

DOKUMENTATION

03/2026

Abschlussbericht

Brandereignisse und Relevanz fossiler Brandgüter (CO₂) in der Quellkategorie 5E

von:

Jan Reichenbach

INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management,
Dresden

Herausgeber:

Umweltbundesamt

DOKUMENTATION 03/2026

Projektnr. 201844

FB002053

Abschlussbericht

Brandereignisse und Relevanz fossiler Brandgüter (CO₂) in der Quellkategorie 5E

von

Jan Reichenbach

INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives
Management, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management
Pohlandstraße 17
01309 Dresden

Abschlussdatum:

Februar 2026

Redaktion:

Fachgebiet V 1.6: Emissions- und Klimaschutzberichterstattung
Robert Kludt

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8339>

ISSN 2199-6571

Dessau-Roßlau, April 2026

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

Kurzbeschreibung: Brandereignisse und Relevanz fossiler Brandgüter (CO₂)

Das Umweltbundesamt erstellt in der Sektorendefinition nach Klimaschutzgesetz und nach Kategorien der Klimarahmenkonvention UNFCCC sogenannte Inventare über Treibhausgasemissionen. Eine hierfür beauftragte Untersuchung durch Sachverständige befasste sich für die Kennung CRF 5.E –übrige Emissionen– dabei mit Brandereignissen in drei verschiedenen Segmenten (Wohngebäude, Personenkraftwagen und Abfallcontainer). Zusammengefasst werden die dabei ermittelten Ergebnisse, welche insbesondere durch materialdifferenziert ausgewiesene Brandlasten die Berechnungsgrundlage für Kohlendioxidemissionen liefern.

Bei Gebäuden beträgt die emissionsrelevante Gesamtbrandmasse je Brandereignisfall zwischen 11,1 t für Ein- und 50,3 t für Mehrfamilienhäuser. Der fossile Brandmasseanteil steigt hierbei über die Gebäudekategorien vor allem durch den Beitrag der Wohnungsinventare von 17 % auf 32 % an, umgelegt auf die Wohnfläche bewegt er sich dabei zwischen 20 kg bzw. rund 14 kg/m². Mit rund 0,42 t an Brandmasse, die aber zu 80 % fossilen Ursprungs sind, schlägt das Brandereignis eines etwa 1,4 t schweren Personenkraftwagens zu Buche. Bei Abfallcontainern in der 1.100 Liter-Ausführung sorgen knapp 60 % der als emissionsrelevant ermittelten Brandmasse von 105 kg für Emissionen, die in fossilen Quellen gründen. Den Hauptbeitrag an fossiler Brandmasse liefert mit 78 % Anteil dabei der Behälterkorpus aus Kunststoff.

Abstract: Fire incidents and relevance of the affected materials' fossil content (CO₂)

The German Environment Agency acts as the responsible institution for inventories of greenhouse gas emissions that are eventually compiled and reported in accordance with the sector definition under the Climate Protection Act and the categories of the UNFCCC. In a study commissioned to close data gaps existing for the CRF 5.E identifier –other emissions–, the fire incidents in three different segments (residential buildings, passenger cars and waste containers) were investigated. The results summarized from this report show which types and quantities of different materials such incidents actually involve, thus forming the basis for calculating carbon dioxide emissions.

For buildings, the total mass of materials relevant to emissions has been determined with 11.1 t per each fire incident of a single-family house and 50.3 t for a multi-storey home. Within this range, the proportion of the fossil material mass increases across the building categories, primarily due to the contribution of home furnishings, from 17 % to 32 %, relative to living space this is a range between 20 kg and approximately 14 kg per m².

The fire of a passenger car of about 1.4 t in weight was found to result in a fire-ravaged material mass of around 0,42 t, 80 % of which is of fossil origin.

For a 1,100-litre waste container with its approx. 105 kg determined as the mass relevant to emissions in a fire incident, nearly 60% is attributable to fossil sources. The main contribution to the fossil share comes with 78 % from the container's plastic body.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	10
Summary	13
1 Studienhintergrund	16
1.1 Anlass der Studie.....	16
1.2 Auftrag und Ziele der Studie	16
2 Ausrichtung von Untersuchungsrahmen und -vorgehen	17
2.1 Allgemeine Einführung.....	17
2.2 Einführung zu den Betrachtungssegmenten.....	19
2.2.1 Betrachtungssegment Gebäude	19
2.2.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge	20
2.2.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer	21
3 Elemente der weiteren Umsetzung	23
3.1 Herleitung der Brandmassen	23
3.1.1 Betrachtungssegment Gebäude	23
3.1.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge	29
3.1.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer	32
4 Ergebniszusammenfassung	38
4.1 Emissionsrelevante Brandmassen und Anteil ‘fossil’.....	38
4.1.1 Betrachtungssegment Gebäude	38
4.1.1.1 Ergebniswerte	38
4.1.1.2 Ergebniseinschätzung und Lücken.....	39
4.1.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge	41
4.1.2.1 Ergebniswerte	41
4.1.2.2 Ergebniseinschätzung und Lücken.....	43
4.1.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer	45
4.1.3.1 Ergebniswerte	45
4.1.3.2 Ergebniseinschätzung und Lücken.....	47
5 Veränderungsdynamiken und Fortschreibbarkeit	48
5.1 Erforderlichkeit der Betrachtung	48
5.2 Weitere Aspekte der Brandmasseveränderung und Datenfortschreibung.....	48

5.2.1	Betrachtungssegment Gebäude	48
5.2.2	Betrachtungssegment Fahrzeuge	51
5.2.3	Betrachtungssegment Abfallcontainer	52
6	Quellenverzeichnis	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Alters- und Gewichtsentwicklung des PKW-Bestandes in Deutschland.....	20
Abbildung 2:	Modellierungsbausteine und deren Zusammenführung zur Herleitung der Brandmassenwerte für die Brandereignisfälle in verschiedenen Gebäudekategorien	29
Abbildung 3:	Verknüpfung von Gebäudenutzung und vermutlichem Objekt der Brandentstehung in absoluter Anzahl nach Datenlage zur vfdb- Brandschadenstatistik	33
Abbildung 4:	Der Herleitung der Brandmassenwerte bei Brandereignisfällen in Abfallcontainern MGB1.1 zugrunde gelegter Modellierungsansatz für den Behälterinhalt	35
Abbildung 5:	Bei der Brandmasseermittlung angesetzter Verteilschlüssel für die Anteile am Abfallinhalt aus verschiedenen Erfassungssystemen.....	36
Abbildung 6:	Wertebeispiel zum veränderlichen Materialbild beim Automobilbau in verschiedenen Zeitfenstern.....	44
Abbildung 7:	Beispiel der Veränderungsdynamik im Materialmix (der Brandmasse) des Gebäudekorpus entlang des Bauwerksalters.....	49
Abbildung 8:	Dynamik des Holzbaugeschehens im letzten Jahrzehnt und gebäudeartbezogen	50
Abbildung 9:	Regionalität des Holzbaugeschehens.....	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht zu den einer Wohnung zugehörigen und als deren Inhalt berücksichtigten Inventarbausteinen (die als separate Arbeitsblätter angelegt wurden)	25
Tabelle 2:	Auf den Gebäudekorpus zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien [in Tonnen]	38
Tabelle 3:	Auf das Gebäudeinventar zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien [in Tonnen]	38
Tabelle 4:	Emissionsrelevante Gesamtbrandmasse in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]	39
Tabelle 5:	Emissionsrelevante Brandmassen der Fahrzeugkarosse pro Brandfallereignis in der betrachteten Fahrzeugkategorie [in Tonnen]	41
Tabelle 6:	Auf das Bordinventar zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in der betrachteten Fahrzeugkategorie [in Tonnen]	42

Tabelle 7:	Emissionsrelevante Gesamtbrandmassen eines Kraftfahrzeuges differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]	42
Tabelle 8:	Auf den Abfallbehälterkorpus zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 [in Tonnen].....	45
Tabelle 9:	Auf den Abfallbehälterinhalt zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 [in Tonnen].....	45
Tabelle 10:	Emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]	46

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BHMA	bundesweite Hausmüllanalyse(n)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CRT	common reporting tables
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
Destatis	Statistisches Bundesamt
EFH	Einfamilienhaus bzw. -häuser
EPD	Environmental Product Declaration
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
HDPE	High-Density Polyethylen
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
ISBE	Informationssystem Gebaute Umwelt
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
kg	Gewichtseinheit Kilogramm (=1.000 Gramm)
KOM	im Zusammenhang mit innerhalb der EU standardisierten Tabellen- und Meldeformaten hier abkürzend für Europäische <u>Kommission</u> stehend
KSG	Bundesklimaschutzgesetz
LVP	(Abfallsammelfraktion) Leichtverpackungen
M1/N1	Kategorisierungsindex beim Kraftfahrt-Bundesamt für Fahrzeuge der Kategorien Personenkraftwagen (mit maximal 8 Sitzplätzen) und leichte Nutzfahrzeuge
MFH	Mehrfamilienhaus bzw. -häuser
MGB1.1	Müllgroßbehälter 1.100 Liter
o.g.	oben genannt(e)
PPK	(Abfallsammelfraktion) Papier, Pappe und Kartonagen
PKW	Personenkraftwagen
RAbf	(Abfallsammelfraktion) Haushaltsrestabfälle
SGB	Deutsches Sozialgesetzbuch
t	Gewichtseinheit Tonne (=1.000 Kilogramm)
UBA	Umweltbundesamt
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
ZFH	Zweifamilienhaus bzw. -häuser

Zusammenfassung

Deutschland ist unter der Klimarahmenkonvention und dem Paris-Abkommen verpflichtet, mittels tabellarischer Daten und im Rahmen eines Inventarberichtes jährlich über seine nationalen Treibhausgasemissionen zu berichten. Bestandteil dieser Berichtspflichten sind innerhalb der CRT-Quellkategorie 5E auch Emissionen aus unbeabsichtigten Bränden. Das Umweltbundesamt beauftragte die INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management aus dem Spektrum an Brandereignisfeldern die Relevanz fossiler Brandgüter bei Gebäuden mit der Eingrenzung auf Wohngebäude, Personenkraftwagen sowie Abfallsammelcontainer zu ermitteln. Ursprünglich war für alle Betrachtungssegmente angedacht worden, die Ermittlung der Daten zur Brandmasse aus der Abfallperspektive vornehmen zu lassen. Nach einvernehmlicher Feststellung, dass dies nicht in allen Fällen eine sachgerechte Bilanzierung sicherstellt, wurden alternative Ansätze für die Modellierung der Brandmassen und notwendige Datengewinnung herangezogen.

Die Auftaktbesprechung zur Studie führten die Forschungsnehmerin und UBA-Fachbegleitung Anfang September 2025 durch. Im gleichen Kreis erfolgte im Oktober 2025 die Erörterung der Modellierungsansätze, dazu heranziehbaren Datenquellen und hieraus erwartbaren Ergebnisse. Zum Austausch über die ermittelten Brandmassewerte für die einzelnen Betrachtungssegmente kam es in Arbeitssitzungen, die zwischen November 2025 und Januar 2026 abgehalten wurden.

Für das Betrachtungssegment Wohngebäude erfolgte die Untersuchung in der Differenzierung der Gebäudekategorien Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser. Unter Heranziehung von Werten zur bundesdeutschen Wohnstatistik wurde bei Mehrfamilienhäusern außerdem noch zwischen Gebäuden mit drei unterschiedlichen Geschosshöhen und Gesamtwohnungszahlen unterschieden. Hinsichtlich ihres im Gebäudekorpus enthaltenen Materialvorrats wurden die Gebäude mithilfe des IÖR-Informationssystems zur gebauten Umwelt modelliert. Für die Gebäudeinventare bildeten Flächenkennzahlen und Bewohnerwerte aus den Zensuserhebungen und Statistikfundus von Destatis die Basis für Wohnungsmodelle. Zu diesen wurden entsprechende raum- und personenbezogene Ausstattungen modelliert, wofür u.a. auf Daten aus der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, den laufenden Wirtschaftsrechnungen und Bemessungsstandards nach Sozialgesetzbuch zurückgegriffen wurde. Für die Ausstattungen wurden anschließend Gewichts- und Materialkennziffern erhoben und, ebenso wie die Materialkennziffern zum Gebäudekorpus, unter Gesichtspunkten zur Brennbarkeit und Emissionsrelevanz bewertet und zu Brandmassewerten aggregiert.

Über die Zusammenführung der Werte zu Gebäudekorpus und -inventaren entsprechend der Modellierungen zu den einzelnen Gebäudekategorien konnten die für den Brandereignisfall emissionsrelevanten Gesamtbrandmassen ausgewiesen und hinsichtlich der für Emissionen fossilen Ursprungs maßgeblichen Anteile berechnet werden. Ein auf alle Betrachtungssegmente zutreffendes, generisch somit übertragbares und mit Wertparametern zu fossilen und nichtfossilen Anteilen hinterlegtes Schema an Materialgruppen wurde hierfür zur Grundlage genommen.

Die zum Betrachtungssegment Wohngebäude im Brandereignisfall als emissionsrelevant ermittelten Gesamtbrandmassen reichen von rund 11,1 t für den Brandereignisfall eines Einfamilienhauses bis zu 50,3 t bei einem 6-geschossigen Mehrfamilienhaus. Dabei liegt der Anteil an Brandmasse, welcher der Emissionskategorie 'fossil' zurechenbar ist, bei 17 % bzw. 32 %, auf die Wohnfläche bezogen bewegt er sich dabei zwischen 20 kg bzw. rund 14 kg/m². Die Veränderungen kommen dem Modellansatz nach insbesondere über die Wohnungsinventare zustande. Die jeweils überwiegenden Beiträge liefert die Materialgruppe Kunststoffe, gefolgt von

der Materialgruppe Textilien, die somit für fossile Brandgüter über die höchste Relevanz verfügen.

Bei Personenkraftwagen veranlasst das über die Jahrzehnte in Deutschland gestiegene mittlere Zulassungsgewicht eine jahrgangsdifferenzierte Betrachtung. Hierfür können Werte der beim Kraftfahrt-Bundesamt geführten Statistik und jener von Destatis zur Altfahrzeugverwertung herangezogen werden, die wegen des zeitlichen Versatzes von Zulassungs-, Verschrottungs- und Brandfalleintritt jedoch miteinander verschnitten werden müssen. Sich dabei ergebende Massedifferenzen bedürfen der Auffüllung, ohne dass eine genaue Informationsbasis vorliegt, was die betroffenen Materialanteile angeht. Demgegenüber lassen auch die aus Demontage und Fahrzeugteilverwertung in Zerlegbetrieben und Schredderanlagen vorliegenden abfallstatistischen Daten nur eingeschränkt konkrete Rückschlüsse auf die materielle Beschaffenheit der Fahrzeuge zu. Zudem geht auch mit diesen Statistiken der Hinweis auf nicht aufklärbare Masseverluste einher.

Der für die Brandmasseermittlung hieraus abgeleitete Kompromiss bestand in einer Interpolation mit den Abfallstatistikdaten und ergänzend dazu getroffenen Annahmen zur Materialverteilung in Fahrzeugkarosse, Bauteilkomponenten und sonstigem Bordinventar während der Fahrzeugbetriebsphase als Hauptgrundlagen. Hierbei flossen, neben teils sehr detailgenauen Hersteller- und Studienaussagen zu Fahrzeugeinzelkomponenten (wie bspw. Autoreifen), quasi als Leitplanken auch allgemein zum Fahrzeugbau kommunizierte grobgefasste Materialproportionen mit ein. Mit der abfallstatistischen Wertbasis als gewählten Ausgangspunkt ergab dieses Vorgehen entlang der generischen Materialgruppendifferenzierung schlussendlich Brandmassen, die in Orientierung an den Kennzahlen des Fahrzeugbaus lediglich bei der Materialgruppe Kunststoffe noch Auffüllbedarf offenlegten. Angesichts des nicht unerheblichen Auffüllbetrages und der mit den gröberen (und selbst längere Zeitstrecken überstreichenden) Materialverteilungsschlüsseln des Fahrzeugbaus ebenso ausreichend gut erreichbaren Annäherung an das erhaltene Brandmasseergebnis erscheinen komplexere Modellierungs- bzw. Interpolationsansätze zu diesem Betrachtungssegment in der Nachbetrachtung nur bedingt zielwirksamer und notwendig.

Im Hinblick auf die jahrgangsdifferenzierte Betrachtungsnotwendigkeit wurde die Relevanz fossiler Brandgüter im Segment Personenkraftwagen mit einem für das Referenzjahr 2020 betrachteten Brandereignisfall bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt lag das mittlere Alter des PKW-Bestandes in Deutschland bei etwa 10 Jahren und das somit zur Berücksichtigung gebrachte durchschnittliche Fahrzeugzulassungsgewicht bei etwas über 1,4 t. Darauf bezugnehmend bewegt sich die ermittelte Brandmasse bei rund 0,42 t, die zu 80 % in fossilen Materialanteilen gründen. Der Beitrag der Materialgruppe Kunststoffe beläuft sich daran auf Zweidrittel und hat somit die höchste Relevanz.

Ein beim Brandereigniseintritt praktisch sicher voraussetzbarer und für das Brandgeschehen dann relevanter (wenn nicht sogar ursächlicher) Betankungsinhalt ist vor dem Hintergrund des Doppelanrechnungsrisikos im Zuge der Gesamtinventaraufstellung nicht in die Brandmasse zum Betrachtungssegment Personenkraftwagen eingeflossen.

Im Ergebnis der Untersuchung zum Betrachtungssegment Abfallcontainern stellen auch hier die Kunststoffe die meistrelevante Materialgruppe in Bezug auf fossile Brandgüter dar. Als Bezugsgröße ist für den Brandereignisfall in diesem Betrachtungssegment ein Sammelbehälter der Standardausführung MGB1.1 mit 1.100 l Abfallaufnahmefähigkeit zugrunde gelegt.

Die Anwendung der Abfallperspektive für die Brandmasseermittlung war durch das Brandobjekt unmittelbar vorgegeben bzw. zwangsläufig. Allerdings galt es für ein Ergebnis möglichst nah der Realität, zu ermitteln, wie sich das Brandgeschehen über die in Deutschland

praktizierten Abfallerfassungssysteme verteilt, um daraus auf den im Brandfall betroffenen Behälterinhalt zu schließen. Da in der Praxis mit MGB1.1 ausgestattete Erfassungssysteme für verschiedene Abfallströme existieren und von Brandereignissen erfasst werden, musste auf Grundlage der Erkenntnislage zur Brandverteilung ein mit Inhalten aus diesen Erfassungssystemen anteilig befüllter ‘synthetischer’ Abfallbehälter modelliert werden.

Die materielle Zusammensetzung der verschiedenen Inhaltsanteile wurde auf Basis von Abfallanalysedaten für in den jeweiligen Erfassungssystemen eingesetzte MGB1.1 ermittelt. Aus den dafür herangezogenen Protokollwerten der unterschiedlichen Gebietsbeprobungen ergaben sich ein mittlerer Gewichtswert sowie eine Befüllgrad des den Brandereignisfall repräsentierenden Behälters mit Abfall bei etwa Dreiviertel des Gesamtaufnahmevervolumens. Allerdings blieb der, über verschiedene Initiativen (u.a. auch Befragungen von Feuerwehren und Entsorgungsträgern) angestrebte empirische Informationsgewinn zum Brandverteilungsschema hinter den Erwartungen zurück, so dass diesbezüglich stark annahmefasert gearbeitet werden musste.

In Analogie des für alle Betrachtungssegmente angewandten Vorgehens wurden die so zum modellierten Abfallbehälter ermittelten Masseanteile verschiedener Materialien am Abfallinhalt ebenfalls wieder hinsichtlich der Brennbarkeit und Emissionsrelevanz bewertet und zu Brandmassewerten aggregiert. Als im Brandereignisfall hier stets markant mitbetroffener Teil des Brandobjektes war der Behälterkorpus dabei unbedingt mit zu berücksichtigen. Da dieser inzwischen im Regelfall aus Vollkunststoff besteht und so in die Modellrechnung einbezogen wurde, ergibt sich gerade hieraus eine erhebliche Brandmasserelevanz, besonders auch für die Emissionen fossilen Ursprungs.

Insgesamt wird für den Brandereignisfall MGB1.1 eine emissionsrelevante Brandmasse von ca. 105 kg ermittelt, der auf die Emissionskategorie fossil anrechenbare Anteil liegt hierbei bei knapp 60 %. Ungefähr 48 kg dieses Anteils und damit gut 78 % des Beitrages zur Emissionskategorie ‘fossil’ entstammen dem Behälterkorpus.

Die für jedes Betrachtungssegment mehr oder weniger scharf auf einen bestimmten Zeitpunkt fokussierende bzw. aufsetzende Brandmasseermittlung ist darüber hinaus mit Informationen über in der Vergangenheit eingetretene oder zukünftige Veränderungsdynamiken an der Brandmassezusammensetzung unterlegt. Beispielhaft dafür anbringen lassen sich der bereits in den 1990-er Jahren umfänglich vollzogene Wechsel bei Abfallbehältern von Stahlblech- zu Kunststoffkonstruktionen oder die mit Durchbruch der Elektromobilität zukünftig erwartbaren Materialverschiebungen im Fahrzeugbau. Da nicht Kernpunkte des Vorhabens bildend, gelangten entsprechende hinweisgebende Kennwerte und Vergleichsrechnungen insbesondere zusammen mit den zur Brandmasseherleitung erstellten Tabellen an das Umweltbundesamt zur Übergabe.

Im vorliegenden Bericht wird mit Kurzaussagen darauf eingegangen. Ebenso werden Datenunsicherheiten, -lücken und andere, die Größenordnung und Aussagegenauigkeit der Brandmassewerte beeinflussende und relativierende Aspekte in dieser Form thematisiert. Es kommen zusätzliche Bedarfe an Forschung und möglicher Nachjustierung ebenso zur Hervorhebung wie dabei bestehende Grenzen sowie Beschränkungen für den Erhalt komplett realer Brandmassegrößenordnungen.

Summary

Pursuant to the Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement, Germany reports annually its national greenhouse gas emissions in tables and as part of an inventory document. Emissions from unintentional fires are also included in this reporting obligation within CRT source category 5E. The German Environment Agency (UBA) sought here the support from an expert body and commissioned the INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management to establish the relevance of material of fossil origin, limiting the scope to fire incidents in the segment of residential buildings, passenger cars, and waste collection containers. Whilst the original idea had been to determine the affected material quantities for all segments from a waste perspective, it was agreed later on that this would not ensure an appropriate and sufficiently accurate allocation in all cases. Alternative approaches were consequently developed and applied for modeling the fire-ravaged masses and obtaining the necessary data.

The study kicked off with a talk by the research team and UBA technical supervisor held beginning of September 2025. The same circle of persons discussed the modeling approaches, available data sources and therewith achievable results in October of the same year. The values eventually obtained in the individual segments on the fire-stricken material masses were discussed in further working meetings scheduled between November 2025 and January 2026.

In the segment of residential buildings, the study distinguished between single-family, two-family and multi-dwelling resp. multi-storey houses. Drawing from data of the German housing statistics, multi-storey houses were further differentiated between three building types with different floor and total apartment numbers. All buildings were modeled with regard to the material stock contained in the building corpus using the information system for the built environment of IOER. For the apartment's material stock, floorsize parameter and resident numbers from the German Zensus-survey and statistics database of Destatis gave the modeling framework. Corresponding room- and person-related furnishings were derived, adopting data from the 'Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (income and consumption sample)', the 'Laufende Wirtschaftsrechnung (current economic accounts)', and assessment standards according to the Social Security Law as further sources. Weight and material indices were then collected for the furnishings and, like the material indices for the building structure, evaluated in terms of combustibility and emission relevance and finally amalgamated to receive fire-stricken material masses.

By combining the values for building corpus and the apartment's interior material stock along the individual building models, it was possible to determine the total material masses relevant to emissions in the event of a fire and to draw up the proportions relevant to emissions of fossil origin. A scheme of predefined material groups applicable to and generically transferable for all segments under consideration, combined with value parameters for their fossil and non-fossil content share was used here as the basis.

The total material masses found to be relevant for emissions in the event of fire in the residential building segment starts from around 11.1 tons for a single-family home and reaches 50.3 tons for a six-story apartment building. Within this range, the mass proportion attributable to the emission category 'fossil' is rising from 17 % to 32 %, relative to living space the amount is between 20 kg and approximately 14 kg per m², however. According to the applied model, these changes are mainly due to the growth in the apartment's interior material stock. The largest contributions come from the material group 'plastics', followed by the material group 'textiles', which are therefore the most relevant ones as fossil content of the fire-stricken material mass is concerned.

