	7 %	8 %	15 %	2 %	3 %	0 %	6 %	1,1
23	Glas, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	7 %	3 %	4 %	5 %	3 %	1 %	4 %	0 %	6,5
24-25	Metallerzeugnisse	9 %	25 %	11 %	24 %	0 %	0 %	-1 %	3 %	2,9
26-27	Elektroerzeugnisse	2 %	6 %	5 %	7 %	3 %	2 %	4 %	6 %	0,6
28	Maschinen	3 %	3 %	5 %	7 %	2 %	0 %	5 %	6 %	0,7
29-30	Fahrzeuge	4 %	4 %	6 %	9 %	4 %	4 %	4 %	9 %	0,6
13-18, 31-33	Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe	4 %	6 %	5 %	7 %	4 %	6 %	2 %	5 %	0,8
35	Elektrizitäts-, Gas- und Wärmeversorgung	6 %	0 %	4 %	2 %	5 %	9 %	0 %	2 %	1,2
41-43	Bauleistungen	12 %	0 %	18 %	0 %	35 %	0 %	79 %	5 %	3,0
49-53	Verkehrsdienstleistungen	4 %	6 %	4 %	4 %	5 %	9 %	0 %	2 %	1,7
Sonstige	Sonstige Dienstleistungen	9 %	2 %	10 %	3 %	17 %	29 %	1 %	48 %	0,2

Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

Der Rohstoffaufwand für die Herstellung der Importgüter ist sehr stark dominiert durch die Gütergruppen Bergbauerzeugnisse (direkte Importe von Rohstoffen) und Metalle, auf die zusammen mehr als die Hälfte des Rohstoffaufwandes entfällt.

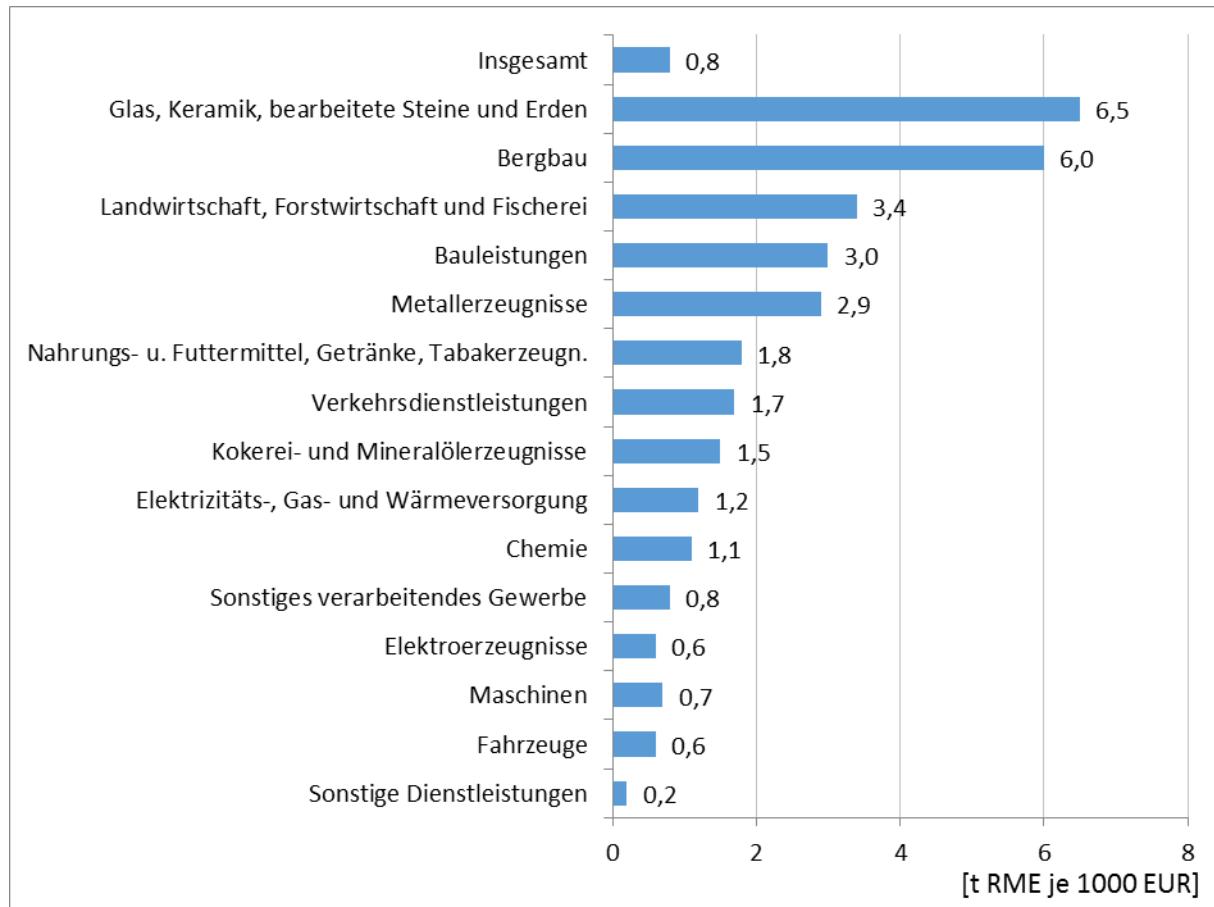
Bei den einzelnen Kategorien der letzten Verwendung ergibt sich folgendes Bild:

- ▶ Bei den Exporten konzentriert sich der Rohstoffaufwand auf die Gütergruppen Metallerzeugnisse (24 %), Chemie (15 %), Fahrzeuge (9 %), Elektro (7 %) und Maschinen (7 %).
- ▶ Bei der letzten inländischen Verwendung, die sowohl den Konsum als auch die Investitionen umfasst, dominieren die Gütergruppen Bauleistungen (35 %), sonstige Dienstleistungen (17 %) und Nahrungsmittel (13 %).
 - Der Rohstoffaufwand zur Herstellung der Güter für den inländischen Konsum konzentriert sich auf die Gütergruppen sonstige Dienstleistungen (29 %)⁹, Nahrungsmittel (24 %), Elektrizität (9 %) und Verkehr (9 %).
 - Der Rohstoffaufwand für die Herstellung der Güter der Endnachfragekategorie Investitionen wird eindeutig von den Bauleistungen (79 %) dominiert.

⁹ Gemessen in monetären Einheiten handelt es sich bei fast drei Viertel aller Konsumgüter um Dienstleistungen, ein Drittel davon sind Konsumausgaben des Staates. Daher entfällt auf die Konsumgüterkategorie Dienstleistungen, trotz weit unterschätzter Rohstoffintensität, ein vergleichsweise hoher Anteil des Rohstoffaufwandes.

Abbildung 9 zeigt die Rohstoffintensitäten der Güter der letzten Verwendung nach Gütergruppen. Die Rohstoffintensität der sonstigen Dienstleistungen liegt deutlich unterhalb des Durchschnittswertes für alle Gütergruppen. Besonders hoch ist die Rohstoffintensität für die Gütergruppen Glas, Keramik (weit überwiegend Baustoffe), Bergbau, Landwirtschaft, Bauleistungen und Metalle.

Abbildung 9: Rohstoffintensität nach Gütergruppen aus Verwendungsperspektive, 2010

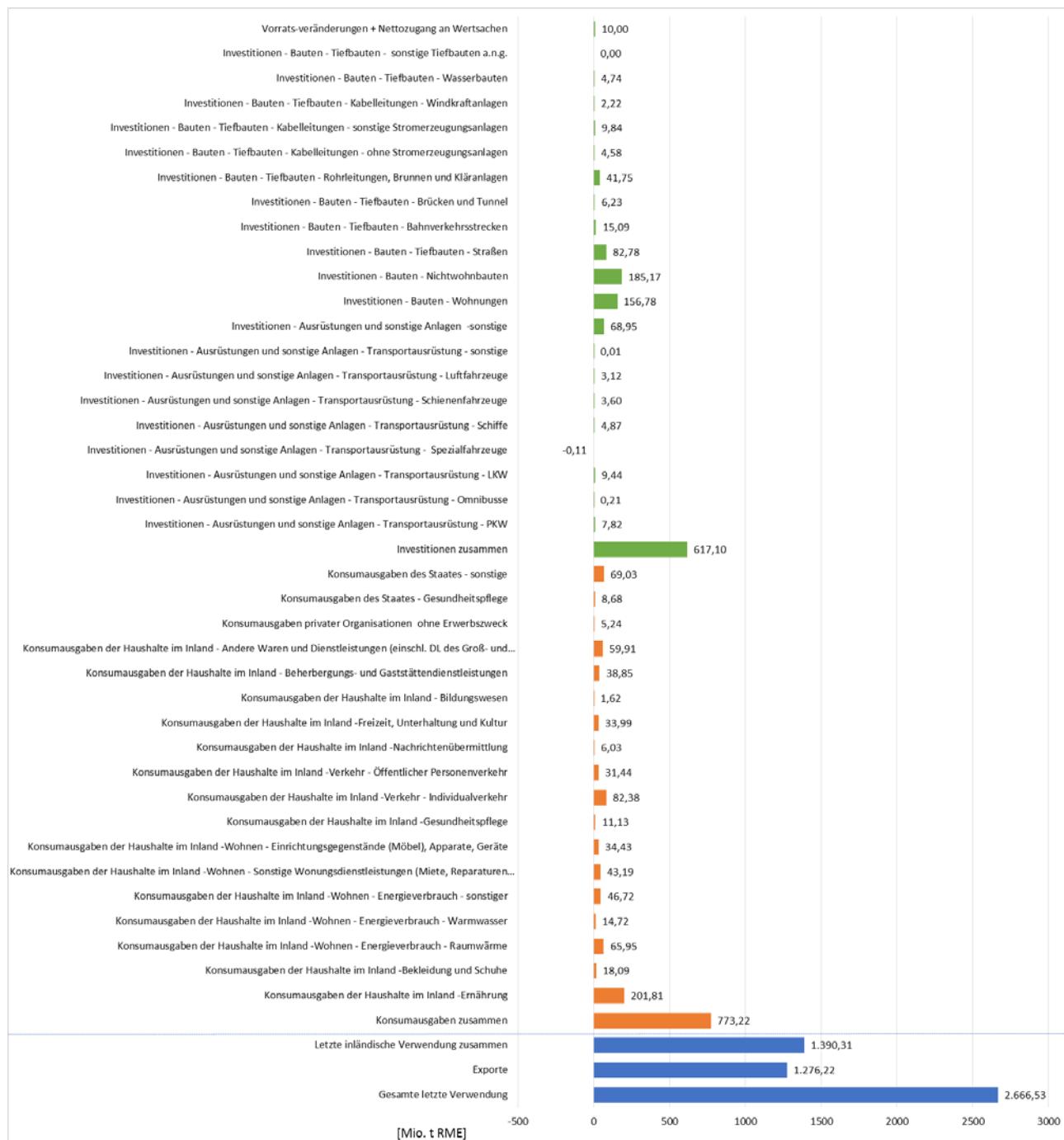


Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

3.2.3 Kategorien der letzten Verwendung

Der kumulierte Rohstoffaufwand (RME) zur Herstellung der Güter der letzten Verwendung (RMI) belief sich im Jahre 2010 auf 2.667 Mio. Tonnen (Abbildung 10, siehe auch Tabelle 57 im Anhang). Nahezu die Hälfte davon entfiel auf Exporte (1.276 Mio. t). Der RME der Güter der letzten Verwendung ($RMC = RMI - RME \text{ Exporte}$) setzt sich aus Konsumausgaben (773 Mio. t) und Investitionen (617 Mio. t) zusammen. Bei den RME der Konsumausgaben entfallen wesentliche Anteile auf die Kategorien Ernährung (202 Mio. t), Wohnen (205 Mio. t) und Verkehr (113 Mio. t). Bei den Investitionen dominieren die Bauinvestitionen mit einem Anteil von 509 Mio. t.

Abbildung 10: RMI von Deutschland nach Kategorien der letzten Verwendung



Quelle: URMOD

3.2.4 Materialien und Energieträger zur Substitution von Primärrohstoffen

Wie in Abschnitt 2.1.1.6 dargelegt werden in URMOD ergänzend zu den Primärrohstoffströmen die Flüsse von erneuerbaren Energieträgern und verwerteten Abfällen detailliert dargestellt, um Prozesse der Substitution von Primärrohstoffen durch diese Materialien bzw. Energieträger abzubilden. Tabelle 4 stellt den kumulierten Aufwand an erneuerbaren Energieträgern und verwerteten Abfällen dieser Materialien bei Herstellung der Güter der letzten Verwendung und der Importe für das Jahr 2010 dar. Da noch nicht alle methodischen Probleme zur Abgrenzung der Materialien und bei der Beschaffung der Daten im Rahmen dieses Projektes abschließend geklärt werden konnten, handelt es sich bei den hier vorgelegten Ergebnissen um erste Schätzungen.

Tabelle 4: Kumulierter Aufwand an erneuerbaren Energien und verwerteten Abfällen zur Herstellung von Gütern, 2010

		Einheit	Inländische Entnahme	Importe	Letzte Verwendung insgesamt	Exporte	Letzte inländische Verwendung
	Erneuerbare Energien	1000 TOE	6.988	10.807	17.795	8.698	9.097
IE1	Wasserkraftenergie	1000 TOE	1.768	6.577	8.345	4.524	3.822
IE2	Windenergie	1000 TOE	3.272	2.669	5.942	2.815	3.127
IE3	Fotovoltaische Energie	1000 TOE	1.016	403	1.418	625	794
IE4	Gezeiten-/ Wellen-/Meeresenergie	1000 TOE	0	9	9	5	4
IE5	Thermische Sonnenenergie	1000 TOE	711	287	997	167	830
IE6	Geothermalenergie	1000 TOE	221	863	1.084	562	522
Stofflich verwertete Abfälle							
WR11	Stoffliche Verwertung Abfälle - Holz	1000 t	15.353	6.313	21.666	12.552	9.113
WR12	Papier	1000 t	15.698	11.688	27.386	19.362	8.024
WR21	Plastik sortenrein	1000 t	1.498	1.219	2.717	1.766	951
WR22	Plastik nicht sortenrein	1000 t	585	227	811	662	150
WR31	Schrott und Abfälle - Eisen und Stahl	1000 t RME	36.870	87.945	124.816	81.988	42.828
WR33	Schrott und Abfälle - Kupfer	1000 t RME	26.763	139.098	165.860	117.973	47.888
WR34	Schrott und Abfälle - Aluminium	1000 t RME	4.971	11.883	16.854	11.556	5.298
WR5	Abfälle - zur Verwendung im Hochbau	1000 t	2.838	263	3.101	354	2.748
WR6	Abfälle - zur Verwendung im Verkehrswegebau	1000 t	158.193	7.664	165.857	9.014	156.843
	Energetisch verwertete Abfälle	1000 TOE	17.073	8.670	25.743	10.037	15.707
WE1	Holz- und Bioabfälle	1000 TOE	5.086	2.456	7.542	2.300	5.242
WE2	Bioabfälle - zur Biokraftstofferzeugung	1000 TOE	469	286	755	282	472

WE3	Bioabfälle - zur Biogaserzeugung	1000 TOE	851	293	1.144	464	680
WE4	Deponiegas	1000 TOE	141	150	292	139	153
WE5	Klärschlammgas	1000 TOE	380	75	455	175	280
WE5	Hausmüll	1000 TOE	4.667	2.809	7.476	3.261	4.215
WE7	Industrieabfälle	1000 TOE	5.479	2.601	8.079	3.415	4.665

Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

Den weitaus höchsten Beitrag zum kumulierten Aufwand von Materialien zur Substitution von Primärrohstoffen liefert die stoffliche Verwertung von Abfällen. Die Beiträge der erneuerbaren Energien waren dagegen im Jahre 2010 noch relativ gering.

3.2.5 Vergleich mit der Umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes

Neben den Ergebnissen zur Materialflussrechnung (EW-MFA) veröffentlicht Destatis auch Ergebnisse in Rohstoffäquivalenten gemäß des RME-Modells der UGR. Diese Ergebnisse stimmen nicht voll über ein mit den Angaben aus URMOD, wie Tabelle 5 zeigt.

Tabelle 5: Ergebnisvergleich URMOD und UGR-Modell, 2010: Kumulierter Primärrohstoffaufwand zur Herstellung der Güter der letzten Verwendung und der Importe

	DE	IMP	RMI	EXP	RMC
Millionen Tonnen Rohstoffäquivalente (RME)					
URMOD					
Primärrohstoffe insgesamt	1.046	1.621	2.667	1.276	1.391
Dar.: Metallerze	0	618	619	465	154
UGR RME-Modell					
Primärrohstoffe insgesamt	1.004	1.712	2.716	1.479	1.236
Dar.: Metallerze	0	826	826	782	44
Differenzen					
Primärrohstoffe insgesamt	42	-91	-49	-203	155
Dar.: Metallerze	0	-208	-207	-317	110

Quelle: URMOD Basisjahr 2010.

Quantitativ bedeutsam für die Differenzen zwischen den Modellen sind vor allem zwei methodische Unterschiede:

- ▶ Konzept zur Behandlung von Sekundärrohstoffen
- ▶ Produktionstechnologie zur Schätzung des Rohstoffgehalts der Importe

Sekundärmetalle: Im UGR-Modell werden Im- und Exporte von Metallschrott und Sekundärmetallen wie Primärmetalle behandelt. Dies bedeutet, dass Sekundärmetallimporte in vollem Umfang den RME der Importe zugerechnet werden. Dagegen werden in URMOD den in den Importen und Exporten ent-

haltenen Sekundärrohstoffen keine unmittelbaren Rohstoffäquivalente zugeordnet. Diese Vorgehensweise steht im Einklang mit der Vorgehensweise beim europäischen RME-Modell von Eurostat und auch mit den relevanten methodischen Vorgaben des Produktionskonzepts des SNA und des SEEA-CF [EC, 2008; UN, 2014]¹⁰. Aufgrund dieses methodischen Unterschiedes weist das UGR-Modell deutlich höhere Primärmetallgehalte für Im- und Exporte nach.

In URMOD werden die Sekundärrohstoffgehalte der Güter als Zusatzinformation ergänzend zu den Primärrohstoffströmen abgeleitet, um Substitutionsprozesse modellieren zu können (siehe Tabelle 4).

Produktionstechnologie Importe: Im UGR Modell wird der Primärrohstoffgehalt der Importgüter weitgehend unter der Annahme geschätzt, dass die Importgüter mit inländischer Produktionstechnologie (DTA) hergestellt wurden. Um die Genauigkeit der RME Schätzung zu verbessern, wurde dagegen für URMOD ein sogenanntes Drei-Regionen-Modell (siehe Abschnitt 2.1.1.4) entwickelt. Damit wird erreicht, dass die Ermittlung des Rohstoffgehalts der Importgüter möglichst weitgehend auf der Produktionstechnologie der Herkunftsregionen der Importe beruht. Die Anwendung dieses Konzeptes führt dazu, dass den Importen im Vergleich zum UGR-Modell ein höherer Rohstoffgehalt zugewiesen wird.

4 Strategien zur Senkung des Materialinputs

Um, wie in Kapitel 2 dargestellt, die strukturellen Effekte einer effizienteren Ressourcennutzung mit URMOD genauer zu analysieren, ist es wegen der großen Zahl von Rohstoffen und Materialien notwendig, diejenigen Rohstoffanwendungen zu identifizieren, die absolut gesehen einen bedeutenden Anteil an der gesamten Rohstofffinanzspruchnahme haben und in der Folge auch ein deutliches Potenzial zur Einsparung aufweisen. Dazu werden in Kapitel 4.1 zunächst grundlegende Einsparstrategien dargestellt. In Kapitel 4.2 werden dann die Branchen und Anwendungen identifiziert, in denen diese Strategien angewendet werden können. Schließlich erfolgt in Kapitel 4.3 eine Abschätzung der theoretisch möglichen Einsparpotenziale für diese Anwendungen, die als Grundlage für die Auswahl relevanter Einsparbereiche in den Kapiteln 6 bis 8 dient.

Da die Abschätzung der Rohstoffeinsparpotenziale verschiedener Ressourceneffizienztechnologien in diesem Kapitel Voraussetzung für die Berechnung der Zahlen (in den Kapiteln 5 bis 8) ist, die letztlich in URMOD eingehen, kann an dieser Stelle auf die Ergebnisse dieser Modellberechnung noch nicht zurückgegriffen werden. Stattdessen wird hier zur Berechnung der technologiespezifischen Einsparpotenziale das Konzept des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) verwendet [ifeu, 2012a]. Der spezifische KRA eines bestimmten Rohstoffs oder Materials stellt die Masse aller Rohstoffe (und der wiederum zu ihrer Gewinnung erforderlichen Rohstoffe usw.) dar, die verwendet werden, um dieses eine Kilogramm bereitzustellen. Durch Berücksichtigung des spezifischen KRA werden die KRA-Werte verschiedener Rohstoffe und Materialien miteinander vergleichbar und aggregierbar. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Input-Output-Modellierung in URMOD stellen die spezifischen KRA-Werte aus ifeu [ifeu, 2012a] allgemeine Koeffizienten dar, mit denen produktbezogene Einsparungen direkter als in URMOD berechnet werden können (vgl. Kapitel 2.1). Die jeweiligen konkreten Bedingungen und

¹⁰ Das RME-Modell beruht auf dem Leontief Verfahren (siehe Abschnitt 2.1.1.2). Danach werden die Angaben der IOT, die auf der vollständigen Abbildung der Güterströme in der Volkswirtschaft beruht mit der Primärrohstoffmatrix (M) Rohstoffmatrix verknüpft. Als Ergebnis dieses Verfahrens werden den Güterströmen ausschließlich die in der M -Matrix enthaltenen Primärrohstoffäquivalente zugewiesen. Sollen auch Sekundärrohstoffe berücksichtigt werden, wie im URMOD für Zwecke der Tabelle 3 geschehen, dann ist dies im Leontief Modell in methodisch konsistenter nur möglich, wenn die Primärrohstoffmatrix um Sekundärrohstoffe erweitert wird. D.h. vor allem, die inländische Generierung von Sekundärrohstoffen muss voll mit einbezogen werden. Eine selektive Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen nur bei Importen und Exporten ist dagegen mit der Logik des Modells nicht vereinbar.

sonstigen Verflechtungen in der Volkswirtschaft können jedoch nicht vollständig berücksichtigt werden. Daher erlauben die Ergebnisse dieses Kapitels eine *Vorabschätzung* zu den Rohstoffeinsparungen, sind aber mit den Ergebnissen von URMOD nur bedingt vergleichbar.

4.1 Grundlegende Strategien: Effizienzsteigerung, Substitution und Recycling

Wird davon ausgegangen, dass Menge und Struktur der zum Ver- bzw. Gebrauch bereitstehenden Güter und Dienstleistungen nicht verändert werden sollen, bieten sich folgende grundlegende Strategien zur Senkung des Primärrohstoffeinsatzes an:¹¹

- ▶ Steigerung der **Effizienz** des Rohstoffeinsatzes: Für die Bereitstellung des gleichen Outputs im Zuge der Produktion entlang der Wertschöpfungsketten und (sofern dafür Rohstoffe aufgewendet werden) während der Nutzungs- und Nachnutzungsphase, wird von einem (oder mehreren) Rohstoff(en) eine geringere Menge als Input aufgewendet. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Rohstoffen müssen insbesondere dann Berücksichtigung finden, wenn der Minderverbrauch eines Rohstoffs den Mehreinsatz eines anderen nach sich zieht (Bsp.: effiziente Elektromotoren, Minderverbrauch an elektrischer Energie geht mit Mehreinsatz an Kupfer einher).
- ▶ **Substitution** von Materialien mit hohem kumuliertem Rohstoffaufwand durch solche mit geringerem Rohstoffaufwand. Dabei sind beim Vergleich der Substitute nicht nur die spezifischen Gewichte und spezifischen kumulierten Rohstoffaufwände (KRA)¹² der beiden Rohstoffe zu berücksichtigen, sondern auch Unterschiede, die die Rohstoffe bzgl. derjenigen technischen Funktionsparameter aufweisen, die für die jeweilige Verwendung maßgeblich sind (Bsp: Kupfer weist als Leiter elektrischen Stroms eine bessere Leitfähigkeit auf als das Substitut Aluminium). Der gesamte rohstoffrelevante Vorteil ergibt sich aus dem KRA-Änderungsfaktor

$$\text{KRA-Änderungsfaktor} = \frac{\text{KRA}_2}{\text{KRA}_1} = \frac{\text{KRA}_{\text{spez},2}}{\text{KRA}_{\text{spez},1}} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1},$$

wobei KRA_{spez} den spezifischen KRA, ρ die Dichte und σ den relevanten Funktionsparameter der Materialien 1 bzw. 2 darstellt. Die Substitution von Material 1 durch Material 2 ist aus Sicht der Rohstofffinanzspruchnahme dann sinnvoll, wenn $\text{KRA}_2 < \text{KRA}_1$.¹³

- ▶ Weitestgehende **Verwertung**, insbesondere **Recycling**, von Abfällen, die im Zuge der Herstellung oder während und nach dem Gebrauch von Produkten anfallen. Voraussetzung für den Rohstoffeinspareffekt ist dabei die Tatsache, dass die Aufbereitung von Abfällen zu Sekundärmaterial weniger ressourcenintensiv ist als die Bereitstellung entsprechender Primärmaterialien. Entsprechend ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass das Recycling steigende Grenzkosten aufweist, das heißt, dass auch die Ressourcenintensität des Recyclings mit steigendem Umfang ansteigt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Sekundärmaterialien häufig nicht die gleiche

¹¹ Die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten könnte durch die Senkung der zu produzierenden Gütermenge ebenfalls einen Beitrag zur Senkung des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffeinsatzes leisten. Sie erfordert aber neben technischen Veränderungen auch eine Veränderung des Verbraucherverhaltens, welche in diesem Vorhaben nicht untersucht werden soll.

¹² Der spezifische KRA eines bestimmten Rohstoffs oder Materials stellt die Masse (z.B. in kg) aller Rohstoffe (und der wiederum zu ihrer Gewinnung erforderlichen Rohstoffe usw.) dar, die verwendet werden, um dieses eine Kilogramm bereitzustellen. Der spezifische KRA variiert in weiten Grenzen zwischen etwas mehr als 1 kg/kg für Rohstoffe wie Steine und Sand, die für die Verwendung nur in geringem Umfang weiterverarbeitet werden müssen, und bspw. 740.320 kg/kg für Gold, für dessen Herstellung unter anderem große Mengen von Erz verarbeitet werden [ifeu, 2012a].

¹³ Ebenfalls zu berücksichtigen ist an dieser Stelle die Veränderung der Wiederverwertbarkeit von Materialien infolge der Substitution. So lässt sich zwar durch den Einsatz hochfester Verbundwerkstoffe in vielen Fällen eine bedeutende Gewichtsreduktion herbeiführen; diese kann aber ggf. zumindest teilweise dadurch zunichte gemacht werden, dass die Materialien am Ende der Nutzungszeit nur in geringerem Umfang verwertet werden können, wodurch der Aufwand an Primärmaterial wieder steigt.

Qualität aufweisen, wie die entsprechenden Primärmaterialien, was deren Einsatzpotenziale einschränken kann.

4.2 Identifizierung relevanter Rohstoffeinsparpotenziale/-technologien

Um die strukturellen Effekte der verstärkten Einsparung von Rohstoffen und ihren Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität zu ermitteln, müssen zunächst die Wirtschaftsbereiche ausfindig gemacht werden, in denen ein großes Potenzial für Einsparungen besteht. Da es eine große Zahl von Rohstoffen und daraus hergestellten Materialien gibt und für jeden dieser Rohstoffe bzw. Materialien eine große Zahl von Verwendungen in den unterschiedlichsten Wirtschaftsbereichen, ist die Anzahl der zu untersuchenden Rohstoffeinsatzmöglichkeiten sehr groß. Da darüber hinaus in vielen dieser Bereiche genaue Kenntnisse über die Art und Menge der verwendeten bzw. anfallenden Stoffe fehlen, ist es nicht möglich, das Rohstoffeinsparpotenzial für jede dieser Einsatzmöglichkeiten ausfindig zu machen. Um dennoch einen signifikanten Anteil der Einsparmöglichkeiten zu erfassen, die im Rahmen des Szenarios TW30 im Rahmen des volkswirtschaftlichen Ansatzes einbezogen und weiter untersucht werden sollten, wurde daher folgender Ansatz gewählt:

In einem ersten Schritt wurde eine Vorauswahl der zu untersuchenden Materialien festgelegt und mit den EU-weiten Ergebnissen des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) für 2008 verglichen. Der europäische RMI für 2008 war zum Zeitpunkt des Arbeitsschrittes die aktuellste Quelle, die Rohstoffäquivalente einbezog und methodisch konsistent zu den Berechnungen dieses Projekts war, da auf die EU-weiten Ergebnisse aus dem Eurostat-Modell zurückgegriffen werden konnte. Das Ergebnis zeigt Tabelle 8.

Tabelle 6: Vorauswahl der zu untersuchenden Materialien

Gruppe	Auswahl	Anteil am europäischen Gesamt-RMI, 2008
Metalle	Eisen/Stahl	3,2 %
	Kupfer	3,0 %
	Aluminium	0,6 %
	Gold	4,2 %
	<i>Seltene Erden</i>	n.a.
	Zinn	0,2 %
	Titan	0,6 %
Mineralien	Sand und Kies	25,7 %
	Kalk	8,0 %
	Naturstein	4,5 %
Energierohstoffe	Kohle	9,6 %
	Öl	9,3 %
	Gas	5,4 %
Biogene Rohstoffe	Holz, Nahrungsmittel	18,3 %
SUMME		91,8 %

Quelle: [Eurostat, 2016].

In einem nächsten Schritt wurden die absoluten Mengen erfasst, die in Deutschland innerhalb eines Jahres (hier: 2010) Verwendung finden und zu diesem Zweck im Land gefördert oder importiert wurden. Als Datenquellen hierzu dienten die Rohstoffinformationen der Deutschen Rohstoffagentur [DERA, 2011] und die Trends der Angebots- und Nachfragesituation mineralischer Rohstoffe von

Frondel et al. [Frondel et al., 2007]. Die verwendete Masse jedes Rohstoffs wird dazu mit dem jeweiligen, für den Rohstoff charakteristischen spezifischen KRA multipliziert und alle Ergebnisse miteinander verglichen.

Auf der Basis beider Informationen wurde im Rahmen eines Projekt-Fachgespräches am 23.11.2013 als wesentliche Kriterien die Mengenrelevanz und die Datenverfügbarkeit, und dabei insbesondere die Möglichkeit, die Materialien durch die Wirtschaftssektoren hindurch verfolgen zu können, definiert.

Die komplette Liste der Rohstoffe, die auf Basis dieser Methode und nach Diskussion mit Experten im Rahmen des Projekt-Fachgespräches am 23.11.2013 als besonders relevant erachtet werden und damit in Abstimmung zwischen dem Umweltbundesamt und dem Projektnehmer die Grundlage für die weiteren Untersuchungen bilden, ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Liste der Rohstoffe mit den größten KRA-Werten und ihr Anteil an der jeweiligen Rohstoffgruppe

Rohstoffgruppen	Rohstoffe		Anteil der Auswahl
Metallische Rohstoffe	Eisen/Stahl Kupfer	Aluminium Gold	70%
Mineralische Rohstoffe	Sand Kies	Kalk Naturstein	91%
Energierohstoffe	Kohle Öl	Gas	82%
Biogene Rohstoffe	Holz	Nahrungsmittel	—

Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Berechnung.

Im nächsten Schritt werden, nach Rohstoffgruppen gegliedert, für jeden der in Tabelle 7 aufgeführten Rohstoffe die mengenmäßig wichtigsten Rohstoffverwendungen sowie Strategien¹⁴ identifiziert, mit Hilfe derer sich ein nennenswerter Anteil des jeweiligen Rohstoffs einsparen ließe. Auch hier stellt der KRA der in die Verwendung einfließenden Rohstoffe bzw. des Einsparpotenzials, das primäre Kriterium dar. Die komplette Liste der Rohstoffeinsparpotenziale, die auf Basis dieser Methode und nach Diskussion mit Experten im Rahmen eines Fachgespräches als am erfolgversprechendsten erachtet wurden und damit in Abstimmung zwischen dem Umweltbundesamt und dem Projektnehmer die Grundlage für die weiteren Untersuchungen bildeten, ist in Tabelle 8 aufgeführt. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass durch diese Auswahl ein wesentlicher, aber eben nur ein Teil der gesamten Rohstoffverwendung in die Untersuchung der Einsparpotenziale eingeht (vgl. hierzu Kapitel 4.4).

Tabelle 8: Relevante Potenziale der Rohstoffeinsparung

Rohstoff	Verwendung	Szenario/Strategie
Metallische Rohstoffe		
Kupfer	Bausektor: Trinkwasserrohre, Fittings (13 % d. Cu-Verwendung)	Substitution durch Kunststoffrohre (anhaltender Trend)
	Bausektor: Elektrische Installationen, insbes. Kabel (5 %)	Substitution durch Aluminium

¹⁴ Strategien zur Einsparung von Rohstoffen sind die Steigerung der Materialeffizienz in der Produktion, die Substitution durch einen Rohstoff mit niedrigerem KRA und intensiviertes Recycling. Sie werden später eingehender erläutert. Ein Szenario bezeichnet demgegenüber die Anwendung einer dieser Strategien auf eine bestimmte Rohstoffverwendung.

Rohstoff	Verwendung	Szenario/Strategie
Eisen/Stahl	Recyclingsektor: Erfassung und Recycling von Cu	Verbesserung der Erfassung und Verbesserung der Cu-Ausbeute beim Recycling
	Fahrzeugbau: Automobilbleche (18 % d. Fe-Verwendung)	Substitution durch CFK Effizienzsteigerung durch Tailored Blanks
	Maschinen- und Anlagenbau (22 %)	Effizienzsteigerung durch bessere Anpassung der Auslegung an die Anforderungen
Aluminium	Flugzeugbau: Flugzeughülle	Substitution durch CFK
	Bausektor: Fenster (19 %)	Substitution durch Kunststoff/Holz
Gold	Zahnprothetik, Elektronik(kontakte)	Verbesserung der Erfassung und Verbesserung der Au-Ausbeute beim Recycling
Mineralische Rohstoffe		
Sand/Kies	Bausektor: Verwendung von Beton (ca. 30 % der Verwendung mineralischer Rohstoffe)	Effizienzsteigerung durch Anpassung von Standards an die jeweilige Verwendung
Kalkstein	Zementherstellung	Effizienzsteigerung bei der Zementherstellung (z.B. Celiment)
	Herstellung von Eisen/Stahl	Effizienzsteigerung im Konverter- und anderen Prozessen
Energierohstoffe		
Erdöl und Erdgas	Beheizung von Gebäuden	Effizienzsteigerung durch bessere Wärmeisolierung, Einsatz von KWK
	Herstellung von Kunststoffen	Effizientere Produktions- und Verarbeitungsprozesse Weitergehende Wiederverwertung
Erdgas	Herstellung von Düngemitteln	Substitution durch Wirtschaftsdünger
Kohle und Erdgas	Herstellung elektr. Stroms	Substitution durch erneuerbare Energieträger
Biotische Rohstoffe		
Lebensmittel	Herstellung landwirtschaftlicher Produkte als Ausgangsmaterial	Effizienzsteigerung bei Düngerausbringung durch Precision Farming
Holz	Substitution von Konstruktionswerkstoffen und fossilen Energieträgern	Recycling: Kaskadennutzung

Quelle: Fraunhofer ISI.

4.3 Darstellung ausgewählter Rohstoffeinsparszenarien

Von den in Tabelle 8 aufgeführten Rohstoffeinsparpotenziale werden im Folgenden diejenigen dargestellt und erläutert, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln verwertet werden. Das sind insbesondere die Potenziale, die in den Bereichen Energie, Bau und Verkehr relevant sind und damit auch den technologischen Wandel repräsentieren, der die gleichnamigen, in den Kapiteln 6, 7 und 8 behandelten Szenarien charakterisieren. Die Strukturierung dieser Darstellung folgt aber nicht, wie in Kapitel 4.2, der Art der Rohstoffe oder ihrer Verwendung, sondern den Typen von Einsparstrategien, die in Kapitel 4.1 vorgestellt wurden.

4.3.1 Effizienzsteigerung

4.3.1.1 Effizienterer Rohstoffeinsatz im Bausektor

Fast 45 % der in Deutschland verwendeten Sande und Kiese sowie zwei Drittel des Kalksteins gehen in die Betonherstellung [BBS, 2013], aus der im Jahr 2010 170 Mio. Tonnen Beton und Betonfertigprodukte hervorgingen [Gellenbeck et al., 2014]. Damit handelt es sich um eine Menge, bei der schon geringe relative Einsparungen signifikante Auswirkungen auf die absolute Rohstofffinanzspruchnahme haben. Ein Ansatzpunkt für Einsparungen sind bspw. Sicherheitsmargen bei der Dimensionierung von Betonbauteilen und -konstruktionen, die der Tatsache Rechnung tragen, dass die Festigkeit von Beton auch bei industrieller Herstellung im Rahmen der Normalverteilung unterhalb des Mittelwertes liegen kann. In diesem Zusammenhang gewährleistet die Anwendung eines Sicherheitsbeiwertes, dass auch weniger feste Chargen des Betons den mechanischen Anforderungen an die Konstruktion entsprechen. Ein zu hoher Sicherheitsbeiwert bedeutet aber auch, dass mehr Material zum Einsatz kommt, als unbedingt notwendig. Nguyen, Schenck, & Schwarz (2005) haben in diesem Zusammenhang festgestellt, dass die Varianz der Festigkeit vor allem der qualitativ hochwertigeren Betonarten seit der letzten Erhebung 1969 zurückgegangen ist, so dass eigentlich geringere als die in DIN 1045-1 angegebenen Sicherheitsbeiwerte ausreichend wären (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Sicherheitsbeiwerte für verschiedene Betonarten nach DIN und wie theoretisch erforderlich

f_{ck}	$\gamma_{c,DIN}$	$\gamma_{c, \text{erf}}$	f_{ck}	$\gamma_{c,DIN}$	$\gamma_{c, \text{erf}}$
C8/10			C45/55	1,5	1,356
C12/15	1,5	1,721	C50/60	1,5	1,344
C16/20	1,5	1,587	C55/67	1,52	1,334
C20/25	1,5	1,511	C60/75	1,53	1,326
C25/30	1,5	1,453	C70/85	1,56	1,314
C30/37	1,5	1,416	C80/95	1,6	1,305
C35/45	1,5	1,390	C90/105	1,63	1,298
C40/50	1,5	1,370	C100/115	1,67	1,292

Quelle: Nguyen et al. (2005).

Für die einzelnen Betonqualitäten ergeben sich daraus potenzielle Einsparungen, die von 3 % in der Festigkeitsklasse C25/30 bis 25 % in der Klasse C100/115 reichen. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren wie der Notwendigkeit höherer Sicherheitsbeiwerte bei Biegebauteilen (d.h. Balken oder Platten) und der jeweiligen Anteile der verschiedenen Festigkeitsklassen an der gesamten Produktionsmenge berechnet sich daraus ein Einsparpotenzial von insgesamt rund 2,5 % bzw. 4,53 Mio. Tonnen Beton, was einer KRA-Einsparung von 4,7 Mio. Tonnen RME entspricht.

4.3.1.2 Effizientere Herstellung von Baustoffen am Beispiel Zement

Weltweit wurden im Jahr 2012 ca. 3,6 Mrd. Tonnen Zement hergestellt, davon etwa 2,15 Mrd. Tonnen in China [vdz, 2014]. In Deutschland wurden im Jahr 2013 insgesamt 31,5 Mio. Tonnen Zement hergestellt, für deren Produktion ca. 23,1 Mio. Klinker benötigt wurden. Die entsprechenden Zahlen für 2010 sind mit 29,9 bzw. 23,0 Mio. Tonnen nur unwesentlich geringer [vdz, 2014]. Fast alle im Baubereich eingesetzten Normzemente enthalten als hydraulische Komponente Portlandzementklinker, dessen Herstellung im Drehrohrofen aus Kalkstein und silikathaltigen Komponenten wie Kalkmergeln und Tonen mit einem erheblichen Einsatz von Rohstoffen und Energie verbunden ist. Letzteres ist im Wesentlichen auf den hohen Gehalt des Portlandzementklinkers an Calciumoxid (bis ca. 70 Gew.-%)

zurückzuführen, welches hauptsächlich durch die Calcinierung von Kalkstein (CaCO_3) bei etwa 800 bis 1000 °C unter Freisetzung von CO_2 gewonnen wird. Aus dem Brennen von ca. 1,2 Tonnen Kalkstein je Tonne Klinker werden rohstoffbedingt je nach verwendetem Kalkstein ca. 520 Kilogramm CO_2 freigesetzt [Saure, 2013]. Die Bildung der Klinkerphasen erfordert anschließend Materialtemperaturen von bis zu 1.450 °C, wobei zusätzlich etwa 330 Kilogramm CO_2 pro Tonne Klinker aus den Brennstoffen emittiert werden. Schließlich kommen je Tonne Zement noch etwa 63 Kilogramm CO_2 hinzu, die unter Annahme des deutschen Strommixes aus der Produktion des für die Betonherstellung erforderlichen Stroms stammen [Stemmermann et al., 2010].

Derzeit werden verschiedene Verfahren entwickelt, um die Herstellung von Zement effizienter zu gestalten. Dazu gehört die Entwicklung neuer Bindemittel, die mehr oder weniger ohne Klinkerphasen auskommen, wie der Belit-Calciumsulfoaluminat-Ternesit-Zement, der von der HeidelbergCement entwickelt wird und um 150 bis 200 °C geringere Temperaturen benötigt [HeidelbergCement, 2014]. Ein anderer Ansatz ist der Einsatz von Magnesiazement (Sorelzement), welcher von der 2012 in Insolvenz gegangenen britischen Firma novacem verfolgt wurde [Mötzl, 2014].

Der vielleicht radikalste und hierzulande bekannteste neue Prozess ist die Herstellung des hydraulischen Bindemittels Celitement®, welches bei 200 °C in einem Druckautoklaven produziert wird. Ziel ist es dabei, gezielt die verklebenden Calciumhydrosilikate herzustellen, die, wie in den Formeln (1) und (2) dargestellt, nach dem Wässern unter Bildung von Calciumsilikathydraten (C-S-H-Phasen) erhärten. Unterstellt man für herkömmlichen Portlandzement vereinfachend, dass die Zementklinker nur aus dem Hauptmineral Tricalciumsilikat Alit besteht, werden beim Brennen der Rohstoffe aus Calciumcarbonat im Gegensatz zum Celitement statt einer drei Einheiten Kohlendioxid freigesetzt (Gl. 3). Das Zwischenprodukt Calciumoxid verbindet sich während des Brennvorgangs mit Siliziumdioxid zu Tricalciumsilikat Alit (Gl. 4).

1. $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{Celitement}$
2. $\text{Celitement} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} [\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}]$
3. $3 \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 \uparrow + \text{Ca}_3\text{SiO}_5$
4. $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Ca(OH)}_2 + \text{C-S-H} [\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}]$

Der Celitement-Prozess zieht fast eine Halbierung der spezifischen CO_2 -Emissionen nach sich, die sowohl aus der in geringerem Umfang stattfindenden Calcinierung als auch den geringeren Prozesstemperaturen resultiert [Stemmermann et al., 2010]. Was den Rohstoffeinsatz angeht, fällt vor allem der geringere Kalkbedarf des Celitement-Prozesses ins Auge, dem vor allem ein erhöhter Sandbedarf gegenübersteht. Da Kalk mit 1,42 kg/kg überdies einen höheren spezifischen KRA aufweist als Sand (1,04 kg/kg) (ifeu 2014b), ergibt sich daraus ein theoretisches Reduktionspotenzial von 46,8 Mio. auf 31,1 Mio. Tonnen, d.h. um 15,7 Mio. Tonnen RME.

Der Markteintritt von Celitement® wird vermutlich mit Produkten erfolgen, für die langwierige Zulassungsverfahren (Festigkeitsentwicklung, E-Modul, Schwinden, Kriechen, Frost-Tauwechsel-Beständigkeit, Wärmedehnung, Bewehrungskorrosion, Auszugfestigkeit etc.) nicht notwendig sind, bspw. Putze, Mörtel, Fliesenkleber und Betonwaren. Große KRA-Wirkungen werden mit Celitement® erst realisiert werden können, wenn nach entsprechenden Prüfungen die Charakterisierung als hochwertiger Zement (CEM I 52,5R) erreicht wird, mit welchem Portlandzement in fast allen Bereichen substituierbar wäre.

4.3.1.3 Energieeinsparung durch Wärmedämmung

Der Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser, Kühlung und Beleuchtung in deutschen Gebäuden beträgt ca. 38 Prozent des gesamten deutschen Endenergieverbrauch [DENA, 2012]. Obwohl hinsichtlich ihrer Anzahl (18,9 Mio.) mit einem Anteil von 91 % weit überlegen, überwiegt der Anteil der Wohngebäude am Endenergieverbrauch mit einem Anteil von 65 % immer noch deutlich [Zensus, 2011]. Daraus ergibt sich eine zu beheizende Wohnfläche von insgesamt 2,3 Mrd. Quadratmetern.

Durch die Energieeinsparverordnung EnEV2014 wird in diesem Zusammenhang das Ziel verfolgt, den deutschen Gebäudebestand bis 2050 klimaneutral umzugestalten. Neben einer verstärkten Nutzung von regenerativen Energieträgern und der effizienteren Nutzung der Energie im Allgemeinen wird durch die EnEV2014 angestrebt, Gebäude durch dickere Isolierschichten, optimierte Dämmmaterialien und besser isolierende Fenster (gedämmte Fensterrahmen und 3-Scheibenfenster) energetisch zu optimieren. Außerdem werden die Vermeidung von Wärmebrücken und eine verbesserte Lüftungs-technik mit Wärmerückgewinnung durch die Einsparverordnung gefördert. Wegen des großen Anteils an den absehbaren Einsparpotenzialen und der verhältnismäßig guten Datenlage wird im Folgenden das Rohstoffeinsparpotenzial durch Wärmedämmung genauer untersucht.

Der aktuelle durchschnittliche Endenergiebedarf eines Wohnhauses beträgt 23.069 Kilowattstunden pro Jahr (bzw. 182 kWh/(m²·a); [DENA, 2012]), was auf einen Gesamtendenergiebedarf aller deutschen Wohngebäude von 436,5 Terawattstunden hinausläuft. Unter Berücksichtigung der Beheizungs-struktur (d.h. des Primärenergieträgermixes) des Jahres 2010 [AGEB, 2014] und Vernachlässigung von Fernwärme, Strom und Wärmepumpen lässt sich daraus ein KRA von 48,7 Mio. Tonnen jährlich be-rechnen.

Das durchschnittliche deutsche Wohnhaus weist aktuell, wie in Tabelle 10 dargestellt, Dämmstärken zwischen 8,1 (Kellerdecke) und 13,3 cm (Dach) auf. Demgegenüber wird für eine neuartige Wärmedämmung eine durchschnittlich um 45 % verstärkte Dämmschicht und für zukunftsweisend sanierte Häuser eine um durchschnittlich 146 % verstärkte Dämmung angenommen.

Tabelle 10: Für die Wärmeisolierung von Gebäuden verwendete Dämmstärken

	Aktueller Durchschnitt ^a [cm]	Neuartig (ab 2005) ^a [cm]	Zukunftsweisend ^b [cm]
Wand	9,4	14,1	32
Dach	13,3	18,7	32
Keller	8,1	11,9	11,9 ^c

Quelle: ^a Henning et al. [Henning / Palzer, 2012], ^b BMVBS (2008), ^c Wert von Szenario „Neuartig“.

Aufgrund des erforderlichen Modellierungsaufwandes ist es im Rahmen dieser Studie nicht möglich, die direkten Auswirkungen der verstärkten Dämmung auf den Energiebedarf zu berechnen. Stattdes-sen werden in einer Art Sensitivitätsanalyse die energetischen und rohstoffmäßigen Auswirkungen verschiedener Maßnahmen miteinander verglichen. Seitens des Materialeinsatzes wird dabei auf die Verstärkung der Dämmschichten im Rahmen der neuartigen und zukunftsweisenden Wärmedämmung (vgl. Tabelle 10) Bezug genommen; hinsichtlich der Energieeinsparungen werden das "energe-tisch gut modernisierte Einfamilienhaus" und das "Effizienzhaus 40" mit einem Endenergiebedarf von 140 bzw. 25 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr als Referenz betrachtet. Während sich bei allgemeiner Anwendung dieser Energieeffizienz-Standards der für die Wärmeversorgung erforderli-che KRA von 48,7 Mio. Tonnen RME auf 37,5 bzw. 15,1 Mio. Tonnen RME senken lässt,¹⁵ ist der Mehr-aufwand für die Dämmung verhältnismäßig gering. Er betrüge für die Ausstattung aller Häuser mit neuartiger oder zukunftsweisender Dämmung unter Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren nur 0,37 bzw. 0,81 Mio. Tonnen RME jährlich.

4.3.1.4 Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft durch Precision Farming

Der landwirtschaftliche Sektor lag nicht im Fokus der Modellierung; er wurde aber in den vorbereiten-den Arbeiten als ein wichtiger und materialintensiver Bereich benannt. Als ein Beispiel dafür, dass

¹⁵ In den 15,1 Mio. Tonnen RME ist neben dem Energieverbrauch der Wärmebereitstellung (6,7 Mio. t) auch die Energie zum Betrieb der Hausinfrastruktur (z.B. Lüftung; 8,4 Mio. t) enthalten.

auch relevante Effizienzsteigerungen in Sektoren erzielbar sind, die in diesem Projekt nicht betrachtet werden konnten, sei das Beispiel Precision Farming hier im Folgenden genannt.

Biogene Rohstoffe sind erneuerbare Rohstoffe, die für ihr Wachstum auf Inputfaktoren wie Wasser, Luft und Sonne angewiesen sind, die auch heute noch weitgehend von der Natur bereit gestellt werden. Werden jedoch, wie in der modernen Landwirtschaft, die Kreisläufe der erforderlichen Substanzen durch Entnahme, d.h. Ernte, der Erzeugnisse unterbrochen, dann müssen die nun für das Wachstum fehlenden Nährstoffe durch Düngung wieder hinzugefügt werden.

Der Absatz in Deutschland gewonnener oder dorthin importierter Düngemittel hat sich nach einem starken Anstieg nach dem zweiten Weltkrieg und einem Maximum von rund 8 Mio. Tonnen Mitte der 1980er Jahre im letzten Jahrzehnt in einem Bereich zwischen 4 Mio. und 5 Mio. Tonnen stabilisiert. Auffällig sind Schwankungen, die mit der wirtschaftlichen Konjunktur und, herausragend in den Jahren 2008 bis 2010, mit dem Preisanstieg der Düngemittel im Zuge der Rohstoffkrise einhergehen. Der Anteil der verschiedenen Nährstoffe hat sich dabei in den letzten 20 Jahren unterschiedlich entwickelt. Während der Anteil von Kalk (CaO) leicht anstieg, gingen die Anteile von Kalium (K_2O) und Phosphat (P_2O_5) leicht zurück; Stickstoff (N) blieb weitgehend konstant. Im Jahr 2010 wurden in Deutschland 4,51 Mio. Tonnen Düngemittel verkauft, deren Zuordnung zu den verschiedenen Nährstoffen in Tabelle 11 dargestellt ist. Anhand dieser Zahlen kann der KRA für den gesamten Mineraldüngerabsatz auf knapp 10 Mio. Tonnen berechnet werden.

Tabelle 11: Inlandsabsatz und KRA der Nährstoffe in Deutschland im Jahr 2010

	Einheit	N	P_2O_5	K_2O	CaO	Gesamt
Abgesetzte Menge	(1000 t)	1678	261	398	2176	4512
Spezifischer KRA	(kg/kg)	0,974	8,229	7,736	1,417	
KRA	(1000 t)	1634	2146	3081	3083	9944
Potenzielle KRA-Reduktion	(1000 t)	-245	-322	-462	-462	-1491

Quellen: Destatis (2013c), ifeu (2014b).

Ein wichtiger Ansatz zum effizienteren Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft ist die teilflächenspezifische Bewirtschaftung in der Pflanzenproduktion, das sogenannte "Precision farming". Hierbei werden kleinräumige Informationen über Flurstücke und darauf angebaute Kulturpflanzen gesammelt, mittels Informationstechnik verarbeitet und so an die Landtechnik weitergegeben, dass jedem Flurstück genau die Bewirtschaftung (d.h. auch Düngung) zu Teil wird, die es braucht, um einen optimalen Ertrag zu erbringen.

Der hinsichtlich der möglichen Effizienzsteigerung wichtigste Nährstoff ist Nitrat, die Stickstoffverbindung, die am häufigsten vorliegt und von den Pflanzen unmittelbar aufgenommen wird. Schon seit einigen Jahren gibt es Sensoren von der Firma YARA, die, auf dem Traktor montiert, anhand der Grünfärbung der zu düngenden Pflanzen deren Stickstoffbedarf bestimmen und damit eine Anpassung der Düngemittelgabe bei der Zweit- und Dritt düngung ermöglichen [Agricon, 2014]. Schwieriger war es dagegen bisher, die Stickstoffverfügbarkeit für die Erstdüngung unmittelbar vor der Aussaat zu bestimmen (wenn kein Pflanzengrün vorhanden ist). Da Nitrat eine hohe Mobilität aufweist, das heißt, in tiefere Schichten wandern oder ausgespült werden kann, ist es schwer einzuschätzen, wie viel Nitrat dann im Boden tatsächlich pflanzenverfügbar ist. Dazu waren bisher Laboruntersuchungen erforderlich, die mit höherem Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind und deshalb oft nicht im erforderlichen Umfang durchgeführt wurden. Die Folge war meist eine suboptimale (Erst-) Düngung, bei der entweder Düngemittel verschwendet wurden oder Ertragseinbußen hinnehmen waren. Neuere technische Entwicklungen bedienen sich nun eines kleinen mobilen Gerätes, eines sogenannten "Labs on the Chip", mit Hilfe dessen vor Ort in wenigen Minuten der Nitratgehalt und ggf. noch der anderer

Nährstoffe in einem Schritt gemessen werden können. Optifert (2014) und Plumeré (2014) sind unabhängige Entwicklungen in diese Richtung, die durch Vereinfachung und Miniaturisierung die System- und damit auch Analysekosten sehr niedrig halten können. Sie können, ähnlich der Blutzuckermessung durch Diabetiker, unmittelbar vor der Düngung vor Ort vom Landwirt selbst durchgeführt und über GPS auch geografisch genau mit der Düngemittelgabe abgestimmt werden.

Hinsichtlich der Wirkung des YARA-Sensors gibt die Firma Agricon an, dass trotz eines Stickstoffmindereinsatzes bei der Zweit- und Drittdüngung von 12 % eine Ertragssteigerung um 6 % erreicht wird. Für eine gegebene Ertragsmenge berechnen Schimanski et al. (2010) daraus eine Effizienzsteigerung hinsichtlich des Düngemittelaufwandes in Höhe von rund 15 %. Eine weitere Steigerung durch die bedarfsgerechtere Erstdüngung ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Inzwischen sind auch weitere bzw. leistungsstärkere Sensoren in der Entwicklung, die auch für Phosphatdüngemittel eine bedarfsgerechte Anpassung der Düngemittelgabe ermöglichen. Es erscheint also angemessen, für den gesamten Düngemittelleinsatz von einer möglichen Effizienzsteigerung in Höhe von 15 % auszugehen, woraus sich die in Tabelle 11 Einsparungen berechnen lassen.

4.3.2 Materialsubstitution

4.3.2.1 Erneuerbare anstelle von fossilen Energieträgern

Die deutsche Bruttostromerzeugung lag im Jahr 2013 bei 633,6 Terawattstunden und damit, vom Krisenjahr 2009 abgesehen, seit 2005 auf etwa gleich hohem Niveau. Braunkohle (19,6 %) und Steinkohle (25,6 %) dominieren dabei mit insgesamt 45,1 Prozent den deutschen Strommix, wobei ihr Anteil seit 1990 nur langsam zurückgeht. Demgegenüber stieg der Anteil der erneuerbaren Energieträger, u.a. wegen des EEG, im gleichen Zeitraum deutlich an und erreichte im Jahr 2013 eine Höhe von 25,4 % (152,6 TWh). Dieser Anstieg ging vor allem auf Kosten der Kernenergie, deren Anteil von einem Maximum von fast 30 % auf weniger als 14 % im Jahr 2013 zurückging [BMWi, 2014].

Um den Rohstoffbedarf zur Stromerzeugung in Deutschland abzuschätzen, müssen neben den Betriebsmitteln, d.h. insbesondere den (Primär)Energieträgern auch Aufwendungen für die Infrastruktur, d.h. Materialien zu Bau und Instandhaltung der Kraftwerke, berücksichtigt werden, die sich aus typischen Baumaterialien wie beispielsweise Beton, Stahl und Kies zusammensetzen. Diese Rohstoffaufwendungen werden aus der Datenbank EcoInvent (Version 3.1), in der verifizierte Inventare zu den jeweiligen Kraftwerkstechnologien exemplarisch hinterlegt sind, extrahiert und auf den gesamten deutschen Kraftwerkspark hochgerechnet. Nicht berücksichtigt wird der Einfluss der Stromtransportinfrastruktur, da eine klare Zuordnung zu den einzelnen Energieträgern nicht möglich ist. Die auf dieser Grundlage berechneten, spezifischen KRA-Werte pro Einheit (TJ) produzierten Stroms sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Spezifische KRA-Werte der Bruttostromerzeugung auf Basis verschiedener Energieträger

Konventionelle Energieträger	Spez. KRA (t/TJ)	Erneuerbare Energieträger	Spez. KRA (t/TJ)
Braunkohle	352,15	Photovoltaik	34,19
Steinkohle	177,67	Windkraft	27,18
Mineralöl	91,49	Wasserkraft	5,47
Erdgas	61,82	Biomasse	52,50
Kernenergie	1,23	Geothermie	0,47
Gichtgas	0,23	Müll	653,6

Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Berechnungen auf Basis von Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2014).

Hervorzuheben ist, dass im von konventionellen Kraftwerken dominierten Strommix des Jahres 2010 der Anteil der Energieträger am KRA mehr als 97 % ausmacht. Bei den konventionellen Kraftwerken sind es sogar 99 %, so dass die Infrastruktur fast vernachlässigt werden kann. Bei den Erneuerbaren sind die spezifischen Rohstoffaufwendungen für die Kraftwerke deutlich höher; dafür entfällt der Aufwand für die Energieträger völlig. Auf jeden Fall wird deutlich, dass ein Umsteigen auf erneuerbare Energieträger ein bedeutendes Rohstoffeinsparpotenzial nach sich ziehen kann.

Insgesamt weisen die regenerativen Energieträger ein technisch-ökologisches Potential von 705 TWh in Deutschland auf, wodurch sie die aktuelle Stromerzeugung (633,6 TWh) im Prinzip decken können. Das zumindest theoretische Potenzial einer 100 prozentigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern wird von Klaus et al. (2010) und Henning and Palzer (2012) bestätigt. Allerdings bedarf es u. a. einem weiteren Netzausbau, um die dezentralen regenerativen Kraftwerke in das Stromnetz integrieren zu können. Außerdem ist ein weiterer Ausbau von Stromspeichersystemen notwendig. Beides ist in der Ermittlung des Rohstoffaufwandes nicht enthalten.

Um sinnvolle Potentiale aufzuzeigen, werden dem Basisszenario (Stand 2010) verschiedene Szenarien gegenübergestellt, die sich durch unterschiedliche Strommixe auszeichnen, wobei die erzeugte Strommenge mit 632,98 TWh immer der des Jahres 2010 entspricht. In dem theoretischen Szenario „Wind“ erfolgt die Bruttostromerzeugung ausschließlich mittels Windkraft. In den Szenarien auf Basis der Prognos-Studie [Prognos AG, 2011] werden zwei verschiedene Energieszenarien angenommen: zum einen unter der Randbedingung des Atomausstiegs „Energiemix 2030 Ausstieg“ und zum anderen bei Laufzeitverlängerung der Atomkraftwerke „Energiemix 2030 LZV“. Des Weiteren wird in dem Szenario „Regionenverbund“ vom Umweltbundesamt [Klaus et al., 2010] ein Energiemix mit 100 % erneuerbaren Energien untersucht. Außerdem wird noch ein Szenario betrachtet, in dem ein Energiemix entsprechend der technisch-ökologischen Potentiale der erneuerbaren Energieträger angenommen wird. Auch hier tragen die konventionellen Energieträger nicht mehr zur Bruttostromerzeugung bei.

Aus den in Tabelle 13 dargestellten Analyseergebnissen wird deutlich, dass, ausgehend vom Energieträgermix des Jahres 2010, die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energieträger unabhängig vom genauen erneuerbaren Strommix ein KRA-Einsparpotenzial von rund 80 % aufweist. Das absolute Einsparpotenzial beträgt dementsprechend zwischen 242 und 247 Mio. Tonnen RME.

Tabelle 13: KRA-Reduktionspotentiale verschiedener Szenarien der Stromerzeugung in Deutschland

KRA	Basis-szenario 2010	Szenario Wind	Energie-mix 2030 Ausstieg	Energiemix 2030 Laufzeit-ver-längerung	Szenario „Regionen-verbund“ UBA	Technisch-Ökologi-sches Potential
Gesamt KRA [Mio. t]	305,6	61,9	218,9	167,8	58,5	63,4
Absolute KRA-Reduktion [Mio. t]	0,0	-243,7	-86,7	-137,8	-247,1	-242,2
Relative Reduktion (%)	0	-79,7	-28,4	-45,1	-80,9	-79,2

Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Berechnungen

4.3.2.2 Elektrische Leitungen: Aluminium anstelle von Kupfer

Als Leiterwerkstoff in der elektrischen Gebäudeinstallation Europas wird heute ausschließlich Kupfer verwendet. In der ehemaligen DDR wurden aus Gründen der leichteren Verfügbarkeit auch Aluminiumleitungen verbaut, in Entwicklungsländern geschieht dies zum Teil heute noch. Auch aus Sicht der Rohstoffverwendung wäre Aluminium günstiger, da es weniger ressourcenintensiv ist. Nach Aussage des Deutschen Kupferinstituts wird der Einsatz von Aluminium in Installationsleitungen in Westeuropa durch die Normung aber nicht zugelassen [DKI, 2014]. Bestehende Elektroinstallationen unter

Verwendung von Aluminiumleitungen dürfen jedoch weiter genutzt werden, wenn deren Austausch unverhältnismäßig wäre und die übertragenen Leistungen gering bleiben. Grund dafür ist, dass Aluminium im Vergleich zum Kupfer spröder ist und ein Aluminiumdraht durch mehrmaliges Biegen brechen kann. Dadurch kann ein Lichtbogen entstehen, das Kabel kann sich erhitzen und ein Brand entstehen. Ähnliche Folgen kann der Kontaktverlust an herkömmlichen Klemmen durch die Fließneigung von Aluminium haben. Grundsätzlich können diese Schwierigkeiten auf technischem Weg überwunden werden; bei Unterlassung dieses Aufwandes stellen sie aber ein Sicherheitsrisiko dar.

Die Leitfähigkeit von Kupfer für elektrische Leitungen ist, wie in Tabelle 14 dargestellt, um 58 % höher als die von Aluminium. Die schlechtere Leitfähigkeit von Aluminium kann in vielen Anwendungsfällen durch einen größer dimensionierten Leiterquerschnitt ausgeglichen werden. Aluminium weist mit einer Dichte von $2,71 \text{ g/cm}^3$ nur 30 % der Dichte von Kupfer auf, die $8,94 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Trotz des größeren Leiterquerschnitts ist also aufgrund der geringeren Leitfähigkeit die Aluminiumleitung bei gleicher Leitfähigkeit weniger als halb so schwer wie eine Kupferleitung gleichen Widerstands. Dies hat dazu geführt, dass in gewichtskritischen Anwendungen (z.B. Flugzeugbau) häufiger Aluminiumleitungen eingesetzt werden. Zieht man zusätzlich in Betracht, dass der spezifische KRA von Kupfer bei dem in Deutschland erreichten Sekundärkupferanteil von 50 % um fast den Faktor 9 höher ist als die für die Drahtherstellung verwendeten Knetlegierungen mit maximal 30 % Sekundäraluminium, dann resultiert daraus ein KRA-Einsparpotenzial von 94,2 %. Im Gegensatz dazu ist bemerkenswerterweise der kumulierte Energieaufwand (KEA) und damit im Falle der Verwendung fossiler Energieträger auch das Treibhauspotenzial bei Verwendung von Aluminiumdrähten um das 3,5-fache höher als bei Kupferdrähten.

Tabelle 14: Technische Basisdaten für den Vergleich zwischen Kupfer und Aluminium

Eigenschaft	Einheit	Kupfer	Aluminium	Bemerkung
Leitfähigkeit	$\text{m}/\Omega \text{ mm}^2$	58,0	36,6	
Leitungsquerschnitt	mm^2	1,5	2,5	Gleiche Leitfähigkeit
Dichte	kg/dm^3	8,9	2,7	
Drahtmasse	g/m	13,4	6,8	
KRA	kg/t	67,7	7,7	Sekundärkupferanteil 50 %, Al Knetlegierung mit 30 % Sekundäraluminium [ifeu, 2012a, 2014b]
KEA	MJ/t	36.773	127.547	s. KRA

Eine Substitution von Kupfer durch Aluminium kommt aus technischen Gründen nur für die elektrische Energieübertragung, nicht jedoch für die Übertragung von Daten in Betracht. Laut IWCC (2014) gehen in diese Kupfernutzung 20,8 Prozent des globalen Kupferverbrauchs ein. Wird diese Verwendungsstruktur auf Westeuropa und Deutschland übertragen, so resultiert daraus bei einer gesamten Kupferverwendung in Deutschland im Umfang von 1,522 Mio. Tonnen jährlich ein Bedarf von 316.600 Tonnen Kupfer allein für die Leitungsinstallation zur Übertragung elektrischer Energie in Gebäuden. Unter Berücksichtigung des in Tabelle 14 angegebenen spezifischen KRA und dem oben berechneten KRA-Einsparfaktor von 94,2 % lässt sich daraus ein KRA-Einsparpotenzial von 20,2 Mio. Tonnen berechnen.

4.3.2.3 Leichtbau bei Straßen- und Luftfahrzeugen auf Basis von CFK

Klimaschutz und Elektromobilität haben den seit langem anhaltenden Trend zum Leichtbau in der Fahrzeugtechnik in den letzten Jahren noch verstärkt. Insbesondere bei den batteriegetriebenen reinen Elektrofahrzeugen spielt die Reduktion des Fahrzeuggewichts eine wichtige Rolle, um die Reichweite der Fahrzeuge zu steigern. Tatsächlich haben die Verbesserung der Crashsicherheit, aber auch

Komfortbedürfnisse wie elektrische Fensterheber, Servolenkung, Vierradantrieb und Breitreifen sowie die stärkere Motorisierung das Fahrzeuggewicht in den letzten Jahrzehnten laufend erhöht. Durch Leichtbautechniken ist es dabei zumindest gelungen, die Gewichtszunahme abzumildern.

Das klassische Leichtbaumaterial ist Aluminium. Daneben kommen Komponenten aus Magnesium und Titan zum Einsatz. Ein in der Serienfertigung von Kraftfahrzeugen neues Material ist kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoff (CFK). Die Fahrgastzellen der Pkw-Modelle i3 und i8 von BMW sind die ersten, die zur Gänze aus CFK bestehen. Die Gewichtseinsparung von CFK gegenüber Stahl beträgt für die entsprechenden Bauteile rund 50 % und im Vergleich zu Aluminium 30 % (BMW AG 2014; VW 2009, S.131) was sich bei den Fahrzeuggewichten in Reduktionen (im Vergleich zur Stahlkarosserie) um bis zu 300 Kilogramm pro Fahrzeug niederschlagen kann. Zu dem reinen Gewichtsvorteil addiert sich der Vorteil des CFK hinsichtlich des spezifischen KRA, der für Stahl 10,0 kg/kg, für CFK hingegen nur 4,4 kg/kg beträgt (ifeu, 2014 und eigene Berechnungen). Insgesamt kann so pro Kilogramm durch CFK ersetzen Stahls ein KRA von 7,8 kg vermieden werden. Angesichts von 3,2 Mio. in Deutschland (im Jahr 2010) zugelassenen Fahrzeugen und einem durchschnittlichen substituierbaren Stahlanteil von ca. 350 Kilogramm pro Fahrzeug, addiert sich die theoretisch mögliche KRA-Einsparung auf insgesamt 8,7 Mio. Tonnen.¹⁶

Diesem Rohstoffvorteil steht der Nachteil gegenüber, dass im Gegensatz zu Stahl eine stoffliche Verwertung auf gleichem Qualitätsniveau für CFK bislang nicht möglich ist. Die duroplastische Kunststoffmatrix kann nur energetisch verwertet werden. Es wird berichtet, dass die Kohlenstofffasern zurückgewonnen werden können (CFK-Recycling 2014). Diese verkürzen sich jedoch bei der Rückgewinnung und können danach zwar als Beimischung in Spritzgussanwendungen verwendet werden, ohne Beimischung von Primärfasern jedoch nicht für die Herstellung hoch belastbarer CFK-Bauteile. Weitere Nachteil von CFK-Bauteilen besteht darin, dass sich zum einen Produktionsfehler oder andere Schäden nicht immer leicht feststellen und reparieren lassen und zum anderen die Produktion heute noch mit einem großen Energieaufwand verbunden ist. Wie sich diese Nachteile auf Dauer auf die rohstoffliche Gesamtbilanz auswirken werden, ist momentan nicht abschätzbar.

4.3.3 Recycling

4.3.3.1 Recycling von Verpackungskunststoffen

Kunststoffe stellen eine der wichtigsten Produktgruppen der chemischen Industrie dar. Für ihre Herstellung finden als Rohstoffe vor allem Erdöl und, in geringerem Umfang, Erdgas Verwendung. 5, % des in Deutschland 2010 verbrauchten Erdöls und 2,7 % des Erdgases fließen in die Herstellung von Kunststoffen [AGEB, 2012]. Die verstärkte Wiederverwendung von Kunststoffabfällen kann daher einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Rohstoffverbrauchs leisten.

Angesichts der Vielzahl von Kunststoffsorten und ihren Anwendungs- sowie möglichen Verwertungsmöglichkeiten ist es im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, alle oder eine größere Zahl von Verwendungsbereichen zu analysieren. Stattdessen muss eine Auswahl getroffen werden, die sich an der Bedeutung der Anwendungsbranchen und der dort verwendeten Kunststoffe orientiert. Wie die Übersicht aller Kunststoffverwendungen im Jahr 2011 in Deutschland [Consultic, 2012] zeigt, treten dabei zwei Bereiche hervor: der Verpackungsbereich mit Polyolefinen (insbesondere PE, außerdem PET) sowie den Baubereich mit PVC (und Polyolefinen) als wichtigsten Kunststoffsorten.

Um das durch die Verwertung von Kunststoffabfällen erzielbare Rohstoffeinsparpotenzial zu ermitteln, haben Wagner et al. (2012) für jede der oben identifizierten, wichtigsten Kunststoffsorten nicht nur die Post-Consumer-Abfallmengen in jedem ihrer wichtigen Anwendungsbereiche bestimmt, sondern auch Art und Umfang ihrer jeweiligen Verwertung. Was die Verwertungswege angeht, so wird bei

¹⁶ Der kumulierte Energieaufwand von CFK ist insbesondere aufgrund des energieaufwändigen Herstellungsprozesses der Kohlenstofffasern und trotz des Gewichtsvorteils deutlich höher als der von Stahl.

der werkstofflichen Verwertung zwischen hochwertigen, sortenreinen Kunststoffen und Mischkunststoffen unterschieden, von denen erstere als (Re-)Granulate die entsprechenden Primärkunststoffsor-ten substituieren, während letztere durch thermoplastische Verformung der Herstellung solcher Produkte dienen, in denen sie Holz oder Beton ersetzen. Die rohstoffliche Verwertung der Kunststoffab-fallfraktionen erfolgt ausschließlich als Reduktionsmittel im Hochofenprozess, wodurch Schweröl als Primärrohstoff ersetzt wird. Die energetische Verwertung, die den größten Anteil der Verwertung ins-gesamt ausmacht, geschieht überwiegend in Müllverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraft-werken, in denen die Kunststoffe die Primärenergieträger des deutschen Strom- und Wärmemixes er-setzen, wogegen in Zementwerken vor allem Steinkohle substituiert wird. Nachdem aufgrund des je-wils substituierten Materials (und seines jeweiligen spezifischen KRA-Wertes und des Aufwandes für Sammlung und Sortierung) für jede Kombination aus Kunststoff und Verwertungsweg eine spezifische KRA-Reduktion berechnet wurde (vgl. Tabelle 15), sind Wagner et al. (2012) schließlich in der Lage, die mit der Verwertung von Kunststoffabfällen nach heutigem Stand (2011) verbundenen absoluten Reduktionen des KRA zu beziffern. Sie betragen 1,88 Mio. Tonnen RME.

Tabelle 15: Spezifische KRA-Reduktionen bei der Verwertung verschiedener Sorten von Kunststoff-abfällen aus dem Verpackungs- und Baubereich (in kg/kg)

Verwertungswege	HDPE	LDPE	PET	PVC
Werkstofflich, sortenreiner Kunststoff	1,357	1,429	2,236	0,765
Werkstofflich, Mischkunststoff	2,930*	2,930*	2,930*	2,930*
Rohstofflich	0,536	0,536	0,204	-0,085
Energetisch in der MVA	0,626	0,626	0,448	0,286
Energetisch im EBS-Kraftwerk	0,644	0,644	0,428	**
Energetisch im Zementwerk	2,055	2,055	1,428	0,854

* Wert gilt für die Mischung der Kunststoffe.

**Die Verbrennung von PVC im EBS-Kraftwerk wird nach Möglichkeit vermieden.

Quelle: Wagner et al. (2012) und eigene Berechnungen.

Um diesem Status quo ein Szenario (quantitativ) umfassenderer und (qualitativ) besserer Verwertung von Kunststoffabfällen gegenüberzustellen, werden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Im Jahr 2007 wurden laut Wagner et al. (2012) rund 600.000 Tonnen mehr Kunststoffabfälle, vor allem ausgediente Verpackungen, exportiert als importiert. Es ist unklar, in welchem Umfang und in welcher Art dieser Abfall im Ausland der Verwertung zugeführt wird. Dennoch scheint es grundsätzlich möglich, durch entsprechende Anreizsetzung die Hälfte davon, d.h. 300.000 Tonnen, nicht zu exportieren und in Deutschland einer Verwertung zuzuführen.
- ▶ Consultic (2012) zufolge betrug das verwertete Abfallaufkommen der untersuchten Kunststoffs-orten im Baubereich im Jahr 2011 nur 357.000 Tonnen. Geht man davon aus, dass die im Jahr 2011 in der Bauwirtschaft verwendeten 2,78 Mio. Tonnen Kunststoff in 40 Jahren anlässlich von Sanierungen oder Rückbauten wieder als Abfall in Erscheinung treten und dass 60 % davon als Kunststoff erfasst und einer Verwertung zugeführt werden kann, so wären das 1,668 Mio. Tonnen, 1,311 Mio. Tonnen mehr als 2011.
- ▶ Im Jahr 2007 lag der Anteil der werkstofflichen Verwertung Wagner et al. (2012) und Consultic (2012) zufolge bei rund 35 %. Für das Einsparszenario gehen wir davon aus, dass in beiden Berei-chen ein doppelt so hoher werkstofflicher Verwertungsgrad, d.h. 70 %, erreichbar ist, wobei der Anteil der energetischen Verwertung entsprechend zurückgeht und alle anderen Verwertungs-grade unverändert bleiben.

Im Szenario einer entsprechend dieser Annahmen optimierten Verwertung berechnet sich ein KRA-Einsparpotenzial von 4,57 Mio. Tonnen RME, so dass beim Vergleich der Szenarien von einem Reduktionspotenzial in Höhe von 2,69 Mio. Tonnen RME ausgegangen werden kann.

4.3.3.2 Ersatz chemischer Düngemittel durch Wirtschaftsdünger

Ein Zehntel des in Deutschland verbrauchten Erdgases wird einer stofflichen Verwendung zugeführt, wovon wiederum 35 Prozent für die Herstellung von Düngemitteln und anderen Stickstoffverbindungen verwendet werden. Stickstoffhaltige Düngemittel sind also die größte einzelne Stoffgruppe, die auf Basis von Erdgas hergestellt wird. Anstelle chemischer Düngemittel könnten auch verstärkt Wirtschaftsdünger zum Einsatz kommen, die einen in der Tierhaltung anfallen Sekundärrohstoff darstellen, der nur einen geringen Rohstoffaufwand verursacht, andererseits aber die Inanspruchnahme primärer Rohstoffe reduzieren.

Tatsächlich werden Wirtschaftsdünger auch heute schon als Nährstoff-, insbesondere Stickstofflieferanten, genutzt (vgl. Tabelle 16); dies geschieht aber auf eine eher ineffektive Weise. Ursache dafür ist das regional sehr ungleiche Aufkommen von Wirtschaftsdüngern in Verbindung mit dem vor allem bei Gülle eher geringen spezifischen Nährstoffgehalt, der einen Transport über weitere Strecken wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheinen lässt. Wirtschaftsdünger kommen daher oft in den Regionen, in denen sie anfallen (also vor allem im westlichen Niedersachsen), in weit größeren Mengen zum Einsatz, als es sinnvoll ist, so dass die Düngung teilweise den Charakter einer Entsorgung überschüssiger Gülle oder Mists annimmt.

Tabelle 16: Verwendung von Wirtschaftsdünger und ihr N-Gehalt in Deutschland im Jahr 2010

Düngerart	Menge	Einheit	N-Gehalt	Einheit	N-Gehalt (1000 t)
Flüssiger Wirtschaftsdünger	190,7	Mio. m ³	5,0	kg/m ³	953
Festmist	25,7	Mio. t	6,5	kg/t	167
Geflügeltrockenkot	1,7	Mio. t	25,0	kg/t	42
Fester Biogas-Gärrest	0,9	Mio. t	6,5	kg/t	6
<i>Summe</i>					1168

Quelle: Destatis (2011), <http://www.effizientduengen.de/files/orgduenger.php> (31.7.2014)

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie viel chemische Düngemittel eingespart werden könnten, wenn Wirtschaftsdünger bedarfsgerecht, d.h. so verwendet würden, dass ihre Düngewirkung optimiert wird. Ausgangspunkt für diese Untersuchung ist eine Studie von [Kreins et al., 2007], in der für das Land Niedersachsen untersucht wird, wie sich die Festlegung einer verbindlichen, bedarfsorientierten Obergrenze für die Stickstoffausbringung auf die überregionale Verteilung der Stickstoffbelastung in Gewässern auswirkt. Für die Zielsetzung der vorliegenden Studie, die Analyse einer effizienteren Verwendung von Wirtschaftsdünger, erscheint das Szenario mit Transport, mit einem Grenzwert von 80 Kilogramm pro Hektar und der Möglichkeit einer differenzierten, bedarfsangepassten Stickstoffzufuhr als am geeignetsten. Für dieses Szenario und für das Untersuchungsgebiet, Niedersachsen, ermitteln sie einen Transportbedarf von rund 71.500 Tonnen Stickstoff. Um dieses Ergebnis auf die gesamte Bundesrepublik zu übertragen, wurden auf der Basis der durchschnittlichen Stickstoffbilanzüberschüsse aller Landkreise Deutschlands diejenigen Mengen bestimmt, die über den angenommenen Grenzwert von 80 Kilogramm pro Hektar hinausgehen. Diese wurden mit den entsprechenden Werten für Niedersachsen verglichen, woraus ein Verhältnisfaktor von 2,573 bestimmt werden konnte. Werden nun die für Niedersachsen ermittelten 71.500 Tonnen mit diesem Faktor multipliziert, dann resultiert daraus für ganz Deutschland eine Stickstofftransportmenge von rund 184.000 Tonnen. Wird außerdem berücksichtigt, dass vom Stickstoffgehalt der Gülle nur 60 % düngemittelwirksam sind, dann ergibt sich aus dem effizienten Einsatz der Gülle eine Einsparung an mineralischen

Stickstoffdüngemitteln im Umfang von 110.400 Tonnen pro Jahr. Multipliziert mit dem spezifischen KRA von Ammoniak (in Höhe von 0,97 kg/kg), dem Grundstoff der Stickstoffdüngemittelsynthese, und unter Berücksichtigung des höheren Molgewichtes von Ammoniak (gegenüber elementarem Stickstoff) resultiert daraus ein eingesparter KRA in Höhe von 130 Kilotonnen.