In the segment of passenger cars, the increase seen in the average vehicle weight in Germany over time necessitates a differentiated analysis by year of registration or within time slots. Data from the statistics maintained by the Kraftfahrt-Bundesamt (Federal Motor Transport Authority) and those from Destatis on the disposal of end-of-life vehicles can be used for this purpose, but they had to be blended together due to the time gap that lies between the date of registration, scrapping, and occurrence of the fire incident. Any thereover resulting differences in mass must be assessed without an accurate information base regarding the material proportions involved. On the other hand, the waste statistics data covering the disassembly and car part recycling operations carried out from dismantling and shredding facilities also allow only limited conclusions as to the vehicles' concrete material composition. In addition, these statistics also indicate unexplained mass differences vis à vis the weight of the cars at the time of registration and handover for disposal.

The compromise followed here for determining the fire-stricken material mass comprised an interpolation taking waste statistics data and supplementary assumptions made about material content in the vehicle body, component parts and other equipment found aboard a passenger car during the operating phase as the principal basis. In addition to highly detailed manufacturer and study statements on individual vehicle components (such as the tires), this also considered coarse material proportions communicated in general terms for vehicle construction as guiding values. Drawing upon the waste statistics data as the selected starting point, this ultimately resulted in mass values for the generic material group differentiation, which, based on the guard rail set by vehicle construction values, revealed a greater deficit only in the plastics material group. The need to fill a weight gap of significant size, and the otherwise sufficiently good approximation obtained with less differentiated (and even for longer timespans available) material indices from vehicle construction showed, in retrospect, that more complex modelling or interpolation to this segment appear to be of limited effectiveness and necessity. The attempt made embodied an element that is good in terms of its verification function for the calculated fire-stricken material mass, however, rather dispensable from the point of view of its future or retroactive updating, especially since other aspects impact on an accurate estimate must be also taken into account.

In view of the need to adopt a rather strict time- respectively age-dependent perspective for the material mass calculation in the passenger car segment, the relevance of fossil content was derived setting 2020 as the reference year for the fire incident. At that time, the average age of the passenger car fleet in Germany was around ten years and the average vehicle weight at the corresponding registration date slightly above 1.4 tons. Taking this as the basis, the fire-stricken material mass gets calculated with around 0.42 tons, 80 % of which is attributable to fossil materials. The contribution of the plastics material group amounts to two-thirds of this and is therefore the most relevant one.

Against the backdrop of a double counting risk in the course of the overall inventory mechanism, fuel quantities that can be assumed with high certainty aboard a car at the time of the fire incident and are then relevant (if not causal) for the burning have not been included in the calculation for the passenger car segment.

The investigation done for the waste container segment came to the result that also here plastics are the most relevant material group in terms of fossil content of the fire-stricken material mass. The reference for the fire incident in this segment is set by a standard waste container MGB 1.1 with a waste capacity of 1,100 litres.

Applying the waste perspective for determining the fire-stricken material mass was basically predetermined if not inevitable due to the object of the fire. However, in order to obtain a result

as close to reality as possible, it was important to find out how fire incidents are distributed across the existing waste collection systems in order to draw conclusions about the type of waste content affected by a container fire. Since, in practice, collection systems equipped with MGB 1.1 exist for a number of different waste streams and fires can hit any of them, a 'synthetic' waste container filled proportionally with waste from these collection systems had to be modeled based on the actual distribution of those fires.

The material composition of the waste contents was determined using waste analysis data for MGB 1.1 from the respective collection systems. Helped by the protocols available from the various areas where sampling was conducted, an average weight value had been derived and the container could be characterized in terms of its filling level with waste representing three-quarters of the total container volume at the moment of fire. However, the empirical evidence on the fire distribution sought via a number of initiatives, including surveys among fire stations and waste service providers, did not reach up to the level that assumptions could be largely replaced by it.

In line with the approach applied to all segments under investigation, the different materials determined as making up the waste content in the modelled collection container were also evaluated in terms of combustibility and emission relevance and eventually aggregated to mass values. Representing a part of the investigated object that is inevitably affected in the event of a fire, the container body also had to be taken into account. Usually made of solid plastic, its contribution in the calculated fire-stricken material mass was significant, especially for the share of fossil origin.

In total, an emission-relevant material mass of approximately 105 kg is determined for a standard waste container MGB 1.1, with the proportion attributable to the category fossil amounting to just under 60 %. Nearly 48 kg of this proportion, and thus roundabout 78 % of the contribution to the category fossil, originate from the container body.

Along with the fire-stricken material masses, whose determination focusses more or less sharply on a specified point in time for each segment, come also complementary information on past or future material changes and the corresponding mass calculation impacts. Remarkable examples for this include the changeover from sheet steel to plastic waste container bodies, which was already largely completed in the 1990s, as well as the material shifts in car construction that are expected in the future with the breakthrough of electromobility, and did historically show in growing shares of plastics. Corresponding indicative parameters and comparative calculations, although not of core interest in the study, were submitted to the German Environment Agency together with the calculation tables used for deriving the fire-stricken mass values.

The report hence addresses the above issues in short statements only. Data gaps, methodical uncertainties and other aspects that influence or allow to properly interpret the magnitude and accuracy of the results are also outlined this way. Additional research needs and possible readjustments are briefly highlighted, as are existing limitations and restrictions on obtaining entirely realistic figures for fire-stricken material mass and fossil content.

1 Studienhintergrund

1.1 Anlass der Studie

Deutschland ist unter der Klimarahmenkonvention und dem Paris-Abkommen verpflichtet, mittels tabellarischer Daten und im Rahmen eines Inventarberichtes jährlich über seine nationalen Treibhausgasemissionen zu berichten. Derzeit fehlt in einer Kategorie eine potenzielle Menge an Kohlendioxidemissionen, weil die Materialmengen unbekannt sind.

Bei der hiervon betroffenen Meldekategorie handelt es sich um die sogenannte CRT-Quellkategorie 5E. CRT-Quellkategorien sind ein Einteilungsschema für Teilaspekte der Treibhausgasberichterstattung unter der Klimarahmenkonferenz, die in der Nomenklatur den CRT (common reporting tables) folgt. So werden innerhalb der CRT-Quellkategorie 5E Emissionen aus unbeabsichtigten Bränden berichtet. Gegenwärtig kommen dabei zwar schon verschiedene Luftschadstoffe zur Berücksichtigung, nicht aber Kohlendioxid-Emissionen (CO₂-EM), weder biogener noch fossiler Herkunft.

Dies wiederum sind jedoch nicht zwei Fehlstellen im Meldeschema, sondern betrifft lediglich zwei Ausprägungen einer Fehlstelle, die durch Daten für die Ermittlung der CO₂-EM geschlossen werden soll. Vorrangige Priorität hat der Lückenschluss des fossilen Anteils, da dieser in die Nationalen Gesamtmengen einzubeziehen ist.

1.2 Auftrag und Ziele der Studie

Der zum vorgenannten Zweck vom Umweltbundesamt (UBA) ausgeschriebene und anschließend begleitete Untersuchungsauftrag wurde der in Dresden ansässigen INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management erteilt. Aus dem Spektrum an Brandereignisfeldern waren Gebäude, mit der Eingrenzung auf Wohngebäude, und des Weiteren Personenkraftwagen sowie Abfallsammelcontainer als zu bearbeitende Betrachtungssegmente definiert worden. Um hier den Forschungsdurchführenden für die Studie und weitere Datenermittlung einen Anknüpfungspunkt zu geben, wurde die bislang zur Berichtskategorie geschaffene Datenlage des UBA zum Einstieg in den Untersuchungsauftrag übermittelt.

Vereinfacht wird diese durch ein statistisches Modell gebildet, über das die Anzahl der Brände pro Jahr in Deutschland je Betrachtungssegment in Zeitreihen zur Ermittlung gelangt. Dies erfolgt unter Normalisierung auf Standard- bzw. Norm-Brände (sogenannter 'full-scale-approach'). Im Ergebnis werden die sich jeweils pro Jahr in Deutschland ereignenden Brandfälle anzahlmäßig ausgewiesen. Hieraus ergeben sich zu den Betrachtungssegmenten momentan sechs Zeitreihen in der resultierenden Bezugseinheit: Gebäudebrände/a (differenziert für die Gebäudekategorien Einfamilien-, Zweifamilien, Mehrfamilienhaus und Nichtwohngebäude), Fahrzeugbrände PKW/a sowie Containerbrände/a (bezogen auf Standardbehälter mit 1,1 m³ Aufnahmevolumen, sogenannte MGB1.1).

Als Verknüpfungspunkt zu den durch das Brandgeschehen entstehenden CO₂-Emissionen bedarf es vor allem der Kenntnis zu den verbrennenden Materialmassen und deren Beschaffenheit und dies möglichst weiterführend bis zu den enthaltenen Anteilen an Kohlenstoff fossilen Ursprungs. Ursprünglich war dahingehend angedacht, die Datenermittlung zur Brandmasse aus der Abfallperspektive vornehmen zu lassen. Beispielsweise spielte die Überlegung, eventuell über die häuslichen Sperrmüllmassen auf den Gesamthausrat rückschließen zu können, hierbei eine Rolle. Sich anfänglich mit diesen Überlegungen kritisch auseinanderzusetzen war daher Teil des Untersuchungsauftrages. So im Ergebnis tragfähigere Ansätze erkennbar werden sollten, waren diese schlussendlich zu entwickeln und damit die Brandmasseermittlung durchzuführen.

2 Ausrichtung von Untersuchungsrahmen und -vorgehen

2.1 Allgemeine Einführung

Vereinbarungsgemäß sollten Brandereignisfälle

- ▶ im Wohngebäudesektor,
- ▶ an Personenkraftwagen sowie
- ▶ Abfallsammelcontainern (bezogen auf Standardbehälter mit 1,1 m³ Aufnahmevermögen)

Gegenstand der Ermittlung von Brandmassen und des Anteils fossiler Brandgüter sein. Hierdurch standen bei der Untersuchungsausführung und Ergebnisdarstellung drei Betrachtungssegmente im Fokus. Während Personenkraftwagen und Abfallsammelcontainer bereits konkrete Betrachtungseinheiten vorgeben, wurde für das Wohngebäudesegment hierzu noch in die Untereinheiten bzw. Gebäudekategorien Einfamilien-, Zweifamilien- und Mehrfamilienhaus unterschieden.

Nachdem, gerade zu diesem Betrachtungssegment, schlüssig dargelegt werden konnte, dass sich eine sachgerechte Massebilanzierung über Art, Umfang und Zusammensetzung objektbezogen anfallender Abfälle als ursprünglich angedachter Ermittlungsperspektive keineswegs umsetzen lässt, wurden in gemeinsamer Abstimmung alternative Ansätze für die Modellierung der Brandmassen und notwendige Datengewinnung herangezogen. Worauf diese aufbauen und wie sie entwickelt und anschließend umgesetzt wurden, ist hauptsächlich Darstellungsinhalt der weiteren Berichtsabschnitte. Es werden außerdem Hintergründe für das entsprechende Herangehen, für Datenlücken und Unsicherheiten in den Berechnungsansätzen sowie die schlussendlich daraus erhaltenen Ergebnisse angesprochen bzw. zusammenfassend wiedergegeben. Eine ausführliche Vertiefung und Dokumentation in allen Punkten gehörte nicht zum Leistungsauftrag, es fanden aber mündliche Erörterungen hierüber statt.

Eine umfassendere Vertiefung entfällt demzufolge auch für die Aufteilungsgrundlagen von fossilen und nichtfossilen Brandmasseanteilen (niedergelegt in Form eines *Excel-Arbeitsblattes* betitelt mit 'Andockliste Fossilität') und zur Bildung von Materialgruppierungen, unter denen die Brandmassen letztlich betrachtet und die hierfür ermittelten Gewichtsmassen zur Ausweisung gebracht wurden. Der Leistungsauftrag sah dahingehend insbesondere vor, eine gute Anknüpfungsfähigkeit für die weiteren Berechnungen von Emissionsäquivalenten gewährleistet zu bekommen.

Mit der verwendeten, generischen Materialgruppenunterteilung in

- | | |
|--------------------------|---|
| ▶ Kunststoffe (KS) | ▶ Textilien (TX) |
| ▶ Holz (HZ) | ▶ Holzwerkstoff (HW) |
| ▶ Papier/Kartonage (PA) | ▶ unspezifisierbare biogene Materialien BI) |
| ▶ Gummi (GU) | ▶ anderes Brennbares (aBr) |
| ▶ nicht zuordenbar (nzo) | ▶ brennbare Flüssiggebinde (bLi) |

erfolgt eine Kategorisierung sowie Zuordenbarkeit im Sinne des für fossile und nichtfossile Anteile genutzten Aufteilungsschlüssels. Dies trifft ebenso auch für weitere Gesichtspunkte, wie

die Beurteilung nach Brennbarkeit und tatsächlich im Detail bestimmbare stoffliche Ausprägung im Zusammenhang mit der jeweiligen Betrachtungseinheit zu.

Über die Betrachtungssegmente hinweg machten sich dabei Ausnahmen bzw. eine getrennte Behandlung lediglich innerhalb von zwei Materialgruppen notwendig. Bei der Gruppe Kunststoffe wurden Materialmassen aus Inventaren in Bezug auf die Aufteilung in fossile/nichtfossile Anteile geringfügig anders behandelt als Kunststoffe in konstruktiven Strukturen (Gebäude-/Abfallbehälterkorpus). Abgestellt wird hiermit auf die biopolymeren Produktanteile, die bspw. im Bereich Verpackungen (damit u.a. den Inhalt von Abfallcontainern betreffend) aber auch für andere Konsumartikel mittelweile über eine gewisse Relevanz verfügen. Bei Gummi, dem speziell im Segment Personenkraftwagen besondere Beachtung zukommt, stellen Reifen die andere Ausnahme dar. Hierfür sind vor allem deutlich detaillierter vorliegende Materialbeschaffungsangaben ausschlaggebend, wonach Autoreifen nicht ausschließlich als Gummi, sondern als ein sehr viel heterogener Materialmix zu betrachten sind und zudem noch Anteile von natürlichem sowie erdölbasiertem Synthesekautschuk enthalten.

Die in oben wiedergegebener Auflistung eingeklammerten Abkürzungen dienen sowohl als Brandmasseindexe (BM-Indexe) zur Vereinfachung der Berechnungen¹ als auch zum Verständnis weiterer berücksichtigter Stoffbestandteile. So steckt beispielsweise hinter der Bezeichnung 'nicht zuordenbar (nzo)' eine stofflich bzw. der Art nach nicht eindeutig aufschlüsselbare, aber zumindest in gewissem Umfang als brennbar einschätzbare Materialmenge. Beispielgebend hierfür ist die bei der Abfallzusammensetzungsbestimmung signifikante Beträge einnehmende Feinfraktion (kleiner 40 bzw. 10 mm), welche bekanntermaßen u.a. brennbare Organik- und nichtbrennbare Mineralikanteile beinhaltet. Demgegenüber werden als 'anderes Brennbares (aBr)' ausgewiesene Materialmassen als vollständig brennbar angesehen und berücksichtigt, trotz auch hier ungenügend klarer und ggf. veränderlicher stofflicher Zusammensetzung.

Der zu den Brandmassen führende generelle Berechnungsmodus umfasste stets die Ermittlung der Masseanteile für alle durch das Brandereignis potenziell betroffenen Einzelkomponenten der jeweiligen Betrachtungseinheit. Diese wurden dann im Einzelnen materialdifferenziert aufgeschlüsselt und nach Brennbarkeit gefiltert. Ob die ermittelten Materialmasseanteile letztlich als Brandmassen Berücksichtigung fanden, wurde dabei über den materialspezifisch vergebenen Brandmasseindex gesteuert. Den o.g. brandmasserelevanten Materialgruppen war hierfür zusätzlich die Gruppierung bzw. ein Index für alle als nichtbrennbar charakterisierten Materialien (NB) beigelegt. Dieser Index fungierte als Filterelement für jene Anteile, die im Weiteren unberücksichtigt blieben, wohingegen die restlichen Materialmassen als (theoretisch) tatsächlich verbrannt betrachtet und demzufolge zur grundsätzlich emissionsrelevanten Brandmasse aufsummiert werden konnten.

Den Brandmasse-Index erneut zuhelfenehmend, wurde hieran dann mit den Einschätzungen zur materialgruppenbezogenen Fossilität angeknüpft und abschließend der jeweilige Brandmasseendwert zur Kategorie fossile Brandgüter errechnet.

Die für Überlegungen zur Arbeitsmethodik und zur Ergebnisberechnung konsultierten bzw. herangezogenen Literatur- und Informationsquellen sind im Quellenverzeichnis zu diesem Bericht aufgeführt.

¹ vgl. mit Tabellenblättern zur Brandmasseherleitung

2.2 Einführung zu den Betrachtungssegmenten

2.2.1 Betrachtungssegment Gebäude

Die Brandmasseermittlung für das Betrachtungssegment Wohngebäude ist durch eine Vielzahl von Herausforderungen gekennzeichnet. Eine wesentliche sind hierbei die unterschiedenen Gebäudekategorien Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser. Diese waren definitorisch weder genauer bestimmt noch sind dafür standardisierte oder durchweg detaillierte statistische Kenngrößen für die jeweilige Gebäudedimension, Geschoss- und Wohnungsanzahl hinterlegt. Gleichwohl hat jedes dieser Merkmale erheblichen Einfluss auf die Brandmasse.

Dabei stellen Gebäudebrände nicht nur eine potenziell vernichtete Masse an Wohninventar dar, sondern sind ebenso für den Baukörper bzw. Gebäudekorpus relevant, welcher demzufolge einzubeziehen und materialdifferenziert mit zu betrachten ist. Dies gilt umso mehr, da als Norm- bzw. Bezugseinheit die Fallkonstellation von 'Full-scale'-Bränden herangezogen wird und damit auch die Vernichtung von Gebäudesubstanz zu unterstellen ist.

Dem Gebäudekorpus zugehörig sind alle baulichen und insbesondere zur Gebäudestatik beitragenden Strukturen. Demgegenüber wird die Inventarmasse neben der Wohnungs- und Raumausstattung auch durch die personenbezogene Ausstattung, bspw. in Form von Bekleidungsstücken der Gebäudebewohner gebildet.

Rückschluss auf den Gebäudekorpus und die darin gebundene Brandmasse könnten Angaben zur Menge und Zusammensetzung von Abbruchabfällen liefern. Hierzu müsste allerdings die Erfassung jeweils gebäudescharf erfolgen und gleichzeitig der Status einer vollständigen Beräumung von Rauminventar (Vollentrümpelung) vorliegen.

Da die Abbruchpraxis dies so nicht hergibt, ist auch entsprechendes Datenmaterial in keinem verwertbaren Umfang vorhanden. Tatsächlich sind Datensätze dieser Art nur vereinzelt aus speziellen Studienvorhaben² und damit keinesfalls repräsentativ für den Gebäudebestand bzw. die verschiedenen Gebäudekategorien Deutschlands verfügbar.

Zur Bestimmung der Inventarmasse bedürfte es wiederum gleichzeitiger Untersuchungen im Rahmen von Entrümpelungen kompletter Wohnungen. Da es in der Praxis ebenso wenig zu derartigen Analysen kommt, hilft auch hier die Abfallperspektive nicht weiter. Die der Abfallstatistik entnehmbaren, hin und wieder auch in ihrer Zusammensetzung untersuchten Sperrmüllmengen sind lediglich der Teilentsorgung von Wohnungsinventar unter bestimmten Entledigungsabsichten zuzuschreiben. Die Ableitung auf ein Wohnungsgesamtinventar lässt sich daraus nicht vornehmen. Überdies würden wesentliche Inventarbestandteile, darunter Elektro(nik)- und Bekleidungsartikel, die Haushalte wiederum nicht nur als Abfall -und selbst dann- auf verschiedenen Wegen wieder verlassen, unberücksichtigt bleiben oder ungenügend zur Abschätzung kommen.

Die Fallkonstellation der Full-scale'-Brände lässt sich grundsätzlich auch nicht als Wiedergabe des tatsächlichen Brandgeschehen in und von Gebäuden ansehen. Diese Schlussfolgerung findet sich insbesondere durch die vfdb-Brandschadenstatistik bestätigt, die von Feuerwehren zu Gebäudebrandeinsätzen eingehende Informationen mit aufgreift. Zwischenzeitlich bildeten Berichte von mehr als 5.000 entsprechenden Einsätzen hierfür die Grundlage und belegen, dass

² z.B. Untersuchungen zum selektiven Rückbau und Recycling von Gebäuden am Beispiel des Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw, 1994 oder Daten zum Rückbau von acht Einzelgebäuden aus der Erprobung der Getrennthaltung von Altholz und Schadstoffschnellanalytik im Rahmen des Förderschwerpunktes Holz bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 1998-2000 [31]

eine Eindämmung auf sehr begrenzte Wohnbereiche die Regel der Brandereignisfälle darstellt [1] (vgl. auch Abschnitt 4.1.1.2).

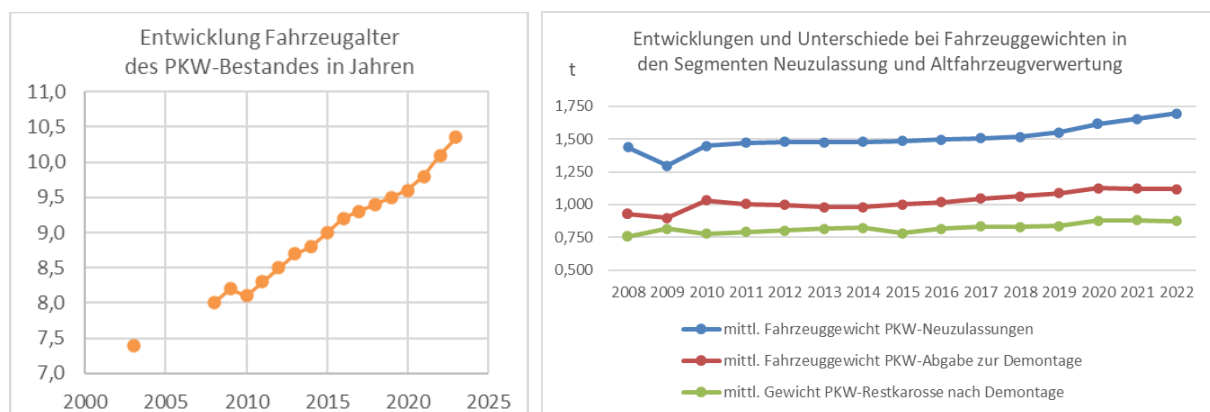
Wird also schon das Konstrukt der ‘Full-scale’-Brände dem realen Brandgeschehen nur äußerst grob gerecht, so muss auch die dabei als potenziell (bzw. theoretisch) vollständig vernichtet angesehene und insofern emissionsrelevante Brandmasse als Annäherung bzw. wahrscheinliche Überschätzung begriffen werden. Hierfür wurde die Modellierung der Wohnrauminventare, in Verbindung mit Daten, die für unterschiedliche Gebäudekategorien zur Baumasse und Materialität des Gebäudekorpus vorlagen, als probates Herangehen eingeschätzt und vollzogen.

2.2.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge

Auch im Betrachtungssegment Personenkraftwagen sind die Brandereignisfälle auf eine Grundgesamtheit zu beziehen, die eine sehr heterogene Zusammensetzung aufweist. Hierzu dokumentiert die Zulassungs- und Abmeldestatistik den Fahrzeugbestand in Deutschland und gruppiert diesen, wobei die Kategorien M1-Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens acht Sitzplätzen und N1-leichte Nutzfahrzeuge bis zu einem Gesamtgewicht von maximal 3,5 Tonnen im Untersuchungszusammenhang den gemeinsamen Betrachtungsrahmen als Brandereignisfälle bilden.

Die Untersuchungen profitieren dabei von besagter Statistik durch eine Wertebasis zur Altersentwicklung des Fahrzeugbestandes sowie zum mittleren Gewicht der in den Kategorien zugelassenen Fahrzeuge und damit eines für die Brandmassebestimmung heranziehbaren Referenzwertes. Die hierüber vorliegenden Datenreihen geben in Bezug auf beide Aspekte einen Anstieg der Statistikwerte zu erkennen, d.h. mittleres Fahrzeugalter und Fahrzeuggewicht haben über die Zeit zugenommen [2] [3].

Abbildung 1: Alters- und Gewichtsentwicklung des PKW-Bestandes in Deutschland



Quelle: Darstellungen aus Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes und zur Altfahrzeugverwertung (KOM-Tabellen, [32])

Da für die tatsächlich zum Brandfall werdenden Fahrzeuge das mittlere Alter indes unbekannt ist, kann diese Wertebasis auch nur einen orientierenden Grundwert und den Hinweis auf sich zeitlich ändernde Gewichtsbezüge liefern. Nicht ermittelbar ist über diese statistischen Zugänge dagegen, wie die Fahrzeuge des Bestandes materialseitig beschaffen sind.