Außerdem ist in diesem Zusammenhang noch zu berücksichtigen, dass Gülle neben Stickstoff einen nennenswerten Gehalt an Phosphat aufweist, welches außerdem eine relativ hohe (70 %) Düngettelwirksamkeit aufweist. Unter Zugrundelegung eines im Vergleich zum Stickstoff nur halb so hohen Phosphorgehaltes (2,5 kg P₂O₅ pro m³ Gülle) berechnet sich eine Einsparung von aus Primärphosphat hergestellten Phosphatdüngemitteln im Umfang von 64.400 Tonnen¹⁷. Die daraus mittels des spezifischen KRA von Rohphosphat (8,2 kg/kg; ifeu 2014b) zu berechnende KRA-Reduktion beträgt 528 Kilotonnen und ist damit noch um den Faktor 4 größer als die KRA-Reduktion seitens des Stickstoffs. Daraus resultiert ein Gesamt-KRA-Einsparpotenzial von 0,66 Mio. Tonnen, von dem 80 % der möglichen Reduktion des Einsatzes von Rohphosphat und damit den mineralischen Rohstoffen zuzuschreiben ist, aber nur 20 % dem ursprünglich im Fokus stehenden Einsparung des Energierohstoffes Erdgas.

4.4 Zusammenfassung: Vergleich der Potenziale

Die Ergebnisse der in Kapitel 4.3 durchgeführten Berechnungen der kumulierten Rohstoffeinsparpotenziale sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass

- ▶ Hinsichtlich der Rohstoffauswahl, wie aufgrund der Erwägungen in Kapitel 4.2 zu erwarten, vom gesamten KRA Deutschlands in Höhe von 2.887 Mio. Tonnen gut 53 % abgedeckt werden konnten,
- ▶ Rohstoffanwendungen mit einem Gesamt-KRA von 694 Mio. Tonnen analysiert wurden, die mehr als 46 % aller Verwendungen der ausgewählten Rohstoffe und damit knapp ein Viertel des gesamten KRA Deutschlands repräsentieren, und
- ▶ Innerhalb dieser Anwendungen wiederum deutlich mehr als die Hälfte, nämlich 410 Mio. Tonnen oder 59 % durch Maßnahmen eingespart werden können, die einerseits anspruchsvoll sind, andererseits aber mittel- bis langfristig flächendeckend umsetzbar erscheinen.

Dabei unterscheiden sich die betrachteten Fälle nicht nur hinsichtlich der in Anspruch genommenen Rohstoffmengen (KRA), sondern auch bezüglich der Einsparpotenziale stark. Das größte Einsparpotenzial mit mehr als der Hälfte des gesamten untersuchten Potenzials besteht bei der Substitution fossiler durch erneuerbare Energieträger. Weitere substantielle Einsparpotenziale ergeben sich aus dem Ersatz von Stahl durch CFK im Rahmen des Fahrzeugleichtbaus (ca. 20 %), dem Ersatz von Kupfer durch Aluminium in Stromleitungen (ca. 9 %), der effizienteren Zementherstellung (knapp 4 %) und der effizienteren Wärmenutzung in Wohngebäuden (knapp 3 %). Alle anderen Einsparpotenziale liegen bei einem Prozent des gesamten hier identifizierten Einsparpotenzials oder darunter.

Tabelle 17: Übersicht der ermittelten KRA-Reduktionspotenziale (Δ KRA)

Rohstoff	Verwendung	Szenario	KRA _{Rohstoff} (Mio. t/a)	KRA _{Verwendung} (Mio. t/a)	Δ KRA _{Verw} (Mio. t/a)	Δ KRA- Verw ((%)
Metallische Rohstoffe						
Kupfer	Elektrische Leitungen Hochbau	Substitution: Aluminium	103,1	39,0	-36,7	-94,1

¹⁷ Obwohl die Erscheinungsform sowie die pflanzenphysiologische Form des P-Düngers das Phosphat ist, wird der Phosphatgehalt in der phosphatgewinnenden Industrie konventionsgemäß in P₂O₅ gemessen.

Rohstoff	Verwendung	Szenario	KRA _{Rohstoff} (Mio. t/a)	KRA _{Verwendung} (Mio. t/a)	ΔKRA _{Verw} (Mio. t/a)	ΔKRA- Verw ((%)
Stahl	Automobil- und andere Bleche	Substitution: CFK	400,0	100,3	-82,9	-82,7
Mineralische Rohstoffe						
Sand/Kies (und Kalk)	Beton im Hoch- und Tiefbau	Effizienzanstieg	263,0	117,8	-4,6	-3,9
Kalk	Zement(klinker)-herstellung	Effizienzanstieg: ^a Betonherstellung	66,0	49,5	-14,7	-29,7
Energierohstoffe						
Kohle, Erdöl, Erdgas	Herstellung elektrischen Stroms	Substitution: Erneuerbare Energieträger	624,3	299,2 (+6,4) ^b	-247,1 ^c	-80,9
Erdöl/-gas	Beheizung von Gebäuden	Effizienzanstieg: Wärmedämmung		48,7	-10,9 (-5,9) ^d	-22,4 (-34,5) ^d
Erdöl/-gas	Kunststoffproduktion (Verpackung/Bau)	Recycling: Kunststoff	36,9	12,6 (+7,1) ^e	-1,9 (-2,9) ^e	-15,1 (-24,4) ^e
Erdgas	Düngemittelherstellung	Recycling: Wirtschaftsdünger		1,6 (+2,1) ^f	-0,13 (-0,53) ^f	-8,1 (-25,2) ^f
Biotische Rohstoffe						
Pflanzen (Landwirtsch.)	Lebensmittelproduktion	Effizienzanstieg: ^g Precision farming	— ^g	9,9 ^g	-1,5 ^g	-15,2
Summe:			1493,3	694,3	-409,8	-59,0

Anmerkungen: ^a Effizienzsteigerung seitens der Zementklinkerinputs Kalk, Sand und Ton

^b Rohstoffe Beton, Stahl u.a. für die Kraftwerke

^c Szenario "Regionenverbund" (UBA), einschl. Rohstoffe für Kraftwerk

^d Zusätzliche Einsparung bei Übergang zu Niedrigstenergiehausstandard

^e Wert für Verpackung und Bau, (-)Wert zusätzlich für gesamte Kunststoffproduktion

^f Zusätzlicher Aufwand bzw. Einsparung seitens P-Düngemittel

^g Effizienzsteigerung seitens der für die Pflanzenproduktion benötigten Rohstoffe N (Erdgas), P₂O₅, K₂O und CaO (die den Energie- und mineralischen Rohstoffen zuzurechnen sind)

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die in diesem Kapitel ermittelten Rohstoffeinsparpotenziale nur einer ersten Einschätzung darüber dienen, an welcher Stelle und in welchem Umfang überhaupt Potenziale vorliegen können. Keinesfalls antizipieren diese Zahlen die mittels URMOD in Kapitel 9 ermittelten Effekte, weil

- ggf. nur ein Teil des jeweils identifizierten Potenzials in den TW-Szenarien umgesetzt wird,

- ▶ ggf. ein Teil des jeweils identifizierten Potenzials schon im Szenario AZE realisiert wird, wodurch sich die Wirkung der Maßnahme, die sich aus der Differenz von Maßnahmen- und Referenzszenario ergibt, weiter reduziert und
- ▶ die Berechnungen in Kapitel 9 eigene spezifische KRA-Werte hervorbringen, die den spezifischen Vorgaben im Modell genau entsprechen, von den hier genutzten Werten von ifeu (2012) und ifeu (2014) aber durchaus abweichen können.

5 Einfluss relevanter Entwicklungstrends

5.1 Bevölkerung

5.1.1 Allgemeiner Trend und Datengrundlage für die Ausgestaltung der Szenarien

Die Bevölkerungsanzahl ist neben dem Wohlstandsniveau und dem Technischen Fortschritt zweifels-ohne einer der wichtigsten Faktoren für den gesamten Materialverbrauch einer Volkswirtschaft. Bereits in den 1970ern stellten Ehrlich und Holdren die IPAT-Identität auf, welche die menschliche Einwirkung auf die Umwelt als ein Produkt aus Bevölkerung, Wohlstand pro Kopf und Technologie begreift [Chertow, 2000], und damit der Bevölkerungsanzahl eine zentrale Rolle zuweist. Materialverbrauch kann hierbei als ein möglicher Proxy für die Einwirkung auf die Umwelt dienen. Nachfolgende Studien zeigten auf, dass sich der starke Zusammenhang von Materialverbrauch und Bevölkerung empirisch bestätigen lässt [Rosa et al., 2004], wobei Biomasse und Baumaterialien die stärkste Korrelation mit der Bevölkerung aufweisen [Steinberger et al., 2010].

In Deutschland ist die Einwohnerzahl seit den 1950er Jahren von 70 Mio. auf 82 Mio. im Jahr 2005 gestiegen. Die Zuwachsrraten haben sich allerdings in den letzten Jahren deutlich verlangsamt, was auf die seit den 1980er Jahren sinkende Geburtenrate zurückzuführen ist. Seit 2005 ist die Bevölkerungsanzahl rückläufig, im Basisjahr 2010 lebten 81.752 Mio. Menschen in Deutschland. Die jüngsten leichten Bevölkerungszuwächse sind auf positive Wanderungssalden zurückzuführen, da Deutschland in Zeiten der Eurokrise ein wirtschaftsattraktiver Arbeitsstandort ist.

Neben dem Rückgang der absoluten Bevölkerungsanzahl hat sich auch die Altersstruktur signifikant verändert. Der Anteil der Bevölkerung im Erwerbsalter ist zwar zwischen 1980 und 2010 noch von 45,4 % auf 54,6 % gestiegen, gleichzeitig hat allerdings auch der Anteil der Bevölkerung über 65 von 16 % auf 20,7 % zugenommen. Diese Verschiebungen der Altersstruktur haben Auswirkungen auf die Nachfrage nach Konsumgütern und Dienstleistungen. So kann gegenwärtig auf der Basis des Einkommens- und Verbrauchsstichproben 2013 beobachtet werden, dass die Nachfrage nach verschiedenen Konsumgütern und Dienstleistungen, wie beispielsweise zur Gesundheitspflege und nach Pauschalreisen, in der älteren Bevölkerung höher ist als im allgemeinen Durchschnitt, während die Nachfrage im Bereich Verkehr, Bildung und Telekommunikation niedriger ist [Destatis, 2013a].

Für die im Projekt erstellten Szenarien wurde die 12. Koordinierte Bevölkerungsvorausschau, Variante „Mittlere Bevölkerung, Obergrenze“ zu Grunde gelegt [Destatis, 2009]. Diese basiert auf der Annahme, dass die Geburtenhäufigkeit konstant auf einem niedrigen Stand bleibt (1,4 Kinder je Frau) und die Lebenserwartung kontinuierlich steigt (um 8 Jahre bei Jungen und um 7 Jahre bei Mädchen, die in 2060 geboren werden). Es wird ferner von einem Wanderungssaldo von 100.000 Personen ab 2014 und von 200.000 ab 2020 ausgegangen. Dieser Prognose folgend leben 79 Mio. Personen im Jahr 2030 in Deutschland, was einem Rückgang von -3,3 % verglichen mit der Bevölkerung im Jahr 2010 entspricht. Ab 2030 erfolgt dann ein stärkerer Rückgang bis auf 69,4 Mio¹⁸ (siehe Tabelle 18). Die absolute Anzahl der Rentner steigt demnach bis 2030 von 16,8 auf 20,3 Mio. an (28,3 % an der Gesamtbewölkerung), während die Bevölkerung im arbeitsfähigen Alter von 49,655 Mio. auf 43,465 Mio. sinkt.

¹⁸ Die Zahlen geben den Mittelwert der 12. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (Variante 1-W1 und 1-W2) an.

Tabelle 18: Bevölkerungsentwicklung —Szenario Mittlere Bevölkerung, Obergrenze

Parameter	Einheit	2010	2030
Bevölkerung absolut	Mio.	81,7	79,0
Anteil Menschen über 65 Jahren	%	20,7	28,3

Quelle: [Destatis, 2009].

5.1.2 Überleitung der Daten in URMOD

Die Bevölkerungsvorausschätzung liefert differenzierte Informationen zur Entwicklung der Anzahl und der Struktur der Bevölkerung. Im Modell gibt es keinen direkten Parameter, die diese externen Informationen unmittelbar abbilden. Die verfügbaren Informationen müssen somit außerhalb des Modells so umgeformt werden, dass diese für die Variation der Bezugsparameter im Modell nutzbar sind.

Die Annahmen über die Entwicklung der Bevölkerung wirken sich an verschiedenen Stellen des Modells aus. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erwähnt, wird hier bei der Übertragung in URMOD nur der Effekt auf die Generalbereiche einbezogen.

Die absolute Bevölkerungsentwicklung ist bedeutsam im Zusammenhang mit dem Wirtschaftswachstum. Dieser Faktor wird deshalb in Abschnitt 5.2.2. betrachtet. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Altersstruktur der Bevölkerung. Diese ändert sich im Szenario-Zeitraum. Zugleich unterscheidet sich die Struktur der Nachfrage nach Konsumgütern nach Altersgruppen. Der Altersstruktureffekt quantifiziert den dadurch bedingten Einfluss auf die künftige Nachfrage nach Konsumgütern. Auf der Grundlage der Entwicklung der Bevölkerungszahlen nach Altersgruppen und den Angaben der laufenden Wirtschaftsrechnungen über die Struktur der Konsumausgaben nach Altersgruppen wurde ein entsprechendes „Konsummodell“ entwickelt, das die Veränderung der Konsumstruktur nach Gütergruppen im Szenario-Zeitraum schätzt. Die so ermittelten Veränderungen der Konsumstruktur wurden auf die Elemente der Endnachfragematrix (y) in URMOD übertragen (s. Tabelle 1, Faktor 5).

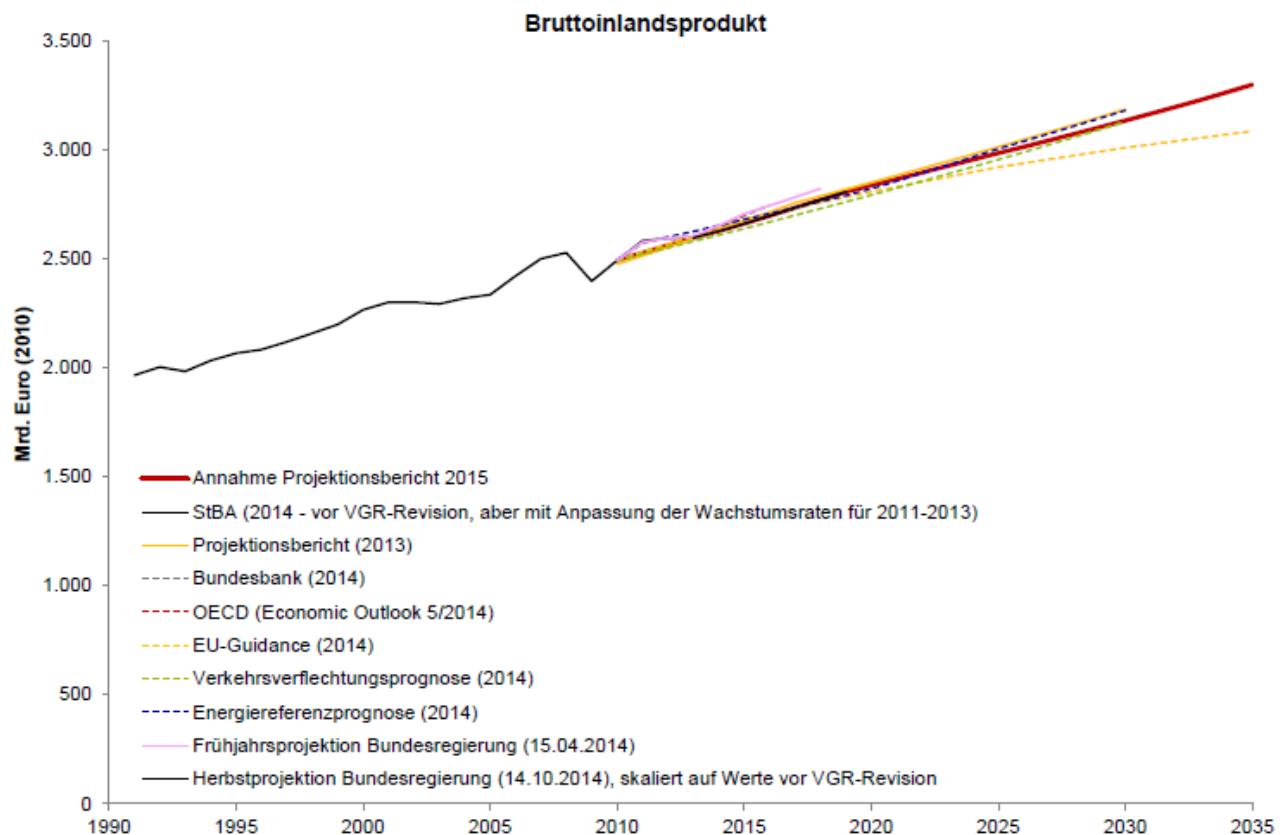
5.2 Entwicklung des Bruttoinlandprodukts

5.2.1 Allgemeiner Trend und Datengrundlage für die Ausgestaltung der Szenarien

Ähnlich wie die Bevölkerungsentwicklung hat die wirtschaftliche Entwicklung generell einen sehr hohen Einfluss auf den Materialbedarf [Wiedmann et al., 2015]. Steinberger et al. [Steinberger et al., 2010] beobachten eine besonders hohe Korrelation zwischen BIP pro Kopf und dem Bedarf an fossilen Brennstoffen und Baumaterialien auf globaler Ebene, während der Biomassebedarf einen deutlich schwächeren Zusammenhang aufweist. Da die Annahme über das zukünftige Wirtschaftswachstum die Ergebnisse der Modellierung in erheblichem Maße beeinflusst, wird im Folgenden die Projektion für das zukünftige Wirtschaftswachstum in Deutschland diskutiert.

In den letzten Jahrzehnten haben die Wachstumsraten in Deutschland kontinuierlich abgenommen. Während es in den 70er Jahren noch ein durchschnittliches jährliches Wirtschaftswachstum von 2,9 % gab, ist dieses bis in die 90er auf 1,6 % gesunken. In den Jahren 2000-2010 lag es aufgrund der Wirtschaftskrise gar nur noch bei 0,9 % [Destatis, 2015a]. Abbildung 11, welche dem BMUB Projektionsbericht [BMUB, 2015] entnommen wurde, stellt die Entwicklung seit 1990 dar. Der Einbruch durch die Wirtschaftskrise sowie die darauffolgende Erholung sind deutlich zu erkennen.

Abbildung 11: Vergangene Entwicklung des BIP und aktuelle Projektionen



Quelle: [BMUB, 2015].

Bezüglich der zu erwartenden zukünftigen Entwicklung stützt sich der vorliegende Bericht ebenfalls auf den BMUB Projektionsbericht, welcher die Ergebnisse verschiedener Prognosen berücksichtigt. Abbildung 11 bietet einen Überblick über die Unterschiede zwischen den verschiedenen Prognosen. Basierend auf den Kurzfristprognosen des BMWi und der Herbstprojektion der Bundesregierung von 2014 nimmt der Projektionsbericht für die Jahre 2013-2019 ein Wachstum von 1,3 % jährlich an. Die Annahme ist dabei, dass die Erholungsphase und damit auch die erhöhten Wachstumsraten im Ausklang begriffen sind. Für die Periode von 2020 bis 2035 folgt der Projektionsbericht der OECD Projektion, die ein relativ stabiles positives Wachstum von 1,0 % annimmt. Über den gesamten Zeitraum von 2010 bis 2030 gerechnet ergibt sich daraus ein durchschnittliches Wachstum von 1,2 % p.a [BMUB, 2015]. In Anlehnung daran wird in diesem Bericht statt zweier verschiedener Wachstumsraten ein konstantes Wachstum von 1,2 % p.a. unterstellt.

5.2.2 Überleitung der Daten in URMOD

Die Annahme über die Entwicklung des preisbereinigten Bruttonlandprodukts (BIP) wirken sich an verschiedenen Stellen des Modells aus. Bei der Übertragung in URMOD wird nur der Effekt auf die Generalbereiche einbezogen.

Letzte Verwendung: Im Modell gibt es keinen Parameter, der die generelle Entwicklung des BIP unmittelbar abbildet. Vereinfachend wurde deshalb die externe Setzung über die Veränderung des BIP im Szenario-Zeitraum als Veränderung auf die Zellen der Y-Matrix (Letzte inländische Verwendung und Exporte) übertragen. Diese Vorgehensweise impliziert Folgendes:

- ▶ Vereinfachend wurde angenommen, dass der Leistungsbilanzsaldo ausgeglichen ist. Nur in diesem Spezialfall entspricht die Letzte Inländische Verwendung dem BIP.

- ▶ Entsprechend dem Projektdesign wurde unterstellt, dass es keine extern vorgegebene Veränderung der Wirtschaftsstruktur gibt, mit Ausnahme der Entwicklung in den Spezialbereichen (siehe Tabelle 1, Faktor 1).

Pro-Kopf-Einkommen: Ein weiterer Einflussfaktor ist die Entwicklung des Pro-Kopf-Einkommens. Diese Größe wird beeinflusst durch das Wirtschaftswachstum und die Bevölkerungsentwicklung. Die Struktur der Nachfrage nach Konsumgütern ändert sich mit der Höhe des Einkommens. Der „Einkommenseffekt“ quantifiziert diesen Einfluss. Auf der Grundlage der Entwicklung des Pro-Kopf-Einkommens und den Angaben der laufenden Wirtschaftsrechnungen über die Konsumstruktur nach Einkommensgruppen wurde ein entsprechendes „Konsummodell“ entwickelt, das die Veränderung der Konsumstruktur nach Gütergruppen im Szenario-Zeitraum schätzt. Die so ermittelten Veränderungen der Konsumstruktur wurde auf die Y-Matrix des IOT-Modells übertragen (s. Tabelle 1, Faktor 6).

5.3 Technischer Fortschritt

5.3.1 Allgemeine Trends

Der technische Fortschritt beschreibt die Innovationen einer Gesellschaft, die unter anderem dazu führen, dass der gleiche Output mit weniger Input oder mehr Output mit der gleichen Menge Input erwirtschaftet werden kann. Zum Input können dabei Arbeitsleistung, Kapital aber auch Rohstoffe bzw. natürliche Ressourcen wie Land oder Wasser gehören. Im vorliegenden Projekt stehen die Rohstoffe im Fokus. Der technische Fortschritt innerhalb spezifischer Technologiebereiche beschreibt somit die Fähigkeit einer Ökonomie, rohstoffeffizienter zu produzieren. Bis heute existieren jedoch nur wenige Studien, die Aufschluss geben, wie genau der technische Fortschritt hinsichtlich der Nutzung von Rohstoffen und die Wirtschaftsleistung zusammenhängen. Viele Autoren stellen den technischen Fortschritt bzw. die Erhöhung der Rohstoffeffizienz als einen wichtigen Faktor heraus, um die Leistungsfähigkeit und damit die globale Wettbewerbsfähigkeit einer Volkswirtschaft zu erhöhen; programmatische Bücher wie Faktor 4, Faktor 5 oder Faktor 10 sind in diesem Zusammenhang beispielhaft [Bleischwitz, 2010; Schmidt-Bleek, 2010; Weizsäcker et al., 2012].

Empirisch ist der Technische Fortschritt, der auf eine erhöhte Rohstoffproduktivität zurückgeht, bislang nur in allgemeiner Form untersucht. UNEP [UNEP, 2011] beobachtet auf globaler Ebene, dass ein „spontaneous decoupling“ existiert, womit das allgemeine Bestreben von Unternehmen beschrieben wird, Rohstoffe im Produktionsprozess einzusparen und darüber effizienter zu wirtschaften. Weitere Studien untersuchen den Zusammenhang zwischen Wirtschaftsleistung (BIP) einerseits und dem Konsum von Rohstoffen nach Rohstoffgruppen (fossile Rohstoffe, Mineralien und Biomasse, bezogen auf den DMC) andererseits. So kommen beispielsweise Steinberger und Krausmann [Steinberger / Krausmann, 2011] auf der Basis eines Ländervergleichs zum Schluss, dass die Rohstoffproduktivität vor allem vom Einkommen abhängig ist. Diese Abhängigkeit ist bezogen auf den Konsum von fossilen Brennstoffen besonders ausgeprägt, bezogen auf den Konsum von Mineralien weniger stark ausgeprägt und bezogen auf den Konsum von Biomasse gering. Steger und Bleischwitz [Steger / Bleischwitz, 2011] nennen allgemein die Bereiche Energie, Bau und Mobilität als wichtige Treiber des Rohstoffkonsums, aber sie stellen auch die Bedeutung von Prozessen wie der Verlagerung von rohstoffintensiven Industrien ins Ausland oder einen Strukturwandel hin zu weniger materialintensiven Sektoren wie Dienstleistungen für die Erhöhung der Rohstoffproduktivität von Volkswirtschaften heraus.

Diese weitgehend auf die gesamtwirtschaftliche Rohstoffproduktivität ausgerichteten Untersuchungen können allerdings nur erste Anhaltspunkte für die Auswirkungen des technischen Fortschritts auf den Rohstoffbedarf liefern.

5.3.2 Überleitung der Daten in URMOD

In URMOD wird die Produktionstechnik mit Hilfe der A-Matrix abgebildet, welche die direkten Güterinputs je Einheit Output für die einzelnen Produktionsbereiche darstellt. Änderungen der Produktionstechnik drücken sich darin aus, dass die einzelnen Koeffizienten dieser Matrix variieren. Naheliegend ist es, die Vergangenheitsentwicklung der A-Matrix heranzuziehen, um daraus eine Einschätzung der zukünftigen Entwicklung abzuleiten. Ein Problem bei diesem Ansatz ist allerdings, dass eine empirisch begründete Beschreibung der Vergangenheitsentwicklung außerordentlich schwierig ist. Als Datenquelle käme nur der zeitliche Vergleich zum Anteil der Vorleistungen am gesamten Güteraufkommen in Betracht, idealerweise auf der Grundlage von Input-Output-Tabellen. Auf dieser Grundlage könnte die Entwicklung der Koeffizienten der A-Matrix im Zeitablauf dargestellt werden. Abgesehen vom Problem der Deflationierung bei den IOT-Angaben ist bei einem derartigen Vergleich aber zu berücksichtigen, dass der technische Fortschritt, der zu einem Rückgang der Koeffizienten bzw. der Vorleistungsquote führen müsste, überlagert wird durch den Effekt der Intensivierung der horizontalen Arbeitsteilung. Für Deutschland zum Beispiel ist die durchschnittliche Vorleistungsquote im Zeitraum 1991 bis 2015 im Ergebnis gestiegen [Destatis, 2016a], trotz technischen Fortschritts.

Eine weitere Möglichkeit, den technischen Fortschritt mit Blick auf die Rohstoffverwendung zu beschreiben, ist eine Analyse der Entwicklung der **Rohstoffintensität**. Bei dieser Größe werden die in physischen Einheiten gemessenen Rohstoffinputs in die Ökonomie auf die Outputs bezogen. Der technische Fortschritt lässt sich allerdings nur zutreffend beschreiben, wenn es gelingt, den Gesamteffekt in die Komponenten Intensitätseffekt, der den technischen Fortschritt misst, und Struktureffekt zu zerlegen.

Für eine Zerlegung werden nach Produktionsbereichen differenzierte Angaben benötigt, die sich nur aus entsprechenden detaillierten RME-Modellen ableiten lassen.

Für die Umsetzung in URMOD werden getrennte Angaben für die Entwicklung der Rohstoffintensität für die inländische Produktion als auch für die Produktion der importierten Güter benötigt. Ergänzend wird eine Schätzung vorgenommen für einen zusätzlichen Produktivitätsfortschritt, der bei der Aufstellung des TW30-Szenarios berücksichtigt wird.

5.3.2.1 Rohstoffintensität der inländischen Produktion

Entsprechend der Vorgehensweise beim Wirtschaftswachstum werden die Parameteränderungen für den technischen Fortschritt nur auf die Generalbereiche, nicht aber auf die Spezialbereiche angewendet.

Geeignete RME-Modelle wurden bisher nur von Eurostat für die EU und von Destatis für Deutschland entwickelt. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Modelle wurden Schätzungen zur Vergangenheitsentwicklung der Rohstoffintensitäten nach zwei Rechenwegen vorgenommen:

1. **Datenbasis UGR Ergebnisse** [Destatis, 2014b] zur Entwicklung des RMI zwischen 2000 und 2010 nach Gütergruppen: Der Intensitätseffekt wurde mit Hilfe einer Dekompositionsanalyse (rechnerische Zerlegung der Gesamtentwicklung in die Komponenten Skaleneffekt, Intensitätseffekt und Struktureffekt) isoliert. Der Intensitätseffekt zeigt die Rohstoffeinsparungen an, die sich aus der Änderung der Produktionstechnologie in den einzelnen Produktionsbereichen ergeben haben. Aufgrund dieser Analyse ergibt sich ein durchschnittlicher jährlicher Intensitätsrückgang von ca. 1 %. Schwachpunkt ist die relativ geringe sektorale Auflösung der verfügbaren Ergebnisse nach nur 25 Produktionsbereichen. Je geringer der Auflösungsgrad der IOT, umso ungenauer ist die Separierung von Intensitäts- und Struktureffekt.
2. **Datenbasis RME Modell für EU** [Schoer et al., 2012] für den Zeitraum 2000-2012: Die Verwendung dieser Quelle hat den Vorteil, dass sie unmittelbare Angaben zum Intensitätseffekt (FL-Matrix nach Gütergruppen und Rohstoffarten in tiefer Untergliederung nach 166 Produktionsbereichen) bereitstellt. Außerdem erlaubt die Gliederungstiefe dieser Daten eine Bereinigung um den

Einfluss der Spezialbereiche, die im Szenario-Modell gesondert betrachtet werden. In mehreren Rechenschritten wurde auf Grundlage dieser Angaben ein durchschnittlicher jährlicher Rückgang der Rohstoffintensität abgeleitet. Das Ergebnis stimmt in der Größenordnung weitgehend mit den Angaben aus Rechenweg 1 überein.

Das Ergebnis aus Rechenweg 2 wurde für das Modell übernommen, in Anlehnung an das Ergebnis von Rechenweg 1 zuzüglich der Annahme eines etwas höheren Intensitätsrückgangs für Deutschland im Vergleich zur EU.

Die Angaben über die Veränderung der Rohstoffintensität können allerdings nicht unmittelbar als Parametervariation in URMOD übertragen werden, da die Zielparameter dort die Veränderung der direkten Güterinputkoeffizienten (A-Matrix) sind. Deshalb wurde die Angabe für die durchschnittliche Entwicklung der Rohstoffintensität anhand der Relation des gesamtwirtschaftlichen Vorleistungsinputs zum Output umgerechnet auf einen durchschnittlichen Wert für die Veränderung der direkten Güterinputkoeffizienten. Die angenommene jahresdurchschnittliche Veränderung der einzelnen Güterinputkoeffizienten beläuft sich auf -0.5 %. Diese durchschnittliche Veränderung wurde an alle Produktionsprozesse (A-Matrix), mit Ausnahme der Spezialbereiche angelegt (Tabelle 1, Faktor 2).

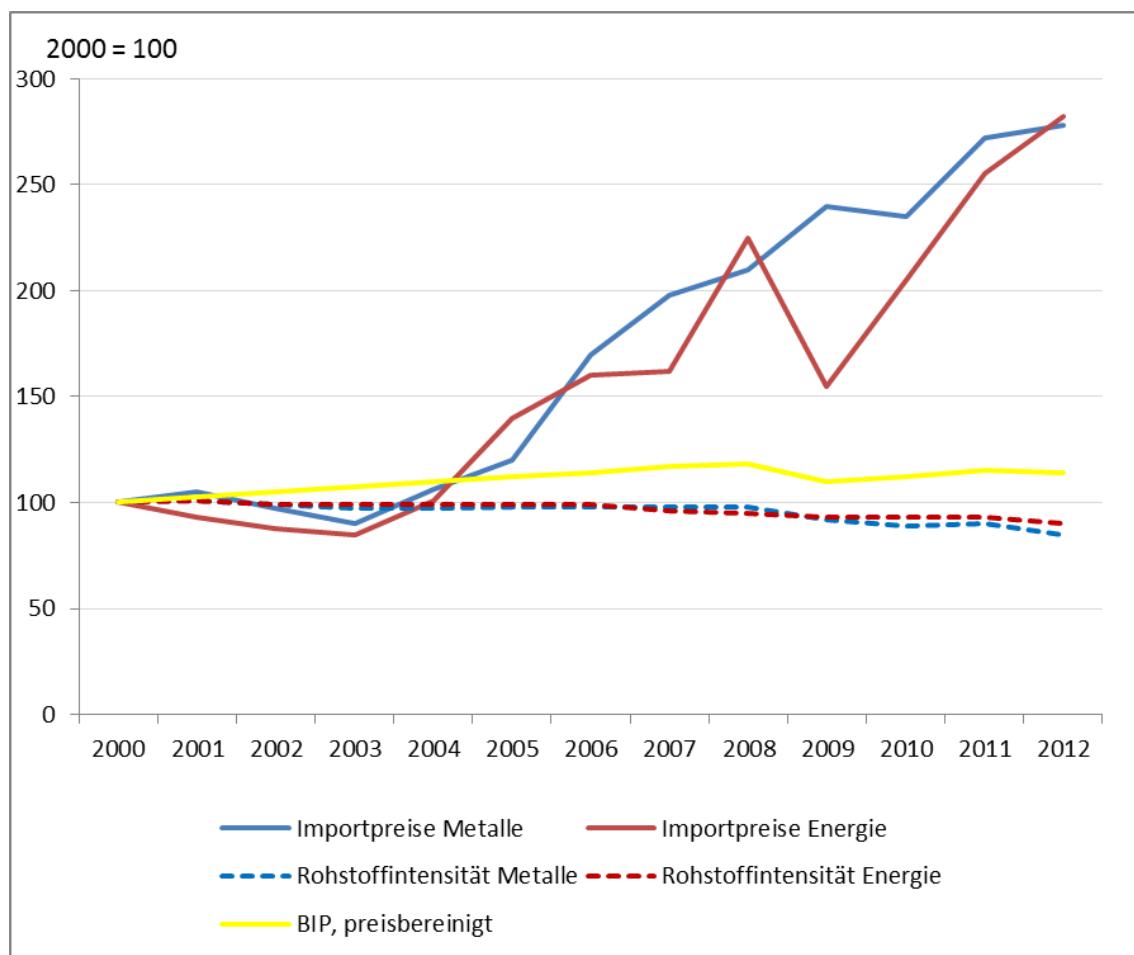
Die hier vorgenommene Setzung zur Produktivitätsentwicklung schlägt sich relativ deutlich im Gesamtergebnis des AZE-Szenarios nieder. Demnach können sich die dargestellten Unsicherheiten bei den Annahmen auf den erreichbaren Genauigkeitsgrad der Schätzung auswirken

Eine weitere Überlegung war, ob der erwartete weitere Preisanstieg bei Rohstoffen einen Zuschlag zum bislang angenommenen Intensitätsrückgang, der aus der Vergangenheitsentwicklung abgeleitet wurde, rechtfertigt. Dazu sind zwei Fragen zu untersuchen:

1. Ist zu erwarten, dass die Entwicklung der Rohstoffpreise bis 2030 sich signifikant von der für 2000-2012 beobachteten Entwicklung unterscheidet?
2. Wird die Rohstoffintensität in nennenswertem Umfang durch die Entwicklung der Rohstoffpreise beeinflusst?

Die verfügbaren Daten legen nahe, auf einen preisbedingten Zuschlag für die Intensitätsentwicklung zu verzichten. Die nachstehende Abbildung 12 zur Entwicklung von Rohstoffpreisen und Rohstoffintensitäten zeigt, dass die Rohstoffpreise für Metalle und Energieträger zwischen 2000 und 2012 bereits relativ stark gestiegen sind. Die entsprechenden Rohstoffintensitäten (hier einschließlich Struktureffekt) für die EU sind diesem Anstieg nur sehr verhalten gefolgt. Die durchschnittlichen Preiselastizitäten (Rohstoffpreise zu Rohstoffintensität) für den betrachteten Zeitraum sind sehr niedrig, d.h. Preisänderungen hatten nur einen relativ geringen Einfluss auf die Änderung der Rohstoffintensitäten. Die künftige Entwicklung der Rohstoffpreise lässt sich nur schwer voraussagen. Es dürfte aber schwierig sein, die Annahme einer zusätzlichen preisbedingten Beschleunigung des Intensitätsrückganges zu begründen.

Abbildung 12: Rohstoffpreise und -intensität für Metalle und Energieträger der EU, 2000-2012



Quelle: [Eurostat, 2016].

5.3.2.2 Rohstoffintensität der Importe

Rund die Hälfte aller deutschen Importe stammt aus der EU. Zur Schätzung des durchschnittlichen Rückgangs der Rohstoffintensität der Importe für das Szenario wurden die Ergebnisse aus Rechenweg 2 (Daten für EU) in der Gliederung nach Gütergruppen verwendet, hier allerdings in der Differenzierung nach Gütergruppen, um die Unterschiede bei der Güterstruktur zwischen Inlandsgütern in der EU und den deutschen Importgütern aus der EU zu berücksichtigen.

Es gibt keine geeigneten Daten, um die Entwicklung der Rohstoffintensität in Nicht-EU Ländern gesondert zu schätzen. Deshalb wurde auch hier die EU-Entwicklung als Maßstab herangezogen. Durch die Verwendung von Intensitätsindikatoren, die tief nach Gütergruppen untergliedert sind, werden jedoch zumindest Effekte, die aus Unterschieden in der Güterstruktur der Importe resultieren (niedrigere Intensitätsrückgänge bei Rohstoffen und Halbwaren als bei Fertigwaren) einbezogen.

Die Veränderungen der Rohstoffintensitäten nach Gütergruppen wurden in URMOD als Parametervariation auf die Matrix der kumulierten Rohstoffkoeffizienten (F-Matrix) übertragen (Tabelle 1, Faktor 3).

5.3.2.3 Rohstoffintensität im Inland TW30

Für Szenario TW30 wurde ein zusätzlicher Rückgang der Rohstoffintensität angenommen. Bereits berücksichtigt sind Änderungen der Produktionstechnik bei den für das TW-Szenario ausgewählten Faktoren. Der Effekt „Rohstoffintensität Inland TW30“ deckt weitere, bei den ausgewählten Faktoren für TW30 nicht berücksichtigte Verbesserungen der Rohstoffintensität ab. Es wird damit unterstellt, dass auch in den nicht untersuchten Bereichen weitere über AZE hinausgehende, bisher nicht spezifizierte

Produktivitätsverbesserungen zu erwarten sind. Um diesen Effekt grob abzudecken wird für das TW30-Szenario ein zusätzlicher Rückgang der Rohstoffintensität von -3.5 % für den gesamten Prognosezeitraum (entspricht in etwa einem Wert von knapp 0.2 % p.a.) angenommen. Der Veränderungsfaktor wurde auf die Elemente der A-Matrix übertragen (Tabelle 2, Faktor 25).

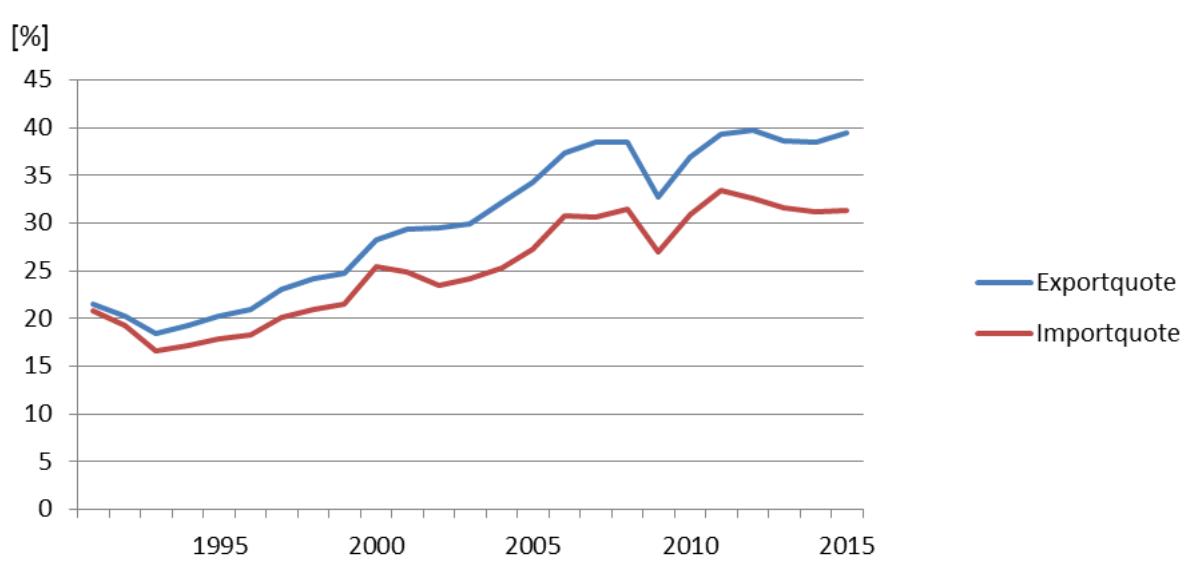
Bei der Größenordnung handelt es sich um eine grobe Schätzung, da geeignete Daten nicht verfügbar sind. Empirische Vergleiche mit anderen Ländern sind nicht möglich, da dies die Ergebnisse von RME-Modellen voraussetzt.

5.4 Internationaler Handel

5.4.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage

Die Wirtschaft Deutschlands ist eng mit den Wirtschaften der anderen europäischen Länder und mit weiteren großen Volkswirtschaften verflochten. Diese Verflechtungen vertieften sich in den vergangenen Dekaden aufgrund der Intensivierung der internationalen Arbeitsteilung und der Europäisierung deutlich. So zeigen beispielsweise die Export- und die Importquoten, dass sich seit der Wiedervereinigung der Anteil der Exporte am BIP fast verdoppelt hat und auch der Anteil der Importe am BIP stark gestiegen ist (Abbildung 13). Gegenwärtig (2015) beträgt die Exportquote nahezu 40 % und die Importquote etwa 32 %.

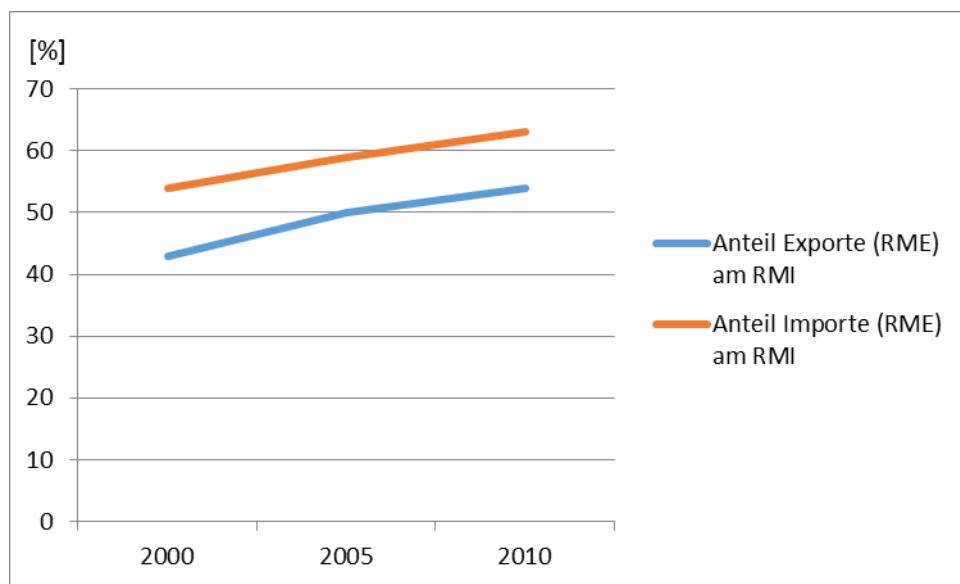
Abbildung 13: Ex- und Importquoten zwischen 1991 und 2015



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [Destatis, 2016b].

Die zunehmende Verflechtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Relation von RMI und RMC, wobei der RMC von einer Zunahme der Außenhandelsverflechtung weniger berührt ist, da er die RME der Exporte nicht enthält. Die zunehmende Verflechtung der deutschen Volkswirtschaft zeigt sich insbesondere, wenn die physischen Ex- und Importe (in Rohstoffäquivalenten) mit dem RMI verglichen werden. Der Anteil der Importe am RMI stieg zwischen 2000 und 2010 von 54 % auf 63 %. Der Anteil der Exporte bezogen auf den RMI stieg im selben Zeitraum von 43 % auf 54 % (Abbildung 14).

Abbildung 14: Anteil der Im- und Exporte am RMI: 2000, 2005 und 2010



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Destatis (2014c).

Für die Projektionen im Rahmen dieses Projekts wird davon ausgegangen, dass sich die internationalen Verflechtungen bis 2030 weiter vertiefen. Konkret wurde für die Szenarien AZE und TW30 unterstellt, dass die Öffnung für den internationalen Handel und damit die internationale Integration fortschreitet, wenn auch mit geringerem Tempo, als es in der Vergangenheit zu beobachten war. Dies stellt eine vorsichtige Setzung dar.

5.4.2 Überleitung der Daten in URMOD

Bei der Übertragung dieser Überlegungen in URMOD wurde folgendermaßen vorgegangen:

Exporte: Für Zwecke des Szenarios wurde unterstellt, dass die Exporte weiterhin stärker zunehmen als die gesamte letzte Verwendung bzw. das BIP. Dies allerdings in deutlich abgeschwächtem Umfang gegenüber den Jahren 2000 bis 2010. Die Größenordnung dieses Faktors wurde mit Hilfe eines externen Überlegungen abgeleitet, die sich auf die entsprechende Vergangenheitsentwicklung stützen. Allerdings wurde ein moderater Ansatz gewählt, der unterstellt, dass sich die Erhöhung des Exportanteils abschwächt.

Für den gesamten Szenario-Zeitraum wurde angenommen, dass die Exporte um rund 7 % (0,34 % p.a.) stärker zunehmen als die gesamte letzte Verwendung. Diese Veränderung wurde als Parameteränderung auf die Spalte für Exporte in der Matrix der letzten Verwendung (Y-Matrix) übertragen (Tabelle 1, Faktor 4).

Importe: Die Veränderung der RME der Importe wird im Modell endogen abgeleitet.

5.5 Kreislaufwirtschaft und stoffliche Verwertung

5.5.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage

Die politische Förderung der Kreislaufwirtschaft ist in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus geraten und ist eng mit dem Stichwort Ressourceneffizienz verknüpft. Damit Stoffe möglichst ressourcenschonend genutzt werden, müssen die Materialien, die in Produkten enthalten sind, möglichst in einem Materialkreislauf gehalten und gleichzeitig eine Anreicherung von Schad- und Störstoffen verhindert werden. Kreislaufwirtschaft ist somit dann erfolgreich, wenn möglichst wenige Abfälle produziert werden, die aus ökologischen Gründen nicht mehr verwendet werden können [UBA, 2015].

Auf EU-Ebene gilt seit Dezember 2008 die Abfallrahmenrichtlinie. Wichtige Punkte sind die Einführung einer fünfstufigen Abfallhierarchie und die Förderung der getrennten Sammlung von Abfällen sowie die Vorgabe von Recyclingquoten. Seit dem Juni 2012 gilt in Deutschland das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), ein Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, das die Anforderungen der Abfallrahmenrichtlinie in nationales Recht überführt. Dieses Gesetz enthält unter anderem Ziele für 2020, die eine getrennte Sammlung von Abfällen sowie Recyclingquoten für Siedlungsabfälle und stoffliche Verwertungsquoten für Bau- und Abbruchabfälle adressieren (§ 14, KrWG).

Im Rahmen der Kreislaufwirtschaft wird die stoffliche Verwertung für verschiedene Abfallströme betrachtet, die aus einer separaten Sammlung oder einer Sortierung resultieren. Insbesondere werden die Abfallströme Holz, Papier, Kunststoffe (sortenrein und nicht sortenrein), Eisen/Stahl, Kupfer, Aluminium und mineralische Abfälle berücksichtigt.

Die massenrelevantesten Ströme sind hierbei die mineralischen Bauabfälle, die in großen Mengen stofflich verwertet werden – vorwiegend durch die Nutzung von Bauschutt und Straßenaufbruch im Straßenbau oder Erdbau. In Deutschland werden jährlich etwa 60 Mio. t Bauabfälle (ohne Erdaushub) dem Recycling zugeführt. Als weiterer massenrelevanter Abfallstrom lassen sich die Metalle identifizieren, speziell bei der Betrachtung des kumulierten Rohstoffaufwandes KRA, der eine Quantifizierung der Materialrucksäcke von Rohstoffen erlaubt. In Deutschland werden inkl. Neuschrotten jährlich etwa 30 Mio. t Stahlschrott zur Verwertung erfasst, wovon etwa ein Drittel exportiert wird, während die verbleibende Menge in der deutschen Stahlproduktion eingesetzt wird. Das in Deutschland verwertete Kupferschrottaufkommen liegt bei etwas unter 1 Mio. t jährlich; jährliche Mengen verwerteten Aluminumschrotts liegen in der gleichen Größenordnung. Bei den Kunststoffen wird zwischen sortenreinen und gemischten Kunststoffen unterschieden, die unterschiedliche Recycling-Potenziale aufweisen. Insgesamt werden in Deutschland jährlich etwa 8 Mio. t Kunststoffabfälle erfasst, von denen nur ein Teil zum sortenreinen Recycling geeignet ist. Sortenrein trennbare Kunststoffe umfassen vor allem PVC, PE und PET, von denen insgesamt etwa 0,4 Mio. t Material dem qualitativ hochwertigen Recycling zugeführt werden. Diese Menge ersetzt etwa 0,25 Mio. t Primärkunststoff. Mischkunststoffe folgen dagegen weniger hochwertigen Recycling-Pfaden: die werkstoffliche Verwertung als Holz-/Betonersatz, die rohstoffliche Verwertung als Reduktionsmittel im Hochofen als Ersatz für Schweröl oder eine energetische Verwertung. Letztere umfasst den Einsatz in Müllverbrennungsanlagen oder in Ersatzbrennstoffkraftwerken, sowie in der Zementindustrie (Substitution von Steinkohle). Die energetische Verwertung von Kunststoffen konkurriert mit einem Anteil von über 50 % mit der stofflichen Verwertung: Kunststoffabfälle können auch im Rahmen der energetischen Nutzung primäre (fossile) Energieträger ersetzen. (Genannte Abfallmengen in Mio. t dienen der Orientierung [Wagner et al., 2012].)

Die Einbindung der Nutzung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen im Modell geschieht über einen Massenfluss einer bestimmten Abfallart in einen Produktionsbereich der Wirtschaft, in dem der Einsatz von primären Rohstoffen substituiert wird. Die Abfallmenge substituiert die Menge des entsprechenden Primärrohstoffes im Allgemeinen nicht 1:1, da sich durch eine geringere Materialqualität Verluste ergeben. Diese Verluste beinhalten je nach Abfallart Verunreinigungen, Feuchte, materialfremde Stoffe oder Material verminderter Qualität. Diese Mengen sind in der ursprünglich gemessenen Abfallmenge noch enthalten. Geeignete individuelle Umwandlungsfaktoren zur Anpassung der Abfallmengen sind ggf. notwendig, um die Mengen eingesparter Primärrohstoffe zu errechnen. Diese Notwendigkeit tritt auf, wenn die verwendeten Abfallmengen nicht den tatsächlich einsetzbaren Mengen an Sekundärrohstoffen entsprechen. Tabelle 19 gibt einen Überblick über die wichtigsten Abfallarten, die der Substitution von Primärmaterial dienen, und die Notwendigkeit einer rechnerischen Anpassung der Abfallmengen bei Substitution.

Tabelle 19: Stoffliche Verwertung von Abfällen und Verwendung von Umwandlungsfaktoren

Abfallart	Substituiertes Material	Quelle	Bewertung der Substitution
Holz	Stammholz	UGR (Thünen Institut)	Menge Holzabfall in die Holzverarbeitung. Umwandlungsfaktor notwendig zur Ermittlung des eingesparten Stammholzes
Papier	Faserholz	UGR (Thünen Institut)	Menge Faserabfall in die Papierherstellung. Umwandlungsfaktor notwendig zur Ermittlung des eingesparten Faserholzes
Kunststoffe, sortenrein	Primär-Kunststoff	ifeu	Umwandlungsverluste bereits abgezogen.
Misch-Kunststoffe	Holz/Beton-Ersatz	ifeu	Umwandlungsverluste müssen abgezogen werden.
Eisen/Stahl	Eisenerz (Metallgehalt)	ifeu, Verbandsstatistik, USGS und ProStat	Kein Umwandlungsfaktor. Annahme 1 t Schrott = 1 t Sekundärstahl
Kupfer	Kupfererz (Metallgehalt)	Verschiedene	Kein Umwandlungsfaktor. Annahme 1 t Schrott = 1 t Sekundärkupfer
Aluminium	Bauxit (Metallgehalt)	Verschiedene	Kein Umwandlungsfaktor. Annahme 1 t Schrott = 1 t Sekundäraluminium
Mineralisch (Baustoffherstellung)	Sand/Kies bei Gas-/Betonherstellung; Lehm/Ton bei Ziegelherstellung	ifeu	Annahme 1 t Recycling-Material = 1 t Primäreinsparung, Umwandlungsverluste müssen abgezogen werden.
Mineralisch (Tiefbau)	Sand/Kies	ifeu	Annahme 1 t Recycling-Material = 1 t Primäreinsparung, Umwandlungsverluste müssen abgezogen werden.

5.5.2 Überleitung der Daten in URMOD

In URMOD wurden nur quantitativ bedeutsame Recyclingmaterialien, wie Holz, Papier, Plastik, Metall (Eisen, Kupfer Aluminium) und Baurohstoffe berücksichtigt. Für Papier, Kupfer und Aluminium und Hochbauabfälle wurden steigende Recyclingraten unterstellt. Die Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe wird in der A-Matrix dadurch abgebildet, dass bei den relevanten Produktionsprozessen der Koeffizient für das jeweilige Sekundärmaterial erhöht und als Gegenbuchung der Koeffizient für das Primärmaterial sich entsprechend vermindert wird (Tabelle 1, Faktor 10).

5.6 Metallgehalte in Erzen und Mengenrelevanz

5.6.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage

Mit der Stilllegung des Erzbergwerkes Grund (Pb-Zn-Cu-Ag) im Oberharz 1992 endete der bisherige Metallerzbergbau in Deutschland. In sehr kleinen Mengen fallen in Deutschland Metalle als Nebenprodukte in der Steine- und Erden-Förderung an.¹⁹ Tatsächlich werden in Deutschland noch Eisenerz und Bauxit gefördert. Diese Rohstoffe werden allerdings nicht weiter als Metalle verhüttet und finden ihre Anwendung im Fall von Eisenerz als Zuschlagstoffe in der Zement- und Betonindustrie und im Fall von Bauxit als Industriemineral in der Elektroindustrie.

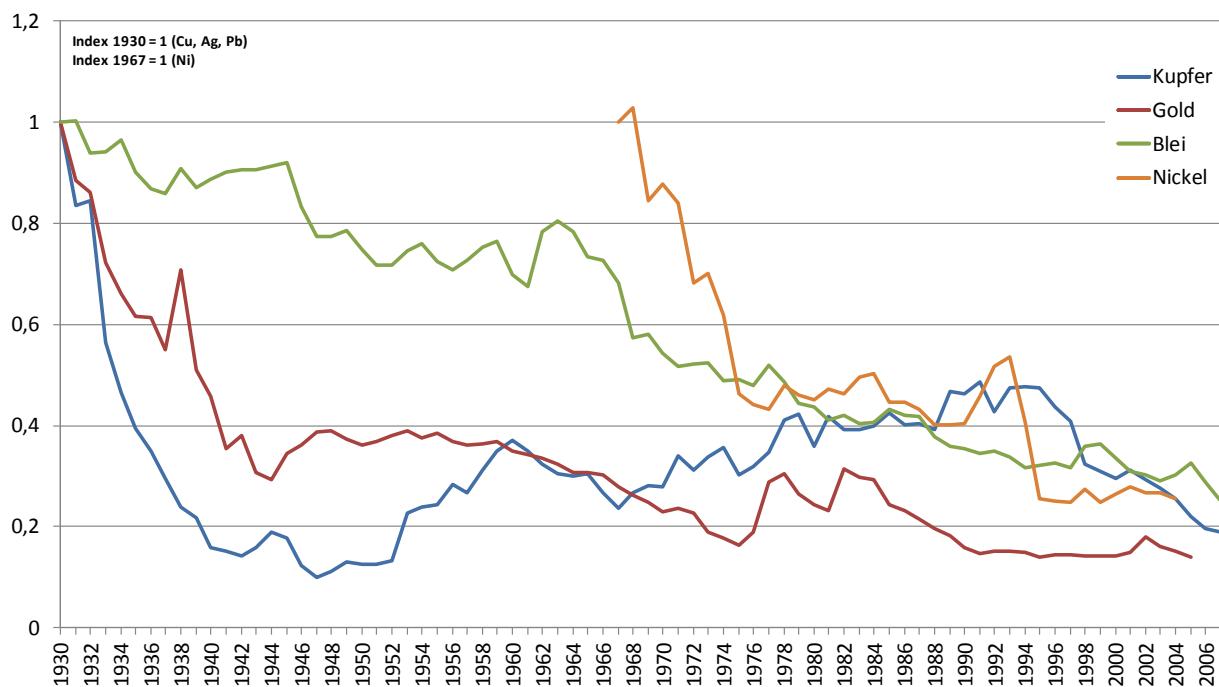
¹⁹ 2014 wurden 121 t Kupfer und Silber als Nebenprodukt der Fluss- und Schwerspatförderung gewonnen. Das BGR schätzt die Seifengoldgewinnung aus der Sand und Kiesförderung (z.B. Rheingold) auf 10 kg im Jahr.

Dies hat zur Folge, dass sämtliche Metallrohstoffe importiert werden. Die Rohstoffaufwendungen (RME) für die verschiedenen Metalle variieren je nach Produktionsstandort sehr stark aufgrund unterschiedlicher Bedingungen in folgenden Aspekten:

- Erzgehalt der Lagerstätte
- Technologischer Stand der Abbau- und Aufbereitungsanlagen
- Rohstoff ist Hauptprodukt oder Nebenprodukt

Betrachtet man die global stattfindende Diskussion um die Verfügbarkeit von Metallen, so fällt auf, dass immer mehr von Förderhöhepunkten („peaks“) bei den jeweiligen Metallen gesprochen wird, analog zum bereits in den 1970er Jahren prognostizierten „peak oil“. Globale Auswertungen von Metallgehalten zeigen über einen längeren Zeitraum generell eine abnehmende Tendenz [vgl. Gerst, 2008; Prior et al., 2011]. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Entwicklung der Erzgehalte in der australischen Minenproduktion für die Metalle Kupfer, Gold, Blei und Nickel. Dieser Trend der abnehmenden Erzgehalte ist darauf zurückzuführen, dass im Sinne des Prinzips der Grenzkosten zu Beginn erst die leichter zugänglichen Lagerstätten ausgebeutet wurden und mit der Zeit Lagerstätten mit immer niedrigeren Erzgehalten produzieren. Technologische Verbesserungen haben sich in dieser Logik als Reaktion auf die steigenden Kosten eingestellt. Eine andere Argumentationslinie verfolgt West [2011], der in den technologischen Verbesserungen den eigentlichen Treiber für die niedrigen Erzgehalte sieht. Mit besserer Technologie wurde es möglich unter ökonomisch rentablen Bedingungen Lagerstätten auszubeuten, die zwar geringere Erzgehalte aufwiesen, dafür aber große/leichtzugängliche Reserven hatten. Beide Aspekte wirken sicherlich zusammen, mit dem Resultat, dass die Metallgehalte der weltweit geförderten Erze sinken. Aus Sicht der Ressourcenschonung ist dies problematisch, da abnehmende Metallgehalte in den geförderten Erzen mit einem höheren Rohstoffaufwand verbunden sind. Zusätzlich steigt auch der Einsatz von anderen Ressourcen wie Energie oder Fläche, um die gleiche Menge an Metall zu produzieren.

Abbildung 15: Entwicklung der Erzgehalte der australischen Minenproduktion

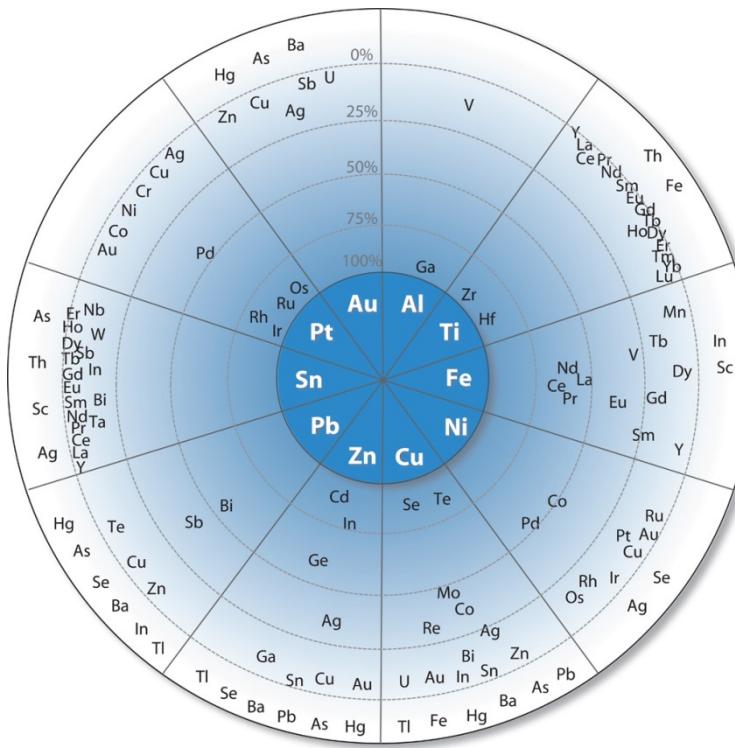


Quelle: Datengrundlage [Mudd, 2009].

Die Metallgehalte und somit die Rohstoffvorkette ist nicht für alle Standorte gleich und verändert sich zudem im zeitlichen Verlauf. Da nicht für alle Produktionsstätten der einzelnen Metalle Daten zur Berechnung eines nach Produktionsstätten spezifischen RME vorliegen, wurde der Ansatz verfolgt, einen länderspezifischen RME, mit einer repräsentativen Fallzahl an Minen, zu berechnen.

Im Rahmen der Projekte des ifeu für Eurostat wurden eine Methode und eine Datenbasis für die Bestimmung der RME entwickelt [ifeu et al., 2012]. Dafür wurden über 500 Geschäftsberichte von Minengesellschaften zu den Metallgehalten ausgewertet. Allerdings zeigt die Auswertung, dass dazu unbedingt die Vergesellschaftung von Metallen zu berücksichtigen ist, da die meisten Metalle in vergesell-schafteten Erzen vorkommen und auch als polymetallische Erze gefördert werden. Nasser et al. [2015] hat nachgewiesen, dass ein Großteil der Metalle des Periodensystems als Nebenprodukte gefördert wird. Kupfer hingegen ist häufig Hauptprodukt der Minenförderung. Kupferminen fördern aber zu über 99 % auch andere Nebenprodukte wie Selen, Tellur, Molybdän, Kobalt etc.. Ähnlich verhält es sich mit den anderen Nicht-Eisenmetallen. Abbildung 16 zeigt die Beziehung ausgewählter Metalle in ihrer natürlichen Erzformation. In dieser Darstellung wird die Vielzahl an Nebenprodukten deutlich und die Tatsache, dass klassische Hauptprodukte wie Kupfer auch als Nebenprodukt auftreten können. Im Zentrum des „Rad der metallischen Vergesellschaftung“ befinden sich die Hauptmetalle. Die vergesell-schafteten Elemente reihen sich in den äußeren Ringen entsprechend ihrer prozentualen Primärpro-dukton bezogen auf das geförderte Hauptmetall ein (0 % bis 100 %). Den Elementen im äußersten weißen Rand lassen sich aufgrund der Datenqualität keine Produktionsanteile zuordnen.

Abbildung 16: Beziehung der Metalle in vergesellschafteten Erzen nach Hauptmetall



Quelle: [Nassar et al., 2015].

Vor dem Hintergrund der komplexen Beziehung der Metalle in ihrer vergesellschafteten Form kann eine Ableitung von RMEs nur mit Hilfe einer Allokation erfolgen, da es sonst zu einer Mehrfachzählung der Rohstoffvorkette kommt. Dazu gibt es zwei methodische Optionen:

- #### ► Allokation nach Masse (physikalisch)

- ▶ Allokation nach Marktpreis (ökonomisch)

Vergesellschaftungen stellen nicht nur eine Herausforderung bei der Berechnung von RME von vergangenen Jahren dar, sondern sie sind auch eine Herausforderung bei der Abschätzung von zukünftigen Metallgehalten. So werden Minen nicht zwingend nur aufgrund des Vorkommens eines Metalls eröffnet oder erweitert, sondern beispielsweise auch aufgrund der Summe der verschiedenen, vergesellschafteten Metalle. Das kann dazu führen, dass Metalle trotz einer geringeren Konzentration (als beispielsweise in einer anderen Mine) extrahiert werden, weil sie im Verbund mit anderen Metallen vorkommen, und es in Summe für das Minenunternehmen wirtschaftlich ist, alle vergesellschaftet vorkommenden Metalle zu extrahieren. Dies erschwert eine mögliche simple Fortschreibung von sinkenden, durchschnittlichen Erzkonzentrationen zur Berechnung zukünftiger RME.

Die Analyse der Minendaten ergab weiterhin, dass die Differenzierung der RME der Importe nach Ländern zu großen Schwankungen führen würde. Dies ist unter anderem auf wechselnde Lieferverträge von Unternehmen zurückzuführen, auf die Eröffnung oder Erweiterung einzelner Minen oder auch veränderte Unternehmensstrukturen der Minenbetreibergesellschaften.

Im Zuge des Eurostat-Projektes wurde weiter untersucht, ob globale Minenproduktionsdaten in der notwendigen Auflösung vorliegen. Alle untersuchten Studien und Datenplattformen haben sich jedoch entweder nur auf eine eingeschränkte Stichprobe fokussiert (ein Land oder ein Metall) oder waren nicht öffentlich zugänglich. Daher war es notwendig, die Daten über Geschäftsberichte auszuwerten und anschließend die RME-Faktoren mit entsprechender Allokationsregel zu berechnen, um die mangelnde Differenziertheit global zugänglicher Daten auszugleichen [ifeu et al., 2012].

In Summe zeigte die Analyse der für die Vergangenheit vorliegenden Daten zur Entwicklung der Metallgehalte der Erze, dass eine plausible Vorausschätzung der Metallgehalte nur mit erheblichen Unsicherheiten hätte realisiert werden können. Zur Abschätzung hätten umfangreichere Annahmen zur globalen Nachfrageentwicklung und zur Entwicklung von Explorations- und Bergbautechnologien begründet und getroffen werden müssen als zunächst angenommen, die nicht im Rahmen dieses Projektes leistbar waren. Dies gilt nicht nur für Metalle, die in kleinerem Umfang eingesetzt werden, sondern auch für Massenmetalle wie Eisen und Kupfer. Da der Fokus des DeteRess-Projekts auf den Möglichkeiten der *inländischen* Dematerialisierungspolitik liegt, und die Erzgehalte von der inländischen Dematerialisierungspolitik kaum beeinflussbar sind, wurden die Erzgehalte in den Szenarien als konstant angenommen.

5.6.2 Überleitung der Daten in URMOD

Die Veränderung der Metallgehalte der Erze würde sich in URMOD in einer entsprechenden Änderung der kumulierten Rohstoffkoeffizienten der Metallimporte niederschlagen (F-Matrix). Die entsprechenden Koeffizienten wurden wegen der dargestellten Schätzunsicherheiten in URMOD konstant gehalten. Da tendenziell eher sinkende Metallgehalte wahrscheinlich sind, dürfte die Annahme insgesamt zu einer Unterschätzung des Rohstoffbedarfs führen.

5.7 Klimawandel und Mengenrelevanz

5.7.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage

Auch wenn der Klimawandel zunächst eine Folge der wirtschaftlichen Nutzung der natürlichen Rohstoffe (insb. der fossilen Energierohstoffe) ist, so geht es an dieser Stelle darum, dass die Anpassung an den Klimawandel wiederum Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf hat. Zwei Aspekte können mit Blick auf die Konsequenzen für den Rohstoffbedarf hierbei unterschieden werden. Im Zuge des Klimawandels kommt es zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Jahrestemperaturen, was den Bedarf an Wärme- und Kühlleistungen verändert. Gleichzeitig ist mit dem häufigeren Auftreten von Extremwetterereignissen zu rechnen, was wiederum vorsorgende Maßnahmen zum Schutz vor den Auswirkungen solcher Extremwetterereignisse erfordert.

Die durchschnittliche Jahrestemperatur in dem vergleichsweise heißen Jahr 2015 lag bei 9,9 C. Verglichen mit der internationalen Klimareferenzperiode 1961-1990 hat sich die durchschnittliche Jahrestemperatur in 2015 damit um 1,7°C erhöht [DWD, 2016]. Berechnungen von Klimaszenarien kommen zum Schluss, dass sich die Durchschnittstemperaturen global und bezogen auf Deutschland weiter erhöhen werden. Die für Deutschland angenommene Spannweite einer durchschnittlichen Erhöhung bis 2100 liegt dabei zwischen 2,5 und 3,5°C (basierend auf den MPI-M Berechnungen von Schwarz et al. [Schwarz et al., 2007]). UBA [UBA, 2013] nennt gegenwärtig eine Spannweite von 1,5 bis 5°C im Sommer und 2 bis 4,5°C im Winter. Diese Veränderungen haben direkte Auswirkungen auf den anzunehmenden Heizwärmebedarf von Gebäuden im Winter und Kühlbedarf von Gebäuden (einschließlich Lagerhallen) in warmen bzw. heißen Jahreszeiten. Im vorliegenden Projekt wurden beide Auswirkungen entsprechend des Projektionsberichts des BMBU berücksichtigt, indem der Bedarf für die Wärmegegewinnung (neben anderen Gründen) auch aufgrund der Temperaturanstiege gesenkt und die Gerätzahl für Kühlung erhöht wurden (siehe auch Kapitel 6.2.4).

Weiterhin ist davon auszugehen, dass auch die Häufigkeit von Extremwetterereignissen, darunter Überschwemmungen und Starkregen, zunehmen werden. Die deutsche Anpassungsstrategie nennt in diesem Zusammenhang vorsorgende Maßnahmen im Bereich Hochwasser- und Küstenschutz [Bundesregierung, 2008]²⁰.

Von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser in Zusammenarbeit mit den Flussgebietsgemeinschaften und unter Beteiligung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung wurden zur Prävention gegen Auswirkungen von Hochwassern konkrete und umfangreiche Maßnahmen im Rahmen eines Nationalen Hochwasserschutzprogramms entwickelt. Dazu gehören vor allem Maßnahmen zur Deichrückverlegung und Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen, zur gesteuerten Hochwasserrückhaltung und zur Beseitigung von Schwachstellen. Die prioritären Maßnahmen wurden mit einem zeitlichen Fokus bis 2027 konkret benannt und budgetiert. Die weniger prioritären Maßnahmen wurden für einen dahinter liegenden Zeitraum gelistet, ohne Nennung eines Jahres, bis wann die Maßnahmen final durchgeführt sein sollen. Im Bereich des Küstenschutzes wurde ein Sonderrahmenplan im Zuge der Gemeinschaftsaufgaben Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK) Hochwasser- und Küstenschutzmaßnahmen der Länder definiert. Der Sonderrahmenplan definiert dabei Maßnahmen bis 2025, jedoch keine darüber hinaus.

Da beide wesentlichen Ansätze (DAS und der Sonderrahmenplan) keine ausreichend konkreten Anhaltspunkte für Umsetzungsmaßnahmen im Jahr 2030 gegeben haben und da angesichts der bestehenden Planungen davon auszugehen ist, dass die aus heutiger Sicht wesentlichen Maßnahmen bereits vorher umgesetzt sein werden, wurde im Rahmen dieses Projektes keine Annahme für zusätzliche Maßnahmen im Bereich des Hochwasser- oder Küstenschutzes in 2030 getroffen.

5.7.2 Überleitung der Daten in URMOD

Auswirkungen des Klimawandels auf den Materialverbrauch bezüglich des Hochwasser- und Küstenschutzes wurden nicht modelliert. Die Auswirkungen des Klimawandels hinsichtlich der Veränderungen der Heizwärmebedarfe werden in Kapitel 6.2.4 erläutert.

5.8 Sonstige Entwicklungstrends

5.8.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage

Über die oben benannten Trends hinaus hat das UBA [2014a] weitere Trendthemen bestehend aus 300 Einzeltrends identifiziert und ihren Bezug zum Rohstoffverbrauch skizziert. Besonders relevante Trends wurden in drei Trendcluster gruppiert, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. Dabei

²⁰ Andere Ansatzpunkte der DAS werden in diesem Projekt berücksichtigt, ohne dass sie explizit so herausgestellt werden; dazu zählt im Wesentlichen die Energiewende, das heißt die Abkehr von der Nutzung der fossilen Rohstoffe und die Steigerung der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern, um den Treibhausgasausstoß zu minimieren [Bundesregierung, 2008].

liegt der Fokus auf der Frage, welche möglichen Auswirkungen auf Rohstoffmengen technologisch oder lebensstilbedingt sind und daher im vorliegenden Projekt berücksichtigt werden sollten.

► **Trendcluster 1: Beschleunigung des Kapital- und Wirtschaftssystems**

Von Wachstum und Profit getriebene Geschäftsmodelle führen einer Ausbreitung westlicher Produktions- und Konsummuster, und damit zu einer Erhöhung des Ressourcen- und insbesondere Rohstoffverbrauchs auf globaler Ebene. Durch die Urbanisierung werden städtische Konsum- und Verhaltensmuster verstärkt, gleichzeitig ergeben sich Einsparpotenziale bezüglich der in Anspruch genommenen Flächen. Bezuglich des globalen Rohstoffverbrauchs wurde in diesem Projekt unterstellt, dass der erwartete Anstieg des globalen Rohstoffverbrauchs weder inländisch noch weltweit erhebliche Rohstoffknappheiten auslöst, die zu signifikanten Auswirkungen auf die Rohstoffpreise führen und die gegenwärtig vorherrschenden Nutzungsarten ändern. Eine Ausnahme stellen die fossilen Rohstoffe dar, bei denen der in der Studie vom BMUB unterstellte Preisanstieg in seinen Auswirkungen auf die Energienutzung in dieser Modellierung übernommen wurde.

► **Trendcluster 2: Nachhaltige Lebensmodelle und Entschleunigung**

Aus der Kritik am wachstumsorientierten Wirtschaftssystem heraus werden alternative Lebensmodelle entwickelt, welche Nachhaltigkeit und kollaboratives Wirtschaften in den Vordergrund stellen. Es wird bewusst versucht, Konsum- und Verhaltensweisen zu entwickeln, die den Ressourcenverbrauch verringern. Da sich die Trends in diesem Cluster vor allem auf Lebensstiländerungen beziehen, werden sie im vorliegenden Projekt nicht berücksichtigt.

► **Trendcluster 3: Digitalisierung und Informationsflüsse**

Durch die Digitalisierung verändern sich Arbeitswelten und Produktionsweisen. Innovationsgeschwindigkeiten nehmen zu; die Industrie wird zunehmend automatisiert. Neue IKT-Technologien wie Cloud Computing können den Ressourcenbedarf von Unternehmen reduzieren, gleichzeitig kann sich der Bedarf an zusätzlichem Material ergeben (z.B. Server, Breitband, Roboter). Die technologischen Auswirkungen der Digitalisierung sind ein Aspekt des technischen Fortschritts, der in Kapitel 5.3 behandelt wurde. Die Änderungen, die sich in Bezug auf die Arbeitswelt ergeben, manifestieren sich in veränderten Lebensstilen und Konsummustern, welche in diesem Projekt nicht behandelt werden.

5.8.2 Überleitung der Daten in URMOD

Auswirkungen der sonstigen dargestellten Entwicklungstrends auf den Materialverbrauch wurden wenn nicht indirekt berücksichtigt (z.B. Digitalisierung als Aspekt des technischen Fortschritts) nicht explizit in URMOD modelliert.

6 Szenariengestaltung im Energiesektor

6.1 Status quo 2010 und Trends in der Vergangenheit

Der Komplex Energieversorgung ist grundlegend relevant für annähernd alle Bereiche unserer Gesellschaft und Wirtschaft. Nicht nur jeder private Haushalt benötigt Energie in Form von elektrischem Strom, Wärme sowie anderen Energieträgern; zusätzlich basieren alle Wirtschaftsbereiche wie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Industrie und Verkehr auf dem Einsatz und der Umwandlung von Energie. Statistische Daten zu Trends in der Vergangenheit und 2010 entstammen den Quellen [AGEB, 2015a], [AGEB, 2015b] und [BMWi, 2015]. Der Ursprung dieser Daten liegt sowohl bei der AG Energiebilanzen (AGEB), als auch bei Destatis und der Bundesnetzagentur (Monitoringberichte).

Die Primärenergiegewinnung in Deutschland basiert hauptsächlich auf fossilen Brennstoffen, ergänzt durch die Nutzung von Photovoltaik (PV), Wind-/Wasserkraft und anderen Brennstoffen wie Holz, Torf, Klärschlamm und Abfall sowie nutzbarer Abwärme. Bei den Mineralölen und Naturgasen übersteigt der Import die innerdeutsche Primärenergiegewinnung deutlich. Während die genutzte Braunkohle fast ausschließlich aus deutschem Abbau stammt, wird Steinkohle größtenteils importiert (siehe auch Abbildung 20).

Die Bereitstellung der Endenergie an die Verbraucher erfolgt nach Umsetzung der gewonnenen und importierten Energieträger in entsprechenden Anlagen und Kraftwerken. Der entsprechende Materialbedarf setzen sich im Energiesektor aus den physisch eingesetzten Energieträgern zur Primärenergieerzeugung und dem Bedarf für die Anlagen-Infrastruktur zusammen. Hierbei stammen Anlagen zur Umwandlung von Energieträgern (z.B. Raffinerien) und zur Energieerzeugung (z.B. Windkraftanlagen, Kraftwerke) als Bauwerke aus dem Bereich Hoch-/Tiefbau. Ähnlich verhält es sich bei der Energieversorgungs-Infrastruktur (z.B. Strom- und Gasnetze). Der Materialbedarf im Rahmen von Maschinen und Technik stammt aus dem Bereich Maschinenbau. Hierbei handelt es sich um den Bedarf sowohl für den Neubau als auch die Instandhaltung der entsprechenden Anlagen.

Die Anteile der Sektoren private Haushalte, Industrie und Verkehr am Primärenergieverbrauch beanspruchen mit je 20 % im Jahr etwa gleiche Anteile; der Sektor GHD hat einen leicht geringeren Energieverbrauch (etwa 10 % des Primärenergieverbrauchs). Der verbleibende Anteil der Primärenergie von etwa 30 % beruht auf Verbrauch und Verlusten im Energiesektor. Beim Energieverbrauch im Sektor Industrie überwiegt der Einsatz von Strom und Gas; im Verkehr werden fast ausschließlich Kraftstoffe wie Benzin und Diesel sowie Kerosin verwendet. In privaten Haushalten werden hauptsächlich Gas, Heizöl und Strom eingesetzt; der Energieverbrauch im Sektor GHD ähnelt bzgl. der anteiligen Nutzung der Energieträger im Wesentlichen dem Verbrauch privater Haushalte.

Im Folgenden werden für den Bereich Energie wesentliche Trends in der Vergangenheit und der Status quo im Jahr 2010 aufgezeigt. Hierbei werden sowohl die Energiebereitstellung und Nutzung allgemein als auch die separaten Bereiche Strom und Raumwärme betrachtet.

6.1.1 Energie: Erzeugung, Außenhandel und Nutzung

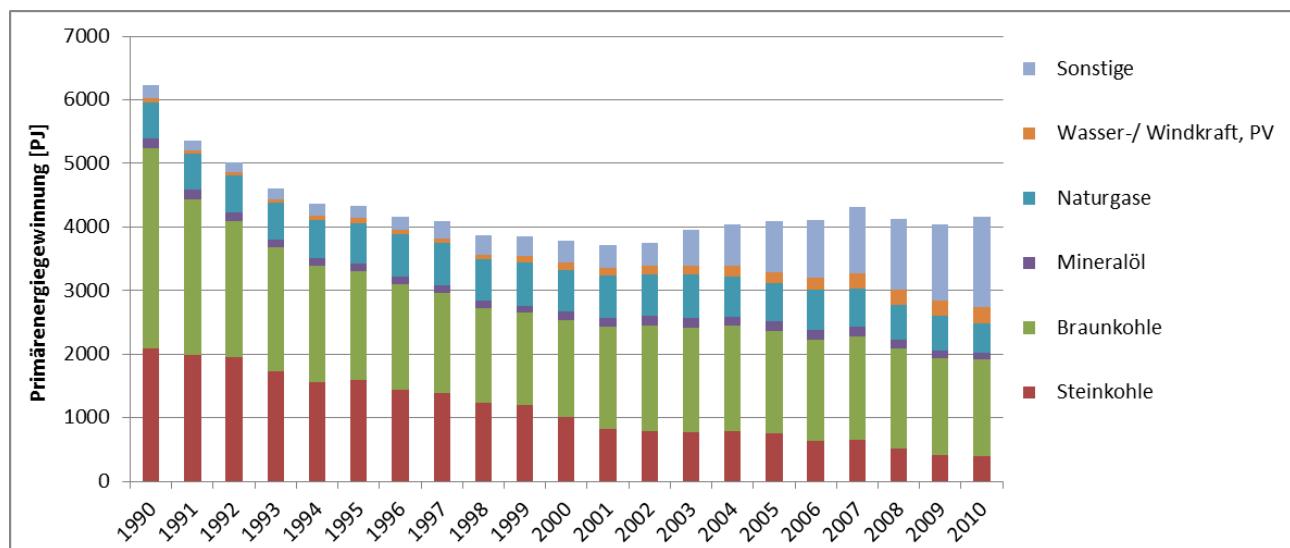
6.1.1.1 Primärenergiegewinnung und Außenhandel in der Vergangenheit

Die Energieerzeugung in Deutschland beruht sowohl auf Energieträgern aus innerdeutscher Gewinnung (s. Abbildung 17) als auch auf der Einfuhr von Energieträgern aus dem Ausland (siehe Abbildung 18). Die Netto-Einfuhr von Primärenergieträgern entspricht etwa der doppelten Menge der inländischen Primärenergiegewinnung, bezogen auf den Energiegehalt in PJ pro Jahr.

Die Primärenergiegewinnung in Deutschland zeigt in den Jahrzehnten vor 2010 einen deutlichen Rückgang der Steinkohle- und Braunkohlegewinnung bei gleichzeitiger Steigerung der Nutzung sonstiger Primärenergieträger (Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Abfall u.Ä., Abwärme zur Strom- und

Fernwärmeverzeugung), etwa ab den 2000er Jahren. Die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Wasser, Wind, PV) nimmt in diesem Zeitraum ebenfalls zu.

Abbildung 17: Primärenergiegewinnung in Deutschland nach Energieträgern in PJ für die Jahre 1990-2010



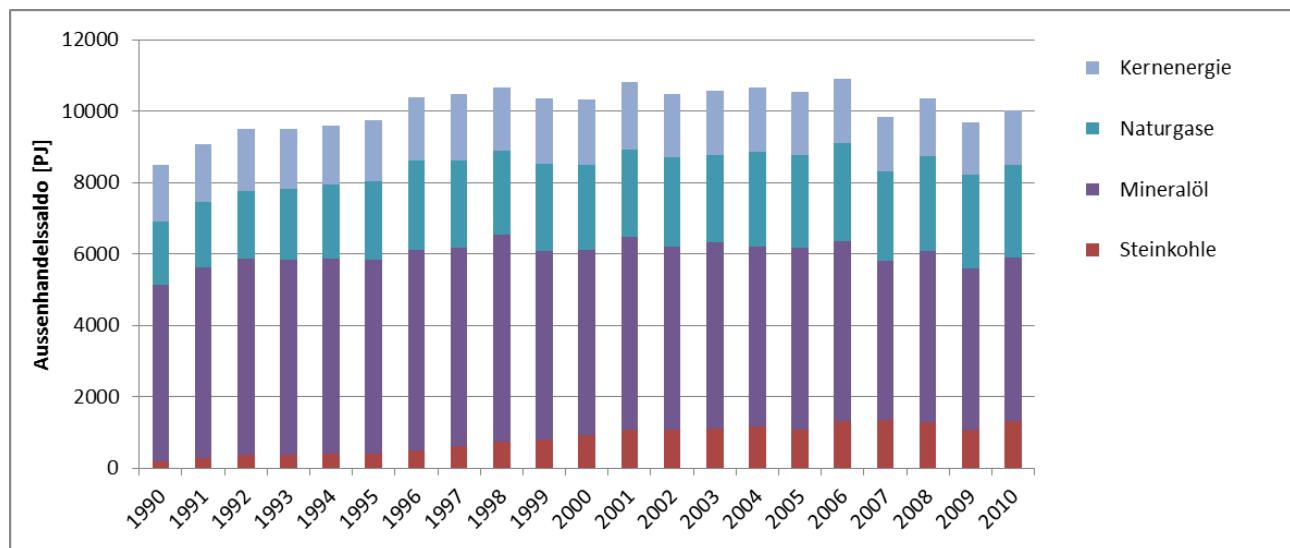
Anmerkung: „Sonstige“ beinhaltet: Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Abfall u.Ä., Abwärme zur Strom- und Fernwärmeverzeugung.

Quelle: [AGEB, 2015b] (AGEB, Statistik der Kohlenwirtschaft, Bundesverband Braunkohle, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Mineralölwirtschaftsverband).

Beim Außenhandel mit Primärenergieträgern überwiegt deutlich die Einfuhr, wobei die Gesamteinfuhr ab 1990 vorerst zunahm, seit Mitte der 90er Jahre stabil bleibt, mit einem leichten Rückgang etwa ab 2007. Diese Abnahme ist zu zwei Dritteln auf eine Abnahme von Öl-Importen und zu einem Drittel auf einen Rückgang der Rohstoffen der Kernenergie-Erzeugung zurückzuführen. Dies kann in direkten Zusammenhang mit dem Anstieg der Rohölpreise auf dem Weltmarkt ab Mitte der 2000er Jahre gebracht werden.

Die Importe von Steinkohle nahmen zwischen 1990 und 2010 von 180 PJ/a auf 1.300 PJ/a zu, mit einem Anteil am Import von 13 % in 2010. Steinkohle wird vorrangig in der Industrie (Metallerzeugung) eingesetzt und ist in der Stahlindustrie nur begrenzt substituierbar. Die inländische Gewinnung von Steinkohle nimmt im betrachteten Zeitraum dagegen von 2.100 PJ/a auf 390 PJ/a ab. Die Im- und auch Exporte von Braunkohle liegen im betrachteten Zeitraum im Bereich unter 100 PJ/a und sind in Abbildung 18 nicht dargestellt. Die Stromexporte zeigen seit 2003 eine Zunahme und liegen seitdem im Bereich 50-100 PJ/a; diese sind in der Graphik ebenfalls nicht dargestellt.

Abbildung 18: Außenhandelssaldo für Deutschland nach Primärenergieträgern in PJ für die Jahre 1990–2010



Quelle: [AGEB, 2015b] (AG Energiebilanzen, Statistik der Kohlewirtschaft, Bundesverband Braunkohle, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Mineralölverband).

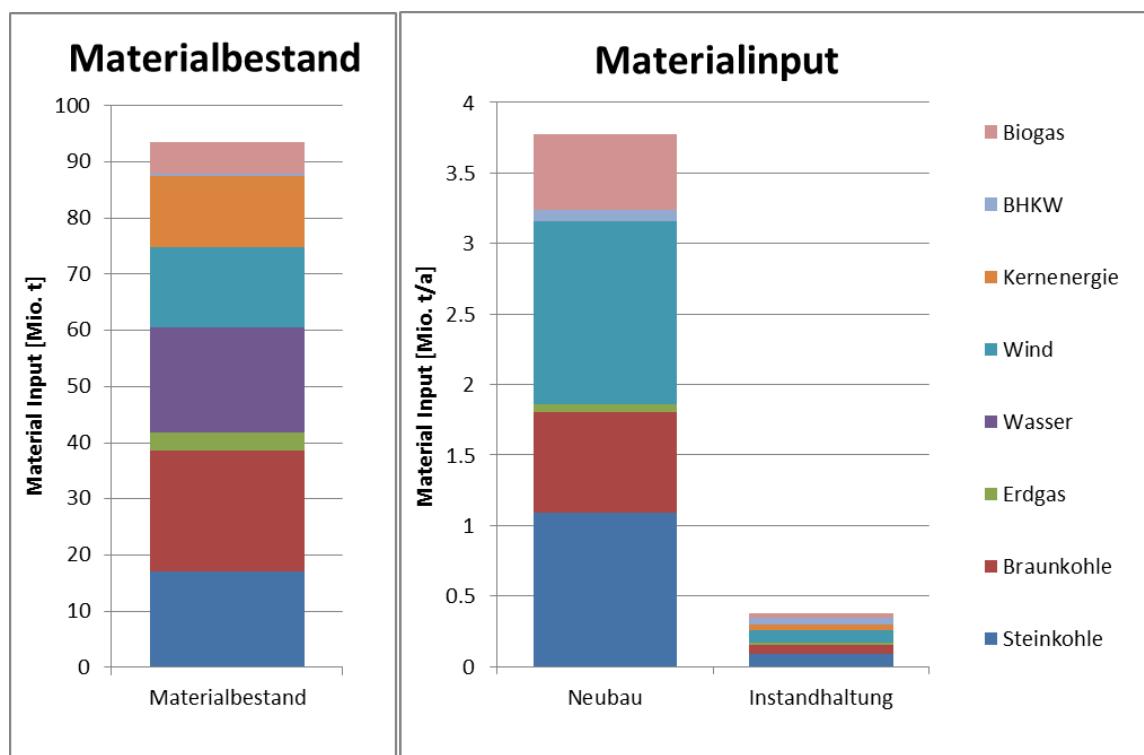
6.1.1.2 Materialbestand und -inputs im Energiesektor

Der Materialbestand und der Materialbedarf im Bereich der Energieerzeugung und der entsprechenden Infrastruktur in Deutschland sind im Folgenden in Abbildung 19 und Abbildung 20 exemplarisch dargestellt. Die gezeigten Werte werden als repräsentativ für die Situation in 2010 angesehen und stammen aus Erhebungen und Berechnungen im Rahmen von MaRess [Wuppertal-Institut, 2011].

Der Materialbestand des Kraftwerksparks (Abbildung 19) liegt bei insgesamt knapp unter 100 Mio. t, wobei die mineralischen Rohstoffe der Bauwerke knapp 80 % des Bestandes ausmachen (Beton). Der gesamte Materialbedarf für den Neubau und die Instandhaltung von Kraftwerken liegt bei gut 4 Mio. t pro Jahr (repräsentativ für 2010), wovon große Anteile auf den Neubau von Kohlekraftwerken und Windkraftanlagen entfallen (Abbildung 19).

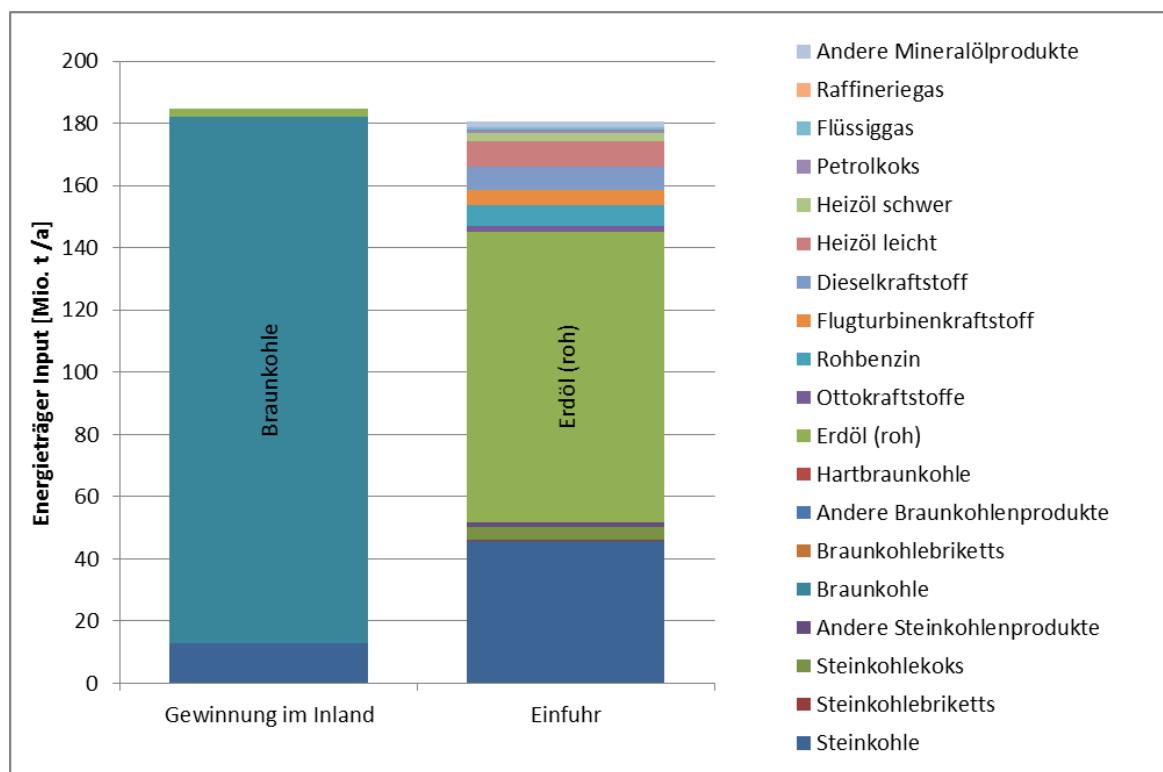
Die jährlichen Materialinputs durch Energieträger liegen in 2010 um ein Vielfaches höher als der entsprechende Bedarf der Bauwerke des Kraftwerksparks. Exemplarisch sind in Abbildung 20 die Inputs der Energieträger aus Kohle und Öl pro Jahr dargestellt, wobei deren Summe (fast 400 Mio. t in 2010) dem Vierfachen der Materialbestände deutscher Kraftwerke entspricht. Dieser jährliche Materialinput der Energieträger übersteigt den entsprechenden Materialinput in den Kraftwerkspark (für Neubau und Instandhaltung) etwa um den Faktor 100.

Abbildung 19: Materialbestand der deutschen Kraftwerke in Mio. t und jährlicher Materialinput für Neubau und Instandhaltung in Mio. t/a, für die unterschiedlichen Kraftwerkstypen.



Quelle: [Wuppertal-Institut, 2011].

Abbildung 20: Input von Material zur Energieerzeugung in 2010 in Deutschland, nur Energieträger aus Kohle und Öl , innerdeutsche Gewinnung und Einfuhr nebeneinander in Mio. t/a



Quelle: [AGEB, 2015a].

6.1.1.3 Primär- und Endenergieverbrauch in der Vergangenheit und in 2010

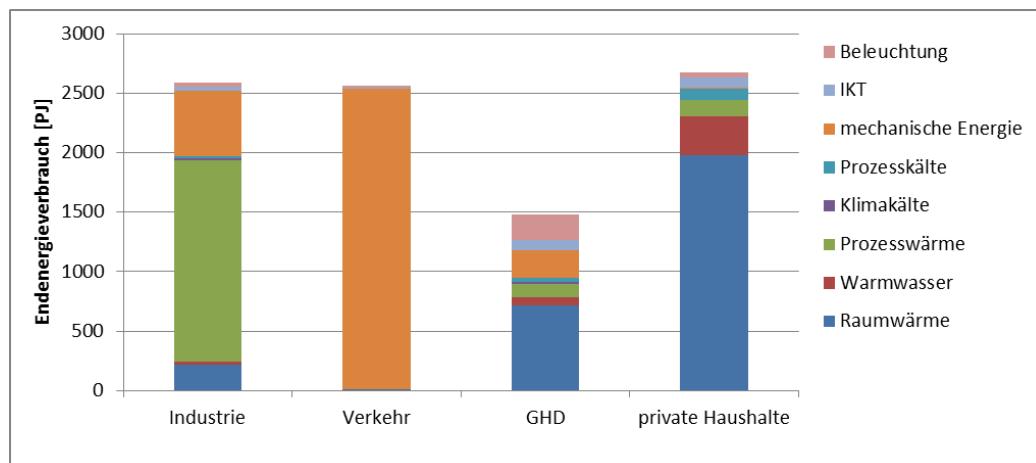
Der gesamte Primärenergieverbrauch lag in Deutschland zwischen 1990 und 2010 etwa gleichbleibend um 14.000 PJ pro Jahr, wobei ein Einbruch um etwa 1.000-2000 PJ in 2009 zu beobachten ist; hiervon waren alle Wirtschaftssektoren etwa gleichermaßen betroffen. Etwa 30 % des Primärenergieverbrauchs beruhen auf Verbrauch und Verlusten im Energiesektor, während auf Industrie, Verkehr und Haushalte je knapp 20 % und GHD etwa 10 % entfallen. Der nichtenergetische Verbrauch liegt bei etwa 5 % des gesamten Primärenergieverbrauches.

Bei der direkten Nutzung von Energieträgern (im Endenergieverbrauch) ist ein starker Rückgang der Nutzung von Braunkohle von etwa 1.000 PJ/a auf unter 100 PJ/a innerhalb der 90er Jahre zu beobachten. Weiterhin verringert sich die Nutzung von Heizöl von etwa 1.500 PJ/a in den 90er Jahren auf weniger als 900 PJ/a in 2010. Ebenfalls ist ein leichter Rückgang bei der Nutzung von Steinkohle von etwa 600 PJ/a in 1990 auf knapp 400 PJ/a in 2010 zu beobachten. Die Nutzung von Kraftstoffen bleibt im gezeigten Zeitraum etwa konstant während die Nutzung von Fernwärme, Strom und Gas einen Anstieg verzeichnen. Die Nutzung sonstiger Energieträger (Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm und Abfall) erhöht sich zwischen 1990 und 2010 von etwa 50 PJ/a auf knapp 700 PJ/a. Die Endenergienutzung aller Sektoren beruhte in 2010 zu etwa 25 % auf Kraftstoffen, zu weiteren 25 % auf Gas, zu 20 % auf Strom und etwa 10 % auf Heizöl.

Die Hauptnutzung (alle folgenden Angaben pro Jahr in 2010) von Gas findet mit 1.040 PJ/a bei den privaten Haushalten statt (85 % für Raumwärme, 15 % für Warmwasser). Weitere 360 PJ/a aus Gas entfallen auf Raumwärme im Sektor GHD; 770 PJ/a werden im Sektor Industrie für Prozesswärme eingesetzt. Kraftstoffe und Öl werden vorrangig im Verkehr für mechanische Energie eingesetzt (2.340 PJ/a), weiterhin für Raumwärme bei den Haushalten (500 PJ/a) und im Sektor GHD (180 PJ/a). Die Verwendung von Strom liegt im Sektor Industrie bei der Erzeugung mechanischer Energie (540 PJ/a) und Prozesswärme (150 PJ/a). Im Verkehr werden etwa 50 PJ/a als Strom für mechanische Energie eingesetzt; im Sektor GHD sind es 120 PJ/a, ebenfalls für mechanische Energie, sowie 80 PJ/a für IKT und 220 PJ/a für Beleuchtung. Die privaten Haushalte verwenden Strom vorrangig für sonstige Prozesswärme (Kochen/Waschen, 130 PJ/a), neben der Nutzung für IKT (80 PJ/a) und Beleuchtung (40 PJ/a). (Zur Stromnutzung siehe auch Abbildung 23).

Der Endenergieverbrauch der Sektoren nach Anwendungsgebieten für 2010 ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Hauptanwendung im Sektor Industrie (Prozesswärme, 65 %) beruht fast zur Hälfte auf der Nutzung von Gas und zu etwa einem Viertel auf Kohle. Mechanische Energie im Bereich Industrie wird zu 98 % aus Strom erzeugt. Im Verkehrssektor dominiert wie erwartet die Nutzung von erdöl-basierten Kraftstoffen für mechanische Energie (98 % Endenergie für Verkehr) mit einem Anteil von 5 % erneuerbarer Energieträger in dieser Anwendung. Die Raumwärme macht vor allem bei den privaten Haushalten als auch im Sektor GHD einen großen Anteil aus (je 74 % und 48 % des sektoralen Endenergieverbrauchs). Wobei bei den privaten Haushalten neben 44 % Gas und 27 % Öl auch etwa 15 % erneuerbare Energieträger eingesetzt werden, während im Sektor GHD zur Hälfte auf Gas, einem Viertel auf Öl und zu 15 % auf Fernwärme zurückgegriffen wird.

Abbildung 21: Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ nach Anwendungsgebieten für Deutschland in 2010



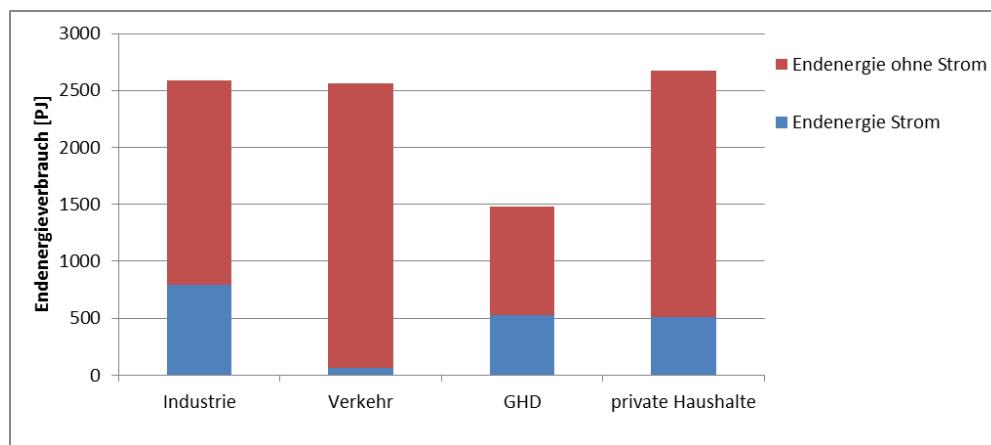
Quelle: [AGEB, 2015a; BMWi, 2015].

6.1.2 Energie aus Strom: (nicht-) erneuerbar, Erzeugung und Verbrauch

Im Rahmen der Energienutzung wird im Besonderen auf die Erzeugung und den Verbrauch von Strom eingegangen. Gründe hierfür liegen sowohl in der aktuellen Bedeutung der Stromnutzung im Endenergieverbrauch als auch in der Entwicklung der Energiewende in Deutschland. Letztere hat mit der deutlichen Förderung erneuerbarer Energiequellen und der Abwendung von fossilen Energieträgern und der Kernenergie bereits begonnen.

Die Nutzung von Strom liegt innerhalb der Sektoren Industrie, GHD und private Haushalte in 2010 bei 31 %, 36 % und 19 % des jeweiligen Endenergieverbrauchs (siehe Abbildung 22). In 2010 basiert die Stromerzeugungskapazität in Deutschland noch zu etwa 60 % auf fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl, Gas und Kernenergie. Durch die geplante Energiewende sind speziell im Bereich der Stromerzeugung in zukünftigen Jahrzehnten maßgebliche Veränderungen zu erwarten, sowohl im Rahmen der Menge als auch der Herkunft der erzeugten Energie (aus erneuerbaren Quellen). Eine allgemeine Zunahme der Bedeutung von Energie aus Strom wird unter anderem im Hinblick auf den geplanten starken Ausbau der Elektromobilität und dem entsprechenden Rückgang der Nutzung fossiler Energieträger antizipiert.

Abbildung 22: Anteil Strom am Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ für Deutschland in 2010



Quelle: [AGEB, 2015a; BMWi, 2015].

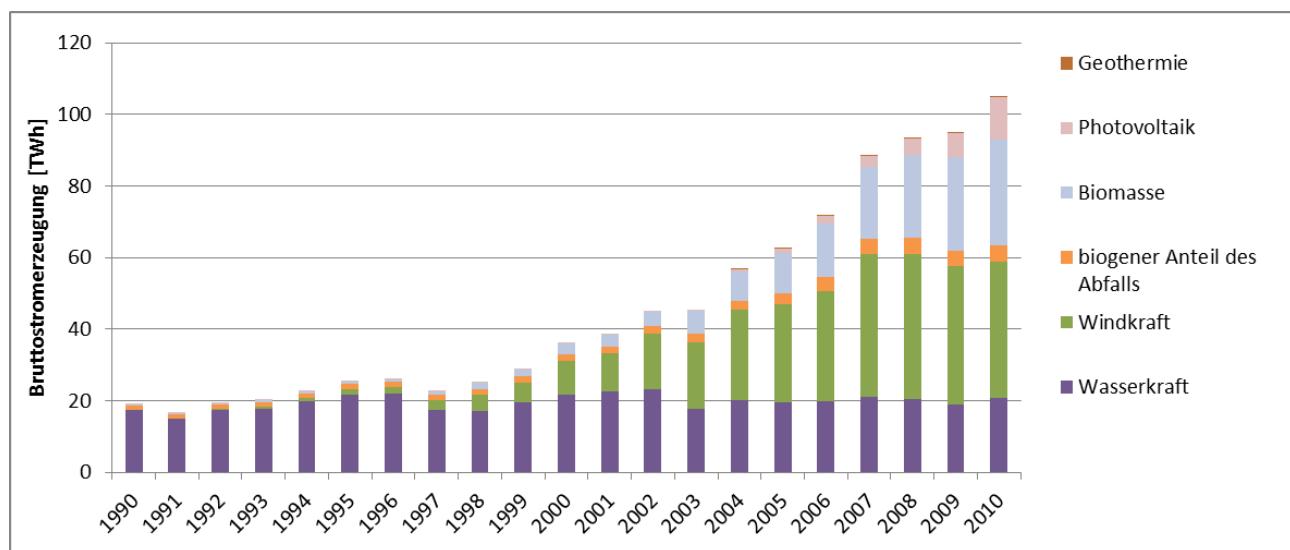
6.1.2.1 Stromerzeugung in der Vergangenheit

Insgesamt sank zwischen 1990 und 2010 die installierte Leistung der Stromerzeugung aus Kohle, Heizöl und Kernenergie, während bei Strom aus Gas und Wasserkraft im gleichen Zeitraum eine leichte Zunahme zu beobachten ist. Ab etwa Anfang der 2000er Jahre erfolgt eine deutliche Steigerung der Kapazitäten von Windstrom, PV und Biomasse. Die Stromerzeugung aus Geothermie beginnt erst in 2004 und spielt eine dauerhaft vernachlässigbare Rolle. Insgesamt zeigt sich zwischen 1990 und 2010 eine Steigerung der Kapazitäten der Stromerzeugung von insgesamt etwa 125 GW zu 170 GW Leistung. Diese Steigerung ist vor allem auf Anlagen für die Nutzung erneuerbarer Energien zurückzuführen (40 % erneuerbar in 2010).

Die Bruttostromerzeugung durch die oben genannten Anlagen hat sich von 1990 bis 2010 von etwa 550 TWh/a auf etwa 630 TWh/a leicht erhöht. Ein Einbruch der Stromerzeugung in 2009 ist erkennbar, besonders ausgeprägt bei der Nutzung von Steinkohle. Die gesamte Stromerzeugung erfolgt in 2010 noch zu etwa 80 % durch die Nutzung fossiler Quellen (inkl. Kernenergie); der relative Anteil fossiler Quellen liegt in 1990 bei ca. 95 %, in 2010 liegt er unter 80 %. Absolut liegt der fossile Beitrag in diesem Zeitraum nahezu unverändert bei 480-540 TWh/a, wovon etwa 250-310 TWh/a aus Stein-/Braunkohle stammen. Hierbei zeigt Kohle zwischen 1990 und 2010 einen sich verringernden Anteil innerhalb der fossilen Energieträger (von 61 % auf 52 %).

Eine Zunahme der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen ist sichtbar, entsprechend dem Zubau der Erzeugungskapazitäten. Diese Entwicklung der erneuerbaren für den Zeitraum 1990 bis 2010 ist in der folgenden Abbildung 23 dargestellt. Eine deutliche Zunahme an erneuerbarem Strom setzt etwa um das Jahr 2000 mit einer Steigerung der Windenergieerzeugung ein. Deren Beitrag erhöht sich zwischen 2000 und 2010 von 9,5 TWh/a auf 38 TWh/a. Der Ausbau der Windkraft in den 90er Jahren fand vorerst im Bereich der Onshore-Anlagen statt. In 2009 setzt die Erzeugung von Strom aus Offshore-Windkraftanlagen ein und liegt 2010 im Bereich <0,5 % der Windstromerzeugung. Die Nutzung von Biomasse und des biogenen Anteils des Abfalls zur Stromerzeugung steigert sich im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 von 4,7 TWh/a auf 34 TWh/a. Biomasse umfasst hierbei biogene flüssige und Festbrennstoffe, Biogas und Biomethan, sowie Klär- und Deponiegas. Aus Biomasse erzeugter Strom besteht in 2010 zu etwa 50 % aus Biogas und Biomethan, zu etwa einem Drittel aus biogenen Festbrennstoffen, sowie aus geringen Anteilen weiterer Gase und flüssiger Brennstoffe. Die Bedeutung von Biogas und Biomethan innerhalb des Bereichs Biomasse liegt ab etwa 2007 in der Größenordnung 50 %, während zuvor Festbrennstoffe diesen Bereich dominierten. Insbesondere fällt der konstante Beitrag der Wasserkraft auf, deren Potenzial in Deutschland bereits seit den 90er Jahren ausgeschöpft ist. Anteilig nimmt die Bedeutung von Strom aus Wasserkraft aufgrund des Ausbaus anderer erneuerbarer Quellen stetig ab: von 92 % in 1990 auf 20 % in 2010. Solarstrom aus Photovoltaik-Anlagen liefern in 2000 lediglich 0,06 TWh/a, verzeichnen jedoch bis 2010 eine Steigerung auf 12 TWh/a. Einen gleichbleibend verschwindenden Beitrag liefert die Geothermie mit lediglich 0,2 GWh/a in 2004 und einer Steigerung auf 28 GWh/a in 2010.

Abbildung 23: Bruttostromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Quellen in TWh für die Jahre 1990-2010



Quelle: [AGEB, 2015a; BMWi, 2015].

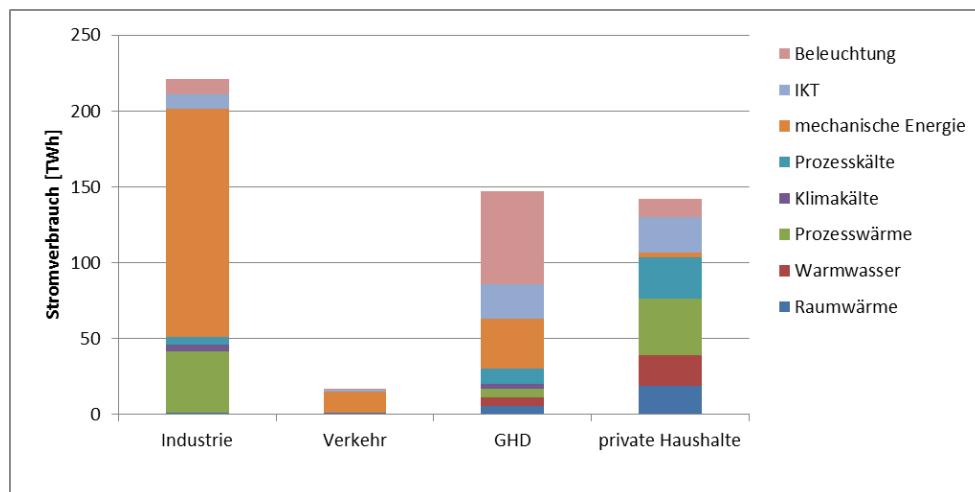
6.1.2.2 Stromnutzung der Sektoren

Die Stromnutzung in Deutschland steigt in der Vergangenheit zwischen 1990 und 2010 leicht von etwa 570 TWh/a auf 670 TWh/a. Diese Gesamtmenge verteilt sich jeweils auf die Sektoren und beinhaltet sowohl Verluste, Speicherverbräuche und Eigenverbräuche des Energiesektors als auch den Export von Strom. Etwa ein Drittel der Gesamtsteigerung um 100 TWh ist einer Ausfuhrsteigerung zuzuschreiben. Der relative Anteil der Ausfuhr steigt entsprechend von etwa 5 % auf 10 %. Darüber hinaus lässt sich eine weitestgehend gleichbleibende Verteilung der gesamten Stromnutzung auf die Sektoren beobachten. Wobei die Veränderungen innerhalb der Sektoren sich unterscheiden: Im Sektor Industrie steigt die Stromnutzung zwischen 1990 und 2010 um 8 %; die Stromnutzung im Handel und Gewerbe steigt um 35 %, im Bereich der öffentliche Einrichtungen um 29 %, bei den privaten Haushalten um 16 %; Verkehr und Landwirtschaft zeigen einen leicht sinkenden Stromverbrauch zwischen 1990 bis 2010 (um 4 % und 3 %). Verluste und Eigenverbräuche im Energiesektor sowie Speicherverluste steigen um 13 %. Ähnlich wie im allgemeinen Energieverbrauch ist auch in der Stromnutzung in 2009 ein Einbruch (um insgesamt etwa 40 TWh) sichtbar, wovon ebenfalls alle Sektoren gleichermaßen betroffen sind.

Die Verteilung der Stromverbräuche in 2010 (insgesamt etwa 530 TWh nach Abzug von Ausfuhr und Verlusten) auf die verschiedenen Anwendungsgebiete innerhalb der Sektoren ist in Abbildung 24 dargestellt. Der Stromverbrauch ist hierbei ein Teil des Endenergieverbrauches der Sektoren, der bereits in Abbildung 21 (in PJ) dargestellt wurde.

Der Sektor Industrie nimmt hierbei den größten Teil des Gesamtstromverbrauches in 2010 ein (42 %). Weitere 28 % entfallen auf den Sektor GHD, 27 % auf die privaten Haushalte, und lediglich 3 % auf den Verkehrssektor. Die mechanische Energie hat dabei insgesamt den bedeutendsten Anteil am Gesamtstromverbrauch (38 %). Insbesondere der Bereich Industrie; hier entspricht die mechanische Energie 68 % des sektoralen Stromverbrauchs. Mechanische Energie im Bereich Industrie wird fast ausschließlich aus Strom erzeugt. Auch in den Bereichen Verkehr und GHD dominiert die Stromnutzung für mechanische Energie mit 85 % bzw. 22 % des sektoralen Stromverbrauchs. Der Sektor GHD nutzt elektrischen Strom hauptsächlich zur Beleuchtung (42 %) und in geringerem Ausmaß für IKT (16 %). Im Bereich der privaten Haushalte dagegen ist die Stromnutzung verteilt auf die Anwendungsbereiche Prozesswärme (26 %) und -kälte (19 %), IKT (17 %), Warmwasser (14 %) und Raumwärme (13 %), sowie Beleuchtung (8 %).

Abbildung 24: Stromverbrauch der Sektoren in TWh nach Anwendungsgebieten für Deutschland in 2010



Quelle: [AGEB, 2015a; BMWi, 2015].

6.1.3 Raumwärme, Erzeugung und Bedarf

Raumwärme oder Heizwärme spielen vor allem in den Sektoren GHD und private Haushalte eine entscheidende Rolle im gesamten Endenergieverbrauch (siehe Abbildung 21). Private Haushalte beanspruchten für diese Nutzungsart etwa 1.980 PJ/a in 2010, davon etwa 70 PJ/a aus Strom. Insgesamt entspricht die Energienutzung für Raumwärme etwa 31 % des gesamten Endenergieverbrauchs aller Sektoren (8 % bei der Industrie, 48 % bei GHD, und 74 % bei privaten Haushalten, lediglich 0.5 % bei Verkehr, siehe Abbildung 21).

Beim geplanten Verringerung der Nutzung fossiler Brennstoffen in den kommenden Jahrzehnten ist ein deutlicher Wandel im Bereich der Raumwärmennutzung zu erwarten. Zum einen werden Energieträger aus erneuerbaren Quellen zunehmend an Bedeutung gewinnen und fossile Energieträger ersetzen (sowohl im direkten Einsatz als auch über die Nutzung erneuerbarer Stromquellen zur Wärmeerzeugung); zum anderen werden Dämmungsmaßnahmen an Gebäuden zu einer Verringerung des absoluten Raumwärmebedarfes führen.

6.1.3.1 Raumwärme in der Vergangenheit

Statistische Daten zu Trends in der Vergangenheit für Raumwärme liegen für die Jahre 1996 und 2008-2010 vor. Zwischen 1996 und 2010 ist eine Halbierung in der Nutzung von Mineralöl von 1.420 PJ/a auf 710 PJ/a zu beobachten. Diese Reduktion ist verknüpft mit einer Verringerung des gesamten Endenergiebedarfs um 18 % und einem Einsatz von 360 PJ/a aus erneuerbaren Energiequellen in 2010. Gleichzeitig verringert sich die Nutzung von Strom und Kohle zur Wärmeerzeugung in 2010 gegenüber 1996 um 39 % auf etwa 90 PJ/a (aus Strom) und um 45 % auf etwa 70 PJ/a (aus Kohle). Die Nutzung von Gas erfährt ab 1996 (1.470 PJ/a) lediglich eine geringe Abnahme von 100-200 PJ/a und liegt in 2008-2010 konstant um die 1.300 PJ/a.

Der Anteil, den die Sektoren am gesamten Endenergieverbrauch für Raumwärme haben, bleibt über den Zeitraum 1996 bis 2010 konstant. Für Raumwärme aufgewendete Endenergie liegt zu 67% bei den privaten Haushalten, zu 25 % im Sektor GHD, und zu 7 % im Sektor Industrie. Auf den Sektor Verkehr entfallen weniger als 0.5 % der gesamten Energiemenge zur Raumwärmeerzeugung. Somit entfällt auf die privaten Haushalte sowohl einen hohen Anteil am sektoralen Energiebedarf für Raumwärme (74 % der Endenergie im Sektor private Haushalte) als auch ein hoher Anteil der insgesamt für Raumwärme genutzten Endenergie (67 % der Endenergie aller Sektoren für Raumwärme).

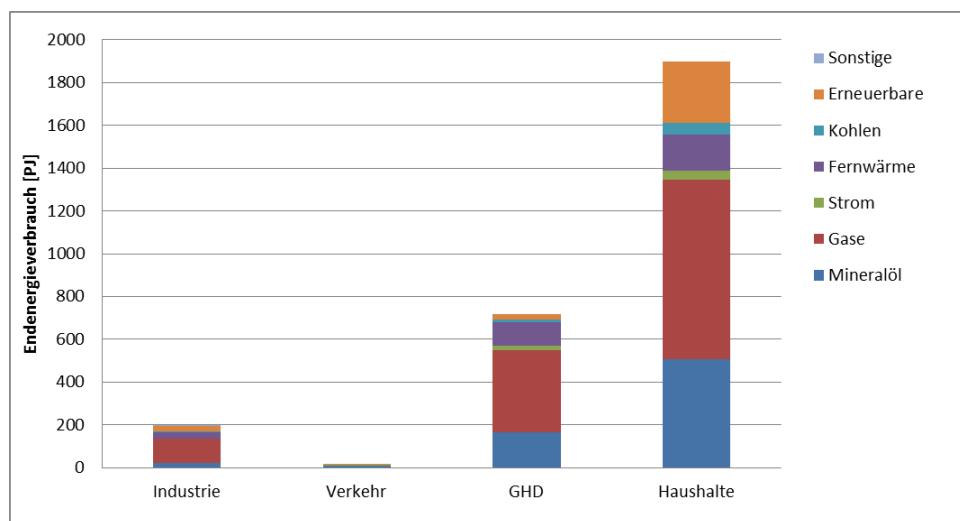
6.1.3.2 Raumwärme: Stand 2010

Nachdem Abbildung 21 einen Überblick über den Energieverbrauch für Raumwärme (blau in Abbildung 21) im Vergleich zu anderen Energienutzungen liefert, stellt Abbildung 25 im Folgenden dar, aus welchen Energiequellen die erzeugte Raumwärme stammt.

Die Energiebereitstellung zur Raumwärmeerzeugung betrifft vor allem die Sektoren private Haushalte (Wohngebäude) und GHD (Nichtwohngebäude), wobei die insgesamt in 2010 genutzte Energie für Raumwärme von 2.800 PJ zu 68 % auf die privaten Haushalte und zu 24 % auf den Sektor GHD entfällt.

Ein bedeutender Anteil der genutzten Raumwärme in den Sektoren Industrie, GHD und private Haushalte wird aus Gas erzeugt (57 %, 51 % und 44 %). Ein weiterer großer Anteil stammt vor allem in den Sektoren GHD und private Haushalte aus Mineralölen (je 25 %). Im Bereich der privaten Haushalte stammen in 2010 bereits 15 % der erzeugten Raumwärme aus erneuerbaren Quellen. Insgesamt stellen Erneuerbare 12 % der gesamten Endenergie für Raumwärme in 2010 bereit.

Abbildung 25: Nutzung von Endenergie für Raumwärme nach Energieträgern innerhalb der Sektoren in Deutschland in 2010



Quelle: [AGEB, 2015a; BMWi, 2015].

6.2 Anznehmende zukünftige Entwicklung

Als Grundlage für die Betrachtungen des Szenarios AZE dient für den Bereich Energie der aktuelle ProJEktionsbericht des BMUB [BMUB, 2015]. Dieser beinhaltet in einem Ohne-Maßnahmen-Szenario und einem Mit-Maßnahmen-Szenario die Betrachtung von Energieerzeugung und -verbrauch sowie der resultierenden Treibhausgasemissionen im Rahmen von Projektionen in 5-Jahres-Schritten bis 2035.

6.2.1 Annahmen des ProJEktionsberichts

Im Mit-Maßnahmen-Szenario werden die Wirkungen der klima- und energiepolitischen Maßnahmen berücksichtigt, die bis zum 31. August 2014 in den verschiedenen Sektoren neu eingeführt oder maßgeblich geändert wurden: u.a. KfW-Programme, Öko-Design-Richtlinien, Marktanreizprogramme.

Nicht mehr enthalten sind Maßnahmen des im Dezember 2014 beschlossenen Aktionsprogramms Klimaschutz 2020 und des Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz. Entsprechend spiegelt dieses Szenario eine Situation wider, die keine weiteren als die genannten Maßnahmen berücksichtigt. Diese Vorgehensweise wird als passende Abschätzung einer anznehmenden zukünftigen Entwicklung bis 2030 (AZE) angesehen.

Das Szenario AZE beruht entsprechend auf Annahmen und Ergebnissen des ProJEktionsberichts im Mit-Maßnahmen-Szenario. Die Annahmen des ProJEktionsberichts stimmen mit den Annahmen zu den

allgemeinen Rahmenbedingungen im Szenario AZE (Kapitel 5) überein (zum Beispiel im Bereich der Wohnbevölkerung und den Annahmen zu den Privathaushalten) bzw. bildeten sogar die Grundlage für diese (so wurden die Annahmen des Wirtschaftswachstums aus dem Projektionsbericht für das Szenario AZE übernommen).

Die bedeutendsten Annahmen des Szenarios AZE im Bereich Energiebereitstellung umfassen:

- ▶ eine Verringerung des absoluten Endenergieverbrauchs bis 2030 um 20 %,
- ▶ eine deutliche Steigerung der CO₂-Zertifikatspreise (auf etwa das Fünffache),
- ▶ eine signifikante Verringerung der (energetischen) Nutzung von Mineralölprodukten, einhergehend mit einer deutlichen Preissteigerung für Rohöl um etwa 50 % (Entkoppelung von Öl- und Gaspreisen), und einer Zunahme der Elektromobilität,
- ▶ den Komplettausstieg aus der Kernenergie, und einen Rückgang der Kohleverstromung,
- ▶ einen bedeutenden Anstieg der Nutzung erneuerbarer Energiequellen – insbesondere durch eine Verdreifachung der erneuerbaren Stromerzeugung, sowie erneuerbare Wärmeerzeugung.

Werte für das Szenario AZE werden im Folgenden mit statistischen Daten für Deutschland in 2010 verglichen.

Während der Projektionsbericht [BMUB, 2015] Werte für 2008 und 2012 darstellt, liegen hier keine Angaben für das Jahr 2010 vor, die einen direkten Vergleich mit statistischen Daten ermöglichen würden. Allgemein lassen sich geringe Unterschiede zwischen den Angaben des Projektionsberichts für die betrachteten Jahre und den entsprechenden statistischen Daten feststellen. Zum Beispiel nennt der Projektionsbericht für die Endenergieverbräuche in 2012 einen Wert von 8.638 PJ, während Daten aus Bundesstatistiken für denselben Zeitraum um 280 PJ höher liegen.

6.2.2 Annahmen für den Energieverbrauch

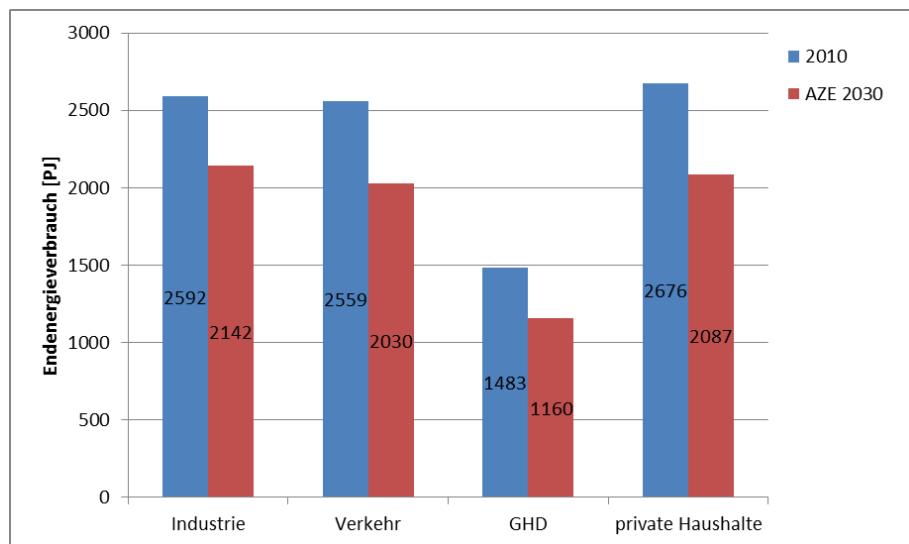
Der Primärenergieverbrauch in Deutschland liegt in 2010 bei etwa 14.000 PJ pro Jahr. Etwa 30 % des Primärenergieverbrauchs beruhen auf Verbrauch und Verlusten im Energiesektor, während auf Industrie, Verkehr und Haushalte je knapp 20 % und auf GHD etwa 10 % entfallen. Der nichtenergetische Verbrauch liegt bei etwa 5 % des gesamten Primärenergieverbrauchs. In AZE verringert sich der Gesamtverbrauch von Primärenergie um ein Viertel auf etwa 11.000 PJ/a.

Die Primärenergie wird in 2010 zu 10 % aus erneuerbaren Quellen erzeugt; in AZE erhöht sich dieser Anteil auf 26 %. Wasser, Wind und Photovoltaik machen in 2010 18 % der erneuerbar erzeugten Energie aus, während die verbleibenden 82 % über (u.a.) Brennholz, Brenntorf, Klärgas und Abfall abgedeckt werden. Im Szenario AZE steigt der Anteil von Wasser, Wind und Photovoltaik auf 40 %. Absolut verdoppelt sich die erneuerbar erzeugte Primärenergie von 1.400 PJ/a in 2010 auf 2.900 PJ/a in AZE.

Die Senkung des Endenergieverbrauchs der Sektoren zwischen 2010 und dem Szenario AZE liegt bei insgesamt 20 % oder 1.900 PJ/a (von 9.300 PJ/a auf 7.400 PJ/a). Die Einsparungen der einzelnen Sektoren ähneln sich mit 17 % (Industrie), 21 % (Verkehr) und 22 % (jeweils für GHD und private Haushalte) (siehe Abbildung 26). Die Abnahme bei den privaten Haushalten ist in erster Linie auf Wärmeschutzmaßnahmen im Gebäudebereich und effizientere Anlagentechnik zurückzuführen.

Die Energieträger, die eine Senkung des Endenergieverbrauchs maßgeblich ausmachen, sind in erster Linie energetisch genutzte Mineralölprodukte, deren Anteil von 37 % auf 27 % sinkt. Dies entspricht einer Abnahme um 1.400 PJ/a zwischen 2010 und AZE 2030. Diese generelle Abnahme setzt sich aus einer deutlichen Abnahme bei Heizöl, Ottokraftstoff und Diesel bei gleichzeitiger Steigerung der Nutzung von Flugkraftstoffen zusammen. Zwei weitere bedeutende Endenergiträger (fossile Gase und Strom) liefern in 2010 Anteile von 25 % (Gas) und 20 % (Strom) am Endenergieverbrauch. Diese Energieträger verzeichnen im Gegensatz zu den Mineralölprodukten wesentlich geringere absolute Reduktionen: 280 PJ/a (Gase), und 140 PJ/a (Strom).

Abbildung 26: Endenergieverbrauch der Sektoren in PJ für Deutschland in 2010 und für das Szenario 2030 AZE



Anmerkung: Verkehr mit Bauwirtschaft und ohne internat. Luft- und Seeverkehr.

Quelle: [AGEB, 2015a; BMUB, 2015; BMWi, 2015].

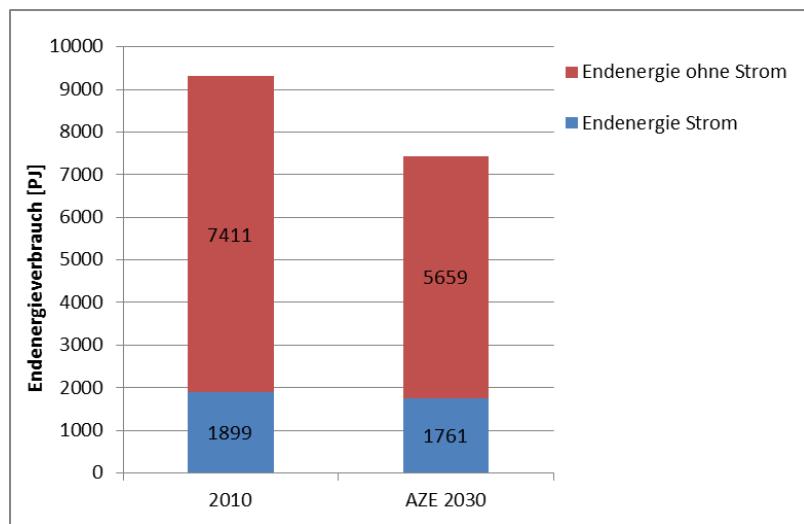
6.2.3 Annahmen für Stromerzeugung und -verbrauch

Im Rahmen von [BMUB, 2015] wird die zu erwartende Entwicklung des Kraftwerksparks mit Hilfe der Modelle ELIAS (Electricity Investment Analysis) sowie mit dem Kraftwerkseinsatzmodell PowerFlex vorgenommen. Die Stilllegungsdynamik der konventionellen Kraftwerke wird unter der Annahme modelliert, dass diejenigen Kraftwerke, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Planungs- oder Baustadium befinden, auch tatsächlich gebaut werden. Die Entwicklung der Leistung erneuerbarer Energien wird auf Basis der Vorgaben des EEG 2014 und weiterer Abschätzungen abgeleitet. Bei der Betrachtung des Außenhandels mit Strom wird auf Modellierungsarbeiten im Rahmen des Projektes Klimaschutzszenarien 2050 aufgesetzt, in denen der Stromaustausch mit einem europäischen Strommarktmödell bis 2050 modelliert wurde.

Zwischen den Jahren 2010 und AZE sinkt der Endenergieverbrauch in Deutschland um insgesamt 20 %. Währenddessen bleibt der Bruttostromverbrauch der Jahre 2010 und AZE vergleichbar und nimmt lediglich um 7 % von 1.900 PJ auf 1.760 PJ ab. Der relative Anteil des Stromverbrauchs am Endenergieverbrauch steigt zwischen 2010 und AZE von 20 % auf 24 %, wie in Abbildung 27 dargestellt.

Eine Erhöhung der Stromnutzung für Elektromobilität überlagert hierbei Stromeinsparungen in anderen Bereichen; insbesondere weisen die zunehmend genutzten Windkraft- und PV-Anlagen bei der Eigenstromnutzung einen deutlich niedrigeren Bedarf als thermische (fossile und nukleare) Kraftwerke auf. Diese Entwicklungen unterstreichen die zunehmende Bedeutung der Umstände von Stromerzeugung und -nutzung.

Abbildung 27: Energieverbrauch nach Anwendungsbereichen: Bruttostromverbrauchs in PJ, Anteil am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 2010 und AZE



Quelle: [AGEB, 2015a; BMUB, 2015; BMWi, 2015].

Die absolute Stromerzeugung aus nicht-erneuerbaren Energieträgern halbiert sich zwischen 2010 und AZE nahezu. Während der Beitrag nicht-erneuerbarer Quellen an der gesamten Stromerzeugung entsprechend von 79 % (2010) auf 39 % (AZE) sinkt, verringern sich die Anteile der entsprechenden Energieträger wie folgt:

- ▶ Der Anteil Kernenergie sinkt nach dem Komplettausstieg aus der Kernenergie von 22 % in 2010 auf 0 % in AZE.
- ▶ Die Anteile der Stromerzeugung aus Kohle verringern sich für Braunkohle geringfügig von 23 % in 2010 auf 21 % und für Steinkohle von 18 % in 2010 auf 11 % in AZE.
- ▶ Der Anteil Erdgas an der Stromerzeugung sinkt von 15 % in 2010 auf 7 % in AZE. Unter der Annahme steigender Strompreise ab 2025 befinden sich im Szenario AZE kaum noch Gaskraftwerke in Kaltreserve.
- ▶ Der ohnehin geringe Anteil der Stromerzeugung aus Mineralöl sinkt weiter von 1 % in 2010 auf unter 0.2 % in AZE.

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern verdreifacht sich zwischen 2010 und AZE, unter anderem durch die Förderung nach EEG 2014 und das KfW-Programm Offshore Windenergie.

Während der Beitrag erneuerbarer Quellen an der gesamten Stromerzeugung von 21 % (2010) auf 61 % (AZE) steigt, verhalten sich die Anteile der Energiequellen wie folgt:

- ▶ Die Nutzung von Wasser hat bereits ihr Potenzial ausgeschöpft. Ihr Anteil an der Stromerzeugung liegt gleichbleibend bei 4 %.
- ▶ Der Anteil der onshore Windenergie steigt von 6 % in 2010 auf 28 % in AZE. Offshore Windenergie hat in 2010 noch keine Bedeutung und steigt auf 10 % in AZE. Insgesamt nimmt die Bedeutung der Windkraft somit von 6 % in 2010 (nur onshore) auf 38 % in AZE (davon etwa ein Viertel offshore) zu.
- ▶ Die Stromerzeugung von Photovoltaik liefert 2 % der Nettostromerzeugung in 2010 und liegt in AZE nahe der angenommenen Sättigung bei 10 %.
- ▶ Die Bedeutung der Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung liegt in 2010 bei 5 % und erhöht sich bis zum Jahr AZE auf 6 %.
- ▶ Geothermie spielt sowohl in 2010 als auch in naher Zukunft eine untergeordnete Rolle.

Für den Import-Export-Saldo von Strom wird eine Zunahme der Netto-Exporte von 3 % der erzeugten Strommenge in 2010 auf 7 % in AZE angenommen. Dies entspricht exportierten Strommengen von 18 TWh (2010) und 42 TWh (AZE).

Die Nettostromerzeugung im Szenario 2030 AZE wird entsprechend der Werte in Tabelle 20 angenommen.

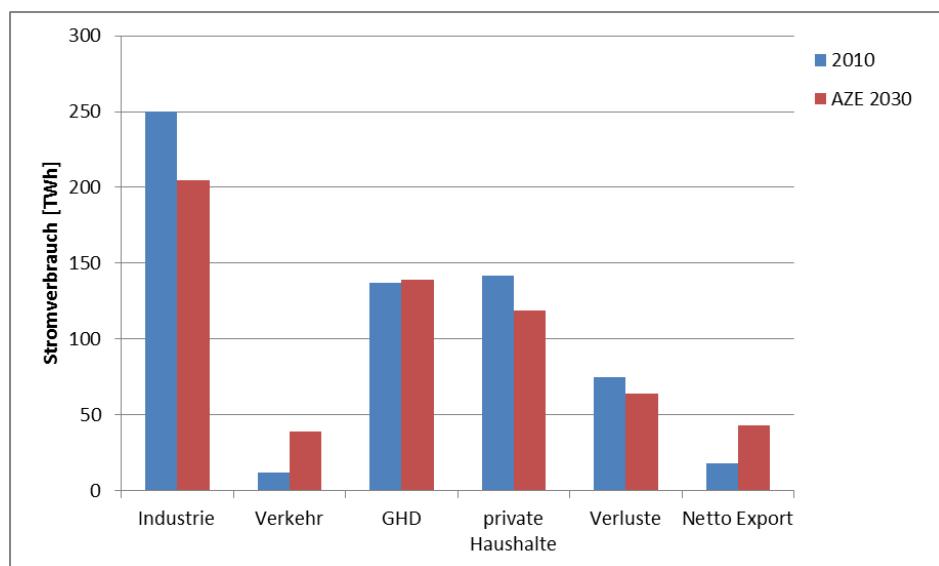
Tabelle 20: Nettostromerzeugung in TWh nach Energieträgern in 2010 und im Szenario AZE

Energieträger		2010	AZE 2030	Änderung
NICHT-ERNEUERBAR				
Kernenergie	TWh	133	0	-100 %
Braunkohle	TWh	134	119	-11 %
Steinkohle	TWh	108	61	-43 %
Erdgas	TWh	88	41	-53 %
Öl	TWh	6,6	1,0	-85 %
Summe nicht-erneuerbar	TWh	470	222	-47 %
ERNEUERBAR				
Wasser	TWh	21	23	+7 %
Wind	TWh	38	216	+472 %
- Wind onshore	TWh	38	160	+323 %
- Wind offshore	TWh	0	56	-
PV	TWh	12	56	+377 %
Biomasse und Biogas	TWh	30	34	+15 %
Summe erneuerbar	TWh	101	329	+327 %
GESAMTERZEUGUNG	TWh	596	575	-4 %

Quelle: [BMUB, 2015; BMWi, 2015].

Die Stromnutzung der Sektoren – wie in Abbildung 28 dargestellt – erhöht sich in AZE im Bereich Verkehr durch den Ausbau der Elektromobilität um 70 %. Die für 2010 gezeigten 12 TWh Stromverbrauch im Verkehr beziehen sich lediglich auf den Schienenverkehr. In AZE bezieht sich dagegen die Hälfte des Stromverbrauches im Verkehrsbereich auf den Straßenverkehr. Währenddessen verzeichnen Industrie und private Haushalte eine Verringerung der Stromnutzung von etwa je 20 %. Die Stromnutzung im Bereich GHD in 2010 und AZE ist in etwa vergleichbar. Eigenverbräuche der Kraftwerke und des Umwandlungssektors, Speicher- und Leitungsverluste verringern sich zwischen 2010 und AZE um 17 %. Diese Verringerung kann vor allem den Annahmen sinkender Eigenverbräuchen der erneuerbaren gegenüber fossilen Kraftwerke zugeschrieben werden, sowie einer Verringerung von Leitungsverlusten. Eine Exportsteigerung für Strom wird entsprechend der Entwicklung bis 2010 fortgeschrieben; es wird signifikant mehr Strom erzeugt als verbraucht, was zu entsprechenden Exporten in Nachbarländer führt.

Abbildung 28: Stromnutzung der Sektoren in Deutschland in TWh für die Jahre 2010 und AZE, einschließlich netto exportierter Strommenge (abzüglich Importe)



Anmerkung: GHD beinhaltet auch öffentliche Einrichtungen und Landwirtschaft. Verluste beinhaltet auch Eigenverbrauch Energieerzeuger und Pumpstromverbrauch (Speicherung).

Quelle: [BMWi, 2015] (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) und [BMUB, 2015].

6.2.4 Annahmen zum Raumwärmebedarf

Der Energiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser werden in [BMUB, 2015] gemeinsam dargestellt. Werte für das Mit-Maßnahmen-Szenario (AZE) beruhen Annahmen zur Energiepreis- und Wohnflächenentwicklung. Die Ergebnisse beruhen auf Modellierungen mit dem Simulationsmodell Invert/ EE-Lab. Die Auswirkungen der verschiedenen Förderinstrumente werden in diesem Modell abgebildet. Das Modell basiert auf Annahmen zum Gebäudebestand und der Technologieausstattung zur Wärmebereitstellung, sowie Daten zu Energiepreisentwicklung und Klima.

Die Prognose für das Szenario AZE ist in Abbildung 29 dargestellt. Die Werte für 2010 stammen aus statistischen Daten der AGEB. Die dargestellten Energieverbräuche in 2010 enthalten Anteile der Warmwassererzeugung von 9 % im Sektor GHD und 14 % für private Haushalte. Für AZE sind die Größe des Warmwasseranteils und die Zusammensetzung der genutzten Energieträger nicht bekannt. Zwischen 2010 und AZE wird eine Verringerung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser um 243 PJ oder 31 % für Nichtwohngebäude im Bereich GHD und 540 PJ oder 25 % für private Wohngebäude gefunden. Insgesamt verringert sich der Energiebedarf für diese Anwendungen um 26 %. Der Anteil von Raumwärme und Warmwasser am gesamten Endenergieverbrauch entspricht 33 % in 2010 und bleibt nahezu unverändert mit 31 % in AZE.

Abbildung 29: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in PJ: Raumwärme und Warmwasser für private Haushalte (Wohngebäude) und GHD (Nichtwohngebäude) für 2010 und AZE



Quelle: [BMWi, 2015] (AGEB) und [BMUB, 2015].

6.2.5 Überleitung der Daten in URMOD

Im Rahmen von URMOD werden die Entwicklungstendenzen zum Bereich Energie durch die beiden Einflussfaktoren „Stromerzeugung“ und „Sonstige Energie“ abgebildet.

Stromerzeugung: Beim Effekt Stromerzeugung (Tabelle 1, Faktor 11) sind zwei Einzelfaktoren zu betrachten:

- ▶ Entwicklung der Struktur des Energieträgereinsatzes bei der Stromerzeugung
- ▶ Entwicklung der Effizienz des Stromeinsatzes

Strommix: Beim Faktor Energieträgermix bei der Stromerzeugung wird die Entwicklung der relativen Anteile der verschiedenen Energieträger bei der Stromerzeugung, wie fossile Energieträger, Nuklear-energie, erneuerbare Energieträger (z.B. Wind, Wasser, Photovoltaik, energetisch verwertete Abfälle, oder aus Biomasse gewonnene Energieträger) betrachtet. Die Ursprungswerte müssen zunächst um den Skaleneffekt bereinigt werden. Die so abgeleitete Veränderung der Anteile der einzelnen Energieträger für die Stromerzeugung wird auf die entsprechenden Parameter der A-Matrix übertragen.

Effizienz des Stromeinsatzes: Verbesserte Effizienz des Stromeinsatzes kann sich sowohl beim Einsatz von Strom bei der Produktion der einzelnen Branchen (Vorleistung) als auch dem Einsatz beim Konsum der privaten Haushalte (Endnachfrage) niederschlagen.

Bezüglich der Stromnachfrage der privaten Haushalte wird die allgemeine Verminderung des Stromverbrauchs (ohne Einsparungen durch Wärmedämmung) auf die entsprechenden Zellen der Endnachfragematrix (Y-Matrix) übertragen. Die Stromeinsparungen auf Grund von Wärmedämmung werden beim Faktor Bauleistungen gesondert berücksichtigt.

Die Effizienzsteigerung beim Vorleistungseinsatz von Strom wird aus der generellen Entwicklung des Stromverbrauchs, der um den Skaleneffekt bereinigt wurde, abgeleitet. Die Veränderung wird auf die A-Matrix (Zeile für das Produkt Strom) als Parameteränderung übertragen.

Sonstige Energie: Der Effekt Sonstige Energie (Tabelle 1, Faktor 12) fasst folgende Einzelfaktoren (jeweils ohne Stromeinsatz) zusammen:

- ▶ Energetische Verwertung von Abfällen
- ▶ Energetische Verwertung von primärer Biomasse
- ▶ Sonstige erneuerbare Energieträger

Die Veränderung der entsprechenden Inputkoeffizienten (A-Matrix) und der Endnachfrage (Y-Matrix) wurde mit Hilfe eines externen Modells aus den Ursprungszahlen abgeleitet.

6.3 Technologischer Wandel 2030

Der Komplex der Energienutzung lässt sich in die Verwendungsbereiche Strom, Wärme und Transport untergliedern. Eine andere Unterteilung orientiert sich an den Verwendern und unterscheidet die Bereiche private Haushalte, Industrie, Verkehr und GHD, wobei mit Ausnahme des GHD-Sektors alle Bereiche vergleichbare Endenergieverbräuche aufweisen. Der GHD-Sektor benötigt in etwa die Hälfte der jeweiligen übrigen Bereiche, weshalb er in TW30 nicht weiter betrachtet wird. Des Weiteren wird der Verkehr hier nicht weiter untersucht, da die entsprechenden Effekte bereits in den Kapiteln 8.3.1 und 8.3.3 berücksichtigt werden. Bei privaten Haushalten wird Endenergie hauptsächlich für die Anwendung Raumwärme verbraucht. Auch diese ist bereits in Kapitel 7.2 (im AZE-Szenario) berücksichtigt.

Im Bereich Industrie besitzen die Anwendungen mechanische Energie und Prozesswärme den größten Anteil am Endenergieverbrauch, weshalb für beide Anwendungen technische Maßnahmen und Auswirkungen auf den Materialbedarf detailliert analysiert werden. Darüber hinaus werden Rohstoffeinsparungen durch eine veränderte Stromerzeugung analysiert. Strom wird in allen Bereichen benötigt, sodass die gesamtwirtschaftlichen Implikationen erheblich sind. Tabelle 28 zeigt eine Übersicht der (grün bezeichneten) Bereiche, die voraussichtlich besonders signifikante Einsparpotenziale aufweisen und daher einer detaillierteren Analyse unterzogen werden sollen.

Tabelle 21: Energiebereiche mit hohem Rohstoffeinsparpotenzial im Szenario TW30 in Deutschland

	Primärenergiegewinnung	Umwandlung	Nutzung in Industrie	Nutzung in GHD-Sektor
Substi-tu-tion	Erhöhter Anteil an erneuerbaren Energieträgern			
	Stromspeicher			
Effizienz-steigerung		Übertragungsnetz (Gleichstrom)		
		Effizientere Kraftwerksparks: - Erneuerbar - konventionell	Querschnittstechnologie: Elektromotor (mech. Energie)	Querschnittstechnologie: LED bzw. OLED (Beleuchtung)
			Querschnittstechnologie: Prozesswärme	Querschnittstechnologie: Prozesswärme

Anmerkung: Im Detail untersuchte Bereiche sind grün markiert.

Quelle: eigene Darstellung.

6.3.1 Höherer Anteil erneuerbarer Energien

Um den Rohstoffbedarf zur Stromerzeugung in Deutschland abzuschätzen, müssen Aufwendungen für den Prozess, sprich der Energieträger selber, sowie Aufwendungen für Produktionsmittel (d.h. die Anlagen) betrachtet werden. Unter den letztgenannten sind Materialien zum Bau von Kraftwerke sowie zum Betrieb derselben zu verstehen, die sich aus typischen Baumaterialien wie beispielsweise Beton, Stahl und Kies zusammensetzen.

Nach Berechnungen auf Datenbasis von Ecoinvent 3 [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2014] für die jeweiligen Energieträgertechnologie und des Strommixes [BMWi, 2014] ergibt sich für die jährliche Bruttostromerzeugung in Deutschland ein Bedarf an ca. 1,39 Mio. Tonnen Beton und 0,44 Mio. Tonnen Stahl im Jahr 2010. Insgesamt werden somit schätzungsweise 2,33 Mio. Tonnen Produktionsmittel verwendet. Hinzu kommen noch die für die Stromproduktion erforderlichen Prozessmittel (d.h. die Energieträger), die mit 248,81 Mio. Tonnen einen erheblich größeren Anteil (99,07 %) darstellen. Definitionsgemäß besteht die genannte Prozessmittelmenge ausschließlich aus konventionellen Energieträgern. Werden die Prozess- und Produktionsmittel mit den jeweiligen spezifischen KRA-Werten multipliziert ergibt sich inklusive der Vorketten ein Materialbedarf von 287,76 Mio. Tonnen. Der Anteil der Prozessmittel vergrößert sich damit geringfügig auf 97,21 %. Insgesamt stammen somit rund 15 % des Rohstoffverbrauchs aus Vorprozessen.

Tabelle 22: Berechnung der KRA-Werte für die Bruttostromerzeugung in Deutschland in 2010

Material	Bedarf (Mt)	Spez. KRA	KRA (Mt)	Anteil (%)
Beton	1,39	1,03	1,43	0,50
Stahl	0,44	10,03	4,40	1,53
Sonst. Produktionsmittel	0,50	2,20	1,10	0,38
Prozessmittel (Energierohstoffe)	248,81	1,13	280,84	97,78
Gesamt	251,14	1,15	287,76	100,00

Quellen: [BMWi, 2014], [Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2014], eigene Berechnungen ISI.

Der Hauptunterschied zwischen den konventionellen und erneuerbaren Energieträgern besteht darin, dass die Produktionsmittel bei den konventionellen mit rund ein Prozent kaum zum Rohstoffaufwand beitragen. Zudem ist durch den hohen Bedarf an Prozessmitteln der spezifische KRA für die Erzeugung von jeweils einem Terrawatt Elektrizität bei konventionellen Energieträgern im Mittel achtmal größer als bei erneuerbaren. In Tabelle 12 sind die spezifischen KRA-Werte (in t/TJ) aufgeführt. Den höchsten spez. KRA besitzt Abfall mit 653,60 t/TJ, gefolgt von Braunkohle mit 352,15 t/TJ. Den kleinsten Wert besitzen Geothermie (0,47 t/TJ) und Gichtgas (0,23 t/TJ). Durch Vernachlässigen des Rohstoffaufwandes für Prozessmittel bei Geothermie und Gichtgas sind diese Werte als sehr gering einzuschätzen. Allerdings besitzen diese nur einen geringen Anteil am deutschen Strommix, sodass die getroffene Annahme sich nur sehr geringfügig auf das Gesamtergebnis zur deutschen Bruttostromerzeugung auswirkt.

Durch einen höheren Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix können also erhebliche Material einsparungen bewirkt werden. Im AZE-Szenario wurde für 2030 bereits der recht hohe Anteil von 61 % erneuerbarer Energien aus dem Projektionsbericht zugrunde gelegt. Im TW30 Szenario wurde daher, um das Anspruchsniveau noch zu erhöhen, der Strommix aus dem Projektionsbericht für das Jahr 2035 angenommen, der sich durch einen Anteil von erneuerbaren Energien von 61 % zu Lasten eines geringeren Braunkohleanteils auszeichnet (vgl. Tabelle 23). Außerdem wird hinsichtlich des Kraftwerksparks von einer durchschnittlichen Steigerung des Wirkungsgrades um 6 %-Punkte (vgl. Ta-

belle 24) gegenüber dem Projektionsbericht ausgegangen [BMUB, 2015; UBA, 2009a]. Insgesamt resultiert aus dem geringeren Bedarf an fossilen Energieträgern in TW30 gegenüber dem AZE eine Reduktion des KRA um 42,4 Mio. Tonnen RME.

Tabelle 23: Verteilung der Nettostromerzeugung auf die verschiedenen Energieträger

Energieträger	2010 ^a	AZE ^b	TW30 ^b	TW30+ ^c
Kernenergie	22 %	0 %	0 %	0 %
Braunkohle	23 %	21 %	13 %	0 %
Steinkohle	18 %	11 %	13 %	0 %
Erdgas	15 %	7 %	10 %	0 %
Übrige	4 %	3 %	3 %	0 %
Öl	1 %	0 %	0 %	0 %
Gichtgas	k.A.	1 %	1 %	0 %
Kokereigas	k.A.	0 %	0 %	0 %
Müll	1 %	1 %	1 %	0 %
Sonstige	4 %	0 %	0 %	0 %
Erneuerbare	17 %	58 %	61 %	100 %
Wasser	4 %	4 %	4 %	4 %
Wind	6 %	38 %	41 %	65 %
Wind onshore	6 %	28 %	30 %	32 %
Wind offshore	0 %	10 %	11 %	33 %
PV	2 %	10 %	10 %	19 %
Biogas	k.A.	3 %	1 %	1 %
Biomasse	5 %	3 %	3 %	2 %
Geothermie	0 %	1 %	1 %	9 %
Pumpspeicher	0 %	1 %	1 %	0 %

Anmerkung: ^d Müll ist in [BDEW, 2015] den Erneuerbaren zugeordnet

Quelle: ^a [BDEW, 2015]; ^b [BMUB, 2015]; ^c [Klaus et al., 2010].

Tabelle 24: Wirkungsgrade der Kraftwerkstypen

Technologie	2010	TW30
Kernenergie	33 %	33 %
Braunkohle	41 %	50 %
Steinkohle	43 %	50 %
Erdgas	40 - 58 %	60 %
Öl	34 - 58 %	60 %
Durchschnitt	42 %	48 %

Quelle: [BMUB, 2015; UBA, 2009a].

In Tabelle 25 ist das Einsparpotential für jeden der einzelnen Energieträger im Detail spezifiziert. Wie auch beim AZE Szenario ist die relative spezifische Einsparung für Kernenergie bzgl. 2010 aufgrund des Kernenergieausstiegs am größten. Erdöl hat die zweitgrößte spezifische Reduktion aufzuweisen. Aufgrund des geringen Anteils im Strommix sind die absoluten Materialeinsparungen aber gering. Ebenso sind auch die absoluten Materialeinsparungen durch den Wegfall der Kernenergie gering, da Uran gegenüber den anderen fossilen Energieträgern nur einen geringen KRA hat. Die größten Materialeinsparungen resultieren durch einen absolut geringeren Bedarf an Braunkohle und Steinkohle.

Tabelle 25: Spezifische Reduktion der Nachfrage nach fossilen Energieträgern von TW30 gegenüber 2010 mit gleicher Kraftwerkseffizienz und mit höherer Effizienz

	Gleiche Effizienz	Höhere Effizienz
Kernenergie	100 %	100 %
Braunkohle	17 %	32 %
Steinkohle	32 %	41 %
Erdgas	35 %	47 %
Erdöl	87 %	87 %

Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Berechnungen.

Materialmehraufwendungen für effizientere Kraftwerke wurden wegen Geringfügigkeit vernachlässigt. Aufgrund des geringen zu erwartenden Effektes wurde eine detaillierte Betrachtung des Stromnetzes in dem Szenario ebenso vernachlässigt (Berechnungen nach Steger et al. [2011]).

6.3.2 Effizientere Elektromotoren

Elektromotoren wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um und kommen in der Industrie als Förderantriebe für den Materialfluss, in Produktionsstraßen oder bei Prozessen, die direkt auf ein Werkstück (z.B. formgebend) einwirken, zum Einsatz. Elektromotoren werden in die weltweit gültigen IE-Effizienzklassen eingeteilt, um elektrische Antriebe nach ihrem Stromverbrauch und Wirkungsgrad zu klassifizieren. Über eine elektronische Drehzahlregelung wird außerdem eine höhere Strom einsparung als durch die alleinige Wirkungsgradsteigerung der Motoren erreicht [UBA, 2009b]. Ab 2011 dürfen nach der Ökodesign-Richtlinie nur noch hocheffiziente Elektromotoren (mindestens IE2-Effizienzklasse) in Verkehr gebracht werden [EU, 2009]. Die Wirkungsgradsteigerung wird bei IE3-Elektromotoren durch eine Reduktion des elektrischen Widerstands erzielt, indem Kupfer anstatt Aluminium als Läufermaterial eingesetzt wird. Zudem werden die Leiterquerschnitte vergrößert, der Luftspalt reduziert und verbesserte Lager verwendet. Damit können die Verluste gegenüber IE2-Elektromotoren um 17 % vermindert werden, was in einem Mindestwirkungsgrad zwischen 85 % bis 95 % resultiert. Bei der IE4-Effizienzklasse können die IE3-Verluste noch einmal um 40 % reduziert werden und Wirkungsgrade zwischen 91 % bis 98 % erreicht werden [Wietschel et al., 2010].

Basierend auf Daten von Almeida et al. [2008] ergeben sich aufgrund der zuvor beschriebenen Maßnahmen folgende durchschnittliche Wirkungsgrade der verschiedenen Elektromotorenklassen in der Industrie:

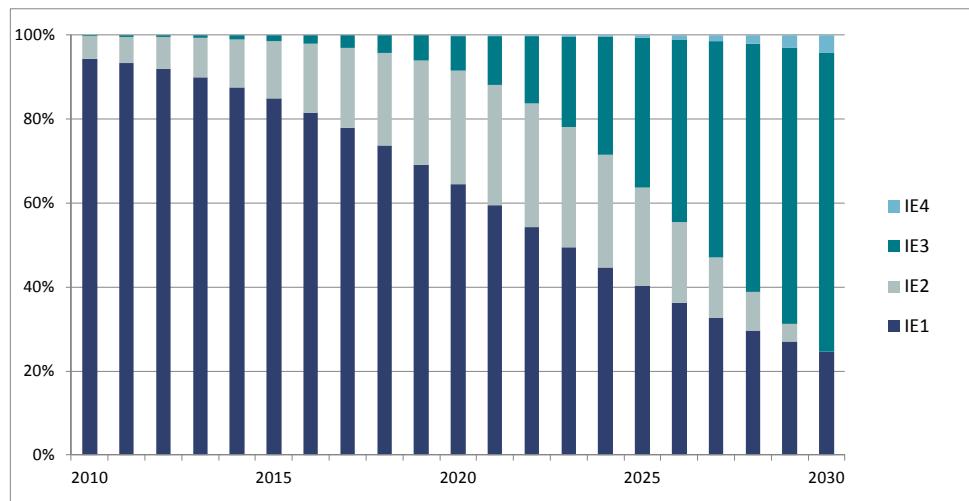
Tabelle 26: Durchschnittliche Wirkungsgrade in den Effizienzklassen von Elektromotoren

Effizienzklasse	Wirkungsgrad
IE1	86 %
IE2	88 %
IE3	89 %
IE4	93 %

Quelle: [Almeida et al., 2008].

Im AZE Szenario werden dem Projektionsbericht zufolge ausschließlich Elektromotoren der Klassen IE1 bis IE3 in der Industrie verwendet. Daneben diffundieren in TW30 Elektromotoren der energieeffizientesten Klasse IE4 in den Markt und machen 4,2 % des Bestandes in der Industrie im Jahr 2030 aus. Gegenüber dem AZE Szenario gelangen dadurch noch einmal weniger Elektromotoren der Klassen IE1 und IE2 zum Einsatz (vgl. Abbildung 30). Dadurch reduziert sich der Stromverbrauch von Elektromotoren durchschnittlich um 3,1 % in TW30. Über den Anteil der Elektromotoren am Stromverbrauch der relevanten Industriebranchen wird die Reduktion des Stromverbrauchs in jeder dieser Branchen berechnet [Fleiter / Eichhammer, 2011]. Es ergeben sich Differenzen zwischen -1,0 % und -2,8 % in TW30, um die beispielsweise die Papierindustrie weniger Strom aufgrund des Einsatzes von effizienteren Elektromotoren beim Energiewirtschaftssektor nachfragt. Gewichtet mit dem jeweiligen Stromverbrauch berechnet sich daraus eine Reduktion des gesamten Stromverbrauchs der deutschen Industrie um -1,27 % in TW30. Daraus berechnen sich KRA-Einsparungen in Höhe von 1,2 Mio. t RME. Mehraufwendungen für andere Materialien zur Erreichung dieser Einsparungen liegen im Bereich von +/- 1 % und werden deshalb vernachlässigt (Berechnungen nach Almeida et al. [2008]).

Abbildung 30: Marktdiffusion von Elektromotoren in den Industriesektor nach Effizienzklassen



Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Berechnung basierend auf IE1-IE4 Anteilen aus BMUB (2015).