Immerhin gibt es hierüber jedoch aus verschiedenen Bereichen der Autoteilehersteller, des Fahrzeugbaus und sonstigen kraftfahrzeugnahen Gewerbes einschließlich der Forschungsseite grobgefasste Einblicke³. Diese münden übergreifend in ein ungefähres Materialverhältnis von 70-75 % metallischen, 15 % Kunststoff- und rund 10 % anderen Materialkomponenten, mit

³ vgl. bspw. [37] [38] [48]

gewissen Varianzen, u.a. beeinflusst durch die Art der Zurechnung der Fahrzeugräder. Davon ungeachtet bietet sich in diesem ansonsten recht robusten Wertegerüst insgesamt eine gute Näherung für die notwendige Materialdifferenzierung bei der Brandmassebetrachtung⁴.

Ein Vorteil dieses meist auf drei- oder vier Materialgruppen zugespitzten Wertekanons liegt auch im Vorhandensein deutlich weiter zurückreichender (z.B. mit überschaubarem Aufwand bis in die 1970-er Jahre auffindbarer) Angaben, die dann auch leicht mit den Gewichtsangaben zum jeweiligen Zulassungsjahrgang zu verschneiden sind.

Laut dieser zeitversetzten Angaben hat sich der (nicht brandmasserelevante) Metallanteil in den Kraftfahrzeugen rückläufig (von ca. 80 % Mitte der 1970-er Jahre auf heutzutage etwas unter 75 %) entwickelt, wobei im Gegenzug insbesondere Kunststoffe (von ca. 11 % auf über 15 %) zugenommen und damit den Metallwegfall gewichtsmäßig am umfänglichsten kompensiert haben [37] [48]. Bezüglich der Fahrzeugräder hat sich mit stabilen 3-4 % Masseanteil indes nur sehr wenig verändert. Einen wiederum deutlicheren Umbruch bei den Materialanteilen lassen hingegen die geänderten Autobauweisen im Zuge der Elektromobilität erwarten [41] [42].

Den Ansatzpunkt einer tatsächlich noch tieferen Erschließung dieses groben Wertegerüst liefert schlussendlich die Abfallperspektive und die zur Altfahrzeugentsorgung gesetzlich veranlasste abfallstatistische Datenerfassung [4]. Diese vollzieht sich insbesondere über die Zerlegebetriebe und Schredderanlagen, welche grundsätzlich als Ausführende der Demontage und Weiterbehandlung der Altfahrzeuge und ihrer Komponenten in Deutschland bestimmt sind.

Auch am UBA werden die beim Statistischen Bundesamt diesbezüglich auflaufenden Daten seit dem Jahr 2004 genutzt, um für Deutschland die Verwertungsquoten im Altfahrzeugsbereich zu ermitteln und damit u.a. den Berichtspflichten im Rahmen der Richtlinie 2000/53/EG nachzukommen [32]. Aus deren Veröffentlichung eröffnet sich ein zusätzlicher Datenzugang.

Wie auch zur Brandmasseermittlung angewandt, sind die abfallstatistischen Erhebungsgrößen zu Input- und Outputströmen von Altfahrzeug-Demontagebetrieben sowie Altfahrzeugmaterial behandelnden Schredderbetriebe dabei wesentlich. Die Angaben ermöglichen allerdings keine vollständige Aufschlüsselung und Massebilanzierung nach Materialarten, wodurch Annahmen und Schätzungen entsprechende Lücken methodisch füllen müssen. Unumgänglich wird dies speziell beim Schreddermaterial und hier die Leichtfraktion besonders betreffend. An dieser Stelle ist die der Autodemontage nachfolgende Anschlussbehandlung der Fahrzeugrestkarossen gemeinsam mit metallhaltigen Abfällen anderer Herkunft ein Grund. Ein Teil der Massewerte der Statistik sind hierdurch nicht mehr klar dem Materialstrom aus Fahrzeugen zuordenbar und auch in Sachen Materialdifferenzierung noch schwerer zu handhaben. Dazu werfen dann in beiderlei Hinsicht Exportflüsse bei Altfahrzeugmaterialien ebenfalls noch Problematiken auf.

2.2.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer

Wie die unterschiedlichen Wohngebäudekategorien im Gebäudesegment, so sind im Betrachtungssegment Abfallcontainer die praktizierten (Getrennt-)Erfassungssysteme für verschiedene Abfallarten ein stark einflussnehmendes Element und besonders herausfordernd für die Brandmasseermittlung.

Ursprünglich war im Untersuchungsauftrag als Bezugseinheit für die Brandereignisfälle allein auf den Stoffstrom der Haushaltsrestabfälle (RAbf), die in Abfallcontainern der Größe 1.100 Liter bzw. 1,1 m³, also Sammelbehältern des Typs MGB1.1. erfasst und dort zum Brandobjekt werden, abgestellt. Der Blick auf die Organisation der Abfallsammlung und das breite Spektrum

⁴ im Nachhinein zum Untersuchungsprozess erlaubt es sich, dieses sogar als nahezu ausreichend für die Brandmasseermittlung einzuschätzen

an dafür in Deutschland eingesetzten Behälterarten und -größen macht allerdings deutlich, dass dieser Ansatz die Betrachtungsperspektive erheblich einengt. Dies veranlasst(e), eingangs zur Bestimmung der Brandmasse und des sich dafür eignenden Modellierungsansatzes, eine sachgerechtere Situationsbewertung vorzunehmen. Deren Ziel liegt in einer realistischeren Betrachtungsgrundlage und Einschätzung zu den tatsächlich betroffenen Abfallmaterialien.

Naheliegender erscheint, dass Brandereignisse bei Abfallcontainern über alle Systeme und Behälterarten zur Abfallerfassung stattfinden. Ferner lässt sich davon auszugehen, dass mit zunehmender Brennbarkeit des Abfallmaterials auch eine wachsende Wahrscheinlichkeit von Brandfällen im entsprechenden Erfassungssystem einhergeht. Aus dieser Perspektive ordnen sich Haushaltsrestabfälle, die idealerweise ein um Wertstoffe abgereichertes und folglich meist feucht-schmierig und mineralisch-staubiges Abfallgemisch darstellen, eher am hinteren Ende ein. Verpackungsmaterialien (LVP) und Altpapier (PPK), als gleichfalls haushaltsnah über vergleichbare Behältertypen separat erfasste Abfallströme, verfügen über ein deutlich höheres Entzündungs- und Brandrisiko. Demgemäß ist zu unterstellen, dass diese Erfassungssysteme unbedingt am Brandgeschehen mitbeteiligt sind, wenn nicht sogar überwiegend zur Brandmasse beitragen.

Trotz der großen Bandbreite eingesetzter Abfallbehältergrößen in allen Erfassungssystemen werden MGB1.1 tatsächlich am meisten von Brandfällen betroffen sein. Nachweislich weisen deren hauptsächlichen Bereitstellungsgebiete Merkmale auf, aus denen sich erhöhte Brandrisiken herleiten. Hierzu gehören eine größere allgemeine Zugänglichkeit zu den Containern aufgrund zentraler Aufstellorte mit oft kaum vorhandener Beschränkung auf einen ausgesuchten Benutzerkreis. Gegenseitige Kontrolle und angemessene Eigenverantwortung kommen mit der anonymen Behälternutzung weniger stark zum Tragen, was in höhere Fehlwurfanteile⁵ und damit verbundene Brandrisiken mündet. Vor allem akkubestückte Abfallkomponenten, die zunehmend häufig als brandauslösend festgestellt werden und eigentlich dem Rücknahmesystem für Elektroaltgeräte anzudienen sind, bilden dabei ein aktuelles Thema. Die mittlerweile zur gesamten Entsorgungsinfrastruktur berichteten und dazu mit [Zit.] „täglich rund 30 Brände in Entsorgungsanlagen und Sammelfahrzeugen durch falsch entsorgte Batterien und Akkus“ [44] bezifferten Ereignisfälle stellen hier eine Vervollständigung des Lagebildes und zugleich Relativierung der Bedeutung des Untersuchungsobjektes Abfallcontainer in der Berichtskategorie dar.

Zu Erfassungssystemen mit erhöht entzündlichen und brennbaren Abfallarten kommt die Umstellung von Stahlblech- auf Kunststoffbehältern als weiterer brandrelevanter Aspekt hinzu. Damit zieht ein brennender Behälterinhalt inzwischen nahezu unvermeidlich auch eine Entzündung des Behälterkorpus nach sich. Im Zusammenhang mit ‘Full-scale Bränden’ als definierter Betrachtungsgröße sind in der Konsequenz Korpus und Inhalt der Abfallbehälter gemeinsam der Brandmasse anzurechnen.

⁵ in Fachkreisen verwendete Bezeichnung für die gemäß Vorgaben (z.B. durch Satzungsfestlegung) nicht in das jeweilige Erfassungssystem gehörenden Abfallinhalte

3 Elemente der weiteren Umsetzung

3.1 Herleitung der Brandmassen

3.1.1 Betrachtungssegment Gebäude

Wie im Abschnitt 2.2.1 ausgeführt, stellt(e) die relative Unbestimmtheit der unterschiedenen Gebäudekategorien (Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser) bzw. das dafür fehlende Kennzahlengerüst eine der Grundherausforderungen im Zusammenhang mit der Brandmasseermittlung dar.

Trotz des immensen Einflusses entsprechender baulicher Ausprägungsattribute auf den Gebäudekorpus waren Ansatzpunkte, mit denen die Diversität an Gebäudeausformungen bei den einzelnen Gebäudekategorien einigermaßen belastbar nachgezeichnet und normiert werden kann, nicht ersichtlich. Entlang statistischer Indikatoren in Form von Gebäudezahlen mit einer gewissen Bandbreite darin befindlicher Wohnungen konnte lediglich noch bezüglich der Unterscheidung bzw. Aufteilung von Mehrfamilienhäusern nach Geschossezahlen eine grobe Annahme getroffen werden. Diese erlangt indes nur bei der Gebäudeinventarbetrachtung wirklich Relevanz. Hinnehmbar erscheint dies insofern, da nicht die zusätzlichen Geschosse eines Gebäudes aus der Brandmasseperspektive Wesentliches beim Gebäudekorpus zur Veränderung bringen. Grund hierfür sind die generell hohen Anteile welche ohnehin nichtbrennbare Baumaterialien (mineralische und metallische Baustoffe sowie Glas) an der allgemeinen Gebäudesubstanz einnehmen. Der Dachbereich, als ein durch Gebälk, Sparren, Dämmung und Eindeckung eher sehr brandmasseeträchtiger Gebäudeteil, sitzt bspw. jedem Gebäude jeweils nur einfach auf und zwar höhenunabhängig.

Somit konnte für den Gebäudekorpus der Datenbestand des am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) entwickelten und verwalteten "Informationssystem Gebaute Umwelt (ISBE)" in den Blickpunkt genommen werden. Dieses Informationssystem liefert u.a. in Form von Materialkennzahlen empirische Datengrundlagen zur Materialität der gebauten Umwelt. Zur Ausweisung kommen diese in einer Unterscheidung von Wohngebäuden der Kategorien Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie Nichtwohngebäuden, jeweils gestaffelt in Baualtersgruppen bzw. bezogen auf den Bestandsquerschnitt und ausgewählte Regionen in Deutschland [21]. Zweifamilienhäuser (ZFH) kommen im bezeichneten Informationssystem allerdings nicht separat, sondern als Teil der Gebäudekategorie Einfamilienhäuser zur Mitbetrachtung. Ebenso liegt der Kategorie Mehrfamilienhäuser eine Mischbetrachtung der jeweiligen Gebäudegrößen zugrunde.

Hinter jeder im Informationssystem abgebildeten Wohngebäudekategorie steht eine bestimmte Anzahl an real errichteten Gebäuden mit ähnlichen Merkmalsausprägungen –sogenannten Repräsentanten– die zu synthetischen Gebäuden aggregiert wurden. Diese spiegeln dann den Durchschnitt der im jeweiligen Bauzeitraum üblichen Gebäude- und Wohnungsgrößen, Konstruktionsarten sowie verwendeten Materialien und dienen damit als Bezugseinheit für die Materialkennzahlen. Für letztere findet eine Systematik Anwendung, die 44 Baumaterialgruppen differenziert, unter denen wiederum ca. 130 einzelne Baumaterialien subsummiert sind. Diese Systematik bzw. die hierbei mitgegebenen stofflichen Beschreibungen ermöglichen es, die potenzielle Brennbarkeit der Materialien zu beurteilen und somit über deren Relevanz als tatsächlich emissionsrelevante Brandmasse befinden und die Massekennzahlen zuordnen zu können.

Dies wurde unter Verwendung des vom IÖR für alle Baualterskohorten übergeordnet gebildeten Datenpools vollzogen und in einer Excel-Datei mit der Bezeichnung *'Berechnungsteil_Gebäude-*

Korpus hinterlegt. Aus den Arbeitsblättern *'EFH-Baumaterial_ID247'* sowie *'MFH-Baumaterial_ID246'* gehen dabei jeweils die Urdaten und Berechnungsergebnisse für beide Wohngebäudekategorien hervor. Die ID-Kennzeichnung nimmt in diesem Falle Bezug auf die einschlägige Kennzeichnung im ISBE, um so den Datenursprung erkennbar zu halten.

Für die mit den verschiedenen Gebäudekategorien verbundenen Gebäude- bzw. Rauminventare steht hingegen kein annähernd vergleichbares Materialkataster zur Verfügung, selbst eine umfassende Beschreibung ist dafür unbekannt. Dass Versicherer über entsprechende Einblicke verfügen (z.B. im Rahmen von Sachversicherungen und Schadensbearbeitungen) darf angenommen werden, hierzu auffindbar waren solche indes nur in Form von Sachwert- oder Schadenssummenbeträgen⁶.

Demzufolge musste ein eigener Modellierungsansatz gefunden und darüber ein Maßstab erarbeitet werden, um jede Gebäudekategorie in einer für sich normierten Art und Weise betrachten und ein dazu entsprechendes Brandmasseäquivalent bestimmen zu können.

Dies führte zum Blick auf beim Statistischen Bundesamt (Destatis) geführte Statistiken, die bspw. im Rahmen des periodisch durchgeführten bundesweiten Zensus bzw. Mikrozensus, der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) oder als Teil der Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) Informationen zusammenführen, die einerseits Haushalt- und Wohnungsgrößen nach Flächen und Bewohnerzahlen [11] [12] [13] [15] sowie andererseits die Gebrauchsgüterausstattung betreffen [8] [9] [10].

Bezüglich der Gebrauchsgüterausstattung liefern die genannten Quellen allerdings nur Einblick für ein bestimmtes Spektrum. Dabei handelt es sich um eine Auswahl an Haushaltsgeräten [8], Gütern der Unterhaltungselektronik [10] sowie der Informations- und Kommunikationstechnik [9]. Zu Möbeln, weiteren Einrichtungsgegenständen und Ausstattungsartikeln für die persönliche Lebens- und Haushaltsführung (u.a. Bekleidung, Bettzeug, Bücher) gibt es hieraus keine Angaben, ebenso war diesbezüglich kein anderer repräsentativer Erfassungsmechanismus bekannt bzw. auffindbar.

Zum Ausfüllen dieser Lücken fiel die Entscheidung, auf die Mindestausstattungsmaßstäbe aufzusetzen, welche der Bevölkerung Deutschlands für die Lebens- und Haushaltsführung nach dem deutschen Sozialgesetzbuch (SGB) [...im Zuge staatlicher Unterstützungsmechanismen] zuzubilligen sind. Neben den einmaligen Bedarfen, die jeweils einen Grundumfang an Mobiliar, Geräte- und Bekleidungsausstattung einschließen [17], finden unter Hinzuziehung ergänzender Quellen auch Mehrbedarfe eine Benennung [18] [19]. Hieraus kann auf ein grundsätzlich in Haushalten vorhandenes Basisinventar abgeleitet und dieses auf den Wohnungsbestand in Wohngebäuden der unterschiedlichen Ausprägung zur Übertragung gebracht werden.

Eine damit einhergehende Notwendigkeit war, den Haushalt bzw. die Wohnung als Aufstell- und Verwahrort der gesamten Wohneinrichtung und Ausstattungsgegenstände und darüber hinaus wiederum in unterschiedlicher Anzahl die Gebäude ausfüllende Normeinheit zu bestimmen bzw. zu modellieren.

Hierfür wurden die statistischen Angaben über das mittlere Flächenmaß, die durchschnittliche Anzahl an Haushaltsbewohnern und Räumen der in der Bundesrepublik im Jahr 2022 bewohnten Wohnungen als Basis herangezogen [6] [7] [13] [16]. Dazu wurde ein subjektiv gewählter Schlüssel für die Raumaufteilung und deren Nutzungsarten festgelegt. Der allgemeinen Wohnrealität folgend, fanden dabei Küche, Wohn-, Schlafräum, jeweils ein Bad- und Toilettenraum sowie Wohnungsflur Berücksichtigung.

⁶ vgl. bspw. [20] [23]

Über ein ebenfalls subjektiv gewähltes Multiplikationsschema wurde jedem Raum eine spezifische Grundfläche zugewiesen. Den Basiswert lieferte die sich, aus dem Quotient von Gesamtwohnfläche und Raumanzahl ergebende Raumdurchschnittsgröße mit dem Schlafraum als Ausgangseinheit mit dem Multiplikationswert 1.

Nachzuvollziehen ist dieser Grundbestandteil der Modellierung über das in der Ergebnisdatei *'Berechnungsteil_Gebaeude-Inventar'* enthaltene Arbeitsblatt 'Basismodell'). Der Werteanatz kann nicht nur hinsichtlich der Raumaufteilung und Flächenbemessungsfaktoren verändert, sondern auch an das veränderliche Wertegerüst der Statistik (Wohnungsgesamtzahl u. -durchschnittsfläche, mittlere Haushaltsgröße bzw. -bewohneranzahl) angepasst und somit fortgeschrieben werden.

Mit Erhalt eines mittleren Wohnungszuschnittes konnten auch noch weitere Komponenten der Raumausstattung (z.B. Türen, Fenster, Fußbodenbeläge, Tapezierung) und sonstige verbliebene Inventarlücken identifiziert und ins Gesamtausstattungsportfolio aufgenommen werden. Ausgerichtet an diesem Wohnungszuschnitt und unter Verwendung der über das Basismodell dazu hergeleiteten Kennzahlen zu Raumflächenmaßen und Wohnungsbewohneranzahl konnten nunmehr einzelne Inventarlisten angelegt werden. Diese liegen in Form entsprechender Arbeitsblätter als Teil der Ergebnisdatei *'Berechnungsteil_Gebaeude-Inventar'* vor.

Unterschieden wird in ein generelles Raumgrundinventar, ein zu jeder Wohnung gehörendes (Gesamt-)Geräteinventar, raumfunktional begründete Grund-(Ausstattungs)inventare zu jedem Raum und personenbezogene Grund-(Ausstattungs)inventare an Textil- und Bekleidungsgütern sowie Mobiliar. Eine Gesamtauflistung mit der entsprechenden Kurzerläuterung zum jeweiligen Inventarbaustein/Arbeitsblattinhalt liefert die nachstehende Übersicht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht zu den einer Wohnung zugehörigen und als deren Inhalt berücksichtigten Inventarbausteinen (als separate Arbeitsblätter angelegt)

Inventarbaustein	Kurzerläuterung (in Kommentarform auch jedem Arbeitsblatt beigelegt)	Bezeichnung des Detail- u. Berechnungs- angaben enthaltenden Arbeitsblattes
Raumgrundinventar	Das Raumgrundinventar umfasst alle Ausstattungskomponenten, welche in den Räumen einer Wohnung im Neu- bzw. Erstübergabezustand (d.h. einer zum Einzug vorgerichteten, ansonsten aber leeren Wohnung) im Allgemeinen vorzufinden bzw. zu erwarten sind.	Raumgrundinventar
Geräteinventar	Das Geräteinventar umfasst die Ausstattung einer Wohnung mit elektronischen Gerätschaften über alle Räume (ohne Werkzeuge, die als in Keller oder Garagen ausgelagert angesehen werden)	Geräteinventar
Möbelinventar	Das Möbelgrundinventar umfasst die Grundausrüstung einer Wohnung an personenbezogenem Mobiliar über alle Räume, unabhängig vom konkreten Raumstandort bzw. der Raumfunktion. Weitere, auch vergleichbare Mobiliarteile kommen bei der raumbezogenen Inventarausrüstung zur Berücksichtigung.	Möbelgrundinventar
Textil- und Bekleidungsinventar	Das Textilinventar umfasst den raumunabhängig vorzufindenden Ausstattungsumfang einer Wohnung an personenbezogenen Bekleidungs- und Textilartikeln für	Textilinventar

Inventarbaustein	Kurzerläuterung (in Kommentarform auch jedem Arbeitsblatt beigelegt)	Bezeichnung des Detail- u. Berechnungs- angaben enthaltenden Arbeitsblattes
	den individuellen Komfort bzw. die allgemein übliche Lebensführung.	
Küchen-Inventar	Die Wohnungsaufteilung entlang der mittleren statistischen Raumanzahl, hat die allgemein üblichen Raumfunktionalitäten zu berücksichtigen. Dazu zählt der Raum bzw. Wohnungsbereich, welcher in der hier jeweils linkspaltig benannten Funktion genutzt wird und dessen funktionsspezifische Grundausstattung. Diese ergänzt das generelle, raumfunktionsunabhängige Raumgrundinventar, wobei dieses ergänzt wird durch die raumabhängig variierenden Annahmen zu funktionellen Wand-/Bodenauflagen (bspw. Tapeten/Teppiche vs. Fliesen).	Grundinventar-Küche
Wohnraum-Inventar		Grundinventar-Wohnraum
Schlafraum-Inventar		Grundinventar-Schlafraum
Flurinventar		Grundinventar-Flur
Bad-/Toiletteninventar		Grundinventar-Bad
Treppenhausinventar* (*zzgl. ab >1 Wohnung)	Sobald Gebäude über mehrere Wohnungen verfügen, bedürfen diese eines außerhalb der Wohnung liegenden, von allen Gebäudebewohnern betretbaren Zugangsbereiches. Dies ist im Allgemeinen ein Treppenhaus durch das auch die Wohnungen in verschiedenen Geschossebenen verbunden sind. Prägend für diesen Raum ist die Treppenstruktur und der zusätzlich separate Abschluss nach außen (Zwischen- oder Hausaußentür). Anteilig ist jeder Geschossebene am Treppenhaus mit den gleichen Merkmalen angebunden.	InventarMFH-Treppe

Quelle: eigene Darstellung

Wie in den Kurzerläuterungen (Tabelle 1, Spalte 2) verfasst, sind jedem Inventarbaustein entweder die raumfunktional begründeten Güter und Ausstattungsgegenstände bzw. personenbezogene Ausstattungsartikel zugewiesen. Hierfür lieferten die oben bereits erwähnten Statistiken oder Mindestausstattungsstandards gemäß SGB den jeweiligen Mengenschlüssel (s. *Spalte 'Grundbedarf' im jeweiligen Arbeitsblatt*). Nach objektivem Ermessen wurden vereinzelt noch zusätzliche Güter und Mehrausstattungsmengen ergänzt (s. *Spalte 'Zusatzausstattung' im jeweiligen Arbeitsblatt*) oder zum vorhandenen statistischen Wert aufgefüllt (z.B. 'Zusatzausstattung' im *Arbeitsblatt 'Geräteinventar'*). Der jeweilige Summenwert aus Grundbedarf und Zusatzausstattung, bzw. Multiplikationswert mit der mittleren Bewohneranzahl bei personenbezogenen Gütern, bildet dann den Ausstattungsumfang pro Wohnungseinheit ab.