6.3.3 Effizientere Dampferzeuger

Insgesamt sind in Deutschland etwa 15.000 Dampferzeuger installiert. Bei Dampferzeugern handelt es sich um ein beheiztes und geschlossenes Drucksystem. Die notwendige thermische Energie wird vor allem durch die Befeuerung mit Erdgas zugeführt. Dampferzeuger werden insbesondere in der Papier- und Chemieindustrie eingesetzt (Einstein et al. 2001), um Wärme für verschiedene Prozesse zur Verfügung zu stellen. Es wird angenommen, dass Dampferzeuger ein Drittel des Energiebedarfs in der In-

dustrie verursachen [Aydemir et al. 2015] Daher können Energieeffizienzmaßnahmen bei Dampferzeugern große energetische wie rohstoffliche Einsparung bewirken. Neben der automatisierten Verbrennungskontrolle sowie dem Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben besteht eine wichtige Effizienzmaßnahme darin, das Speisewasser mittels eines Wärmetauschers vorzuheizen, wobei das Rauchgas abgekühlt wird. Somit erhöht sich der gesamte thermische Wirkungsgrad des Dampferzeugers, da Wärmeverluste reduziert werden [Aydemir et al. 2015]. Dies bewirkt eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und somit der eingesetzten Rohstoffe.

Im Jahr 2010 waren bereits 70 % der Dampferzeuger mit einem verbesserten Wärmetauscher ausgestattet. Wird angenommen, dass bis 2030 alle Dampferzeuger verbessert werden und dies gleichmäßig über die Zeitspanne von 20 Jahren passiert, müssen jährlich 225 neue Dampferzeuger gebaut und installiert werden. Weiterhin werden aufgrund der Lebensdauer der Dampferzeuger von 25 Jahren jährlich 420 Dampferzeuger (4 % des Bestandes) zum Bestandserhalt benötigt. Damit liegt der jährliche Bedarf an Dampferzeugern in Deutschland bei rund 645 Stück. Diese benötigen zwar aufgrund des komplexeren Aufbaus durch den Wärmetauscher 31 % mehr Materialien als herkömmliche Dampferzeuger, sparen jedoch durch die Wirkungsgradsteigerung rund 5 % Gas ein. Durch die über die Lebensdauer hohe Energieaufnahme überwiegt die Gaseinsparung gegenüber dem Materialmehraufwand in der Produktion erheblich.

Im Szenario TW30 steigt der Anteil von (Eco-)Dampferzeugern von 70 % (in 2010 bzw. AZE) auf 100 %. Daraus resultiert eine Einsparung von 1,7 % Energie (Erdgas), was 1,7 Mio. Tonnen entspricht. Die Dampferzeuger selber verursachen im Vergleich dazu einen zusätzlichen Materialaufwand von nur 43.800 Tonnen und sind daher im Vergleich zu der eingesparten Gasmenge vernachlässigbar.

6.3.4 Überleitung der Daten in URMOD

In URMOD wurden die Faktoren Strommix, Elektromotoren und Dampfkessel berücksichtigt.

Strommix: Der Effekt Strommix (Tabelle 2, Faktor 23) bündelt zwei verschiedene Typen von Maßnahmen, die sich auf die Stromherstellung beziehen: a) Substitutionsprozesse zwischen Energieträgern und b) Erhöhung von Wirkungsgraden bei der Stromerzeugung. Die jeweiligen Veränderungen werden auf die Koeffizienten der A-Matrix übertragen.

Elektromotoren: Der Faktor Elektromotoren (Tabelle 2, Faktor 24) bildet den zunehmenden Einsatz von effizienteren Elektromotoren ab, deren Produktion allerdings mit einem höheren Materialbedarf verbunden ist. Die Stromeffizienzsteigerung beim Betrieb der Motoren wird durch Änderung der relevanten Koeffizienten der A-Matrix im Modell abgebildet.

Allerdings reicht die Auflösung der verfügbaren IOT nicht aus, um diesen recht speziellen Effekt unmittelbar abzubilden. Der Stromverbrauch müsste differenziert nach Produktionsbereichen nach Stromeinsatz für den Betrieb von Elektromotoren und übriger Stromeinsatz unterteilt werden und aus dem Bereich Elektrotechnik müsste die Herstellung von Elektromotoren ausgegliedert werden. Zur Ableitung der Parameteränderungen für die existierende IOT wird deshalb ein externes Modell, das die notwendigen Differenzierungen enthält, aufgestellt.

Dampfkessel: Der Faktor Dampfkessel (Tabelle 2, Faktor 25) bildet den zunehmenden Einsatz von effizienteren Dampferzeugern ab. Dieser Effekt wird durch Änderung der relevanten Koeffizienten der A-Matrix im Modell abgebildet. Auch hier reicht die Auflösung der verfügbaren IOT nicht aus. Zur Abbildung des Effektes müsste der Vorleistungsverbrauch von Erdgas differenziert nach Produktionsbereichen nach Dampfkesseln und übriger Verbrauch unterteilt werden. Zur Ableitung der Parameteränderungen für die existierende IOT wird deshalb ein externes Modell, das die notwendigen Differenzierungen enthält, aufgestellt.

6.4 Weitreichende Tendenz TW30+

6.4.1 Höherer Anteil erneuerbarer Energien

Nach Klaus et al. [Klaus et al., 2010] und Henning und Palzer [Henning / Palzer, 2012] ist die 100 prozentige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern theoretisch möglich. Allerdings bedarf es u. a. einem weiteren Netzausbau, um die dezentralen regenerativen Kraftwerke in das Stromnetz integrieren zu können. Außerdem ist ein weiterer Ausbau von Stromspeichersystemen notwendig. Insgesamt weisen die regenerativen Energieträger ein technisch-ökologisches Potential von 705 TWh in Deutschland auf und können somit die Stromerzeugung von 2010 (633,6 TWh) decken. Bei dieser Potentialabschätzung reduzieren gesellschaftliche und technische Restriktionen das theoretische Gesamtpotential. Daher setzt sich das Potential der erneuerbaren Energien, wie in Tabelle 27 aufgelistet, zusammen.

Tabelle 27: Technisch ökologisches Potential der erneuerbaren Energieträger

Energieträger	Technisch ökologisches Potential (TWh)
Photovoltaik	248
Windenergie	360
Wasserkraft	24
Geothermie	50
Abfallbiomasse (nur Biogas)	23

Quelle: [Klaus et al., 2010].

In der Abschätzung TW30+ wird von einer vollständig auf erneuerbaren Energiequellen basierenden Stromproduktion ausgegangen. Die zu erzeugende Strommenge ist dabei gleich der von TW30. Der Strommix setzt sich nach dem Szenario „Regionenverbund“ vom Umweltbundesamt [Klaus et al., 2010] zusammen.

6.4.2 Effizientere Elektromotoren

In TW30+ werden ausschließlich IE4-Motoren verwendet. Dadurch reduziert sich der durchschnittliche Stromverbrauch pro Elektromotor um 8,1 % in TW30+. Über den Anteil der Elektromotoren am Stromverbrauch der relevanten Industriebranchen wird die Reduktion des Stromverbrauchs in jeder dieser Branchen berechnet. Es ergeben sich Spannen von -2,7 % bis -7,4 % in TW30+. Gewichtet mit dem jeweiligen Stromverbrauch berechnet sich daraus eine Reduktion des gesamten Stromverbrauchs um -3,31 % in TW30+. Wie auch schon beim TW30 wurden Mehraufwendungen für andere Materialien zur Erreichung dieser Einsparungen nicht berücksichtigt, da sie im Bereich von +/- 1 % liegen.

6.4.3 Überleitung der Daten in URMOD

Die Abschätzung TW30+ wird für die Faktoren Strommix und Elektromotoren in analoger Weise wie bei TW30 modelliert. Für Dampfkessel wurde das mögliche Potential bereits durch TW30 ausgeschöpft.

7 Szenariengestaltung im Bausektor

7.1 Allgemeine Trends

Der Bausektor ist in zweifacher Hinsicht relevant, wenn der zukünftige Materialinput und -verbrauch einer Volkswirtschaft abgeschätzt wird: Erstens, ist der Bausektor, der sowohl den Hochbau als auch den Tiefbau umfasst, einer der materialintensivsten Wirtschaftssektoren. Zweitens, benötigt der Bau-sektor nicht nur den größten Anteil der nicht-metallischen Mineralien, darunter Kalk, Sand und Kies, sondern auch einen erheblichen Anteil der Metalle und weiterer Materialien aus biotischen und fossilen Rohstoffen. Der Anteil der Bauproduktion am gesamtwirtschaftlichen Rohstoffdurchsatz beläuft sich auf 12 % (siehe Abbildung 6).

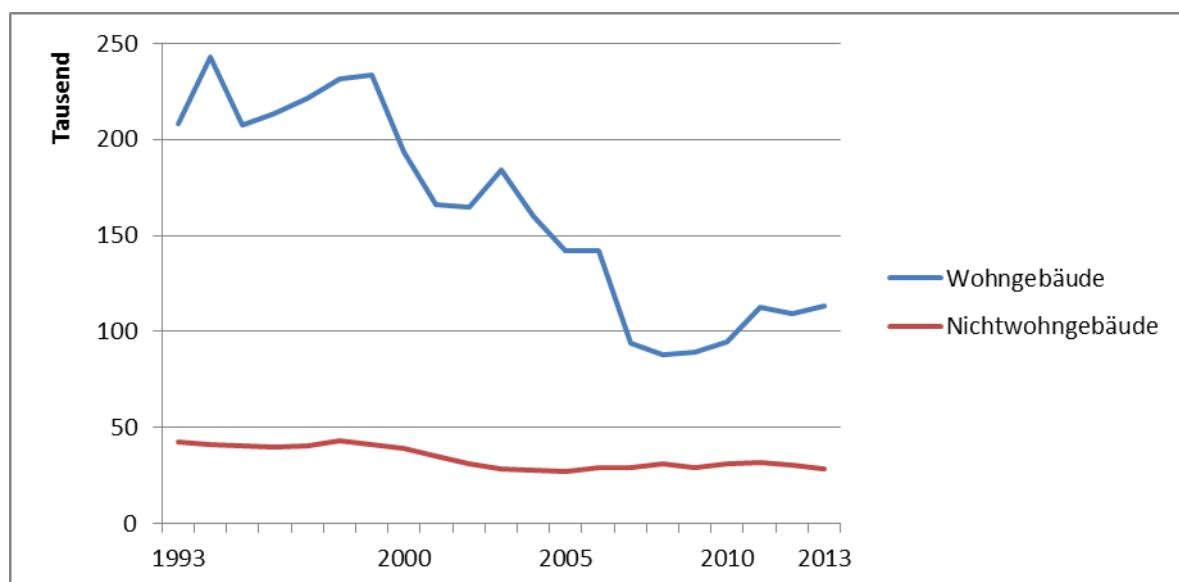
Im Folgenden werden zunächst die wesentlichen Trends in der Vergangenheit im Hoch- und Tiefbau getrennt voneinander aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die Annahmen für AZE, für TW30 und für TW30+ dargestellt.

7.1.1 Hochbau: Trends in der Vergangenheit

Der Hochbausektor wird langfristig vor allem durch die Bevölkerungsentwicklung und durch den Bedarf an Wohnfläche dominiert. Kurzfristig unterliegt der Bausektor konjunkturellen Schwankungen, die aber aufgrund ihrer Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung in langfristigen Prognosen nicht berücksichtigt werden.

In Deutschland wurde die Entwicklung des Bausektors in der Vergangenheit zudem durch die Wiedervereinigung geprägt. So wurden in Ostdeutschland nach dem Zweiten Weltkrieg insbesondere Mehrfamilienhäuser mit zehn und mehr Wohnungen gebaut, während in Westdeutschland überwiegend Ein- und Zweifamilienhäuser errichtet wurden. Nach 1990 führten in Ostdeutschland sinkende Bevölkerungszahlen in Verbindung mit hohen Bauaktivitäten zu hohen Wohnungsleerständen, während in Westdeutschland entsprechend der steigenden Bevölkerungszahlen gebaut wurde [Banse / Effenberger, 2006]. Die umfangreichen Bauaktivitäten im Zuge der Wiedervereinigung gingen seit Mitte der 1990er Jahre kontinuierlich zurück und erreichten zwischen 2008 und 2010 einen Tiefpunkt. Abbildung 31 zeigt dies am Beispiel der Anzahl der Genehmigungen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude. Das Jahr 2010 ist auch im Bausektor geprägt von der globalen Finanzkrise. Nach 2010 wurde der rückläufige Trend der Bauaktivitäten im Bereich der Wohngebäude nicht fortgesetzt, im Bereich der Nichtwohngebäude stagnierten seitdem jedoch die Genehmigungen.

Abbildung 31: Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden, 1993-2013



Quelle: [Destatis, 2014c].

Insgesamt hat sich der Gebäudebestand in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten erhöht. Seit 1994 weist Destatis den Wohngebäudebestand für die gesamte Bundesrepublik aus. Demnach ist der Wohngebäudebestand von rund 15,5 Mio. Wohngebäuden im Jahr 1994 auf 18,2 Mio. Wohngebäude im Jahr 2010 angestiegen [Destatis, 2014d]. Die Anzahl der Wohnungen stieg im gleichen Zeitraum von 35,7 Mio. Wohnungen auf 40,5 Mio. Wohnungen an. Der Bestand der Nichtwohngebäude wurde auf eine Größenordnung von rund 3 Mio. Gebäude [BMVBS, 2013] mit 3,0 Mrd. m² Nutzfläche [Deilmann et al., 2014b] geschätzt (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28: Gebäudebestand im Jahr 2010

	Anzahl	Fläche
Wohngebäude¹	18,235 Mio.	3.557, 920 Mio. m ²
Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden¹	40,479 Mio.	3.680, 626 Mio. m ²
Nichtwohngebäude²	3 Mio.	3.000 Mio. m ²
Davon: beheizt*		2.310 Mio. m ²
Davon: unbeheizt*		690 Mio. m ²

Anmerkungen: *beheizt sind nach BMVBS [2013] alle Nichtwohngebäude außer land- und forstwirtschaftliche Betriebsgebäude, Gebäude der technischen und verkehrlichen Erschließung bzw. Infrastruktur sowie sonstige Nichtwohngebäude.

Quellen: ¹Destatis [2014d]; ²Deilmann et al. [Deilmann et al., 2014a];

Die amtlichen Statistiken erfassen über die Baugenehmigungen und Baufertigstellungen die Neubautätigkeiten. Umbauten, Sanierungen und Abgänge sind jedoch nicht, bzw. nicht vollständig erfasst. Die Datenlage ist für den Wohngebäudebestand vergleichsweise gut, denn in regelmäßigen Abständen werden Gebäude- und Wohnungszählungen durchgeführt, deren Ergebnisse auch in jährliche Fortschreibungen einbezogen werden. Hinsichtlich der Nichtwohngebäude gibt es keine vergleichbaren Erhebungen und Fortschreibungen, so dass auf Expertenschätzungen zurückgegriffen wird. Die Anzahl privater Nichtwohngebäude, zu denen beispielsweise Garagen, Schuppen und Lauben, aber auch Wochenendhäuser zählen, wird amtlich nicht bzw. nur sehr unzureichend erfasst.

7.1.2 Tiefbau: Trends in der Vergangenheit

Deutschland hat als Industrieland eine ausgebauten Infrastruktur, so dass heute im Unterschied zu vielen Entwicklungs- und Schwellenländern der Anteil des Rohstoffbedarfes für den Ausbau und die Unterhaltung der Infrastruktur vergleichsweise höher ist als der Anteil des Rohstoffbedarfes, der für einen Neu- und Zubau benötigt wird. Ein Rückbau ohne Ersatz findet im Allgemeinen eher selten statt.

Der Tiefbau umfasst den Bau von Straßen und Wegen, Bahnverkehrsstrecken, Tunnel und Brücken, die Wasserver- und -entsorgung (Rohrleitungen, Brunnenbau und Kläranlagen) und Kabelnetzleitungen einschließlich dazugehöriger Gebäude (Kraftwerke) sowie den Wasserbau (Wasserstraßen, Häfen, Talsperren, Deiche) und sonstige Tiefbauarbeiten, darunter der Bau von Industrieanlagen wie Raffinerien und die Anlage von Sportplätzen. Die Bereiche werden im Folgenden nacheinander abgehendelt.

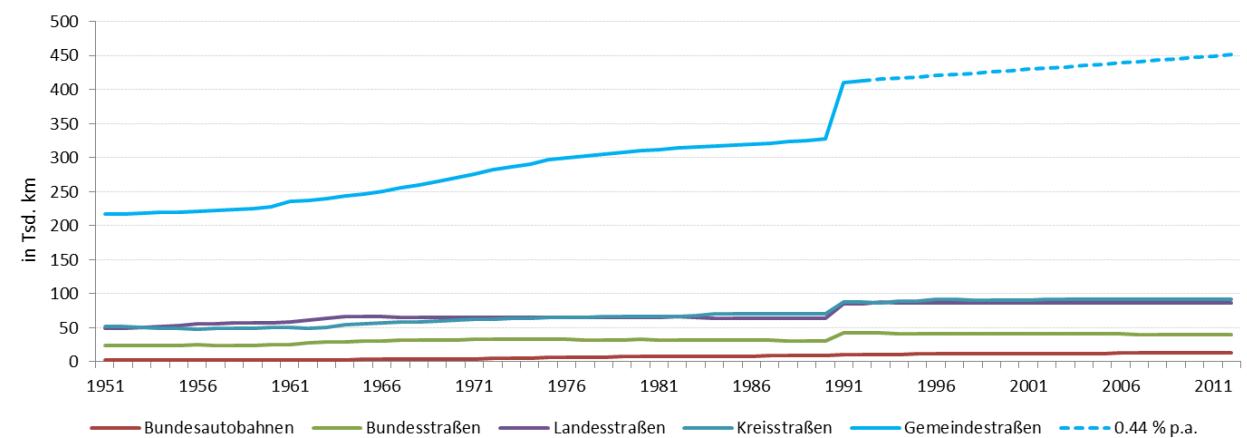
7.1.2.1 Straßen und Wegebau

Die deutsche Straßeninfrastruktur wurde insbesondere in den 60er und 70er Jahren ausgebaut (Abbildung 32). Nach der Wiedervereinigung kam es zu einem nachholenden Ausbau der Fernverkehrswege in den neuen Bundesländern. Das größte Wachstum konnten die Gemeindestraßen mit ca. 1,2 % p.a. (1960-1990) verzeichnen. Diese Straßenkategorie beinhaltet auch das mit Abstand größte Straßennetz. Es wird allerdings nach der Wiedervereinigung nicht mehr von der Statistik ausgewiesen. Im

Projekt „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ wurde eine aktuelle Länge von rund 451 Tsd. km Gemeindestraßen ermittelt, was einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 0,44 % zwischen 1992 und 2012 entspricht [Knappe et al., n.d.].

Es ist zu beachten, dass die in der Abbildung zu sehenden Veränderungen der Straßenlängen nicht nur auf den Zubau bzw. die Erweiterungen zurückzuführen sind, sondern auch auf Umwidmungen bestehender Straßen.

Abbildung 32: Entwicklung der Straßeninfrastruktur nach vers. Straßenkategorien



Datengrundlage: [Knappe et al., n.d.; ViZ, n.d.].

Nach Knappe et al. [n.d.] besteht das gegenwärtige Straßennetz aus insgesamt 995 Tausend Kilometern (vgl. Tabelle 29) und beherbergt einen gesamten Materialbestand von 4,8 Mio. Tonnen. 62 % des Materialagers befindet sich in Gemeindestraßen und untergeordneten Wegen (Rad- und Feldwege, land- und forstwirtschaftliche Wege), und damit in kommunaler Trägerschaft. Dieser hohe Anteil ist bemerkenswert, da die überregionalen Straßen (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) aufgrund der höheren Anforderungen an Festigkeiten und Belastungen einen deutlich höheren Materialbedarf pro Kilometer aufweisen.

Tabelle 29: Länge und Materiallager Straßen

Straßen-ka-tegorie	Länge [km]	Asphalt [Mio. t]	Beton [Mio. t]	Ungebundene Schichten [Mio. t]	Pflaster [Mio. t]	Material, gesamt [Mio. t]	Materialbedarf pro km [Tsd. t]
BAB	18.403	180	122	207	0	509	27,66
BS	41.287	166	7	170	0	343	8,31
LS	87.325	197	9	256	1	463	5,30
KS	91.877	168	15	311	14	508	5,53
GS	405.770	846	75	1571	73	2565	6,32
W	311.492	57	82	269	22	430	1,38
Gesamt	995.684	1.614	310	2.784	110	4818	4,84

Quelle: Knappe et al. [n.d.].

Der jährliche gegenwärtige Materialaufwand für den Zubau wird in der genannten Studie nicht ausgewiesen. Nach Steger et al. [Steger et al., 2011] werden jährlich durchschnittlich etwa 126 km Bundesautobahnen neu- und 70 km ausgebaut sowie 84 km Kreis- und 1.500 km Gemeindestraßen neugebaut. Der jährliche Materialbedarf für den Neubau liegt bei insgesamt 21 Mio. Tonnen (64 % davon im Bereich der Kreis- und Gemeindestraßen), wovon 98 % Schotter, Kies, Sand und Split sind.

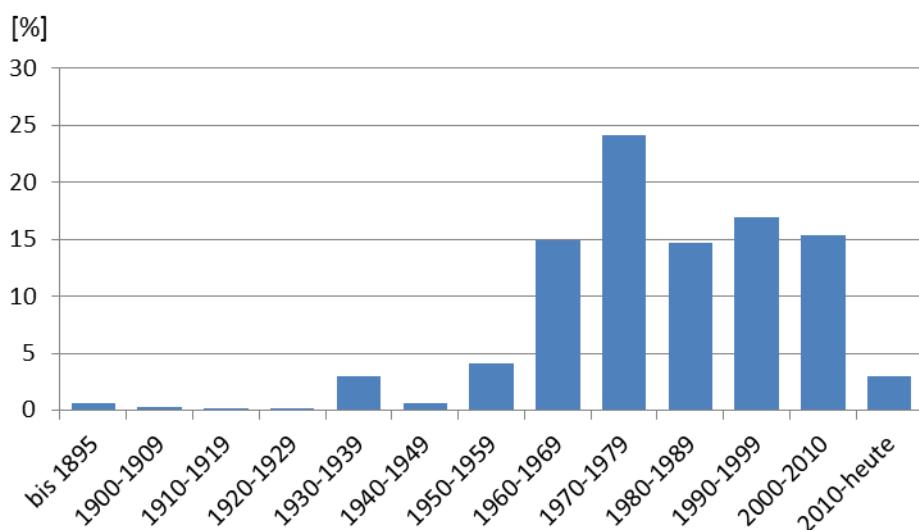
Die jährlichen Unterhaltungsaufwendungen werden, basierend auf demselben Datensatz wie Knappe et al. [n.d.], von [Bergmann et al., 2015] abgeschätzt. Ausgehend von unterschiedlichen Lebensdauern der Straßenkategorien und Straßenschichten schätzen sie die gesamten Aufwendungen auf insgesamt 69,2 Mio. Tonnen, wovon knapp 52 % Beton, Pflaster und vor allem Schotter, Kies und Sand sind und die übrigen 48 % Asphalt.

7.1.2.2 Ingenieursbauwerke

Straßenbegleitende Ingenieursbauwerke wie Brücken und Tunnel werden normalerweise im Zuge des Baus der jeweiligen Straße oder Schiene mitgebaut. Während die Ingenieursbauwerke der überörtlichen Wegenetze in der Vergangenheit vergleichsweise gut erfasst wurden, liegt jedoch für die örtlichen Wegenetze keine ausreichend belastbare Abschätzung für die Vergangenheit vor.

Die meisten Brücken im Bundesfernstraßennetz wurden nach dem zweiten Weltkrieg, insbesondere seit 1960 gebaut. Nach Gunreben [2014a] sind etwa 62 % der Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen mindestens 25 Jahre alt. Gemessen an den Flächen sind rund 73 % in nur einem befriedigenden bzw. ausreichendem Zustand und etwa weitere 15 % in einem nicht ausreichendem bzw. ungenügendem Zustand [Gunreben, 2014b].

Abbildung 33: Verteilung des Errichtungsjahres der Brücken im Bundesfernstraßennetz nach Teilbauwerken in Prozent

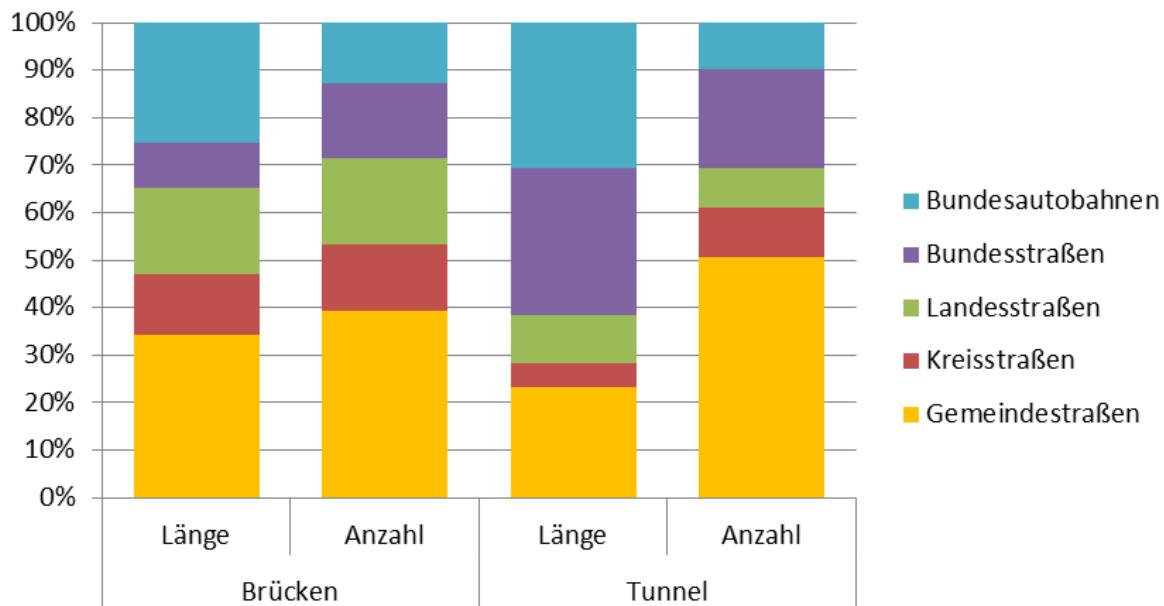


Eigene Darstellung basierend auf [Gunreben, 2014b].

Im Projekt „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ wurden Brücken und Tunnel im gesamten Straßennetz erfasst. Demnach gibt es gegenwärtig rund 130.000 Brücken mit einer Gesamtlänge von 4.373 km in Deutschland [Knappe et al., n.d.]. Die Brücken unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Breite, Länge, Bauart und der vorwiegend genutzten Materialien. Bezogen auf die Länge und die Anzahl dominieren die Brücken im örtlichen Wegenetz. So sind allein 39 % der Brücken (51.000 Stück) im Netz der Gemeindestraßen, die 30 % der Brückenlängen (1.329 km) ausmachen (siehe Abbildung 34).

Knappe et al. [n.d.] kommen zu einem Gesamtmaterialbestand von 107,1 Mio. Tonnen Beton und 24,7 Mio. Tonnen Stahl in den Brücken. Bei ihren Abschätzungen des zukünftigen Materialbedarfes in den Szenarien gehen sie von einer Lebensdauer von 80 Jahren für Brücken aus, weisen jedoch keinen eigenständigen Materialbedarf für Brücken aus. Basierend auf den Abschätzungen von Knappe et al. [n.d.], jedoch abweichend in den Gesamtsummen (86,5 Mio. Tonnen Beton und 20,1 Mio. Tonnen Stahl) errechnen Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] einen jährlichen Erneuerungsbedarf von 1,08 Mio. Tonnen Beton und 0,25 Mio. Tonnen Stahl. Dies ist mehr als der von Steger et al. [Steger et al., 2011] genannte jährliche Erneuerungsbedarf von 780.780 Tonnen Beton und 77.220 Tonnen Stahl und ist damit zu erklären, dass Steger et al. [2011] nur Brücken im Bundesfernstraßennetz einbezogen hat und ferner von einer unterschiedlichen Lebensdauer ausgegangen ist.

Abbildung 34: Länge und Anzahl der Brücken und Tunnel nach Straßenkategorie



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Knappe et al. [n.d.].

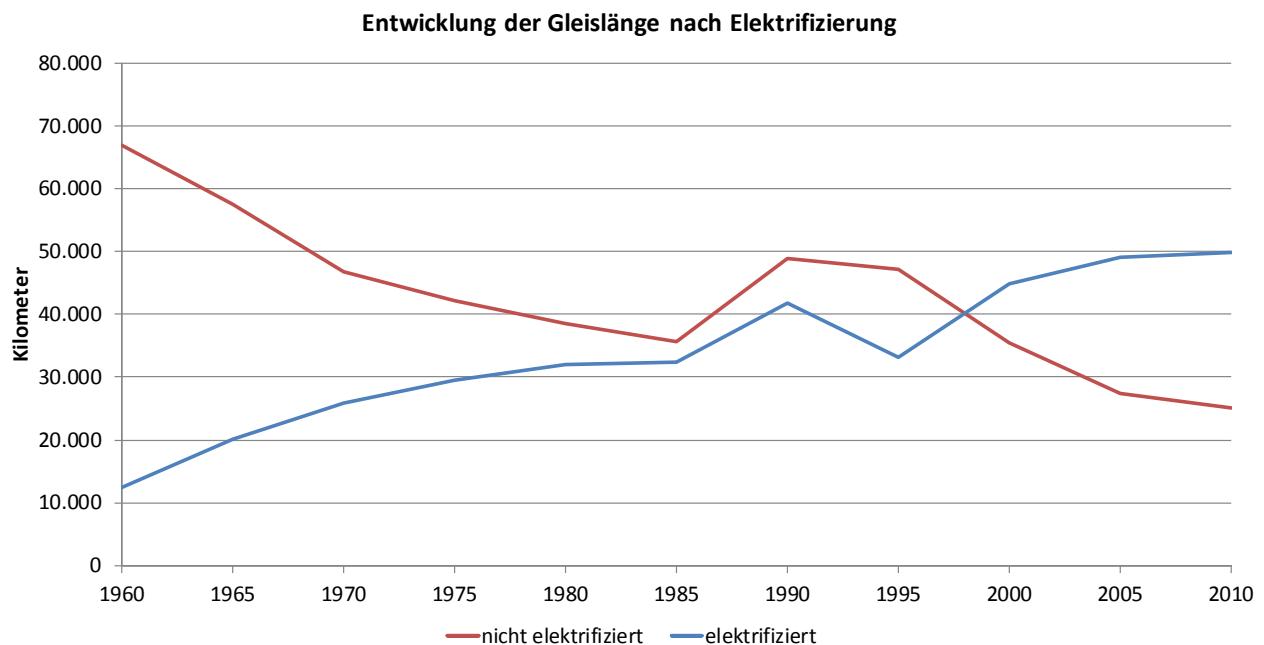
Die insgesamt 3.456 Tunnel im Wegenetz haben eine Gesamtlänge von rund 407 km [Knappe et al., n.d.]. Wie bei den Brücken sind auch die meisten Tunnel (48 %) in den Gemeindestraßen zu finden, sie machen allerdings nur 23 % der Gesamtlänge aus. Das Materiallager ist mit 45,5 Mio. Tonnen Beton und 4,6 Mio. Tonnen Stahl deutlich geringer als das der Brücken; Knappe nennt eine Lebensdauer von rund 100 Jahren. Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] summieren den Materialbestand auf 9,9 Mio. Tonnen Beton und 1,9 Mio. Tonnen Stahl und errechnen basierend auf einer Lebensdauer von 80 Jahren einem jährlichen Erneuerungsbedarf von 123 Tsd. Tonnen Beton und 24 Tonnen Stahl.

7.1.2.3 Gleisinfrastruktur

Bis zum 2. Weltkrieg wurde die Schieneninfrastruktur stark ausgebaut. Nach dem Kriegsende kam es aufgrund von Reparationsleistungen zu einer umfangreichen Demontage von Gleisen sowohl in der BRD als auch der ehemaligen DDR, wobei das ehemalige Staatsgebiet der DDR stärker betroffen war. Vor 1945 war knapp die Hälfte der Reichsbahnstrecke auf diesem Gebiet zweigleisig. Nach Kriegsende war dieser Anteil auf unter 10 % gesunken [Wolf, 2007]. Trotz Ausbau von zweigleisigen Strecken in den 60er und 70er Jahren kam es weiterhin zu einem absoluten Rückgang der Schieneninfrastruktur, was in einem direkten Zusammenhang mit der Förderung des Straßenverkehrs steht.

Nach der Wiedervereinigung wurde die Schiene nicht im gleichen Maße gefördert wie die Straßeninfrastruktur, was zu einem weiteren Rückgang der Gleislänge seit den 1990er (-18 %) führte. Diese Entwicklung ist auch auf den Fokus der Deutschen Bahn zurückzuführen, die sich vermehrt aus der Fläche zurückzieht und die Verbindung zwischen den Hauptzentren fördert. Ein deutlicher Trend ist in der Elektrifizierung der Schieneninfrastruktur zu erkennen, der sich zunehmend aus Gründen der Energieeffizienz fortsetzt.

Abbildung 35: Entwicklung der Gleislänge nach Stand der Elektrifizierung



Quelle: Datengrundlage ViZ (versch. Jahrgänge).

Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] schätzen den Materialbestand in der Schieneninfrastruktur einschließlich der dazugehörigen Ingenieursbauwerke und der Leitungen für die Energieversorgung ab. Den jährlichen Erneuerungsaufwand, für den rund 14 Mio. Tonnen Material (insbesondere Schotter) benötigt werden, leiten sie aus einer angenommenen Lebensdauer von unter anderem 30 Jahren für Gleise ab, wie in Tabelle 30 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 30: Materialbestand und jährlicher Erneuerungsaufwand in der Schieneninfrastruktur

	Materialbestand gesamt [1.000 t]	Jährlicher Erneuerungsauf- wand gesamt [t/a]
Schotter	315.886,950	10.529.565
Beton	171.714,745	2.734.222
Stahl, Baustahl und Be- wehrungsstahl	21.061,710	514.668
Andere Metalle (Bronze, Kupfer, Aluminium)	243,181	5.500
Buchenholz	3.893,925	129.797
Sonstiges (Teeröl, PVC/PE, Porzellan)	538,361	17.031

Quelle: [Bergmann et al., 2015].

7.1.2.4 Wasserstraßen

Wasserstraßen wie Flüsse, Bäche und Seen gehören zu den ältesten Transportwegen. Der erste funktionsfähige Kanal im heutigen Deutschland, der Stecknitz-Kanal, wurde bereits 1398 südlich von Lübeck für den Transport von Salz gebaut. In der Neuzeit wurden weitere Kanäle und Flüsse ge- bzw. ausgebaut, darunter der erste nutzbare Kanal zwischen Rhein und Donau. Mit der Industrialisierung und der aufkommenden Dampfschifffahrt erhielt der Ausbau der Wasserinfrastruktur weiteren Aufschwung. So wurden im 19. und im beginnenden 20. Jahrhundert unter anderem der Dortmund-Ems-Kanal, der Elbe-Lübeck-Kanal und der Mittellandkanal gebaut, womit Deutschland bereits in den 30er Jahren über ein gut ausgebautes Netz von Wasserstraßen, das Rhein und Oder verbindet, ausgestattet war [WSV, 2016].

Die Wasserstraßen und dazugehörige Anlagen umfassen heute neben Flüssen, für die vor allem Ufersicherungen unterhalten werden, auch Kanälen und Hafenanlagen sowie Schleusenanlagen, Brücken, Sperrwerke, Ufersicherungen und Leuchttürme.

Steger et al. [Steger et al., 2011] nehmen an, dass die offenen Lagerflächen von Umschlaganlagen im Durchschnitt jährlich um 5 %, die Spundwandkais um 2 % und die sonstige Ufer, Gleise und Lager um 1 % erweitert sowie eine Schleuse neugebaut bzw. erweitert wird. Insgesamt wird dafür ein Materialaufwand von rund 1.636 Tausend Tonnen pro Jahr benötigt. Der jährliche Erneuerungsbedarf wird von Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] übernommen, da die darin enthaltenen Abschätzungen insgesamt umfassender sind. Demnach wird für die insgesamt 5.484 km Uferbefestigungen, 1.753 km Kanäle, 326 Schleusen und 10 Kanalbrücken bei einer angenommenen Lebensdauer von 60 Jahren ein jährlicher Erneuerungsbedarf von insgesamt rund 3.801 Tausend Tonnen Material benötigt, die zu 90 % aus mineralischen und zu 4 % aus metallischen Rohstoffen bestehen (Der Rest besteht aus Geotextilien, Schlacken und Bitumensand).

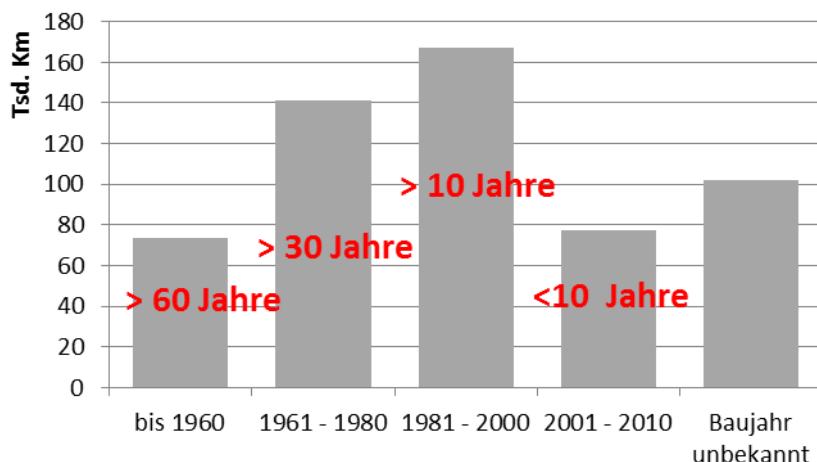
Die Wasserstraßen sind damit deutlich weniger materialintensiv als die Straßen- und die Gleisinfrastruktur. Die Materialaufwendungen für Flughäfen sind noch geringer und werden unter den sonstigen Infrastruktureinrichtungen subsumiert.

7.1.2.5 Trinkwasserver- und -entsorgungsinfrastruktur

In Deutschland ist die genutzte Wassermenge in den vergangenen Dekaden rückläufig. Sie sank beispielsweise zwischen 2004 und 2010 um 5,4 % bezogen auf die Nutzungsmenge der privaten Haushalte und des Gewerbes. Auch die Anzahl der Abwasserbehandlungsanlagen sank in diesem Zeitraum (-3,6 %, [Destatis, 2013b]). Gleichzeitig stieg aber die Gesamtlänge der Leitungsnetze. So wurden zwischen 2000 und 2010 etwa 77 Tsd. km Abwasserkanäle gebaut [Destatis, 2013b].

Für die Wasserinfrastruktur wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 100 Jahren angenommen. Ein Großteil der Infrastruktur wurde in den Jahren zwischen 1960 und 2000 gebaut und ist damit zwischen 10 und 50 Jahren alt (siehe Abbildung 36 für das Abwasserkanalnetz im Jahr 2010). DWA [2009] gibt eine durchschnittliche technische Restnutzungsdauer der Kanalnetze von 47 Jahren an.

Abbildung 36: Alter des Abwasserkanalnetzes bezogen auf 2010



Quelle: [Destatis, 2013c].

Die nachfolgende Tabelle 31 zeigt den aggregierten Materialaufwand für den jährlichen Zubau für die Trinkwasserinfrastruktur (Ver- und Entsorgung), die aus Steger et al. [Steger et al., 2011] übernommen wurde. Weiterhin zeigt sie den jährlichen Erneuerungsbedarf nach Wuppertal-Institut bzw. VDI-ZRE der Wasserversorgungsinfrastruktur. Die Abschätzungen weichen erheblich voneinander ab, was auf verschiedene Gründe zurückzuführen ist. So wurden unterschiedliche Ausgangsdaten bei Netzlängen aufgrund unterschiedlicher Bezugsjahre unterstellt und die zur Wasserinfrastruktur gehörigen Bauten unterschiedlich umfangreich berücksichtigt. Im Rahmen dieses Projektes wird auf die Erhebung vom VDI-ZRE hinsichtlich der Erneuerungen aufgrund der vollständigeren Berücksichtigung von Wasserinfrastrukturbereichen zurückgegriffen.

Tabelle 31: Jährlicher Materialinput in die Wasserinfrastruktur (Ver- und Entsorgung)

	Neubau ¹ [1.000 t]	Erneuerung ¹ [1.000 t]	Erneuerung ² [1.000 t]
Mineralische Rohstoffe	16.534,70	17.410,00	32.721,69
Metallische Rohstoffe	62,4	139,00	236,36
Kunststoffe	75,06	126,00	27,27
Gesamt	16.672,16	17.675,00	32.985,31

Quelle: ¹[Steger et al., 2011]; ²[Bergmann et al., 2015].

7.1.2.6 Kabelinfrastruktur und sonstige Infrastruktur

Die oben genannten Infrastrukturbereiche, und dabei insbesondere die Straßen-, Schienen- und Wasserinfrastruktur, sind verglichen mit den in diesem Absatz behandelten Infrastrukturen zur Strom-, Informations- und Kommunikations- sowie Gasversorgung mit Abstand die materialintensivsten. Daraus werden die Bereiche Strom-, IuK-, und Gasversorgung im Folgenden kurz dargestellt.

Zu den Kabelleitungen gehören die Informations- und Kommunikationsinfrastruktur sowie die Stromleitungen. Die Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ist ein vergleichsweise junger und dynamischer Infrastrukturbereich, der insgesamt schlecht erfasst ist. Im Folgenden wird auf die Erhebung von Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] aufgebaut, in der der Bestand und der jährliche Erneuerungsbedarf abgeschätzt wurde. Demnach existieren laut der neuesten Angabe von 2006 1,48 Mio. km Kupfernetze und 206.300 km Glasfasernetze. Gemessen an dem Anstieg der DSL-Anschlüsse, wurde nach Bergmann et al. [2015] in den folgenden Jahren stark zugebaut, was jedoch aufgrund

manglender Daten nicht hinreichend genau berücksichtigt werden konnte. Die Erhebungen vernachlässigen ferner Bettungssande. Es ist somit davon auszugehen, dass der tatsächliche Materialbestand und auch der jährliche Erneuerungsbedarf unterschätzt werden (Die Schätzung des Bestands liegt dennoch höher als die von KartAL II [2016a]). Bei einer angenommenen Lebensdauer von 30 Jahren für Leitungen und Mobilfunkstationen kommen Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] auf einen jährlichen Erneuerungsbedarf von insgesamt 95.557 Tonnen Metallen, wovon 93 % Kupfer ist.

Das Stromkabelnetz ist im Vergleich zum IuK-Netz gut erfasst. Die Elektrifizierung begann in Deutschland gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Mit der massenhaften Verbreitung von Anwendungen wie Radio, Fernsehen und weißer Ware in der Mitte des 20. Jahrhunderts, wurde auch das Stromnetz flächen-deckend ausgebaut. Gegenwärtig erzeugt die Energiewende einen hohen Bedarf an weiterem Ausbau der Kabelnetze, insbesondere im überregionalen Bereich. Das Netz wird nach der Funktion bzw. Spannungsebene in Übertragungs- bzw. Höchstspannungsnetze, Verteilungs- bzw. Mittelspannungsnetze und Feinverteilungs- bzw. Niederspannungsnetze unterteilt und hat eine Länge von etwa 35.000 km Höchstspannungsleitungen, 515.000 km Mittelspannungsleitungen und 1.160.000 km Niederrhein-spannungsnetze [Knappe et al., n.d.]. Die Materialaufwendungen für den Neubau werden von Steger et al. [2011] mit jährlich rund 1,95 Mio. Tonnen im Mittel- und Hochspannungsnetzbereich und mit 4,33 Mio. Tonnen im Niederspannungsbereich angegeben, wobei der jeweils größte Anteil bei der Verle-gung der Erdkabel anfällt. Der Erneuerungsaufwand wird von Steger et al. [2011] und Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] vor allem aufgrund der unterschiedlichen Berücksichtigung von Bettungssan-den unterschiedlich eingeschätzt, wobei in diesem Fall die Schätzung von Steger et al. [2011] die um-fassendere ist. Demzufolge wird der jährliche Erneuerungsaufwand von rund 1,1 bzw. 0,8 Mio. Tonnen für die Hoch- und Mittelspannungsleitungen bzw. für die Niederspannungsleitungen benötigt, wobei die mineralischen Rohstoffe mit 98 % bzw. 96 % dominieren.

Zu den sonstigen Bereichen der Infrastruktur gehören neben den Gasnetzen auch Flughäfen und Kraft-werke. Angaben zu den Neubau- und Unterhaltungsaufwendungen der Gasnetze und Flughäfen wer-den ebenfalls von Steger et al. [2011] und Bergmann et al. [Bergmann et al., 2015] vergleichbar zu den obigen Ausführungen übernommen (zu den Kraftwerken siehe auch Kapitel 6.1). An dieser Stelle sei vor allem der Kraftwerkspark hervorgehoben, der zum sonstigen Tiefbau gehört und aufgrund der Umstellungen auf erneuerbare Energien eine erhebliche Dynamik besitzt. Der Ausbau der Windener-gie wurde bereits in Kapitel 6.1.1 genannt; dem sonstigen Tiefbau werden dabei die Fundamente und Türme zugeordnet. Die Materialaufwendungen für den Zubau von 1,551 GW im Onshore-Bereich und 41 Anlagen im Offshore-Bereich und die Materialaufwendungen für die Instandhaltung im Jahr 2010 wurde auf der Basis der Angaben aus dem Projekt ReStra [UBA, 2016b] umgerechnet. Demnach liegen die Gesamtaufwendungen für die Fundamente und Türme im Neubau bei rund 0,95 Mio. Tonnen für Onshore- und 0,044 Mio. Tonnen im Offshore-Anlagen und für die Instandhaltung bei einer angenom-menen Lebensdauer von 20 Jahren bei insgesamt 0,125 Mio. Tonnen.

7.2 Anznehmende zukünftige Entwicklung

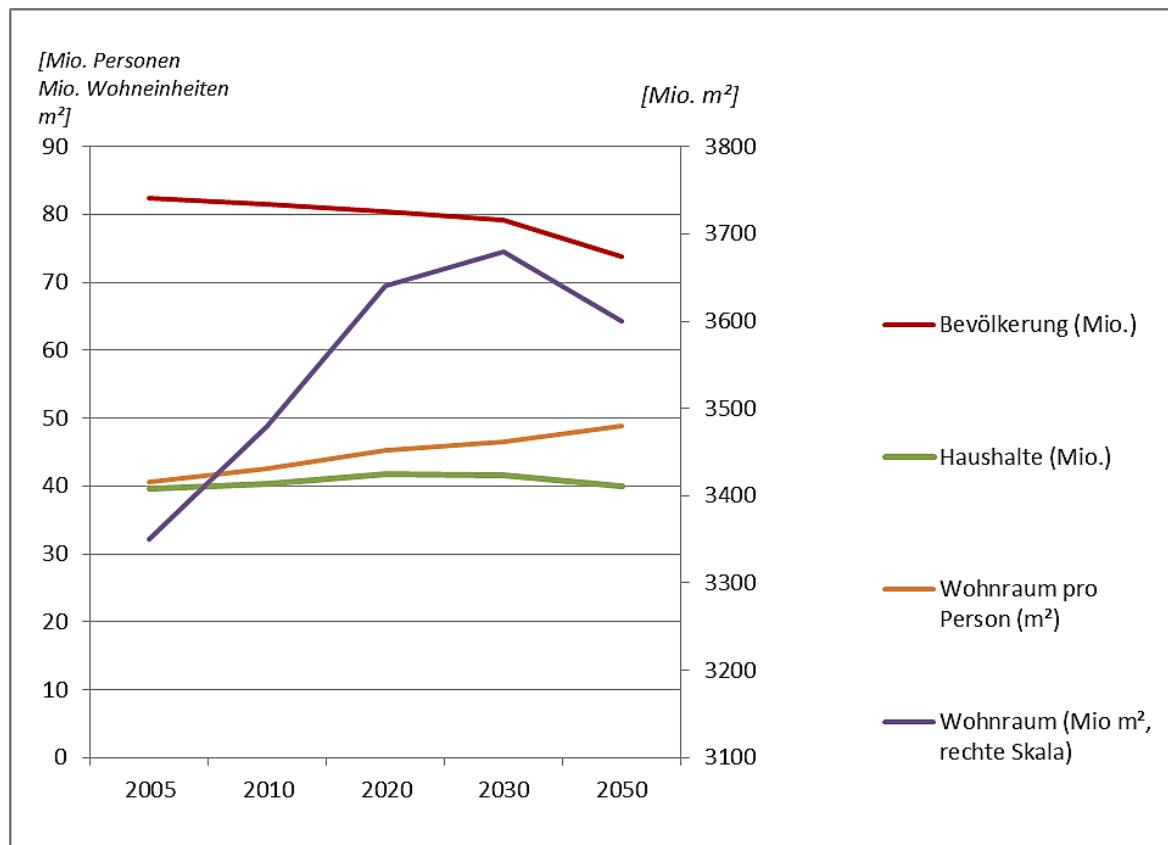
7.2.1 Allgemeine Trends und Datengrundlage für AZE: Hochbau

Wie oben bereits genannt, werden die langfristigen Veränderungen im Hochbau maßgeblich von der demographischen Entwicklung beeinflusst. Die Bevölkerungsprognosen der vergangenen Jahre zeigen durchweg eine rückläufige Bevölkerung bis 2030 und eine stärkere Abnahme in den darauffolgenden Dekaden (siehe auch Kapitel 5.1).

Im Wohngebäudebereich gehen Experten darüber hinaus von weiterhin sinkenden Haushaltsgrößen aus [DLR et al., 2012; Prognos et al., 2014]. Vernachlässigt man konjunkturelle Schwankungen der Wirtschaftsentwicklung, so ist davon auszugehen, dass beide Trends (sinkende Bevölkerung und sinkende Haushaltsgrößen) bis etwa 2030/2035 insgesamt zu einem steigenden Wohnraumbedarf füh-ren aufgrund des zu erwartenden steigenden Wohnraumbedarfs pro Person (Abbildung 37). Nach

etwa 2035 überwiegen die Effekte, die durch den Bevölkerungsrückgang ausgelöst werden, so dass insgesamt von einem Rückgang des Wohnraumbedarfs ausgegangen werden kann.

Abbildung 37: Trends im Wohnungssektor, 2005 - 2050



Quelle: [DLR et al., 2012].

Die Aktivitäten im Nichtwohngebäudebereich werden ebenso von der Bevölkerungsentwicklung beeinflusst. Sie unterliegen darüber hinaus aber anderen Entwicklungstrends als die Aktivitäten im Wohngebäudebereich. So ist der Bau von Verwaltungs- oder Dienstleistungsgebäuden wie Schulen oder Krankenhäuser nicht nur von öffentlichen Finanzierungsmöglichkeiten abhängig, sondern auch von innerdeutschen Migrationsbewegungen. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass sich der in Deutschland zu beobachtende Trend der Landflucht weiter fortsetzt [Klingholz, 2016]. Dadurch sinkt der Gesamtbedarf an Neubauten von Dienstleistungsgebäuden in weiten Teilen des ländlichen Raumes erheblich, während sich zusätzlicher Bedarf auf die Ballungsgebiete konzentriert. In Summe kann davon ausgegangen werden, dass der zukünftige Gesamtbedarf an Dienstleistungsgebäuden deutschlandweit sinkt. Die Bauaktivitäten von Gewerbegebäuden werden hingegen stärker von der wirtschaftlichen Situation bestimmt. Unter der Annahme, dass die Wirtschaftsaktivitäten kontinuierlich leicht steigen, ist es wahrscheinlich, dass auch der Bedarf an Gewerbegebäuden weiter steigt. Aufgrund der unzureichenden empirischen Datenbasis im Nichtwohngebäudebereich existieren jedoch keine hinreichend differenzierten Prognosen zu den Entwicklungen der Bauaktivitäten im Nichtwohngebäudebereich.

Ein weiterer Trend im Hochbau betrifft die Änderungen im energetischen Standard der Gebäude. Dies beinhaltet sowohl den Neubau als auch die energetische Sanierung von Gebäuden. Ziel der energetischen Standardsetzung bei Neubau und Sanierungen ist die Reduktion von klimaschädlichen Emissionen durch die Einsparungen beim Bedarf der Erzeugung von Raumwärme, insbesondere über die Verbesserung von Dämmungen, den Einbau von Isolierglasfenstern und über die Modernisierung der Haustechnik. Die dadurch ausgelösten Einsparungen von fossilen Energieträgern, aber auch der Mehr-

bedarf an Strom wurden bereits in Kapitel 6 benannt und quantifiziert. An dieser Stelle geht es vor allem um den zusätzlichen Materialbedarf, der im Neubau und bei den energetischen Sanierungen anfällt. Durch den Trend zu höheren energetischen Standards wird zukünftig die Nachfrage nach Dämmmaterialien, einschließlich Fenstern und Türen mit geringeren U-Werten, und nach energetisch optimierter Haustechnik weiter steigen. Hinsichtlich der gesamten Materialzusammensetzung im Hochbau sind insbesondere die Dämmungen wichtig, auch wenn sie ein geringes Eigengewicht haben und im Vergleich zu dem Materialbedarf des Rohbaus nicht so stark ins Gewicht fallen. Aufgrund der anzunehmenden zusätzlichen Mengen wird sich der durchschnittliche zukünftige Materialbedarf strukturell ändern. Dämmungen können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden, unter anderem aus Kunststoffen, mineralischen und biotischen Rohstoffen. In der Praxis überwiegen die kunststoffbasierten Dämmungen, während die anderen Dämmstoffe einen eher kleinen Anteil am Markt haben. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass dieses Verhältnis auch in Zukunft bestehen bleibt (siehe auch unten).

Im Rahmen eines Fachgespräches am 23./24. März 2015 in Berlin wurde vereinbart, vor allem auf die Studien des IÖR [Deilmann et al., 2014a] zurückzugreifen. Deilmann et al. [2014a] hat den Materialbedarf im Hochbausektor, und zwar sowohl für den Wohn- als auch für den Nichtwohngebäudebereich, im Jahr 2030 umfassend abgeschätzt. Diese Abschätzungen beziehen sich auf Deutschland, und sie sind hinsichtlich Materialgruppen differenzierter als jede andere Materialabschätzung. Deswegen werden sie im Folgenden als Basisstudie für den Hochbau zu Grunde gelegt. Für das AZE-Szenario wurde das Basisszenario von Deilmann et al. [2014a; b] zugrunde gelegt.

Die Annahmen sind in Deilmann et al. [2014a; b] ausführlich beschrieben. Wie oben bereits angesprochen, wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Haushalte, die durchschnittliche Wohnfläche pro Person, ebenso wie die gesamte Wohnfläche bis 2030, steigen werden. Es wird ferner angenommen, dass zwischen 2011 und 2030 etwa 4,2 Mio. neue Wohnungen entstehen und ca. 2,6 Mio. Wohnungen abgerissen werden. Hinsichtlich der Nichtwohngebäude wurden von Deilmann et al. [2014a] aufgrund der empirisch schlechteren Ausgangsdatenlage und aufgrund der Tatsache, dass die Fortschreibung des Trends in der Vergangenheit zu einer unrealistischen Überversorgung mit Nichtwohngebäuden führen würde, eine Deckelung des Neubaus angenommen.

Für die Übernahme in URMOD mussten Veränderungskennzahlen gefunden werden, die die Gesamtveränderungen im Hochbau, getrennt für den Wohnungsbau und den Nichtwohnungsbau, repräsentieren. Bezuglich der Bauaktivitäten im Wohngebäudebereich wurde der Wohnungszugang pro Jahr als Grundlage genommen, denn dieser Wert repräsentiert den physischen Bedarf an Baumaterialien im Allgemeinen gut. Auf Basis der Angaben von Deilmann et al. [2014a] zu den durchschnittlichen Wohnungszugängen wurde demnach eine Steigerung der Wohnbauaktivitäten im Wohnbereich um rund 23 % ermittelt. Bezogen auf den Nicht-Wohnungsbau wurde die Schätzung Deilmann et al. [2014a] übernommen, wonach sich der jährliche Zugang der Fläche um rund 20 % gegenüber 2010 reduziert.

Tabelle 32: Veränderungen im Wohn- und Nichtwohnbereich

	Einheit	2010	2030	Veränderung 2030 gegenüber 2010
Wohnungszugang p.a.	Anzahl	140.000	172.500	23,21 %
Zugang Nicht-Wohnungsbau p.a.	1.000 m ²	25.475	20.307	-20,29 %

Quelle: Deilmann et al. [2014a].

Deilmann et al. [2014a] berechnen den Materialbedarf aller Wohngebäuden mittels eines synthetischen Neubau-Gebäudetyps für je ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus und den Materialbe-

darf von Nichtwohngebäuden mittels synthetischen Gebäudetypen für die in der Statistik ausgewiesenen Nichtwohngebäudearten. Bei allen Gebäudetypen wurde unterstellt, dass MFH und E/ZFH zu je 50 % EnEV 2012 und einen Passivhausstandard erfüllen. Der Anteil der Hauptbaustoffe der Gebäudearten ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 33: MFH und E/ZFH 2030, Anteile der Hauptbaustoffe und energetische Standards

Synthetische Typen	Mehrfamilienhäuser			Ein-/Zweifamilienhäuser		
	Gesamt	EnEV 2012	PH-Stan- dard	Gesamt	EnEv 2012	PH-Stan- dard
Gasbeton				15 %	7,5 %	7,5 %
Ziegel	40 %	20 %	20 %	25 %	12,5 %	12,5 %
Kalksandstein	40 %	20 %	20 %	30 %	15,0 %	15,0 %
Holz	10 %	5 %	5 %	25 %	12,5 %	12,5 %
Beton	5 %	2,5 %	2,5 %			
Konstruktion mit Vakuumplatten	5 %	2,5 %	2,5 %	5 %	2,5 %	2,5 %

Anmerkungen: EnEV: Energieeinsparverordnung; PH-Standard: Passivhaus-Standard

Quelle: [Gruhler / Böhm, 2011].

Deilmann et al. [2014a] gehen weiterhin von einer Sanierungsrate von 2,5 % im Jahr 2030 bei Wohngebäuden aus; die Sanierungsrate ist nicht gleichzusetzen mit der Rate der energetischen Sanierungen. Der Materialinput wird dabei auf 5,5 % des Ausgangsmateriallagers geschätzt. Bezüglich der Nichtwohngebäude wird von einer Sanierungsrate von 2 % bei wohngebäudeähnlichen Nichtwohngebäuden und 0,5 % bei allen übrigen Nichtwohngebäuden ausgegangen. Hinsichtlich des Materialinputs wird von 5,5 % des Ausgangsmateriallagers bei wohngebäudeähnlichen Nichtwohngebäuden und von 3 % bei allen übrigen Nichtwohngebäudearten ausgegangen. Es wird ferner angenommen, dass beim Neubau durchschnittlich 3 % des verbauten Materials als Abfall entsteht. Bei Dämmstoffen und Dachbahnen liegt der Wert bei 8 % und bei Gipskarton und Holz bei 15 %.

Weitere Annahmen, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt werden, betreffen Abrisse von Gebäuden, Abgänge ohne Abrisse, Zugänge ohne Neubau und nicht erfasste Abgänge. Ferner werden Annahmen hinsichtlich der Verfüllung von Baugruben beim Neubau und hinsichtlich versiegelter Flächen getroffen [Deilmann et al., 2014b].

Das Ergebnis der Abschätzungen zeigt Tabelle 34. Der Vergleich mit den in URMOD ermittelten Materialien für 2010 ergab eine erhebliche Diskrepanz der Gesamtmenge. Es wurde davon ausgegangen, dass Unterschiede in der Materialstruktur unter anderem auf Nebengebäude wie Garagen oder Carports, und auch Gartenanlagen wie Mauern oder Gartenhäuschen zurückgehen.

Im Vergleich zum Jahr 2010 bleibt die Gesamtmenge der Materialien, die 2030 im Hochbau verbaut werden, bei Deilmann et al. [2014a] relativ konstant. Die Materialzusammensetzung ändert sich jedoch. Für das Szenario AZE wurde im Wesentlichen davon ausgegangen, dass die von Deilmann et al. ermittelten *Veränderungen* zwischen 2010 und 2030 unabhängig von der Gesamtmenge in URMOD übertragbar sind. Die größten relativen Zuwächse sind unter anderem bei der Gruppe der mineralischen und fossilen Dämmstoffe (+35 % bzw. +26 %) zu finden. Rückläufig sind hingegen Kunststofffenster und -türen sowie Flachglas und Konstruktionsholz (-14 %, -11 %, -11 %). Für die Übernahme in das Modell wurden die Kategorien der Baustoffe gemäß den Differenzierungen im Modell geordnet.

Tabelle 34: Relative Änderungen der Materialzusammensetzung im Hochbau 2030 gegenüber 2010

	2010 [Mio. t]	2030 [Mio. t]	Veränderung 2030 ge- genüber 2010
Bau-/Konstruktionsholz	2,71	2,422	-10,6 %
Sonst. Holz (inkl. Bodenbeläge)	1,017	1,08	6,2 %
Beton	41,708	42,205	1,2 %
Ziegel	7,905	7,433	-6,0 %
Kalksandstein	5,252	5,752	9,5 %
Porenbeton	1,5	1,512	0,8 %
Sonst. Mineralisch (inkl. Boden- beläge)	42,055	40,933	-2,7 %
Gipsprodukte und Gipskarton	3,412	3,178	-3,5 %
Flachglas	2,518	2,251	-10,6 %
Mineral. Dämmstoffe	0,55	0,743	35,1 %
Kunststoff-Dämmstoffe	0,874	1,109	26,9 %
Kunstst.-Fenster / Türen	0,591	0,508	-14,0 %
Sonstige Kunststoffe (inkl. Be- läge & Leitungen)	1,012	1,18	16,6 %
Metalle (inkl. Leitungen)	9,206	9,374	1,8 %
Sonst. Stoffe (inkl. Leitungen & Beläge)	0,757	0,766	1,2 %
Gesamt	121,067	120,446	-0,5 %

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Basis von [Deilmann et al., 2014a].

7.2.2 Allgemeine Trends und Datengrundlagen: Tiefbau

Um das Szenario „Anzunehmend zukünftige Entwicklung (AZE)“ auszugestalten, mussten die Entwicklungen im Infrastrukturbereich eigenständig abgeschätzt werden, da eine alle Infrastrukturbereiche umfassende Studie nicht vorlag. Dabei wurden, getrennt für jeden in URMOD differenzierten Teilbereich der Infrastruktur, die Aufwendungen für den Neubau und für die Unterhaltungen für 2030 ermittelt, basierend auf Methoden und Annahmen, die für die Gegenwart entwickelt wurden. Für die Übernahme in URMOD sind jeweils die Veränderungsparameter der Aufwendungen relevant, nicht die abgeschätzten Materialaufwendungen selbst. Für alle im Folgenden dargestellten Bereiche ist zu beachten, dass die Materialabschätzungen für den Neubau und für die Unterhaltsleistungen in den Studien, auf die zurückgegriffen wurde, unterschiedlich vollständig und umfassend sind. Die hier dargestellten Abschätzungen der Veränderungsparameter sind daher mit einer Unsicherheit behaftet, deren Konsolidierung nicht im Rahmen des Projekts leistbar war.

Es wurde daher im Wesentlichen auf Konsistenz der Entwicklungen und Plausibilitäten geachtet. Insgesamt wurde angenommen, dass aufgrund der rückläufigen Bevölkerung und dem anhaltenden Trend der Urbanisierung, der im Zusammenhang mit dem rückläufigen Trend der Ausweisung von neuen Siedlungsgebieten steht, die Neubauaktivitäten in der Fläche rückläufig sind. Dies gilt für den kommunalen Straßenbau und für alle kommunalen Infrastruktureinrichtungen, die mit der Siedlungs-

entwicklung zusammenhängen, darunter insbesondere für die materialintensive Wasserver- und -entsorgung und die kommunale Strom- und IuK-Infrastruktur. Die überregionalen Infrastrukturen unterliegen demgegenüber anderen Trends, die insgesamt stärker von nationalen Ausbauplänen dominiert werden.

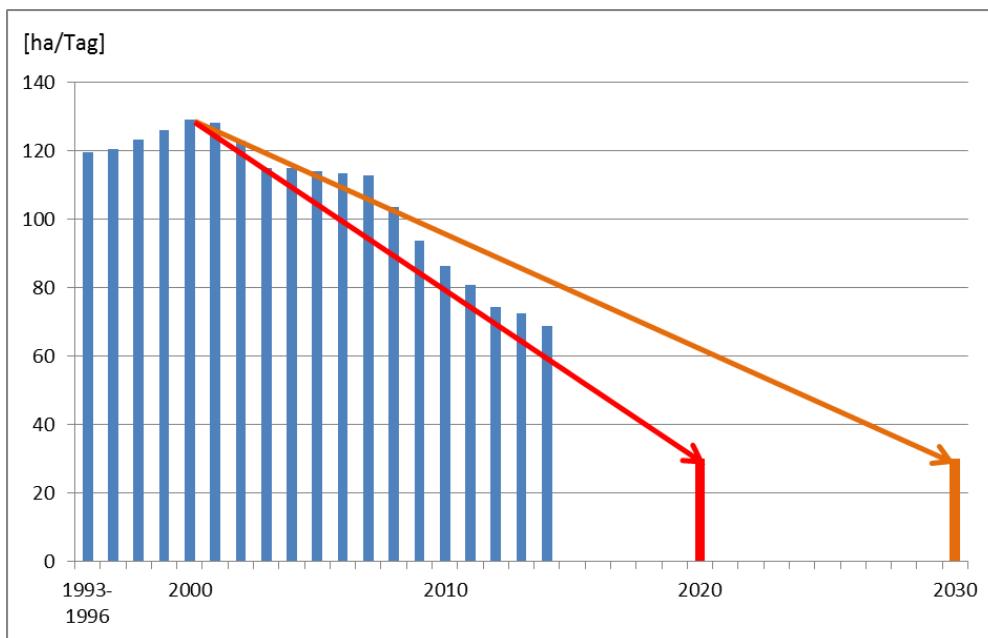
Im Allgemeinen zeigen die auf diesen Annahmen basierenden Rechnungen, dass sich die Relation der Materialaufwendungen für den Neubau einerseits und für die Unterhaltungsaufwendungen andererseits zukünftig verschieben: Der Anteil der Aufwendungen für den Neubau von Infrastruktur ist rückläufig, während der Anteil für die Aufwendungen zur Unterhaltung steigt. Dies erscheint insgesamt plausibel. Da die Materialaufwendungen für den Neubau ungleich höher sind als die für Unterhaltungsmaßnahmen, ist insgesamt ein Rückgang der Materialaufwendungen für den Infrastrukturbereich anzunehmen, der im Folgenden im Einzelnen ermittelt wird. Die angenommenen Entwicklungen und Eingangsparameter werden dabei entlang der Bereiche, die in URMOD getrennt sind, dargestellt.

7.2.2.1 Straßen und Wegebau

Bei der Ermittlung der Veränderungsparameter im Straßen- und Wegebau wurde auf die Ergebnisse des Projekts „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ [Knappe et al., n.d.] zurück gegriffen. Im Rahmen dieses Projekts wurde die umfassendste Abschätzung von benötigten Baustoffen im Straßen- und Wegebau geleistet (siehe Kapitel 7.1.2). Für das Szenario AZE wurde auf das Basisszenario zurückgegriffen, wonach die Siedlungsflächenentwicklung auf 30 ha/Tag zurückgeht und der Zuwachs des Straßennetzes aus dem typischen Anteil der Verkehrsflächen an diesen Siedlungsflächen abgeleitet wird. Ferner wurden die Vorgaben der Planwerke und technischen Notwendigkeiten in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Finanzmittel berücksichtigt. Hinsichtlich der Lebensdauer wurden unter anderem für die ungebundenen Schichten 100 Jahre angesetzt und für die Deckschichten, abhängig von den Bauklassen, Lebensdauern 33 bzw. 50 Jahren im kommunalen Straßen- und Wegebau. Die angesetzten Lebensdauern für Deck-, Binder- und Tragschichten für die übrigen Baulastträger sind stark differenziert. Im Basisszenario von [Knappe et al., n.d.] wurden die mittleren Planzahlen der Bundesstraßen unterstellt.

Die Siedlungsentwicklung, die auch für weitere Infrastrukturbereiche maßgeblich ist, wurde in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Plausibilität des allgemeinen Trends geprüft. Abbildung 38 zeigt, dass ein Rückgang der Siedlungsentwicklung auf 30 ha/Tag eine Fortsetzung des Trends der vergangenen Jahre darstellt, wobei der Rückgang im Vergleich zu den Jahren 2010 – 2014 sogar verlangsamt verläuft.

Abbildung 38: Siedlungsflächenentwicklung in der Vergangenheit, Ziel 2020 und angenommene Entwicklung bis 2030



Quelle: Destatis [2015b]. Die vergangene Entwicklung ist auf der Basis der gleitenden Vierjahresdurchschnitte dargestellt.

Bezogen auf den Straßen- und Wegebau werden ferner alle weiteren Annahmen des Basisszenarios von [Knappe et al., n.d.] übernommen, die den Baustoffbedarf bestimmen, darunter die Erneuerungszyklen der unterschiedlichen Schichten nach Straßenkategorien und die Annahmen zu den genutzten Materialien. Im Rahmen von AZE wurden nur der ausgewiesene Baustoffbedarf übernommen, jedoch keine zusätzlichen Recyclingannahmen, um den spezifischen Beitrag des Recyclings in TW30 sichtbarer zu machen.

Demzufolge werden im Straßen- und Wegebau in 2030 rund 97 Mio. Tonnen Materialien für Neubau und für Instandhaltung insgesamt benötigt. Aus dem Vergleich mit den bekannten Materialaufwendungen in 2010 ergeben sich Veränderungsparameter in 2030 gegenüber 2010. Da bei Knappe et al. [n.d.] die begleitende Infrastruktur wie Leitplanken oder Ampeln nicht enthalten sind, wurden sie bei der Berechnung der Änderungsparameter nicht berücksichtigt. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Datengrundlage für die Unterhaltungsaufwendungen vergleichbar ist, weil beide genannten Studien auf denselben Grunddatensatz zurückgreifen. Dies gilt nicht für den Neubau, da der Datensatz von Steger et al. [2011] nicht so umfassend ist wie der von Knappe et al. [n.d.]. Der Rückgang im Neubau dürfte damit unterschätzt sein. Insgesamt ist der gezeigte Trend, Anstieg der Unterhaltungsaufwendungen und Rückgang des Neubaus, durchaus plausibel.

Hinsichtlich der Zusammensetzung der Baustoffe für den Neubau und für die Unterhaltungsaufwendungen wird in AZE nicht von strukturellen Änderungen der Materialien ausgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass die Straßen und Wege in 2030 mit einer vergleichbaren Materialzusammensetzung, die von mineralischen Baustoffen dominiert ist, neugebaut und instand gehalten werden.

Tabelle 35: Materialbedarf im Straßen- und Wegebau und Veränderungen in 2030 ggü. 2010

	2010 [1.000 t / a]	2030 [1.000 t/a]	Veränderung 2030 gegenüber 2010
Neubau*	20.803	18.493	-11,1 %
Unterhaltungs- aufwendungen**	69.191	78.264	13,1 %

*Straßenerweiterung im Vollausbau, Neubau und Ausbau; **Erneuerung und Hocheinbau

Quellen: 2010: Steger et al. [2011] für Neubau; Bergmann et al. [2015] für Unterhalt; 2030: Knappe et al. [n.d.].

7.2.2.2 Ingenieursbauwerke

Zu den Ingenieursbauwerken zählen Brücken und Tunnel. Sie befinden sich in der Straßen- und Wegeinfrastruktur sowie in der Gleisinfrastruktur. Gemessen am Materialaufwand stellen sie jedoch einen viel geringeren Anteil als die Straßen und die Gleisinfrastruktur dar. Wie unter 7.1. bereits dargestellt, gibt es vergleichsweise gute Angaben zu den Brücken und Tunnel im überörtlichen Wegenetz, während die Angaben zu kommunalen Brücken weniger genau sind.

Im vorigen Abschnitt bereits genannten Basisszenario für den Straßen- und Wegebau werden die Materialaufwendungen für die Ingenieursbauwerke im Straßen- und Wegebau separat von den Aufwendungen für den Straßen- und Wegebau ausgewiesen [Knappe et al., n.d.]. Diese Angaben werden hier herangezogen, um die benötigten Veränderungsparameter abzuleiten. Für das Basisjahr sind Angaben für den Unterhaltsaufwand der straßenbezogenen Ingenieursbauwerke bei Bergmann et al. [2015] enthalten, die auf denselben Basisdatensatz zurückgreifen. Die Angaben zum Materialbedarf im Neubau von Ingenieursbauwerken werden wieder, in Ermangelung vollständigerer Daten, von Steger et al. [2011] übernommen. Da Steger et al. [2011] keine Angaben zu kommunalen Ingenieursbauwerken macht, dürfte der festzustellende Rückgang der Materialaufwendungen für den Neubau unterschätzt sein. Im Ergebnis sind die Aufwendungen sowohl für den Neubau als auch für die Unterhaltung der Ingenieursbauwerke rückläufig (Tabelle 34).

Hinsichtlich der Ingenieursbauwerke in der Gleisinfrastruktur finden sich keine separat ausgewiesenen Materialaufwendungen für den Neubau im Basisjahr; es finden sich ferner keine hinreichende Angaben, auf deren Basis Schätzungen zur Veränderung des Bestandes hätten abgeleitet werden können. Daher konnte dieser Bereich nicht in die Berechnung der ins Modell eingehenden Parameter einbezogen werden. Ein Vergleich der Unterhaltsaufwendungen zeigt, dass die Materialaufwendungen für die Ingenieursbauwerke der Gleisinfrastruktur deutlich geringer sind als die Aufwendungen für die Ingenieursbauwerke im Straßen- und Wegebau. Die im Straßen- und Wegebau ermittelten Veränderungsparameter werden damit auf den gesamten Bereich der Ingenieursbauwerke übertragen.

Tabelle 36 Materialbedarf für Ingenieursbauwerke 2030 ggü. 2010

	2010 [1.000 t / a]	2030 [1.000 t/a]	Veränderung 2030 gegenüber 2010
Neubau*	1.145	1.039	-9 %
Unterhaltsaufwendungen**	4.477	2.237	-33 %

Quellen: 2010: Steger et al. [2011] für Neubau; Bergmann et al. [2015] für Unterhalt; 2030: Knappe et al. [n.d.].

7.2.2.3 Gleisinfrastruktur

Auch für die anzunehmende Entwicklung der Gleislängen mussten Veränderungsindikatoren für die Übertragung in URMOD ermittelt werden, soweit möglich getrennt nach Neuinvestitionen und Ersatzinvestitionen. Die Indikatoren sollen, wie bereits in den obigen Bereichen dargestellt, möglichst repräsentativ für die Veränderungen in 2030 gegenüber 2010 hinsichtlich des Rohstoffbedarfs sein. Aus diesem Grunde wird auch hier, soweit möglich, auf Erhebungen zurückgegriffen, die die physischen Materialaufwendungen untersucht haben.

Hinsichtlich des Neubaus wird auf die Annahme von Steger et al. [Steger et al., 2011] bzw. auf die Ergebnisse der Studie zur Kartierung anthropogener Lager II [UBA, 2016a], zurückgegriffen, demzufolge jährlich im Schnitt 100 km Gleislänge neugebaut und 300 km ausgebaut werden. Angesichts der Ankündigungen der Deutschen Bahn, die Verkehrsleistung der Bahn zu erhöhen und unter Berücksichtigung der prognostizierten Anstiege der Verkehrsleistungen der Bahn (siehe Kapitel 8) ist eine weitere Zunahme der Infrastruktur realistisch. Es wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass diese durchschnittlichen Investitionen zukünftig fortgesetzt werden. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass die Neubautätigkeit in 2030 der Neubautätigkeit im Gleisbau in 2010 entspricht.

Durch den Zubau verändert sich allerdings die Größe des gesamten Schienennetzes. Der von Bergmann et al. [2015] verwendeten Methode folgend, wird der Erneuerungsaufwand unter Berücksichtigung der Lebensdauer anhand des Bestandes abgeschätzt. Das heißt, es ist in einem ersten Schritt der Bestand in 2030 abzuschätzen und in einem zweiten der Berechnungsweg von Bergmann et al. [2015] anzuwenden. Ausgehend von einer Gleislänge von rund 70.500 Kilometern (ohne S- und U-Bahnen) in 2010 [Destatis, 2011] und unter der Annahme eines Neu- und Zubaus von 400 km Gleislänge jährlich würde die Gleislänge bis 2030 auf rund 78.000 km bzw. um 11 % steigen. Der Erneuerungsaufwand pro km Gleislänge wird wie in Kapitel 7.2.2.1 begründet wieder von Bergmann et al. [2015] übernommen. Demzufolge würde sich der jährliche Materialaufwand für die Unterhaltungsleistungen um 7,6 % zwischen 2010 und 2030 erhöhen. Der Gesamtmaterialaufwand für die Gleisinfrastruktur steigt damit um 5,2 % in 2030 verglichen mit 2010.

Tabelle 37: Materialaufwand für die Schieneninfrastruktur und Veränderungen 2030 ggü. 2010

	2010 [1.000 t]	2030 [1.000 t]	Veränderung 2030 ge- genüber 2010
Neubau	6.411	6.411	Keine
Unterhaltungsaufwand	13.931	14.989	+ 7,6 %
Gesamt	20.342	21.400	+ 5,2 %

Quelle: Die Daten für Neubau 2010 basieren auf Steger et al. [2011]; die Daten zur Erneuerung 2010 basieren auf Bergmann et al. [2015]. Die Angaben für 2030 und die Änderungen basieren auf eigenen Berechnungen.

Durch die veränderten Relationen im Neu- und Unterhaltungsaufwand verändert sich die Materialzusammensetzung, die in die Schieneninfrastruktur geht, nur unwesentlich. Den höchsten Anteil haben 2010 wie auch 2030 die mineralischen Baustoffe mit 95,87 % in 2010 und 95,84 % in 2030.

7.2.2.4 Wasserstraßen

Auch in diesem Infraukturbereich musste ein Indikator abgeleitet werden, der die Veränderungen zwischen 2010 und 2030 zeigt. Wie bei der Gleisinfrastruktur wurde auch hier auf Steger et al. [Steger et al., 2011] hinsichtlich der Neubautätigkeiten und auf Bergmann et al. [2015] hinsichtlich des Erneuerungsaufwandes zurückgegriffen. Wie bereits bei der Beschreibung der vergangenen Trends dargelegt, sind die Binnenschifffahrtswege wie Kanäle und Uferbefestigungen von natürlichen Wasserstraßen und dazugehörige Bauwerke wie Schleusen und Brücken berücksichtigt, Seehäfen und Deiche sind jedoch weder bei Steger et al. [Steger et al., 2011] noch bei Bergmann et al. [2015] erfasst.

Für die Ableitung der Veränderungen im Neubau wurde angenommen, dass die Neubautätigkeit konstant bleibt. Ein konstanter weiterer Ausbau der Wasserinfrastruktur erscheint aufgrund der zunehmenden Schiffsgrößen und der Annahmen, die hinsichtlich der fortschreitenden Einbindung in den internationalen Handel (siehe Kapitel 5.4) getroffen wurde, plausibel. Ähnlich dem Vorgehen bei der Gleisinfrastruktur wird der basierend auf Steger et al. [Steger et al., 2011] jährlich angenommene Materialaufwand für den Neubau bis 2030 fortgeschrieben. Anhand der durchschnittlichen Lebensdauer werden dann die Materialaufwendungen für die Unterhaltungsmaßnahmen ermittelt. Dabei wird dem Vorgehen und den Annahmen von Bergmann et al. [2015] gefolgt. Die Aufwendungen für die Unterhaltung der Wasserinfrastruktur steigen damit um 9,6 % in 2030 gegenüber 2010. Die gesamten Materialaufwendungen in die Wasserinfrastruktur (Neubau und Unterhaltung) steigen um rund 7,2 % (siehe Tabelle 38). Da in URMOD die Aufwendungen für den Deichbau und die Seehäfen in 2010 enthalten sind, werden die Aufwendungen für diese bei der Übernahme der Veränderungsindikatoren auch berücksichtigt. Die unterstellte Annahme lautet dabei, dass die Aufwendungen für die seeseitige Wasserinfrastruktur analog zu den Aufwendungen für die Binnenwasserinfrastruktur steigen.

Tabelle 38: Materialaufwand für die Wasserinfrastruktur und Veränderungen 2030 ggü. 2010

	2010 [1.000 t]	2030 [1.000]	Veränderung 2030 ggü. 2010
Neubau	1.990	1.990	konstant
Erneuerung	5.843	6.404	9,61 %
Gesamtverbrauch	7.833	8.394	7,17 %

Quelle: Die Daten für Neubau 2010 basieren auf Steger et al. [2011]; die Daten zur Erneuerung 2010 basieren auf Bergmann et al. [2015]. Die Angaben für 2030 und die Änderungen basieren auf eigenen Berechnungen.

7.2.2.5 Trinkwasserver- und -entsorgungsinfrastruktur

Auch für die Wasserver- und entsorgungsinfrastruktur mussten Indikatoren gefunden werden, die die Veränderungen in 2030 gegenüber 2010 ausdrücken. Anders als in den vorigen Infrastrukturbereichen konnte jedoch der jährliche Zubau nicht fortgeschrieben werden. Im Straßenbau wurde, wie oben dargestellt, angenommen, dass die Ausweisungen von Siedlungsflächen dem Trend folgend weiter rückläufig sind. Das heißt, es werden weniger kommunale Straßen gebaut, die neue Siedlungsflächen erschließen. Es ist demzufolge logisch, dass gleichzeitig auch die Neuerschließung von Siedlungsflächen mit dazugehöriger Infrastruktur, darunter die Wasserver- und -entsorgung, rückläufig ist.

Der Rückgang der Flächenversiegelung zwischen 2010 und 2030 liegt bei -65,5 %, abgeleitet aus der Veränderung von 87ha/Tag (bezogen auf den Vierjahresdurchschnitt 2007-2010 [Destatis, 2014e]) in 2010 und der Annahme von 30 ha/Tag in 2030, übernommen von Knappe et al. [n.d.]. Diese Veränderung wurde auf den Neubau der Trinkwasserleitungen und der Abwasserleitungen übertragen. Angesichts der Klimaänderungen wurde jedoch davon ausgegangen, dass die Wasserentsorgung die zukünftig eher ansteigenden sporadischen Regenwassermengen fassen muss. Daher ist ein Investitionsrückgang nicht plausibel. Folglich wurden die insgesamt relativ lückenhaften Angaben zu den Neuinvestitionen im Bereich der Wassergewinnung (die physisch nur einen sehr kleinen Teil ausmachen) und der Wasserentsorgung als konstante Größen weitergeführt. In Summe verändert sich der Materialaufwand zum Neubau der Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur daher um -63,1 % (siehe Tabelle 39).

Wie bereits in den anderen Infrastrukturbereichen wurde der Unterhaltungsaufwand der Methodik und Annahmen von Bergmann et al. [2015] folgend basierend auf den Bestandsdaten in 2030, die sich aus den Annahmen zum Neubau ergeben, ermittelt. Hinsichtlich der rückläufigen Neubauinvestitionen wurden dabei unterstellt, dass diese linear über den Zeitraum von 2010 bis 2030 zurückgehen. Der Bestand in 2030 wurde separat für das Kanalnetz, die Kanalschächte und die Regenentlastungsanlagen

sowie für die Brunnen, Talsperren und Speicheranlagen ermittelt. Den Annahmen von Bergmann et al. [2015] folgend, wurde dann anhand der Lebensdauer der jährliche Materialaufwand zur Unterhaltung der Infrastrukturbereiche abgeleitet. Aufgrund des gestiegenen Gesamtbestandes steigen im Ergebnis die Aufwendungen für die Unterhaltung der Infrastruktur. Die Materialzusammensetzung ändert sich dabei leicht. Der Anteil der Kunststoffe steigt, da diese zunehmend beim Neubau und bei den Reparaturen insbesondere des Leitungsnetzes eingesetzt werden. Da diese Substitution im Szenario TW30 gezielt betrachtet wurde, wurde in AZE unterstellt, dass die Materialzusammensetzung 2030 bei Neubau bzw. Unterhaltung der Infrastruktur gegenüber 2010 unverändert bleibt.

Tabelle 39: Materialaufwand für die Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur und Veränderungen 2030 gegenüber 2010

	2010 [1.000 t]	2030 [1.000]	Änderung 2030 gegen- über 2010
Neubau	16.318	6.022	-63,10 %
Erneuerung	30.944	33.105	6,99 %
Gesamt	47.262	39.127	-17,21 %

Quelle: Die Daten für Neubau 2010 basieren auf Steger et al. [2011]; die Daten zur Erneuerung 2010 basieren auf Bergmann et al. [2015]. Die Angaben für 2030 und die Änderungen basieren auf eigenen Berechnungen.

7.2.2.6 Kabelinfrastruktur und sonstige Infrastruktur

Für die Modellierung musste ein Indikator gefunden werden, der die Veränderungen im Bereich der Kabelinfrastruktur repräsentiert und sowohl die Aufwendungen für die Informations- und Kommunikationsinfrastruktur als auch für die strombezogene Infrastruktur berücksichtigt. Ähnlich den obigen Ausführungen wurde von Materialaufwendungen ausgegangen, die von Steger et al. [2011] und Bergmann et al. [2015] und im Rahmen der Kartierung anthropogener Lager von UBA [2016a] erhoben wurden. Dabei wurden die Aufwendungen, die die überregionale Infrastruktur betreffen, getrennt von denen berechnet, welche die kommunale Infrastruktur betreffen. Bei der übergeordneten Infrastruktur, insbesondere im Strombereich (bezüglich der Hoch- und Mittelspannungsleitungen), wurden Netzausbaupläne und dabei insbesondere Kabelleitungen zur Integration im Offshore-Bereich weitestgehend berücksichtigt. Das heißt, es wurde insgesamt von einem kontinuierlichen Zubau ausgegangen. Bei der kommunalen Infrastruktur (bezogen auf den Strom betrifft das die Niederspannungsleitungen) wurde die Annahme zur rückläufigen Neuausweisung von Siedlungsfläche zugrunde gelegt und damit von einem rückläufigen Zubau ausgegangen. Da die Niederspannungskabel nahezu ausschließlich unterirdisch, die überregionalen Leitungen jedoch überwiegend oberirdisch verlegt werden, und dieser Unterschied auch für die Zukunft unterstellt wurde, dominieren die rückläufigen Materialaufwendungen im kommunalen Bereich den Gesamtrend. Für den Neubau gehen die Materialaufwendungen daher um rund 29 % zurück.

Bezogen auf die Unterhaltungsaufwendungen wurde wie oben der Methodik und den Annahmen von Bergmann et al. [2015] bezüglich der IuK-Infrastruktur und von Steger et al. [2011] bezüglich der Stromnetze gefolgt. Die IuK-Infrastruktur ist bei Steger et al. [2011] nicht enthalten, die Erneuerungsaufwendungen für die Stromkabelinfrastruktur sind jedoch umfassender berücksichtigt. Die jeweiligen Berechnungen für den Unterhaltungsaufwand wurden auf die errechneten neuen Bestände in 2030 übertragen. Konsistent zu den Berechnungen zu kommunalen Straßen und zur kommunalen Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur wurde unterstellt, dass der Neubau linear rückläufig erfolgt. Insgesamt steigen demzufolge die Unterhaltungsaufwendungen um 27 %. Da die Aufwendungen für den Neubau die Aufwendungen für die Unterhaltung der Infrastrukturbereiche überwiegen, ist der Materialaufwand für diesen Infrastrukturbereich insgesamt rückläufig.

Tabelle 40: Materialaufwand für die kabelbezogene Infrastruktur und Veränderungen 2030 gegenüber 2010

	2010 [1.000 t]	2030 [1.000 t]	Veränderung 2030 gegenüber 2010
Neubau	6.274	4.476	-28,66 %
Erneuerung	1.980	2.513	26,94 %
Gesamt	8.254	6.989	-15,32 %

Quelle: Steger et al. [2011] für den Neubau 2010; Bergmann et al. [2015] für den Erneuerungsaufwand 2010; eigene Berechnungen für 2030 und Veränderungen 2030 gegenüber 2010.

Die sonstigen Infrastrukturbereiche umfassen eine Vielzahl verschiedener Bereiche, darunter Flughäfen, Raffinerien und Sportanlagen. Bezogen auf die Flughäfen sind außer Abschätzungen zu dem jährlichen Erneuerungsbedarf für die Start- und Landebahnen keine belastbaren Daten, die eine Gesamtabschätzung der Entwicklungen zulassen, vorhanden. In 2010 wurden Teile des Berliner Flughafens ausgebaut, und es wurde vereinfacht unterstellt, dass auch in 2030 Aktivitäten im Bereich des Flughafenbaus stattfinden. In Summe wurden jedoch aufgrund fehlender belastbarer Daten die Materialaufwendungen in diesem Teilbereich als konstant angenommen. Gleichermaßen wurde aufgrund fehlender belastbarer Daten für die Sportanlagen unterstellt.

Bezogen auf die Raffinerien waren aus Konsistenzgründen zusätzliche Prüfungen zu leisten. So ist einerseits davon auszugehen, dass die Verkehrsleistung steigt (+10 %, siehe Kapitel 8.2.2) wie auch der Anteil der Elektro- und Hybridautos (3 bzw. 17 % Marktanteil). In Summe jedoch gleicht sich beides mehr oder weniger aus, womit die Nachfrage nach konventionellem Kraftstoff im AZE-Szenario insgesamt in etwa konstant bleibt. Hinsichtlich des voraussichtlichen Anstiegs der Nachfrage in Bezug auf Luft-, Schiff- und sonstige Verkehrsträger wird davon ausgegangen, dass dieser von laufenden Raffinerien gedeckt werden kann. Das heißt, in Summe wird davon ausgegangen, dass sich die Anzahl der Raffinerien unter den Bedingungen im Szenario AZE nicht ändern wird. Damit bleiben auch die Aufwendungen für die Unterhaltungsleistungen konstant. Zusammenfassend wird davon ausgegangen, dass in 2030 im Bereich "sonstiger Tiefbau" keine Veränderung im Vergleich zum Jahr 2010 stattfindet. Demzufolge fließen 2030 die gleichen Mengen Material in diesen Bereich wie im Jahr 2010. Auch hinsichtlich Zusammensetzung und Materialintensität wird im Szenario AZE davon ausgegangen, dass es keine signifikanten Veränderungen zu 2010 gibt.

7.2.3 Überleitung der Daten in URMOD

Bauleistungen: Der Faktor Bauleistungen (Tabelle 1, Faktor 9) in URMOD berücksichtigt den kumulierten Rohstoffaufwand für die Herstellung der Bauinvestitionen sowie für den laufenden Erhaltungsaufwand für Bauten nach Bauarten. Für die Abbildung dieses Effekts müssen folgende Parameterarten variiert werden:

- ▶ Inputkoeffizienten (A-Matrix) nach Gütergruppen für die Bauproduktion (siehe Klassifikation der Gütergruppen für Urmod) nach Bauarten (siehe Klassifikation der Gütergruppen)
- ▶ Inputkoeffizienten (A-Matrix) für den laufenden Erhaltungsaufwand von Bauten (Vorleistungsinput) nach Bauarten (Gütergruppen) und Produktionsbereichen
- ▶ Bauinvestitionen (Y-Matrix) nach Gütergruppen und Investitionskategorien (siehe Klassifikation der letzten inländischen Verwendungen)

Input Bauproduktion: Die Ursprungsdaten zur Veränderung des Güterinputs in die Bauproduktion wurden in einem ersten Schritt so umgeformt, dass sie der Gütergruppengliederung der IOT entsprechen. Da die Veränderung der Inputkoeffizienten der A-Matrix benötigt wird (Veränderung des jeweiligen Inputs bei konstantem Output) sind in einem weiteren Schritt die gegebenen Entwicklungen der

Inputmengen um die Veränderung der jeweiligen Outputs zu bereinigen (Bereinigung um den Skaleneffekt).

Erhaltungsaufwand für Bauten: Zur Ableitung der Inputkoeffizienten für den Erhaltungsaufwand wurden die Entwicklungen der Aufwendungen aus den Sektorstudien um den Skaleneffekt bereinigt, damit die Entwicklungen des Erhaltungsaufwandes je Einheit Output der empfangenen Bereiche abgebildet werden.

Bauinvestitionen: Die Veränderung der Bauleistungen, die in die Bauinvestitionen fließen, können unmittelbar auf die relevanten Zellen der Y-Matrix übertragen werden.

7.3 Technologischer Wandel 2030

Im Bereich Hochbau wurden verschiedene Ansätze mit einem substantiellen Potenzial zur Rohstoffeinsparung untersucht. In Tabelle 41 ist eine Übersicht über die Technologien des Hochbaus dargestellt, die im Folgenden genauer untersucht werden.

Tabelle 41: Technologien mit Rohstoffeinsparpotenzial im Hochbau für TW2030

Bereiche	Technologien
Senkung der Materialintensität im Hochbau	Holzhäuseranteil EFH/MFH Beton (Materialeinsparung durch Planung /Technik) Einsatz von Dämmstoffen Wohnungs-Neubau
Elektroleitungen	Substitution von Kupferleitungen durch Aluminium
Wärmedämmung	Vakuumisolationspaneele (VIP) Vakuumisolationsverglasungen (VIG)
Ressourceneffizienterer Beton	Substitution von Portlandzement durch alternative Bindemittel
Recyclingsteine	Recyclingmauerstein aus Sandstein Recycling für Leichtbetonsteine

Anmerkung: Im Detail untersuchte Bereiche sind grün markiert.

Quelle: eigene Darstellung

7.3.1 Senkung der Materialintensität im Hochbau

Basis der Materialeffizienzbetrachtungen zur Einsparung im Hochbau für das Jahr 2030 ist die in Kapitel 7.1.2 dargestellte Studie von Deilmann, Krauß, et al., (2014) und die sich daraus ergebende Mengenbetrachtung (vgl. ebenfalls Kapitel 7.1.2). Zur Berechnung der Änderung des Materialeinsatzes für das Szenario TW30 wurde das Nachhaltigkeitsszenario mit Recycling („NA-RC 2030“) aus der genannten Studie genutzt. Dieses Szenario geht gegenüber dem im AZE genutzten Szenario für 2030 von einem größeren Holzhäuseranteil (EFH: 30 % gegenüber 10 % im AZE und bei den MFH 5 % statt 1 %), einer Einsparung von 10 % Beton durch bessere Planung und Technik sowie einem um 30 % höheren Einsatz von Dämmstoffen (mit entsprechenden Einsparungen beim Energieverbrauch) aus. Ein weiterer wesentlicher Unterschied des Szenarios „NA-RC 2030“ gegenüber dem Referenzszenario besteht im Verhältnis der Ein- und Zweifamilienhäuser zu den Mehrfamilienhäusern. In beiden Szenarien wird von jährlich 1.725.000 zu bauenden Wohneinheiten ausgegangen, beim Referenzszenario befinden sich davon 1.065.000 in Ein- und Zweifamilienhäusern, während im „NA-RC 2030“ Szenario mit 1.192.000 die Mehrzahl in Form von Mehrfamilienhäusern errichtet werden.

In der Tabelle 42 sind die sich daraus ergebenden Materialeinsatzmengen für TW30 zusammen- und den Werten für 2010 aus Tabelle 34 gegenüber gestellt, wobei die Gesamtmengen aufgrund der beobachteten Diskrepanzen zwischen Deilmann et al., 2014a und URMOD (mit Ausnahme der gipshaltigen

Materialien) verdoppelt wurden. In URMOD übertragen wurden die prozentualen Veränderungen, die sich jeweils zwischen den Mengen 2010 und 2030 ergeben. Man erkennt, dass der Baustoffeinsatz im Szenario TW30 in fast allen Bereichen rückläufig ist und nur bei den Dämmstoffen zunimmt.

Tabelle 42: Materialeinsatz (in Mio. t) im Hochbau im Jahr 2010

Baustoffe/Produkte	2010	TW30	Verände- rung 2030 ggü. 2010	TW30+	Verände- rung 2030 ggü. 2010
Beton	83,416	78,258	-6,18 %	36,61	-56,11 %
Ziegel	15,810	13,744	-13,07 %	6,608	-58,20 %
Kalksandstein	10,504	10,556	0,50 %	5,11	-51,35 %
Porenbeton	3,000	2,788	-7,07 %	0,946	-68,47 %
Sonst. Mineralisch (inkl. Bodenbe-läge)	97,197	84,719	-12,84 %	47,265	-51,37 %
Gipskarton	0,168	0,258	53,57 %	0,162	-3,57 %
Sonst. Gipsprodukte	3,244	2,9	-10,60 %	1,586	-51,11 %
Bau-/Konstruktionsholz	5,420	5,064	-6,57 %	3,148	-41,92 %
Sonst. Holz (Inkl. Bodenbeläge)	2,034	2,02	-0,69 %	1,36	-33,14 %
Flachglas	2,7698	2,4431	-11,80 %	1,419	-48,77 %
Mineral. Dämmstoffe	0,550	0,753	36,91 %	0,466	-15,27 %
Kunststoff-Dämmstoffe	0,874	1,139	30,32 %	0,694	-20,59 %
Kunststoff-Fenster / -Türen	1,182	1,016	-14,04 %	0,512	-56,68 %
Sonstige Kunststoffe (inkl. Beläge & Leitungen)	2,024	2,28	12,65 %	1,384	-31,62 %
Metalle (inkl. Leitungen)	18,412	18,148	-1,43 %	10,022	-45,57 %
Sonst. Stoffe (inkl. Leitungen & Be-läge)	1,514	1,432	-5,42 %	0,77	-49,14 %
Gesamt	242,134	227,518	-6,04 %	118,062	-51,24 %

Quelle: Deilmann et al. [Deilmann et al., 2014a], eigene Berechnung.

7.3.2 Ersatz von Kupfer in Gebäudeelektroinstallationen

Durch Substitution von Kupfer in **Elektroleitungen bei der Gebäudeinstallation** lässt sich Material einsparen, da Aluminium Strom zwar nur halb so gut leitet wie Kupfer, es aber nur ein Drittel der Dichte von Kupfer und, vor allem, weniger als ein Achtel des spezifischen KRA aufweist (vgl. Tabelle 14). Dabei wird für Kupfer ein Sekundärkupferanteil von 50 % angenommen und für Aluminium, dass es sich um eine Knetlegierung mit 30 % Sekundäraluminium handelt. Für den Vergleich wird eine Kupferleitung mit 1,5 mm² Drahtquerschnitt zugrunde gelegt, die durch eine Aluminiumleitung mit 2,5 mm² Querschnitt ersetzt wird. Mit beiden Querschnitten können Ströme von 16 Ampère übertragen werden [Kalsen-Friese, 2012], was einer typischen Leitungsauslegung in Gebäuden entspricht.

Es wird im Szenario TW30 unterstellt, dass eine Substitution von 20 % der ca. 316.000 t Kupfer erfolgt, die in Hausleitungen eingesetzt werden – das sind 63.200 t. Auf Basis der in Tabelle 14 angegebenen Drahtmassen beträgt der Massen-Ersatzfaktor für die Substitution von Kupfer durch Aluminium in der Elektroinstallation 6,8/13,4 = 0,51. Mithin müssen zwecks Ersatz des Kupfers (0,51 * 0,2 *

316.600 =) 32.200 Jahrestonnen Aluminiumdraht für die Elektroinstallation in Gebäuden Deutschlands eingesetzt werden.

Der Ersatz von Kupfer durch Aluminium hat neben dem geringeren Rohstoffaufwand auch negative Wirkungen (z.B. höheren KEA) und technische Herausforderungen zur Folge, die in Kapitel 4.3.1.3 dargestellt sind, hier aber nicht relevant sind.

7.3.3 Einsparung von Rohstoffen bei der Wärmedämmung

Es wurden zwei Technologien untersucht, Vakuumisolationsglasfenster und Vakuumisolationspanele (VIP). Letztere bestehen aus einem Stützkern aus einem pulverförmigen Dämmstoff wie z. B. pyrogene Kieselsäure, der mehrlagig mit luftdichten Folien ummantelt ist. Seine Festigkeit und Steifigkeit erhält ein VIP durch das bestehende Vakuum und den Druck auf die Folie. Eine Dämmung mit 3,3 cm starken VIP entsprechen hinsichtlich der Dämmwirkung einer ungefähr 25 cm starken EPS-Dämmung (Schonhardt et al. 2003; Heinemann, Weinländer und Gintars 2011) Hochgerechnet auf die in Deutschland jährlich zum Austausch oder (Neu-)Einbau anstehende Fensterfläche würde hier bezogen auf die reine Masse eine Materialeinsparung in Höhe von 12.000 t resultieren. Da die eingesparten Dämmmaterialien tendenziell einen geringeren spezifischen KRA aufweisen als die Substitute, ist unklar, ob sich letztlich bzgl. des KRA überhaupt ein positiver Saldo ergäbe.

Gegenüber der in Deutschland üblichen Zweischeibenverglasung mit Edelgasfüllung hat ein Vakuumisolationsglasfenster im Zweischeibenaufbau mit einem Wärmeübertragungskoeffizienten von $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eine zwei- bis dreifach bessere Dämmwirkung. Die ebenfalls relativ neue Dreifachverglasung mit Edelgasfüllung hat einen vergleichbaren Wärmeübertragungskoeffizienten von $U = 0,5$ bis $0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Heinemann, Weinländer und Gintars 2011; Glaser 2012). Der Einspareffekt bestünde also im Wesentlichen in der Einsparung der dritten Glasscheibe und beliefe sich auf Deutschland hochgerechnet auf ca. 100.000 t. Angesichts des unklaren Saldos der Einsparwirkung der Vakuumpanele und des geringen Effektes der Vakuumisolationsfenster wurden beiden Technologien in URMOD nicht berücksichtigt.

7.3.4 Ressourceneffizienterer Beton

Derzeit werden verschiedene Verfahren entwickelt, um die Herstellung von Zement effizienter zu gestalten. Dazu gehört die Entwicklung neuer Bindemittel, die mehr oder weniger ohne Klinkerphasen auskommen, wie beim Belit-Calciumsulfoaluminat-Ternesit-Zement, der von der HeidelbergCement entwickelt wird und um 150 bis 200°C geringere Temperaturen benötigt [HeidelbergCement, 2014]. Ein anderer Ansatz ist der Einsatz von Magnesiazement (Sorelzement), welcher von der 2012 in Insolvenz gegangenen britischen Firma novacem verfolgt wurde [Mötzl, 2014]. Der vielleicht radikalste und hierzulande bekannteste neue Prozess ist die Herstellung des hydraulischen Bindemittels Celitement, welches bei 200 °C in einem Druckautoklaven produziert wird. Ziel ist es dabei, gezielt nur die verklebenden Calciumhydrosilikate herzustellen, die nach dem Wässern unter Bildung von Calciumsilikathydraten (C-S-H-Phasen) erhärten, nicht jedoch zusätzlich große Mengen von Calciumhydroxid, die bei der herkömmlichen Zementherstellung als ungenutztes Nebenprodukt entstehen (vgl. 4.3.1.2 für mehr Details).

Obwohl der Celitement®-Ansatz nicht der einzige Ansatz zur Reduktion des erforderlichen Rohstoffinputs ist, liegen für ihn die detailliertesten Informationen vor. Außerdem ist er der bislang wirksamste. Obwohl damit nicht impliziert werden soll, dass er den einzigen oder den Ansatz mit der größten Chance zur Umsetzung darstellt, wird im Rahmen der vorliegenden Studie exemplarisch unterstellt, dass die Reduktion des Rohstoffeinsatzes bei der Zementherstellung mittels des Celitement®-Prozesses herbeigeführt wird.

Durch den Einsatz des Celitement®-Verfahrens werden 68 % weniger Kalk, kein Ton und kein Eisen-erz, dafür aber mehr Sand verbraucht. Während beim Portlandzement ca. 4.360 MJ Primärenergie pro

Tonne Klinker benötigt werden, ist der Energiebedarf für Celitement® etwa 3.150 MJ pro Tonne (erhöhter Strombedarf bei geringerem Wärmebedarf, der Mahlaufwand zur Produktmahlung ist im Vergleich zur Mahlung von Portlandzementklinker erhöht). Diese Zahlen schlagen sich in URMOD in einer entsprechenden Änderung der Inputstruktur des Wirtschaftszweiges "Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips" nieder. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass im Szenario TW30 die gesamte Zementherstellung auf die neuen, rohstoffeffizienteren Verfahren umgestellt werden können. Bislang existieren lediglich Pilot- und kleine Demonstrationsanlagen. Mit neuen Anlagen im 10.000-Tonnen-Maßstab ist kaum vor 2020 zu rechnen, so dass bis 2030 vielleicht von einer Gesamtproduktionskapazität für Celitement® von etwa 100.000 Jahrestonnen zu rechnen ist, was etwa 6 % der aktuellen Gesamtkapazität der Zementherstellung entspräche. Diese Annahme bezieht sich auf die gesamte Zementproduktion und ist somit für den Hochbau und den Tiefbau relevant. Eine weitergehende Differenzierung zwischen beiden Bereichen wird nicht vorgenommen.

7.3.5 Recycling von Mauersteinen

Das **Recycling von Bausteinen** wurde für Kalksandsteine und Leichtbetonsteine modelliert. Beim Recycling von Kalksandstein ist nach Eden und Middendorf [Eden / Middendorf, 2009] die Verwendung von Kalksandstein-, Ziegel-, Beton- und Naturstein-Recycling-Material grundsätzlich möglich. Das Recyclingmaterial ersetzt dabei den Sand, der zwischen 65 % bis 85 % des Kalksandsteins ausmacht [Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., 2014]. Um Qualitäts-Einbußen gering zu halten, sollte nur die feine Fraktion des RC Materials (0/2 mm) benutzt und ggf. weitere energie- bzw. materialtechnisch aufwändige Maßnahmen durchgeführt werden. Dazu gehören die Steigerung des Verdichtungsdrucks, die Erhöhung der Menge an gebranntem Kalk oder die Verlängerung der Härtezeiten. Die gesamte im Hochbau eingesetzte Menge an Kalksandsteinen wird der Studie von Deilmann et al. (2014) entnommen (vergleiche Tabelle 42). Für das Szenario TW30 wird unterstellt, dass 33 % der Kalksand-Mauersteine durch Recyclingsteine ersetzt werden, so dass ca. 3 Mio. Tonnen Sand eingespart werden können.

Zur Modellierung der Herstellung von Leichtbetonsteinen wird auf die Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Aufbaukörnungen“ [Schnell et al., 2013] zurückgegriffen. In diesem Vorhaben wird belegt, dass sich Mauerwerkbruch als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen ähnlich wie Blähton eignet und sich Schwankungen in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials wenig auf das Produkt auswirken. Das Verfahren könnte sich für die Rückgewinnung des im Mauerwerkbruch enthaltenen Gipses eignen. Es wird unterstellt, dass der Anteil an Leichtbetonzuschlag bei 60 % liegt und dieser aus Blähton besteht. Die gesamte im Hochbau eingesetzte Menge an Leichtbetonsteinen wird ebenfalls der Studie von Deilmann et al. [2014b] bzw. Tabelle 42 entnommen. Auch in diesem Fall wird angenommen, dass im Szenario TW30 insgesamt 33 % der Leichtbetonsteine durch Recyclingsteine ersetzt werden. Dadurch errechnet sich eine Einsparung von 0,55 Mio. t Blähton.

7.3.6 Straßenverkehr: Asphalt-Recycling

In der vom Öko-Institut durchgeführten Studie "Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau" [Bergmann et al., 2015] wird Asphalt nicht nur als eine der wichtigsten Rohstoffsenken im Tiefbau angesehen, sondern als eine, bei der ein substanzielles Potenzial für Recycling und damit für die Einsparung von Primärrohstoffen besteht. Asphalt stellt ein Gemisch von 95 % Gesteinskörnung und 5 % Bitumen dar und wird vorwiegend für die Deckschicht und bestimmte (wasserdichte) Zwischenschichten von Straßen verwendet. In einem gewissen Umfang (ca. 25 %) wird Asphalt auch heute schon für die gleiche Verwendung recycelt; der größere Teil geht jedoch in andere Verwendungen, z.B. die Erstellung des Straßenunterbaus und ist damit für die ursprüngliche Verwendung verloren, so dass dort frisches Primärmaterial zum Einsatz kommen muss. Der Studie entsprechend sollte es möglich sein, insbesondere im Rahmen der Straßensanierung den Anteil des Sekundärmaterials am vorhandenen Asphaltbedarf auf 71 % zu steigern. Dazu wird die Asphaltsschicht vom zu sanierenden Straßenabschnitt möglichst sauber abgetrennt, in eine geeignete Körnungsgröße aufgebrochen und mit frischem Bitumen versetzt

und gemischt. Das Altmaterial verlässt typischerweise die Baustelle nicht, so dass kein Abfall und offiziell (d.h. bzgl. Warendeklaration) auch kein Sekundärasphalt in Erscheinung tritt. Der volkswirtschaftliche Effekt besteht folglich darin, dass lediglich die Nachfrage nach primärer Gesteinskörnung und Bitumen sinkt. Durch dieses Vorgehen sollte es möglich sein, pro Jahr bis zu 20 Mio. Tonnen Primärmaterial einzusparen. Das Verhältnis von 95:5 verschiebt sich dabei leicht zugunsten der Gesteinskörnung, da für die Herstellung des Sekundärasphalts in geringen Mengen Primärbitumen benötigt werden. Hinsichtlich der Ausgestaltung des Szenarios TW30 wird davon ausgegangen, dass bis 2030 50 % des vorhandenen Einsparpotenzials umgesetzt werden.

7.3.7 Überleitung der Daten in URMOD

Für Zwecke des TW-Szenarios wurden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt: „Ressourceneffizienter Beton“, „Recycling von Straßenbaumaterialien“, „Materialeffizienz im Hochbau“, Recycling von Kalksandsteinen“, Recycling von Leichtbetonsteinen“ und „Kabelleitungen im Hochbau“.

Ressourceneffizienter Beton: Der Effekt „Ressourceneffizienter Beton“ (Tabelle 2, Faktor 17) bezieht sich auf die Technikänderung (A-Matrix) bei der Zementherstellung durch Substitution von Portlandzement durch ressourceneffizientere Varianten. Da der Inputbedarf von ressourceneffizientem Beton geringer ist, kommt es zu einem Materialeinspareffekt. Die Auflösung der verfügbaren IOT reicht nicht aus, um diesen speziellen Effekt unmittelbar abzubilden. Die Zementproduktion müsste unterteilt werden in Portlandzement, ressourceneffizienter Zement und übrige Zementproduktion. Zur Ableitung der Veränderung der relevanten Zellen der A-Matrix in der existierenden IOT wird deshalb ein externes Modell vorgeschaltet, das die notwendigen Differenzierungen enthält.

Die Rohstoffeinsparungen bei der Zementherstellung wirken sich entsprechend auf die nachgelagerten Produktionsstufen, Betonherstellung und Bauleistungen aus.

Recycling von Straßenbaumaterialien: Der Effekt Recycling von Straßenbaumaterialien (Tabelle 2, Faktor 18) betrachtet die Substitution von Asphalt durch Sekundärmaterial beim Straßenbau (verstärktes Recycling). Die Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe wird in der A-Matrix dadurch abgebildet, dass bei den relevanten Produktionsprozessen der Koeffizient für das jeweilige Sekundärmaterial erhöht und als Gegenbuchung der Koeffizient für das Primärmaterial sich entsprechend vermindert.

Materialeffizienz im Hochbau: Der Effekt Materialeffizienz im Hochbau (Tabelle 2, Faktor 19) berücksichtigt mehrere Einflussfaktoren, wie verminderter Betoneinsatz durch bessere Planung/Technik, höherer Anteil von Holzhäusern. Diese Faktoren beeinflussen die Inputstruktur im Hochbau. Für die Ableitung der Indikatoren für die entsprechende Änderung der Produktionstechnik (A-Matrix) müssen die Ursprungswerte insbesondere um den Skaleneffekt bereinigt werden.

Recycling von Kalksandsteinen: Der Effekt Recycling von Kalksandsteinen (Tabelle 2, Faktor 20) betrachtet die Substitution von Sand durch Sekundärmaterial beim Produktionsbereich Herstellung von Mauersteinen (Untergruppe von 23.6 Beton). Die Veränderungen werden über einen externen Modellansatz, der die IOT weiter differenziert und in URMOD übertragen. Die Substitution von Primär-durch Sekundärrohstoffe wird in der A-Matrix dadurch abgebildet, dass bei den relevanten Produktionsprozessen der Koeffizient für das jeweilige Sekundärmaterial erhöht und als Gegenbuchung der Koeffizient für das Primärmaterial sich entsprechend vermindert.

Recycling von Leichtbetonsteinen: Der Effekt Recycling von Leichtbetonsteinen (Tabelle 2, Faktor 21) betrachtet die Substitution von Ton durch Sekundärmaterial beim Produktionsbereich Betonherstellung (Untergruppe von 20.6). Ferner werden Einsparungen von Erdgas durch die Verwendung von Recyclingmaterial berücksichtigt. Die Veränderungen werden über einen externen Modellansatz, der die IOT weiter differenziert, geschätzt und auf in URMOD übertragen. Die Substitution von Primär-

durch Sekundärrohstoffe wird in der A-Matrix dadurch abgebildet, dass bei den relevanten Produktionsprozessen der Koeffizient für das jeweilige Sekundärmaterial erhöht und als Gegenbuchung der Koeffizient für das Primärmaterial sich entsprechend vermindert.

Kabelleitungen im Hochbau: Der Effekt Kabelleitungen im Hochbau (Tabelle 2, Faktor 22) betrachtet die Substitution von Kupferkabeln im Hochbau durch Aluminiumkabel.

Der Substitutionsprozess wird folgendermaßen modelliert: Modifikation der IOT durch Umsetzung der entsprechenden Metallinputs von Bereich Elektrotechnik zum Bereich Elektroinstallation. Anpassung der betroffenen Inputkoeffizienten (A-Matrix) bei der Elektroinstallation. Im Hinblick auf die Schätzung der eingesparten RME ist zu beachten, dass es sich bei den substituierten Kupfermengen und bei den zusätzlich eingesetzten Aluminiummengen teilweise um Sekundärmetalle handelt.

7.4 Weitreichende Tendenz TW30+

7.4.1 Senkung der Materialintensität im Hochbau

Basis der Materialeffizienzbetrachtungen zur Einsparung im Hochbau für TW30+ ist das Nachhaltigkeitsszenario mit Recycling („NA-RC 2050“) aus der Studie Deilmann et al. [2014]. Dieses Szenario basiert auf den in Kapitel 7.3 dargestellten größeren Holzhäuseranteil, der Einsparung von 10 % Beton durch bessere Planung & Technik sowie auf einem um 30 % höheren Einsatz von Dämmstoffen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied gegenüber im TW30 genutzten „NA-RC 2030“ Szenario besteht in der Reduktion der Anzahl der zu errichtenden Wohneinheiten von 1.725 Mio. auf 965.000, von denen 35 % in Ein- und Zweifamilienhäusern errichtet werden. Die Annahme der Reduktion der Wohneinheiten bezieht sich dabei auf das Jahr 2050, ausgelöst durch den Rückgang der Bevölkerung. Die Ergebnisse für TW30+ sind in Tabelle 42 dargestellt.

7.4.2 Ersatz von Kupfer in Gebäudeelektroinstallationen

Den Berechnungen zum Ersatz von Kupfer durch Aluminium in der Elektroinstallation von Gebäuden in der Abschätzung TW30+ liegen die gleichen Annahmen und Überlegungen wie in Kapitel 7.3.2 zugrunde. Der einzige Unterschied besteht im Anteil des Potenzials, welcher zur Umsetzung ansteht: 100 %. Dementsprechend werden jährlich 316.000 t Kupfer eingespart und 161.000 t Aluminium zusätzlich aufgewendet.

7.4.3 Ressourceneffizienter Beton

Für TW30+ wird unterstellt, dass 50 % des Zements nach innovativen Zementherstellungsverfahren produziert werden. Dieser Zement findet in diesem Umfang, wie im Szenario TW30 erläutert, (vgl. Kapitel 7.3.4) sowohl im Hochbau als auch im Tiefbau Verwendung.

7.4.4 Recycling von Mauersteinen

Für TW30+ wird unterstellt, dass jeweils 66 % der Kalk- und Leichtbetonmauersteine durch Recyclingsteine ersetzt werden. Da, wie in Kapitel 7.4.1 dargestellt, die Anzahl der zu erstellenden Wohneinheiten im Szenario TW30+ deutlich geringer ist, sind auch die insgesamt eingesetzten Mengen entsprechend geringer (vgl. Tabelle 42). Folglich sind die zusätzlichen Einsparungen aufgrund des Recyclings von Mauersteinen mit 2,9 Mio. t Sand und 0,375 Mio. t Blähton trotz des höheren Recyclinggrades von 66 % nicht größer als im Szenario TW30.

7.4.5 Straßenverkehr: Asphalt-Recycling

Für die Berechnung der Rohstoffeinsparung durch verstärktes Asphaltrecycling im Straßenverkehr in TW30+ kommt im Grunde der gleiche Ansatz zur Anwendung wie im Fall des Szenarios TW30 (vgl. Kapitel 7.3.6). Der einzige Unterschied besteht darin, dass für TW30+ für die Maßnahme von einem Umsetzungsgrad von 90 % anstelle von 50 % ausgegangen wird.

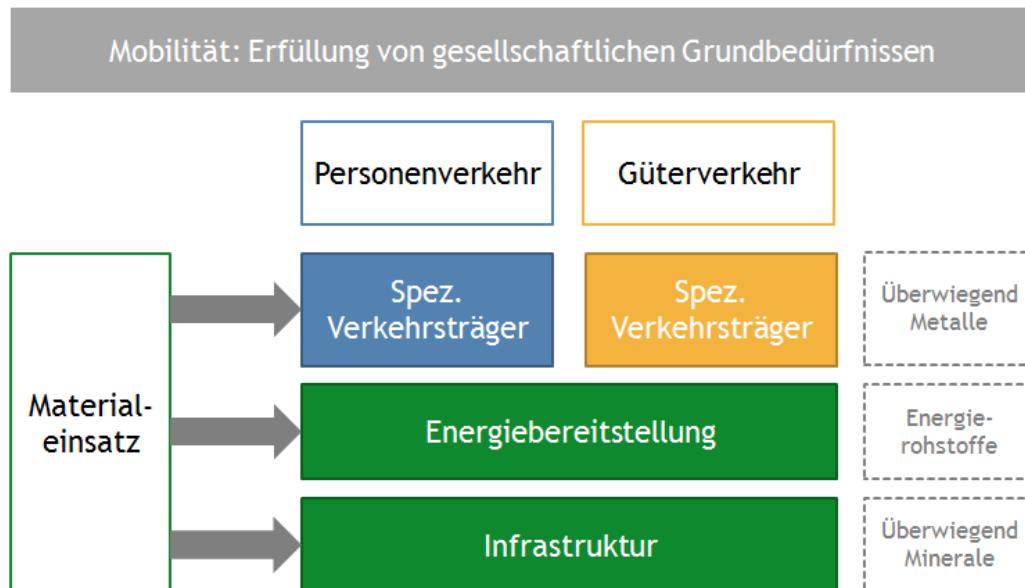
7.4.6 Überleitung der Daten in URMOD

Das TW30+ Szenario wird für alle Faktoren in analoger Weise wie bei TW30 modelliert.

8 Szenariengestaltung Verkehrssektor

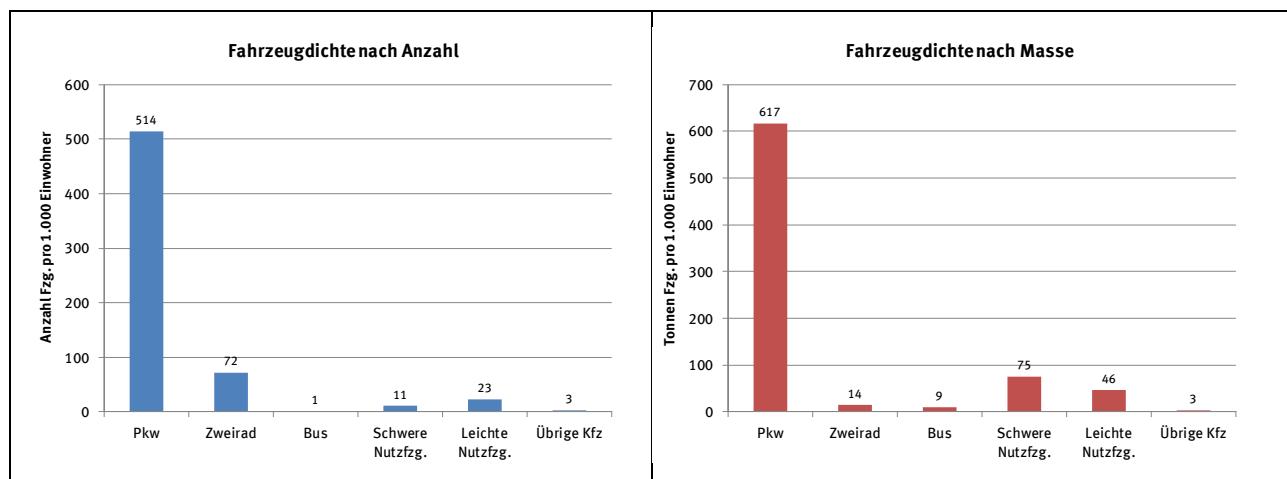
Verkehr leitet sich aus dem Mobilitätsverhalten der Menschen ab. Mobilität bildet die Voraussetzung zur Erfüllung von gesellschaftlichen Grundbedürfnissen. Verkehr ist demnach gleichzeitig Folge und ermöglicht überhaupt erst räumliche Mobilität. Verkehr äußert sich entweder in der Ortsveränderung von Personen oder im Transport von Gütern oder Informationen. Verkehr erfolgt über verschiedene Verkehrsmittel (z.B. Auto, Bahn, Leitungen, etc.) und ist eingebettet in ein Verkehrssystem (Gesamtheit der Verkehrsmittel, Verkehrsträger und Verkehrsregeln). Da Verkehr in nahezu allen Lebensbereichen des Menschen eine wichtige Rolle spielt, hat er einen bestimmenden Beitrag in der Rohstoffnutzung. Er benötigt Materialien zur Fertigung der Verkehrsmittel und Verkehrswege sowie Energie-Rohstoffe zur Bewegung des Verkehrs. 8 % des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffdurchsatzes (Abbildung 6) entfällt auf den Sektor Verkehr (Verkehrsdiensleistungen und Fahrzeuge, ohne Verkehrsbauten). Bei der Verarbeitung und der Verbrennung von Rohstoffen werden Schadstoffe emittiert, welche die Umwelt schädigen und die menschliche Gesundheit gefährden. Die Verbrennung von Energie-Rohstoffen im Verkehrssektor ist in Deutschland für 18 % der Treibhausgase verantwortlich [UBA, 2014b]. Abbildung 39 zeigt die relevanten Materialflüsse innerhalb des Verkehrssektors. Dabei werden überwiegend Metalle für den Bau der Verkehrsmittel im Personen- und Güterverkehr eingesetzt; für die Energiebereitstellung zur Betreibung des Verkehrs werden Energie-Rohstoffe benötigt. Die Verkehrsinfrastruktur ist ebenfalls sehr rohstoffintensiv, hier werden insbesondere Mineralien eingesetzt (Kapitel 7).

Abbildung 39: Materialeinsatz im Verkehrssektor



Bezogen auf die Materialintensität der einzelnen Verkehrsmittel haben die Pkws die mit Abstand größte Bedeutung, wie die Gegenüberstellungen der Fahrzeugbestände nach Anzahl und durchschnittlichem Gewicht zeigen (Abbildung 41). Zweiräder treten bei der Massenbetrachtung weiter in den Hintergrund, während Busse und schwere Nutzfahrzeuge aufgrund ihres hohen Einzelfahrzeuggewichtes an Bedeutung gewinnen.

Abbildung 40: Fahrzeugdichte nach Anzahl und Masse in Deutschland 2010



Zur Abschätzung der Fahrzeugmasse wurden durchschnittliche Fahrzeuggewichte von mittleren Fahrzeugen angenommen.

Quelle: [KBA, n.d.].

8.1 Status quo 2010 und Trends in der Vergangenheit

8.1.1 Personenverkehr

Seit den 1960er Jahren hat sich die Verkehrsleistung von Personen (ausgedrückt in Personenkilometer) bis 2010 mehr als vervierfacht (+325 %). Auch die spezifische Verkehrsleistung pro Einwohner zeichnet einen ähnlichen Verlauf (+200 %). Dass die absolute Verkehrsleistung noch stärker zugenommen hat, ist auf die positive Bevölkerungsentwicklung zurückzuführen (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43: Entwicklung der absoluten und spezifischen Verkehrsleistung in Deutschland (1960-2010)

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Verkehrsleistung [Mrd. pkm]	262	483,7	603,5	729,7	1045	1117
Pro-Kopf VL [Tsd. pkm/Einw.]	4,6	7,9	9,8	11,5	12,7	13,6

Die Jahre 1960-1990 gelten für Westdeutschland.

Quelle: verschiedene Jahrgänge Verkehr in Zahlen [BMVI, 2014].

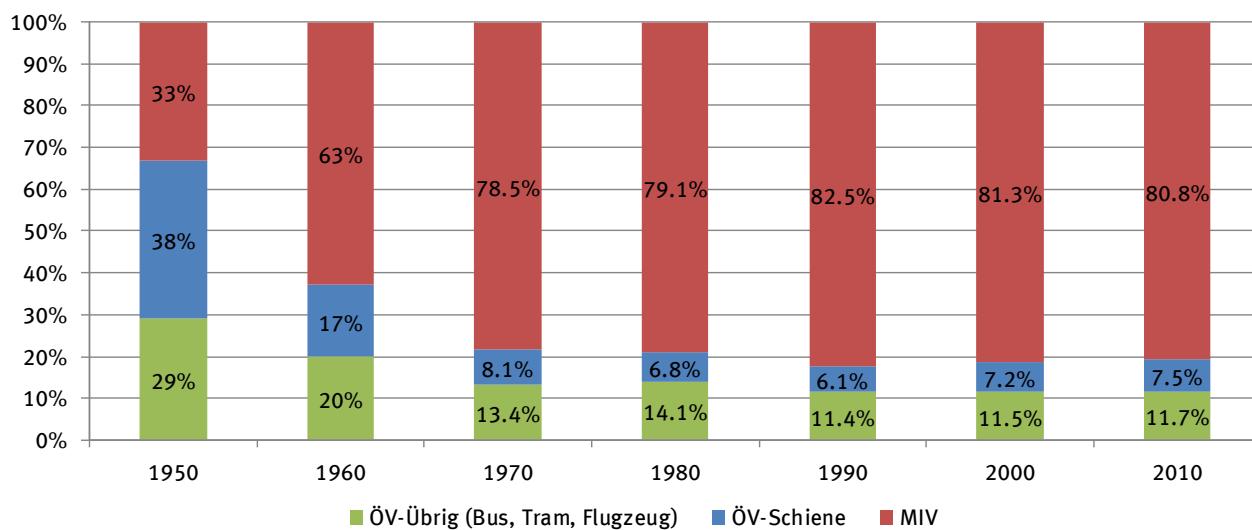
Absolut gesehen ist sowohl der motorisierte Individualverkehr²¹ (MIV) als auch der öffentliche Verkehr²² (ÖV) angestiegen. Jedoch haben der MIV überdurchschnittlich und der ÖV unterdurchschnittlich zugewonnen. Damit setzt sich ein Trend fort, der bereits in den 1920er Jahren begonnen hatte: Mit der Einführung von Benzin als maßgeblicher Energieträger für Verkehrsmittel wurde der bis dahin auf schienengebundenen Verkehr umstrukturiert und im großen Stil Autobahnen errichtet. Außerdem begann bereits in den 30er Jahren eine forcierte finanzielle Unterstützung der Automobilproduktion, die gemeinsam mit der neuen Infrastruktur den Grundstein für den Aufstieg des MIV legte [Wolf, 2007]. Noch in den 1950er Jahren hatte der ÖV einen Anteil von 69 % am motorisierten Verkehr (Fuß- und Radverkehr ausgenommen). Das deutsche Wirtschaftswunder, welches eine breite Motorisierung der Bevölkerung zumindest vorerst in Westdeutschland ermöglichte, ließ den Anteil des ÖV auf knapp

²¹ MIV ist durch individuell genutzte Verkehrsmittel (z.B. Auto oder Motorrad) generierter Verkehr

²² ÖV steht prinzipiell allen Nutzern gleichermaßen zur Verfügung und verläuft meist auf festen Routen

20 % in den 70er Jahren schrumpfen. In der DDR kam es ebenfalls zu einem Anstieg des MIV, aber der ÖV hatte hier sehr viel länger einen höheren Anteil, was jedoch nicht auf eine gezielte Förderung des ÖV zurückzuführen ist. So hatte die Reichsbahn mit massiveren Reparationsleistungen zu kämpfen als die Deutsche Bahn und politische Fehlentscheidungen des Regimes verhinderten eine qualitative Verbesserung des Schienensystems. Trotzdem dominierte der ÖV bis zu Beginn der 80er Jahre im Personenverkehr, doch bereits in den letzten Jahren der DDR setzte eine Massenmotorisierung der Bevölkerung ein. Diese Entwicklung war zur Wende soweit fortgeschritten, dass sich der übliche Sprung in der Statistik zur Wiedervereinigung kaum für die Verkehrsmittelwahl bemerkbar macht. So bleibt die Aufteilung zwischen ÖV und MIV von ca. 20:80 seit 1980 bis heute relativ konstant, wobei eine zunehmende Reduzierung des straßen- und schienengebundenen ÖV durch den stark gewachsenen Luftverkehr²³ in diesem Vergleich überdeckt wird (vgl. Abbildung 41). Innerhalb des MIV werden nur 2 % der Verkehrsleistung durch motorisierte Zweiräder erbracht.

Abbildung 41: Entwicklung der Verkehrsmittelanteile an der Verkehrsleistung in Deutschland (1950-2010)



Quelle: verschiedene Jahrgänge Verkehr in Zahlen [ViZ, n.d.].

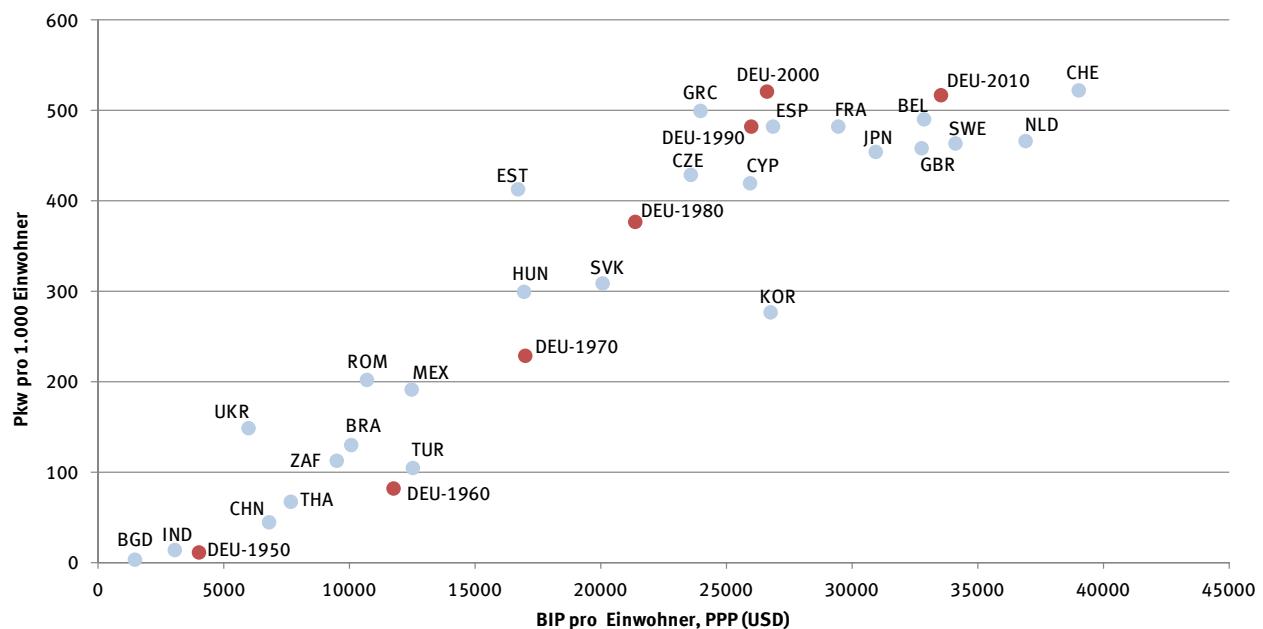
Die Jahre 1950-1990 gelten für Westdeutschland.

Die hohe Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs wird durch einen hohen Motorisierungsgrad der Bevölkerung ermöglicht. Deutschland hat im internationalen Vergleich einen hohen Motorisierungsgrad mit 517 Pkws pro 1.000 Einwohner im Jahr 2010 und liegt damit im oberen Feld der Europäer. Daneben spielen motorisierte Zweiräder (72 Krafträder pro 1.000 Einwohner) nur eine untergeordnete Rolle. Die Pkw-Motorisierung hat im zeitlichen Verlauf einen rasanten Anstieg erfahren. 1950 lag sie noch bei 11,2 Pkws pro 1.000 Einwohner (heutiges indisches Niveau) und 1970 bereits bei 229 Pkws pro 1.000 Einwohner. Seit den 70er Jahren hat sich der Autobestand pro Einwohner nochmal mehr als verdoppelt. Zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung hatten die neuen Bundesländer noch einen deutlichen Rückstand im Motorisierungsgrad gegenüber den alten Bundesländern (238 Pkws pro 1.000 Einwohner). Hier kam es allerdings in einem Zeitraum von 10 Jahren zu einem massiven Aufholprozess, sodass bereits 2000 mit 497 Pkws pro 1.000 Einwohner (Neue Bundesländer) nur noch ein marginales Ost-West-Gefälle beobachtet werden kann. Die Voraussetzung war wie schon in Kapitel 7 beschrieben ein massiver Ausbau des Straßennetzes und damit verbundene staatliche Investitionen. Der schienengebundene Verkehr wurde im Vergleich zum Straßenverkehr nach der Wende

²³ Der Luftverkehr hat im Personenverkehr bis in die 50er Jahre kaum eine Rolle gespielt. Im Zeitraum von 1950 bis 2010 stieg die Transportleistung von 0 % auf 5 % an.

zunächst finanziell und auf politischer Entscheidungsebene vernachlässigt, was zu Fahrgastverlusten und einem Investitionsstau führte.

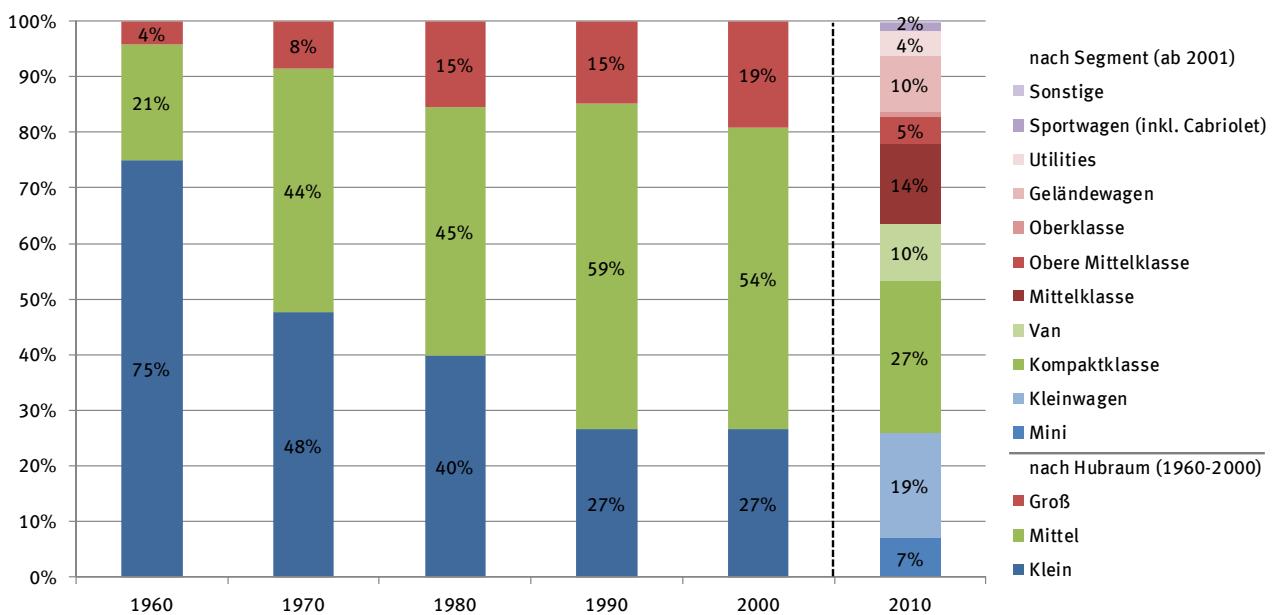
Abbildung 42: Motorisierungsgrad Deutschlands im internationalen Vergleich (2010)



Quelle: Internationale Daten für 2010 [Worldbank, 2015]. Pkw-Bestand für Deutschland vor 1950-2000 [VIZ, n.d.]. BIP pro Einwohner für Deutschland 1950-2000 nach [IMF, 2015]. Die Jahre 1950-1990 gelten für Westdeutschland.

Ein weiterer Trend neben dem Anstieg des Autobesitzes allgemein ist der tendenzielle Anstieg des Fahrzeuggewichtes und der Fahrzeuggröße. In den 60er Jahren wog ein Mittelklassewagen noch weit unter einer Tonne; heute wiegen bereits Kompaktklassewagen in der Basisausstattung über 1,2 Tonnen. Der VW Golf hat über die Generationen I bis VII um 60 % an Gewicht hinzugewonnen. Höhere Sicherheitsanforderungen, aber auch größere Leistungsanforderungen und der Bedarf nach Convenience-Ausstattung sind für die Gewichtszunahme verantwortlich. Weiterhin gibt es neben dem absoluten Anstieg des Fahrzeuggewichtes auch eine Verschiebung der Neuzulassungen hin zu größeren Fahrzeugsegmenten. Abbildung 43 zeigt die Entwicklung von 1960 bis 2010. In den 60er Jahren waren mit 75 % die kleinen Fahrzeuge der dominierende Anteil der Neuzulassungen. Dies hat sich sukzessive zugunsten insbesondere der mittleren Fahrzeuge verschoben. Seit 1999 weist das Kraftfahrtbundesamt in seiner Fahrzeugstatistik die Neuzulassungen nach Fahrzeugsegmenten aus. In Abbildung 43 ist der Versuch unternommen, die Segmente den Kategorien klein, mittel und groß zuzuordnen (blaue Färbung: klein; grüne Färbung: mittel; rote Färbung: groß). Diese Zuordnung orientiert sich an der Vorgehensweise in TREMOD 5.53. Auffällig ist die Zuweisung von Mittelklassefahrzeugen zum großen Segment. Das ist darauf zurückzuführen, dass deutsche Autos im europäischen Vergleich eher größer sind und die Bezeichnung Mittelklasse heute nicht mehr einem mittelgroßen Pkw im europäischen Vergleich entspricht [ifeu, 2014a]. 2010 ist das größte Fahrzeugsegment bei den Neuzulassungen die Kompaktklasse (z.B. VW Golf). Die großen Fahrzeuge sind ungefähr gleich auf mit den mittleren Fahrzeugen, das größte Wachstum haben allerdings die Sport und Geländewagen in den letzten Jahren erfahren [KBA, 2014].

Abbildung 43: Entwicklung der Fahrzeugneuzulassungen nach Größe (1960-2010)



Quelle: Statistik nach [KBA, n.d.]. Bis 2000 erfolgt die Ausweisung der Fahrzeuggröße nach Hubraum (klein: < 1,4 l, mittel: 1,4-2 l, groß: > 2 l). Ab 1999 wurde die Ausweisung auf Fahrzeugsegmente umgestellt. Es kam allerdings in den Folgejahren noch zu einigen statistischen Anpassungen, weshalb in dieser Darstellung erst das Jahr 2010 nach Segmenten ausgewiesen wird.

Eine weitere relevante Tendenz in Bezug auf die Materialintensität der Verkehrsmittel ist die Antriebsart der Fahrzeuge. Fahrzeuge benötigen Energie, um den Motor anzutreiben und das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Als Energieträger kommen unterschiedliche Konzepte in Frage: flüssige Kraftstoffe, gasförmige Kraftstoffe oder Batterien. Am weitesten verbreitet sind Fahrzeuge, die mit flüssigem Kraftstoff in Form von Benzin oder Diesel fahren. Elektroautos sind weit weniger verbreitet, obwohl das Konzept des elektrischen Antriebs in mobilen Verwendungen bereits vor dem Verbrennungsmotor entwickelt wurde [Thomes, 2013]. Auch die Verbreitung von Erdgas-Fahrzeugen hält sich in Deutschland in Grenzen (1,3 % des Fahrzeugbestandes²⁴). In Deutschland werden 98,4 % der Pkw mit Benzin oder Diesel (konventionell) angetrieben. Tabelle 44 stellt den deutschen Straßenfahrzeugbestand gegliedert nach Kraftstoffarten dar. Dabei wird deutlich, dass alternative Antriebskonzepte (Gas, Elektro und Hybride) auch bei den anderen Fahrzeugen eine untergeordnete Rolle spielen.

²⁴ Erdgas und Flüssiggasfahrzeuge einschließlich bivalent.

Tabelle 44: Straßenfahrzeugbestand am 1. Januar 2011 nach Kraftstoffarten

	Pkw	Krafträder	Busse	Lkw	Zugmaschinen	Übrige Kfz	Summe
Benzin	30.487.578	3.811.634	99	133.896	54.403	24.855	34.512.465
Diesel	11.266.644	4.055	74.593	2.281.560	19.35.430	237.148	15.799.430
Flüssiggas	418.659	120	23	7.401	105	685	426.993
Erdgas	71.519	38	1.527	16.394	30	467	89.975
Elektro	2.307	1.659	90	1.136	177	244	5.613
Hybrid	37.256	198	91	92	95	16	37.748
Sonstige	17.600	10.190	40	898	859	320	29.907
Summe	42.301.563	3.827.894	76.463	2.441.377	1.991.099	263.735	50.902.131

Quelle: [KBA, n.d.]

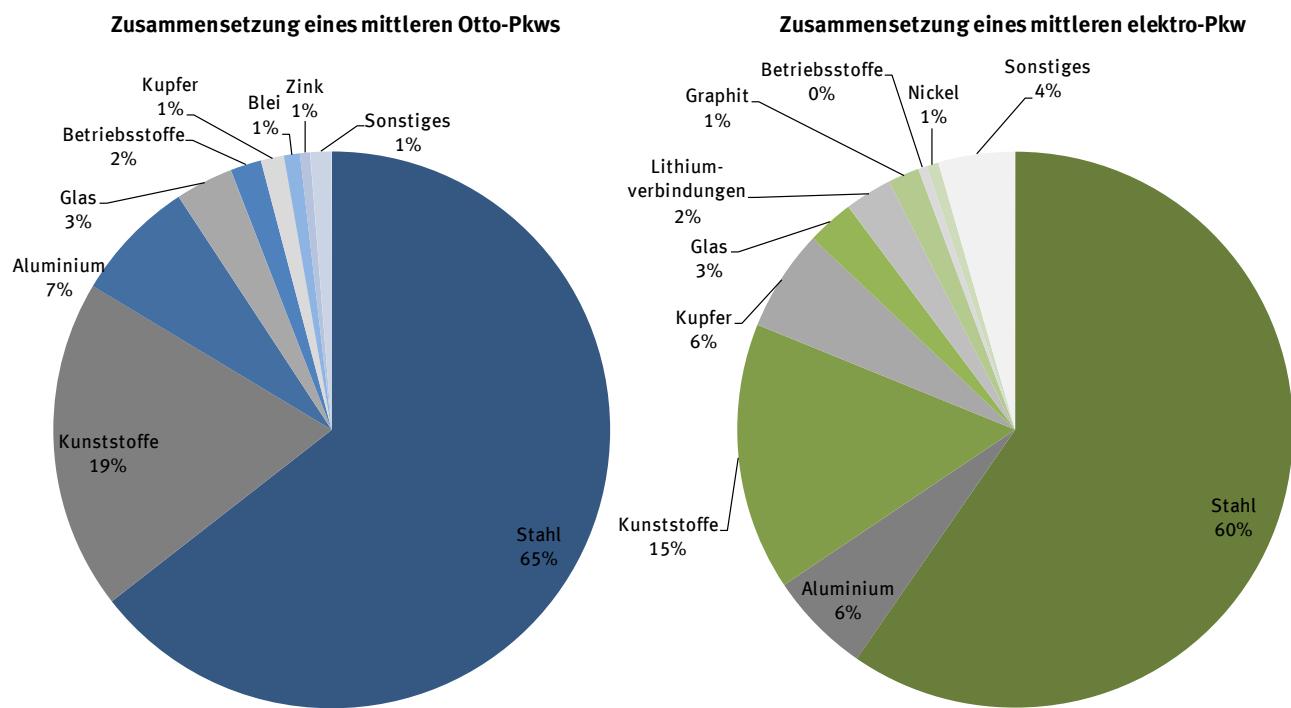
Der Einfluss auf den Materialeinsatz wird insbesondere bei dem Vergleich von konventionellen Fahrzeugen mit einem Elektrofahrzeug deutlich. Neben den Rohstoffen, die für die Energieerzeugung eingesetzt werden, benötigt ein Elektrofahrzeug andere Komponenten und Materialien. Abbildung 43 vergleicht die Materialzusammensetzung von einem konventionellen und elektrischen Pkw (Kompaktklasse). Die Datengrundlage bildet das ifeu Ökobilanz Modell eLCAr für Elektrofahrzeuge [ifeu, 2011, 2016]. Hierbei wird deutlich, dass insbesondere der Anteil von Kupfer, Lithiumverbindungen und sonstigen Materialien zunimmt. Das ist auf die Komponenten Elektromotor und Batterie zurückzuführen. Insbesondere die Batterie konsumiert große Mengen von Kupfer, Aluminium und Lithiumverbindungen. Je nach chemischer Zusammensetzung der Lithium-Ionen Batterie kommen weiterhin Materialien wie Kobalt, Mangan oder Nickel zum Einsatz. Im Elektromotor werden andere Materialien (z.B. Seltene Erden) als im Verbrennungsmotor verbaut. Insgesamt wiegen Elektrofahrzeuge heute noch tendenziell mehr als konventionelle Fahrzeuge (bis zu 30 % im direkten Segmentvergleich), da eine relativ große Batterie benötigt wird, um Reichweitenanforderungen zu erfüllen. Dieser erhöhte Materialeinsatz zeigt sich auch in der Betrachtung des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA). Prinzipiell ist der KRA über den (kompletten Lebensweg betrachtet) in Elektrofahrzeugen heute höher als in konventionellen Fahrzeugen (ca. 75 %), da hier eine Reihe von zusätzlichen Materialien für die Elektrokomponenten benötigt werden. Die Fahrzeugherstellung überwiegt im Materialeinsatz gegenüber der Nutzungsphase, was insbesondere auf den Einsatz vieler Metalle mit hohem Primärmaterialaufwand zurückzuführen ist. Bei steigendem Einsatz Erneuerbarer Energien im Strommix wird der Materialeinsatz für die Strombereitstellung der Elektrofahrzeuge sinken. Den größten Treiber für den hohen Materialaufwand in der Elektromobilität stellt die Batterie dar. Die heute noch nicht zufriedenstellende Reichweite der Elektrofahrzeuge wird zunächst noch dazu beitragen, dass der Materialeinsatz an dieser Stelle nur langsam gesenkt werden kann²⁵.

In Zukunft ist anzunehmen, dass der Anteil von alternativen Fahrzeugkonzepten zunimmt, da klimapolitische Zielsetzungen insbesondere die Elektromobilität forcieren. Bis 2020 will die Bundesregierung 40 % ihrer Treibhausgase gegenüber 1990 einsparen [Bundesregierung, 2010]. Der Verkehrssektor ist einer der Hauptemittenten von klimaschädlichen Gasen und muss hier einen relevanten Beitrag leisten. Elektrofahrzeuge bieten die Möglichkeit erneuerbare Energien in den Verkehrssektor zu integrieren. Deshalb hatte sich die Bundesregierung 2009 das Ziel gesetzt, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge in den deutschen Bestand zu bringen [Bundesregierung, 2009]. Der nur sehr leichte Anstieg der Elektroflotte auf unter 20.000 bis 2015 veranlasste die Bundesregierung schließlich ihr Ziel bis 2020

²⁵ Eine umfassende Umwelt- und Ressourcenbewertung von Elektrofahrzeugen wurde in der UBA-Studie „Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“ durchgeführt [ifeu, 2016].

auf 500.000 zu halbieren. Nach langer Zurückhaltung wurde im Frühjahr 2016 eine Kaufprämie für Elektroautos in Deutschland eingeführt.

Abbildung 44: Vergleich Materialzusammensetzung Pkw-konventionell und Pkw-elektro (gegenwärtig)



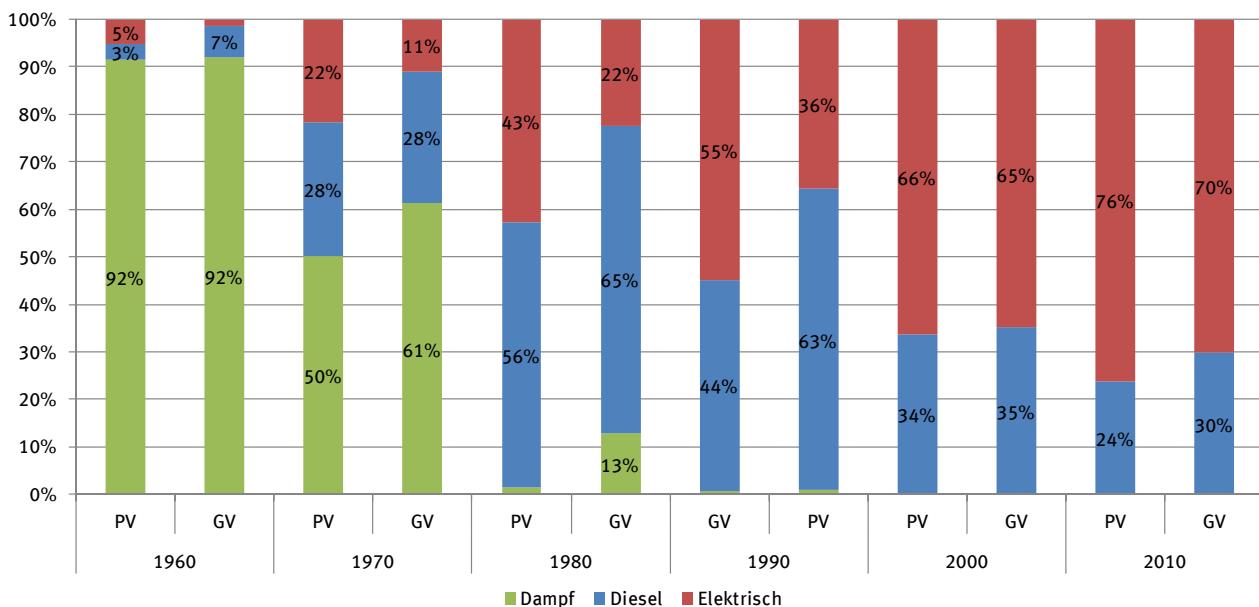
Quelle: eLCAr [ifeu, 2011, 2016]

Im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs sind besonders drei materialrelevante Entwicklungs-tendenzen auszumachen:

- Ausbau Fernverkehr und Elektrifizierung Bahn
- Starker Anstieg des Flugverkehrs
- Einführung Fernbuslinien

Die fortschreitende Elektrifizierung des Schienenverkehrs in Deutschland ist schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts als Trend zu beobachten. In den 60er Jahren war noch der Großteil der Gleisanlagen nicht elektrifiziert (84 %) und musste folglich mit Dieselzügen betrieben werden. 2010 waren bereits nahezu 70 % der Gleislänge elektrifiziert. Abbildung 45 zeigt den Energieaufwand (in MJ) für den schienengebundenen Bahnbetrieb nach Antriebsart. In den 60er Jahren spielten Dampflokomotiven noch die größte Rolle im Bahnbetrieb. Bis in die 80er konnten Dieselloks und elektrische Triebwagen die alten Dampfmaschinen komplett ersetzen. Ab den 90er Jahren ging der Anteil des Dieselantriebs sukzessive zurück, sodass 2010 über 70 % der Fahrleistung im Schienenverkehr elektrisch angetrieben waren. Investitionen werden unternommen, den Schienenverkehr weiter zu elektrifizieren [BMVI, 2012].

Abbildung 45: Energieaufwand für den Schienenbahnbetrieb nach Antriebsart in MJ (1960-2010)



PV: Personenverkehr; GV: Güterverkehr.

Berücksichtigt sind Nahverkehr (inkl. Stadtbahnen), Regionalverkehr und Fernverkehr.

Quelle: TREMOD 5.53 siehe [ifeu, 2014a].

Ein weiterer Trend im Bereich des Schienenpersonenverkehrs ist der Ausbau der Hochgeschwindigkeitsstrecken. Dieser seit den 90er Jahren anhaltende Trend ist auch in anderen Ländern zu beobachten. Die DB AG hat im Zeitraum von 1994 bis 2005 60 % ihrer Investitionen im Bereich des Hochgeschwindigkeitsverkehrs getätigt. Parallel hat sich die deutsche Bahn stärker aus der Fläche zurückgezogen. Im Zeitraum von 1993 bis 2006 wurden mehr als 5.500 km Schienenstrecke stillgelegt [Wolf, 2007]. Mit diesen Investitionen ist sowohl der Aufbau von neuen Hochgeschwindigkeitstrassen verbunden als auch der vermehrte Kauf von IC und ICE Zügen. Der umfangreichen finanziellen Förderung des Fernverkehrs steht allerdings keine signifikante Steigerung der Personenverkehrsleistung gegenüber. 2010 machte der Anteil des Personenfernverkehrs nach Personenkilometer 43 % (nach beförderten Personen 5 %) des gesamten Schienenpersonenverkehrs aus [BMVI, 2014].

Im Gegensatz zu anderen Ländern existiert in Deutschland kein etabliertes Fernbusliniennetz, was mit der gesetzlichen Regulierung der Strecken zusammenhängt. 2013 wurde der Fernlinienbus-Markt in Deutschland liberalisiert, woraufhin ein enormes Angebotswachstum einsetzte. So stieg bis 31. März 2014 die Zahl der bedienten Strecken von 86 auf 247 [UBA, 2014c]. Dabei nahm nicht nur die Anzahl der Linien zu, sondern auch deren Bedienungshäufigkeit. In Zukunft ist nach der ersten Konsolidierungsphase mit einem weiteren Anstieg im geringeren Umfang zu rechnen.

Die wohl rasanteste Entwicklung hat neben der Pkw-Motorisierung die Zunahme des Flugverkehrs im Personenverkehr genommen. In den 60er Jahren lagen die Flugpreise noch so hoch, dass Fliegen eine luxuriöse Mobilitätsform für einen sehr kleinen Teil der Bevölkerung darstellt. Bis 2000 hat sich die Personenverkehrsleistung im Flugverkehr gegenüber 1970 verachtlicht. Von 2000 bis 2010 nahm die Verkehrsleistung nochmals um 36 % zu [ifeu, 2014a]. Seit dem Aufkommen der Billigflüge Ende der 90er Jahre in Deutschland wurde Fliegen eine Angelegenheit für breite Schichten der Bevölkerung. Nicht nur Auslandsflüge, sondern mittlerweile auch Inlandsflüge spielen eine immer größere Rolle. Mittlerweile macht der Luftverkehr ca. 5 % am deutschen Modalsplit (nach Verkehrsleistung) aus und somit nicht viel weniger als der Schienenverkehr (7,5 %).

8.1.2 Entwicklung Güterverkehr

Analog zum Personenverkehr hat sich auch die Verkehrsleistung des Güterverkehrs (ausgedrückt in Tonnenkilometer) seit 1960 mehr als vervierfacht (+342 %). Die spezifische Verkehrsleistung pro Einwohner hat sich im gleichen Zeitraum verdreifacht (vgl. Tabelle 45). Grund hierfür ist die wirtschaftliche Entwicklung, die mit einer Steigerung des Güterhandels verbunden ist, was insbesondere für die exportorientierte Bundesrepublik von Bedeutung ist. Weiterhin trägt die zunehmende Internationalisierung und Europäisierung dazu bei, dass Handelsströme stärker grenzüberschreitend vernetzt werden. Deutschland als zentraleuropäisches Land hat einen herausragenden Stellenwert als Verkehrsdrehkreuz für internationale Warenströme.

Tabelle 45: Entwicklung der absoluten und spezifischen Güterverkehrsleistung im deutschen Binnenlandverkehr (1960-2010)

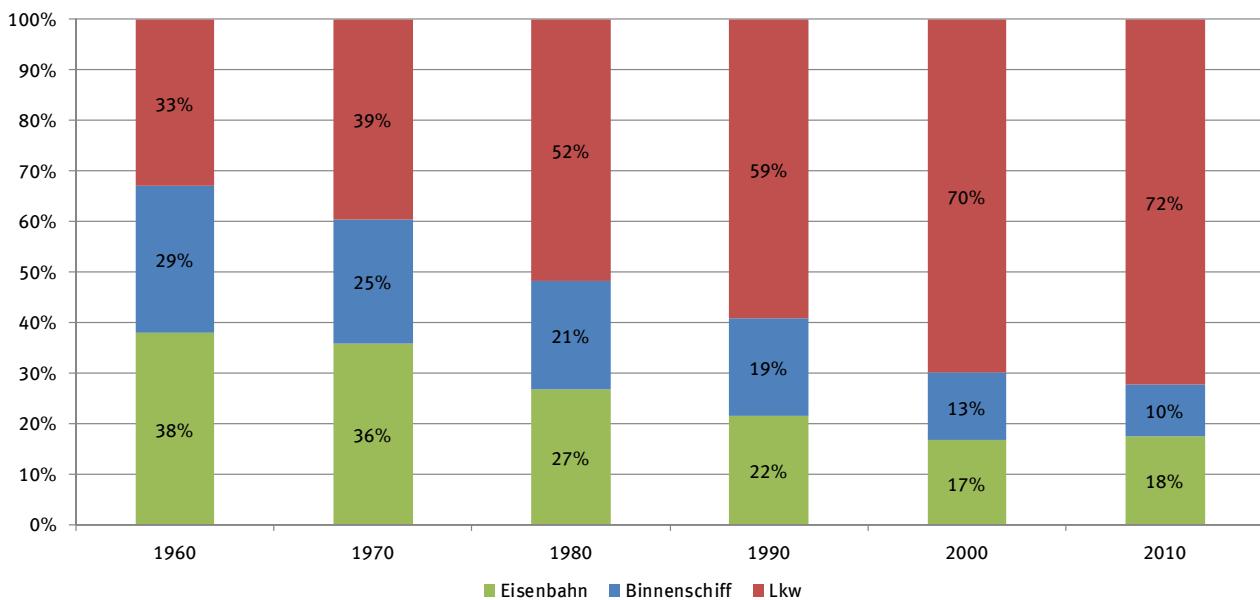
	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Verkehrsleistung [Mrd. tkm]	142	216	256	300	511	629
Pro-Kopf VL [Tsd. tkm/Einw.]	2,5	3,5	4,2	4,7	6,2	7,7

Angaben inkl. Rohfernleitungen; die Jahre 1960-1990 gelten für Westdeutschland.

Quelle: verschiedene Jahrgänge Verkehr in Zahlen [ViZ, n.d.].

Ähnlich wie beim Personenverkehr hatte der Verkehrsträger Straße zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine untergeordnete Rolle im Güterverkehr. In den 60er Jahren lag sein Anteil mit 33 % noch hinter der Eisenbahn (38 %). Im Gegensatz zum Personentransport setzte sich der Straßengüterverkehr in Westdeutschland erst später durch, doch bereits in den 70er Jahren nahm er mit knapp 40 % den größten Anteil innerhalb der Erbringung der Verkehrsleistung ein. Bis 1990 erfolgte ein starker Einbruch des Schienengüterverkehrs, der sogar mit einem absoluten Rückgang der Transportleistung verbunden war [Wolf, 2007]. In der ehemaligen DDR verfolgte man eine andere Politik. Hier hatte die Schiene bis vor der Wende den weitaus größten Anteil an der Güterverkehrsleistung. Damit waren allerdings, wie bereits beschrieben, keine hinreichenden Investitionen in die Infrastruktur verbunden, sodass es zur Überlastung und starken Abnutzung kam. Dieser Investitionsstau ermöglichte u.a. den schnellen Umschwung nach der Wende auf die Straße. Bis 2010 konnte der Anteil des Straßengüterverkehrs auf 72 % sukzessive ausgebaut werden. Der Anteil des Binnenschiffs hat sich gegenüber 1960 um das Dreifache reduziert und der Anteil der Eisenbahn hat sich im gleichen Zeitraum halbiert. Seit 2003 konnte der Anteil des Schienengüterverkehrs wieder etwas gesteigert werden, was nun zu einer Stabilisierung geführt hat.