Für jeden Inventarbestandteil ist dann ferner ein Massewert und eine annähernd repräsentative Materialzusammensetzung (im jeweiligen Arbeitsblatt s. *Arbeitsblattbereich 'Materialaufteilung'*) hinterlegt. Hierzu wurde eine umfassende Quellenrecherche und -sichtung vorgenommen⁷ und im Abgleichverfahren eine Standardreferenz bzw. ein Standardermittlungsweg möglichst

⁷ Referenzinformationen für Annahmen über Stückgewichte und Materialbeschaffenheiten z.B.:

SULO Deutschland GmbH, der ROLLENDE Shop.de GmbH, ESE World B.V., Rollawaycontainer.com srl

Löwe Handelsgesellschaft mbH, Engels Behältertechnik GmbH, KAISER+KRAFT GmbH, Stabilo Sanitärgrößhandel GmbH, Schnell Inform Vinylboden Outlet e.K., WERZALIT Austria GmbH, RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co., Continental Aktiengesellschaft, Otto GmbH & Co. KGaA

durchgängig heranzuziehen versucht. In die Arbeitsblätter bzw. dortige Wertangaben teils direkt integrierte Quellenhinweise, -verlinkungen und Belegkopien schaffen hierzu Transparenz. Einen wesentlichen Zugang, darunter auch die Materialanteile und deren (fossilen/biogenen) Ursprung betreffend, boten hier bspw. die Dokumentationen zur Umwelt-Produktdeklaration (EPD) und Einträge in Bauproduktdatenbanken (u.a. Ökobaumat, Baunetzwissen, ecobau)⁸. Überdies wurde mehrfach auch auf Produktangaben zurückgegriffen, die im Online-Handel entsprechenden Inventarartikeln beigegeben sind. Im Standardverfahren wurde dazu zunächst immer die Angebotsplattform des Großhandelsversandunternehmens OTTO aufgerufen und auf Basis von mindestens drei verschiedenen Produktrepräsentanten (u.a. durch Mittelwertbildung aus den Gewichtsangaben) ein Dateneintrag generiert.

Für die Materialzuordnung (s. *Arbeitsblattbereich 'Aufschlüsselung Materialkomponenten'* u. *'Materialaufteilung'*) wurde dem Materialgruppenkatalog mit den entsprechenden Indizes und der jeweiligen Bewertung zur Brennbarkeit (s. *Arbeitsblattbereich 'Brandmassebeurteilung BM-Index II'*) gefolgt (s. auch Ausführungen in Abschnitt 2.1).

Die Berechnung zur Brandmasse bei Gebäudebränden erfolgt(e) mittels der so gewonnenen Datensätze dann mehrstufig. Gebäudekorpus und Gebäudeinventare, als die im Brandereignisfall durch den angenommenen Voll(ab)brand betroffenen Materiallager, unterliegen zunächst der getrennten Betrachtung. Dies ist primär dem Umstand der unterschiedlichen Datenzugänge geschuldet, ermöglicht es gleichzeitig aber, die Brandfälle -bei entsprechender Informationslage- auch differenzierter hinsichtlich des tatsächlichen Ausmaßes und der damit anrechenbaren Brandmasse einzuschätzen.

Wesentlich dabei ist die Einzelaufrechnung des Inventars für die funktionell unterschiedlichen Räume einer Wohnung. Potenziell entsteht der genaueren Betrachtung von Emissionsinventaren hier ein Vorteil durch die Tatsache, dass der weit überwiegende Teil von Bränden in Gebäuden letztlich auf den Raum und oftmals sogar nur auf den Inventarteil beschränkt bleibt, der den Entstehungsort des Feuers markiert⁹. Damit wird bspw. die Küche, die statistisch in Gebäuden der häufigste Brandausbruchsort, dann aber überwiegend ebenso der einzige feuergeschädigte Raum einer Wohnung ist, völlig separat betrachtbar.

Die vollumfängliche Betrachtung im Full-scale Szenario liefert im Ergebnis der materialgruppen- bzw. am Brandmasseindex ausgerichteten Aufrechnung Brandmassen, wie zum Gebäudekorpus (in der *Ergebnisdatei 'Berechnungsteil_Gebäude-Korpus.xlsx'* im grüengefärbten Zeilenbereich der Spalten D u. E) und für das Gebäudeinventar (in der *Ergebnisdatei 'Berechnungsteil_Gebäude-Inventar.xlsx'* im grüengefärbten Zeilenbereich der Spalten H u. I) jeweils wertemäßig ausgewiesen.

Limitiert durch den Datenbestand im ISBE sind dies für den Gebäudekorpus zugleich Endwerte für die Brandmassen in der Unterscheidung von EFH/ZFH sowie MFH. Beim Gebäudeinventar kommen diese erst durch Zusammenziehen der zu jedem Inventarbaustein ermittelten Brandmassewerte der gleichen Materialgruppe in einen Summenwert zustande. Insgesamt repräsentiert der die materialgruppendifferenziert aufgeschlüsselte Brandmasse einer kompletten Wohn(ein)heit.

⁸ BauNetz Wissen, bereitgestellt über die Heinze GmbH, ecoProdukte (bereitgestellt durch den Verein ecobau — nachhaltig planen und bauen, Zürich, CH), ÖKOBAUDAT.de (bereitgestellt vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen)

⁹ Fachexperten zufolge beläuft sich der Anteil von Ereignissen mit Totalabbrand auf nur ca. 0,07 % aller registrierten Brandfälle [55]. Für das Gebiet der EU besagen im Projekt EU FIRESTAT gewonnene Studienergebnisse, dass bei vom Wohnungsinventar ausgehenden Bränden durch Löschmaßnahmen die Brandausbreitung zu 50 % nur im Aufstellraum erfolgt, zu 41 % auf den brandauslösenden Gegenstand (Möbelteil) begrenzt bleibt und nur zu 9 % über den Entstehungsraum hinausgeht. In Deutschland überwiegt demnach sogar die Brandbegrenzung auf den Ausgangsgegenstand [1].

Auf die Wohneinheit aufsetzend wird dann die Modellierung der Gebäude der unterschiedlichen Kategorien hinsichtlich ihrer jeweiligen Gesamtinventare vollzogen.

Beachte

Gebäuden der Kategorie EFH ist dabei genau eine Wohnung des zur Inventarberechnung verwendeten Zuschnitts (in einer Gesamtgröße von 94,4 m²) zugrunde gelegt (s. *Arbeitsblatt 'Basismodell' in der Ergebnisdatei 'Berechnungsteil_Gebäude-Inventar'*). Diese Konfiguration dient gleichzeitig als Basismodell für die weiteren Gebäudemodellierungen. Nach diesem Ansatz umfassen ZFH zwei dieser Durchschnittswohnungen und MFH das entsprechend Vielfache davon. Bereits ab der 2. Wohnung wird von einer Mehrgeschossigkeit des Gebäudes ausgegangen, d.h. ein ZFH wird als doppelstöckig und nicht in der Bauform eines Reihenhauses betrachtet.

Diesem Betrachtungsweg wird durch die Statistiken zur Gebäude- und Wohnungsverteilung eine gewisse Rechtfertigung zuteil, indem dort die Angaben zu Gebäuden mit einer bestimmten Wohnungszahl und Anzahl der Wohnungen in Gebäuden in den jeweiligen Ebenen recht gut korrespondieren [5]. Demnach kann zum Großteil tatsächlich bereits auch für die ZFH von einer Mehrgeschossigkeit der Gebäude ausgegangen werden. Über einen sich daran anlehnenden Schlüssel wurde bei den MFH auch die Geschosshöhen modelliert bzw. Verteilmenge an Wohnungen als normierte Brandmasseeinheiten auf Gebäude einer bestimmten Geschosshöhe bestimmt (s. *Arbeitsblatt 3000G-1012 in der Exceldatei 'Bezugsdaten-Zensus_WG'*).

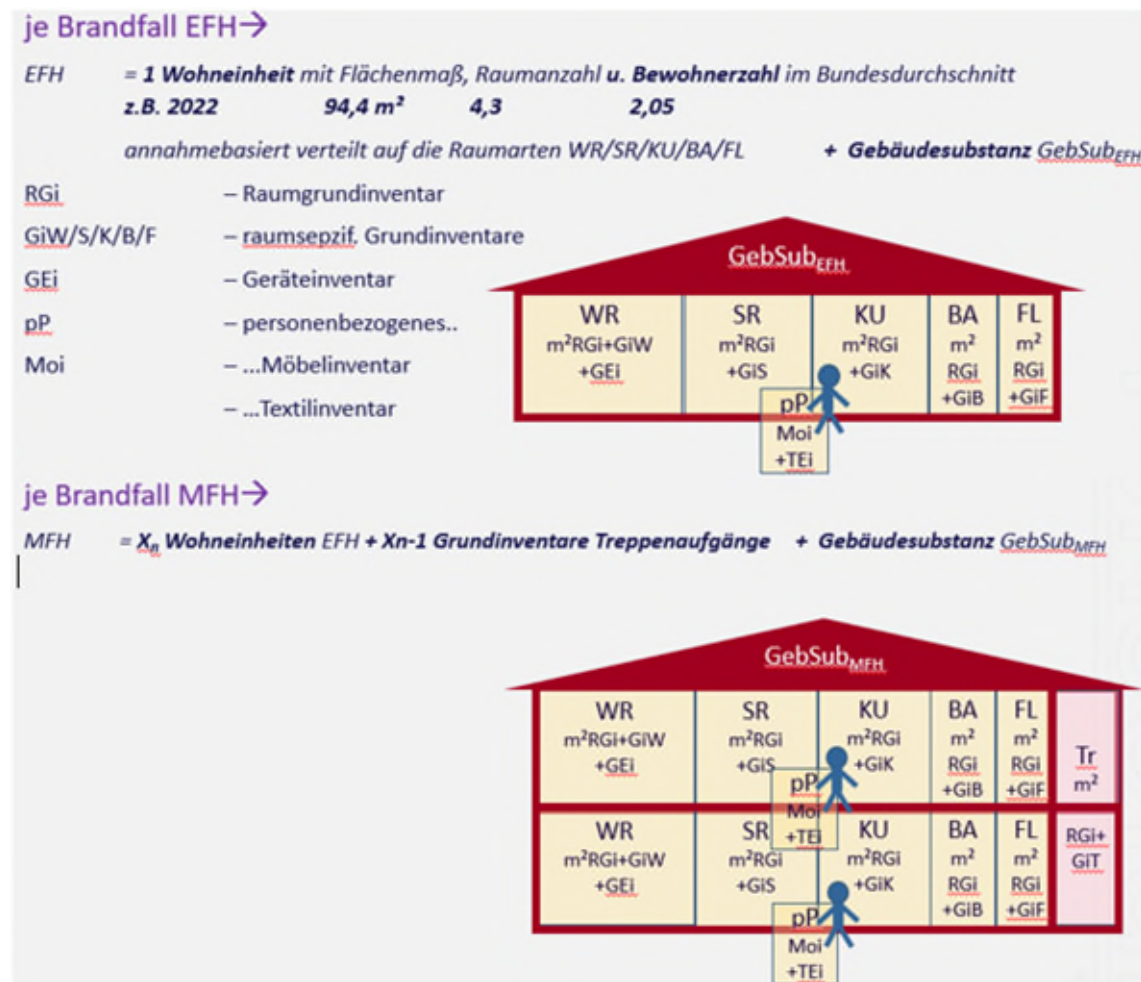
Diesem umfassenden Modellierungsschema für

- a) Ausstattung je Wohnungsräumlichkeit und Bewohner, zusammengefasst zu
- b) Inventar pro Wohneinheit
- c) Wohneinheit als Gebäudebasis, transponiert auf
- d) Zuschnitte der verschiedenen Wohngebäudekategorien

zunächst schrittweise folgend, lässt sich finalisierend zur emissionsrelevanten Gesamtbrandmasseberechnung gelangen. Hierbei werden die Brandmassewerte für den Gebäudekorpus der jeweiligen Wohngebäudekategorie mit dem dieser Gebäudekategorie entsprechenden Vielfachen an Wohnungsinventarbrandmasse aufsummiert.

Die nachstehende Grafik (Abbildung 2) versucht den Vorgang der Modellierung über die einzelnen Teilkomponenten nochmals illustrativ zusammenzufassen und nachzuzeichnen.

Abbildung 2: Modellierungsbausteine und deren Zusammenführung zur Herleitung der Brandmassenwerte für die Brandereignisfälle in verschiedenen Gebäudekategorien



Quelle: eigene Darstellung

3.1.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge

Wie eingangs im Abschnitt 2.2.2 festgehalten, ergibt sich der Zugang zu Angaben für die Bestimmung der Brandmasse von Kraftfahrzeugen über mehrere Quellen und umfasst dabei auch Überschneidungen, die für eine wechselseitige Werteverifizierung herangezogen werden können. Dabei sind z.B. Stückmasseangaben aus der Zulassungsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) [3], durch Angaben der Hersteller bzw. Produzentenverbände sowie den abfallstatistischen Erhebungen zur Altfahrzeugverwertung erhältlich. Die materielle Beschaffenheit der Kraftfahrzeuge wird ebenfalls in Hersteller bzw. Verbandsangaben und mittelbar in den abfallstatistischen Erhebungen thematisiert. Ergänzend liefern Studien (u.a. zu technologischen Ansätzen und Mengenströmen von Demontage- und Schredderbetrieben [33, 35]) sowie Meldeformate (z.B. des Umweltbundesamtes an die europäische Kommission zur Erfüllung von Verwertungsquoten im Altfahrzeugbereich) hierüber Einblicke.

Die Detailtiefe der verschiedenen Quellen fällt dabei sehr unterschiedlich aus. So sind bspw. die Hersteller- bzw. Verbandsangaben der PKW-Erzeugerbranche zum Materialeinsatz beim Fahrzeugbau in der Regel auf wenige Materialgruppen fokussierend und stark generalisierend, so dass nur die speziell von Autoreifenproduzenten bzw. zur Altreifenaufbereitung bereitgestellten Informationen überhaupt erst eine weitere Materialdifferenzierung für Autoreifen möglich machen. Ohne diese Zusatzdetail würde der seitens der PKW-Hersteller bzw.

Fahrzeugdemontagebetriebe verfügbare Informationsumfang nicht für eine hinreichend genaue Materialdifferenzierung ausreichen bzw. Grund sein können, signifikante Masseanteile (nämlich rund die Hälfte der Fahrzeugkomponente Reifen) „fehlerhaft“ einem anderen Materialschlüssel (z.B. Gummi) zuzuordnen bzw. anzurechnen. Nichtsdestotrotz bleiben selbst in dieser fortgeschrittenen Betrachtungstiefe zusätzlich bestehende Unterschiede bei den Reifenrezepturen (die u.a. mit den Saisonalvarianten an Sommer-, Winter- und Ganzjahresreifen sowie der geographischen Reifenherkunft im Zusammenhang stehen) wie auch in Bezug auf die entlang des Reifengrößenspektrums stark variierenden Stückmassen weiterhin unaufgelöst.

Die in Deutschland grundsätzlich von spezialisierten, registrierpflichtigen Demontagebetrieben vorzunehmende Zerlegung von Altfahrzeuge liefert als Gegenstück über die Abfallperspektive eine Art ‘bottom-up’-Zugang zum Materialmix in Kraftfahrzeugen. Vor allem werden im ersten Demontageschritt Betriebsflüssigkeiten abgelassen und gefährliche (Starterbatterien, Airbags u.ä.) sowie werthaltige Bauteile (Katalysatoren, große Kunststoffteile, Kabelbäume, Reifen u.ä.) entfernt. Der verbleibende Rest wird in Schredderanlagen zerkleinert, wobei eine Schwerfraktion und eine Leichtfraktion sowie ggf. weitere Fraktionen abgeschieden werden. Die jeweiligen Input- und Outputströme werden in Zuordnung zu entsprechenden Abfallschlüsselnummern Überwachungsstellen gemeldet bzw. der Abfallstatistik zugeleitet. Die dabei infrage kommenden Abfallschlüsselnummern geben jedoch nur vereinzelt die genauere stoffliche Beschaffenheit bzw. Materialanteile zu erkennen.

Für diesen Umstand mussten dann bspw. über Untersuchungsberichte zu Einzelfractionen oder Detailproblematiken der Altfahrzeugaufbereitung weitere Nachforschungen angestellt oder Annahmen getroffen werden. Als Schwerpunkt stellt(e) sich an dieser Stelle die Ermittlung von Stoffanteilen im nicht-metallischen und damit vornehmlich brandmasserelevante Materialien enthaltendem Schredderoutput dar.

Obwohl aufgefundene Daten/Studienmaterialien¹⁰ die Materialbilanzierung an dieser Stelle trotzdem vage belassen, wurde der Ausgangspunkt für die Brandmasseermittlungen zunächst primär bei den abfallstatistischen Daten gesucht. Den Rahmen setzt(t)en hierbei das bei Destatis unter der Kodierung 32111-0004 Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart, Abfallarten abrufbare Angabenformat [4]¹¹ bzw. die daran zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquote vom UBA mit eigener Methodik weitergeführten und im Berichtsverfahren an die zuständigen EU-Stellen verwendeten Aufbereitungen [32]. Mit darin adressiert ist u.a. die gewichtsmäßige Fahrzeugcharakterisierung in unterschiedlichen Betrachtungsebenen (Zulassungszeitpunkt vs. verschiedene Entsorgungsstadien), die in ungeklärte Differenzbeträge mündet und bei der Brandmassebestimmung ebenso besonderer Beachtung bedarf.

Im Kontext des Vorgehens und notwendigen Verschneidens von bzw. mit Daten verschiedener Herkunft kommt Quellenabgleichen eine zentrale Bedeutung zu. Wertangaben zu mutmaßlich selben Sachverhalten fielen in dieser Hinsicht jedoch teils durch Abweichungen markanter Größenordnung¹² auf. Gleichzeitig geht praktisch jede eingesehene Bilanzierungsquelle zu Altfahrzeugmaterialien mit Hinweisen auf Differenzbeträge (in Betrachtung von Input- vs. Outputmenge und Fahrzeuggewichtskennzahlen) einher. Hauptsächlich dieser Konstellation geschuldet, fehlt es dann ebenso auch den für die Brandmasseermittlung aufsummierten Massenbeträgen an Fahrzeugbestandteilen im Abfallstatus an vollständiger Übereinstimmung mit den jeweiligen Referenzwerten zu Fahrzeuggesamt- bzw. Demontagegewicht. Damit sowohl

¹⁰ hier insbesondere [33], [35]

¹¹ in der Hauptdatenbank GENESIS-Online für den Zeitraum 2006 - 2023 hinterlegt

¹² u.a. fällt im Referenzjahr 2020 die KOM-Meldung [32] gegenüber dem bei Destatis einsehbaren Wertegerüst für den Bereich Schreddermaterial [4] summarisch um ca. 65.500 t niedriger aus

diese Parität und gleichzeitig ein angemessenes Verhältnis mit den Anteilsgrößenordnungen der Hersteller zum Materialeinsatz zustande kommt, erweisen sich in der Endkonsequenz innerhalb einzelner Materialkategorien Auffüllbeträge als unausweichlich.

Auch das Betrachtungssegment Kraftfahrzeugbrände verzeichnet(e) damit letztlich einen Modellierungsbedarf insofern, dass die über Fahrzeuge hinsichtlich wichtiger Eckparameter (Gewicht, Komponentenanteile/-massen/-beschaffenheit usw.) aber in unterschiedlichen Zeit- und Betrachtungskontexten vorgehaltenen Daten bestmöglich zusammengebracht und auf ein Fahrzeug projiziert werden müssen, welches als Brandfall keinem dieser Kontexte genau entspricht. Bezugspunkte des erwähnten statistischen Datenbestandes sind einerseits nämlich die Zeitpunkte der Herstellungs- bzw. Zulassung und andererseits die der Abgabe von Fahrzeugen in die Entsorgung. Währenddessen beschreiben die Brandfälle einen Ereignisseintritt irgendwo zwischen beiden Zeithorizonten und prägen damit das Dilemma, dass dem Gewicht eines Neufahrzeuges (Fahrzeugleer- bzw. Zulassungsmasse) und dafür ggf. vorliegender Aussagen zur Materialbeschaffenheit nunmehr Gewichtswerte für ein in die Verwertung gelangendes Altfahrzeuges in Form von Abgabe- und Demontagemasse und Mengen für dabei gewonnene Abfallströme gegenüberzustellen sind.

Betrachtet man in diesem Spannungsfeld jeden Brandereignisfall als einen, der ein Fahrzeug im Durchschnittsalter des Bestandes betrifft, so ist hierfür -ausgehend vom Jahr des Ereignisses- der Leermassewert eines Neufahrzeuges um das geltende Bestandsdurchschnittsalter zurückliegenden Zulassungsjahr heranzuziehen¹³. Gleichzeitig kann daran sachengerecht allerdings nur mit dem Wertgerüst der Altfahrzeugverwertung aus dem Ereignisjahr bzw. dem für die Stilllegung prognostizierten Jahr als Datenbasis zur Materialdifferenzierung angeknüpft werden. So bewirkt auch dieser (zeit- wie erhebungsimmanente) Versatz, dass Statistikwerte und Berechnungsergebnisse nur bedingt korrespondieren und gewisse Inkompatibilitäten auftreten können.

Auch die im Rahmen dieser Studie in Bezug auf das Stichjahr 2020 durchgeführte Brandmasseermittlung für einen Kraftfahrzeug-Brandereignisfall setzt insofern auf diesen zwei statistischen Grundpfeilern auf und vollzieht im dadurch gesetzten Referenzmassenkorsett eine Zusammenführung der Materialbeträge, bei der zum Masse(differenz)ausgleich schlussendlich auf Kunststoff abgestellt wird (s. Auffüllposition in *Ergebnisdatei 'Berechnung_PKW'*).

Der erläuterten Methodik folgend, bilden der Ansatz eines Fahrzeuggesamtgewichtes aus dem Zulassungsjahr 2010¹³ und die Altfahrzeugverwertungsbilanz zum besagten Stichjahr dabei die Ausgangsgrößen. Letztere wurde dafür entlang der Anzahl aus Deutschland zur Verwertung in Demontage – und Schredderanlagen behandelter Altfahrzeuge auf ein Einzelfahrzeug umgelegt. Die Wahl des Stichjahres ist dabei insbesondere durch die Verfügbarkeit der statistischen Daten und Überschneidung mit einer höheren Zahl an zusätzlichen Angaben, Studienergebnissen und Untersuchungen zu diesem Zeitraum begründet.

Der Wertansatz in besagter Form bringt mit den unter der Sammelbezeichnung 'Fahrzeugkarosse' subsummierten (quasi fest im Fahrzeug eingebauten) Komponenten bereits den Großteil eines Fahrzeuges zur Betrachtung. Im Hinblick auf die Gesamtmasse lässt sich unter bezeichnetem Vorgehen beim Stichjahrbeispiel bei 1,1014 t für die Bestimmung der emissionsrelevanten Brandmasse ansetzen. Bei nur 2 % Abweichung wird dem statistischen Ausgangsgewicht von 1,124 t eines Altfahrzeuges in der Verwertung damit gut entsprochen.

¹³ z.B. beträgt das Alter eines im Jahr 2020 zum Brandobjekt gewordenen Fahrzeuges dann 9,6 Jahre, womit dessen Ausgangsgewicht mit dem der mittleren Leermasse für Neuzulassungen in 2010 anzunehmen ist.

Die Ausdifferenzierung nach Materialien zeigt gegenüber den Orientierungsgrößenordnungen im Fahrzeugbau dann auch nur geringe, in sich plausible Abweichungen, mit Kunststoffen als einziger Ausnahme. Bei der Brandmasse ist diese Materialgruppe daher mit einem zusätzlichen Auffüllbetrag berücksichtigt, der sich am bezeichneten Orientierungsschlüssel in Bezug auf das Fahrzeugzulassungsgewicht als Referenzwert ausrichtet.

Beachte

Aufsummiert ergeben alle Materialbeträge (inklusive Auffüllbetrag) für den Berechnungsteil der 'Fahrzeugkarosse' die Gesamtmasse von 1,2703 t. Gegenüber dem Referenzgewicht eines den Bestandsaltersdurchschnitt repräsentierenden (d.h. in 2010 zugelassenen) Fahrzeuges bedeutet das eine Abweichung von etwas über 10 %. Die emissionsrelevante Brandmasse umfasst hieran gemessen dann 28,2 % (s. entsprechendes *Arbeitsblatt in der Ergebnisdatei 'Berechnung_PKW'*).

Zur Einordnung des genannten Wertespektrums hinsichtlich seiner Belastbarkeit lassen sich die Ergebnisse der Praxisuntersuchungen zur Evaluierung der Ermittlungsmethodik bei den Altfahrzeugverwertungsquoten für das UBA heranziehen [33]. Hier bewegten sich die in Untersuchungskampagnen bei Demontagebetrieben in den Jahren 2015 und 2016 festgestellten Altfahrzeuggewichte in der mittleren Spannweite von 1.002 bis 1.049 kg und wiesen damit leichte Abweichungen vom durchschnittlichen Fahrzeuggewicht nach Fahrzeugbrief auf.