Abbildung 46: Entwicklung der Verkehrsmittelanteile an der Güterverkehrsleistung in Deutschland (1960-2010)



Die Jahre 1960-1990 gelten für Westdeutschland.

Quelle: verschiedene Jahrgänge Verkehr in Zahlen [ViZ, n.d.].

Der starke Anstieg des Straßengüterverkehrs hat neben den öffentlich geförderten Infrastrukturmaßnahmen noch andere Gründe. Lastkraftwagen sind flexibler einsetzbar und können die Fläche schneller mit Gütern versorgen. Das spielt insbesondere bei der Lieferung von Fertigprodukten eine Rolle, die in der Vergangenheit eine zunehmende Bedeutung neben den klassischen Schüttgütern erfahren hat. Außerdem wurde die zulässige Gesamtlast von Lastkraftwagen kontinuierlich angehoben. So hat sich der Anteil von Lkw >28 t von 11 % in den 60er Jahren auf heute 35 % gesteigert [ifeu, 2014a]. Trotz der Erhöhung der Transportleistung von Einzelfahrzeugen haben Lkws einen höheren spezifischen Materialverbrauch als Schienenfahrzeuge, da diese höhere Lebensdauern erreichen und über den elektrischen Antrieb einen besseren Wirkungsgrad erzielen.

Der Binnenschiffverkehr hat am stärksten von seiner Verkehrsleistung eingebüßt. Der Binnenschiffsbestand hat sich sogar bei den Frachtschiffen im Zeitraum von 2000 bis 2010 um 212 Schiffe verringert [WSV, 2010]. Bis heute spielt der Luftverkehr beim Güterverkehr aus Kostengründen noch eine untergeordnete Rolle.

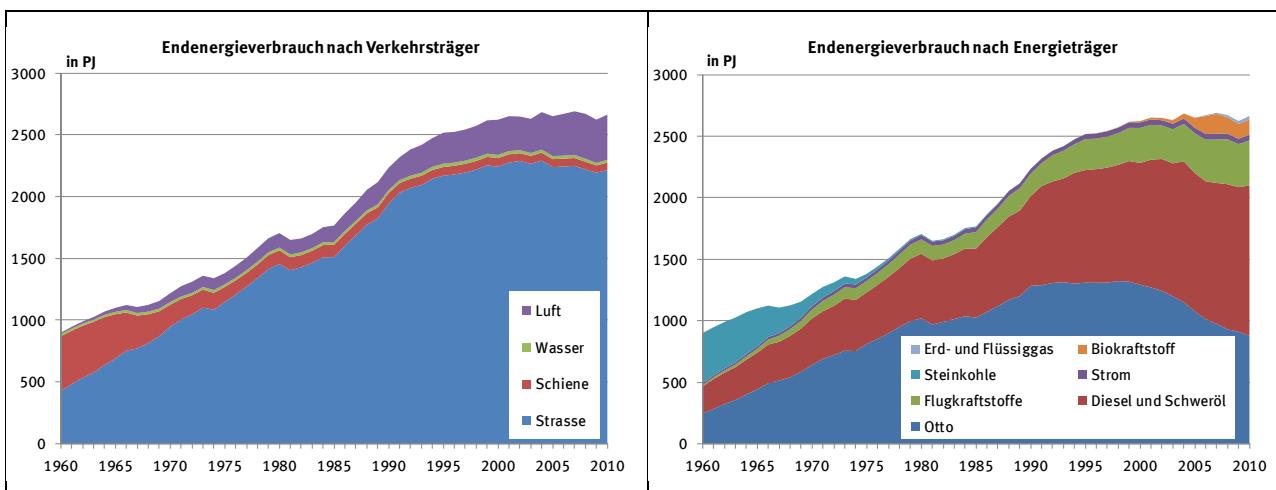
8.1.3 Entwicklung Energieverbrauch

Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors macht ca. 30 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik aus [AGEB, 2015a]. Zwischen 1960 und 2000 kam es nahezu zu einer Verdreifachung des Endenergieverbrauchs (vgl. Abbildung 47). Seit 2000 hat sich das Wachstum deutlich verlangsamt und ab 2007 ist sogar ein leichter Rückgang zu verzeichnen. Diese Entwicklung hängt neben Effizienzgewinnen maßgeblich mit der Finanzkrise seit 2007 zusammen, die eine starke Verringerung der deutschen Wirtschaftskraft verursachte. Ähnliche Einbrüche lassen sich für die erste (1973) und zweite (1979/80) Ölkrise ablesen.

Den größten Anteil am Energieverbrauch haben der Straßenverkehr und damit die Otto- und Dieselmotoren. Der Energieverbrauch der Eisenbahn nahm durch den Wechsel von Kohle- auf Elektrotraktion stark ab. Eine starke Zunahme verzeichnete dagegen der Kerosinverbrauch durch den Anstieg des Flugverkehrs. Biokraftstoffe erreichten bis zum Jahr 2007 einen Anteil von 6 % am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrs. Im Jahr 2008 gab es einen Rückgang auf 5 %, da deutlich weniger reine

Biokraftstoffe (Biodiesel und Pflanzenöl) verbraucht wurden [ifeu, 2014a]. Strom macht nur einen sehr geringen Anteil von 1,7 % aus, der bis 2010 ausschließlich dem Schienenverkehr zuzurechnen ist. Der Schienenverkehr verbraucht insgesamt 2,3 % des gesamten Energieverbrauchs, ca. 30 % seines Endenergieverbrauchs stammen von Dieselkraftstoffen (ca. 70 % aus Strom). Verglichen mit der deutlich höheren Verkehrsleistung von Elektrozügen wird die bessere Effizienz dieser Traktionsart deutlich.

Abbildung 47: Endenergieverbrauch nach Verkehrs- und Energieträger (1960-2010)



Berechnung mit TREMOD; Energieverbrauch im Inland, beim Flugverkehr abgehender Verkehr bis zur ersten Zwischenlandung.

Quelle: TREMOD 5.53, siehe [ifeu, 2014a].

Nach der jahrelangen Phase der starken Konzentration der Energieträger auf Benzin, Diesel und Kerosin kommt es seit 2000 zunehmend zu einer weiteren Differenzierung der Energieträger. Strom kann ein kleines Wachstum verzeichnen, Biokraftstoffe und Erdgas/Flüssiggas treten hinzu. Biokraftstoffe und Strom ermöglichen die Integration von regenerativen Energiequellen in den Verkehrssektor. Da Biokraftstoffe mit einigen sozialen und ökologischen Problemen behaftet sind, ruhen die politischen Hoffnungen insbesondere auf Elektrofahrzeugen.

8.2 Anznehmende zukünftige Entwicklung

8.2.1 Auswahl geeigneter Szenarien

Im Bereich Verkehr gibt es einige Studien, die sich mit Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs beschäftigen, da der Verkehr eine entscheidend Rolle für die Reduktion von Energie und Emissionen in Zukunft einnimmt. Tabelle 46 gibt einen Überblick zu den wichtigsten Studien, die sich mit zukünftigen Verkehrsszenarien beschäftigt haben.

Tabelle 46: Relevante Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrssektors

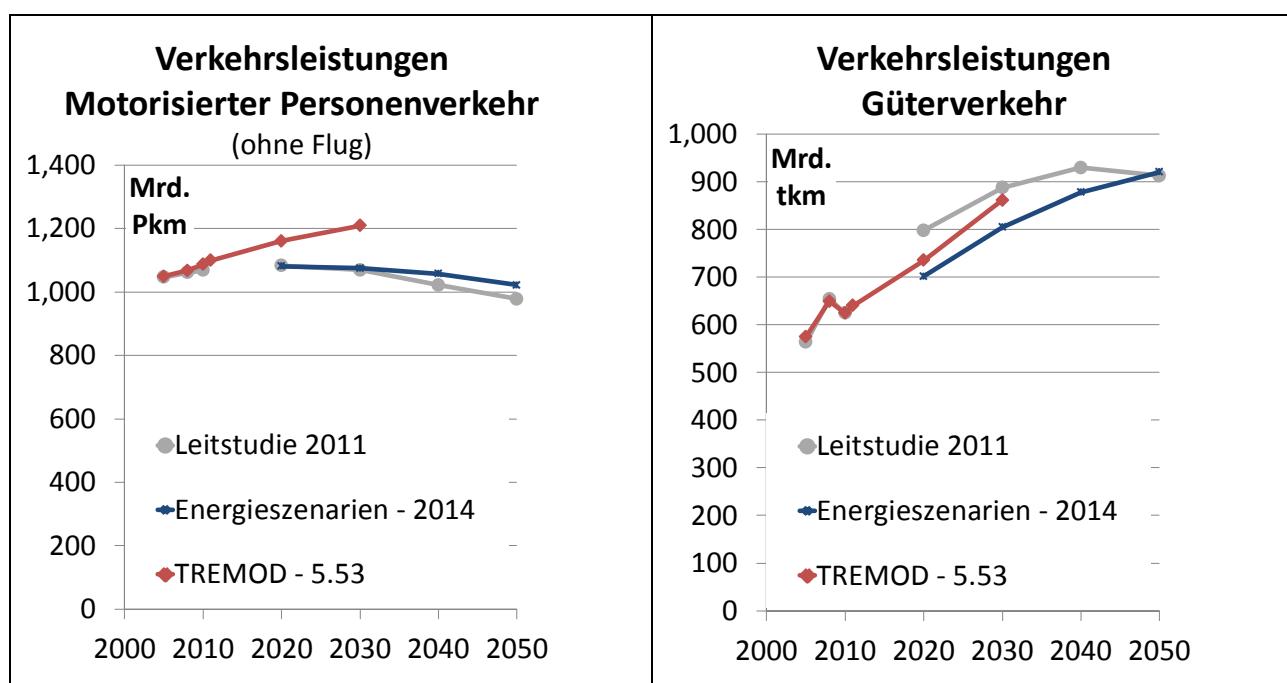
Szenario/Modell	Jahr	Beauftragt/ Gefördert	Institute	Bezugszeitraum
Projektionsbericht	2015	BMUB	ISI, Öko-Institut	2010-2035
EnergieRef-2014	2014	BMWi	EWI, GWS, Prognos	2011-2050
TREMOD 5.5 (VP2030)	2014	UBA, BASt	ifeu	1960-2050
TREMOD 5.3 (VP2025)	2012	UBA, BASt	ifeu	1960-2050
EnergieRef-2010	2010	BMWi	EWI, GWS, Prognos	2008-2050

Leitstudie 2011	2011	BMU	DLR, IWES, IfNE	2005-2050
Modell Deutschland	2009	WWF Deutsch-land	Prognos, Öko	2005-2050
Renewbility	2009, 2012	BMU	Öko, DLR, ISI	2005-2030

Quellen: [BMUB, 2015; DLR et al., 2012; ifeu, 2012b, 2014a; Öko-Institut, 2013; Öko-Institut / DLR, 2009; Öko-Institut / Prognos, 2009; Prognos et al., 2010, 2014].

Aus Gründen der Aktualität wurden die Szenarien des Projektionsberichts (BMUB), der Energierefenzprognose (BMW) und der Emissionsberichterstattung des Verkehrs (UBA, BASt) näher analysiert. Allen Studien liegen die Berechnungen und Erkenntnisse der Verkehrsverflechtungsprognose zu grunde, die alle fünf Jahre vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur veröffentlicht wird. Im Juni 2014 wurde die neue Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [Intraplan, 2014] veröffentlicht.

Abbildung 48: Vergleich zukünftige Entwicklung der Transportleistung im Personen und Güterverkehr in verschiedenen Szenarien



Quelle: [DLR et al., 2012; ifeu, 2014a; Prognos et al., 2014].

Aus Gründen der Aktualität und nach Prüfung der Annahmen wurden die Ergebnisse der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 ausgewählt, die als Eingangsgrößen in URMOD umgesetzt werden sollen. Für weitere Differenzierungen nach Verkehrsmitteln wird auf Daten von TREMOD 5.53 zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise steht der Auswahl des Projektionsberichts (BMUB) für den Energiesektor nicht entgegen, da hier ebenfalls die Annahmen der Verkehrsverflechtungsprognose berücksichtigt wurden.

8.2.2 Annahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 und TREMOD 5.53

Zur Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung des verkehrsbedingten Energieverbrauchs und der Emissionen wird in TREMOD ein Trendszenario bis zum Jahr 2030 definiert. Das Trendszenario soll auf aktuellen Verkehrsleistungsprognosen aufbauen und alle umweltrelevanten politischen Vorgaben, deren Umsetzung beschlossen ist, abbilden. Es sind alle wichtigen Beschlüsse berücksichtigt, die bis Mitte 2014 in Kraft getreten sind.

Die vorgegebenen Verkehrsleistungen werden in TREMOD umgelegt und auf Fahrleistungen und Betriebsleistungen mit den entsprechenden Anteilen der verschiedenen Fahrzeugkategorien und Traktionsarten verteilt. Es wurden unter anderem folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Entwicklung des Fahrzeugbestands nach Antriebsarten, Größenklassen, Emissionsstandards
- ▶ Entwicklung der Fahrleistungsanteile nach Straßenkategorien
- ▶ Entwicklung der Fahrzeugauslastung
- ▶ Annahmen zur Entwicklung der Energieeffizienz und des Emissionsverhaltens neuer Fahrzeugkonzepte sowie der zukünftige Anteil der Biokraftstoffe und anderer Energiearten festzulegen.

Alle diese Annahmen wurden in einem gemeinsamen Abstimmungsprozess von BMUB, UBA und ifeu festgelegt. Die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen des Trendszenarios gehen nicht direkt in die TREMOD-Berechnung ein. Sie sind allerdings Bestandteil der zugrunde liegenden „Verkehrsprognose 2030“ und haben einen Einfluss auf die Verkehrsentwicklung. Sie zeigen im Allgemeinen einen ähnlichen Trend wie die Rahmenannahmen, die für AZE getroffen wurden.

Die wesentlichen Unterschiede zur vorherigen Verkehrsverflechtungsprognose 2025 sind eine deutlich geringere Zunahme des Bruttoinlandsproduktes, ein etwas geringerer Anstieg der Mobilitätskosten in Personenverkehr und keine Kostenreduktion im Straßengüterverkehr (VP 2025: leichter Rückgang). Die neuen Annahmen haben zur Folge, dass die Verkehrsprognose 2030 einen geringeren Anstieg der Verkehrsleistungen voraussagt als die Verkehrsprognose 2025. Dies betrifft vor allem den Straßengüterverkehr und den Flugverkehr.

8.2.2.1 Personenverkehr

Die Verkehrsprognose 2030 geht beim motorisierten Individualverkehr zwischen 2010 und 2030 von einer Zunahme von knapp 10% aus (Tabelle 47). Beim Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (Busse, kommunaler Schienenverkehr) sind die Tendenzen ähnlich, doch ist der Anstieg bis 2030 geringer als beim MIV. Der Luftverkehr nimmt noch um knapp 79 % zu (bezogen auf den gesamten abgehenden Verkehr gemäß Standortprinzip). Die Zunahme im innerdeutschen Luftverkehr ist mit +15 % deutlich geringer.

Tabelle 47: Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2030 in der „Verkehrsprognose 2030“ in Mrd. pkm

Jahr	MIV	ÖSPV	Eisenbahn	Luftverkehr
2010	902,4	78,1	84,0	192,9
2030	991,8	82,8	100,1	344,7
2010-2030	+9,9 %	+6,0 %	+19,2 %	+78,7 %

Luftverkehr nach Standortprinzip

Quelle: [Intraplan, 2014]

Die Entwicklung der Fahrzeugfotten entspricht der Fortschreibung im TREMOD Trendszenario bis 2030 und bildet die Entwicklung der durchschnittlichen Wachstumsraten der letzten Jahre nach. Gegenüber 2010 nehmen der Pkw-Bestand bis 2030 um 10 % und der Bestand an Bussen um 13 % zu.

Aufgrund der klimapolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung wird in Zukunft eine stärkere Durchdringung der Elektrofahrzeuge forciert. Von dem ursprünglichen Ziel der Bundesregierung bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge in den Bestand zu bringen wurde abgewichen und die Zahl auf 500.000 nach unten korrigiert. Im TREMOD 5.53 Trendszenario sind bis 2020 500.000 Elektrofahrzeuge und bis 2030 3 Mio. Elektrofahrzeuge angenommen. Bis zum Jahr 2030 haben Fahrzeuge mit

externer Stromversorgung (BEV und PHEV) einen Anteil von 19 % an den Neuzulassungen, wohingegen der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselantrieb auf 52% zurückgeht. Die restlichen Fahrzeuge sind im wesentlichen Hybride (HEV).

8.2.2.2 Güterverkehr

Die Entwicklung der Güterverkehrsleistung 2010 bis 2030 wird für Straße, Schiene und Binnenschiffahrt direkt aus der Verkehrsprognose 2030 übernommen (Tabelle 46). Für den Flugverkehr wird von der VP 2030 keine Verkehrsleistung prognostiziert. Es werden daher die Änderungsraten des Personenverkehrs übernommen.

Tabelle 48: Entwicklung der Transportleistung 2010-2030 in der „Verkehrsprognose 2030“ in Mrd. tkm

Jahr	Straße	Schiene	Binnenschiff	Luftverkehr
2010	437,3	107,6	62,3	10,8
2030	607,4	153,7	76,5	19,2
2010-2030	+38,9 %	+42,9 %	+9,1 %	+78,7 %

Annahme Verkehrsleistung Luftverkehr 2030: gleiche Zunahme wie Personenverkehr

Quelle: [Intraplan, 2014]; eigene Annahme (Luftverkehr)

Die Entwicklung der Fahrzeugfotten entspricht der Fortschreibung im TREMOD Trendszenario bis 2030 und bildet die Entwicklung der durchschnittlichen Wachstumsraten der letzten Jahre nach. Gegenüber 2010 nehmen der Lkw-Bestand bis 2030 um 6 % und der Bestand an leichten Nutzfahrzeugen um 5 % zu.

Für die schweren Nutzfahrzeuge wurde im AZE-Szenario zunächst nicht von einer Elektrifizierung ausgegangen.

8.2.3 Entwicklung der Energieeffizienz in Fahrzeugen

Die Entwicklung der Energieeffizienz wurde in URMOD nicht auf Fahrzeugebenen umgesetzt, sondern für Verkehrsgruppen angegeben. Die Energieeffizienz der Verkehrsgruppen drückt sich in Energieeinsatz pro Transportleistung (Personen-/Tonnenkilometer) aus. Zwei Umstände können zu einer Effizienzsteigerung bei dieser Betrachtung führen: 1) Höhere Auslastung der Fahrzeuge, 2) Effizienzsteigerung im Antriebsstrang der Fahrzeuge. Als Grundlage für das AZE-Szenario wurden die Annahmen im TREMOD-Trendszenario angenommen (vgl. Abbildung 43). An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Effizienzsteigerungen auch in der TREMOD-Dokumentation als sehr ambitioniert gesetzt sind.

Tabelle 49: Entwicklung der Energieeffizienz im TREMOD Trendszenario bis 2030 für verschiedene Fahrzeuggruppen

	Annahmen in TREMOD 5.53
Personenstraßenverkehr	-24 %
Öffentlicher Nahverkehr	26,1 %
Schienenfernverkehr	-29 %
Flugverkehr	-21 %
Schienengüterverkehr	-22 %
Straßengüterverkehr	-21 %

Binnenschifffahrt

-14 %

8.2.4 Überleitung der Daten in URMOD

Wichtigste Datenquelle für den Bereich Verkehr ist das TREMOD und die Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Die Daten aus dieser Quelle müssen so umgeformt und ergänzt werden, dass sie dem VGR-Konzept der IOT entsprechen.

Ein wichtiger Konzeptunterschied bezieht sich auf die Systemgrenze. Nach TREMOD sind die Verkehrsaktivitäten nach dem Territorialprinzip abgegrenzt (alle Verkehrsaktivitäten auf dem Territorium), die IOT folgt dagegen dem Konzept der gebietsansässigen Einheiten. Diese Vorgehensweise entspricht der Abgrenzung der Ökonomie in den VGR, der zufolge die inländische Ökonomie über die Produktionsaktivitäten der gebietsansässigen Einheiten definiert ist. Mit Bezug auf die Transportaktivitäten bedeutet dies, dass Transportleistungen die durch inländische Fahrzeuge auf dem Territorium der übrigen Welt erbracht werden, der inländischen Ökonomie zugerechnet werden, während Transportaktivitäten nicht-gebietsansässiger Einheiten auf dem inländischen Territorium nicht als Bestandteil der inländischen Ökonomie berücksichtigt werden. Soweit diese Leistungen allerdings für inländische Einheiten erbracht werden, sind diese als Importe von Transportleistungen zu berücksichtigen.

Darüber hinaus sind zusätzlich Schätzungen für Verkehrsträger, die in TREMOD nicht enthalten sind (z.B. Personentransport in der Schifffahrt) vorzunehmen. Diese Bereiche sind allerdings quantitativ unbedeutend.

8.2.4.1 Verkehrsdienstleistungen

Die Abbildung des Rohstoffbedarfs des Verkehrssektors wurde in URMOD zu zwei Themenkomplexen zusammengefasst, nämlich „Verkehrsdienstleistungen“ und „Fahrzeuge“.

Der Faktor Verkehrsdienstleistungen (Tabelle 1, Faktor 7) fasst zwei unterschiedliche Einzelfaktoren zusammen, Entwicklung der Energieeffizienz (Energieaufwand je Einheit Transportleistung) der einzelnen Verkehrsträger und Nachfrage nach Transportleistungen: Hier ist zu unterscheiden zwischen Endnachfrage nach Transportleistungen (z.B. Individualverkehr) und Nachfrage von Transportleistungen als Vorleistungsinput.

Energieeffizienz: Bezüglich der Entwicklung der Energieaufwendungen je Einheit Transportleistung liefert TREMOD Daten, die unmittelbar in URMOD übernommen werden können (A-Matrix).

Transportleistungen Endnachfrage: Die TREMOD-Indikatoren für die Konsumnachfrage der privaten Haushalte nach Transportdienstleistungen können unmittelbar in URMOD übernommen werden (Y-Matrix).

Vorleistungsnachfrage nach Transportleistungen: Die Schätzungen des TREMOD-Modells über die Entwicklung der Transportnachfrage für Vorleistungszwecke müssen vor Einbau in das Modell (A-Matrix) um den Skaleneffekt bereinigt werden um eine Doppelzählung zu vermeiden.

8.2.4.2 Fahrzeuge

Der Effekt Fahrzeuge (Tabelle 1, Faktor 8) berücksichtigt die Bruttoinvestitionen in Transportausrüstung und den laufenden Erhaltungsaufwand für Fahrzeuge.

Investitionen: Die aus TREMOD abgeleiteten Veränderungsindikatoren können unmittelbar in die Zellen der Endnachfrage Matrix für Fahrzeuginvestitionen übernommen werden (Y-Matrix).

Reparaturen: Für die Ableitung der Entwicklungen der Inputkoeffizienten für Reparaturen (A-Matrix) musste eine Bereinigung um den Skaleneffekt durchgeführt werden.

8.3 Technologischer Wandel 2030

Der Verkehrsbereich lässt sich in die Verkehrsträger Straße, Schiene, Schiff und Flugzeug und in den Transport von Personen und Gütern unterteilen und in jedem dieser Fälle können sich Einsparpotenziale jeweils bezüglich der Infrastruktur, der Fahrzeuge und des Kraftstoffverbrauchs ergeben. Daher wurden auf Basis von aus der Literatur bekannten Fakten und einer Diskussion im Rahmen eines Fachgespräches diejenigen (in grün bezeichneten) Bereiche identifiziert, die voraussichtlich besonders signifikante Einsparpotenziale aufweisen und daher einer detaillierteren Analyse unterzogen werden sollen (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Verkehrsbereiche mit Rohstoffeinsparpotenzial im Szenario TW30 in Deutschland

		Kraftstoff	Fahrzeuge	Infrastruktur
Straße	Personen	BEV (PHEV, FCV) Effiz. Antrieb (HCCI)	Leichtbau (CFK)	RC-Baustoffe, ressourceneff. Beton
	Güter	Effiz. Antrieb, Aerodynamik	Verkehrslenkung, effiz. Logistik	RC-Baustoffe, ressourceneff. Beton
Schiene	Personen	Hybridantrieb	Triebwagen	RC-Baustoffe, ressourceneff. Beton
	Güter	Erneuerbarer Strom (Antrieb)	Effiz. Nutzung	RC-Baustoffe, ressourceneff. Beton
(Binnen) Schifffahrt	Hauptsächlich Güter			
Flugverkehr	Hauptsächlich Personen	Kraftstoffsparende Leichtbauflugzeuge	Flugzeugleichtbau	

Anmerkung: Im Detail untersuchte Bereiche mit hohem Einsparpotenzial sind grün markiert.

Quelle: eigene Darstellung.

8.3.1 Pkw-Leichtbau: Herstellung

In Deutschland verkehrten laut Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [Intraplan, 2014] im Jahr 2010 42,3 Mio. Pkws und bis 2030 wird diese Zahl voraussichtlich um weitere knapp 10 % ansteigen. Für den (für die Herstellung erforderlichen) Rohstoffverbrauch maßgeblicher ist die Anzahl der Neuzulassungen, die im Jahr 2010 bei 3,2 Mio. lag. Angesichts des Einsatzes von rund einer Tonne Stahl pro Pkw und der Möglichkeit, den für den Karosseriebau verwendeten Teil dieses Stahls durch kohlefaser-verstärkten Kunststoff (CFK) zu ersetzen (vgl. Kapitel 4.3.2.3) deutet sich hier ein hohes Einsparpotenzial an.

Zwecks Quantifizierung dieses Potenzials wurde die Gesamtzahl der zugelassenen Pkws auf Grundlage der Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes für 2015 zunächst auf einzelne Fahrzeugsegmente aufgeteilt. Für jedes dieser Segmente wurde dann die Masse an Stahl abgeschätzt, die für den Bau der Karosserie jedes dieser Fahrzeuge benötigt wird. Ausgehend von einer Abschätzung für den VW Golf (in Kap. 4.3.1.3) reicht diese von ca. 300 kg für ein kleines bis rund 500 kg für ein Oberklasse- oder Geländefahrzeug. Außerdem wurde eine Abschätzung darüber angestellt, welcher Anteil der Fahrzeuge jedes Segmentes bis zum Jahr 2030 mit einer CFK- anstelle einer Stahlblechkarosserie hergestellt werden könnte. Dabei spielt einerseits die Verwendung der Fahrzeuge eine Rolle, der entsprechend CFK-Karosserien bei Sportwagen wegen der Gewichtseinsparung sehr sinnvoll sind, wogegen sie für Geländewagen wegen der geringeren Robustheit weniger geeignet erscheinen. Andererseits sind CFK-Karosserien teurer, weswegen sie bei teureren Fahrzeugen mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Einsatz

kommen als bei Kleinwagen. Eine wichtige Rolle dürfte außerdem spielen, ob es sich um ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug handelt, da sich hier das geringere Gewicht förderlich auf die Reichweite auswirkt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass bis zum Jahr 2030 insgesamt bis zu 26 % des für den Karosseriebau in Pkws verwendeten Stahls durch CFK ersetzt werden könnten. Aufgeschlüsselt nach der Art des Fahrzeugantriebes und auf Basis der jeweiligen Anteile an den Neuzulassungen (aus TREMOD 5.53) schätzen wir, dass der Anteil der CFK-Karosserien bei den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit 40 % sogar deutlich höher sein wird als der Durchschnittswert von 26 %, wogegen der Anteil konventioneller Pkw mit CFK-Karosserie bei nur 15 % liegen dürfte. Grund dafür ist nicht nur der für Elektrofahrzeuge relevante durch den Leichtbau erzielbare Reichweitenvorteil, sondern auch die Tatsache, dass im Zuge der Entwicklung eines Elektrofahrzeugs oftmals nicht nur der Antrieb, sondern das gesamte Fahrzeug einer Überarbeitung und oft Neukonstruktion bedarf.

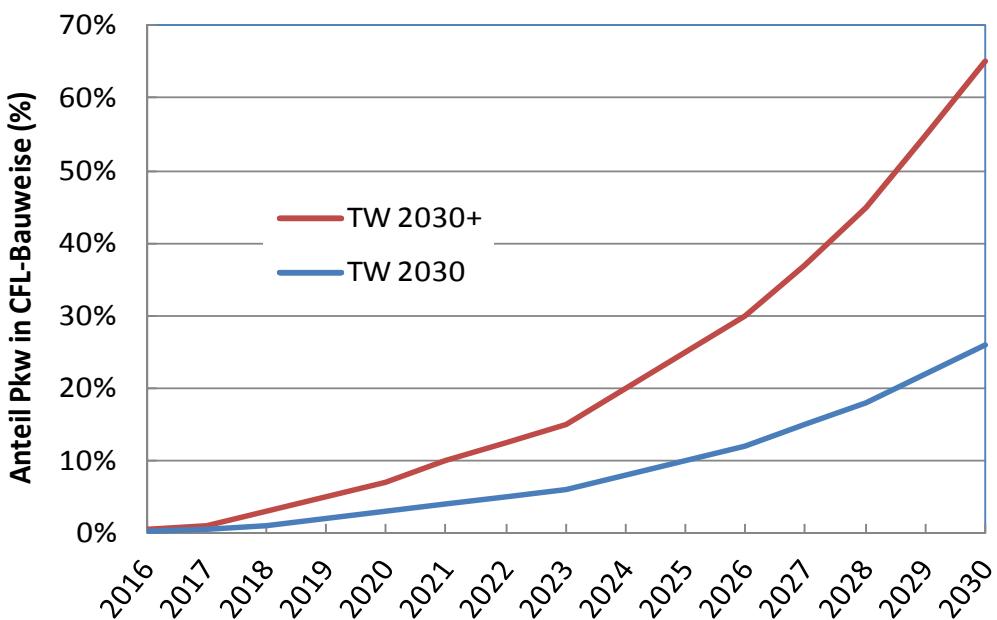
Selbstverständlich zieht der Minderverbrauch an Stahl einen Mehrverbrauch an CFK nach sich, wobei anstelle von einer Tonne Stahl nur 0,5 Tonnen CFK verwendet werden. Letzterer besteht zu 80 % aus Kohlefasern, die der Kunststoffverarbeitung entstammen, und zu 20 % aus einem Matrix-Kunststoff, der von der chemischen Industrie bereitgestellt wird.

8.3.2 Pkw-Leichtbau: Betrieb

Die verstärkte Einführung des Leichtbaus insbesondere unter Nutzung von CFK im Fahrzeugbau hat nicht nur eine Verringerung des Rohstoffeinsatzes bei der Herstellung der Fahrzeuge zur Folge, sondern trägt auch zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei. Dabei stellt der Leichtbau nur eine von einer ganzen Anzahl von Ansätzen dar, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Die meisten dieser Ansätze befinden sich schon heute in der Umsetzung und beziehen sich überwiegend auf effizienzsteigernde Maßnahmen vor allem beim Antrieb und bspw. in der Aerodynamik der Fahrzeuge. Sie sollen dazu beitragen, die Senkungen der spezifischen Kraftstoffverbräuche bzw. CO₂-Emissionen herbeizuführen, die politisch bereits beschlossen und daher schon für das Szenario AZE vorgesehenen sind. Dabei ist es eigentlich nicht möglich eine Zuordnung vorzunehmen, welche der rohstoffeffizienzsteigernden technischen Maßnahmen in welchem Umfang zur Erreichung der politisch bereits beschlossenen Ziele beiträgt und damit dem AZE zuzuordnen ist und welche das Erreichen darüber hinaus gehender Ziele ermöglichen und damit dem Szenario TW30 zuzuordnen wären. Fest steht, dass die im AZE-Szenario für 2030 (gegenüber 2010) angestrebten spezifischen Kraftstoffeinsparungen gemäß dem TREMOD-Modell 19 % betragen. Im Vergleich dazu gehen die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, das Innovationsszenario in Modell Deutschland und das Szenario KS80 in Klimaschutzszenario 2050 für den Zeitraum von 2010 bis 2030 von Effizienzsteigerungsraten von 40 % bis 60 % aus. Betrachtet man diese Steigerungsraten als Potenzial für das Szenario TW, dann ergibt sich für letzteres im Vergleich zum AZE-Szenario ein zusätzlicher Effizienzanstieg um 26 % und dementsprechend eine zusätzliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 20 %.

Grundsätzlich ist der Pkw-Leichtbau in der Lage, einen Großteil dieser Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zu erbringen. Pro 100 kg Gewichtserspartniss resultiert bei Pkws ein Verbrauchsrückgang von ca. 0,4 l/100km. Das ergibt bei der zuvor berechneten, durchschnittlichen Gewichtseinsparung von 185 kg pro Fahrzeug und einem aktuellen Durchschnittsverbrauch von ca. 6 l/100km eine Verbrauchsreduktion um 12 %. Allerdings ist für die 2030 durch Pkw-Leichtbau tatsächlich erzielbaren Kraftstoffeinsparungen der *Bestand* an Leichtbau-Fahrzeugen maßgeblich, der sich aus der Gesamtzahl der Neuzulassungen bis 2030 ergibt (vgl. Abbildung 49) und im Verhältnis zum Gesamtbestand nur etwa 10 % beträgt. Das resultierende Verbrauchsreduktionspotenzial beträgt damit auch nur 1,2 %.

Abbildung 49: Angenommener Anteil der Pkw mit Leichtbau-Karosserie in CFK-Ausführung an allen Pkw-Neuzulassungen in den Szenarien TW30 und TW30+ in den Jahren 2016 bis 2030



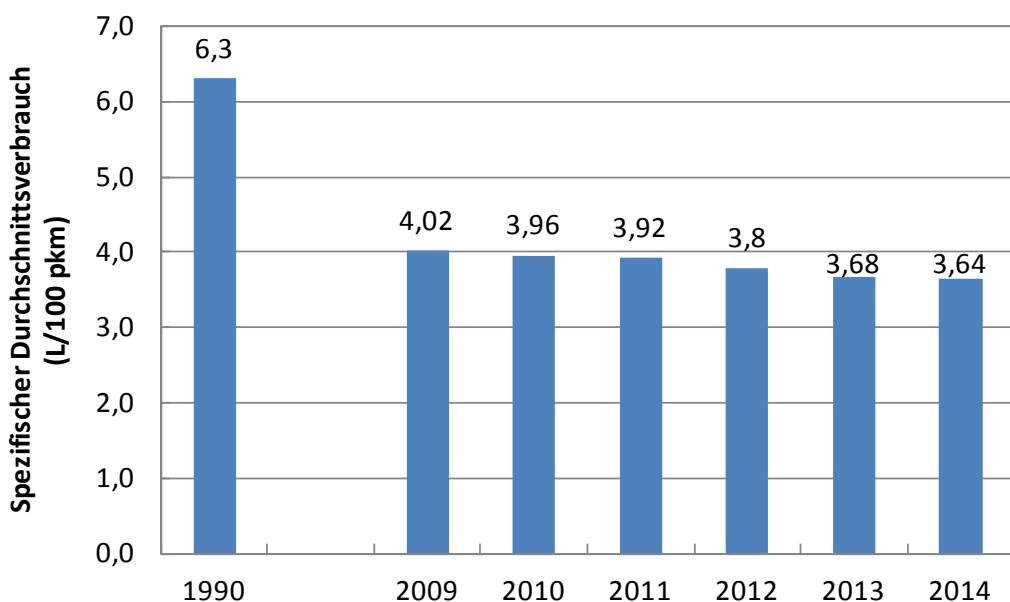
Quelle: Fraunhofer ISI, eigene Annahmen.

8.3.3 Flugzeug-Leichtbau: Betrieb

Obwohl der Luftverkehr laut Verkehrsverflechtungsprognose hinsichtlich seiner Verkehrsleistung selbst im Personenverkehr nicht an den Schienenverkehr heranreicht, sind der Kraftstoffverbrauch und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen im Luftverkehr deutlich höher als im Schienenverkehr. Im Vergleich dazu ist der Rohstoff- bzw. Materialaufwand für die Herstellung der Flugzeuge naturgemäß deutlich geringer als beim Rollmaterial der Eisenbahn, da Flugzeuge ihrer Bestimmung entsprechend besonders leicht gebaut und wegen ihrer hohen Kosten intensiv genutzt werden müssen, wogegen es bei Lokomotiven und Waggons der Bahn in besonderem Maße auf Stabilität und Langlebigkeit ankommt. Daher werden im Folgenden nur die Einsparpotenziale bzgl. des Kraftstoffverbrauchs im Luftverkehr betrachtet.

Laut Energieeffizienz- und Klimaschutzreport 2015 des Bundesverbandes der Deutschen Luftverkehrswirtschaft [BDL, 2015] ist die Verkehrsleistung im Luftverkehr von 1990 bis 2013 um 219 % angestiegen, wogegen der Kerosinbedarf nur um 91 % anstieg. Seit 2007 ist der Kerosinbedarf sogar nahezu gleich geblieben, obwohl die Beförderungsleistung im gleichen Zeitraum um mehr als ein Fünftel anstieg. Dieser Effizienzgewinn schlägt sich auch darin nieder, dass der durchschnittliche spezifische Verbrauch im Zeitraum von 1990 bis 2014 von 6,3 auf 3,64 Liter pro Passagier und 100 km Flugstrecke sank (vgl. Abbildung 50). Das entspricht einem Rückgang um rund 2 %, wobei diese historische Entwicklung auch das AZE-Szenario in Deutschland bis 2030 charakterisieren dürfte. Gleichzeitig wird die Verkehrsleistung in Deutschland bis 2030 in ähnlichem Umfang zunehmen, so dass der Rohstoffverbrauch an dieser Stelle mehr oder weniger stagnieren dürfte.

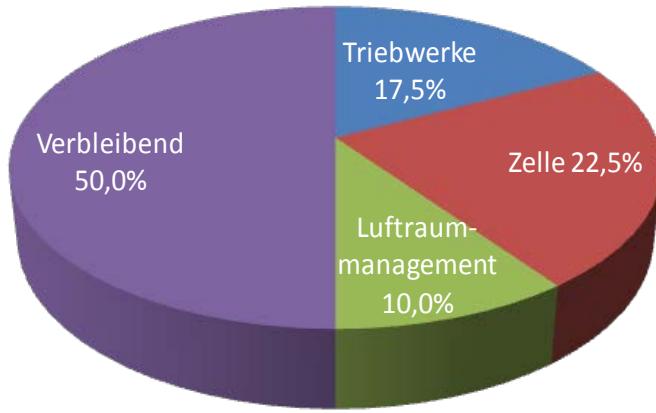
Abbildung 50: Entwicklung des spezifischen Durchschnittsverbrauchs der deutschen Flugzeugflotte



Quelle: [BDL, 2015]

Im TW-Szenario kommen dagegen die maximalen Einsparpotenziale zum Ansatz, die aus aktueller Sicht umsetzbar erscheinen. Diese Potenziale können einer Studie von Gmelin et al. [Gmelin et al., 2008] im Auftrag des BMU entnommen und folgendermaßen zusammengefasst werden. Insgesamt soll der spezifische Kerosinverbrauch über einen Zeitraum von 15 Jahren (ursprünglich bis 2020) halbiert werden, wovon eine Reduktion um 15 % bis 20 % auf die Triebwerke entfallen, 20 % bis 25 % auf die Zelle und 5 % bis 10 % auf ein effizienteres Luftverkehrsmanagement (vgl. Abbildung 51).

Abbildung 51: Einsparpotenziale bzgl. Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen durch Maßnahmen in verschiedenen Bereichen der Luftfahrt



Quelle: [Gmelin et al., 2008].

Eine Reduktion in diesem Umfang stellt die Grenze des technisch Machbaren dar und eine vollständige Umsetzung war zum Zeitpunkt der Studie noch nicht absehbar. Sie entspräche einer jährlichen Reduktion um jeweils gut 4 %, d.h. eine mehr als doppelt so starke Reduktion wie im Referenzfall. Werden diese Zahlen auf den Zeitraum von 2010 bis 2030 übertragen, so ergibt sich im Jahr 2030 im Szenario TW30 ein gegenüber dem AZE um rund 30 % reduzierter spezifischer (und wegen der gleichen Ver-

kehrsleistung auch absoluter) Kerosinverbrauch. Allerdings soll von dieser Reduktion nur der Teil betrachtet werden, der auf Leichtbau zurückzuführen ist (d.h. ein Drittel bis ein Viertel je nach Länge der Flugstrecke). Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bis zum Jahr 2030 höchstens die Hälfte der Flugzeugflotte dem neuen Standard würde angepasst werden können. Wir gelangen so zu einer Reduktion, die etwa einem Sechstel der 30 % entspricht, um die sich die Szenarien TW30 und AZE im Jahr 2030 unterscheiden, das sind %.

8.3.4 Schienengüterverkehr: effizientere Nutzung des Rollmaterials

Durch die effizientere Nutzung, d.h. kürzere Standzeiten, bessere Auslastung, weniger Leerfahrten, ließen sich bei der Bahn Schätzungen von Doll (2015) zufolge längerfristig bis zu 20 % und mittelfristig, bis 2030 10 % des Bestandes an Güterwagons und entsprechenden Lokomotiven einsparen. Da Güterwagons hinsichtlich ihrer grundlegenden Bestandteile eine Nutzungsdauer von 40 Jahren aufweisen, müssten jährlich 2,5 % des Bestandes ersetzt werden. Bei einem Gesamtbestand von 119.000 (DB-eigenen) Güterwagons (in 2010; BMVI 2014) wären das 2.975 Wagons. Um diesen Bestand von 2016 bis 2030 um 10 % zu reduzieren, müssten bis 2030 jährlich nur 2.180 Wagons ersetzt werden (d.h. knapp 800 oder 27 % weniger als 2010). Allerdings steigt die Güterverkehrsleistung auf der Schiene laut Verflechtungsprognose im Zeitraum von 2010 bis 2030 um über 42 % an, weshalb die Zahl bereitzustellender Wagons trotz Effizienzsteigerung deutlich ansteige. Nach 2030, wenn der um 10 % reduzierte Bestand erreicht ist, ist die Reduktion der verwendeten Rohstoffinputs um genau diese 10 % relevant. Dabei spielen Veränderungen im Referenzbestand (im Szenario AZE) keine Rolle, da nur das Verhältnis der Wagenbestände in den Szenarien AZE und TW30 relevant ist, welches unabhängig vom jeweiligen absoluten Bestand 1:0,9 beträgt.

8.3.5 Überleitung der Daten in URMOD

Für Zwecke des TW-Szenarios wurden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt: "PKW- Leichtbau - Herstellung", „Pkw-Leichtbau - Betrieb“, „Luftfahrzeuge-Leichtbau - Betrieb“ und Verbesserung der Effizienz beim Schienengüterverkehr“.

Pkw-Leichtbau - Herstellung: Der Effekt Pkw-Leichtbau – Herstellung (Tabelle 2, Faktor 13) bezieht sich auf die Technikänderung (A-Matrix) bei der Pkw-Herstellung (jeweils Elektro- und Nicht-Elektro-Fahrzeuge) durch Substitution von Stahl- durch CFK-Karosserien. Die Auflösung der verfügbaren IOT reicht nicht aus, um diesen speziellen Effekt unmittelbar abzubilden. Die Pkw-Produktion müsste unterteilt werden in Pkw mit Stahl- und mit CFK-Karosserien, da diese Teilbereiche unterschiedliche Inputstrukturen aufweisen. Zur Ableitung der Veränderung der relevanten Zellen der A-Matrix in der existierenden IOT wird deshalb ein externes Modell vorgeschaltet, das die notwendigen Differenzierungen enthält.

Pkw-Leichtbau - Betrieb: Der Effekt Pkw-Leichtbau - Betrieb (Tabelle 2, Faktor 14) betrachtet die Einspareffekte an Kraftstoff und Strom durch den Einsatz von leichteren "CFK-Fahrzeugen". Die Auflösung der verfügbaren IOT reicht nicht aus, um diesen speziellen Effekt unmittelbar abzubilden. Die Aktivität müsste unterteilt werden in Pkw mit Stahl- und mit CFK-Karosserien, da diese Teilbereiche unterschiedliche Inputstrukturen bezüglich Energie aufweisen. Zur Ableitung der Veränderung der relevanten Zellen der A-Matrix in der existierenden IOT wird deshalb ein externes Modell vorgeschaltet, das die notwendigen Differenzierungen enthält.

Luftfahrzeuge -Leichtbau - Betrieb: Der Effekt Luftfahrzeuge-Leichtbau - Betrieb (Tabelle 2, Faktor 15) betrachtet die Einspareffekte an Kraftstoff durch den Einsatz von leichteren "CFK-Flugzeugen". Die Auflösung der verfügbaren IOT reicht nicht aus, um diesen speziellen Effekt unmittelbar abzubilden. Die Aktivität müsste unterteilt werden in Luftfahrzeugen mit konventionellen und mit CFK-Bauteilen, da diese Teilbereiche unterschiedliche Kraftstoffintensitäten aufweisen. Zur Ableitung der Veränderung der relevanten Zellen der A-Matrix in der existierenden IOT wird deshalb ein externes Modell vorgeschaltet, das die notwendigen Differenzierungen enthält.

Verbesserung der Effizienz des Schienengüterverkehrs: Der Faktor Verbesserung der Effizienz des Schienengüterverkehrs berücksichtigt den Einfluss einer effizienteren Nutzung von Rollmaterial für den Eisenbahngüterverkehr (Tabelle 2, Faktor 16). Die effiziente Nutzung des Rollmaterials für den Eisenbahngüterverkehr wirkt sich sowohl als geringer Investitions- (Y-Matrix) als auch als geringerer Reparaturbedarf (A-Matrix) aus. Die Auflösung der verfügbaren IOT reicht nicht aus, um diesen beiden speziellen Einflussfaktor unmittelbar abzubilden. Die Gütergruppe Schienenfahrzeuge müsste so untergliedert werden, dass die Fahrzeuge für den Güterverkehr gesondert nachgewiesen werden. Zur Ableitung der Veränderung der relevanten Zellen der A-Matrix und der Y-Matrix in der existierenden IOT wird deshalb ein externes Modell vorgeschaltet, das die notwendigen Differenzierungen enthält.

8.4 Weitreichende Tendenz TW30+

8.4.1 Pkw-Leichtbau: Herstellung

In der Abschätzung TW30+ werden die gleichen Fahrzeug(zulassungs)zahlen unterstellt wie im Szenario TW30. Auch die Relationen zwischen dem ersetzen Material (Stahl) und dem Substitut (CFK-Fasern und -Matrix) bleiben die gleichen. Der Unterschied besteht nur darin, dass ein größerer Anteil der Fahrzeuge mit CFK-Karosserie ausgestattet wird. Dieser Anteil beträgt nun für die Summe aller neu zugelassenen Fahrzeuge 65 % (anstelle von 26 %), für die Elektrofahrzeuge sogar 80 % und für die konventionellen Fahrzeuge immerhin 53,5 %.

Die Ursache dafür, dass auch in TW30+ nur etwas mehr als die Hälfte aller konventionellen Pkw in Leichtbau ausgeführt wird, besteht darin, dass für einige Verwendungen auch in Zukunft Stabilität und Robustheit Priorität vor Leichtbau und Energieeinsparung haben wird.

8.4.2 Pkw-Leichtbau: Betrieb

Die durch den verstärkten Leichtbau von Pkws erzielbare Kraftstoffeinsparung kann für die Abschätzung TW30+ analog zu den Annahmen und Diskussion in Kapitel 8.3.1 ermittelt werden. Auch hier gilt, dass der Bestand an Leichtbau-Fahrzeugen maßgeblich ist, der sich aus den entsprechenden Neuzulassungen des Jahres 2030 und aller Vorjahre bis 2016 speist und unseren Annahmen zufolge etwa 25 % betragen sollte, wodurch das Reduktionspotenzial durch den Leichtbau von Pkws auf rund 3 % beschränkt ist.²⁶

8.4.3 Flugzeug-Leichtbau: Betrieb

Die durch den verstärkten Leichtbau von Flugzeugen erzielbare Kraftstoffeinsparung in TW30+ kann analog zu den Annahmen und Berechnungen in Kapitel 8.3.3 ermittelt werden. Im Unterschied zu TW30 wird aber berücksichtigt, dass bis zum Jahr 2030 die gesamte Flotte in entsprechendem Umfang in Leichtbau ausgeführt werden kann. Das liefert auf eine über AZE hinausgehende Reduktion um 10 % hinaus. Angesichts der deutlich höheren insgesamt erzielbaren Reduktionsziele von rund 30 % durch Anwendung aller Optionen (d.h. effizientere Triebwerke, bessere Aerodynamik und effizienteres Management zusätzlich zum Leichtbau) stellt sich jedoch die Frage, ob die Beschränkung auf den Leichtbau gerade in TW30+ sinnvoll ist.

8.4.4 Schienengüterverkehr: effizientere Nutzung des Rollmaterials

Die durch die effizientere Nutzung des Rollmaterials im schienengebundenen Güterverkehr erzielbaren Rohstoffeinsparungen in TW30+ können analog zu den Annahmen und Berechnungen in Kapitel 8.3.3 ermittelt werden. Im Unterschied zu TW30 wird aber berücksichtigt, dass bis zum Jahr 2030 das volle Potenzial, d.h. 20 % des Rollmaterials eingespart werden können. Die absoluten Bestände spielen an dieser Stelle keine Rolle, finden aber in der IOT-Matrix in den Wirtschaftszweigen Vorleistungen

²⁶ Angesichts der deutlich höheren Reduktionsziele von durchschnittlich rund 20 Prozent in den anspruchsvoller Szenarien der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, des Modells Deutschland und des Klimaschutzszenario 2050 erscheint es wahrscheinlich, dass noch andere, über den Leichtbau hinausgehende Einspareffekte erzielbar sind, die hier aber nicht berücksichtigt werden können.

(Erhaltungsreparaturen) für Schienenfahrzeuge und Ausrüstungen mit Schienenfahrzeugen Berücksichtigung.

8.4.5 Überleitung der Daten in URMOD

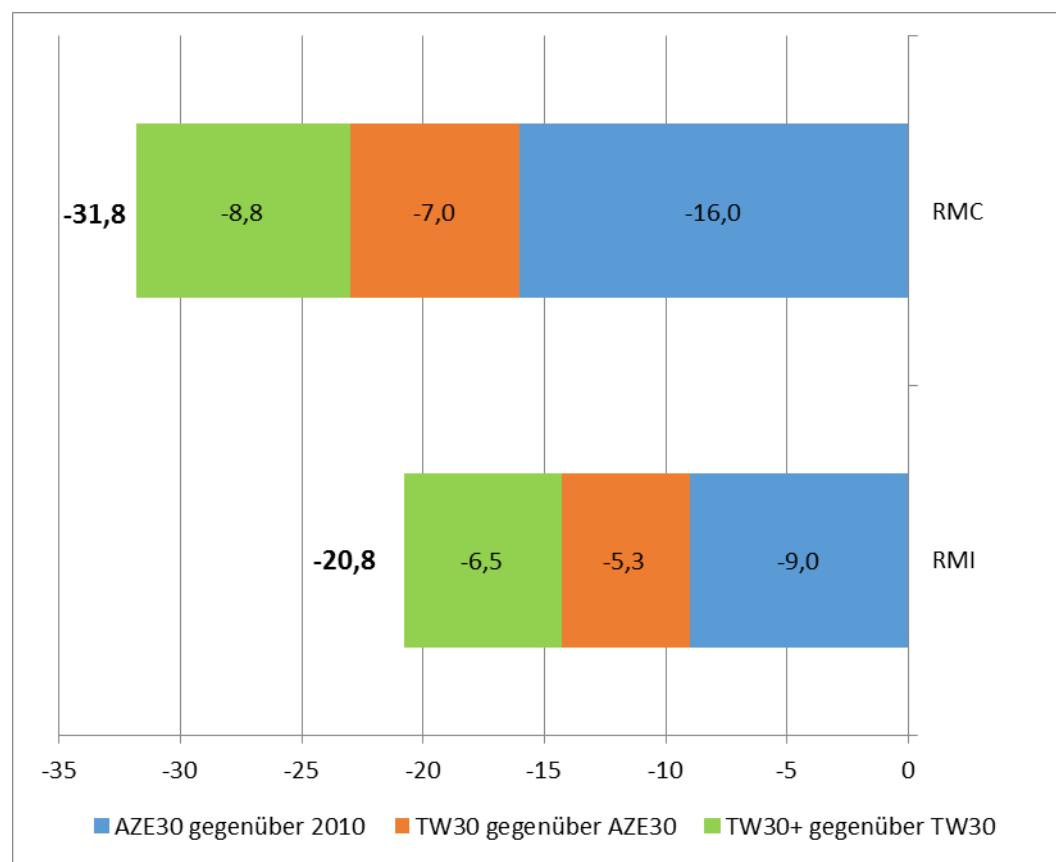
Das TW30+ Szenario wird für alle Faktoren in analoger Weise zu TW30 modelliert.

9 Ergebnisse der Szenarioberechnungen

9.1 Überblick über die allgemeinen Entwicklungstendenzen

Es wurden, wie mehrfach angesprochen, drei verschiedene Szenarien zur zeitlichen Entwicklung des kumulierten Rohstoffs aufwandes für das Jahr 2030 ausgehend vom Basisjahr 2010 ermittelt: ein Trendszenario (AZE), ein Szenario zum „Technischen Wandel“ bis 2030 (TW30) und eine Abschätzung TW30+, welches den technischen Wandel bis 2050 fortgeschreibt. Letzteres kann als eine technisch ambitioniertere Variante von TW30 interpretiert werden. Abbildung 52 gibt einen Überblick über die Gesamtergebnisse der betrachteten Szenarien.

Abbildung 52: Szenarienergebnisse: Veränderung des RMC und RMI ggü. dem Basiswert für 2010



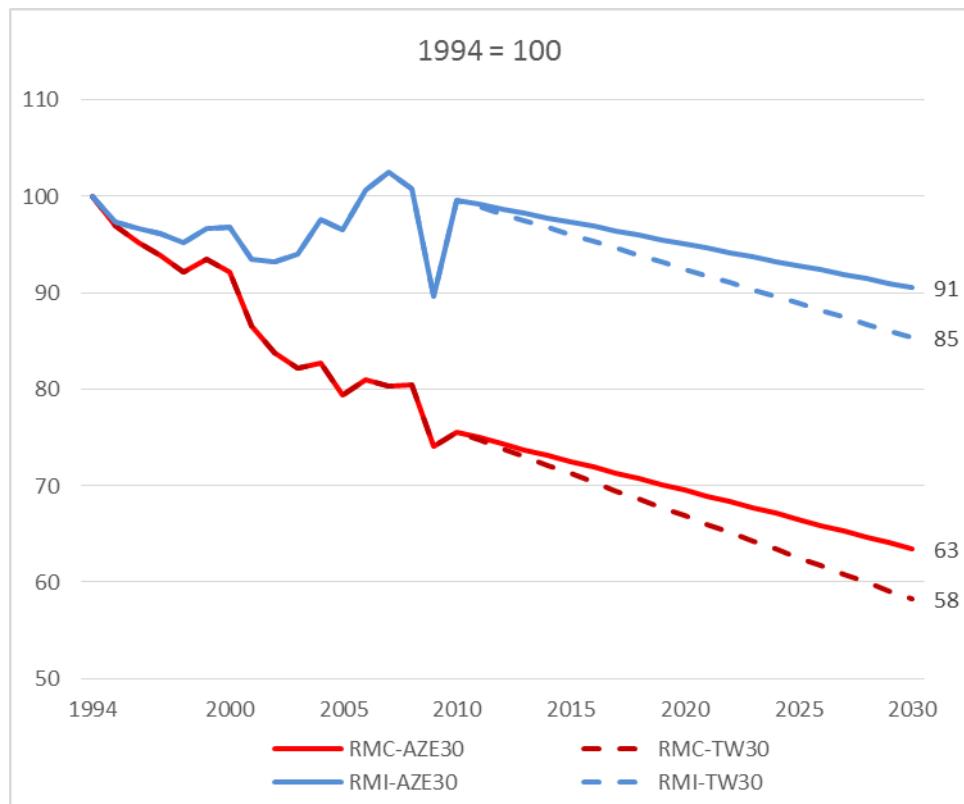
Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Gezeigt ist die Veränderung gegenüber den Basiswerten von 2010 aufgeteilt auf die jeweiligen zusätzlichen Beiträge der Szenarien. Bezogen auf den RMC führt der Gesamteffekt der drei berücksichtigten Szenarien zu einem Rückgang von -31,8 %. Der Beitrag des Trendszenarios (AZE) beläuft sich auf -16 %. Die zusätzlichen Beiträge des Szenarios TW30 (-7,0 %) und von TW30+ (-8,8 %) sind zusammen (-15,8 %) annähernd gleich hoch. Beim RMI ist im Vergleich zum RMC der Rohstoffs aufwand zur Herstellung der Exportgüter eingeschlossen. Zugleich steigen die Exporte überproportional. Daher

fällt der relative Rückgang des RMI im Vergleich zum RMC in allen Szenario Varianten deutlich schwächer aus. Der Gesamteffekt aller drei Szenarien zum RMI beläuft sich auf -20.8 %. Die Beiträge der einzelnen Szenarien sind ähnlich wie beim RMC.

Abbildung 53 und Abbildung 54 geben einen Überblick über die zeitliche Entwicklung des RMC und des RMI für den Zeitraum 1994 bis 2010 und über die voraussichtliche Entwicklung von 2010 bis 2030 gemäß dem Trendszenario AZE und dem Gesamteffekt von AZE zuzüglich TW30.

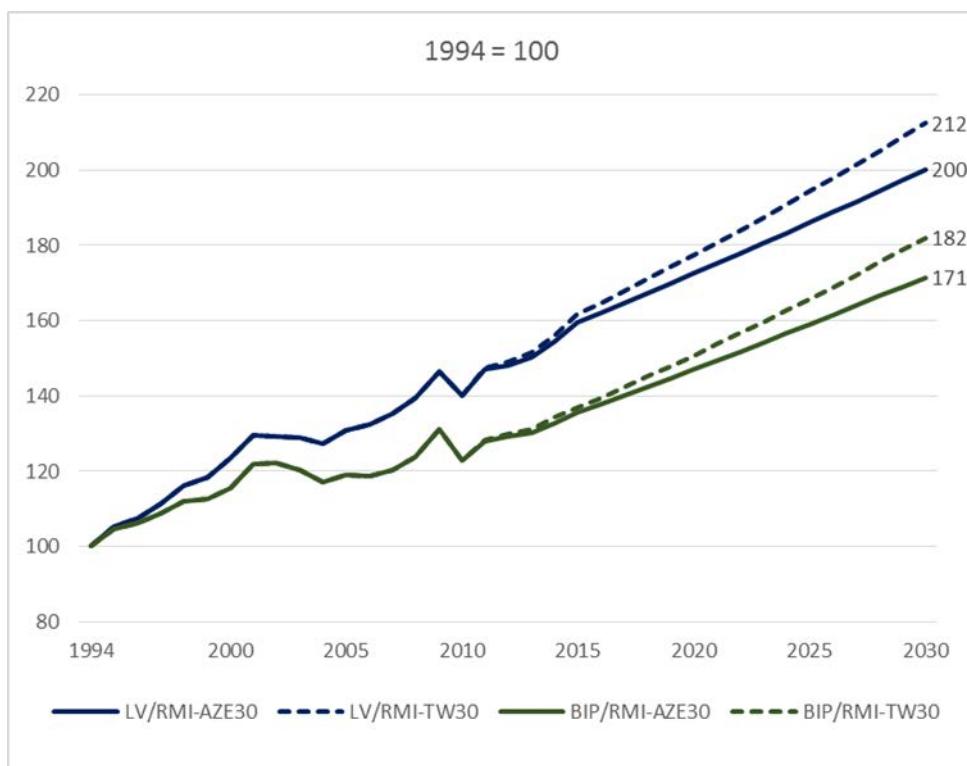
Abbildung 53: Zeitliche Entwicklung RMI und RMC gemäß Szenario AZE und TW30



Quelle: URMOD für 2010 und 2030 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994 – 2010 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA). Ab 2011 lineare Interpolation.

Im Zeitraum zwischen 1994 bis 2010 verminderte sich der kumulierte Rohstoffaufwand für die Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC) um rund ein Viertel während der RMI (gesamte letzte Verwendung) betrachtet über den Gesamtzeitraum stagnierte. Im Szenariozeitraum setzt sich der in der Vergangenheit beobachtete Rückgang des RMC weiter fort. Auch für den RMI wird, anders als für den Beobachtungszeitraum 1994 bis 2010, ein Rückgang erwartet. Die Rückgänge fallen bei Berücksichtigung von zusätzlichem technologischen Wandel (TW30) deutlich stärker aus als im Trendszenario (AZE).

Abbildung 54: Zeitliche Entwicklung Rohstoffproduktivität gemäß AZE und TW30 Szenario



Quelle: URMOD für 2010 und 2030 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994 – 2010 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA). Ab 2011 lineare Interpolation.

In Abbildung 54 werden jeweils zwei Produktivitätsarten dargestellt. Der grüne Graph bezieht sich auf das BIP und der blaue Graph bezieht sich auf die letzte Verwendung.

Der Zusammenhang zwischen den dafür herangezogenen monetären Aggregaten der VGR kann durch folgende Identitätsgleichung dargestellt werden:

$$\begin{aligned}
 & \text{Bruttoinlandsprodukt (BIP)} \\
 & + \text{Importe} \\
 & = \text{Letzte Verwendung (LV)}
 \end{aligned}$$

Der Materialflussindikator RMI stellt das als kumulierten Rohstoffaufwand gemessenen Äquivalent zum monetären Strom „Letzte Verwendung“ dar. Die Entwicklung der Rohstoffproduktivität²⁷ fällt auf der Grundlage des TW30 Szenarios höher aus als beim AZE30 Szenario.

In Tabelle 51 werden die in Abbildung 52 dargestellten Ergebnisse weiter differenziert nach Rohstoffarten und Güterverwendungskategorien.

Tabelle 51: Kumulierter Rohstoffaufwand nach Rohstoffarten in AZE, TW30 und TW30+

Mio. t RME	DE	IMP	RMI	Exp	RMC
Basisjahr 2010					
Insgesamt	1.046	1.621	2.667	1.276	1.391
Biomasse	269	174	443	162	281
Abiotische Materialien	776	1.448	2.224	1.114	1.109

²⁷ Zur Problematik monetärer Bezugszahlen zu den RME-Indikatoren siehe [Kaumanns / Lauber, 2014].

Metallerze	0	618	619	465	154
Nicht-metallische Mineralien	580	263	843	279	564
Fossile Energieträger	196	566	762	371	392
AZE 2030					
Insgesamt	1.008	1.418	2.426	1.257	1.169
Biomasse	286	159	445	171	274
Abiotische Materialien	722	1.259	1.981	1.086	895
Metallerze	0	539	539	428	111
Nicht-metallische Mineralien	539	234	773	308	465
Fossile Energieträger	183	486	669	350	319
AZE30 Veränderung gegenüber dem Basisjahr 2010					
Insgesamt	-38	-203	-241	-19	-222
Biomasse	17	-15	2	10	-8
Abiotische Materialien	-54	-188	-243	-28	-214
Metallerze	0	-80	-80	-37	-43
Nicht-metallische Mineralien	-41	-29	-70	29	-99
Fossile Energieträger	-13	-80	-93	-20	-73
TW30					
Insgesamt	896	1.389	2.285	1.214	1.072
Biomasse	277	157	434	168	266
Abiotische Materialien	619	1.233	1.852	1.046	805
Metallerze	0	526	526	421	105
Nicht-metallische Mineralien	496	229	725	301	424
Fossile Energieträger	122	478	600	324	276
TW30 Veränderung gegenüber AZE 30					
Insgesamt	-112	-29	-141	-44	-97
Biomasse	-9	-2	-11	-4	-7
Abiotische Materialien	-103	-27	-129	-40	-89
Metallerze	0	-13	-13	-7	-6
Nicht-metallische Mineralien	-42	-5	-48	-6	-41
Fossile Energieträger	-60	-8	-69	-26	-42
TW30+					
Insgesamt	767	1.345	2.113	1.163	950
Biomasse	274	156	431	166	264
Abiotische Materialien	493	1.189	1.682	996	686
Metallerze	0	518	519	420	99
Nicht-metallische Mineralien	460	225	685	297	388
Fossile Energieträger	33	446	478	280	199
TW30+ Veränderung gegenüber TW 30					

Insgesamt	-129	-44	-173	-51	-122
Biomasse	-3	0	-3	-1	-2
Abiotische Materialien	-126	-44	-170	-50	-120
Metallerze	0	-7	-7	-1	-6
Nicht-metallische Mineralien	-36	-4	-41	-5	-36
Fossile Energieträger	-90	-32	-122	-44	-78

Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Beim AZE-Szenario resultieren die Veränderungen des RMC gegenüber 2010 (-222 Mio. t) insbesondere aus dem Rückgang der RME der Importe von Metallen (-80 Mio. t) und fossilen Energieträgern (-80 Mio. t) sowie der Verminderung der RME der inländischen Entnahme von nicht-metallischen Mineralien (-41 Mio. t).

Der weitere Rückgang des RMC in TW30 (-97 Mio. t) kommt vor allem durch die Verminderung der inländischen Entnahme von fossilen Energieträgern (-60 Mio. t) und nicht-metallischen Mineralien (-42 Mio. t) zustande. Erstere werden überwiegend bei der Stromerzeugung eingesetzt, letztere sind vor allem Baurohstoffe.

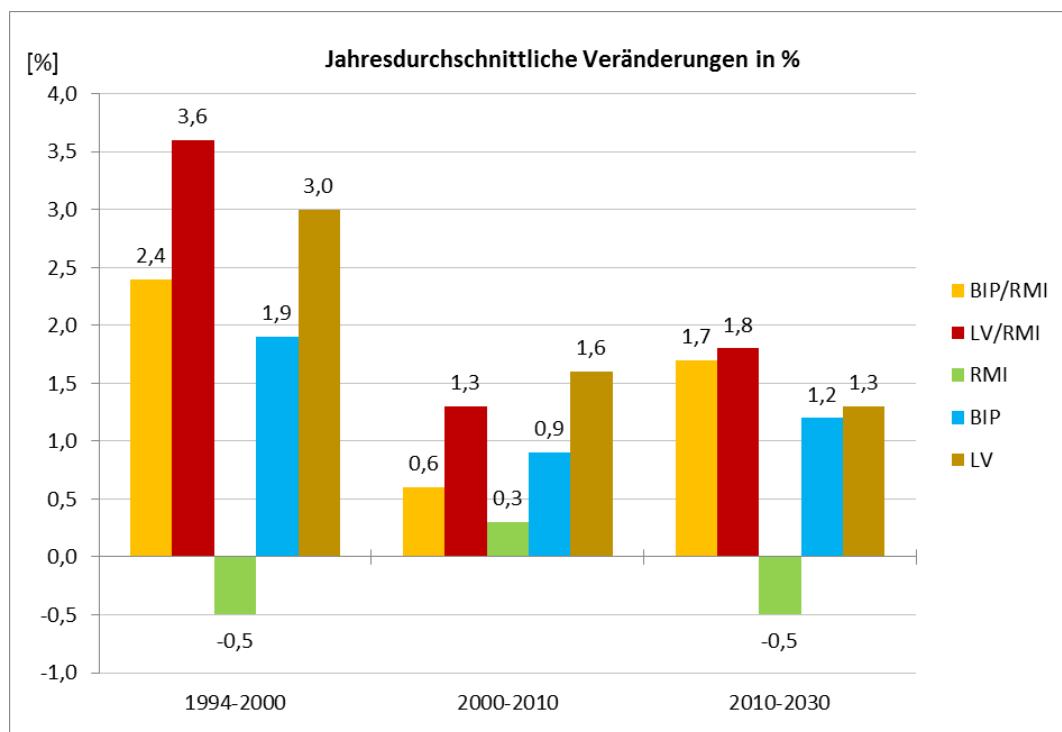
In TW30+ vermindert sich der RMC um weitere 122 Mio. t. Dieser Rückgang entsteht insbesondere durch eine Verminderung der inländischen Entnahme von fossilen Energieträgern (-90 Mio. t) und nicht-metallischen Mineralien (-36 Mio. t). Verursacht werden die Änderungen vor allem durch die in TW30+ unterstellte vollständige Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger bei der Stromerzeugung und die Intensivierung des Recyclings von Baumaterialien.

9.2 Ergebnisse: AZE

9.2.1 Jahresschnittliche Veränderungen

Abbildung 55 zeigt die jahresschnittliche Entwicklung der Rohstoffproduktivität und ihrer Komponenten für die Zeitabschnitte 1994-2000 und 2000-2010 sowie für den Prognosezeitraum 2010 bis 2030 nach AZE.

Abbildung 55: Entwicklung der Rohstoffproduktivität und der Komponenten der Rohstoffproduktivität im Szenario AZE, 1994 - 2030



Quelle: Eigene Darstellung URMOD für 2010 und 2030 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994 – 2010 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA). Ab 2011 lineare Interpolation.

Der durchschnittliche Zuwachs der betrachteten Rohstoffproduktivitäten (BIP/RMI und LV/RMI) verminderte sich im Zeitraum 2000-2010 deutlich gegenüber dem Zeitabschnitt 1994 bis 2000. Für die Periode 2010 bis 2030 wird wieder ein stärkerer Anstieg um jährlich 1,7 % (BIP/RMI) bzw. 1,8 % (LV/RMI) erwartet.

9.2.2 Dekompositionsanalyse

Zur Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Gesamtentwicklung des RMC und des RMI im Zeitraum 2010 bis 2030 nach dem AZE Szenario wurden Dekompositionsanalysen durchgeführt.

Danach wird die Gesamtentwicklung des RMC sowie des RMI rechnerisch in die drei Komponenten Skaleneffekt, Intensitätseffekt und Struktureffekt zerlegt. Diese Analyse beruht auf den tief gegliederten Ergebnissen des Modells nach Rohstoffarten und Gütergruppen.

Der Skaleneffekt beschreibt die Auswirkungen des preisbereinigten Insgesamt-Anstiegs der letzten inländischen Verwendung von Gütern (Konsumausgaben und Bruttoinvestitionen) in der Volkswirtschaft. Der Intensitätseffekt zeigt die Rohstoffeinsparungen an, die sich aus der Änderung der Produktionstechnologie in den einzelnen Produktionsbereichen ergeben haben. Dieser Effekt umfasst sowohl die effizientere Nutzung von eingesetzten Materialien als auch die Ergebnisse von Substitutionsprozessen, wie vermehrte Verwendung von Sekundärrohstoffen oder von erneuerbaren Energieträgern. Der Struktureffekt stellt die Auswirkung von Veränderungen in der Struktur der Nachfrage nach Gütern der letzten inländischen Verwendung dar. Die Ergebnisse dieser Berechnungen für den RMC werden in Abbildung 56 präsentiert.

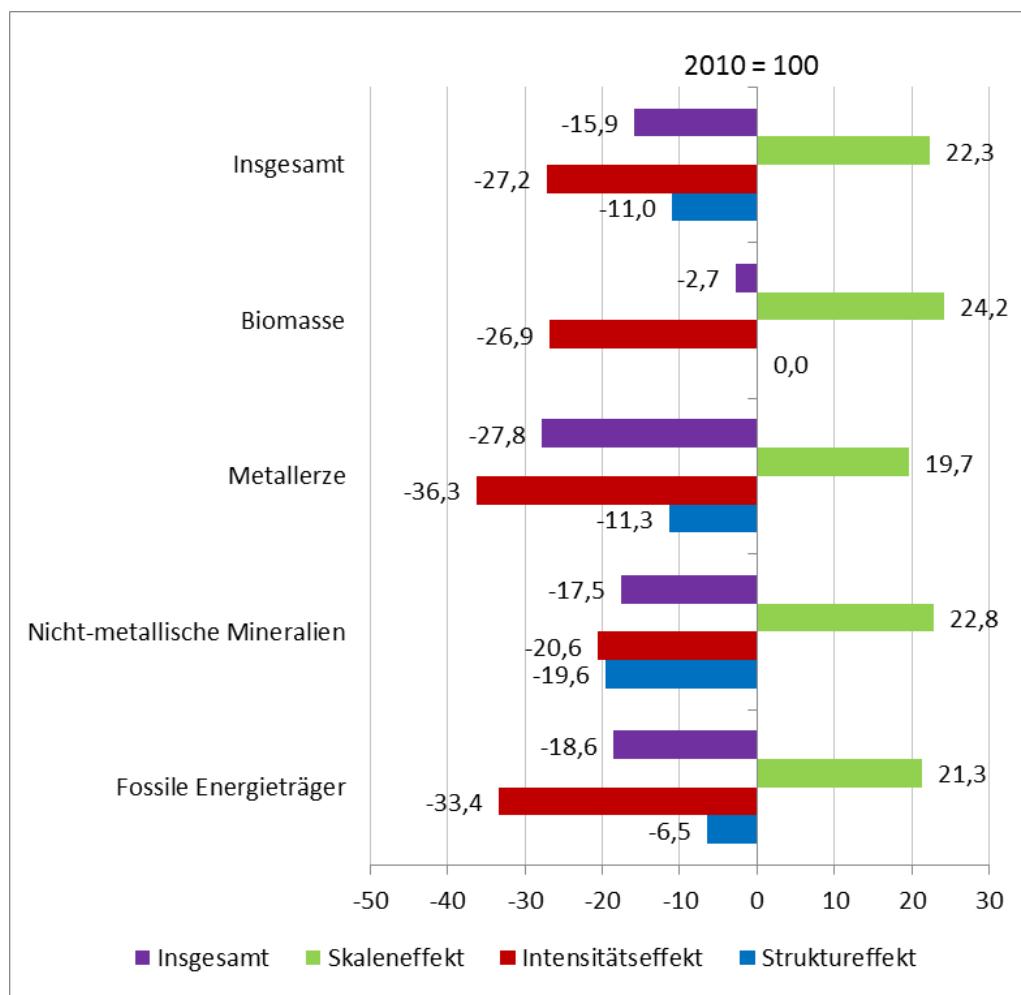
Die Abbildung zeigt für den Indikator RMC die Beiträge der drei Komponenten Skaleneffekt, Intensitätseffekt und Struktureffekt differenziert nach Rohstoffkategorien. Vom Skaleneffekt geht ein belastender Einfluss aus. Dem stehen die entlastenden Wirkungen des Intensitäts- und des Struktureffektes gegenüber. Der insgesamt Rückgang des RMC um 16,0 % setzt sich zusammen aus einen belastenden Skaleneffekt von 22,3 % und entlastendem Intensitätseffekt (-27,2 %) und Struktureffekt (-11,0 %).

Demnach trägt die Verwendung rohstoffeffizienterer Produktionstechnik deutlich stärker zum Rückgang des RMC bei als die Veränderung der Nachfragestruktur (z.B. relativer Rückgang der Bauinvestitionen).

Die Dekompositionsanalyse nach Rohstoffarten führt zu folgenden Ergebnissen: Bezogen auf die jeweiligen Gesamtwerte fällt der relative Rückgang des RMC besonders hoch bei Metallerzen aus (-27,8 %) aus. Demgegenüber ist die Verminderung des RMC bei der Rohstoffart Biomasse vergleichsweise gering (-2,7 %). Bezuglich der Beiträge der einzelnen Komponenten zeigt sich, dass der Skaleneffekt für alle Rohstoffarten eine ähnliche Größenordnung hat. Besonders ausgeprägte Intensitätseffekte sind bei Metallerzen und fossilen Energieträgern zu beobachten, die vor allem in der Produktion des verarbeitenden Gewerbes, der Elektrizitätserzeugung und bei Verkehrsdienstleistungen eine Rolle spielen. Die Struktureffekte sind bei diesen beiden Rohstoffarten relativ gering. Bei nicht-metallischen Mineralien, die zu einem großen Teil für Bauaktivitäten eingesetzt werden, fällt der Intensitätseffekt mit -20,6 % deutlich schwächer aus als bei Metallen und fossilen Energieträgern. Vergleichsweise hoch ist dagegen bei dieser Rohstoffart der entlastende Einfluss des Struktureffektes mit -19,6 % (insbesondere Verminderung der Bauproduktion).

Die in Abbildung 56 dargestellten Entwicklungen beziehen lediglich sich auf die Ergebnisse des Trendszenarios. Die weiteren im Projekt untersuchten Maßnahmen zum technischen Wandel (TW30 und TW30+), die allesamt auf eine Verbesserung der Rohstoffintensität von Produktionsprozessen durch Einsparungen oder Substitution von Materialien abzielen, sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Eine Einbeziehung dieser Maßnahmen dürfte jeweils die Komponente „Intensitätseffekt“ weiter verstärken.

Abbildung 56: Entwicklung des RMC 2010 bis 2030 nach Rohstoffarten im Szenario AZE - Komponentenzerlegung



Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Abbildung 57 zeigt die Beiträge der drei Komponenten Skaleneffekt, Intensitätseffekt und Struktureffekt differenziert nach Rohstoffkategorien für den Indikator RMI.

Die Ergebnisse der Dekompositionsanalyse für den RMI unterscheiden sich teilweise deutlich von den Angaben für den RMC. Die Unterschiede sind vor allem darauf zurückzuführen, dass bei der letzten inländischen Verwendung die Bauinvestitionen, für die insbesondere nicht-metallische Mineralien benötigt werden, einen relativ hohen Anteil beitragen. Bei der gesamten inländischen Verwendung ist aber der Anteil der Erzeugnisse des verarbeitenden Gewerbes, für deren Herstellung vor allem Metalle und Energieträger eingesetzt werden, deutlich höher.

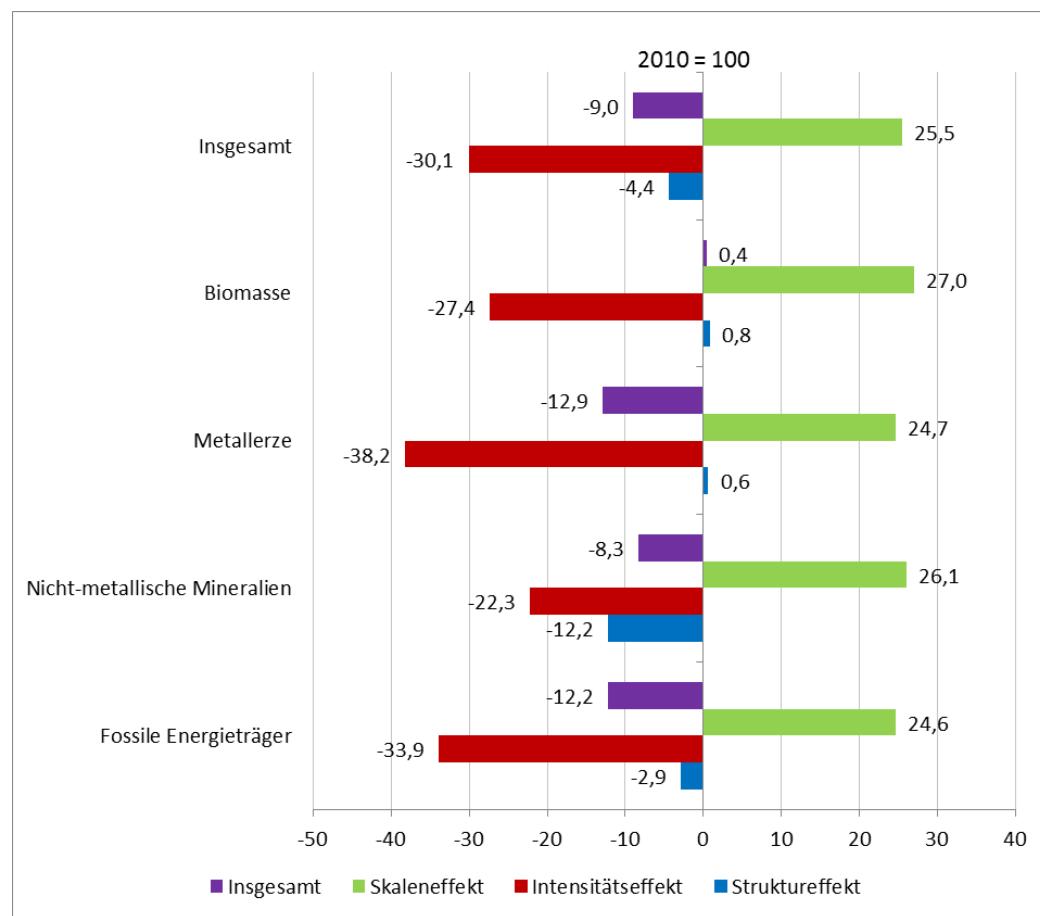
Vom Skaleneffekt geht beim RMI wie auch beim RMC ein belastender Einfluss aus. Dem stehen die entlastenden Wirkungen des Intensitäts- und des Struktureffektes gegenüber. Der insgesamt Rückgang des RMI um 9,1 % setzt sich zusammen aus einem belastenden Skaleneffekt von 25,5 % und entlastendem Intensitätseffekt (-30,2 %) und Struktureffekt (-4,3 %). Demnach trägt die Verwendung rohstoffeffizienterer Produktionstechnik deutlich stärker zum Rückgang des RMI bei als die Veränderung der Nachfragestruktur (z.B. relativer Rückgang der Bauinvestitionen).

Die Dekompositionsanalyse nach Rohstoffarten führt zu folgenden Ergebnissen: Bezogen auf die jeweiligen Gesamtwerte fällt der relative Rückgang des RMI relativ hoch bei Metallerzen (-13,2 %) und bei fossilen Energieträgern (-12,2 %) aus. Demgegenüber erhöht sich der RMI bei der Rohstoffart Biomasse sogar leicht (+0,4%). Bezuglich der Beiträge der einzelnen Komponenten zeigt sich, dass der

Skaleneffekt für alle Rohstoffarten eine ähnliche Größenordnung hat. Besonders ausgeprägte Intensitätseffekte sind bei Metallerzen und fossilen Energieträgern zu beobachten, die vor allem in der Produktion des verarbeitenden Gewerbes, der Elektrizitätserzeugung und bei Verkehrsdienstleistungen eine Rolle spielen. Die Struktureffekte sind bei diesen beiden Rohstoffarten relativ gering oder sogar leicht positiv. Bei nicht-metallischen Mineralien, die zu einem großen Teil für Bauaktivitäten eingesetzt werden, fällt der Intensitätseffekt mit -22,3 % schwächer aus als bei Metallen und fossilen Energieträgern. Vergleichsweise hoch ist dagegen bei dieser Rohstoffart der entlastende Einfluss des Struktureffektes mit -12,1 % (insbesondere Verminderung der Bauproduktion).

Die in Abbildung 57 dargestellten Entwicklungen beziehen lediglich sich auf die Ergebnisse des Trendszenarios. Die weiteren im Projekt untersuchten Maßnahmen zum technischen Wandel (TW30 und TW30+), die allesamt auf eine Verbesserung der Rohstoffintensität von Produktionsprozessen durch Einsparungen oder Substitution von Materialien abzielen, sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Eine Einbeziehung dieser Maßnahmen dürfte jeweils die Komponente „Intensitätseffekt“ weiter verstärken.

Abbildung 57: Entwicklung des RMI 2010 bis 2030 nach Rohstoffarten im Szenario AZE30 - Komponentenzerlegung



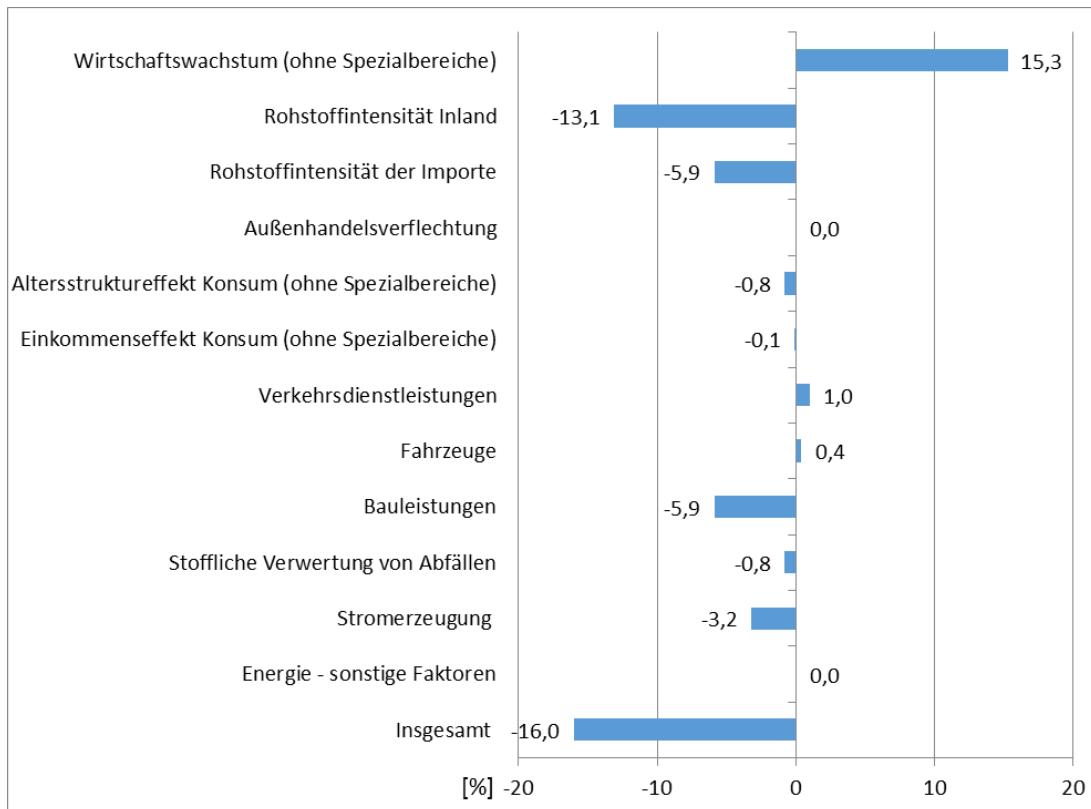
Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

9.2.3 Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen

In den nachstehenden AZE Szenario wird der Effekt verschiedener Einflussfaktoren (Maßnahmen) für den Zeitraum 2010 bis 2030 modelliert. In den Abbildung 58 und Abbildung 59 wird der Einfluss dieser Faktoren auf die Entwicklung der Indikatoren RMC und RMI untersucht. Die Darstellung knüpft an die einzelnen Maßnahmen an, die bei der Aufstellung des Szenarios herangezogen wurden. Siehe Zusammenstellung in Tabelle 1.

Die Angaben für die einzelnen Faktoren stellen die Effekte jeweils *ceteris paribus* dar, während die Angaben „Insgesamt“ (jeweils am Ende) das Ergebnis des simultanen Zusammenwirkens aller Faktoren repräsentieren.

Abbildung 58: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf den RMC – Veränderung AZE30 gegenüber 2010 in Prozent

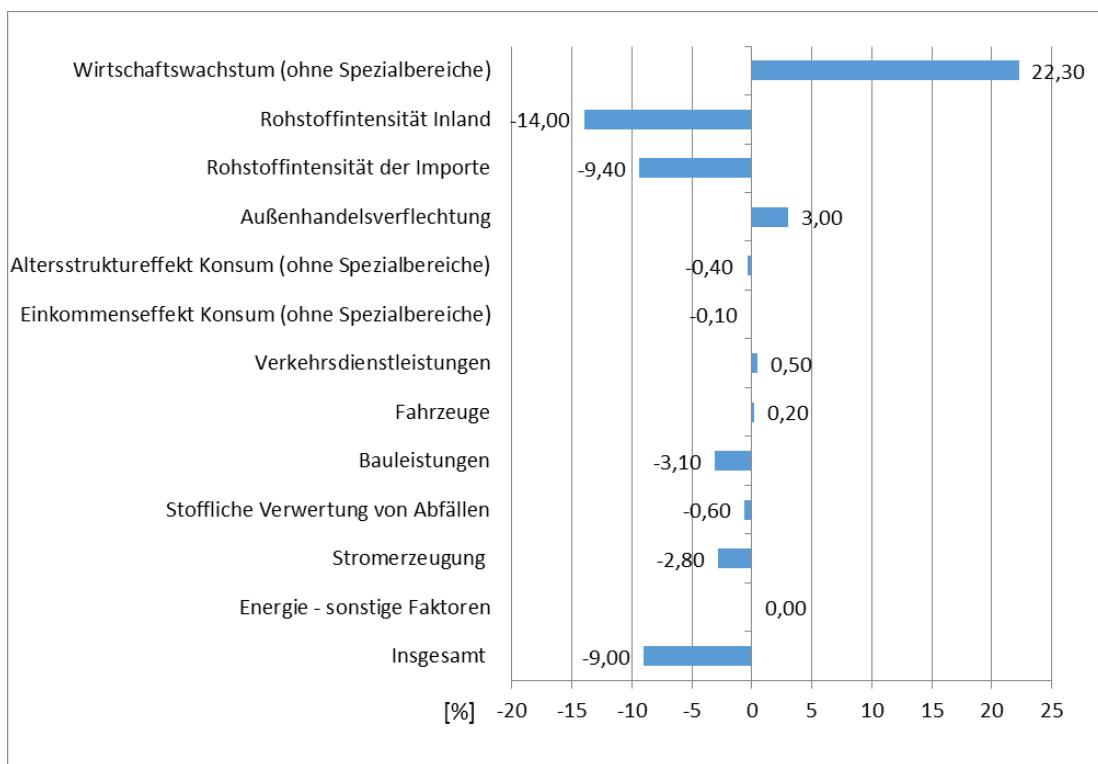


Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Insgesamt ergibt sich für die Entwicklung des RMC ein entlastender Einfluss von -16,0 % (vgl. Abbildung 58). Ein nennenswert belastender Einfluss geht vom Wirtschaftswachstum aus. Die wesentlichen entlastenden Faktoren sind Verminderung der Rohstoffintensität bei der Produktion im Inland, Verringerung der Rohstoffintensität der Importe, Rückgang der Bauaktivitäten und Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung.

Das Bild für den RMI (vgl. Abbildung 59) ähnelt der Struktur für den RMC. Ein wichtiger Unterschied ist der Effekt für die Außenhandelsverflechtung. Dieser Faktor wirkt sich beim RMC (letzte inländische Verwendung) nicht aus. Deswegen fällt u.a. der entlastende Effekt beim RMI mit -9,0 % deutlich niedriger aus.

Abbildung 59: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf den RMI – Veränderung AZE30 gegenüber 2010 in Prozent



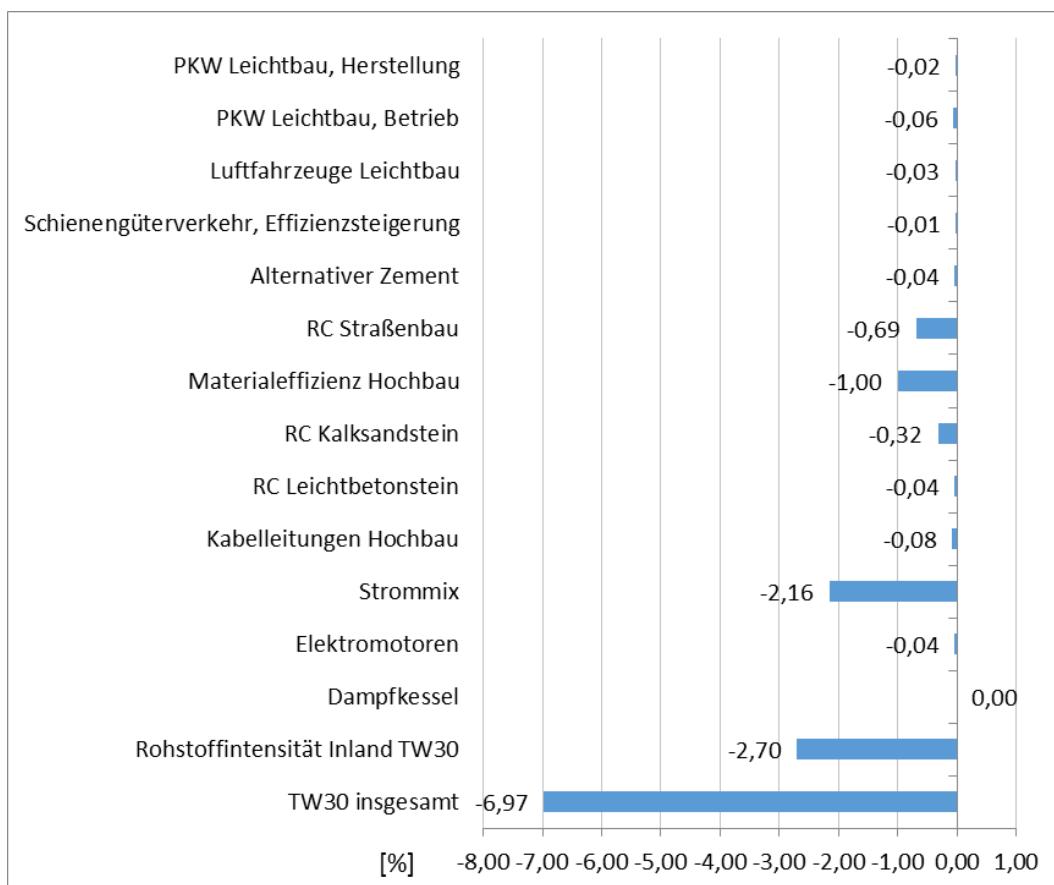
Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

9.3 TW30 - Szenario

Die Abbildung 60 und Abbildung 61 und bilden den Einfluss verschiedener Maßnahmen im Rahmen des Szenarios TW30 (2010-2030) auf die Entwicklung der Indikatoren RMC und RMI gegenüber dem AZE Szenario ab. Die Darstellung knüpft an die einzelnen Maßnahmen an, die bei der Aufstellung der TW30 Szenarios herangezogen wurden.

Auch hier stellen die Angaben für die einzelnen Maßnahmen die Effekte jeweils ceteris paribus dar, während die Angaben „Insgesamt“ (jeweils am Ende) das Ergebnis des simultanen Zusammenwirkens aller genannten Faktoren repräsentieren.

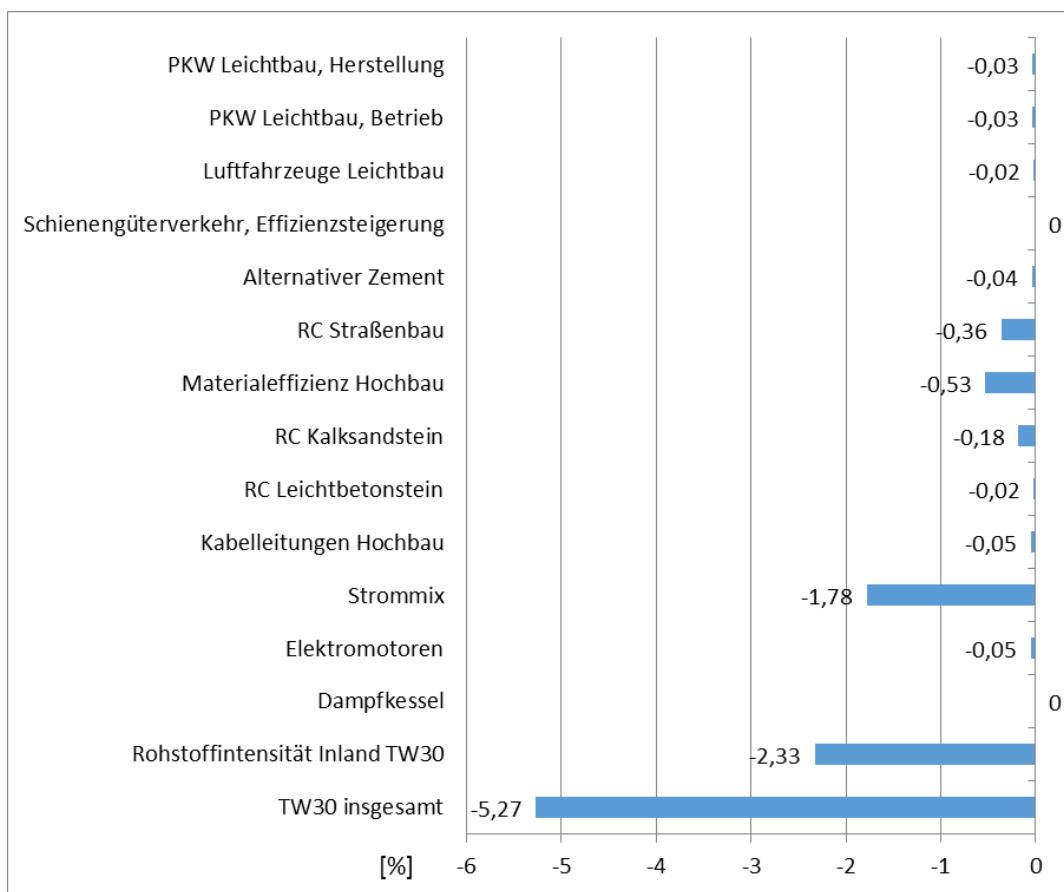
Abbildung 60: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c.p.) auf die Veränderung des RMC – Veränderung TW30 gegenüber AZE30 in Prozent des Basiswertes für 2010



Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Insgesamt ergibt sich bei dem TW30 Szenario für die Entwicklung des RMC ein entlastender Einfluss von 7,0 % (Abbildung 60). Die berücksichtigten Faktoren haben allesamt einen entlastenden Einfluss. Die quantitativ wichtigsten Maßnahmen sind die „allgemeine Verminderung der Rohstoffintensität“ TW30 (-2,7 %), Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung mit -2,2 %, verbesserte Materialeffizienz beim Hochbau (-1,0 %) und erhöhtes Recycling von Baumaterialien (zusammen -1,0 %).

Abbildung 61: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMI – Veränderung TW30 gegenüber AZE30 in Prozent des Basiswertes für 2010



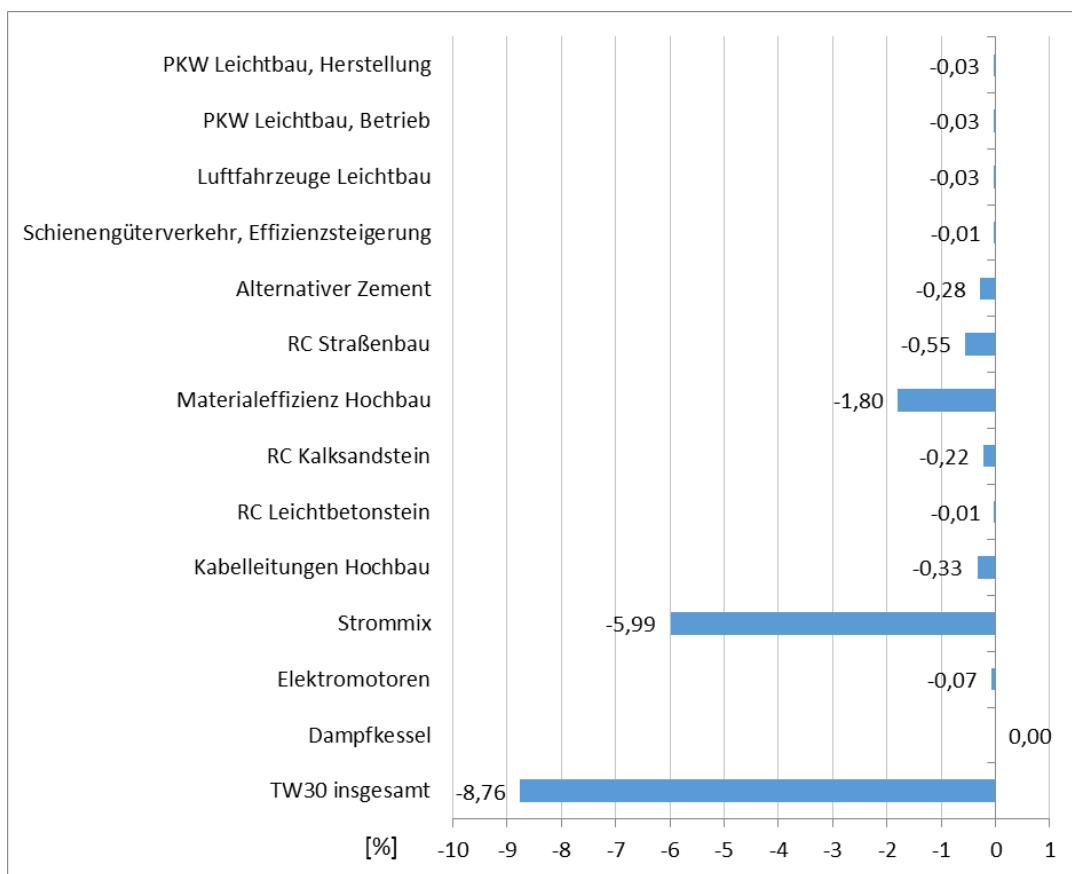
Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Das Bild für den RMI für die Entwicklung im Zeitraum 2010 bis 2030 (Abbildung 61) ähnelt der Struktur für den RMC. Insgesamt vermindert sich der RMI aufgrund der Maßnahmen des TW30 um 5,3 %.

9.4 Abschätzung TW30+

Die Abbildung 62 und Abbildung 63 stellen den zusätzlichen entlastenden Einfluss verschiedener Maßnahmen im Rahmen der Abschätzung TW30+ auf die Entwicklung der Indikatoren RMC und RMI im Vergleich zum TW30 Szenario (2010 bis 2030) dar.

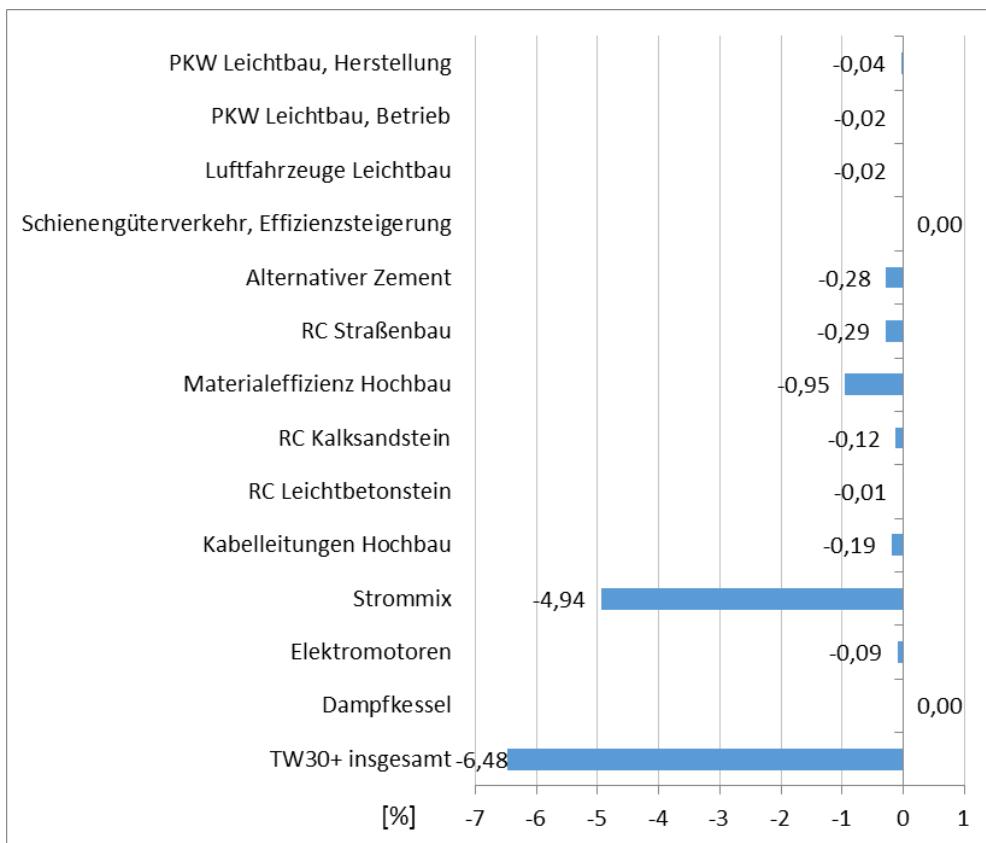
Abbildung 62: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMC – Veränderung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes in 2010



Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Insgesamt ergibt sich für die Entwicklung des RMC bei dieser Szenario-Variante ein entlastender Einfluss von 8,8 % (Abbildung 62). Die mit Abstand bedeutendste Maßnahme ist Veränderung der Energieträgerstruktur bei der Stromerzeugung mit -6,0 %, die, wie bereits erwähnt, vor allem auf die Annahme einer vollständigen Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger bei der Stromerzeugung zurückzuführen ist.

Abbildung 63: Beitrag der verschiedenen Einflussfaktoren (c. p.) auf die Veränderung des RMI - Veränderung TW30+ gegenüber TW30 in Prozent des Basiswertes für 2010



Quelle: Eigene Darstellung URMOD.

Das Bild für den RMI (Abbildung 63) ähnelt den Verhältnissen beim RMC. Insgesamt vermindert sich der RMI aufgrund der Maßnahmen des TW30+ Szenarios um 6,5 %. Auch hier resultiert der wesentliche Anteil aus dem Faktor Strommix (-4,9 %).

10 Schlussfolgerungen und offene Fragen

10.1 Korridore für Rohstoffeffizienz und mögliche Materialeinsparungen

Die Zielsetzung des Vorhabens bestand darin, die Beiträge einer technikorientierten Dematerialisierungspolitik zu untersuchen und existierende Pfadabhängigkeiten zu berücksichtigen. Im Ergebnis soll ein Handlungskorridor erkennbar werden, der die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Rohstoffpolitik in Deutschland aufzeigt. Dazu musste im Projekt eine Methodik entwickelt werden, mit der der zukünftige Rohstoffbedarf in Rohstoffäquivalenten, d.h. einschließlich der Vorketten, abgeschätzt werden kann. Da die methodische Entwicklung einer adäquaten Vorgehensweise einen zentralen Bestandteil des Projekts darstellte, werden im Folgenden nicht nur die inhaltlichen Ergebnisse zusammenfassend diskutiert und zudem auch die entwickelte Methodik reflektiert.

10.1.1 Schlussfolgerungen hinsichtlich des Handlungskorridors

Im Projekt wurden zwei Szenarien mit Blick auf das Prognosejahr 2030 gerechnet, die den Handlungskorridor einer technikorientierten Rohstoffpolitik aufzeigen sollen: ein Trendszenario zur anzunehmenden künftigen Entwicklung (AZE) und ein Szenario, das technisch ambitionierte, aber umsetzbare Veränderungen beinhaltet (Technischer Wandel, TW). Während das Trendszenario AZE die untere Grenze der Einsparung der Rohstofffinanspruchnahme zeigt, bildet das zweite Szenario (TW30) eine optimistische Obergrenze der Einsparpotenziale ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass

- ▶ ein erheblicher Rückgang der gesamtwirtschaftlichen Primärrohstofffinanspruchnahmen bereits im Trendszenario AZE zu erwarten ist; dies weist darauf hin, dass die Primärrohstofffinanspruchnahmen eine hohe Abhängigkeit von allgemeinen und langjährigen Trends und Entwicklungen hat
- ▶ eine technikorientierte Rohstoffpolitik, welche die Umsetzung ressourceneffizienter Innovationen fördern würde, zusätzliche Minderungspotenziale erschließen kann

Der zu erwartende Rückgang der Rohstofffinanspruchnahmen ist im Trendszenario AZE deutlich höher als der zusätzliche Rückgang, der unter optimistisch-realistischen Annahmen zu erschließbaren technikpotenzialen zu erwarten ist (siehe Abbildung 52). Dies ist erklärbungsbedürftig: Das Trendszenario wurde in diesem Projekt nicht wie ein Business-As-Usual-Szenario angelegt, in dem vergangene Trends fortgeschrieben wurden, sondern es wurde eine Vielzahl von bereits beschlossenen Politiken und Maßnahmen in dieses Szenario integriert. Insbesondere die vielfältigen Maßnahmen, die mit der Energiewende zusammenhängen und bereits im Szenario AZE integriert sind, haben erhebliche Auswirkungen auf die Inanspruchnahme von fossilen Brennstoffen. Darüber hinaus hat die in AZE übernommene Annahme, dass auf kommunaler Ebene die Flächenneuversiegelung weiter rückläufig ist, Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf für die Neuinstallation der kommunalen Infrastruktur. Somit tragen bereits die Energiewende und die rückläufige Flächenneuversiegelung entscheidend zu den in AZE beobachtbaren Rückgängen der Primärrohstofffinanspruchnahme bei.

Aus Sicht der Rohstoffpolitik kann damit die Schlussfolgerung gezogen werden, dass andere Politikbereiche, und zwar die Energiepolitik und die Flächenpolitik, erhebliche Auswirkungen auf die Primärrohstofffinanspruchnahme haben. Die umfassende gesamtwirtschaftliche Sichtweise von URMOD verbindet eine lückenlose und differenzierte Darstellung aller Güterströme in der Volkswirtschaft mit dem Umweltfaktor Rohstoffe. Das Modell ist offen für die Berücksichtigung weiterer Umweltfaktoren. Dadurch ermöglicht das Modell auch, mögliche Zielkonflikte zwischen verschiedenen Politikbereichen zu erkennen und das Gesamtausmaß der Zielkonflikte abzuschätzen.

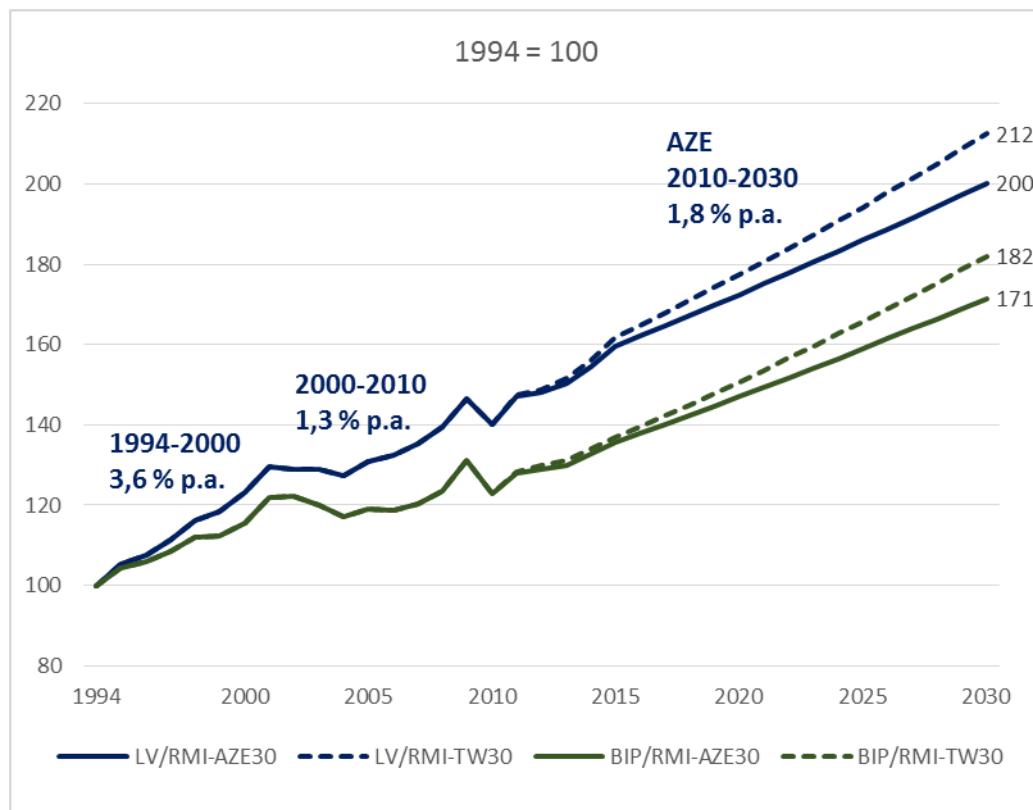
Die unter optimistischen Annahmen zu erwartenden, theoretischen Rohstoffeinsparungen durch die Förderung bzw. Implementierung von innovativen Technologien zur Ressourceneffizienz zeigen, dass

ein großes Potenzial besteht, mit diesen Technologien die Primärrohstofffinanspruchnahme in Deutschland weiter zu mindern. Während die untersuchten Einzeltechnologien im Bereich Substitution (über die Substitution der fossilen Brennstoffe hinausgehend) und Effizienzsteigerung jeweils überwiegend kleine, aber in der Summe durchaus signifikante Beiträge zur Primärrohstoffeinsparung aufweisen, zeigen die untersuchten Ansätze bezüglich des Recyclings von Primärrohstoffen große Minderungspotenziale. Insbesondere die Recyclingansätze bei Baustoffen haben (neben zusätzlichen Anstrengungen im Bereich der Energieerzeugung) signifikante Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftlichen Rohstofffinanspruchnahmen. So trägt beispielsweise die im Szenario TW30 angenommene zusätzliche Änderung des Energiemixes zu einer Minderung der Primärrohstofffinanspruchnahme von 1,8 % bei, Ansätze zur Effizienzsteigerung wie die Annahmen zu den Elektromotoren mindert die Primärrohstofffinanspruchnahme um 0,05 % und das Recycling, beispielsweise Kalk-Sandstein um 0,2 %, jeweils gemessen am RMI.

Angesichts der gegenwärtig hohen Materialinanspruchnahme in Deutschland mit den großen Anteilen von fossilen Energieträgern und mineralischen Baustoffen ist verständlich, dass auch in diesen beiden Rohstoffgruppen besonders hohe gesamtwirtschaftliche Einsparpotenziale liegen. So liegen die absoluten Einsparungen im Szenario AZE bei den fossilen Energieträgern bei 93 Millionen Tonnen und im Szenario TW30 bei insgesamt 162 Millionen Tonnen, jeweils gegenüber dem Basisjahr 2010 und gemessen am RMI.

ProgRess II hat als Ziel formuliert, den zwischen 2000 und 2010 beobachteten Rückgang der Gesamtrohstoffproduktivität (BIP+Importe/RMI bzw. LV/RMI) um jährlich 1,3 % bis 2030 fortzuschreiben. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen, dass das Ziel nicht nur erreicht, sondern auch übertroffen wird, wenn die bereits beschlossenen politischen Maßnahmen umgesetzt werden. Im jährlichen Durchschnitt wird die Gesamtrohstoffproduktivität um 1,8 % bereits im Szenario AZE steigen. Die Gesamtrohstoffproduktivität wird sich zwischen 1994 und 2030 um 100 % im Szenario AZE und um 112 % unter technologisch optimistischeren Annahmen (Szenario TW30) erhöhen.

Abbildung 64: Gesamtrohstoffproduktivität und BIP/RMI in den Szenarien AZE und TW30



Quelle: URMOD.

10.1.2 Schlussfolgerungen mit Blick auf die Annahmen

Allgemeine Rahmenbedingungen

Der Einfluss allgemeiner Rahmenbedingungen, die im Projekt angenommen wurden, zeigt sich vor allem im Trendszenario AZE. Während manche Annahmen, wie die Alterung der Bevölkerung und die mit ihr verbundene Änderung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen einen kleinen, wenn auch messbaren Effekt haben, beeinflussen andere Annahmen das Ergebnis sehr stark. Hier sind insbesondere der Effekt des angenommenen Wirtschaftswachstums und die angenommenen Rohstoffintensitäten im In- und Ausland zu nennen. In Summe heben sich beide Effekte fast auf und wirken sich dadurch nicht sehr stark auf das Endergebnis aus (Abbildung 58). Trotzdem sind an dieser Stelle insbesondere diese beiden Annahmen aufgrund ihrer hohen Ergebnisrelevanz kritisch zu hinterfragen.

Das angenommene Wirtschaftswachstum wurde unter der Vorgabe modelliert, im Prinzip keine Konsumstrukturänderungen zu berücksichtigen. Somit wurde die gegenwärtige Nachfragestruktur weitgehend fortgeschrieben. Speziell modelliert wurden allerdings der Einfluss des Altersstruktur- und des Einkommenseffektes auf den Konsum sowie die Nachfrage nach Wohnungs- und Verkehrsdiestleistungen (einschließlich Individualverkehr) und die direkte Nachfrage nach Energieträgern, insbesondere für Raumheizung. Durch die Annahme einer zu großen Teilen unveränderten Konsumstruktur wirkt sich der Effekt Wirtschaftswachstum deutlich auf den Rohstoffbedarf aus. Bei Unterstellung eines moderateren Wirtschaftswachstums oder einer deutlicheren Veränderung von Konsumgewohnheiten (Lebensstil) könnte die Rohstoffanspruchnahme deutlich niedriger ausfallen.

Die Annahmen zu den Rohstoffintensitäten sind Fortschreibungen der Trends der Vergangenheit. Zur Verwendung im Modell konnten letztlich nur Ergebnisse aus bestehenden RME-Modellen (Destatis, Eurostat) herangezogen werden. Die in das Modell als Trend eingeflossenen Vergangenheitsentwicklungen wurden bereinigt um den Einfluss der „Spezialbereiche“, die im Szenario-Modell gesondert betrachtet werden. Die bei der Ableitung vorgenommene Setzung zur Produktivitätsentwicklung schlägt sich relativ deutlich im Gesamtergebnis des AZE Szenarios nieder. Demnach können sich die dargestellten Unsicherheiten bei den Annahmen auf den Genauigkeitsgrad der Schätzung auswirken. Es sollte an dieser Stelle angemerkt werden, dass eine weitere Verfeinerung der Produktivitätsschätzungen möglicherweise die Genauigkeit der Ergebnisse verbessern könnte. Eine solche umfassendere Analyse war aber im Rahmen dieses Projektes nicht möglich.

Sektor Energie

Ein substanzielles Rohstoffeinsparpotenzial gibt es beim Betrieb elektrisch betriebener Anlagen, wie Elektromotoren oder Dampfkesseln, bereits bei verhältnismäßig geringen Effizienzsteigerungen, da die Anzahl der Anlagen groß ist und sie oft Tag und Nacht in Betrieb sind. Dennoch ist das Rohstoffeinsparpotenzial im Vergleich zur Umstellung auf erneuerbare Energieträger gering, da bei letzterem die grundlegende Energiebasis der gesamten Volkswirtschaft betroffen ist und die Energiewende gleichzeitig einen fundamentalen Wechsel hin zu deutlich weniger rohstoffintensiven Energieträgern bedeutet.

Sektor Bau

Der materialintensive Bausektor hat einen überdurchschnittlich hohen Anteil an dem Primärrohstoffbedarf und damit ein hohes Potenzial, Einsparungen von Primärrohstoffen zu erzielen. Die wesentlichen Veränderungen der Nachfrage nach Primärrohstoffen in diesem Sektor gehen jedoch von Faktoren aus, die nicht im Bereich der Rohstoffpolitik liegen. Darunter fällt z.B. die Erschließung neuer Siedlungsflächen in Kommunen, die erhebliche Materialmengen erfordert, die Entscheidung, ob Ein- bzw. Zwei- oder Mehrfamilienhäuser gebaut werden oder die Entwicklung der Nachfrage, in Abhängigkeit

von der Bevölkerung, die im Untersuchungszeitraum bis 2030 nur im Bereich des Nichtwohnungsbaus, und mit Blick auf 2050 zusätzlich auch im Bereich des Wohnungsbaus starke Auswirkungen zeigte.

Auch wenn die Ansätze, die im Bereich der Rohstoffpolitik liegen und den Bedarf an Primärrohstoffen im Bausektor senken, geringere Auswirkungen haben als die zuvor genannte Faktoren, so sind die Beiträge gleichwohl signifikant. Insbesondere Ansätze zum Recycling von Baustoffen, aber auch die effizientere Verwendung von Baustoffen, insbesondere Beton, ist hervorzuheben. Ferner trägt der Bausektor über die Erhöhung des energetischen Standards von beheizten Gebäuden zur Einsparung von fossilen Brennstoffen bei.

Sektor Verkehr

Der Verkehrssektor ist mit einem hohen Materialaufwand für die verschiedenen Verkehrsmittel und mit einem hohen Energiebedarf für deren Betrieb im Personen- und Güterverkehr verbunden. Im AZE-Szenario wird mit einem leichten Anstieg der Pkw-Motorisierung gerechnet und mit einem starken Anstieg der Verkehrsleistungen insgesamt für den Personen- und Güterverkehr. Deshalb führen die Maßnahmen Fahrzeuge und Verkehrsdiestleistungen zu einem höheren Rohstoffverbrauch in Deutschland. Aufgrund der verbesserten Effizienz der Fahrzeuge wird der Effekt jedoch auf einen geringen Beitrag reduziert (weniger als 2 % für den RMC).

Der Einfluss von technologischen Innovationen – hier insbesondere der Leichtbau in Fahrzeugen – für die TW-Szenarien ist in den Ergebnissen kaum zu erkennen und bewegt sich im Bereich um die 0 %. Der Beitrag von technischen Innovationen im Fahrzeugbau zur Senkung des gesamten Primärrohstoffbedarfs ist jedoch begrenzt, da gerade die alternativen Antriebstechnologien, wie Elektrofahrzeuge zunächst einen Mehraufwand an Materialien haben. Deshalb kann festgehalten werden, dass die Haupthebel zur Reduzierung des Primärrohstoffbedarfs im Verkehrsbereich in der Vermeidung von Verkehr, in der Verlagerung auf umweltschonende Verkehrsmittel und in der verstärkten Integration von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor liegen. Der rein massenbezogen relevantere Einflussfaktor im Verkehrsbereich stellt an dieser Stelle die Verkehrsinfrastruktur dar, die in dieser Betrachtung jedoch dem Tiefbau im Bausektor zugeordnet ist.

10.1.3 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Methodik

Um den zukünftigen Rohstoffbedarf der deutschen Volkswirtschaft abzuschätzen, wurde im Rahmen dieses Projekts das Umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD) entwickelt. Es basiert auf einer Input-Output-Tabelle (IOT), die im Projektverlauf den spezifischen Anforderungen des Projekts entsprechend auf insgesamt 274 x 274 Gütergruppen und 41 Kategorien der letzten Verwendung ausdifferenziert wurde. Die Prognose basiert auf einem komparativ-statistischen Ansatz, der ermöglicht, Änderungen der Produktionstechnologie, wie Effizienzsteigerungen oder Materialsubstitutionen, und Veränderungen in der Endnachfrage nach Gütern abzubilden.

Ein grundlegender Vorteil der Input-Output-Modellierung besteht in der Abbildung der Verflechtung der Wirtschaftszweige. Dies ermöglicht, (1) die Gesamtwirkung von Ressourceneffizienzmaßnahmen über verschiedene Wertschöpfungsketten hinweg zu analysieren und (2) den Beitrag einzelner Wirtschaftsbereiche/-zweige dazu zu bestimmen. Der große Vorteil des entwickelten Modells im Spezifischen besteht in seiner Flexibilität und in der relativ hohen Differenziertheit und Genauigkeit der Abschätzung. Die Flexibilität bezieht sich dabei auf die verschiedenen Möglichkeiten, Änderungen in der Produktionstechnik und in der Endnachfrage im Modell abzubilden. Zudem besteht die Möglichkeit, weitere und über dieses Projekt hinausgehende Fragestellungen zu beantworten. Je nach Aufgabenstellung und Differenzierungswunsch können technische Änderungen entweder über eine weitere Ausdifferenzierung der IOT oder über Veränderungen in der Güterinput-, Rohstoffinput- oder Endnachfragematrix in das Modell übertragen werden. Der mögliche Genauigkeitsgewinn durch eine wei-

tere Ausdifferenzierung der IOT kann durch mangelnde Verfügbarkeit hinreichend adäquater Ausgangsdaten limitiert sein. Zudem ist er häufig mit erheblichem Aufwand verbunden, da für das Basis- und ggf. auch für das Prognosejahr alle bestehenden Verflechtungen in der Ökonomie so exakt wie möglich recherchiert und in URMOD eingegeben werden müssen. Im Gegensatz dazu sind die Veränderungen der Modellparameter für die Aufstellung von Szenarien (Veränderungen in den drei Matrizen hinsichtlich der Endnachfrageparameter, Rohstoff- und Güterinputkoeffizienten) mit deutlich weniger Aufwand verbunden.

In diesem Projekt wurde der Schwerpunkt auf drei besonders rohstoffrelevante Sektoren (Energie, Bau und Verkehr) gelegt. Für diese Sektoren wurde eine Vielzahl verschiedener technologischer Änderungen innerhalb des Prognosezeitraums untersucht. Die entwickelte Methodik erlaubt es, die Spannweite von großen technologischen Umwälzungen wie der Energiewende über spezifischen Technologien mit einem veränderten Rohstoff- oder Güterbedarf hin zu veränderten Nachfrageparametern, wie der Nachfrage nach verschiedenen Transportleistungen, exakt und detailliert zu modellieren. Die Methode eignet sich damit, die verschiedenen Strategien zur Minderung des Rohstoffbedarfs (formuliert als Maßnahmenpakete und Techniken) mit vergleichsweise hoher Genauigkeit abzubilden. Die hier entwickelte Vorgehensweise kann auch auf andere Sektoren übertragen werden. Damit bietet die Methodik ausreichend Flexibilität, eine Vielzahl weiterer möglicher Änderungen, seien sie produktionsseitiger oder konsumseitiger Natur, differenziert abzubilden und zu untersuchen. In diesem Projekt lag der Fokus auf den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffindikatoren und nicht auf der Betrachtung einzelner Rohstoffe; daher sei hier nur erwähnt, dass mit URMOD auch differenzierte Rohstoffgruppen bzw. ausgewählte zukünftige Rohstoffbedarfe ausgewiesen werden können.

Mit Hilfe des komparativ statischen Modells können Systemzustände für beliebig viele Zeitpunkte und Parameterkonstellationen simuliert werden. Eine wesentliche Einschränkung dieser Methodik kann aber darin gesehen werden, dass keine dynamischen Änderungen über die Zeitspanne bis zum Prognosejahr abgebildet werden können. URMOD zeigt das Gesamtbild aller Änderungen einschließlich ihrer gegenseitigen Wirkungen im Prognosejahr (bzw. in den Prognosejahren). Damit können mit URMOD die Auswirkungen von politischen Maßnahmen und/oder von technologischen und/oder konsumbezogenen Veränderungen dargestellt werden. Dies kann für jede Maßnahme bzw. Änderung einzeln, für ausgewählte Maßnahmenbündel und auch in der Gesamtschau aller Maßnahmen bzw. Veränderungen geschehen. Dagegen kann kein automatisiertes, zeitliches Wechselspiel der Wirkungen der Maßnahmen aufeinander in den dazwischen liegenden Jahren dargestellt werden. Die angenommenen und modellierten Änderungen sind damit durchweg sehr transparent, da sie explizit als Parametervariation eingegeben werden müssen. Im Rahmen des vorliegenden Projekts war eine zeitliche Dynamisierung auch nicht Teil der Fragestellung. Die Nennung dieser Einschränkung wird hier mit Blick auf die zukünftige Weiterentwicklung und Verwendung von URMOD jedoch als sinnvoll angesehen.

Als Schlussfolgerung lässt sich festhalten, dass mit URMOD im Rahmen dieses Projekts eine adäquate Methodik entwickelt wurde, um sowohl weitreichende technologische Umwälzungen als auch einzelne technologische Innovationen mit einem hohen Grad an Differenziertheit und Genauigkeit abzubilden. Das entwickelte umweltökonomische Rohstoffmodell URMOD ist damit ein Instrumentarium, mit dem auch zukünftig über die Fragestellung des Projekts hinaus gesamtwirtschaftliche Änderungen des deutschen Rohstoffbedarfs und anderer Umweltkenngrößen wie z.B. Treibhausgasemissionen abgeschätzt werden können, die sich aufgrund von Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel in anderen Sektoren und Politikbereichen ergeben.

10.2 Zusammenfassung

Im Projekt wurden die Chancen und Grenzen einer technikorientierten Dematerialisierungspolitik untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass der Rohstoffbedarf der deutschen Volkswirtschaft zukünftig rückläufig sein wird. „Große Hebel“ sind dabei insbesondere die Umsetzung der Energiewende und weiterhin auch der (im Projekt unterstellte) anhaltende Trend einer sinkenden Erschließung

neuer Siedlungsflächen. Im Vergleich zu diesen beiden „großen Hebeln“ sind die Möglichkeiten, mit innovativen Technologien die Rohstoffeffizienz zu steigern, geringer, aber deutlich vorhanden. Mit zusätzlichen Technologien im Bereich Substitutionen, Effizienzsteigerungen und Recycling kann der Primärrohstoffbedarf der deutschen Volkswirtschaft signifikant gesenkt werden. Die im Projekt untersuchten Technologien decken zwar nicht das gesamte technologische Potenzial der Volkswirtschaft ab, aber es sind Technologien, die besonders große Einsparpotenziale in den materialintensivsten Sektoren aufweisen.

10.3 Offene Fragen und mögliche weitere Schritte

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte eine Methode entwickelt werden, mit welcher der zukünftige Rohstoffbedarf differenziert und unter Berücksichtigung von sektorspezifischen Erhebungen und innovativen Technologien abgeschätzt werden kann. Dazu wurde das Modell URMOD entwickelt. In diesem Projekt konnte erprobt werden, wie die Ausgangsdaten und Ergebnisse des Transportemissionsmodells TREMOD mittels URMOD in Rohstoffbedarfe übersetzt werden können. Der Rohstoffbedarf der übrigen Sektoren wurde basierend auf eigenständigen Studien in das Modell übernommen, wobei Ungenauigkeiten bei der Übersetzung der Studien insbesondere aufgrund teilweise unterschiedlicher Abgrenzungskonzepte hingenommen werden mussten. Es ist anzustreben, zukünftig Verknüpfungen von URMOD mit weiteren sektorspezifischen Modellen anzustreben, um eigenständige Modelldurchläufe, die auf vollständig harmonisierten Ausgangsdaten und Parametervariationen basieren, zu ermöglichen.

URMOD ist ein umweltökonomischer Modellansatz, der verschiedene Umweltfaktoren in einem integrierten Ansatz mit den verursachenden wirtschaftlichen Aktivitäten verknüpfen kann. Mittels URMOD wurde in diesem Projekt der kumulierte Primärrohstoffaufwand zur Herstellung von Gütern ermittelt. URMOD wird zur Zeit im Rahmen des RTD-Projektes für das Umweltbundesamt um den Faktor Treibhausgase erweitert. Bereits das jetzt vorliegende Modell enthält neben der Allokation der Primärrohstoffinputs in die Volkswirtschaft eine analoge Darstellung für erneuerbare Energien und verwertete Abfälle, mit dem Ziel Substitutionsprozesse mit Bezug auf den Bedarf von Primärrohstoffen konsistent abzubilden. Auch weitere umweltbezogene Faktoren sowie z.B. auch der Bedarf an Arbeitsinputs können in analoger Weise in das Modell einbezogen werden. Von Vorteil ist der hohe sektorale Auflösungsgrad von URMOD. Erst die im Vergleich zur Standard-IOT außergewöhnlich hohe sektorale Differenziertheit von URMOD ermöglicht für viele Variablen, wie die Rohstoffe, überhaupt hinreichend genaue Ergebnisse zu ermitteln. Neben der hohen sektoralen Auflösung berücksichtigt URMOD ebenfalls regionale Unterschiede bei den Produktionsbedingungen (erweitertes Drei-Regionen Modell). Die Berechnungen für die beiden Regionen Nicht-EU Länder und EU Länder sind jeweils durch weitere spezifische Informationen zur Produktionstechnologie in den Lieferländern der Importe unterfüttert (partielles multi-regionales Modell). Bezüglich der Einbeziehung weiterer Informationen zur Abbildung länderspezifischer Produktionsbedingungen in das Modell sind weitere Verbesserungen denkbar. Hierzu muss aber jeweils eine Abwägung zwischen Aufwand und erzielbarem Informationsgewinn vorgenommen werden.

Im Rahmen des Projekts konnte die Frage beantwortet werden, welchen Beitrag eine technologieorientierte Rohstoffpolitik zur Minderung des Primärrohstoffbedarfs leisten kann. Dazu wurden Ansätze in den drei materialintensivsten Sektoren untersucht, während der Beitrag der nicht-untersuchten Sektoren mit einem vereinfachten Ansatz zum technologischen Fortschritt fortgeschrieben wurde. Zukünftig sollten auch die hier nicht untersuchten Sektoren im Forschungsdesign einbezogen werden, um die Ergebnisgenauigkeit zu erhöhen und eine differenziertere Einschätzung zu bekommen, welchen Beitrag welche technologischen Innovationen in welchem Sektor leisten können. In diesem Zusammenhang sollte auch genauer untersucht werden, wie sich der autonome Fortschritt, der sich in der Vergangenheit in Deutschland und auch weltweit beobachten lässt und „spontaneous decoupling“

[UNEP, 2011] genannt wird, im Detail zusammensetzt. Das Wissen kann dazu beitragen, technologieorientierte, innovative Technologien gezielter zu fördern und den Beitrag der Politik zur Minderung der Primärrohstoffanspruchnahmen genauer abzuschätzen.

In diesem Projekt wurden die Koeffizienten, die für die Abschätzung der Rohstoffäquivalente der metallischen Importgüter (Erze und Basismetalle) genutzt werden, aufgrund der hohen Unsicherheiten und des Wissens, dass die Koeffizienten ergebnisrelevant sind, nicht fortgeschrieben. Zukünftig sollte eine Methodik entwickelt oder angewendet werden, mit der eine höhere Genauigkeit der Koeffizienten erreicht werden kann. Dabei ist es unerlässlich, Koeffizienten nicht nur aufgrund von Erzgehalten einzubeziehen, sondern auch Kuppelprodukte und andere Faktoren, welche die Koeffizienten signifikant verändern.

Im Energiebereich hat man gelernt, dass die Einsparungen von Energie zu Rebound-Effekten führen können. Im Rohstoffbereich ist das Thema der Rebound-Effekte bislang noch wenig untersucht. Ebenso ist noch wenig untersucht, inwieweit die Rebound-Effekte, die bereits im Energiebereich bekannt sind, Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf haben. In diesem Projekt wurde dieser Aspekt des Themas im Rahmen des Forschungsdesigns durch einen vereinfachten Ansatz (Kompatibilität zwischen BIP-Wachstum und der Zunahme der Gesamt-Konsumausgaben) berücksichtigt. In zukünftigen Forschungsprojekten sollten Rebound-Effekte im Rohstoffbereich eine höhere Aufmerksamkeit zuteilwerden. Zudem sollte genauer untersucht werden, ob und welche Rückkopplungen Rohstoffeinsparungen haben bzw. haben können.

In diesem Forschungsprojekt wurden verschiedene, vereinfachte Annahmen hinsichtlich des Einsatzes von Sekundärprodukten im Basis- und Prognosejahr getroffen. Wissend, dass in laufenden Forschungsprojekten gegenwärtig Indikatoren zum Beitrag der Sekundärwirtschaft zur Einsparung von Primärrohstoffen (wie der DERec und der DIERec) erhoben werden, ist das Thema in diesem Projekt nicht weiter vertieft worden. Zukünftig sollten die Ergebnisse aus den laufenden Vorhaben auf ihre Übernahme in URMOD geprüft und so die im laufenden Projekt getroffenen Annahmen verfeinert werden.

Im Bereich der Infrastruktur und der anthropogenen Lager wurden zeitgleich mit diesem Projekt umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Es ist abzusehen, dass zukünftig weitere Erhebungen notwendig sind, da die gegenwärtig vorliegenden Ergebnisse teilweise noch hohe Unsicherheiten aufweisen und Ergebnisse aus Studien teilweise auch nur bedingt vergleichbar sind. In zukünftigen Einsätzen sollten die im Rahmen dieses Projekts in URMOD übernommenen Ausgangsdaten hinsichtlich neuerer bzw. konsolidierter Erkenntnisse überprüft und aktualisiert werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Unsicherheiten im Bereich der Nichtwohngebäude und die Angaben zum Neubau und zu den Unterhaltungsaufwendungen verschiedener Infrastrukturbereiche zu nennen. Die Unterhaltungsaufwände werden anhand der Lebensdauer abgeschätzt. Dabei wird im Allgemeinen unterstellt, dass nach einer bestimmten Zeit die spezifische Infrastruktureinrichtung vollständig ausgetauscht wird. Allerdings zeigen Beispiele wie die Stopftechnik im Gleisbau oder Ausbesserungstechniken im Talsperrenbau, dass diese Reparaturen anderer Mengen und Arten von Rohstoffen bedürfen als eine Neuerrichtung und die Lebensdauern erheblich verlängern können. Da der Anteil des Unterhaltungsaufwandes zukünftig steigen wird, könnte eine genauere Untersuchung des Rohstoffbedarfs, ähnlich wie es gegenwärtig in Untersuchungen zum Straßenbau erfolgt, die Ergebnisgenauigkeit von Rohstoffprognosen steigern.

Im Verkehrsbereich werden derzeit einige Konzepte und Maßnahmen im Personen- und Güterverkehr diskutiert, um den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu senken. Daraus ergeben sich weitere Anknüpfpunkte zur Modellierung dieser Entwicklungen in URMOD. Bereits in diesem Vorhaben wurde die Variable „Verkehrsdienstleistung“ in URMOD eingefügt, die allerdings im Zuge des (technik-orientierten) Projektes für die TW-Szenarien nicht weiter variiert wurde. Damit können sich

aber sehr übersichtlich Verlagerungseffekte auf den Rohstoffbedarf abbilden. Weiterhin spielen Innovationen wie Oberleitungs-Lkw (im Güterverkehr) oder die Auswirkungen des autonomen Fahrens (Personen- und Güterverkehr) eine wichtige Rolle in der aktuellen politischen Diskussion. URMOD besitzt auch an dieser Stelle das Potenzial Aussagen über die Rohstoffanspruchnahme zu treffen.

11 Quellenverzeichnis

- AGEB (2012): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2008. Bilanzen 1990–2012. Berlin/Köln.
<http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/daten-und-fakten/bilanzen-1990-2012/bilanzen-1990-.html>.
- AGEB (2014): Energieverbrauch in Deutschland. Daten für das 1. Halbjahr 2014.
- AGEB (2015a): Energie in Zahlen - Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen. www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_broschuere_2012_web.pdf.
- AGEB (2015b): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html>.
- Agricon (2014): YARA N-Tester und YARA N-Sensor. <http://www.n-sensor.de/produkte/yara-n-sensor/>.
- Almeida, A. T. De / Ferreira, F. J. T. E. / Fong, J. / Fonseca, P. (2008): EuP Lot11 Motors.
- Banse, J. / Effenberger, K.-H. (2006): Deutschland 2050 - Auswirkungen des demographischen Wandels auf den Wohnungsbestand. Dresden.
- BBS (2013): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. F. Schwarzkopp, J. Drescher, M. Gomig, J. Blazejczak. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. Berlin.
- BDEW (2015): Energiedaten. Netto-Erzeugung in Deutschland nach Energieträgern.
https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten#cat/Daten%2FGrafiken%5CEnergie_allgemein%5CEnergiedaten%5C3. Stromversorgung.
- BDL (2015): Report 2015 Energieeffizienz und Klimaschutz. Berlin.
- Bergmann, T. / Bleher, D. / Jenseit, W. (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau. Verband Deutscher Ingenieure - Zentrum für Ressourceneffizienz (VDI-ZRE). Berlin/Darmstadt.
http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf.
- Bleischwitz, R. (2010): International economics of resource productivity - relevance, measurement, empirical trends, innovation, resource policies. In: *International Economics and Economic Policy*. Vol. 7, No.2, S. 227–244.
- BMUB (2012): Deutsches Ressourceneffizienz programm (ProgRess): Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Broschüre. Zweite Auflage, Stand Februar 2015. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin.
- BMUB (2015): Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525 / 2013 / EU. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin.
http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcgs_pams_projections/envvqlq8w/150318_Projektionsbericht_2015_final.pdf.
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Stand März 2016. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin. *internet*: www.bmub.bund.de/publikationen (abgerufen am: 26.04.2016).
- BMVBS (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude-Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- BMVI (2012): Der Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2012. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVI). Berlin.
<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/18/005/1800580.pdf>.
- BMVI (2014): Verkehr in Zahlen. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Bearbeitet von Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW).

- Erscheinungsweise jährlich. Bonn, Berlin.
- BMW AG (2014): Der neue BMW i8 - Produktkatalog der BMW AG. München.
- BMWi (2014): Grafiken und Tabellen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energie in Deutschland im Jahr 2013. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/arbeitsgruppe-erneuerbare-energien-statistik,did=629806.html>.
- BMWi (2015): Energiedaten des Bundesministeriums für Wirtschaft.
<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energiedaten.html>.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das%7B_%7Dgesamt%7B_%7Dbf.pdf.
- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität. Berlin.
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nep_09_bmu_bf.pdf.
- Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.
- Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2014): Umweltpunktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804. www.unika-kalksandstein.de/download/category/4-broschueren.html.
- Buyny, Š. / Klink, S. / Lauber, U. (2009): Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators, Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung. Umweltbundesamt und Statistisches Bundesamt. Dessau und Wiesbaden.
- Chertow, M. R. (2000): The IPAT Equation and Its Variants. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 4, No.4, S. 13–29.
- Consultic (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011 - Kurzfassung. Studie im Auftrag von BKV, PlasticsEurop, VDMA, byse u.a. http://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/fuerRedakteur/downloads/PDF/Marktforschung/Consultic_2011_31_08_2012_Kurzversion.pdf.
- Deilmann, C. / Gruhler, K. / Krauß, N. / Reichenbach, J. (2014a): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau - Endbericht.
- Deilmann, C. / Gruhler, K. / Krauß, N. / Reichenbach, J. (2014b): Ressourcenschonung im Hochbau. Sensitivitätsstudien zur Bautätigkeit bis 2050 spiegeln Einsparpotenziale durch höhere Recyclatanteile wider. In: *ReSource*. Vol. 27, No.4, S. 20–26.
- DENA (2012): Energiebedarf und -verbrauch: Welche Einsparung bringt eine energetische Sanierung wirklich? http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/ake48/IWU-Tagung_2012-05-31_Bigalke_dena_BedarfVerbrauch.pdf (abgerufen am: 30.08.2016).
- DERA (2011): Deutschland. Rohstoffsituation 2010. Hannover.
- Destatis (2009): Bevölkerung Deutschlands bis 2060: 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 18. November 2009 in Berlin. Wiesbaden.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204099004.pdf?__blob=publicationFile.
- Destatis (2011): Eisenbahnverkehr. Betriebsdaten des Schienenverkehrs (mit Daten zur Schienennetzfrequentierung). Fachserie 8 Reihe 2.1
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/PersonenverkehrSchienenvverkehr/BetriebsdatenSchienenverkehr2080210117004.pdf?__blob=publicationFile.
- Destatis (2013a): Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Aufwendungen privater Haushalte für den Privaten Konsum.

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Konsumausgaben/EVS_AufwendungprivaterHaushalte2152605139004.pdf?__blob=publicationFile.

Destatis (2013b): Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Transportleistung und Energieverbrauch im Straßenverkehr 2002-2013. Statistisches Bundesamt (destatis). Wiesbaden.

Destatis (2013c): Umwelt - öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung. Strukturdaten zur Wasserwirtschaft 2010. Statistisches Bundesamt (destatis). Wiesbaden.

Destatis (2014a): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen - Ausgabe 2014. Statistisches Bundesamt (destatis).

<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Querschnitt/UmweltnutzungundWirtschaftTabellenband.html>.

Destatis (2014b): Rohstoffe für Deutschland, Bedarfsanalyse für Konsum, Investition und Export auf Makro- und Mesoebene, Tabellenband zum Projektbericht. Wiesbaden.

Destatis (2014c): Bauen und Wohnen - Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 1980. Wiesbaden.

Destatis (2014d): Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden. Lange Reihen ab 1969 - 2013. Wiesbaden.

Destatis (2014e): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3 Reihe 5.1

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Flaechennutzung/BodenflaechennutzungPDF_2030510.pdf;jsessionid=733F47E1A4B972C4221A2D8295F24DE4.cae3?__blob=publicationFile.

Destatis (2015a): Bruttoinlandsprodukt 2015 für Deutschland.

https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2016/BIP2015/Pressebroschuere_BIP2015.pdf?__blob=publicationFile.

Destatis (2015b): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Indikatoren zu Umwelt und Ökonomie.

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Umweltindikatoren/IndikatorenPDF_5850012.pdf?__blob=publicationFile.

Destatis (2016a): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Fachserie 18, Reihe 1.4, Inlandsproduktsberechnung, Detaillierte Jahresergebnisse 2015, Tabellen 2.2.4 und 2.2.6. Wiesbaden.

Destatis (2016b): Globalisierungsindikatoren. Kennzahlen zur Außenwirtschaft nach dem Außenhandelskonzept. Statistisches Bundesamt.

DKI (2014): Elektrotechnische Anwendungen. Elektrische Leiter. Düsseldorf.

http://www.kupferinstitut.de/front_frame/frameset.php3?idcat=122&client=1&idside=96&idcatsid=111&lang=1&parent=1.

DLR / IWES / IFNE (2012): Leitstudie 2011 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik. Ingenieurbüro für neue Energien. Stuttgart, Kassel, Teltow.

Doll, C. (2015): Steigerungspotenzial der Nutzungseffizienz des Rollmaterials im Gütertransport auf der Schiene. Persönliche Mitteilung vom 20.03.2015.

DWA (2009): Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009. Christian Berger, Christian Falk. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).

DWD (2016): Zahlen und Fakten zum Klimawandel in Deutschland.

http://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2016/PK_08_03_2016/zundf_zur_pk.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

EC (2008): System of National Accounts. New York.

Eden, W. / Middendorf, B. (2009): Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksand-Technologie. IRB-Verlag.

EEA (2016): More from less -- material resource efficiency in Europe. 2015 overview of policies, instruments and targets in 32 countries. EEA Report Copenhagen.
<http://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less>.

EU (2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.

EU KOM (2011): Ressourcenschonendes Europa - eine Leitinitiative innerhalb der Strategie Europa 2020: Mitteilung der Kommission. Brüssel. [http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe_de.pdf](http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/pdf/resource_efficient_europe_de.pdf).

Eurostat (2016): Documentation of the EU RME model. This documentation has been written by Karl Schoer (SSG Wiesbaden), Monika Dittrich (ifeu), Jan Kovanda (CUEC), Jan Weinzettel (CUEC), Birte Ewers (ifeu), Stephan Moll (Eurostat) and Maaike Bouwmeester (Eurostat) as part of Eurostat's project 'Regular up-. Luxemburg.
<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/Documentation-EU-RME-model/> (abgerufen am: 11.01.2017).

Fleiter, T. / Eichhammer, W. (2011): Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options developing countries. Working Paper.

Frondel, M. / Grösche, P. / Huchtemann, D. / Oberheitmann, A. / Peters, J. / Angerer, G. / Sartorius, C. / Buchholz, P. / Röhling, S. / Wagner, M. (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Endbericht des Forschungsprojekts 09/05 des BMWi. http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB_Mineralische-Riohstoffe.pdf.

G7 (2016): Communiqué - G7 Toyama Environment Ministers' Meeting: Toyoma, Japan May 15-16, 2016.

http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/G7_umweltministertreffen_toyama-japan_abschlussdokument_en_bf.pdf.

Gellenbeck, K. / Becker, G. / Hams, S. (2014): Erarbeitung von Erfassungsmengen und Recyclingquoten.

Gerst, M. D. (2008): Revisiting the Cumulative Grade-Tonnage Relationship for Major Copper Ore Types. In: *Economic Geology*. Economic Geology. Vol. 103, No.3, S. 615–628.

Glaser, S. (2012): Produktionstechniken für Vakuum-Isolierglas (ProVIG). Abschlussbericht – Studie von Glaser FMB, Grenzebach Maschinenbau, Schunk Sonosystems, Fraunhofer IWM und ZAE Bayern für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

Gmelin, T. C. / Hüttig, G. / Lehmann, O. (2008): Zusammenfassende Darstellung der Effizienzpotenziale bei Flugzeugen unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Triebwerkstechnik sowie der absehbaren mittelfristigen Entwicklungen. Bericht im Auftrag des BMU.
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/workshop_effizienz_flugverk_studie.pdf.

Gruhler, K. / Böhm, R. (2011): Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes - Deutschland 2050. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.

Gunreben, Y. (2014a): Brückenertüchtigung - Stand und Ausblick. Expertengespräch im Stahlbrückenbau am 23. September 2014.
http://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Veranstaltungen/B2-2014-Stahlbruecken/Vortrag-Gunreben.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Gunreben, Y. (2014b): Brückenerhöhung - Stand und Ausblick. Expertengespräch im Stahlbrückenbau am 23. September 2014.

HeidelbergCement (2014): Ternärer Klinker- Neuartiger Klinker reduziert CO₂-Ausstoß deutlich.

Heinemann, U. / Weinländer, H. / Gintars, D. (2011): Dämmen durch Vakuum. Hocheffizienter Wärmeschutz für Gebäudehülle und Fenster. BINE Themeninfo 1/2011.

Henning, H.-M. / Palzer, A. (2012): 100% Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland.

ifeu (2011): Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität - Grundlagenbericht. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht, M. Pehnt. Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg. <http://www.emobil-umwelt.de/>.

ifeu (2012a): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA Text 01/2012. J. Giegrich, A. Liebich, C. Lauwigi, J. Reinhardt. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). Dessau.

ifeu (2012b): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell : Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOD, Version 5.3). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 360 16 037. Heidelberg.

ifeu (2014a): Aktualisierung „ Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030 “ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg.

ifeu (2014b): Umweltprofile von Werk- und Rohstoffen.

ifeu (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Umweltbundesamt. UBA Texte, 27/2016. Dessau-Roßlau.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der> (abgerufen am: 05.04.2016).

ifeu / SSG / CUEC (2012): Conversion of European Product Flows into Raw Material Equivalents: Final report of the project "Assistance in the development and maintenance of Raw Material Equivalents conversion factors and calculation of RMC time series." Jürgen Giegrich, Christoph Lauwigi, Axel Liebich (ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH), Karl Schoer (Sustainable Solutions Germany - Consultants Wiesbaden), Jan Kovanda, Sarka Buyny, Josefine Matthias (Charles University). Heidelberg.

IMF (2015): IMF Data. International Monetary Fund (IMF). Washington D.C.
<http://www.imf.org/external/index.htm>.

Intraplan (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Intraplan Consult GmbH. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). München.

IWCC (2014): Statistics. End-use-data. London. <http://www.coppercouncil.org/>.

Kalsen-Friese, M. (2012): Leitungsberechnung, Version 3.2 - Monographie.

Kaumanns, S. / Lauber, U. (2014): Rohstoffe für Deutschland Bedarfsanalyse für Konsum, Investition und Export auf Makro- und Mesoebene. Wiesbaden.

KBA (n.d.): Datenbankauswertung der Fahrzeugbestände und Neuzulassungen für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt. Im Auftrag der BASt. Jährliche Aktualisierung.

KBA (2014): „Kompakte“ konstant auf hohem Niveau. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Flensburg.
http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Segmente/2013/2013_n_kurzbericht_komplexe_hohes_niveau_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7.

- Klaus, T. / Vollmer, C. / Werner, K. / Lehmann, H. / Müschen, K. (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen.
- Klingholz, R. (2016): Deutschlands demografische Herausforderungen - Wie sich unser Land langsam aber sicher wandelt. Berlin. http://www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/Deutschlands_demografische_Herausforderungen/DemografischeHerausforderungen.pdf.
- Knappe, F. / Reinhardt, J. / Bergmann, T. / Mottschall, M. (n.d.): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung Heidelberg. im Auftrag des Umweltbundesamtes (unveröffentlicht).
- Kreins, P. / Gömann, H. / Herrmann, S. / Kunkel, R. / Wendland, F. (2007): Integrated Agricultural and Hydrological Modeling within an Intensive Livestock Region. In: *Ecological Economics of Sustainable Watershed Management. Advances in the Economics of Environmental Resources*, Vol. 7. S. 113–142.
- Lansche, J. / Lübs, H. / Giegrich, J. / Liebich, A. (2007): Ermittlung und Bereitstellung von Koeffizienten zum Rohstoffeinsatz bei Importgütern - Endbericht. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung. Im Auftrag des Statistischen Bundesamtes Geschäftszeichen: ZD 3851 10990-07W001. Heidelberg. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Endbericht_ifeu.pdf?__blob=publicationFile.
- Mötzl, H. (2014): Entwicklungen im Bereich umweltfreundlicher Baustoffe. Vortrag im Rahmen des naBe-Aktionstag am 24.11.2014 in Wien. <http://www.nachhaltigebeschaffung.at/nabe-aktionstag-2014>.
- Mudd, G. M. (2009): The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Department of Civil Engineering Monash University.
- Nassar, N. T. / Graedel, T. E. / Harper, E. M. (2015): By-product metals are technologically essential but have problematic supply. In: *Science Advances*. Vol. 1, No.3, S. e1400180–e1400180.
- Nguyen, V. T. / Schenck, G. / Schwarz, J. (2005): Absicherung der statistisch erhobenen Festbetonkennwerte für die neue Normengeneration. Forschungsbericht Universität Leipzig. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.
- Öko-Institut (2013): Renewbility II. Darmstadt, Berlin.
- Öko-Institut / DLR (2009): Renewbility: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030 - Teil 1: Methodik und Datenbasis. Öko-Institut e.V. DLR-Institut für Verkehrsorschung. Berlin.
- Öko-Institut / Prognos (2009): Modell Deutschland.
- Optifert (2014): Optifert soil sensor and Optifert software. <http://www.optifert.eu/index.php/optifert-product-description>.
- Plumeré, N. (2014): Elektrochemischer Nitratsensor. In: *Nachrichten aus der Chemie*. Vol. 62, No.Juli/August 2014, S. 777–779.
- Prior, T. / Giurco, D. / Mudd, G. / Mason, L. / Behrisch, J. (2011): Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. In: *Global Environmental Change*. Vol. 22, No.3, S. 577–587.
- Prognos AG (2011): Energieszenarien 2011. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, GWS – Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung.
- Prognos / EWI / GWS (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung.
- Prognos / EWI / GWS (2014): Entwicklung der Energiemarkte – Energierefenzprognose. Projekt Nr.

- 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Prognos AG (Prognos), Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Basel, Köln, Osnabrück.
- Rosa, E. A. / York, R. / Dietz, T. (2004): Tracking the Anthropogenic Drivers of Ecological Impacts. In: *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. Vol. 33, No.8, S. 509–512.
- Saure, H. (2013): Kalk: Produktion und Anwendungen. Vortrag am 7.5.2013 im Rahmen der Ringvorlesung an der Ruhr-Universität Bochum.
<http://www.utrm.rub.de/doc/ringvorlesungws1314/>.
- Schimanski, L. / Bernhardt, H. / Heckmann, M. / Grismayer, M. (2010): Ressourceneffizienzpotenziale der intelligenten Landtechnik am Beispiel des Einsatzes von Stickstoffsensoren in der Düngung. In: H. ROHN: / N. PASTEWSKI: / M. LETTENMEIER: *Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse der Potenzialanalysen. Ressourceneffizienz Paper 1.5, Projekt "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess) im Auftrag des UBA*. Wuppertal.
- Schmidt-Bleek, F. (2010): Warum der ökologische Rucksack und Faktor 10 entscheidend sind. Positionsbericht 03/2010.
- Schnell, A. / Müller, A. / Rübner, K. (2013): Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung. In: J. WOIDASKY: / K. OSTERTAG: / C. STIER: *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen*. Fraunhofer Verlag. Stuttgart. S. 300–316.
- Schoer, K. / Giegrich, J. / Kovanda, J. / Lauwigi, C. / Liebich, A. / Buyny, Š. / Matthias, J. (2012): Conversion of European product flows into raw material equivalents - Final report of the Eurostat project: Assistance in the development and maintenance of Raw Material Equivalents conversion factors and calculation of RMC time series. Heidelberg (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- Schoer, K. / Wood, R. / Arto, I. / Weinzettel, J. (2013): Estimating Raw Material Equivalents on a Macro-Level: Comparison of Multi-Regional Input–Output Analysis and Hybrid LCI-IO. In: *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society. Vol. 47, No.24, S. 14282–14289.
- Schonhardt, U. / Binz, A. / Wohler, M. / Dott, R. (2003): Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Panels (VIP).
<http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000008996.pdf&name=00000230312.pdf>.
- Schwarz, R. / Harmeling, S. / Bals, C. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Deutschland mit Exkurs NRW. <https://germanwatch.org/klima/klideu07.pdf>.
- Steger, S. / Bleischwitz, R. (2011): Drivers for the use of materials across countries. In: *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. Vol. 19, No.8, S. 816–826.
- Steger, S. / Fekkak, M. / Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Wuppertal.
- Steinberger, J. K. / Krausmann, F. (2011): Material and energy productivity. In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 45, No.4, S. 1169–1176.
- Steinberger, J. K. / Krausmann, F. / Eisenmenger, N. (2010): Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. In: *Ecological Economics*. Elsevier B.V. Vol. 69, No.5, S. 1148–1158.
- Stemmermann, P. / Schweike, U. / Garbev, K. / Beuchle, G. / Möller, H. (2010): Celitement - eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie. In: *Cement International*. Vol. 8, No.5, S. 52–66.
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2014): Ecoinvent: Version 3.1.
- Thomes, P. (2013): Elektromobilität - eine historisch basierte Analyse. In: A. KAMPKER: / D. VALLÉE: /

- A. SCHNETTLER: *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg.
- UBA (Ed.) (2009a): Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung.
- UBA (Ed.) (2009b): Energieeffizienz bei Elektromotoren.
- UBA (2013): Erwartete Klimaänderungen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien/erwartete-klimaaenderungen>.
- UBA (2014a): Die Zukunft im Blick: Trendbericht für eine vorausschauende Ressourcenpolitik. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-zukunft-im-blick>.
- UBA (2014b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Umweltbundesamt. CLIMATE CHANGE 11/2011.
- UBA (2014c): Wie hat sich der Fernlinienbusmarkt seit seiner Liberalisierung in Deutschland entwickelt? Umweltbundesamt (UBA). Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hat-sich-der-fernlinienbusmarkt-seit-seiner>.
- UBA (2015): Schwerpunkte 2015: Jahrespublikation des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt (UBA). Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkte-2015> (abgerufen am: 11.01.2017).
- UBA (2016a): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland - Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (noch nicht veröffentlicht).
- UBA (2016b): Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien (Forschungskennzahl (UFOPLAN) 3711 93 339) - ReStra (noch unveröffentlicht).
- UN (2014): System of Environmental- Economic Accounting 2012 - Central Framework. New York.
- UNEP (2011): Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth - A report of the working group on decoupling on the international resource panel. Fischer-Kowalski, M. Swilling, M. von Weizsäcker, E.U. Ren, Y. Moriguchi, Y. Crane, W. Krausm. http://www.unep.org/resourcepanel/decoupling/files/pdf/Decoupling_Report_English.pdf.
- VDI-ZRE (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau - Materialaufwendungen und technische Lösungen. Verband Deutscher Ingenieure - Zentrum für Ressourceneffizienz (VDI-ZRE). Berlin/Darmstadt. http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf.
- vdz (2014): Zahlen und Fakten. Zementindustrie in Deutschland. Verlag Bau und Technik GmbH. Düsseldorf.
- ViZ (n.d.): Verkehr in Zahlen. Bearbeitet von DIW. Erscheinungsweise jährlich. Bonn, Berlin.
- VW (2009): Innovative Elements for Lightweight Vehicle Structures. Conference Proceedings, Wolfsburg, 26th – 27th May 2009.
- Wagner, J. / Heidrich, K. / Baumann, J. / Kügler, T. / Reichenbach, J. (2012): Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung. In: *UBA Texte*. Vol. 14.
- Weimer-Jehle, W. / Wassermann, S. / Kosow, H. (2011): Konsistente Rahmendaten für Modellierungen und Szenariobildung im Umweltbundesamt. In: *UBA Texte*. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4096.pdf>.
- Weinzettel, J. / Kovanda, J. (2009): Assessing Socioeconomic Metabolism Through Hybrid Life Cycle Assessment. In: *Journal of Industrial Ecology*. Blackwell Publishing Inc. Vol. 13, No.4, S. 607–621.

Weizsäcker, E. Von / Hargroves, K. / Smith, M. (2012): Faktor fünf: die Formel für nachhaltiges Wachstum.

West, J. (2011): Decreasing Metal Ore Grades. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 15, No.2, S. 165–168.

Wiedmann, T. O. / Schandl, H. / Lenzen, M. / Moran, D. / Suh, S. / West, J. / Kanemoto, K. (2015): The material footprint of nations. In: *PNAS*. Vol. 112, No.20, S. 6271–6276.

Wietschel / Arens / Dötsch / Herkel / Krewitt / Markewitz / Möst / Scheufen (2010): Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung.

Wolf, W. (2007): Verkehr.Umwelt.Klima: Die Globalisierung des Tempowahns. Promedia Druck. Wien.

Worldbank (2015): Worldbank Database. www.worldbank.org.

WSV (2010): Zentrale Binnenschifffahrts- und Bestandsdatei. Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Bonn.

<https://www.wsv.de/Schifffahrt/Statistik/zentr.Binnenschiffskartei/index.html>.