Die der Demontage zurechenbare Materialentnahme lag in besagten Untersuchungen bei etwa 10-11 % der Fahrzeugausgangsmasse, dabei entfielen 5-6 % auf metallische und rund 5 % auf nichtmetallische Komponenten. Die nachfolgende Restkarossenverwertung wurde zusätzlich mit 67-70 % an metallischem und ca. 17-23 % nichtmetallischem Output bilanziert [33]. Die Ergebnisse bekräftigen, dass ein Kraftfahrzeug im Zustand des Eingangs in die Verwertung noch metallische Materialanteile in einer Spanne zwischen 72 % und 75 % sowie nichtmetallische Stoffanteile zwischen 23 % und 28 % aufweist. Gleichzeitig gaben auch diese Untersuchungen eine nicht aufklärbare Massedifferenz in der Größenordnung von etwa 2 % zu erkennen [33].

Der überwiegend im Verlauf der Nutzungsphase eines Fahrzeuges anzunehmende Brandfall verlangt es, neben den verbauten Fahrzeugkomponenten noch ein individuelles Bordinventar zu berücksichtigen. Ein solches ist in allen, für die Bestimmung bzw. Verifizierung der Brandmasse heranziehbaren Referenzgewichten nicht enthalten bzw. bestenfalls nur teilweise von Belang. Es handelt sich hierbei um die im Fahrzeug u.a. als Pflichtauflage (z.B. Warndreieck, Verbandskasten) aber auch aufgrund individueller Bedürfnisse (bspw. persönlicher Komfort, Kinder-/Tiermitnahme) für gewöhnlich zusätzlich mitgeführten Bordmittel. Diese wurden im Rahmen einer separaten Betrachtung dem Sammelbegriff 'Bordinventar' (s. auch so bezeichnetes *Arbeitsblatt in der Ergebnisdatei 'Berechnung_PKW'*) unterstellt und als Teil der emissionsrelevanten Brandmasse ebenfalls mit zur Anrechnung gebracht. Ausgenommen blieb aus Gründen des Doppelanrechnungsrisikos im Zuge der Gesamtinventaraufstellung die (vollständigkeitshalber ebenfalls mitangezeigte) Position zum Betankungsinhalt des Fahrzeugs.

3.1.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer

Wie in den Eingangsbetrachtungen vermerkt (vgl. Abschnitt 2.2.3), war es unrealistisch, den Brandfälle in diesem Segment eine Ausschließlichkeit von Abfallbehältnissen der Bauart MGB1.1 und gemischten Haushaltsrestabfällen als deren Inhalt zu unterstellen.

Ein gefestigtes Bild darüber wurde durch Recherchen und die Suche nach einschlägigen Statistikinformationen angestrebt. Obschon Fachkreise in Deutschland die Dokumentation des Brandgeschehens als stark ausbaufähig erachten, konnten einige ergänzende Bestätigungen und für die Brandmassemmodellierung wichtige Anknüpfungspunkte gefunden werden. So sind die in

der vfdb-Brandschadenstatistik zusammengeführten Informationen bspw. dahingehend zu deuten, dass Brandfälle bei Abfallcontainern zahlenmäßig im Bereich betrieblicher Standorte ihren überwiegenden Schwerpunkt haben [1]¹⁴. Demnach übersteigt die von Werkfeuerwehren für 'Müllbehälter' erfasste Fallzahl bei Weitem die der bei anderen Feuerwehren erfassten Vorkommnisse. Laut dieser Erhebungen

- entfielen im Erfassungsfenster 2013-17 von 1.193 Brandereignissen mit Angaben zum vermutlichen Objekt der Brandentstehung 285 auf Abfallbehälter (ca. 24%, im Vergleich zu 22% im Zeitfenster 2013-15). Verteilt über Gemeindegrößenklassen ist der Anteil dieser Brandfälle mit 3-12 % gering.
- sind entsprechende Brandfälle in der Untersuchungsgruppe Werkfeuerwehr mit einer Anzahl von 207 (84 %) besonders auffällig, innerhalb der sonstigen Feuerwehrrarten schwankt dieser Anteil zwischen 2 und 32 % und liegt im Mittel bei 8 %.
- rangieren bei den auslösenden Ursachen offenes Feuer (75%), sonstige einschließlich unbekannter Ursachen (13%) und Vorsatz (10%) an vorderster Stelle.
- finden Brandereignisse in dieser Fallkategorie am häufigsten auf 'Verkehrsanlagen', demnach also an weitgehend zugänglichen Behälteraufstellorten statt (vgl. Abbildung 3).

Für die Modellierung konnte hieraus geschlussfolgert werden, dass

1. die Abfallzusammensetzung in Behältern des Typs MGB1.1., nicht nur aufgrund der unmittelbaren Übereinstimmung zur Bezugseinheit, sondern als tatsächlich auf 'Verkehrsanlagen' verbreitet zugänglichster Behältertyp¹⁵ direkt herangezogen werden kann und
2. auch der eher der Zuständigkeit von Werksfeuerwehren unterstellte (Erzeuger)Bereich von Gewerbeabfällen anteilig mit in die Brandmasseermittlung einzubeziehen ist.

Abbildung 3: Verknüpfung von Gebäudenutzung und vermutlichem Objekt der Brandentstehung in absoluter Anzahl nach Datenlage zur vfdb-Brandschadenstatistik

ERFASSUNGSKRITERIUM	WOHNEN	MISCHNUTZUNG	INDUSTRIELLE NUTZUNG	LAGER	MESSE, AUSSTELLUNG	VERWALTUNG, BÜRO	VERSAMMLUNGS-STÄTTE	VERKAUFS-STÄTTE	BEHERBERGUNGSBETRIEB	GASTRONOMIE, RESTAURANT	SCHULE, KINDERGARTEN	KRANKENHAUS, ALTENHEIME	VERKEHRSANLAGE	ENERGIEVERSORGUNG	GARAGE, PARKHAUSER	LANDWIRTSCHAFT	SONSTIGE NUTZUNG	SUMME
	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]	[ANZ.]
Elektrische Installation	25	9	7	0	0	8	1	3	3	1	1	3	1	3	3	1	5	74
Einrichtungsgegenstand	47	0	1	0	0	1	0	3	2	1	1	3	1	0	0	0	5	65
Herd, Ofen	231	10	3	2	0	7	2	4	12	5	4	13	3	0	0	0	4	300
Lagermaterial	10	2	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2	21
Maschine, elektr. Gerät	36	1	22	0	1	7	1	2	8	2	1	8	7	1	0	0	4	101
Müllbehälter	10	4	2	11	0	8	8	4	1	3	2	7	176	0	6	0	18	260
Sperrmüll / Unrat	26	6	1	2	2	2	1	1	0	0	0	0	5	0	1	0	9	56
Sonstiges Objekt	75	8	7	8	0	3	1	4	2	1	2	9	6	1	5	2	17	151
Objekt unbekannt	60	8	6	5	1	0	0	1	1	1	2	2	0	0	4	2	15	108
Summe	520	48	49	30	4	36	15	24	29	14	13	45	199	5	21	5	79	1.136

Quelle: Darstellung Bildauszug aus vfdb-Brandschadenstatistik, 2020 [1]

Hinweise zu den realen Gegebenheiten der Brandverteilung auf MGB1.1 in den verschiedenen Erfassungssystemen bot das gesichtete Material indes keine. Über das zusätzlich erkannte

¹⁴ bezeichnete Quelle [1] enthält dabei den Vermerk (S.6), dass die von Berufs-, Freiwilligen und Werkfeuerwehren einfließenden Daten für Deutschland noch nicht als repräsentativ abgesichert gelten

¹⁵ im Unterschied zu Behältern kleinerer Größe, wie MGB60, 80, 120, 240, deren Bereitstellung aufgrund ihrer überwiegend haushaltsscharfen Zuteilung weitaus seltener in zugänglichen Verkehrsanlagen erfolgt

Beachtungserfordernis für Brände gewerblicher Abfälle hinausgehend, konnte groborientierend weiterhin nur vermutet werden, dass die Brandwahrscheinlichkeit bei Behältern zur Erfassung von PPK am höchsten ausfällt, bei Behältern für die Wertstoffgemische LVP und Gewerbeabfälle zur Verwertung etwas niedriger liegt und am geringsten für Haushaltsrestabfallbehälter und Behälter für Bioabfälle ist.

Zur Betrachtung gehören, aber ebenso noch zur Klärung gebracht werden müsste außerdem, wie das gesamtdeutsche Verteilungsverhältnis an Behältern unterschiedlichen Volumens auf die verschiedenen Erfassungssysteme ausfällt und wie viel häufiger MGB1.1 bezogen auf die Brandzahlen gegenüber anderen Behältergrößen brennen. Um auf die Brandanzahl von MGB1.1 umgelegt, deutlich etwas zu verschieben, bedürfte es sehr zahlreicher Brandfälle bei kleineren Behältern, da jeder MGB1.1 ein Mehrfaches dieser darstellt (z.B. ca. 4,5 MGB 240 l, ca. 9 MGB 120 l oder 14 MGB 80 l). Dies müsste sich allerdings in höheren Ereigniszahlen ausdrücken.

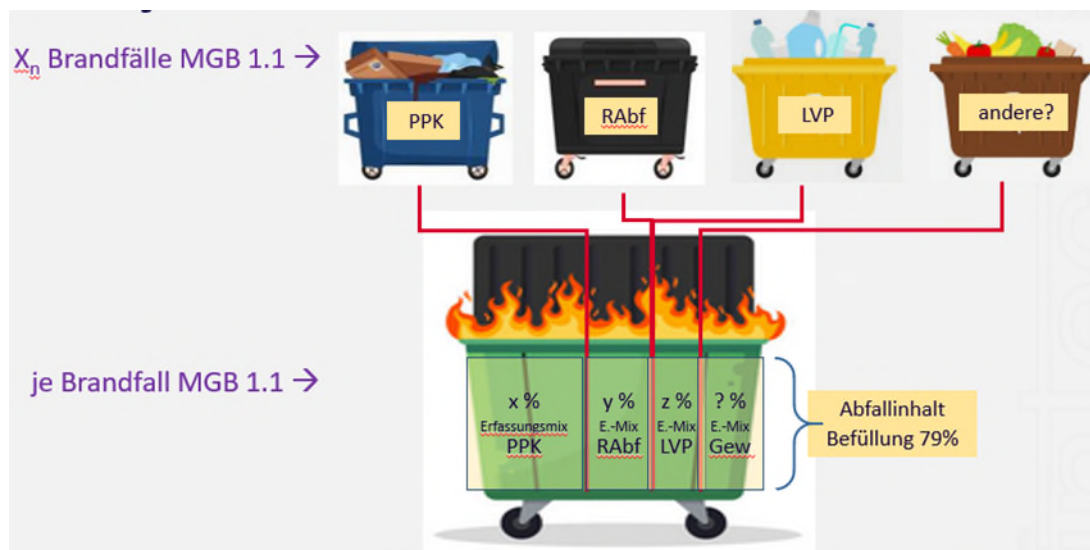
Abfallanalysen zufolge gilt es indes als belegt, dass verschiedene Behältergrößen im gleichen Erfassungssystem einige Abweichungen hinsichtlich ihrer Abfallinhalte aufweisen. Hierbei sind deren Bereitstellungsorte wesentlich, zugleich aber auch ein Grund, der ein Vielfaches an Bränden kleinere Behälter gegenüber MGB1.1 sehr unwahrscheinlich macht. Über alle Erfassungssysteme, den Fokus auf letztgenannte Behältergröße als tatsächlich überwiegend betroffenem Brandobjekt zu legen, erscheint insofern zusätzlich gerechtfertigt.

Vor diesem Hintergrund verkörpert es eine valide Annahme, dass jeder Brandereignisfall eines MGB1.1 in Bezug auf seinen Inhalt, die Proportionalität des die Erfassungssysteme real betreffenden Brandgeschehens abbildet. Sollten also bspw. von 100 Brandfällen 75 auf PPK-Container, 20 auf LVP-Container und 5 auf Restabfallcontainer entfallen, so ginge dies auch dem Brand von 100 Containern gleichzusetzen, deren Inhalt jeweils immer zu 75 % dem Inhalt von PPK-Containern, zu 20 % dem Inhalt von LVP-Containern und zu 5 % dem Inhalt von Restabfallcontainern entspricht.

Wie beim Brandereignisfall im Wohngebäudesegment synthetische Gebäude zur Modellierung der Brandmasse für die unterschiedlichen Gebäudekategorien die Basis bilden, wird damit ein aus Anteilen der verschiedenen Erfassungssysteme synthetisch befüllter MGB1.1 der Brandmasseermittlung für Abfallcontainer zugrunde gelegt. Den vorbezeichneten und letztlich auch so verwendeten Modellierungsansatz illustriert zum besseren Verständnis Abbildung 4.

Da zu den verschiedenen Erfassungssystemen gewonnene Daten zur Abfallzusammensetzung in dieses Modell eingehen, ist der für die Abfallanalyse maßgebliche Bestimmungszeitpunkt (also der Probenahmezeitpunkt) gleichzeitig auch als der des Brandeintritts zu betrachten. Erst durch den in diesem Moment im Abfallbehälter vorliegenden Füllstand bestimmt sich nämlich auch der Umfang des darin verbrennenden Behälterinhaltes.

Abbildung 4: Der Herleitung der Brandmassenwerte bei Brandereignisfällen in Abfallcontainern MGB1.1 zugrunde gelegter Modellierungsansatz für den Behälterinhalt



Quelle: eigene Darstellung

Der darauf aufgebaute Ansatz bleibt damit verknüpft, auch eine Brandgeschehensverteilung für die Abfallerfassungssysteme ermittelt zu bekommen bzw. modellieren zu müssen.

Das Hauptproblem hierbei waren fehlende Statistiken und Dokumentationen, wie auch die unerwartet niedrige Befähigung unmittelbar Betroffener, zu diesem Sachverhalt Einschätzungen zu treffen. Weder auf das Brandsegment angesprochene Eigentümer von Abfallcontainern (öRE, Entsorgungsbetriebe) noch Feuerwehrvertreter bzw. Brandfachleute¹⁶ zeigten sich in der Lage, Brandereigniszahlen, Fallschwerpunkte oder Häufungsproportionen in den verschiedenen Erfassungssystemen oder Behältergrößenklassen konkret zu benennen. Vom Hinweis auf die vergleichsweise (durch die vfdb-Brandschadenstatistik [1] im Übrigen bestätigte) geringe Häufigkeit der Ereignisse abgesehen, blieb den Versuchen selbst ein grobes Einschätzungsbild versagt. Auch die zusätzliche Bereitstellung eines Fragebogens vom Forschungsdurchführenden erbrachte in dieser Richtung keinen verwertbaren Ergebniseingang.

Daraufhin nahmen im Internet weitergeführte Recherchen Pressemeldungen zu Brandfällen und Webauftritte der Feuerwehren, wozu teils auch Einsatzübersichten gehören, in den Blickpunkt. Insgesamt kamen so bei mehr als zehn Feuerwehren entsprechende 'Statistiken' zur Sichtung und Auswertung, vereinzelt konnten für einige Jahre rückwirkend Einblicke getätigt werden¹⁷.

Dabei war feststellbar, dass die Einsatzkategorie 'Brand Abfall- bzw. Müllcontainer' durchaus gängig, allerdings aus weiteren Einsatzdetails oftmals nichts zur Containerart/-größe und dem genauen Brandumfang und -inhalt entnehmbar ist. Über das Kalenderjahr liegt die Fallzahl bei den Wehren mit entsprechenden Angaben i.d.R. in einem sehr niedrigstelligen Bereich, augenfällig ist eine erhöhter Ereigniseintritt um Silvester/Anfang Januar. Wurde das Brandobjekt anstelle des zumeist verwendeten Allgemeinbegriffs Müllcontainer doch genauer bezeichnet, traten tatsächlich Verweise auf 'Altpapiertonnen' (d.h. Behälter für PPK) gehäuft zutage. Vereinzelte Nennungen entfielen bei den Wehren auch noch auf Restabfall- und Alttextilcontainer, wobei für letztere ganz klar nicht der Behältertyp MGB1.1 in Betracht kommt.

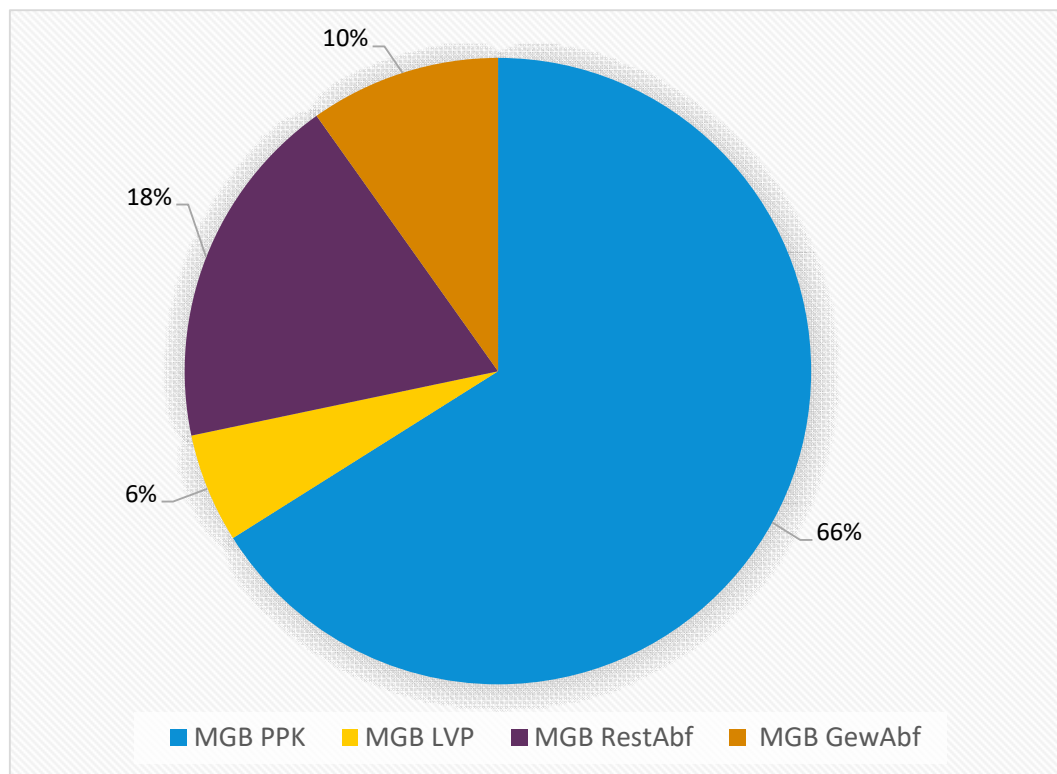
¹⁶ darunter der vfdb-Präsident Hr. Aschenbrenner (Direktor der Feuerwehr Dortmund) und der stellv. vfdb-Generalsekretär Hr. Wingler-Scholz, schriftliche Mitteilung vom 09.10.2025 an INTECUS

¹⁷ Z.B. eingesehene Einsatzübersichten der Feuerwehr Eisenach, Feuerwehr Bamberg, Feuerwehr Landshut, Feuerwehr Wutha, Feuerwehr Bad Doberan, Feuerwehr Staßfurt, Feuerwehr Dresden

Eine konkrete Bezugnahme auf das Erfassungssystem LVP war für den auf die Jahre 2020-25 angelegten Sichtungszeitraum nur in einer einzigen Pressemeldung auffindbar. Die auf diese Weise erhaltenen Einblicke sind für eine statistisch belastbare Aussage zwar ungeeignet, konnten aber in Verbindung mit sonstigen Hinweisen immerhin einen Orientierungsrahmen setzen und die eigenen Annahmen zur Brandwahrscheinlichkeiten in den Erfassungssystemen mit MGB1.1 etwas weiter verfestigen.

Hieran ausgerichtet wurde schlussendlich eine Brandgeschehensverteilung als Grundlage zur Zusammenstellung des synthetischen Abfallbehälterinhaltes modelliert (s. Abbildung 5 und Datenablage im *Arbeitsblatt 'Brandverteilung' der Ergebnisdatei Berechnung_MGB.xlsx*). Danach überwiegt der Brandmassebeitrag aus dem Erfassungssystem PPK, des Weiteren entfällt ein höherer Brandmasseanteil auf die für die Erfassung von LVP und Gewerbeabfall zur Verwertung typischen Wertstoffgemische. Im die Restabfallerrfassung betreffenden Anteil könnte man das Gewerbe ebenfalls mit repräsentiert sehen, da sich Abfallzusammensetzung und -entsorgung hier der haushaltnahen Erfassung weitgehend ähneln.

Abbildung 5: Bei der Brandmasseermittlung angesetztter Verteilschlüssel für die Anteile am Abfallinhalt aus verschiedenen Erfassungssystemen



Quelle: eigene Darstellung

Für die Brandmasseermittlung zum Behälterkorpus wurde grundsätzlich eine Behälterausführung in Vollkunststoff herangezogen (Datenablage im *Arbeitsblatt 'Containerkorpus' der Ergebnisdatei Berechnung_MGB.xlsx*). Diese Festlegung berücksichtigt den Umstand, dass die heutzutage eingesetzten Abfallsammelbehälter weit überwiegend (hauptsächlich aus HDPE gefertigte) Vollkunststoffausführungen sind. Beginnend ab der Größenklasse 1.100 l sind Behälter aus Stahlblech zwar durchaus noch praxisüblich, allerdings vorwiegend im Gewerbesektor. Hier unterliegen die Behälter weniger oft einem Austausch und häufig höherer Aufmerksamkeit bezüglich Beständigkeit und Brandfestigkeit.

Bei den die Abfallzusammensetzung beschreibenden Daten ließ sich auf den umfassenden Bestand des Forschungsdurchführenden aus eigenen Untersuchungen zurückgreifen. Ausgewählt wurden Daten, die auf Basis einer gesicherten repräsentativen Methodik¹⁸ für verschiedene Körperschaften bzw. Auftraggeber in deren Territorien im Zeitfenster zwischen 2015 und 2025 erhoben wurden. Die herangezogenen Datensätze garantieren dabei sowohl eine Abdeckung von Landkreis- als auch Stadtgebieten, erreichen allerdings nicht den Umfang, um hier die bundesdeutsche Verteilung entsprechender Territorialstrukturen und Größenklassen ausbalanciert abzubilden. Dem Beauftragungsprofil geschuldet, ist regional zudem ein Schwerpunkt in den östlichen Bundesländern gegeben. Eine Offenlegung der konkreten Herkunft und gebietsspezifischen Zuordnung der letztlich genutzten Datensätze ist aufgrund des Auftraggeberschutzes und bestehender Veröffentlichungsrestriktionen nicht möglich.

Durch die unmittelbar vorliegenden Urdaten ließen sich die Erhebungsergebnisse speziell für MGB1.1 in Form von Datensätzen zur Materialzusammensetzung in dieser Behälterkategorie zusammenführen. Das Tableau an Materialgruppen und deren Beurteilung nach Brennbarkeit und wesentlichen Materialanteilen (s. Abschnitt 2.1) bot dabei einerseits Orientierung, fand aber auch genau hierüber Nachschärfung. Insbesondere die Gruppe an Verbunden betreffend, galt es Abfallanalyseerkenntnisse und weitere Produkt(beschaffenheits)informationen miteinander abzugleichen. Gleichzeitig ermöglichten es die Urdaten, aus den Gewichten und Füllgraden der in die Analyse eingegangenen MGB1.1 den Bezugswert für die Gesamtbrandmasse bestimmt zu bekommen.

Beachte

Der betrachtete Brandereignisfall MGB1.1. entspricht demnach einem etwa dreiviertel vollem Abfallbehälter, dessen Inhalt an Abfällen ein Gesamtgewicht von 61,7 kg aufweist. Der Behälterkorpus besteht dabei aus Kunststoff.

Zu den Erfassungssystemen PPK, LVP und Haushaltsrestabfälle flossen jeweils acht Datensätze in die Bestimmung eines mittleren Wertes zur materialanteiligen Zusammensetzung und Gewichtsverteilung des Brandmassebeitrages am synthetischen Abfallbehälter MGB1.1 ein. Die Daten sind in der *Ergebnisdatei Berechnung_MGB.xlsx* in *Arbeitsblättern mit der um das jeweilige Erfassungssystem ergänzten Bezeichnung 'BM-Anteil MGB...'* einzeln abgelegt und als synthetischer Behälterinhalt in einem weiteren *Arbeitsblatt 'BM Inhalt MGB'* zusammengeführt. In Summe liegt eine Gesamtstichprobenzahl von 310 analysierten MGB1.1. hinter dem daraus erhaltenem Ergebnisendwert.

Der Brandmasseanteil aus dem Gewerbeabfallbereich konnte in Ermangelung ausreichend vorhandener Abfallanalysen nur mithilfe eines einzelnen Datensatzes modelliert werden. Dieser bezieht sich zudem auf den Inputstrom entsprechender Abfälle in Sortier-/Behandlungsanlagen, repräsentiert damit zwar eine größere Grundgesamtheit aber nicht zwingend nur Inhalte der Behältergröße MGB1.1.