WSV (2016): Binnenschifffahrt - Die Entwicklung der Binnenschifffahrt und des Kanalbaus in Deutschland. <https://www.wsv.de/wasserstrassen/historisches/binnenschifffahrt/index.html>.

Wuppertal-Institut (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Sören Steger, Miriam Fekkak, Stefan Bringezu. Wuppertal Institut. Wuppertal.

Zensus (2011): Gebäude mit Wohnraum nach Art des Gebäudes und Gebäudetyp-Bauweise. Zensus 2011 der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder.

https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,GWZ_10_6,m,table.

12 Anhang

Tabelle 52: Klassifikation der Gütergruppen für URMOD

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
1	01.11.1-4, 01.12	Cereals (excl cereals straw and husk), rice	1000 t
2		Cereal strw and husk	1000 t
3	01.11.6, 01.13 (excl. 01.13.5, 01.13.7)	Green leguminous vegetables, vegetables and melons (excl. edible roots and tubers and sugar beet)	1000 t
4	01.11.7	Dried leguminous vegetables	1000 t
5	01.11.8, 01.11.9, 01.26.1	Soya beans, groundnuts and cotton seed, other oil seeds	1000 t
6	01.13.5	Edible roots and tubers with high starch or inulin content	1000 t
7	01.13.7, 01.14	Sugar beet and sugar beet seed, sugar cane	1000 t
8	01.15	Unmanufactured tobacco	1000 t
9	01.16	Fibre crops	1000 t
10	01.19.1, 01.11.5	Forage crops	1000 t
11		Grazed Biomass	1000 t
12	01.2 (excl 01.25.3, 01.26.1, 01.27, 01.28. 10.29)	Fruits	1000 t
13	01.19.2, 01.19.3, 01.25.3, 01.27, 01.28, 01.29, 01.3	Other crop products	1000 t
14	01.41.1, 01.42	Dairy cattle, live other cattle and buffaloes, live and their semen	Mio. EUR
15	01.41.2	Raw milk from dairy cattle	Mio. EUR
16	01.46	Swine, live	Mio. EUR
17	1.43, 01.44, 01.45, 01.49	Other animals and animal products, incl. hunting and trapping and related services	Mio. EUR
18	01.47.1	Poultry, live	Mio. EUR
19	01.47.2	Eggs, in shell, fresh	Mio. EUR
20	01.9	Farm manure and other agricultural waste products	Mio. EUR
21	01.6	Agricultural and animal husbandry services (except veterinary services)	Mio. EUR
22		Industrieholz	1000 t

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
23		Brennholz	1000 TOE
24	03	Fish and other fishing products; aquaculture products; support services to fishing	1000 t
25	05.1	Hard coal	1000 TOE
26	05.2	Lignite	1000 TOE
27	06.10.1	Petroleum oils and oils obtained from bituminous minerals, crude	1000 TOE
28	06.10.2	Bituminous or oil shale and tar sands	1000 TOE
29	06.2	Natural gas, liquefied or in gaseous state	1000 TOE
30	07.1	Iron ores	1000 t metal content
31	07.21	Uranium and thorium ores	1000 t metal content
32	07.29.11	Copper ores and concentrates	1000 t metal content
33	07.29.12	Nickel ores and concentrates	1000 t metal content
34	07.29.13	Aluminium ores and concentrates	1000 t metal content
35	07.29.14.a	Gold	1000 t metal content
36	07.29.14.b	Silver	1000 t metal content
37	07.29.14.c	Platinum MG	1000 t metal content
38	07.29.15.a	Lead	1000 t metal content
39	07.29.15.b	Zinc	1000 t metal content
40	07.29.15.c	Tin	1000 t metal content
41	07.29.19.a	Tungsten ores and concentrates	1000 t metal content
42	07.29.19.b	Tantalum ores and concentrates	1000 t metal content
43	07.29.19.c	Magnesium ores and concentrates	1000 t metal content
44	07.29.19.d	Titanium ores (Ilmenite) and concentrates	1000 t metal content

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
45	07.29.19.e	Manganese ores and concentrates	1000 t metal content
46	07.29.19.f	Chromium ores and concentrates	1000 t metal content
47	07.29.19.g	Other ores and concentrates	1000 t metal content
48	08.11.1	Ornamental or building stone	1000 t
49	08.11.2	Limestone and gypsum	1000 t
50	08.11.3	Chalk and uncalcined dolomite	1000 t
51	08.11.4	Slate	1000 t
52	08.12.1, excl 08.12.13	Gravel and sand, excl. mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use	1000 t
53	08.12.13	Mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use - recycling	1000 t
54	08.12.2	Clays and kaolin	1000 t
55	08.91	Chemical and fertiliser minerals	1000 t
56	08.93	Salt and pure sodium chloride; sea water	1000 t
57	08.92	Peat	1000 t
58	08.99	Other mining and quarrying products nec	1000 t
59	09	Mining support services	Mio. EUR
60	10.1	Preserved meat and meat products	Mio. EUR
61	10.2	Processed and preserved fish, crustaceans and molluscs	Mio. EUR
62	10.3	Processed and preserved fruit and vegetables	Mio. EUR
63	10.4	Vegetable and animal oils and fats	Mio. EUR
64	10.5	Dairy products	Mio. EUR
65	10.6	Grain mill products, starches and starch products	Mio. EUR
66	10.91	Prepared feeds for farm animals	Mio. EUR
67	10.92	Prepared pet foods	Mio. EUR
68	10.7, 10.8	Other food products	Mio. EUR
69	11	Beverages	Mio. EUR
70	12	Tobacco products	Mio. EUR
71	13	Textiles	Mio. EUR
72	14	Wearing apparel	Mio. EUR
73	15	Leather and related products	Mio. EUR

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
74	16	Wood and of products of wood and cork, except furniture; articles of straw and plaiting	1000 t
75	17.1	Pulp, paper and paperboard	Mio. EUR
76	17.2	Articles of paper and paperboard	Mio. EUR
77	18	Printing and recording services	Mio. EUR
78	19.1	Coke oven products	1000 TOE
79	19.2	Refined petroleum products	1000 TOE
80	20.1, (exc.l 20.15, 20.16)	Basic chemicals, fertilisers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in excl. fertilisers and nitrogen compounds, excl. plastics in primary forms	Mio. EUR
81	20.15	Fertilisers and nitrogen compounds	Mio. EUR
82	20.16	Plastics in primary forms	1000 t
83	20.2	Pesticides and other agrochemical products	Mio. EUR
84	20.3	Paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mastics	Mio. EUR
85	20.4	Soap and detergents, cleaning and polishing preparations, perfumes and toilet	Mio. EUR
86	20.5 excl. 20.59.59.903	Other chemical products, excl. biofuels	Mio. EUR
87	20.59.59.903	Biofuels from agricultural biomass	1000 TOE
88	20.6	Man-made fibres	Mio. EUR
89	21	Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	Mio. EUR
90	22.1	Rubber products	Mio. EUR
91	22.2	Plastic products	1000 t
92	23.1	Glass and glass products	1000 t
93	23.2	Refractory products	Mio. EUR
94	23.3	Clay building materials	Mio. EUR
95	23.4	Other porcelain and ceramic products	Mio. EUR
96	23.5	Cement, lime and plaster	1000 t
97	23.6	Articles of concrete, cement and plaster	1000 t
98	23.7	Cut, shaped and finished stone	Mio. EUR
99	23.9	Other non-metallic mineral products	Mio. EUR
100	24.1-3	Basic iron and steel and ferro-alloys (excl gases)	1000 t metal content
101	B-24.1-24.3	Blast Furnace Gas,	1000 TOE
102	O-24.1-24.3	Oxygen Steel Furnace Gas	1000 TOE
103	S-24.1-24.3	Granulierte Schlacke (Schlackensand) u.a.Schlacken	1000 t

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
104	24.41.1, 24.41.4, 24.41.5, 24.41.9	Silver, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	Mio. EUR
105	24.41.2	Gold, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	Mio. EUR
106	24.41.3	Platinum, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	Mio. EUR
107	24.42	Aluminium	1000 t metal content
108	24.43.11, 24.43.21, 24.43.9	Lead	Mio. EUR
109	24.43.12, 24.43.22, 24.43.23	Zinc	Mio. EUR
110	24.43.13, 24.43.24	Tin	Mio. EUR
111	24.44	Copper	1000 t metal content
112	24.45.1, 24.45.2, 24.45.9	Nickel, unwrought; intermediate products of nickel metallurgy	Mio. EUR
113	24.45.3.a	Tungsten products	Mio. EUR
114	24.45.3.b	Tantalum products	Mio. EUR
115	24.45.3.c	Magnesium products	Mio. EUR
116	24.45.3.d	Titanium products	Mio. EUR
117	24.45.3.e	Manganese products	Mio. EUR
118	24.45.3.f	Chromium products	Mio. EUR
119	24.45.3.g	Other non-ferrous metal products	Mio. EUR
120	24.46	Processed nuclear fuel	1000 TOE
121	24.51	Casting services of iron	Mio. EUR
122	24.52	Casting services of steel	Mio. EUR
123	24.53	Casting services of light metals	Mio. EUR
124	24.54	Casting services of other non-ferrous metals	Mio. EUR
125	25.1	Structural metal products	Mio. EUR
126	25.2	Tanks, reservoirs and containers of metal	Mio. EUR
127	25.3	Steam generators, except central heating hot water boilers	Mio. EUR
128	25.5	Forging, pressing, stamping and roll-forming services of metal; powder metallurgy	Mio. EUR

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
129	25.6	Treatment and coating services of metals; machining	Mio. EUR
130	25.7	Cutlery, tools and general hardware	Mio. EUR
131	25.4, 25.9	Other fabricated metal products, incl weapons and ammunition	Mio. EUR
132	26.1-26.4	DV-Geräte, elektron. Bauelem. u. Erzeugn. f. Telekomm. u. Unterhaltg.	Mio. EUR
133	26.5-26.8	Mess-, Kontroll- u.ä. Instr. u. Einr., elektromed. Gerät., Datenträger	Mio. EUR
134	27	Electrical equipment	Mio. EUR
135	28	Machinery and equipment nec	Mio. EUR
136	29101	Motoren	Mio. EUR
137	29102	PKW oh Elektro	Mio. EUR
138	291024000	Personenkraftwagen mit Elektro- oder anderem Motor	Mio. EUR
139	291030000	Omnibusse	Mio. EUR
140	29104	LKW	Mio. EUR
141	29105	Spezialfahrzeuge	Mio. EUR
142	293	Aufbauten und Anhänger	Mio. EUR
143	293	Auotozubehör	Mio. EUR
144	30.1	Ships and boats	Mio. EUR
145	30.2	Railway locomotives and rolling stock	Mio. EUR
146	30.3	Air and spacecraft and related machinery	Mio. EUR
147	30.4, 30.9	Transport equipment nec, incl military fighting vehicles	Mio. EUR
148	31	Furniture	Mio. EUR
149	32.1	Jewellery, bijouterie and related articles	Mio. EUR
150	32.2	Musical instruments	Mio. EUR
151	32.3	Sports goods	Mio. EUR
152	32.4	Games and toys	Mio. EUR
153	32.5	Medical and dental instruments and supplies	Mio. EUR
154	32.9	Manufactured goods nec	Mio. EUR
155	33	Repair and installation services of machinery and equipment	Mio. EUR
156	35.1-A	Electrical energy	1000 TOE
157	5510	Hydro power	1000 TOE
158	5520	Wind power	1000 TOE
159	5534	Solar photovoltaic	1000 TOE
160	5535	Tide, Wave and Ocean	1000 TOE

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
161	35.2 excl. Ta. 35.21.2	Manufactured gas; distribution services of gaseous fuels through mains, excl biogas from agricultural biomass	1000 TOE
162	T.a. 35.31.2	Biogas from agricultural biomass	1000 TOE
163	35.3-A	Derived heat	1000 TOE
164	5532	Solar thermal	1000 TOE
165	5550	Geothermal Energy	1000 TOE
166	36	Natural water; water treatment and supply services	Mio. EUR
167	37, 39	Sewerage; remediation activities and other waste management services	Mio. EUR
168	38 others	Sewerage; waste collection, treatment and disposal activities; materials recovery; remediation activities and other waste management services, excl waste of metals, glass, paper, rubber, textile, wood and macadam , excl recycling	Mio. EUR
169	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - Holz	1000 t
170	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - Papier	1000 t
171	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - Plastik sortenrein	1000 t Plastikäquivalent
172	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - Plastik nicht sortenrein	1000 t
173	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Eisen und Stahl	1000 t metal content
174	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Kupfer	1000 t metal content
175	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Aluminium	1000 t metal content
176	T.a.38.3	Sonstige Abfälle	Mio. EUR
177	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - zur Verwendung im Hochbau	1000 t
178	T.a.38.3	Stoffliche Verwertung Abfälle - zur Verwendung im Verkehrswegebau	1000 t
179	T.a.38.3	Energetisch verwertete Abfälle - Holz- und Bioabfälle	1000 TOE
180	T.a.38.3	Energetisch verwertete Bioabfälle - zur Biokraftstoffherstellung	1000 TOE
181	T.a.38.3	Energetisch verwertete Bioabfälle - zur Biogaserzeugung	1000 TOE
182	T.a.38.3	Energetisch verwertete Abfälle - Deponiegas	1000 TOE
183	T.a.38.3	Energetisch verwertete Abfälle - Klärschlammgas	1000 TOE
184	T.a.38.3	Energetisch verwertete Abfälle - Hausmüll	1000 TOE
185	T.a.38.3	Energetisch verwertete Abfälle - Industrieabfälle	1000 TOE

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
186	41.a	Wohnungsbau	Mio. EUR
187	41.b	Nichtwohnungsbau	
188	42,11	Bau von Straßen	
189	42,12	Bau von Bahnverkehrsstrecken	
190	42,13	Brücken und Tunnelbau	Mio. EUR
191	42,21	Rohrleitungstiefbau, Brunnenbau und Kläranlagenbau	Mio. EUR
192	42,22	Bauten Tiefbauten Kabelleitungen - ohne Stromerzeugungsanlagen	Mio. EUR
193		Bauten Tiefbauten Kabelleitungen - sonstige Stromerzeugungsanlagen	Mio. EUR
194		Bauten Tiefbauten Kabelleitungen - Windkraftanlagen	Mio. EUR
195	42,91	Wasserbau	Mio. EUR
196	42,99	Sonstiger Tiefbau a.n.g.	Mio. EUR
197	43.1	Abbrucharbeiten und vorbereitende Baustellenarbeiten	Mio. EUR
198	43.21	Elektroinstallation	Mio. EUR
199	43.22	Gas-, Wasser-, Heizungs- und Lüftungs- und Kl	Mio. EUR
200	43.29.1	Dämmung gegen Kälte, Wärme, Schall und Erschütterung	Mio. EUR
201	43.29.9	Sonstiges Bauinstallation, anderweitig nicht genannt	Mio. EUR
202	43.31	Anbringen von Stuckaturen, Gipserei und Verputzerei	Mio. EUR
203	43.32	Bautischlerei und -schlosserei	Mio. EUR
204	43.33	Fußboden-, Fliesen- und Plattenlegerei, Tapeziererei	Mio. EUR
205	43.34	Malerei und Glaserei	Mio. EUR
206	43.39	Sonstiger Ausbau, anderweitig nicht genannt	Mio. EUR
207	43.91	Dachdeckerei und Zimmerei	Mio. EUR
208	43.99	Sonstige spezialisierte Bautätigkeiten, a.n.g.	Mio. EUR
209	45	Wholesale and retail trade and repair services of motor vehicles and motorcycles	Mio. EUR
210	46	Wholesale trade services, except of motor vehicles and motorcycles	Mio. EUR
211	47	Retail trade services, except of motor vehicles and motorcycles	Mio. EUR
212	49.1	Personenbeförderung im Eisenbahnfernverkehr einschl DL	Mio. EUR
213	49.2	Güterbeförderung im Eisenbahnverkehr einschl DL	Mio. EUR

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
214	49.3B	Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Private Haushalte - konventionell	Beförderungsleistung in 1000 TOE
215	49.3B	Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Private Haushalte - elektro u.ä	
216	49.3B	Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Werkverkehr konventionell	Beförderungsleistung in 1000 TOE
217	49.3B	Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Werkverkehr - elektro u.ä.	
218	49.3	Sonstiger Landverkehr - Personen - Öffentlicher Verkehr (Busse, Taxis, Schienennahverkehr)	Mio. EUR
219	49.4	Sonstiger Landverkehr - Güter - Schwerverkehr (Lastkraftwagen, Sattelzüge) - Gewerblicher Verkehr	Mio. EUR
220	49.4B	Sonstiger Landverkehr - Güter - Schwerverkehr (Lastkraftwagen, Sattelzüge) - Werkverkehr	Beförderungsleistung in 1000 TOE
221	49.4B	Sonstiger Landverkehr - Güter - Leichte Nutzfahrzeuge (oh Krafträder) - Werkverkehr	Beförderungsleistung in 1000 TOE
222	49.4B	Sonstiger Landverkehr - Güter - Spezialfahrzeuge - Werkverkehr	Beförderungsleistung in 1000 TOE
223	49.5	Sonstiger Landverkehr - Güter - Rohrfernleitungen	Mio. EUR
224	50.1	Personenbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt einschl DL	Mio. EUR
225	5.02	Güterbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt einschl DL	Mio. EUR
226	50.3	Personenbeförderung in der Binnenschifffahrt einchl DL	Mio. EUR
227	50.4	Güterbeförderung in der Binnenschifffahrt einschl DL	Mio. EUR
228	51.1	Flugverkehr (Personenbeförderung)	Mio. EUR
229	51.2	Flugverkehr (Güterbeförderung)	Mio. EUR
230	51B	Internationaler Transport Importgüter- Bahn - Massengüter	Mio. TKM
231	51B	Internationaler Transport Importgüter - Bahn - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
232	51B	Internationaler Transport Importgüter - Bahn - Voluminose Güter	Mio. TKM
233	51B	Internationaler Transport Importgüter- LKW - Massengüter	Mio. TKM
234	51B	Internationaler Transport Importgüter- LKW - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
235	51B	Internationaler Transport Importgüter - LKW - Voluminose Güter	Mio. TKM
236	51B	Internationaler Transport - Pipeline - Gas	Mio. TKM

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
237	51B	Internationaler Transport Importgüter - Pipeline - Mineralöl und Mineralölprodukte	Mio. TKM
238	51B	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Massengüter	Mio. TKM
239	51B	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
240	51B	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Voluminose Güter	Mio. TKM
241	51B	Internationaler Transport Importgüter- Flugzeug	Mio. TKM
242	51B	Landtransport zum Seehafen - Massengüter	Mio. TKM
243	51B	Landtransport zum Seehafen - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
244	51B	Landtransport zum Seehafen - Voluminose Güter	Mio. TKM
245	52	Warehousing and support services for transportation	Mio. EUR
246	53	Postal and courier services	Mio. EUR
247	55, 56	Accommodation and food services	Mio. EUR
248	58	Publishing services	Mio. EUR
249	59, 60	Motion picture, video and television programme production services, sound recording and music publishing; programming and broadcasting services	Mio. EUR
250	61	Telecommunications services	Mio. EUR
251	62, 63	Computer programming, consultancy and related services; information services	Mio. EUR
252	64	Financial services, except insurance and pension funding	Mio. EUR
253	65	Insurance, reinsurance and pension funding services, except compulsory social security	Mio. EUR
254	66	Services auxiliary to financial services and insurance services	Mio. EUR
255	68	Real estate services	Mio. EUR
256	69, 70	Legal and accounting services; services of head offices; management consulting services	Mio. EUR
257	71	Architectural and engineering services; technical testing and analysis services	Mio. EUR
258	72	Scientific research and development services	Mio. EUR
259	73	Advertising and market research services	Mio. EUR
260	74, 75	Other professional, scientific and technical services; veterinary services	Mio. EUR
261	77	Rental and leasing services	Mio. EUR
262	78	Employment services	Mio. EUR
263	79	Travel agency, tour operator and other reservation services and related services	Mio. EUR

Lfd. Nr.	CPA code		Einheit
264	80, 81, 82	Security and investigation services; services to buildings and landscape; office administrative, office support and other business support services	Mio. EUR
265	84	Public administration and defence services; compulsory social security services	Mio. EUR
266	85	Education services	Mio. EUR
267	86	Human health services	Mio. EUR
268	87, 88	Social work services	Mio. EUR
269	90, 91, 92	Creative, arts and entertainment services; library, archive, museum and other cultural services; gambling and betting services	Mio. EUR
270	93	Sporting services and amusement and recreation services	Mio. EUR
271	94	Services furnished by membership organisations	Mio. EUR
272	95	Repair services of computers and personal and household goods	Mio. EUR
273	96	Other personal services	Mio. EUR
274	97, 98	Services of households as employers; undifferentiated goods and services produced by households for own use	Mio. EUR

Tabelle 53: Klassifikation der Kategorien der letzten inländischen Verwendung für URMOD

Konsumausgaben der Haushalte im Inland
Ernährung
Bekleidung und Schuhe
Wohnen
Wohnen - Energieverbrauch - Zusammen
Wohnen - Energieverbrauch - Raumwärme
Wohnen - Energieverbrauch - Warmwasser
Wohnen - Energieverbrauch - Sonstiger
Wohnen - Sonstige Wonungsdienstleistungen (Miete, Reparaturen u.ä.)
Wohnen - Einrichtungsgegenstände (Möbel), Apparate, Geräte
Gesundheitspflege
Verkehr
Verkehr - Individualverkehr
Verkehr - Öffentlicher Personenverkehr
Nachrichtenübermittlung
Freizeit, Unterhaltung und Kultur
Bildungswesen
Beherbergungs- und Gaststättendienstleistungen
Andere Waren und Dienstleistungen (einschl. DL des Groß- und Einzelhandels)
Konsumausgaben privater Organisationen ohne Erwerbszweck
Konsumausgaben des Staates
Konsumausgaben des Staates - Gesundheitspflege
Konsumausgaben des Staates - sonstige
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Insgesamt
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - PKW
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Omnibusse
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - LKW
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Spezialfahrzeuge
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Schiffe
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Schienenfahrzeuge
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Luftfahrzeuge
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Sonstige
Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Sonstige Ausrüstungen und Anlagen
Bauten zusammen
Bauten Wohnungen
Bauten Nichtwohngebäude
Bauten Tiefbauten
Bauten Tiefbauten - Straßen

Bauten Tiefbauten - Bahnverkehrsstrecken

Bauten Tiefbauten - Brücken und Tunnel

Bauten Tiefbauten - Rohrleitungen, Brunnen und Kläranlagen

Bauten Tiefbauten - Kabelleitungen - ohne Stromerzeugungsanlagen

Bauten Tiefbauten - Kabelleitungen - sonstige Stromerzeugungsanlagen

Bauten Tiefbauten- Kabelleitungen - Windkraftanlagen

Bauten - Tiefbauten Wasserbauten

Bauten Tiefbauten - Sonstige Tiefbauten a.n.g.

Tabelle 54: Classification for use tables for physical inputs to the economy by input categories

	Code		Unit
Primary raw materials (domestic extraction)	MF111	Cereals	1000 t RME
	MF112	Roots, tubers	1000 t RME
	MF113	Sugar crops	1000 t RME
	MF114	Pulses	1000 t RME
	MF115	Nuts	1000 t RME
	MF116	Oil bearing crops	1000 t RME
	MF117	Vegetables	1000 t RME
	MF118	Fruits	1000 t RME
	MF119	Fibres	1000 t RME
	MF110	Other crops n.e.c.	1000 t RME
	MF1211	Straw	1000 t RME
	MF1212	Other crop residues (sugar and fodder beet leaves, other)	1000 t RME
	MF1221	Fodder crops (incl. biomass harvest from grassland)	1000 t RME
	MF1222	Grazed biomass	1000 t RME
	MF131	Timber (Industrial roundwood)	1000 t RME
	MF132	Wood fuel and other extraction	1000 t RME
	MF141	Fish catch	1000 t RME
	MF142	All other aquatic animals and plants	1000 t RME
	MF143	Hunting and gathering	1000 t RME
	MF21	Iron ores	1000 t RME
	MF221	Copper	1000 t RME
	MF222	Nickel	1000 t RME
	MF223	Lead	1000 t RME
	MF224	Zinc	1000 t RME
	MF225	Tin	1000 t RME
	MF2261	Gold - gross ore	1000 t RME
	MF2262	Silver - gross ore	1000 t RME
	MF2262	Platinum and other precious metal ores - gross ore	1000 t RME
	MF227	Bauxite and other aluminium	1000 t RME
	MF228	Uranium and thorium	1000 t RME
	MF2291	Tungsten - gross ore	1000 t RME
	MF2292	Tantalum - gross ore	1000 t RME
	MF2293	Mangnesium ores - gross ore	1000 t RME
	MF2294	Titanium - gross ore	1000 t RME

	MF2295	Manganese - gross ore	1000 t RME
	MF2296	Chromium - gross ore	1000 t RME
	MF2297	Other metal ores - gross ore	1000 t RME
	MF31	Marble, granite, sandstone, porphyry, basalt, other ornamental or building stone (excluding slate)	1000 t RME
	MF32	Chalk and dolomite	1000 t RME
	MF33	Slate	1000 t RME
	MF34	Chemical and fertilizer minerals	1000 t RME
	MF35	Salt	1000 t RME
	MF36	Limestone and gypsum	1000 t RME
	MF37	Clays and kaolin	1000 t RME
	MF38	Sand and gravel	1000 t RME
	MF39	Other non-metallic minerals n.e.c	1000 t RME
	MF411	Lignite (brown coal)	1000 t RME
	MF412	Hard coal	1000 t RME
	MF413	Oil shale and tar sands	1000 t RME
	MF414	Peat	1000 t RME
	MF421	Crude oil, condensate and natural gas liquids (NGL)	1000 t RME
	MF422	Natural gas	1000 t RME
Immaterial renewable energy resources	IE1	Hydro power	1000 TOE
	IE2	Wind power	1000 TOE
	IE3	Solar photovoltaic	1000 TOE
	IE4	Tide, Wave and Ocean	1000 TOE
	IE5	Solar thermal	1000 TOE
	IE6	Geothermal Energy	1000 TOE
Waste for material recovery (recycling)	WR11	Stoffliche Verwertung Abfälle - Holz	1000 t
	WR12	Stoffliche Verwertung Abfälle - Papier	1000 t
	WR21	Stoffliche Verwertung Abfälle - Plastik sortenrein	1000 t
	WR22	Stoffliche Verwertung Abfälle - Plastik nicht sortenrein	1000 t
	WR31	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Eisen und Stahl	1000 t RME
	WR33	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Kupfer	1000 t RME
	WR34	Stoffliche Verwertung Schrott und Abfälle - Aluminium	1000 t RME
	WR4	Others	1000 t

Waste for energy recovery	WR5	Stoffliche Verwertung Abfälle - zur Verwendung im Hochbau	1000 t
	WR6	Stoffliche Verwertung Abfälle - zur Verwendung im Verkehrswegebau	1000 t
	WE1	Energetisch verwertete Abfälle - Holz- und Bioabfälle	1000 TOE
	WE2	Energetisch verwertete Bioabfälle - zur Biokraftstofferzeugung	1000 TOE
	WE3	Energetisch verwertete Bioabfälle - zur Biogaserzeugung	1000 TOE
	WE4	Energetisch verwertete Abfälle - Deponiegas	1000 TOE
	WE5	Energetisch verwertete Abfälle - Klärschlammgas	1000 TOE
Beförderungsleistungen	WE5	Energetisch verwertete Abfälle - Hausmüll	1000 TOE
	WE7	Energetisch verwertete Abfälle - Industrieabfälle	1000 TOE
		Personenbeförderung im Eisenbahnfernverkehr einschl. DL	Mio. PKM
		Güterbeförderung im Eisenbahnverkehr einschl. DL	Mio. TKM
		Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Private Haushalte - konventionell	Mio. PKM
		Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Private Haushalte - elektro u.ä	Mio. PKM
		Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Werkverkehr konventionell	Mio. PKM
		Sonstiger Landverkehr - Personen - Individualverkehr (PKW und Krafträder) - Werkverkehr - elektro u.ä.	Mio. PKM
		Sonstiger Landverkehr - Personen - Öffentlicher Verkehr (Busse, Taxis, Schienennahverkehr)	Mio. PKM
		Sonstiger Landverkehr - Güter - Schwerverkehr (Lastkraftwagen, Sattelzüge) - Gewerblicher Verkehr	Mio. TKM
		Sonstiger Landverkehr - Güter - Schwerverkehr (Lastkraftwagen, Sattelzüge) - Werkverkehr	Mio. TKM
		Sonstiger Landverkehr - Güter - Leichte Nutzfahrzeuge (oh Krafträder) - Werkverkehr	Mio. TKM

	Sonstiger Landverkehr -Güter - Spezialfahrzeuge - Werkverkehr	Mio. TKM
	Sonstiger Landverkehr -Güter - Rohrfernleitungen	Mio. TKM
	Personenbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt einschl. DL	Mio. PKM
	Güterbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt einschl. DL	Mio. TKM
	Personenbeförderung in der Binnenschifffahrt einschl. DL	Mio. PKM
	Güterbeförderung in der Binnenschifffahrt einschl. DL	Mio. TKM
	Flugverkehr (Personenbeförderung)	Mio. PKM
	Flugverkehr (Güterbeförderung)	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- Bahn - Massengüter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter - Bahn - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter - Bahn - Voluminöse Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- LKW - Massengüter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- LKW - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter - LKW - Voluminöse Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport - Pipeline - Gas	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter - Pipeline - Mineralöl und Mineralölprodukte	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Massengüter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- Hochseeschiff - Voluminöse Güter	Mio. TKM
	Internationaler Transport Importgüter- Flugzeug	Mio. TKM
	Landtransport zum Seehafen - Massengüter	Mio. TKM
	Landtransport zum Seehafen - Durchschnittliche Güter	Mio. TKM
	Landtransport zum Seehafen - Voluminöse Güter	Mio. TKM

Tabelle 55: Kumulierter Primärrohstoffaufwand nach Rohstoffarten, 2010, in 1000 Tonnen RME

		Inländische Entnahme	Importe	Letzte Ver- wen-dung insgesamt	Exporte	Letzte in- län-dische Verwen- dung
		DE	RMEIMP	RMI	RMEEXP	RMCM
	Insgesamt	1.045.588	1.621.302	2.666.890	1.276.218	1.390.672
MF1	Biomasse	269.428	173.763	443.190	161.790	281.400
MF111	Getreide	44.039	33.325	77.363	31.836	45.527
MF112	Wurzeln, Knollen	10.442	714	11.156	1.839	9.318
MF113	Zuckerpflanzen	23.432	4.174	27.606	5.523	22.083
MF114	Hülsenfrüchte	222	295	517	147	370
MF115	Nüsse	0	544	544	187	357
MF116	Ölhaltige Früchte	5.745	19.843	25.588	11.273	14.315
MF117	Gemüse	3.291	5.549	8.839	1.682	7.158
MF118	Obst	4.238	6.499	10.737	1.783	8.955
MF119	Fasern	0	415	415	214	200
MF1110	Sonstige Erzeugnisse pflanzlichen Ur- sprungs a.n.g.	435	3.535	3.970	1.385	2.585
MF1211	Stroh	19.480	10.267	29.747	9.773	19.974
MF1212	Sonstige Pflanzenrück- stände (Zucker- und Futtermübenblätter, Sonstige)	4.416	3.004	7.420	2.468	4.951
MF1221	Futterpflanzen (darun- ter auf Weiden anfal- lende Biomasse)	98.902	22.873	121.775	38.675	83.100
MF1222	Geweidete Biomasse	8.200	13.849	22.049	7.625	14.425
MF131	Industrierundholz (Stamm- und Faser- holz)	27.233	43.798	71.031	41.112	29.919
MF132	Brennholz und sons- tige Entnahmen	19.074	4.361	23.435	5.808	17.627
MF141	Wildfischfang	203	595	798	368	430
MF142	Alle sonstigen Wasse- tiere und -pflanzen	19	55	75	35	40
MF143	Jagen und Sammeln	57	67	124	59	65
MF2	Metallerze	394	618.339	618.733	464.774	153.959
MF21	Eisen	394	123.830	124.224	82.697	41.527
MF221	Kupfer	0	140.119	140.119	84.776	55.342
MF222	Nickel	0	18.300	18.300	11.916	6.383

MF223	Blei	0	2.068	2.068	1.678	390
MF224	Zink	0	12.849	12.849	8.237	4.612
MF225	Zinn	0	16.478	16.478	11.308	5.170
MF2261	Gold	0	104.093	104.093	106.453	-2.360
MF2262	Silber	0	9.869	9.869	8.297	1.572
MF2262	Platin und sonstige Edelmetalle	0	37.858	37.858	40.018	-2.160
MF227	Bauxit und sonstiges Aluminium	0	30.595	30.595	18.969	11.627
MF228	Uran und Thorium	0	167	167	103	65
MF2291	Wolfram	0	5.635	5.635	3.492	2.143
MF2292	Tantal	0	3.401	3.401	2.800	601
MF2293	Magnesium	0	780	780	481	299
MF2294	Titan	0	59.454	59.454	47.967	11.487
MF2295	Mangan	0	3.522	3.522	2.170	1.353
MF2296	Chrom	0	4.406	4.406	2.757	1.649
MF2297	Sonstige Metalle a.n.g.	0	44.914	44.914	30.655	14.260
MF3	Nicht-metallische Minerale	579.703	262.988	842.691	279.016	563.675
MF31	Marmor, Granit, Sandstein, Porphyr, Basalt, sonstige Naturwerksteine und Natursteine (außer Tonschiefer)	1.200	6.088	7.288	3.431	3.856
MF32	Kreide und Dolomit	3.120	15.874	18.993	10.974	8.019
MF33	Tonschiefer	34	170	204	88	116
MF34	Chemische und Dünngemittelminerale	7.814	10.585	18.399	18.134	265
MF35	Salz	19.664	12.737	32.401	19.048	13.353
MF36	Kalk- und Gipsstein	67.760	59.353	127.113	64.258	62.855
MF37	Ton und Kaolin	13.905	15.952	29.857	13.881	15.977
MF38	Sand und Kies	454.000	126.691	580.691	136.383	444.309
MF39	Sonstige nichtmetallische Minerale a.n.g.	12.205	15.538	27.743	12.818	14.925
MF4	Fossile Energieträger	196.064	566.212	762.276	370.637	391.639
MF411	Braunkohle	169.403	65.088	234.492	104.896	129.596
MF412	Steinkohle	12.900	129.111	142.011	76.954	65.056
MF413	Ölhaltige Schiefer und Sande	351	2.422	2.774	1.370	1.404

MF414	Torf	0	2.927	2.927	1.795	1.133
MF421	Erdöl, Erdgaskonden-sate und Flüssigerdgas	2.882	219.791	222.673	106.338	116.335
MF422	Erdgas	10.528	146.871	157.399	79.284	78.115

Tabelle 56: RME nach 41 Kategorien der letzten Verwendung in Mio. Tonnen RME

	Primär-rohstoffe insge-samt	Biomasse	Metalle	Nicht-me-tallische Mineralien	Fossile Ener-gie-trä-ger
Gesamte letzte Verwendung	2.667	443	619	843	762
Exporte	1.276	162	465	279	371
Letzte inländische Verwendung zusam-men	1.390	281	154	564	391
Konsumausgaben zusammen	773	247	72	133	321
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Ernährung	202	145	5	28	24
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Bekleidung und Schuhe	18	5	2	5	7
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Wohnen - Energieverbrauch - Raumwärme	66	12	2	2	50
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Wohnen - Energieverbrauch - Warmwasser	15	1	0	1	13
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Wohnen - Energieverbrauch - sonstiger	47	2	1	2	41
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Wohnen - Sonstige Wondungsdienstleistun-gen (Miete, Reparaturen u.ä.)	43	3	7	22	11
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Wohnen - Einrichtungsgegenstände (Möbel), Apparate, Geräte	34	4	11	11	9
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Gesundheitspflege	11	3	2	2	4
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Verkehr - Individualverkehr	82	4	16	10	52
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Verkehr - Öffentlicher Personenverkehr	31	2	3	5	21
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Nachrichtenübermittlung	6	1	1	2	3
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Freizeit, Unterhaltung und Kultur	34	13	5	6	10
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Bildungswesen	2	0	0	0	1
Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Beherbergungs- und Gaststättendienstleis-tungen	39	20	2	6	11

Konsumausgaben der Haushalte im Inland - Andere Waren und Dienstleistungen (einschl. DL des Groß- und Einzelhandles)	60	10	7	14	29
Konsumausgaben privater Organisationen ohne Erwerbszweck	5	1	0	1	3
Konsumausgaben des Staates - Gesundheitspflege	9	1	1	1	5
Konsumausgaben des Staates - sonstige	69	18	8	15	28
Investitionen zusammen	617	34	82	431	70
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - PKW	8	0	3	2	3
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Omnibusse	0	0	0	0	0
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - LKW	9	0	4	2	3
Investitionen - Ausrüst. s. Anlagen - Transportausrüstung - Spezialfahrzeuge	0	0	0	0	0
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Schiffe	5	1	2	1	1
Investitionen - Ausr. u. s. Anlagen - Transportausrüstung - Schienenfahrzeuge	4	0	2	0	1
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - Luftfahrzeuge	3	0	1	1	1
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen - Transportausrüstung - sonstige	0	0	0	0	0
Investitionen - Ausrüstungen und sonstige Anlagen -sonstige	69	4	30	13	21
Investitionen - Bauten - Wohnungen	157	4	19	119	14
Investitionen - Bauten - Nichtwohngebäude	185	4	30	132	19
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Straßen	83	0	2	78	2
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Bahnverkehrsstrecken	15	0	1	13	1
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Brücken und Tunnel	6	0	1	5	0
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Rohrleitungen, Brunnen und Kläranlagen	42	0	2	38	2
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Kabelleitungen - ohne Stromerzeugungsanlagen	5	0	2	2	1
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Kabelleitungen - sonstige Stromerzeugungsanlagen	10	0	1	7	1
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Kabelleitungen - Windkraftanlagen	2	0	1	1	1
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - Wasserbauten	5	0	0	4	0
Investitionen - Bauten - Tiefbauten - sons-tige Tiefbauten a.n.g.	0	0	0	0	0
Vorratsveränderungen + Nettozugang an Wertsachen	10	17	-19	13	-1

Tabelle 57: Kumulierter Rohstoffaufwand nach 274 Gütergruppen und Kategorien der letzten Verwendung, 2010

		Gesamte letzte Ver- wendung (RMI)	Ex- porte	Letzte inländi- sche Verwen- dung (RMC)	Konsum- aus-ga- ben	Investi- tonen	Nach- richt- lich: Im- porte
Basiswert 2010							
	Total	2.667	1.276	1.390	773	617	1.621
01.11.1-4, 01.12	Cereals (excl cerea straw and husk), rice	31	15	16	0	16	10
01.11.6, 01.13 (excl. 01.13.5, 01.13.7)	Cereal straw and husk Green leguminous vegeta- bles, vegetables and mel- mons (excl. edible roots and tubers and sugar beet)	5	1	4	4	0	5
01.11.7	Dried leguminous vegeta- bles	0	0	0	0	0	0
01.11.8, 01.11.9, 01.26.1	Soya beans, groundnuts and cotton seed, other oil seeds	4	1	4	1	2	10
01.13.5	Edible roots and tubers with high starch or inulin content	11	2	9	9	0	1
01.13.7, 01.14	Sugar beet and sugar beet seed, sugar cane	1	0	1	0	1	0
01.15	Unmanufactured tobacco	1	0	1	0	1	2
01.16	Fibre crops	0	0	0	0	0	0
01.19.1, 01.11.5	Forage crops	0	0	0	0	0	0
	Grazed Biomass	0	0	0	0	0	0
01.2 (excl 01.25.3, 01.26.1, 01.27, 01.28, 10.29)	Fruits	8	1	7	7	0	6
01.19.2, 01.19.3, 01.25.3, 01.27, 01.28, 01.29, 01.3	Other crop products	4	2	3	3	0	6
01.41.1, 01.42	Dairy cattle, live other cat- tle and buffaloes, live and their semen	2	6	-3	0	-3	1
01.41.2	Raw milk from dairy cattle	10	0	10	10	0	0
01.46	Swine, live	0	1	0	0	0	3
1.43, 01.44, 01.45, 01.49	Other animals and animal products, incl. hunting and trapping and related ser- vices	7	5	3	3	0	4
01.47.1	Poultry, live	1	1	0	0	0	0

01.47.2	Eggs, in shell, fresh	2	0	2	2	0	1
01.9	Farm manure and other agricultural waste products	0	0	0	0	0	0
01.6	Agricultural and animal husbandry services (except veterinary services)	0	0	0	0	0	0
02 excl.	Products of forestry, logging and related services excl. fuel wood	2	2	0	0	0	5
02.20.14	Fuel wood	11	0	11	11	0	0
03	Fish and other fishing products; aquaculture products; support services to fishing	1	0	0	0	0	0
05.1	Hard coal	2	2	0	0	0	56
05.2	Lignite	0	0	0	0	0	0
06.10.1	Petroleum oils and oils obtained from bituminous minerals, crude	0	1	0	0	0	101
06.10.2	Bituminous or oil shale and tar sands	0	0	0	0	0	0
06.2	Natural gas, liquefied or in gaseous state	43	20	24	27	-4	89
07.1	Iron ores	-9	0	-9	0	-9	54
07.21	Uranium and thorium ores	0	0	0	0	0	0
07.29.11	Copper ores and concentrates	13	2	11	0	11	39
07.29.12	Nickel ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.13	Aluminium ores and concentrates	-1	0	-1	0	-1	3
07.29.14. a	Gold	4	0	4	0	4	6
07.29.14. b	Silver	0	0	0	0	0	0
07.29.14. c	Platinum MG	0	0	0	0	0	0
07.29.15. a	Lead	0	0	0	0	0	2
07.29.15. b	Zinc	0	0	0	0	0	3
07.29.15. c	Tin	0	0	0	0	0	0
07.29.19. a	Tungsten ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19. b	Tantalum ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19. c	Magnesium ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19. d	Titanium ores (Ilmenite) and concentrates	0	0	0	0	0	43
07.29.19. e	Manganese ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19.f	Chromium ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19.g	Other ores and concentrates	1	1	0	0	0	5
08.11.1	Ornamental or building stone	0	0	0	0	0	0
08.11.2	Limestone and gypsum	-2	3	-4	0	-4	6
08.11.3	Chalk and uncalcined dolomite	1	1	0	0	0	1

08.11.4	Slate	0	0	0	0	0	0
08.12.1, excl 08.12.13	Gravel and sand, excl. mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use	37	30	6	0	6	13
08.12.13	Mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use - recycling	0	0	0	0	0	0
08.12.2	Clays and kaolin	6	3	3	0	2	1
08.91	Chemical and fertiliser minerals	-6	2	-7	0	-7	2
08.93	Salt and pure sodium chloride; sea water	-2	3	-5	1	-6	3
08.92	Peat	1	1	0	0	0	1
08.99	Other mining and quarrying products nec	2	2	0	0	0	2
09	Mining support services	0	0	0	0	0	0
10.1	Preserved meat and meat products	106	28	78	74	4	23
10.2	Processed and preserved fish, crustaceans and molluscs	5	2	3	3	0	3
10.3	Processed and preserved fruit and vegetables	8	2	6	5	0	3
10.4	Vegetable and animal oils and fats	10	5	5	4	0	11
10.5	Dairy products	62	21	41	40	1	12
10.6	Grain mill products, starches and starch products	10	4	6	6	0	2
10.91	Prepared feeds for farm animals	4	1	3	2	1	1
10.92	Prepared pet foods	2	0	1	1	0	1
10.7, 10.8	Other food products	46	12	34	37	-3	10
11	Beverages	9	2	7	9	-2	2
12	Tobacco products	2	1	1	1	0	0
13	Textiles	11	7	4	3	0	7
14	Wearing apparel	18	7	11	12	-1	16
15	Leather and related products	9	4	5	5	0	9
16	Wood and of products of wood and cork, except furniture; articles of st2nd l raw and plaiting	14	14	0	0	0	11
17.1	Pulp, paper and paperboard	24	22	2	0	2	24
17.2	Articles of paper and paperboard	13	9	5	6	-1	4
18	Printing and recording services	2	1	1	1	-1	0
19.1	Coke oven products	2	2	0	0	0	7
19.2	Refined petroleum products	55	35	20	20	0	63

20.1, (exc.l 20.15, 20.16)	Basic chemicals, fertilisers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in excl. fertilisers and nitrogen compounds, excl. plastics in primary forms	102	99	3	2	1	60
20.15	Fertilisers and nitrogen compounds	11	9	2	3	-1	3
20.16	Plastics in primary forms	23	20	2	0	2	11
20.2	Pesticides and other agro-chemical products	3	3	0	0	0	1
20.3	Paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mastics	5	4	1	0	0	1
20.4	Soap and detergents, cleaning and polishing preparations, perfumes and toilet	9	6	4	5	-1	3
20.5 excl. 20.59.59. 903	Other chemical products, excl. biofuels	15	13	2	1	2	8
20.59.59. 903	Biofuels from agricultural biomass	2	2	0	0	0	1
20.6	Man-made fibres	1	1	0	0	0	1
21	Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	22	17	5	7	-3	14
22.1	Rubber products	6	5	1	1	0	5
22.2	Plastic products	21	18	3	2	1	10
23.1	Glass and glass products	12	11	1	1	0	10
23.2	Refractory products	1	1	0	0	0	0
23.3	Clay building materials	2	2	0	0	0	4
23.4	Other porcelain and ceramic products	7	5	3	3	0	7
23.5	Cement, lime and plaster	27	20	7	2	6	2
23.6	Articles of concrete, cement and plaster	26	5	21	2	19	5
23.7	Cut, shaped and finished stone	1	0	0	0	0	1
23.9	Other non-metallic mineral products	28	25	3	2	1	16
24.1-3	Basic iron and steel and ferro-alloys (excl gases)	68	66	2	0	2	94
B-24.1- 24.3	Blast Furnace Gas,	0	0	0	0	0	0
O-24.1- 24.3	Oxygen Steel Furnace Gas	0	0	0	0	0	0
S-24.1- 24.3	Slag	0	0	0	0	0	0
24.41.1, 24.41.4, 24.41.5, 24.41.9	Silver, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	6	6	0	0	0	8
24.41.2	Gold, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	52	78	-26	0	-26	73
24.41.3	Platinum, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	23	31	-8	0	-8	38
24.42	Aluminium	25	16	8	0	8	36

24.43.11, 24.43.21, 24.43.9	Lead	3	3	0	0	0	1
24.43.12, 24.43.22, 24.43.23	Zinc	4	4	0	0	0	12
24.43.13, 24.43.24	Tin	1	2	0	0	0	12
24.44	Copper	49	45	4	0	4	70
24.45.1, 24.45.2, 24.45.9	Nickel, unwrought; intermediate products of nickel metallurgy	5	4	1	0	1	12
24.45.3.a	Tungsten products	0	0	0	0	0	1
24.45.3.b	Tantalum products	1	1	0	0	0	1
24.45.3.c	Magnesium products	1	0	0	0	0	2
24.45.3.d	Titanium products	3	2	0	0	0	1
24.45.3.e	Manganese products	0	0	0	0	0	0
24.45.3.f	Chromium products	0	0	0	0	0	0
24.45.3.g	Other non-ferrous metal products	13	13	0	0	0	14
24.46	Processed nuclear fuel	0	0	0	0	0	1
24.51	Casting services of iron	1	0	0	0	0	0
24.52	Casting services of steel	0	0	0	0	0	0
24.53	Casting services of light metals	0	0	0	0	0	0
24.54	Casting services of other non-ferrous metals	-1	0	-1	0	-1	0
25.1	Structural metal products	13	6	7	2	5	3
25.2	Tanks, reservoirs and containers of metal	2	1	1	0	1	1
25.3	Steam generators, except central heating hot water boilers	0	0	0	0	0	0
25.5	Forging, pressing, stamping and roll-forming services of metal; powder metallurgy	2	0	2	0	2	0
25.6	Treatment and coating services of metals; machining	1	0	1	0	1	0
25.7	Cutlery, tools and general hardware	11	7	4	1	3	6
25.4, 25.9	Other fabricated metal products, incl weapons and ammunition	16	14	1	1	0	10
26.1-26.4	DV-Geräte, elektron. Bauelem. u. Erzeugn. f. Telekomm. u. Unterhaltg.	35	21	14	4	10	35
26.5-26.8	Mess-, Kontroll- u. ä. Instr. u. Einr., elektromed. Gerät., Datenträger	19	15	4	2	2	11
27	Electrical equipment	71	53	18	7	11	49
28	Machinery and equipment nec	127	94	33	1	32	44
29.10.1	Internal combustion engines of a kind used for motor vehicles	4	4	0	0	0	6

29.10.2 excl.	Passenger cars excl. electric and other engine	97	60	38	28	10	17
29102400 0	Passenger cars with electric and other engine	0	0	0	0	0	0
29.10.3	Motor vehicles for the transport of or more persons	1	1	0	0	0	0
29.10.4	Motor vehicles for the transport of goods	9	6	3	0	3	3
29.10.5	Special-purpose motor vehicles	2	2	0	0	0	0
29.2	Bodies (coachwork) for motor vehicles; trailers and semi-trailers	5	3	2	1	1	2
29.3	Parts and accessories for motor vehicles	23	21	2	1	1	17
30.1	Ships and boats	9	3	6	0	6	4
30.2	Railway locomotives and rolling stock	11	7	4	0	4	4
30.3	Air and spacecraft and related machinery	9	10	-1	0	-1	10
30.4, 30.9	Transport equipment nec, incl military fighting vehicles	0	0	0	0	0	0
31	Furniture	17	5	12	8	4	8
32.1	Jewellery, bijouterie and related articles	6	3	3	2	1	4
32.2	Musical instruments	1	0	0	0	0	0
32.3	Sports goods	1	1	1	1	0	1
32.4	Games and toys	2	1	1	1	0	1
32.5	Medical and dental instruments and supplies	10	5	5	2	3	4
32.9	Manufactured goods nec	4	2	2	1	0	3
33	Repair and installation services of machinery and equipment	7	1	5	0	5	0
35.1-A	Electrical energy	84	25	59	59	0	5
5510	Hydro power	0	0	0	0	0	0
5520	Wind power	0	0	0	0	0	0
5534	Solar photovoltaic	0	0	0	0	0	0
5535	Tide, Wave and Ocean	0	0	0	0	0	0
35.2 excl. Ta. 35.21.2	Manufactured gas; distribution services of gaseous fuels through mains, excl biogas from agricultural biomass	3	1	3	3	0	1
T.a. 35.31.2	Biogas from agricultural biomass	0	0	0	0	0	0
35.3-A	Derived heat	7	0	7	7	0	0
5532	Solar thermal	0	0	0	0	0	0
5550	Geothermal Energy	0	0	0	0	0	0
36	Natural water; water treatment and supply services	1	0	1	3	-2	0

37, 39	Sewerage; remediation activities and other waste management services	4	0	4	2	1	0
38 others	Sewerage; waste collection, treatment and disposal activities; materials recovery; remediation activities and other waste management services, excl waste of metals, glass, paper, rubber, textile, wood and macadam, excl recycling	5	2	3	6	-3	3
38.32.39A	Other non-metal secondary raw materials - wood	0	0	0	0	0	1
38.32.32	Secondary raw material of paper and paperboard	0	0	0	0	0	1
38.32.33A	Secondary raw material of plastic mono-material	0	0	0	0	0	0
38.32.33B	Secondary raw material of plastic - non mono-material	0	0	0	0	0	0
38.32.22	Secondary raw material of ferrous metals	0	0	0	0	0	1
38.32.23	Secondary raw material of copper	0	0	0	0	0	0
38.32.25	Secondary raw material of aluminium	0	0	0	0	0	0
38.32.2B, 38.32.39B	Other metal and non-metal secondary raw materials - other	0	0	0	0	0	0
38.32.39C	Other non-metal secondary raw materials -used for high building	0	0	0	0	0	0
38.32.39D	Other non-metal secondary raw materials -used for traffic infrastructure	0	0	0	0	0	0
38.21.23A	Energetic use of waste - incineration of wood and other biomass	0	0	0	0	0	0
38.21.23B	Energetic use of waste - biofuels	0	0	0	0	0	0
38.21.23C	Energetic use of waste - biogas	0	0	0	0	0	0
38.21.23D	Energetic use of waste - landfill gas	0	0	0	0	0	0
38.21.23E	Energetic use of waste - sewage sludge gas	0	0	0	0	0	0
38.21.23F	Energetic use of waste - incineration of municipal waste	0	0	0	0	0	0
38.21.23G	Energetic use of waste - incineration of industrial waste	0	0	0	0	0	0
41.00.1, 41.00.3	Residential buildings	127	0	127	0	127	0
41.00.2, 41.00.4	Non-residential buildings	156	0	156	0	156	0
42.11	Roads and motorways; construction works for roads and motorways	80	0	80	0	80	0

42.12	Railways and underground railways; construction works for railways and underground	14	0	14	0	14	0
42.13	Bridges and tunnels; construction works for bridges and tunnels	6	0	6	0	6	0
42.21	Constructions and construction works for utility projects for fluids	39	0	39	0	39	0
42.22A	Constructions and construction works for utility projects for electricity and telecommunications, excl. power plants	3	0	3	0	3	0
42.22B	Power plants excl. Wind	9	0	9	0	9	0
42.22C	Wind power plants	2	0	2	0	2	0
42.91	Constructions and construction works for water projects	5	0	5	0	5	0
42.99	Constructions and construction works for other civil engineering projects nec	0	0	0	0	0	0
43.1	Demolition and site preparation works	0	0	0	0	0	0
43.21	Electrical installation works	17	0	17	1	16	0
43.22	Plumbing, heat and air-conditioning installation works	7	0	7	0	7	0
43.29.11	Insulation works	11	0	11	0	11	0
43.29 excl.	Other construction installation works, excl. insulation works	0	0	0	0	0	0
43.29.11	Plastering works	1	0	1	0	1	0
43.32	Joinery installation works	3	0	3	0	3	0
43.33	Floor and wall covering works	2	0	2	0	2	0
43.34	Painting and glazing works	2	0	2	0	2	0
43.39	Other building completion and finishing works	3	0	3	0	3	0
43.91	Roofing works	2	0	2	0	2	0
43.99	Other specialised construction works nec	2	0	2	0	2	0
45	Wholesale and retail trade and repair services of motor vehicles and motorcycles	9	0	9	7	2	0
46	Wholesale trade services, except of motor vehicles and motorcycles	21	13	9	6	3	2
47	Retail trade services, except of motor vehicles and motorcycles	26	0	26	26	0	0
49.1	Passenger rail transport services, interurban	6	0	6	7	-1	2
49.2	Freight rail transport services	3	2	2	1	0	9

49.3A	Other passenger land transport services - individual transport - private households - conventional	41	0	41	41	0	0
49.3B	Other passenger land transport services - individual transport - private households - electrical etc.	0	0	0	0	0	0
49.3C	Other passenger land transport services - individual own account transport - enterprises - conventional	0	0	0	0	0	0
49.3D	Other passenger land transport services - individual own account transport - enterprises - electrical etc.	0	0	0	0	0	0
49.3E	Other passenger land transport services - public (bus, taxi, light rail vehicles)	5	0	5	4	0	0
49.4A	Freight transport services by road and removal services - heavy vehicles - transport for third account	1	1	0	0	0	29
49.4B	Freight transport services by road and removal services - heavy vehicles - transport for own account	0	0	0	0	0	0
49.4C	Freight transport services by road and removal services - light vehicles - transport for own account	1	0	1	1	0	0
49.4D	Transport services by special vehicles - transport for own account	0	0	0	0	0	0
49.5	Transport services via pipeline	0	0	0	0	0	0
50.1	Sea and coastal passenger water transport services	0	0	0	0	0	0
50.2	Sea and coastal freight water transport services	35	35	0	0	0	30
50.3	Inland passenger water transport services	0	0	0	0	0	0
50.4	Inland freight water transport services	0	0	0	0	0	3
51.1	Passenger air transport services	22	6	16	16	0	13
51.2	Freight air transport and space transport services	3	3	0	0	0	1
49.2XA	International transport of imported goods - rail - bulk goods	0	0	0	0	0	0
49.2XB	International transport of imported goods - Bahn - average goods	0	0	0	0	0	0
49.2XC	International transport of imported goods - rail - light goods	0	0	0	0	0	0
49.4XA	International transport of imported goods- road - bulk goods	0	0	0	0	0	0

49.4XB	International transport of imported goods- road - average goods	0	0	0	0	0	0
49.4XC	International transport of imported goods - road - light goods	0	0	0	0	0	0
49.5XA	International transport of imported goods - pipeline - gas	0	0	0	0	0	5
49.5XB	International transport of imported goods - pipeline - mineral oil and mineral oil products	0	0	0	0	0	1
49.4YA	International transport of imported goods to sea port - bulk goods	0	0	0	0	0	1
49.4YB	International transport of imported goods to sea port - average goods	0	0	0	0	0	0
49.4YC	International transport of imported goods to sea port - light goods	0	0	0	0	0	0
52	Warehousing and support services for transportation	4	2	2	2	0	4
50.2XA	International transport of imported goods- seagoing vessel - bulk goods	0	0	0	0	0	2
50.2XB	International transport of imported goods- seagoing vessel - average goods	0	0	0	0	0	1
50.2XC	International transport of imported goods- seagoing vessel - Voluminose Güter	0	0	0	0	0	0
51.2X	International transport of imported goods- air	0	0	0	0	0	3
53	Postal and courier services	1	0	1	1	0	0
55, 56	Accommodation and food services	35	3	32	32	0	3
58	Publishing services	4	1	3	3	0	1
59, 60	Motion picture, video and television programme production services, sound recording and music publishing; programming and broadcasting services	3	0	2	1	1	1
61	Telecommunications services	6	1	5	5	0	1
62, 63	Computer programming, consultancy and related services; information services	3	1	2	0	2	2
64	Financial services, except insurance and pension funding	4	1	3	3	0	1
65	Insurance, reinsurance and pension funding services, except compulsory social security	4	0	3	3	0	0
66	Services auxiliary to financial services and insurance services	0	0	0	0	0	0
68	Real estate services	24	0	24	24	0	0

69, 70	Legal and accounting services; services of head offices; management consulting services	2	1	0	0	0	3
71	Architectural and engineering services; technical testing and analysis services	3	1	2	0	2	2
72	Scientific research and development services	3	2	1	1	0	2
73	Advertising and market research services	0	0	0	0	0	1
74, 75	Other professional, scientific and technical services; veterinary services	1	1	1	1	0	1
77	Rental and leasing services	0	0	0	0	0	1
78	Employment services	0	0	0	0	0	0
79	Travel agency, tour operator and other reservation services and related services	0	0	0	0	0	0
80, 81, 82	Security and investigation services; services to buildings and landscape; office administrative, office support and other business support services	2	0	1	0	1	1
84	Public administration and defence services; compulsory social security services	29	0	28	28	0	0
85	Education services	11	0	11	11	0	0
86	Human health services	31	0	31	31	0	0
87, 88	Social work services	12	0	12	12	0	0
90, 91, 92	Creative, arts and entertainment services; library, archive, museum and other cultural services; gambling and betting services	4	0	3	3	0	0
93	Sporting services and amusement and recreation services	1	0	1	1	0	0
94	Services furnished by membership organisations	3	0	3	3	0	0
95	Repair services of computers and personal and household goods	0	0	0	0	0	0
96	Other personal services	7	0	7	7	0	0
97, 98	Services of households as employers; undifferentiated goods and services produced by households for own use	0	0	0	0	0	0
AZE 2030							
01.11.1-4, 01.12	Total	2.426	1.257	1.169	694	474	1.418
	Cereals (excl cerea straw and husk), rice	40	20	20	0	20	11
	Cereal straw and husk	0	0	0	0	0	0

01.11.6, 01.13 (excl. 01.13.5, 01.13.7)	Green leguminous vegetables, vegetables and melons (excl. edible roots and tubers and sugar beet)	4	1	3	3	0	3
01.11.7	Dried leguminous vegetables	0	0	0	0	0	0
01.11.8, 01.11.9, 01.26.1	Soya beans, groundnuts and cotton seed, other oil seeds	5	1	4	2	3	10
01.13.5	Edible roots and tubers with high starch or inulin content	14	3	11	11	0	1
01.13.7, 01.14	Sugar beet and sugar beet seed, sugar cane	1	0	1	0	1	0
01.15	Unmanufactured tobacco	1	0	0	0	0	1
01.16	Fibre crops	0	0	0	0	0	0
01.19.1, 01.11.5	Forage crops	1	1	0	0	0	0
	Grazed Biomass	0	0	0	0	0	0
01.2 (excl 01.25.3, 01.26.1, 01.27, 01.28. 10.29)	Fruits	9	1	8	8	0	6
01.19.2, 01.19.3, 01.25.3, 01.27, 01.28, 01.29, 01.3	Other crop products	3	1	2	2	0	3
01.41.1, 01.42	Dairy cattle, live other cattle and buffaloes, live and their semen	3	7	-4	0	-4	2
01.41.2	Raw milk from dairy cattle	11	0	11	11	-1	0
01.46	Swine, live	0	1	0	0	0	3
1.43, 01.44, 01.45, 01.49	Other animals and animal products, incl. hunting and trapping and related services	8	5	2	3	0	3
01.47.1	Poultry, live	1	1	0	0	0	0
01.47.2	Eggs, in shell, fresh	2	0	1	2	0	1
01.9	Farm manure and other agricultural waste products	0	0	0	0	0	0
01.6	Agricultural and animal husbandry services (except veterinary services)	0	0	0	0	0	0
02 excl. 02.20.14	Products of forestry, logging and related services excl. fuel wood	3	3	0	0	0	4
02.20.14	Fuel wood	10	0	10	10	0	0
03	Fish and other fishing products; aquaculture products; support services to fishing	1	1	0	0	0	1
05.1	Hard coal	2	2	0	0	0	39

05.2	Lignite	0	0	0	0	0	0
06.10.1	Petroleum oils and oils obtained from bituminous minerals, crude	1	1	0	0	0	82
06.10.2	Bituminous or oil shale and tar sands	0	0	0	0	0	0
06.2	Natural gas, liquefied or in gaseous state	41	23	17	21	-4	74
07.1	Iron ores	-10	0	-10	0	-10	44
07.21	Uranium and thorium ores	0	0	0	0	0	0
07.29.11	Copper ores and concentrates	12	2	10	0	10	30
07.29.12	Nickel ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.13	Aluminium ores and concentrates	-1	0	-1	0	-1	2
07.29.14.	Gold	4	0	4	0	4	5
a	Silver	0	0	0	0	0	0
07.29.14.	Platinum MG	0	0	0	0	0	0
b	Lead	0	0	0	0	0	2
07.29.15.	Zinc	0	0	0	0	0	2
c	Tin	0	0	0	0	0	0
07.29.19.	Tungsten ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
a	Tantalum ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19.	Magnesium ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
b	Titanium ores (Ilmenite) and concentrates	0	0	0	0	0	44
07.29.19.	Manganese ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
c	Chromium ores and concentrates	0	0	0	0	0	0
07.29.19.	Other ores and concentrates	1	1	0	0	0	5
d	Ornamental or building stone	0	0	0	0	0	0
08.11.1	Limestone and gypsum	-2	4	-6	0	-6	5
08.11.2	Chalk and uncalcined dolomite	1	1	0	0	0	1
08.11.3	Slate	0	0	0	0	0	0
08.11.4	Gravel and sand, excl. mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use	51	43	8	0	8	10
08.12.1, excl	Mixtures of slag and similar industrial waste products, whether or not incorporating pebbles, gravel, shingle and flint for construction use - recycling	0	0	0	0	0	0
08.12.13	Clays and kaolin	7	4	3	0	3	1

08.91	Chemical and fertiliser minerals	-7	2	-9	0	-9	2
08.93	Salt and pure sodium chloride; sea water	-3	4	-7	1	-8	3
08.92	Peat	2	2	0	0	0	2
08.99	Other mining and quarrying products nec	3	2	0	0	0	2
09	Mining support services	0	0	0	0	0	0
10.1	Preserved meat and meat products	99	29	70	66	4	18
10.2	Processed and preserved fish, crustaceans and molluscs	5	2	3	3	0	4
10.3	Processed and preserved fruit and vegetables	6	2	5	4	0	2
10.4	Vegetable and animal oils and fats	13	7	6	5	0	15
10.5	Dairy products	61	23	38	37	1	12
10.6	Grain mill products, starches and starch products	10	4	6	6	0	2
10.91	Prepared feeds for farm animals	4	2	3	2	1	1
10.92	Prepared pet foods	1	0	1	1	0	1
10.7, 10.8	Other food products	48	14	35	37	-3	13
11	Beverages	8	2	6	8	-2	1
12	Tobacco products	1	1	1	1	0	0
13	Textiles	8	5	2	2	0	4
14	Wearing apparel	7	3	4	4	0	5
15	Leather and related products	7	3	4	4	0	7
16	Wood and of products of wood and cork, except furniture; articles of st2nd l raw and plaiting	16	16	0	0	0	10
17.1	Pulp, paper and paperboard	21	20	1	0	1	21
17.2	Articles of paper and paperboard	11	7	4	4	-1	3
18	Printing and recording services	1	1	0	1	0	1
19.1	Coke oven products	2	2	0	0	0	14
19.2	Refined petroleum products	58	41	16	16	1	61
20.1, (exc.l 20.15, 20.16)	Basic chemicals, fertilisers and nitrogen compounds, plastics and synthetic rubber in excl. fertilisers and nitrogen compounds, excl. plastics in primary forms	106	103	3	2	1	56
20.15	Fertilisers and nitrogen compounds	16	13	3	4	-1	6
20.16	Plastics in primary forms	22	20	2	0	2	10
20.2	Pesticides and other agro-chemical products	3	3	0	0	0	1
20.3	Paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mastics	5	4	1	0	0	1

20.4	Soap and detergents, cleaning and polishing preparations, perfumes and toilet	9	5	3	4	-1	4
20.5 excl.							
20.59.59.	Other chemical products, excl. biofuels	15	13	2	1	2	8
903							
20.59.59.	Biofuels from agricultural biomass	2	2	0	0	0	1
903							
20.6	Man-made fibres	1	1	0	0	0	0
21	Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	44	34	10	15	-5	37
22.1	Rubber products	8	6	2	2	0	8
22.2	Plastic products	19	17	2	2	1	9
23.1	Glass and glass products	13	12	1	1	0	10
23.2	Refractory products	1	1	0	0	0	1
23.3	Clay building materials	2	2	0	0	0	4
23.4	Other porcelain and ceramic products	9	6	3	3	0	8
23.5	Cement, lime and plaster	33	25	8	2	7	3
23.6	Articles of concrete, cement and plaster	29	6	22	2	20	5
23.7	Cut, shaped and finished stone	1	0	0	0	0	1
23.9	Other non-metallic mineral products	35	32	3	3	1	16
24.1-3	Basic iron and steel and ferro-alloys (excl gases)	76	75	1	0	1	90
B-24.1-							
24.3	Blast Furnace Gas,	0	0	0	0	0	0
O-24.1-							
24.3	Oxygen Steel Furnace Gas	0	0	0	0	0	0
S-24.1-							
24.3	Slag	0	0	0	0	0	0
24.41.1,							
24.41.4,	Silver, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	13	14	-1	0	-1	17
24.41.5,							
24.41.9							
24.41.2	Gold, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	53	77	-24	0	-24	68
24.41.3	Platinum, unwrought or in semi-manufactured forms, or in powder form	13	17	-4	0	-4	20
24.42	Aluminium	25	17	8	0	8	35
24.43.11,							
24.43.21,	Lead	2	2	0	0	0	1
24.43.9							
24.43.12,							
24.43.22,	Zinc	3	3	0	0	0	9
24.43.23							
24.43.13,							
24.43.24	Tin	2	3	0	0	0	14
24.44	Copper	44	40	3	0	3	55

24.45.1,	Nickel, unwrought; intermediate products of nickel metallurgy	7	6	1	0	1	13
24.45.2,							
24.45.9							
24.45.3.a	Tungsten products	0	0	0	0	0	0
24.45.3.b	Tantalum products	1	1	0	0	0	1
24.45.3.c	Magnesium products	1	1	0	0	0	2
24.45.3.d	Titanium products	3	3	0	0	0	2
24.45.3.e	Manganese products	1	0	0	0	0	1
24.45.3.f	Chromium products	0	0	0	0	0	0
24.45.3.g	Other non-ferrous metal products	15	14	1	0	1	15
24.46	Processed nuclear fuel	0	0	0	0	0	0
24.51	Casting services of iron	1	0	0	0	0	1
24.52	Casting services of steel	0	0	0	0	0	0
24.53	Casting services of light metals	0	0	0	0	0	0
24.54	Casting services of other non-ferrous metals	-1	0	-1	0	-1	0
25.1	Structural metal products	9	6	3	1	2	3
25.2	Tanks, reservoirs and containers of metal	2	1	1	0	1	2
25.3	Steam generators, except central heating hot water boilers	0	0	0	0	0	0
25.5	Forging, pressing, stamping and roll-forming services of metal; powder metallurgy	2	0	2	0	2	0
25.6	Treatment and coating services of metals; machining	1	0	1	0	1	0
25.7	Cutlery, tools and general hardware	11	8	3	1	3	6
25.4, 25.9	Other fabricated metal products, incl weapons and ammunition	17	16	1	1	0	12
26.1-26.4	DV-Geräte, elektron. Bauelem. u. Erzeugn. f. Telekomm. u. Unterhaltg.	30	19	11	3	8	28
26.5-26.8	Mess-, Kontroll- u. ä. Instr. u. Einr., elektromed. Gerät., Datenträger	17	13	4	2	2	9
27	Electrical equipment	63	49	15	6	9	43
28	Machinery and equipment nec	85	65	21	1	20	11
29.10.1	Internal combustion engines of a kind used for motor vehicles	3	3	0	0	0	4
29.10.2 excl. 29102400 0	Passenger cars excl. electric and other engine	54	38	16	11	5	10
29102400 0	Passenger cars with electric and other engine	10	0	10	8	2	1
29.10.3	Motor vehicles for the transport of or more persons	0	0	0	0	0	0
29.10.4	Motor vehicles for the transport of goods	6	4	2	0	2	2

29.10.5	Special-purpose motor vehicles	1	1	0	0	0	0
29.2	Bodies (coachwork) for motor vehicles; trailers and semi-trailers	4	2	2	1	1	1
29.3	Parts and accessories for motor vehicles	21	19	2	1	1	13
30.1	Ships and boats	20	7	13	0	12	16
30.2	Railway locomotives and rolling stock	8	5	3	0	3	2
30.3	Air and spacecraft and related machinery	7	7	1	0	1	8
30.4, 30.9	Transport equipment nec, incl military fighting vehicles	0	0	0	0	0	0
31	Furniture	14	4	10	6	3	6
32.1	Jewellery, bijouterie and related articles	2	1	1	0	0	0
32.2	Musical instruments	0	0	0	0	0	0
32.3	Sports goods	1	1	0	0	0	1
32.4	Games and toys	2	1	1	1	0	2
32.5	Medical and dental instruments and supplies	6	3	3	1	2	1
32.9	Manufactured goods nec	2	1	1	1	0	1
33	Repair and installation services of machinery and equipment	5	1	4	0	4	0
35.1-A	Electrical energy	66	20	46	46	0	4
5510	Hydro power	0	0	0	0	0	0
5520	Wind power	0	0	0	0	0	0
5534	Solar photovoltaic	0	0	0	0	0	0
5535	Tide, Wave and Ocean	0	0	0	0	0	0
35.2 excl. Ta.	Manufactured gas; distribution services of gaseous fuels through mains, excl biogas from agricultural biomass	3	1	2	2	0	1
35.21.2	Biogas from agricultural biomass	0	0	0	0	0	0
35.3-A	Derived heat	5	0	5	5	0	0
5532	Solar thermal	0	0	0	0	0	0
5550	Geothermal Energy	0	0	0	0	0	0
36	Natural water; water treatment and supply services	1	0	1	3	-2	0
37, 39	Sewerage; remediation activities and other waste management services	4	0	3	2	1	0
38 others	Sewerage; waste collection, treatment and disposal activities; materials recovery; remediation activities and other waste management services, excl waste of metals, glass, paper, rubber, textile, wood and macadam, excl recycling	4	2	2	5	-3	3

38.32.39A	Other non-metal secondary raw materials - wood	0	0	0	0	0	1
38.32.32	Secondary raw material of paper and paperboard	0	0	0	0	0	1
38.32.33A	Secondary raw material of plastic mono-material	0	0	0	0	0	0
38.32.33B	Secondary raw material of plastic - non mono-material	0	0	0	0	0	0
38.32.22	Secondary raw material of ferrous metals	0	0	0	0	0	0
38.32.23	Secondary raw material of copper	0	0	0	0	0	0
38.32.25	Secondary raw material of aluminium	0	0	0	0	0	0
38.32.2B, 38.32.39B	Other metal and non-metal secondary raw materials - other	0	0	0	0	0	0
38.32.39C	Other non-metal secondary raw materials -used for high building	0	0	0	0	0	0
38.32.39D	Other non-metal secondary raw materials -used for traffic infrastructure	0	0	0	0	0	0
38.21.23A	Energetic use of waste - incineration of wood and other biomass	0	0	0	0	0	0
38.21.23B	Energetic use of waste - biofuels	0	0	0	0	0	0
38.21.23C	Energetic use of waste - biogas	0	0	0	0	0	0
38.21.23D	Energetic use of waste - landfill gas	0	0	0	0	0	0
38.21.23E	Energetic use of waste - sewage sludge gas	0	0	0	0	0	0
38.21.23F	Energetic use of waste - incineration of municipal waste	0	0	0	0	0	0
38.21.23G	Energetic use of waste - incineration of industrial waste	0	0	0	0	0	0
41.00.1, 41.00.3	Residential buildings	143	0	143	0	143	0
41.00.2, 41.00.4	Non-residential buildings	108	0	108	0	108	0
42.11	Roads and motorways; construction works for roads and motorways	43	0	43	0	43	0
42.12	Railways and underground railways; construction works for railways and underground	14	0	14	0	14	0
42.13	Bridges and tunnels; construction works for bridges and tunnels	3	0	3	0	3	0
42.21	Constructions and construction works for utility projects for fluids	13	0	13	0	13	0

42.22A	Constructions and construction works for utility projects for electricity and telecommunications, excl. power plants	2	0	2	0	2	0
42.22B	Power plants excl. Wind	0	0	0	0	0	0
42.22C	Wind power plants	1	0	1	0	1	0
42.91	Constructions and construction works for water projects	4	0	4	0	4	0
42.99	Constructions and construction works for other civil engineering projects nec	0	0	0	0	0	0
43.1	Demolition and site preparation works	0	0	0	0	0	0
43.21	Electrical installation works	10	0	10	1	10	0
43.22	Plumbing, heat and air-conditioning installation works	5	0	5	0	5	0
43.29.11	Insulation works	9	0	9	0	9	0
43.29 excl. 43.29.11	Other construction installation works, excl. insulation works	0	0	0	0	0	0
43.31	Plastering works	1	0	1	0	1	0
43.32	Joinery installation works	2	0	2	0	2	0
43.33	Floor and wall covering works	1	0	1	0	1	0
43.34	Painting and glazing works	1	0	1	0	1	0
43.39	Other building completion and finishing works	2	0	2	0	2	0
43.91	Roofing works	1	0	1	0	1	0
43.99	Other specialised construction works nec	1	0	1	0	1	0
45	Wholesale and retail trade and repair services of motor vehicles and motorcycles	8	0	8	7	1	0
46	Wholesale trade services, except of motor vehicles and motorcycles	20	12	8	5	3	2
47	Retail trade services, except of motor vehicles and motorcycles	24	0	24	24	0	0
49.1	Passenger rail transport services, interurban	6	0	6	7	-1	1
49.2	Freight rail transport services	3	1	2	2	0	9
49.3A	Other passenger land transport services - individual transport - private households - conventional	25	0	25	25	0	0
49.3B	Other passenger land transport services - individual transport - private households - electrical etc.	12	0	12	12	0	0
49.3C	Other passenger land transport services - individual own account transport - enterprises - conventional	0	0	0	0	0	0

49.3D	Other passenger land transport services - individual own account transport enterprises - electrical etc.	0	0	0	0	0	0
49.3E	Other passenger land transport services - public (bus, taxi, light rail vehicles)	4	0	4	3	0	0
49.4A	Freight transport services by road and removal services - heavy vehicles - transport for third account	1	1	0	0	0	26
49.4B	Freight transport services by road and removal services - heavy vehicles - transport for own account	0	0	0	0	0	0
49.4C	Freight transport services by road and removal services - light vehicles - transport for own account	1	0	1	1	0	0
49.4D	Transport services by special vehicles - transport for own account	0	0	0	0	0	0
49.5	Transport services via pipeline	0	0	0	0	0	0
49.2XA	International transport of imported goods - rail - bulk goods	0	0	0	0	0	0
49.2XB	International transport of imported goods - Bahn - average goods	0	0	0	0	0	0
49.2XC	International transport of imported goods - rail - light goods	0	0	0	0	0	0
49.4XA	International transport of imported goods- road - bulk goods	0	0	0	0	0	0
49.4XB	International transport of imported goods- road - average goods	0	0	0	0	0	0
49.4XC	International transport of imported goods - road - light goods	0	0	0	0	0	0
49.4YA	International transport of imported goods to sea port - bulk goods	0	0	0	0	0	1
49.4YB	International transport of imported goods to sea port - average goods	0	0	0	0	0	0
49.4YC	International transport of imported goods to sea port - light goods	0	0	0	0	0	0
49.5XA	International transport of imported goods - pipeline - gas	0	0	0	0	0	3
49.5XB	International transport of imported goods - pipeline - mineral oil and mineral oil products	0	0	0	0	0	0
50.1	Sea and coastal passenger water transport services	0	0	0	0	0	0
50.2	Sea and coastal freight water transport services	19	19	0	0	0	13

50.2XA	International transport of imported goods- seagoing vessel - bulk goods	0	0	0	0	0	0
50.2XB	International transport of imported goods- seagoing vessel - average goods	0	0	0	0	0	0
50.2XC	International transport of imported goods- seagoing vessel - Voluminose Güter	0	0	0	0	0	0
50.3	Inland passenger water transport services	0	0	0	0	0	0
50.4	Inland freight water transport services	0	0	0	0	0	1
51.1	Passenger air transport services	23	4	19	19	0	15
51.2	Freight air transport and space transport services	3	3	0	0	0	1
51.2X	International transport of imported goods- air	0	0	0	0	0	1
52	Warehousing and support services for transportation	4	2	2	2	0	4
53	Postal and courier services	1	0	0	0	0	0
55, 56	Accommodation and food services	37	3	34	34	0	3
58	Publishing services	3	1	2	2	0	0
59, 60	Motion picture, video and television programme production services, sound recording and music publishing; programming and broadcasting services	2	0	2	1	0	1
61	Telecommunications services	4	0	4	4	0	0
62, 63	Computer programming, consultancy and related services; information services	3	1	2	0	2	1
64	Financial services, except insurance and pension funding	3	1	2	2	0	0
65	Insurance, reinsurance and pension funding services, except compulsory social security	3	0	3	3	0	0
66	Services auxiliary to financial services and insurance services	0	0	0	0	0	0
68	Real estate services	23	0	22	22	0	0
69, 70	Legal and accounting services; services of head offices; management consulting services	2	1	0	0	0	2
71	Architectural and engineering services; technical testing and analysis services	2	1	1	0	1	1
72	Scientific research and development services	3	2	0	0	0	2
73	Advertising and market research services	0	0	0	0	0	1

74, 75	Other professional, scientific and technical services; veterinary services	1	1	1	1	0	1
77	Rental and leasing services	0	0	0	0	0	0
78	Employment services	0	0	0	0	0	0
79	Travel agency, tour operator and other reservation services and related services	0	0	0	0	0	0
80, 81, 82	Security and investigation services; services to buildings and landscape; office administrative, office support and other business support services	1	0	1	0	0	1
84	Public administration and defence services; compulsory social security services	26	0	26	26	0	0
85	Education services	10	0	10	10	0	0
86	Human health services	30	0	30	30	0	0
87, 88	Social work services	12	0	12	11	0	0
90, 91, 92	Creative, arts and entertainment services; library, archive, museum and other cultural services; gambling and betting services	3	0	3	3	0	0
93	Sporting services and amusement and recreation services	1	0	1	1	0	0
94	Services furnished by membership organisations	2	0	2	2	0	0
95	Repair services of computers and personal and household goods	0	0	0	0	0	0
96	Other personal services	6	0	6	6	0	0
97, 98	Services of households as employers; undifferentiated goods and services produced by households for own use	0	0	0	0	0	0