Zum Zwecke einer vergleichenden Auswertung der zeitlichen Veränderungsdynamik im „synthetischen Abfallbehälter“ wurden später außerdem noch zu den bundesweiten Hausmüllanalysen veröffentlichte Datensätze genutzt [56] [57].

¹⁸ i.d.R. bestimmt durch die bundesweit anerkannte und angewandte „Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen“

4 Ergebniszusammenfassung

4.1 Emissionsrelevante Brandmassen und Anteil 'fossil'

4.1.1 Betrachtungssegment Gebäude

4.1.1.1 Ergebniswerte

Aus der Brandmassenermittlung zum Korpus und Inventar von Wohngebäuden der verschiedenen Gebäudekategorien resultieren, differenziert nach Materialgruppen, als Brandmasseanteil aus dem

► Gebäudekorpus (Tabelle 2)

Tabelle 2: Auf den Gebäudekorpus zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien [in Tonnen]

Materialart	EFH	ZFH	MFH 2-geschossig	MFH 4-geschossig	MFH 6-geschossig
Kunststoffe	0,861	0,861	3,244	3,244	3,244
Holz	7,277	7,277	10,488	10,488	10,488
Holzwerkstoff	0,238	0,238	0,217	0,217	0,217
Papier/Kartonage	0,013	0,013	0,045	0,045	0,045
in Summe	8,3894	8,3894	13,9938	13,9938	13,9938
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,9256	0,9256	3,3311	3,3311	3,3311

Quelle: eigene Darstellung

► Gebäudeinventar (Tabelle 3)

Tabelle 3: Auf das Gebäudeinventar zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien [in Tonnen]

Materialart	EFH	ZFH	MFH 2-geschossig	MFH 4-geschossig	MFH 6-geschossig
Kunststoffe	0,653	1,413	3,045	6,416	8,939
Holz	0,595	1,304	2,791	5,879	8,194
Holzwerkstoff	1,069	2,156	4,828	10,191	14,165
Textilien	0,265	0,530	1,194	2,520	3,501
Papier/Kartonage	0,093	0,187	0,421	0,888	1,234
unspezif. biogenes Material	0,001	0,002	0,003	0,007	0,010
Gummi	0,003	0,006	0,013	0,026	0,037
nicht näher zuordenbar	0,016	0,032	0,071	0,151	0,209
in Summe	2,6944	5,6297	12,3656	26,0784	36,2885
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,9351	1,9794	4,3172	9,1019	12,6710

Quelle: eigene Darstellung

Die Ergebniswerte zu beiden Berechnungsteilen lassen erkennen, dass in den Ein- und

Zweifamilienhäusern der Gebäudekorpus mehr emissionsrelevante Brandmasse liefert als deren Gebäudeinventar. Erst bei (den größeren) Mehrfamilienhäusern kippt dieses Verhältnis und die Brandmasse des Gebäudeinventars (s. Tabelle 3) überwiegt. Dies erscheint einerseits plausibel, ist aber auch durch den konstanten, die weitere Gebäudegrößenveränderung unberücksichtigt lassenden Brandmassewert zum Gebäudekorpus beeinflusst (s. dazu auch Abschnitt 4.1.1.2).

Mit der Zusammenführung der entsprechenden Teilwerte ergeben sich pro Brandfallereignis in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien dann die folgenden anrechenbaren Gesamtbrandmassen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Emissionsrelevante Gesamtbrandmasse in einer der jeweiligen Wohngebäudekategorien differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]

Materialart	EFH	ZFH	MFH 2-geschossig	MFH 4-geschossig	MFH 6-geschossig
Kunststoffe	1,514	2,274	6,289	9,660	12,183
Holz	7,872	8,581	13,279	16,367	18,682
Holzwerkstoff	1,307	2,395	5,045	10,408	14,381
Textilien	0,265	0,530	1,194	2,520	3,501
Papier/Kartonage	0,106	0,200	0,466	0,933	1,279
unspezif. biogenes Material	0,001	0,002	0,003	0,007	0,010
Gummi	0,003	0,006	0,013	0,026	0,037
nicht näher zuordenbar	0,016	0,032	0,071	0,151	0,209
in Summe	11,0837	14,0190	26,3594	40,0722	50,2823
davon Emissionskategorie 'fossil'	1,8607	2,9051	7,6483	12,4330	16,0021

Quelle: eigene Darstellung

Die Unterscheidung der materialgruppendifferenziert gewonnenen Massewerte hinsichtlich ihres Anteils fossiler und biogener Prägung basiert auf der Datenlage, die jeder *Ergebnisdatei 'Brandmassen_Gesamtwerte....' im Arbeitsblatt 'Andockliste Fossilität'* beige stellt worden ist. Die darüber für den fossilen Anteil erhaltenen Beträge sind jeweils in der letzten Zeile jeder Ergebnistabelle zusammengefasst. Sie verkörpern das im Sinne des Untersuchungsauftrages zu ermittelnde und für die Berichterstattung zur Quellkategorie 5E relevante Potenzial an klimarelevanten Emissionen aus Brandereignissen in den jeweiligen Betrachtungssegmenten.

4.1.1.2 Ergebniseinschätzung und Lücken

Sowohl die Informationen zum Statistikmodell für die Ermittlung der Brandereigniszahlen und deren generelle Auslegung als Full-Scale Brände, als auch zahlreiche Erkenntnisse aus den Recherche- und Modellierungsarbeiten zu diesem Leistungsauftrag machen deutlich, dass der Gesamtbestimmungsansatz zu CO₂-Emissionen durch (fossile) Brandgüter in der Quellkategorie 5E sehr theoretisch gefasst ist, insofern auch nur eine Annäherung an die tatsächlichen Emissionsumfänge bei Brandereignissen in den jeweiligen Segmenten darstellen und dabei hohe Abweichungswahrscheinlichkeiten beinhalten kann.

Ebenso ist auch für den durch die Untersuchung zustande gekommenen Werterahmen mit zu vermerken, dass die Brandmassen im Sinne der wiedergegebenen Berechnungsergebnisse nicht

unmittelbar mit Kohlenstoffmassen gleichzusetzen und somit auch nicht direkt bzw. sogar ausschließlich als CO₂-Emissionsquelle interpretierbar sind. Zudem kann auch die biogen geprägte Brandmasse Emissionen kritischer Art hervorbringen (vergleiche vgl. [58]), darunter Methan sowie, durch die zumeist nicht „optimal“ ablaufenden Verbrennungsprozesse und resultierenden Schwelbrände, bspw. auch Dioxine. Mit den ermittelten Brandmassen, einschließlich der Ausweisung ihres biogenen Anteils in den mitgelieferten Ergebnisdateien, bietet sich auf jeden Fall aber ein Ansatzpunkt, um Emissionsfolgen jeglicher Art zur Abbildung zu bringen, selbst wenn daraus keine Klimarelevanz ableitbar ist.

Unübersehbar liegt ein Schwachstellenpotenzial der Untersuchungsführung in den umfangreichen Modellierungen und darin einfließenden Annahmen, die aber an vielen Stellen aufgrund des Fehlens einer hinreichend genauen bzw. besseren Datenbasis unumgänglich sind.

In den Brandmassewerten zum Gebäudekorpus in Tabelle 2 spiegelt sich u.a. die mangelnde individuelle Ausdifferenzierbarkeit innerhalb der Gebäudekategorien als solche Schwachstelle wider (vgl. Abschnitt 3.1.1). Die dem ISBE entnehmbare Datenlage erlaubt demnach, eine Baumassenbetrachtung nur in der Unterscheidung von Ein-/Zweifamilienhäusern sowie Mehrfamilienhäusern, ungeachtet ihrer verschiedenen Bauformen, vorzunehmen. Dadurch fallen die Brandmassen auch nur in dieser Differenzierungsebene unterschiedlich aus und behalten dann über die zusätzlich getätigte Geschosshöhen-/Gebäudehöhenunterteilung hinweg einen konstanten Wert. Folglich liegt der Unterschied an Brandmasse des Gebäudekorpus für alle MFH betreffenden Ereignisfälle dann mit etwa dem Dreifachen des Berechnungswertes für EFH/ZFH in einer eher niedrig anmutenden Größenordnung.

Da mit der Gebäudehöhe und -fläche insbesondere auch die Deckenanteile als besonders brandmasserelevante Baukomponenten (u.a. Zwischenböden, Balken, Dielungen) zunehmen, würde bspw. ein Exponentialfaktor, über den je zusätzlicher Geschossebene das noch hinzukommende Deckenmaterial einberechnet wird, wahrscheinlich eine sachgerechtere Bilanzierung für die verschiedenen Gebäudeausprägungen bedeuten. Die benötigten Werte zur Brandmassebestimmung aus dem Deckenanteil stehen über das ISBE bereits zur Verfügung. Die hierfür im synthetischen Gebäuderepräsentanten momentan angesetzte Geschosshöhe aufzuklären würde einen künftigen Verbesserungsbeitrag zum Untersuchungsgegenstand liefern, indem dies für die entsprechende Grundlage zur Bestimmung bzw. Anwendung des Exponentialfaktors sorgen könnte.

Die synthetische Aggregation im ISBE sollte die Repräsentativität der entsprechenden Gebäude in Deutschland indes auch jetzt schon soweit sicherstellen, dass die Massekennzahlen den Gebäudekorpus im Bestandsquerschnitt kennzeichnen und die einzelnen Überschätzungen bzw. Unterschätzungen an Brandmasse über die Brandfallereigniszahlen einigermaßen zum Ausgleich kommen.

Ein etwas kritischeres Problem manifestiert sich im Wohngebäudesegment demzufolge vielleicht durch den zur Inventarbestimmung verwendeten Mindestausstattungschlüssel nach SGB, wonach das in Deutschland anzutreffende Wohn(ungs)bild und -inventar nur auf unterster Schwelle abgebildet wird. Allgemein kann durch das vorherrschende Wohlstandsniveau in der Realität eine weitaus umfangreichere durchschnittliche Wohnausstattung angenommen werden, als die der Modellierung zugrunde gelegte.

Auch finden bspw. die in Wohnungen vorgehaltenen Bestände an Lebensmitteln inkl. Verpackungsmaterialien, verwahrte Erinnerungs- und Ersatzgüter sowie Luxusanschaffungen als übliche Inventarbestandteile darin bislang keine Berücksichtigung. Allerdings fehl(t)en hierzu vollkommen die erforderlichen Daten- bzw. Modellierungsbezüge.

Hinterfragt werden kann überdies das Zutreffen einer Reihe eher konservativ getroffener, jedoch kaum verifizierbarer Annahmen (z.B. ein Fenster pro Raum) zum Raumzuschnitt.

Bei den für Brandfälle im Gebäudesegment ermittelten Brandmassen darf entsprechend der benannten „Schwachstellen“ von einer Unterschätzung, jedoch mindestens nur der niedrigsten realen Größenordnung ausgegangen werden.

Das wiederum gilt es angemessen der Auslegung der Brandfallkonstellation und dafür genutzten Ereigniszahlen gegenüber zu stellen.

In jedem Betrachtungssegment, so auch bei Gebäuden, sind Full-Scale Brände tatsächlich Ausnahmeereignisse⁹, d.h. nur ein Bruchteil des Betrachtungsobjektes wird tatsächlich ein Raub der Flammen und dabei vollständig vernichtet und in Form von Emissionen relevant [55]. Insofern kann der niedrigste Ansatzwert an Brandmasse vor dem Hintergrund der Ereignisfallauslegung zu Gebäudebränden auch immer noch eine Überschätzung darstellen oder auch als beste Annäherung an das Realgeschehen begriffen werden.

4.1.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge

4.1.2.1 Ergebniswerte

Mit einem Anteil von 92,5 % steckt im Brandfall der Großteil der Brandmasse eines Kraftfahrzeuges in den mehr oder weniger dauerhaft im Fahrzeug verbauten und dessen grundsätzliche Betriebsweise gewährleistenden Materialien (hier unter dem Sammelbegriff 'Fahrzeugkarosse' zusammengeführt). Demgegenüber ist das Bordinventar dem Berechnungsergebnis zufolge als Brandmasse von eher geringer Bedeutung.

Nach den hierzu auf die Fahrzeugkategorie M1/N1 ausgerichteten Ermittlungen entfallen, nach Materialgruppen differenziert, als Brandmasseanteil auf den Betrachtungsgegenstand

► Fahrzeugkarosse (Tabelle 5)

Tabelle 5: Emissionsrelevante Brandmassen der Fahrzeugkarosse pro Brandfallereignis in der betrachteten Fahrzeugkategorie [in Tonnen]

Materialart	Kraftfahrzeug (Kategorie M1/N1)
Kunststoffe	0,2169
Textilien (bzw. textile u. vergleichbare Faserwerkstoffe)	0,0480
Gummi	0,0171
anderes Brennbare	0,0133
nicht näher zuordenbar	0,0969
brennbare Flüssiggebinde	0,0161
in Summe	0,4083
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,3274

Quelle: eigene Darstellung

► Bordinventar (Tabelle 6)**Tabelle 6: Auf das Bordinventar zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis in der betrachteten Fahrzeugkategorie [in Tonnen]**

Materialart	Kraftfahrzeug (Kategorie M1/N1)
Kunststoffe	0,0054
Holz	0,0001
Textilien (bzw. textile u. vergleichbare Faserwerkstoffe)	0,0019
Papier/Kartonage	0,0008
Gummi	0,0011
in Summe	0,0093
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,0074

Quelle: eigene Darstellung

Obwohl in den Berechnungstabellen zum Bordinventar vollständigkeitshalber (als infrage kommende Brandmasseposition) mit vermerkt, ist die Fahrzeugbetankung ausdrücklich nicht im Berechnungsergebnis berücksichtigt (s. dazu auch Abschnitt 3.1.2). Anrechnung fanden indes andere, im Berechnungsteil 'Fahrzeugkarosse' berücksichtigte Betriebsflüssigkeiten (u.a. Motor-/Getriebeöl). Der modulare Aufbau der Berechnungstabellen würde jederzeit eine Anrechnung von Kraftstoffmengen ermöglichen. Testweise wurde der Einfluss auf das Berechnungsergebnis auch mit einer mittleren halben Tankfüllung (30 Liter) überprüft und ein deutlicher Anstieg des Materialanteils zur Emissionskategorie 'fossil' (ca. 10 % an der Brandmasse des Bordinventars) ermittelt.

Die für das Bordinventar eines Fahrzeuges und dessen Fahrzeugkarosse ermittelten Werte zusammengeführt, ergeben die folgenden anrechenbaren Gesamtbrandmassen pro 'full-scale' Brandfallereignis eines Kraftwagens der Fahrzeugkategorie M1/N1 (Tabelle 7).

Tabelle 7: Emissionsrelevante Gesamtbrandmassen eines Kraftfahrzeuges differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]

Materialart	Kraftfahrzeug (Kategorie M1/N1)
Kunststoffe	0,2223
Holz	0,0001
Textilien (bzw. textile u. vergleichbare Faserwerkstoffe)	0,0499
Papier/Kartonage	0,0008
Gummi	0,0182
anderes Brennbares	0,0133
nicht näher zuordenbar	0,0969
brennbare Flüssiggebinde	0,0161
in Summe	0,4176
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,3347

Quelle: eigene Darstellung

Im Brandfall wäre für ein als Orientierungsgrundlage herangezogenes Referenzfahrzeug mit einem Gesamtzulassungsgewicht um die 1,4 t unter Hinzunahme von Bordinventar ein Gewichtsanteil von etwa 30 % als emissionsrelevante Brandmasse anzurechnen. Etwa 80 % von dieser Masse liefern einen Emissionsbeitrag, für den eine fossile Herkunft angenommen werden kann.

Die Komplettübersicht zu den materialdifferenzierten Berechnungsergebnissen insgesamt sowie den Teilbeiträgen, die Fahrzeugkarosse und Bordinventar hierzu liefern, liegt auch durch die *Ergebnisdatei 'Brandmassen_GesamtwertePKW.xlsx'* vor.

4.1.2.2 Ergebniseinschätzung und Lücken

Erheblichen Einfluss auf das o.g. Ergebnis hat vor allem die Materialgruppe Kunststoff mit gut 53 % Anteil an der Brandmasse und Zweidritteln des Beitrages zur Emissionskategorie 'fossil'. Dieser Anteil ist jedoch rein über den Datenbestand der Abfallstatistik zur Fahrzeugaufbereitung und daran gekoppelte Hinweisen bzw. Annahmen zur Beschaffenheit von Fahrzeugteilen sowie Aufbereitungsprodukten in keiner Weise rechnerisch abzubilden. Für ein plausibles Ergebnis war daher den zum Fahrzeugbau kommunizierten Materialproportionen zusätzliche Beachtung zu schenken und die Berechnung mit einem daran ausgerichteten Auffüllbetrag zu ergänzen. Dadurch findet sich die beim Referenzfahrzeug letztlich als Brandmasse berücksichtigte Kunststoffmenge mit einem Anteil von gut 15 % auf die Größenordnung der diesbezüglich der PKW-Produktion weithin nachgesagten Materialverhältnisse heraufgesetzt. Allein der statistische Herleitungsweg vermag summarisch kaum mehr als 4 % wirklich zu belegen.

Die Industriewerte lassen als Orientierungsrichtschnur in Bezug auf andere Materialengruppen auch eine Unterschätzung bei Gummi, bei Textilien hingegen eher eine Überschätzung vermuten. Die bei der Brandmasseermittlung mittels vertiefender Materialdifferenzierung gewonnenen Ergebnisse erlangen hier allerdings durchaus Plausibilität, da bspw. die Reifenmasse nicht pauschal Gummi gleichgesetzt, sondern diese den weiteren Bestandteilen (u.a. Stahlcord, Textilgewebe der Karkasse) nach betrachtet wurden. Allein daraus wird eine Verringerung der Brandmasse an Gummi und eine Erhöhung derer bei Textilien bewirkt, während bspw. der Stahlanteil völlig aus der Brandmasse entfällt. Auch industrieseitig wird die durchschnittliche Herstellungsausstattung bei Personenkraftwagen mit textilen Geweben und Faserstoffen pro Fahrzeug mittlerweile in Größenordnungen oberhalb von 35 kg angegeben, ferner soll noch ein Zuwachs an weiteren, in Verbundwerkstoffen eingesetzten Faserstoffen (z.B. Hanf, Flachs) stattgefunden haben [37 [40]. Den pro Fahrzeug ermittelten knapp 50 kg Brandmasse in der Materialgruppe Textilien verleiht dies Nachvollziehbarkeit, zumal in dieser natürliche (biogene) Faserstoffe in der Fossilitätsbewertung berücksichtigt sind.

Angesichts der Wertevarianz und Nachsteuerungsbedarfe, den die rein über Abfallkennzahlen geführte Brandmasseermittlung offensichtlich macht, erscheint es dennoch überlegenswert, ob die seitens des Fahrzeugbaus und in anderen Berichtsformaten (bspw. auch den KOM-Tabellen [32]) grob wiedergegebenen Anteilsverhältnisse verschiedener Materialarten nicht bereits als hinreichend genau für die Brandmasseausweisung bei Fahrzeugbränden gelten dürfen.

Dazu ist der Werteübersicht in der *Ergebnisdatei 'Brandmassen_GesamtwertePKW.xlsx'* im Bereich der *Spalten F-H*, ausgehend von diesen groben Anteilsproportionen, eine mögliche Vergleichsrechnung für den insbesondere relevanten Betrachtungsteil 'Fahrzeugkarosse' beige stellt. Demnach beläuft sich sowohl im Ergebnisteil zur Gesamtbrandmasse als auch beim Brandmasseanteil in der Emissionskategorie 'fossil' die Endabweichung in Summe auf jeweils lediglich rund 10 %.

Die, vor allem aus der fahrzeugbauenden und zuliefernden Industrie und dem Forschungssektor vorliegenden Richt- bzw. Referenzwerte zu Materialproportionen sind demzufolge nicht nur in justierender Funktion, sondern sogar direkt als der viel einfachere Basisansatz für die Brandmasseermittlung in einem bestimmten Zeitabschnitt brauchbar.

Gleichwohl ist der in dieser Hinsicht durchaus festzustellenden Werteverianz, trotz ihrer meist engen Bandbreite, angemessene Beachtung und Absicherung mithilfe verschiedener Quellen beizumessen. In Abbildung 6 sind entsprechende Wertenennungen beispielhaft wiedergegeben. Verglichen mit jenen, die im *Arbeitsblatt 'Referenzdaten' der Datei 'Berechnung PKW'* mit hinterlegt sind, lassen sich die angesprochenen Varianzen deutlich erkennen, so u.a. besonders auch bei der Materialgruppe Kunststoffe. Entlang des unten abgebildeten Wertegerüsts finden die für einen Personenkraftwagen ermittelten rund 50 kg Brandmasse aus textilen Materialien und Faserstoffen dagegen zu weitreichenderer Bestätigung, lässt doch die angezeigte Proportion beim Fahrzeugbezugsgewicht von 1,4 t sogar die doppelte Brandmasse am entsprechenden Material erwarten. Mit dem Auffüllbetrag an Kunststoff wie auch 'Anderes Brennbares' (aBr) und 'nicht näher zuordenbar' (nzo) kommen indes Materialpositionen in Betracht, bei denen im Berechnungsergebnis solche vermeintliche „Überschuss- bzw. Fehlmengen“ enthalten sind.

Abbildung 6: Wertebeispiel zum veränderlichen Materialbild beim Automobilbau in verschiedenen Zeitfenstern

Baujahr		1960 - 1975	1976 - 1980	1981 - 1985	1986 - 1990	1991 - 1995	1996 - 2000
Leergewicht	kg	887	887	910	933	955	1000
Eisen/Stahl	%	78	78	73	67,5	62,4	57,5
NE-Metalle	%	2,4	2,4	4,3	6,1	8,0	10
Kunststoffe	%	2,3	2,3	3,6	4,9	6,2	7,5
Textilien/Verbund	%	2,9	2,9	4,0	5,1	6,2	7,3
Reifen/Gummi	%	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9
Glas	%	2,4	2,4	3,1	3,8	4,5	5,2
Betriebsflüss.	%	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6
Sonstiges	%	5,4	5,4	5,3	6,0	6,1	6,0

Quelle: Darstellung (auf Basis von Werksangaben) nach Nathani in [35]

Inwieweit die jeweiligen Ergebniswerte eine entsprechend gute oder weniger tatsächengerechte Abschätzung der vorliegenden Emissionssituation repräsentieren, steht derweil in hohem Maße in Verbindung mit dem zugrunde gelegten Fahrzeuggewicht und -alter, die im Zusammenhang mit der Verteilung auf die Brandereignisfälle im jeweiligen Jahr jedoch absolut unbekannte Parameter sind. Eben hierin bildet sich für das Betrachtungssegment Kraftfahrzeuge der größte und alle anderen Faktoren wahrscheinlich deutlich übertrumpfende Unsicherheitsbereich ab. Mit dem Berechnungsansatz verbundene oder darauf wirksame Unsicherheiten und Datendefizite finden insbesondere im Abschnitt 3.1.2 Erwähnung. Zu den Schwächen gehört eventuell auch, dass die aus der Abfallstatistik und weiteren Quellen zur Brandmasseermittlung herangezogenen Angaben sowie Annahme zur Materialbeschaffenheit Elektrofahrzeuge und deren Aufbau (noch) nicht wirklich einbeziehen und dies, obwohl Brände solcher Fahrzeugtypen inzwischen signifikant zum Brandgeschehen im Kraftfahrzeugsegment dazugehören.

Generell stellt auch bei Kraftfahrzeugen die pauschale Übertragung der ermittelten Brandmassen auf jeden einzelnen Brandereignisfall wohl eine deutliche Überschätzung dar. Wie im Gebäudesegment ist auch hier begründet davon auszugehen, dass der tatsächliche Umfang eines Brandes selten das gesamte Objekt betrifft und vernichtet. Fachkreise verlautbaren hierzu, dass die Brände hauptsächlich im vorderen Fahrzeugbereich (speziell Motorraum) stattfinden und oft auf diesen begrenzt werden können, Tankinhalte demnach tatsächlich auch eher irrelevant sind [41] [59]. Interessant ist dabei die von der Versicherungswirtschaft vorliegende Angabe, wonach der durchschnittliche finanzielle Schaden von PKW-Bränden im Jahr 2022 etwa 7.600 Euro betrug [43] und somit jeder Fall durchaus als Volschaden (bzw. Vollvernichtung) interpretierbar wäre, soweit dieser Betrag dem realen Restwert eines Fahrzeuges im mittleren Bestandsalter nahekommt.

4.1.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer

4.1.3.1 Ergebniswerte

Aus der Brandmassenermittlung zum Korpus und Inhalt des den Brandereignisfall verkörpernden MGB1.1 resultieren, differenziert nach Materialgruppen, als Brandmasseanteil aus dem

► Behälterkorpus (Tabelle 8)

Tabelle 8: Auf den Abfallbehälterkorpus zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 [in Tonnen]

Materialart	MGB 1.1 nach DIN EN 840 in der Produktausführung in Vollkunststoff
Kunststoffe	0,0457
Gummi	0,0039
in Summe	0,0496
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,0479

Quelle: eigene Darstellung

► Behälterinhalt (Tabelle 9)

Tabelle 9: Auf den Abfallbehälterinhalt zurückführbare emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 [in Tonnen]

Materialart	MGB 1.1 nach DIN EN 840 zu 79% mit Abfall befüllt
Kunststoffe	0,0055
Holz	0,0022
Textilien	0,0021
Papier/Kartonage	0,0350
unspezif. biogene Materialien	0,0085
anderes Brennbare	0,0002
nicht näher zuordenbar	0,0021
in Summe	0,0557

Materialart	MGB 1.1 nach DIN EN 840 zu 79% mit Abfall befüllt
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,0135

Quelle: eigene Darstellung

Aus den Ergebnisteilwerten ergibt sich, dass der Behälterkorpus mit 47 % einen annähernd gleichen Beitrag in Bezug auf die Brandmassen liefert wie der Behälterinhalt mit 53 %. Überaus relevant wird der Behälterkorpus aufgrund seiner Materialausführung jedoch beim Anteil welcher der Emissionskategorie 'fossil' zurechenbar ist. Mit lediglich 22% Anteil an dieser Emissionskategorie schneidet der Abfallinhalt deutlich besser ab. Das vorteilhafte Abschneiden in diesem Punkt resultiert im Wesentlichen aus der Abfallbiomasse und den hohen Anteilen an papierartigen Abfallbestandteilen, die auf den Brandereignisfall eines MGB1.1 aus Bränden im Erfassungssystem für PPK anrechenbar sind.

Eine sehr geringe Größenordnung verbleibt beim Behälterinhalt für 'andere brennbare Stoffe'. In der Emissionskategorie 'fossil' spielen diese Abfallbestandteile, darunter bspw. Arzneimittel, Farb- und Zigarettenreste, praktisch damit keine Rolle. Etwas deutlicher ins Gewicht fallen 'nicht zuordenbare' Abfallbestandteile. Dies sind bei der Abfallanalyse stofflich nicht erkennbare oder näher zur Bestimmung gebrachte Masseanteile, für die auch nur von einem eingeschränktem Brandbeteiligungspotenzial auszugehen ist. Deren Brandmassebeitrag kommt mit einem Umfang zur Einschätzung, der ungefähr dem der Materialgruppe Textilien vergleichbar ist, sowohl in der Gesamtsicht, wie auch in der Emissionskategorie 'fossil'.

Mit der Zusammenführung aller Teilwerte ergeben sich demzufolge pro Brandfallereignis eines Abfallcontainers MGB1.1 die folgenden anrechenbaren Gesamtbrandmassen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Emissionsrelevante Brandmassen pro Brandfallereignis eines MGB1.1 differenziert nach Materialgruppen [in Tonnen]

Materialart	MGB 1.1 nach DIN EN 840 zu 79% mit Abfall befüllt
Kunststoffe	0,0512
Holz	0,0022
Textilien	0,0021
Papier/Kartonage	0,0350
unspezif. biogene Materialien	0,0085
Gummi	0,0039
anderes Brennbare	0,0002
nicht näher zuordenbar	0,0021
in Summe	0,1053
davon Emissionskategorie 'fossil'	0,0614

Quelle: eigene Darstellung

Die Gesamtübersicht zu den materialdifferenzierten Berechnungsergebnissen sowie Teilbeiträgen, die der Behälterkorpus und Abfallbehälterinhalt hierzu liefern, liegt durch die *Ergebnisdatei 'Brandmassen_GesamtwerteMGB.xlsx'* vor. Diese enthält als separates Arbeitsblatt auch wieder die zur Berechnung des Brandmasseanteils der Emissionskategorie 'fossil'

verwendete *‘Andockliste Fossilität’*. Im Zusammenhang mit diesem Betrachtungssegment ist hierbei nochmals besonders erwähnenswert, dass die Materialgruppen Kunststoffe sowie Gummi anteilig mit leicht verschiedenen Ansätzen (Korpus vs. Abfallinhalt) zur Betrachtung kommen und in die Berechnung eingehen (s. auch im Abschnitt 2.1 Ausführungsteil auf S. 18).

4.1.3.2 Ergebniseinschätzung und Lücken

Die aus der Brandmasseermittlung zum Brandereignisfall Abfallcontainer MGB1.1 erhaltenen Ergebniswerte erscheinen für sich äußerst plausibel. Dass allein der Behälterkorpus einen markanten Anteil an der Brandmasse ausmacht und dann in besonders hohem Umfang zur Emissionskategorie *‘fossil’* beiträgt ist nachvollziehbar und unterstreicht, dass dieser Teil des Brandobjektes nicht unbeachtet bleiben darf. Über den Ermittlungsweg, welcher in die Berechnung eines synthetischen Behälterinhalts an Abfällen aus den verschiedenen Erfassungssystemen mündet, gelangt ein eindeutig an den Realitäten des öffentlichen (haushaltsnahen) Abfallentsorgungssystems orientiertes Brandgeschehen zur Abbildung.

Trotzdem verbleiben viele Punkte, die bisher nur durch Annahmen auszufüllen sind und das Berechnungsmodell mit Unschärfen bzw. Ungewissheiten belasten. Darauf wird unter anderem bereits im Abschnitt 3.1.3 umfangreich eingegangen. Nicht nur die Projektion von Bränden auf eine einzige Behälterart als Bezugseinheit ist problematisch, sondern auch die mangelhaft vorliegenden Einblicke, um Containerbrände und deren Auftreten genauer charakterisiert zu bekommen. Die Übertragung von Werten aus der Abfallanalyse bildet ein probates Hilfsmittel, trägt aber auch nur in dem Umfang, wie sich auch die Annahmen zu Brandobjekten/-vorfällen (u.a. woraus bestand der Container, wie stark war er befüllt, welches Erfassungssystem war betroffen) als richtig, sowie die Erhebungssystematik und Abfallzuordnungsmethodik (siehe *‘andere brennbare’* und *‘nicht zuordenbare’* Materialmasse) als kompatibel erweisen.

Ausgesprochen zufällig und insbesondere durch Einbeziehung des Behälterkorpus in die Berechnungen ergibt sich ein Verhältniswert von Brandmasse der Emissionskategorie *‘fossil’* zu anderer Brandmasse, der annähernd das Niveau spiegelt, mit dem seitens der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) bzw. im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) Haushaltsrestabfälle in der Verbrennung emissionsbezogen Betrachtung finden. Würde der Brandereignisfall Abfallcontainer indes ohne Berücksichtigung des Behälterkorpus mit dieser Art der Abfallverbrennung gleichgesetzt, zeigt sich am Modellansatz, dass eine ziemlich andersgelagerte Verhältnisproportion vorliegt und der Emissionsanteil *‘fossil’* nur noch ungefähr ein Viertel ausmachen würde.

Ohnehin verfügen das Abfallentsorgungsverhalten, folglich die Behälterinhalte und hierdurch wiederum auch die Abfallanalyse selbst über viele Sensitivitätsmerkmale. Insoweit ist eine repräsentative Abbildung von Brandmassen und Emissionsgeschehen bei Abfallcontainerbränden für Deutschland generell als sehr schwieriges Unterfangen einzustufen.

Noch komplizierter gestaltet es sich diesbezüglich, wenn mit zeitlichen Veränderungslinien anzuknüpfen ist. Ein Versuch wurde dazu unternommen (s. *Spalten F und L* in der *Ergebnisdatei ‘Brandmassen_GesamtwerteMGB.xlsx’*), kann aber dem Umstand, dass sich laufend neue Rücknahme- und Abfallerfassungssysteme etablieren und hierdurch auch eine Neuverteilung von Materialien und Bränden auf diese einhergeht, nur partiell Rechnung tragen (vgl. auch Abschnitt 5.2.3). Demzufolge gibt die genauere Aufklärung der Brandverteilung innerhalb der Abfallerfassungssysteme sowie Behälterarten in der Tat eine der größten Schwachstellen und zusätzlichen Forschungsbedarfe zu erkennen.

5 Veränderungsdynamiken und Fortschreibbarkeit

5.1 Erforderlichkeit der Betrachtung

Die sich verändernde Beschaffenheit des Bestandes an Gütern insgesamt (anthropogenes Lager), wie auch seiner Teilsegmente (hier Betrachtungssegmente) und Einzelbestandteile (hier Produkte bzw. potenzielle Brandobjekte) verlangt es, die Ermittlung zu Brandmassen und der dabei auf fossile Brandgüter entfallenden Anteile stets an bestimmte Zeitabschnitte zu knüpfen bzw. darauf ausgerichtet zu erneuern. Auf welche Zeitabschnitte die durchgeführten Untersuchungen bzw. ermittelten Brandmassekennzahlen Bezug nehmen, ist in den jeweiligen Berichtsabschnitten und auch den übergebenen Berechnungstabellen kenntlich gemacht.

Gleichzeitig sah die Aufgabenstellung mit vor, auch Einschätzung zur zeitlichen Gültigkeit dieser Kennzahlen zu treffen und Zeitreihenbetrachtungen anzustellen, indem u.a. auf relevante Entwicklungsrichtungen oder rückwirkend signifikante Veränderungstatbestände in den Betrachtungssegmenten hingewiesen werden sollte. Auf dieses Anliegen wird insbesondere durch entsprechende Ausführungen an mehreren Stellen im Bericht, aber auch die zum Teil mitgelieferten Orientierungswerte und testweise durchgeführten Vergleichsrechnungen (s. Ergebnistabellen) eingegangen. Eine weitere Ergänzung liefert der nachfolgende Abschnitt 5.2.

Der Informationsbedarf des UBA zur Zeitreihengültigkeit gründet in den dort von 1990 bis mindestens 2030 für die Emissionsinventarisierung sowie Brandereigniszahlen vorliegenden Zeitreihen.

5.2 Weitere Aspekte der Brandmasseveränderung und Datenfortschreibung

5.2.1 Betrachtungssegment Gebäude

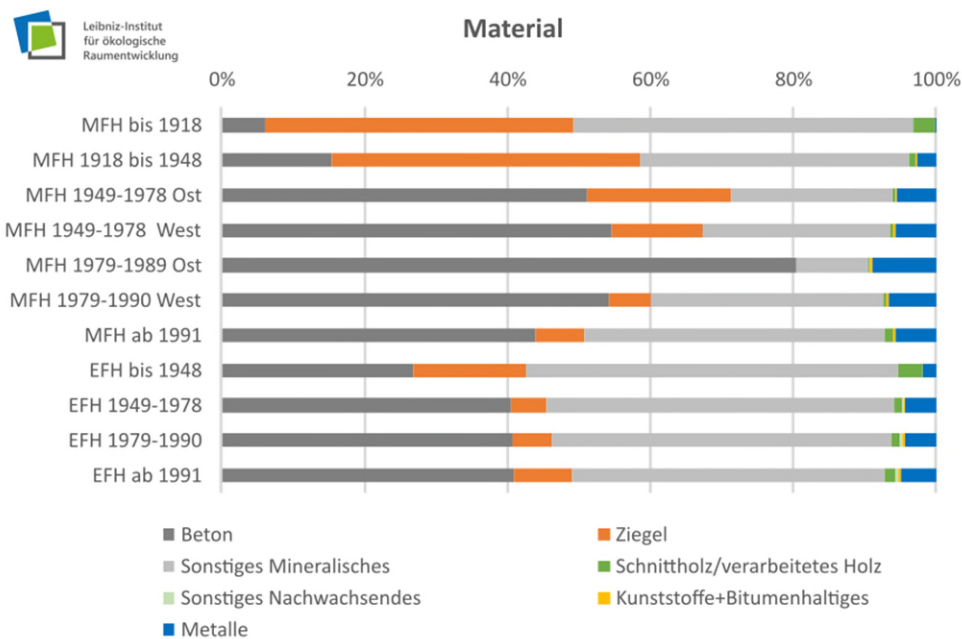
Wesentliche Teile der Modellierung zu den Gebäuden und Wohneinheiten, die letztlich zur betrachteten Brandmasse führen, fußen auf Daten die einer kontinuierlichen, zumindest jedoch zyklisch wiederkehrenden statistischen Erhebung unterliegen. Hierdurch sind mehrjährige Zeitreihen über sich bspw. verändernde Wohnungsbestände, Bewohner- und Raumanzahlen sowie Wohnungsflächen nicht nur verfügbar, sondern auch in Fortschreibung begriffen. Allein mit der (zeitlich rückwirkenden bzw. zukünftigen) Anpassung der entsprechenden Setzwerte in den jeweiligen Modellierungsabschnitten sind zeitbezogen Änderungen am Brandmasseumfang darstellbar. Die modularartig aufgebaute Berechnungsmethodik unterstützt dies in bester Weise und lässt auch erkennen, wo mit neuen Werteeingaben angesetzt werden kann

Ferner finden Veränderungen in der Materialität (bspw. aufgrund von Produktinnovationen, geänderten Herstellungsweisen, Importen u. Einfuhrherkünften) und des Ausstattungsumfanges der Inventargüter (sich ändernde Wohlstandsniveaus oder Mindestausstattungsnormen) statt. Auch beim Gebäudebau kommen sich verändernde Konstruktionsweisen mit Konsequenzen für den Einsatz und die Dominanz verschiedener Materialien zum Tragen. Hierzu ist die Datenlage allerdings weitaus lückenhafter und undifferenzierter, besonders auch, um diese auf die Brandereignisfälle bzw. einzelne Modellierungselemente sachgerecht übertragen zu bekommen.

Entlang unstrittiger Entwicklungen, wie bspw. der gewachsenen Marktdurchdringung synthetischer Materialien (wie Kunststoffe/kunststoffartige Verbindungen), der damit erfolgten Substitution bzw. Verdrängung „klassischer“ Baustoffe (u.a. Holz, Baumwolle) oder Einführung neuer Dämmstandards (ab 1995) ergeben sich jedoch auch in dieser Hinsicht einige verallgemeinerbare Ansatzpunkte für zeitabschnittsbezogene Anpassungen bei der Brandmassemodellierung.

Gemäß der Datenlage, die auch vom Erkenntnischatz aus eigenen Rückbauuntersuchungen² gestützt wird, nimmt bspw. der Anteil an Holz im Materialmix des Gebäudekorpus in Richtung der Gebäudekohorten älteren Baualters zu. Im Gegenzug fällt zumeist das Anteilsverhältnis der verbauten nichtbrennbaren Materialien (Mineralik, Glas, Metall) jeweils niedriger aus, vor allem aber sind Kunststoffe in diesen Gebäudekohorten kaum präsent. Erst bei jüngeren Gebäuden erlangen Kunststoffe, dann vor allem mit Eintritt in das „Dämmzeitalter“, überhaupt einen signifikanten Anteil (s. Abbildung 7). Mithilfe des ISBE-Datenpools und weiteren Einblicken zur dortigen Berechnungsmethodik könnte eventuell ein Zugang für weitere Modellpräzisierungen gefunden werden.

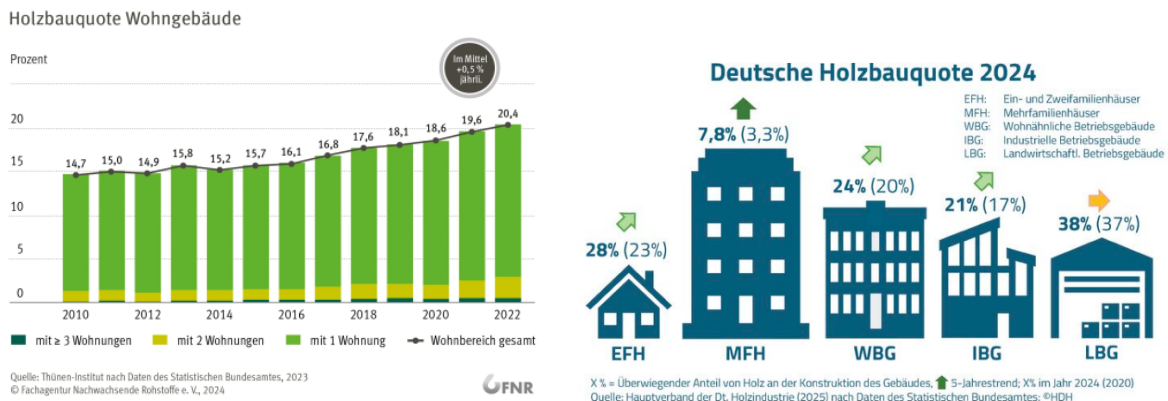
Abbildung 7: Beispiel der Veränderungsdynamik im Materialmix (der Brandmasse) des Gebäudekorpus entlang des Bauwerksalters



Quelle: Darstellung nach IÖR in [14]

Für eine gewisse Renaissance bei den „klassischer“ Baustoffen und damit einen wieder steigenden Holzanteil sorgt in aktuell gebauten Gebäuden nunmehr der Marktzuwachs ökologischer Bauweisen. Dabei ist es insbesondere im Ein- und Zweifamilienhausbau mittlerweile üblich, wieder verstärkt mit Holz als Hauptbaumaterial zu arbeiten. Wurde anfangs der 1990er-Jahre der Anteil in Holzbauweise neu errichteter Ein- und Zweifamilienhäuser mit lediglich 6 % festgestellt, so erfolgte hier in jedem nachfolgenden Jahrzehnt jeweils eine Verdoppelung dieses Anteils (12,3 % in 2000; 20,3 % in 2019 lt. Charta für Holz 2.0 [29]). Holzbaukonstruktionen von Mehrfamilienhäusern und Gebäuden im Nichtwohnbau sind demgegenüber seltener und liegen bei Mehrgeschossbauten im Wohnbereich nur im einstelligen Prozentbereich, allerdings variiert hier die Quote stark mit der Gebäudefunktionalität. Indes zeichnet sich die Wiederzunahme von Holzbaumaterialien in Gebäuden insgesamt bereits statistisch als auch in den weiteren Erwartungen ab (s. Abbildung 8).

Brandereignisfälle in Gebäuden sind daher in der Langfristperspektive sicherlich mit einem (Wieder-)Anstieg der relevanten Brandmasse aus dem Gebäudekorpus zu verknüpfen, dieser wird, die Emissionen fossilen Ursprungs betreffend, aber weitestgehend keine Konsequenzen bzw. Anrechnungsfolgen haben.

Abbildung 8: Dynamik des Holzbaugeschehens im letzten Jahrzehnt und gebäudeartbezogen

Quelle: Darstellungen durch Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) [29] und Hauptverband der Deutschen Holzindustrie und Kunststoffe verarbeitenden Industrie und verwandter Industrie- und Wirtschaftszweige e. V. (HDH) [28]

Auch mit Berücksichtigung solcher Entwicklungen in der zeitdynamischen Brandmasseermittlung werden Verzerrungen, die aus den regionalen Unterschieden im Bauen herrühren, nicht behoben. Erneut lässt sich als Verweis auf diesen Einflussfaktor das Beispiel des Holzbaugeschehens heranziehen (Abbildung 9).

Abbildung 9: Regionalität des Holzbaugeschehens

Quelle: Darstellung durch Hauptverband der Deutschen Holzindustrie und Kunststoffe verarbeitenden Industrie und verwandter Industrie- und Wirtschaftszweige e. V. (HDH) [29]

Generell bestünde zur Justierung des Ergebnisses demnach zunächst das Erfordernis, die Brandereigniszahlen, zusätzlich zu ihrer Aufteilung nach Gebäudekategorien, ebenfalls regionalisiert und nach Baualterskohorten der Brandobjekte gestaffelt zu erheben. Dies darf jedoch als kaum verwirklicht bzw. ein dem Anliegen unverhältnismäßig gegenüberstehender Aufwand angesehen werden.

Veränderungen und Trends, die in Bezug zu den Brandmassebeiträge aus dem Gebäudeinventar stehen, sind überdies noch weit weniger klar erfass- und absehbar. Indes ist zu bezweifeln, dass eine mit dem Gebäudekorpus vergleichbare (Wieder-)Umkehr beim Materialeinsatz z.B. von Kunststoff zu Holz bei Fenstern und Profilen oder von Holz zu Kunststoff bei Mobiliar als zwei hauptsächlichen Brandmassequellen Bedeutung erlangt. Mittlerweile gehen die Vorzüge der jeweiligen Materialien hier nicht nur in einem extrem ausdifferenzierten sowie spezialisierten Produktspektrum, sondern überdies in eigens etablierten Materialkreisläufen (u.a. Rewindo) auf, wonach ein solcher Materialwechsel aus Umweltsicht kaum noch zwingend erscheint.

5.2.2 Betrachtungssegment Fahrzeuge

Die Veränderungsdynamik im Kraftfahrzeugsegment betreffende wichtige Entwicklungen sind bereits in den Abschnitten 2.2.2 und 3.1.2 thematisiert und müssen daher nicht vertieft werden. Von dem der Brandmasseermittlung zugrunde gelegten Stichjahr ist rückblickend besonders der die emissionsrelevante Brandmasse verringernde bzw. erhöhende Anstieg des Kunststoffanteils in Fahrzeugen hervorzuheben und in retrospektiven Berechnungen zu berücksichtigen.

Perspektivisch sind weitere Materialveränderungen absehbar und zu beachten, begründet vor allem durch die Wende zur Elektromobilität. Die dafür gebauten Fahrzeuge sind in einer Vielzahl an Komponenten anders strukturiert (u.a. Wegfall der Abgasanlagen und herkömmlichen Getriebe, deutlich umfänglichere Elektronik, gänzlich anderer Motorenaufbau) und, aufgrund des Batterieolumens, im Allgemeinen nochmals schwerer im Gewicht. Die Position Kraftstoffe wird für die Brandmasseberechnung endgültig obsolet, die Anrechnung eines Anteils anderer brennbarer flüssiger Betriebsmittel jedoch nicht zwingend.

In allen Berichtsabschnitten zu diesem Betrachtungssegment wurde auf die Bedeutung des sich verändernden Fahrzeuggewichts explizit eingegangen und jeder zu anderen Jahren durchgeführte Berechnungsansatz muss diesem Parameter besondere Aufmerksamkeit geben. Allerdings sind in dieser Richtung entsprechende Zeitreihen leicht zugänglich und (durch die Fahrzeugzulassungs- und Abfallstatistik) in laufender Fortschreibung. Eigentlicher Knackpunkt dahingehend ist eine Methodik, welche die Daten zu unterschiedlichen Erhebungszeitpunkten auf sachgerechte Weise zusammenbringt und zu nutzen bzw. zu interpretieren versteht.

Hierzu gehören auch die Angaben über den Materialeinsatz im Fahrzeugbau durch die autoherstellenden und zuliefernden Branchen, die der Justierung von Brandmassewerten hilfreich sind und auch dazu herangezogen werden sollten. Die Brandmasseermittlung deutlich vereinfachend, kann sogar auf die Verwendung nur dieses Wertegerüsts orientiert und das Ergebnis als hinreichend genau für den in Frage stehenden Sachverhalt betrachtet werden. Ebenso ist davon auszugehen, dass diese Angaben auch in Zukunft weiterhin ausreichend und aktuell erhältlich bzw. auffindbar sind.

Sowohl für rückwirkende Brandmasseberechnungen wie auch deren weitere Fortschreibung sind zumindest auf diese Weise besonders gute Voraussetzungen im Betrachtungssegment Kraftfahrzeuge gegeben.

Der Schwerpunkt weiteren Forschungs- bzw. Aufklärungsbedarfes liegt daher insbesondere bei der Feststellung, wie die Brandereignisfälle der verschiedenen Jahre hinsichtlich des Fahrzeugalters (und damit auch bezüglich des Zulassungs- bzw. Abgabegewichtes an die Entsorgung) durchschnittlich charakterisiert sind und wie der Brandumfang an den Fahrzeugen im Querschnitt ausfällt (d.h. ob bspw. Reifen und Tankinhalt relevante Brandmassebeiträge darstellen). Ferner könnten zum bisher angesetzten Bordinventar die getroffenen Annahmen verhältnismäßig aufwandsarm durch eine empirische Werterhebung ersetzt und auch hier die

tatsächliche Brandbeteiligung in praxisnaher Weise (ggf. über die Auswertung von schon an PKWs durchgeführten Brandversuchen) zu ermitteln versucht werden.

5.2.3 Betrachtungssegment Abfallcontainer

Die Veränderlichkeit der Abfallerfassungssysteme ist allgemein bekannt und im Stadtbild erlebbar. Sich verschiebende Konsumgewohnheiten, umweltpolitische und organisatorische Entscheidungen bzw. Vorgaben sind wesentliche Treiber dieser Veränderungen. In Deutschland liegen in dieser Hinsicht die fundamentalsten Umbrüche eher schon drei Jahrzehnte zurück, regional gewinnen neue Konzepte (bspw. Zero Waste) und Systemumstellungen (bspw. Einführung von Wertstofftonnen) jedoch fortwährend immer wieder größere Relevanz.

Jedes Erfassungssystem soll der Aufnahme spezieller Abfallmaterialien dienen und nimmt damit jeweils Einfluss auf die verbleibenden Stoffströme und die Zusammensetzungen in den anderen Erfassungssystemen sowie deren Dynamik, einschließlich veränderter Behälterarten, -größen und Brandrisiken. Zu den Veränderungen der dann in einem Erfassungssystem präsenten (bzw. dafür ansetzbaren) Brandmasse kommen Änderungen der Brandmassezusammensetzung hinzu.

Produktions- und Marktgeschehen schlagen sich dabei kontinuierlich auf die materielle Beschaffenheit des gesamten Abfalls nieder und verändern diesen quasi fließend. Dies sachgerecht abzubilden ist nur über sehr große Datenmengen und Vergleichsbetrachtungen in größeren Zeitabständen möglich. Trends sind dafür praktisch kaum benennbar und sind im Grunde genommen nur auszumachen, indem die Abfallströme bzw. Erfassungssysteme jeweils im Einzelnen zur Untersuchung kommen.

Tatsächlich drastischer und direkter in Verbindung zum Brandgeschehen und den möglichen Brandmasseveränderungen steht dann wohl die Entwicklung der Erfassung, sprich Ausprägung der Erfassungssysteme. Wird sich dabei nach der Etablierung eines Erfassungssystems dessen Brandwahrscheinlichkeit als vergleichsweise konstant einschätzen lassen, haben die Einführungszeitpunkte und daraus resultierende Stoffstromverschiebungen auf die Entstehung, Verteilung und Emissionsfolgen von Brandereignissen sicherlich markante Wirkung (gezeigt und weiter zeigen).

Ableitend daraus erscheint es sinnvoll, weitere (auch retrospektive) Abschätzungen zu (fossilen) Brandgütern im Betrachtungssegment Abfallcontainer vor allem an Einführungszeiträume neuer Erfassungssysteme gekoppelt vorzunehmen.

Dafür ist bspw. relevant, dass die Erfassung von Restabfällen über MGB1.1 bereits über viele Jahrzehnte gängige Praxis ist. Somit ist auch nahezu nur für dieses Erfassungssystem der über die Jahre aus Kostengründen vielerorts erfolgte Austausch von Metallcontainern gegen solche aus Kunststoff von Belang. Dies stellt für den Behälterkorpus als Brandmasse, beginnend nach den 1990-er Jahren, eine wesentliche Veränderung dar.

Kaum von Bedeutung ist dieser Wechsel, was die erst später hinzu gekommenen und vielfach sofort mit MGB1.1. aus Kunststoff ausgestatteten Erfassungssysteme betrifft. Diese haben gleichwohl durch ihre Wertstoffe abziehende Wirkung die Restabfallzusammensetzung verändert. Ansonsten liegen aus einer Vielzahl von über die Jahre durchgeführten Abfallanalysen für entsorgungspflichtige Körperschaften relativ belastbare Schätzwerte für den natürlichen Variationskoeffizienten¹⁹ bei den Haushaltsrestabfällen vor.

Verglichen zur jüngsten bundesweiten Abfalluntersuchung im Jahr 2018 ist die Entwicklung der spezifischen Abfallmengen aus Haushalten in den vergangenen drei Jahrzehnten ein

¹⁹ im Bereich zwischen 0,2 und 0,4 liegend

wesentliches Veränderungsmerkmal. Gegenüber der vorangegangenen bundesweiten Erhebung (BHMA) aus dem Jahr 1985 ist bei Hausmüll ein Mengenrückgang um ca. 46 % (von ca. 239 auf 128 kg/EW*a) eingetreten. Hauptsächlich ist der Rückgang (in Summe ca. 94 kg/EW*a) dabei auf die Getrennthaltung und Übergabe von Wertstoffen und Organikabfällen in andere dafür aufgebaute Erfassungssysteme zurückführbar. Eben diese Systeme sind an Brandereignissen inzwischen erheblich, dem angewandten Modellansatz nach sogar weit überwiegend, beteiligt.

Die LVP-Sammlung wurde in Deutschland mit Inkrafttreten der Verpackungsverordnung von 1991 aufgebaut, erfolgte zunächst aber über viele Jahre fast ausschließlich per Iglu- bzw. Depotcontainer (3-5 m³) und später zusätzlich per Sacksammlung (gelber Sack). Insofern gab es den Betrachtungsfall MGB1.1 anfangs streng genommen gar nicht. Erst um die Jahrtausendwende wurden hier sukzessive auch Abfallstandardbehälter (gelbe Tonne) zur Sammlung eingeführt, wirklich relevant sind dabei MGB1.1 sogar erst seit wenigen Jahren.

PPK wird schon sehr lange separat gesammelt und kam dabei auf verschiedenste Weise zur Erfassung. Viele Jahre standen Iglu- bzw. Depotcontainer hierfür im Mittelpunkt, auch hier kam der Betrachtungsfall MGB1.1 also zunächst nicht zum Tragen. Ergänzt und umgestellt wurde bei dieser Sammelfraktion auf Abfallcontainer MGB (blaue Tonne) erst nach der Jahrtausendwende, erst wenige Jahre und sogar noch später als bei LVP gehören nun verstärkt auch MGB1.1 dazu.

Um die zeitliche Veränderungsdynamik im Zusammenhang mit dem Untersuchungsgegenstand etwas nachvollziehbarer zu machen, wurde mithilfe gemittelter Daten aus den BHMA der Jahre 1980 und 1985 den für (den synthetischen) MGB1.1 im Zeitfenster 2015-2025 gewonnenen Ergebniswerten eine vergleichende Brandmasseberechnung gegenübergestellt. Die darin eingeflossenen Einzelwerte und Berechnungen gibt in der *Ergebnisdatei 'Berechnung_MGB.xlsx'* das *Arbeitsblatt mit der Bezeichnung 'Dynamik-MGB-RestAbf'* wieder.

Das seinerzeit noch im Mittelpunkt stehende Gemischterfassungssystem und die Entwicklung der eingesetzten Behältertechnik entsprechend berücksichtigend, wurde der Behälterkorpus für den Zeitraum der 1980-er Jahre dabei als (noch) aus Stahlblech bestehend angenommen. Die resultierende Brandmasse reduziert sich dadurch für diesen Teil vollständig um den Kunststoffanteil.

Gegenüber den aktuellen 47 % Anteil des Containerkorpus an der emissionsrelevanten Gesamtbrandmasse kommt dieser in den 1980-er Jahren hier lediglich auf 4 %. Beim fossilen Anteil, allein verursacht durch den Behälterkorpus, stehen 17 % für die 1980-er Jahre heutzutage 78 % gegenüber. Der Abfallinhalt eines Containers trug dementsprechend in den 1980-er Jahren noch 83 % gegenüber heutigen 22 % zur Brandmasse fossilen Ursprungs bei.

In Absolutwerten umfasst die emissionsrelevante Brandmasse eines (modellierten) MGB1.1 gegenwärtig rund 105 kg, wovon etwa 62 kg (59 %) als fossil einzustufen sind. Für die 1980-er Jahre lässt sich die emissionsrelevante Brandmasse pro Ereignisfall bei um die 92 kg einschätzen, hiervon bildeten 18 kg bzw. 20 % den als fossil einzustufenden Anteil.

Verallgemeinernd sind Abfallcontainerbrände damit heutzutage mit deutlich höheren klimarelevanten Emissionen verbunden als dies vor etwa drei Jahrzehnten der Fall war. Erklärbar macht sich dies insbesondere über die massiv höhere Kunststoffbeteiligung im heutigen Brandereignisfall (51 kg gegenüber 8 kg), die aber wiederum vor allem durch den Behälterkorpus (mit rund 46 kg Anteil) begründet ist. Hinzu kommt die hohe Relevanz des Altpapiers, welches im Brandfall relativ gesehen zwar nur eine geringe fossile Emissionslast verursacht aber dafür das am häufigsten durch Brandereignisse betroffene Erfassungssystem ist, wodurch hier aktuell 35 kg Brandmasse einem Wert von vormals 22,5 kg gegenüberstehen.

6 Quellenverzeichnis

- [1] vfdb (2020): vfdb-Brandschadenstatistik: Untersuchung der Wirksamkeit von (anlagentechnischen) Brandschutzmaßnahmen. Technischer Bericht vfdb TB 14-01, 1. Auflage, 2020, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 14 (Hrsg.), Münster; Abruf zum 12.08.2025 unter https://www.vfdb.de/media/doc/technischeberichte/TB_14_01_Technischer_Bericht_vfdb-Brandschadenstatistik_02_2020_final_reduziert-2.pdf
- [2] Kraftfahrt-Bundesamt (2025): Neuzulassungen nach technischen Daten (FZ 26). Abrufe zum 05.09.2025 unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produktkatalog_node.html
- [3] Kraftfahrt-Bundesamt (2025): Bestand nach technischen Daten (FZ 25). Abrufe zum 05.09.2025 unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produktkatalog_node.html
- [4] Statistisches Bundesamt (2025): Statistiken zum Code: 32111 Erhebung der Abfallentsorgung. Abrufe zum 28.10.2025 unter <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/32111/details>
- [5] Statistisches Bundesamt (2025): Statistiken zum Code: 3000G Gebäude (Gebietsstand 15.05.2022). Abrufe zum 09.09.2025 unter <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/3000G/details>
- [6] Statistisches Bundesamt (2025): Statistiken zum Code: 4000W Wohnungen (Gebietsstand 15.05.2022). Abrufe zum 09.09.2025 unter <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/4000W/details>
- [7] Statistisches Bundesamt (2025): Statistiken zum Code: 5000H Haushalte (Gebietsstand 15.05.2022). Abrufe zum 09.09.2025 unter <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/5000H/details>
- [8] Statistisches Bundesamt (2025): Ausstattung mit Gebrauchsgütern Daten aus den laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) zur Ausstattung privater Haushalte mit Haushalts- und sonstigen Geräten, Deutschland. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/a-haushaltsgeraete-d-lwr.html>
- [9] Statistisches Bundesamt (2025): Ausstattung mit Gebrauchsgütern Daten aus den laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) zur Ausstattung privater Haushalte mit Informationstechnik. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/a-infotechnik-d-lwr.html>
- [10] Statistisches Bundesamt (2025): Ausstattung mit Gebrauchsgütern Daten aus den laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) zur Ausstattung privater Haushalte mit Unterhaltungselektronik. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/a-unterhaltungselekt-d-lwr.html>
- [11] Statistisches Bundesamt (2025): Statistiken zum Code: 63221 Einkommens- u. Verbrauchsstichproben: Hauptprogramm. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/63221/details>
- [12] Statistisches Bundesamt (2025): Wohnen Wohnungsbestand im Zeitvergleich. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-wohnungsbestand.html#115202>
- [13] Statistisches Bundesamt (2025): Haushalte und Familien Haushalte nach Haushaltsgrößen im Zeitvergleich. Abrufe zum 25.09.2025 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/1-3-privathaushalte-neuer-zeitvergleich.html>

- [14] Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (2025): Materialkennzahlen im Informationssystem Gebaute Umwelt (ISBE). Abruf zum 03.11.2025 unter <https://ioer-isbe.de/ressourcen/bauwerksdaten>
- [15] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (2025): Fakten Private Haushalte. Abrufe zum 13.11.2025 unter https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Haushalte/Faktensuche_formular.html?nn=116880
- [16] Bundeszentrale für politische Bildung (2024): Auszug aus dem Sozialbericht 2024. Kapitel 6 Wohnen. Abruf zum 02.10.2025 unter https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/06_sozialbericht_24_bf.pdf
- [17] Stadt Leipzig (2024): Einmalige Bedarfe nach Sozialgesetzbuch, Zwölftes Buch (SGB XII), Drittes Kapitel, Zweiter Abschnitt, § 31 Abs. 1 Nr. 1 – 3, Abs. 2 und 3. Fachinformation Sozialamt Abt. Wirtschaftliche Sozialhilfe. Abruf zum 25.08.2025 unter https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.5_Dez5_Jugend_Soziales_Gesundheit_Schule/50_Sozialamt/Wirtschaftliche_Sozialhilfe/Einmalige_Bedarfe.pdf
- [18] Landkreis Ostallgäu (kein Jahr): Übersicht Mindeststandards zum Betrieb von Gemeinschaftsunterkünften. Abruf zum 25.08.2025 unter https://www.landkreis-ostallgaeu.de/fileadmin/content/landratsamt/asyl/merkblaetter/01a_Mindeststandards.pdf
- [19] Ahlert, G.; Hoffmann, F.; Meyer, M.; Walter, H.; Buhl, J.; Greiff, K.; Lettenmeier, M.; Liedtke, Ch.; Schipperges, M.; Steger, S.; Teubler, J. (2015): Global nachhaltige materielle Wohlstandsniveaus – Analyse und Veranschaulichung global nachhaltiger materieller Versorgungspfade auf der Ebene von Haushalten. Abschlussbericht zu FKZ 3711 14 105, Texte 99/2015, Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [20] vfdb (2021): Deutsche Brandstatistik. Versicherte Sachschäden des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV). Abruf zum 12.08.2025 unter <https://erweiterungskreis.hornecker.de/app/public>
- [21] Fachverband Lichtkuppel, Lichtband und RWA e.V. (2002): BrandAktuell. Ausgabe 11/02, FVLR – Fachverband Lichtkuppel, Lichtband und RWA e.V., Detmold (Hrsg.) Abruf zum 21.10.2025 unter https://fvlr.de/wp-content/uploads/2023/08/pub_brandak11_02.pdf
- [22] Heinz, A.; Peltier, F.; Thill, G. (2013): Die Wohnsituation: Wohnfläche und Ausstattung der Wohnung. in STATEC Premiers résultats no. 9, 2013. Institut national de la statistique et des études économiques /Université du Luxembourg (Hrsg.) Luxembourg. Abruf zum 02.10.2025 unter https://www.researchgate.net/publication/279449761_Die_Wohnsituation_Wohnflaeche_und_Ausstattun_g_der_Wohnung
- [23] Neutrass Versicherungs-Partner AG (2021): Inventar Hausrat. Abruf zum 25.08.2025 unter https://www.neutrass.ch/docs/inventarblatt_pauschal_2021.pdf
- [24] Viebrockhaus AG (2025): Klein oder groß bauen? Abruf zum 13.11.2025 unter <https://www.viebrockhaus.de/planen-bauen/ratgeber/architektur-und-design/hausgroesse>
- [25] Kaufmann GmbH (2023): Wie viel Wohnfläche hat ein Einfamilienhaus? Abruf zum 13.11.2025 unter <https://www.kaufmannbau.com/wie-viel-wohnflaeche-hat-ein-einfamilienhaus/>
- [26] Schiller, S.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Fernández, J.-A.; Reichenbach, J.; Wagner, J.; Baumann, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Abschlussbericht zu FKZ 3712 93 316, Texte 83/2015, Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [27] Ohnesorge, D. (2025): Holzbauquote 2024 – Entwicklung des Holzbaus mit Licht und Schatten. Beitrag auf LinkedIn. Abruf zum 06.01.2026 unter https://de.linkedin.com/posts/denny-ohnesorge-b379b515b_holzbau-nachhaltigkeit-klimaschutz-activity-7339389629281853440-vHUS

- [28] Hauptverband der Deutschen Holzindustrie und Kunststoffe verarbeitenden Industrie (2025): Holzbauquote auf Höchststand, trotzdem kein Grund zum Jubeln. Pressemitteilung vom 11.06.2025. Hauptverband der Deutschen Holzindustrie, Berlin (Hrsg.) Abruf zum 06.01.2026 unter <https://www.holzindustrie.de/pressemitteilungen/4677/holzbauquote-auf-hoechststand--trotzdem-kein-grund-zum-jubeln.html>
- [29] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2024): Mediathek Grafiken Holzbau. Abruf zum 06.01.2026 unter <https://mediathek.fnr.de/grafiken/holz/holzprodukte.html>
- [30] Wagner, J.; Steinmetzer, S.; Theophil, L.; Strues, A.-S.; Kösegi, N.; Hoyer, St. (2022): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft. Abschlussbericht zu FKZ 3719 34 302 0, Texte 31/2022, Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [31] INTECUS GmbH (mehrere Jahre): interne unveröffentlichte Datenreihen und Ergebnisberichte zu durchgeführten Abfallsortieranaysen in verschiedenen Untersuchungsgebieten Deutschlands sowie zum Rückbau von acht Einzelgebäuden aus der Erprobung der Getrennthaltung von Altholz und Altholzschnellanalytik im Rahmen des Förderschwerpunktes Holz bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in den Jahren 1998-2000
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz / Umweltbundesamt (mehrere Jahre): Jahresberichte über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland nach Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. KOM-Tabellen und Qualitätsbericht. Abrufe zum 28.10.2025 unter <https://www.bundesumweltministerium.de/download/jahresberichte-ueber-die-altfahrzeug-verwertungsquoten-in-deutschland>
- [33] Sander, K.; Rödig, L.; Wagner, L.; Jepsen, D.; Holzhauer, R.; Baberg, L.; Spiecker, Th.; Zwisele, B.; Winterstein, M. (2020): Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. Abschlussbericht zu FKZ 3715 33 305 0, Texte 15/2020, Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [34] Brüning, R.; Witt, F.; Zwisele, B.; Gonser, J.; Böhm, C.; Hollaus, H.; Küchen, V.; Bargfried, P.; Löhle, St.; Schmiedel, U.; Wagner, J.; Günther, M.; Strues, A.-S. (2024, in Veröffentlichung): Entwicklung einer Methodik zur Erhebung des Kunststoffanteils in Elektro- und Elektronikaltgeräten und Ermittlung des Kunststoffrecyclingpotenzials. Unveröffentlichter Ergebnisberichtbericht zu FKZ-Forschungskennzahl 3722 34 3030 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau
- [35] Reinhardt, T.; Richers, U. (2004): Entsorgung von Schredderrückständen – Ein aktueller Überblick. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6940, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe (Hrsg.). Abruf zum 17.09.2025 unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn20/1686716850.pdf>
- [36] Karus, M.; Ortmann, S.; Gahle, Ch.; Pendarovski, C. (2006): Einsatz von Naturfasern in Verbundwerkstoffen für die Automobilproduktion in Deutschland von 1999 bis 2005. nova-Institut GmbH, Hürth (Hrsg.) Abruf zum 15.01.2026 unter <https://epflicht.ulb.uni-bonn.de/download/pdf/100351?originalFilename=true>
- [37] Volkswagen Group (2011): Materialmix – Das Potenzial der Werkstoffe. Viavision Ausgabe Nr. 04, 2011. Volkswagen AG, Wolfsburg (Hrsg.)
- [38] Bruckberger, H.-J. (2020): Woraus besteht eigentlich ein Auto? in Automotive Fachmedien – das Online Portal der Kfz-Wirtschaft, Österreichischer Wirtschaftsverlag GmbH (Hrsg.) Abruf zum 05.11.2025 unter <https://www.automotive.at/allgemein/woraus-besteht-eigentlich-ein-auto-45022/>
- [39] PlasticsEurope Deutschland e.V. (2025): Die Rolle von Kunststoffen in der Automobilindustrie. Abruf zum 05.11.2025 unter <https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/klima/mobilitat/kunststoffe-in-der-automobilindustrie/>

- [40] Heinen-Foudeh, Y. (2023): Diese Aufgaben übernehmen Hightech-Textilien im Auto. in Automobil Produktion, Ultima Media Germany GmbH (Hrsg.) Abruf zum 05.11.2025 unter <https://www.automobil-produktion.de/technik/diese-aufgaben-uebernehmen-hightechtextilien-im-auto/992770>
- [41] Siemon, M.; Moritz, M. (2022): Brandszenarien bei E-PKW. Stand der Wissenschaft. Whitepaper im Auftrag der Gebäudeversicherung Zürich (GVZ) (Hrsg.), Zürich
- [42] DEKRA Automobil GmbH (2022): Fakten zum Thema Elektromobilität und Brandschutz. Abruf zum 18.08.2025 unter <https://dekraproduct-media.e-spirit.cloud/578b2cd5-7629-485e-a4b6-6c4e73f71231/media/fakten-zum-thema-e-mobilitaet-und-brandschutz.pdf>
- [43] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2023): Wer zahlt, wenn mein Auto abgebrannt ist? in Die Versicherer, Abruf zum 15.01.2026 unter <https://www.dieversicherer.de/versicherer/auto/news/wer-zahlt-wenn-mein-auto-abgebrannt-ist--142166>
- [44] Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. / Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (2025): Maßnahmen gegen existenzbedrohende Batteriebrände in der Recyclingwirtschaft. Abruf zum 23.09.2025 unter https://www.bde.de/documents/760/2025-07-14_bvse_BDE_Br%C3%A4nde_durch_Batterien.pdf
- [45] Universität Bremen (2022): LCA „Reifen aus Naturkautschuk“ - Teil 1 Produktion und Ländervergleich. Abruf zum 15.01.2026 unter https://www.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/sites/freix/LCA_3_Gebrauch_Material/AB_1-3_Naturkautschuk_Reifen.docx
- [46] Dehoust, G.; Schüler, D.; Vogt, R.; Giegrich, J. (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft. Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Abschlussbericht zu FKZ 3708 31 302, Texte 06/2010, Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [47] Juhrich, K. (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Climate Change 27/2016 Umweltbundesamt (Hrsg.) Dessau-Roßlau
- [48] Härdtle, G. (1991): Recycling von Kunststoffabfällen. Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit. Beiheft zu Müll und Abfall H27, Verlag Erich Schmidt, Berlin
- [49] European Bioplastics e.V. (2025): Bioplastic market development update. Abruf zum 24.10.2025 unter <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [50] WWF Deutschland (2025): Produkte aus der Landwirtschaft. Naturkautschuk. Abruf zum 24.10.2025 unter <https://www.wwf.de/themen-projekte/landwirtschaft/produkte-aus-der-landwirtschaft/naturkautschuk>
- [51] Textile Exchange (2023): Materials Market Report 2023. Abruf zum 24.10.2025 unter <https://textileexchange.org/app/uploads/2023/11/Materials-Market-Report-2023.pdf>
- [52] Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) / PE INTERNATIONAL GmbH (2007): Grunddatensätze für Holz und Holzwerkstoffe im Netzwerk Lebenszyklusdaten. Projektbericht zum Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401, Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.) Abruf zum 11.11.2025 unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dk041320.pdf
- [53] Wikimedia Foundation Inc. (2025): Wikipedia Papier Chemische Aufbereitung. Abruf zum 15.01.2026 unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Papier#:~:text=notwendig%2E-,Chemische%20Aufbereitung>
- [54] Anonymus (kein Jahr): Papierherstellung Hilfsstoffe. Abruf zum 15.01.2026 unter <https://www.papier-machen.de/papierherstellung/hilfsstoffe/>
- [55] Fachverband Tageslicht und Rauchschutz (FVLR) e. V. (2017): BrandAktuell. Ausgabe 35/17, FVLR (Hrsg.) Abruf zum 02.02.2026 unter https://fvlr.de/wp-content/uploads/2023/08/pub_brandak35_17.pdf

- [56] Lucas, R.; Preiss, U.; Ring, R. (1991): Zur Praxis der Hausmüllvermeidung ausgewählter Kommunen Nordrhein-Westfalens. Schriftenreihe des IÖW 47/91, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin (Hrsg.), Abruf zum 03.12.2025 unter https://www.ioew.de/fileadmin/migrated/tx_ukioewdb/IOEW_SR_047_Hausmuellvermeidung_Kommunen_NRW.pdf
- [57] Heyer, K.-U. (2003): Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Hamburger Berichte 21. IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. R. Stegmann und Partner (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart Abruf zum 03.12.2025 unter https://www.ifas-hamburg.de/PDF/heyer_nachsorge_2einleitung.pdf
- [58] Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2022): Ist Heizen mit Holz klimaneutral? Online-Informationsbeitrag, Abruf zum 06.11.2025 unter <https://www.bundesumweltministerium.de/heizen-mit-holz/umwelt/klimaauswirkungen-von-heizen-mit-holz>