

Kreislaufwirtschaft für die Dekarbonisierung des Bausektors - Modellierung ausgewählter Stoffströme und dazugehöriger THG-Emissionen

Meta Thurid Lotz¹, Andrea Herbst, Matthias Rehfeldt

Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, meta.thurid.lotz@isi.fraunhofer.de, <https://www.isi.fraunhofer.de/>

Kurzfassung:

Vor dem Hintergrund steigender Materialbedarfe und fortschreitender Klimakrise gewinnt die Kreislaufwirtschaft für die Treibhausgasemissionsreduktion auch politisch an Bedeutung. Die Umsetzung solcher Maßnahmen ist insbesondere in Grundstoffindustrien relevant, da diesen ein Großteil der Treibhausgasemissionen zugeordnet werden kann und deren Dekarbonisierung besonders herausfordernd ist. Da die Auswirkungen von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette zeigen, ist die Betrachtung typischer Endverwendungsgüter und zugehöriger Grundstoffe zielführend. In diesem Beitrag werden die mengen- und emissionsmäßig relevanten Grundstoffe Stahl und Zement für den Einsatz im Bausektor untersucht. Es erfolgt die Quantifizierung der Materialflüsse in der Europäischen Union für das Jahr 2019 durch eine flussgetriebene Materialflussmodellierung und die Abschätzung der theoretischen Treibhausgasreduzierungsunterschiede beispielhafter Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen. Ziel der Betrachtung ist das Schaffen einer methodischen Grundlage für die spätere Entwicklung prospektiver Dekarbonisierungsszenarien. Erste Ergebnisse zeigen, dass während die Zementproduktion ausschließlich für Endverwendungsgüter im Bausektor verwendet wird, können dem Bausektor rund 45 Prozent der Stahlfertigerzeugnisse zugeordnet werden. Für letzteres werden hauptsächlich Langprodukte eingesetzt, die zu einem Großteil aus recyceltem Material hergestellt werden. Die zusätzliche Modellierung von Maßnahmen zur Materialeffizienzsteigerung und Materialsubstitution zeigt, dass die Materialflussmodellierung geeignet ist, um Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen abzubilden und diese auch einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zur Reduktion der industriellen Treibhausgasemissionen leisten können.

Keywords: Bausektor, Dekarbonisierung, Kreislaufwirtschaft, Materialflussmodellierung

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund steigender Materialbedarfe und fortschreitender Klimakrise gewinnen materialbasierte Strategien für die Treibhausgasemissionsreduktion an Bedeutung [1, 2]. Insbesondere die unter dem Oberbegriff Kreislaufwirtschaft zusammengefassten Strategien gelten als vielversprechend für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Wirtschaftswachstums [3, 4]. Der Industriesektor und insbesondere die Grundstoffindustrien sind von besonderer Bedeutung, da ihnen mit rund 67 Prozent ein Großteil der prozessbezogenen Treibhausgasemissionen der Industrie zugeordnet werden kann und die Vermeidung dieser besonders

¹ Jungautorin

herausfordernd ist [5, 6]. Die Kreislaufwirtschaft adressiert den Rohstoff- und Energiebedarf sowie die Treibhausgasemissionen, welche im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Grundstoffen entstehen [7, 8]. Zusätzlich kann die Kreislaufwirtschaft den prospektiven Bedarf an treibhausgasneutralen Energieträgern durch Reduzierung der Nachfrage nach neuen Materialien verringern. Dies ist für die Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger und konkurrierender Anwendungen von Bedeutung [9].

Die Kreislaufwirtschaft ist kein neues Konzept für materialbasierte Strategien, sondern als eine Rahmung zu verstehen [3]. Der Grundgedanke wurde bereits 1966 durch Boulding formuliert, indem er die begrenzte Materialverfügbarkeit und die somit notwendige Kreislaufführung von Materialien feststellte [10]. Inzwischen hat sich diese Grundidee weiterentwickelt und diverse Publikationen versuchen sich an der Abgrenzung des Konzeptes [3, 11 bis 15]. Während der ursprüngliche Gedanke das Recycling von Materialien und somit das Ende des Produktlebenszyklus fokussierte [10 bis 13], berücksichtigen aktuellere Betrachtungen außerdem Strategien, welche der Materialeffizienz² und -substitution³ zugeordnet werden können [14, 15]. Infolge der beschriebenen Synergien zwischen der Industriedekarbonisierung und der Kreislaufwirtschaft gewinnt diese in der politischen Debatte bei allen Interessensgruppen an Bedeutung [18]. Die Kreislaufwirtschaft und ihre Verbindung zum Energiesystem durch Material- und Energieströme muss einerseits bei der Politikgestaltung und der Analyse von Treibhausgasminderungspfaden berücksichtigt werden. Andererseits können Analysen, welche die potenziellen Auswirkungen von Kreislaufwirtschaft auf die Energienachfrage und die Treibhausgasemissionen untersuchen, den politischen Prozess durch die Bewertung von Maßnahmen oder Sektoren unterstützen [19]. Der Bausektor ist hierbei von besonderer Relevanz, da diesem große Mengen der treibhausgasintensiven Grundstoffe Stahl und Zement zugeordnet werden können [20, 21].

Die Stahlherstellung bis zur Endverwendung kann in vier Abschnitte entlang der Wertschöpfungskette unterteilt werden. Der erste Abschnitt ist die Herstellung Roheisen und Rohstahl sowie der Guss von Rohstahlformen. Hierbei kann zwischen der Primärstahlerzeugung und der Sekundärstahlerzeugung unterschieden werden. Für die Primärstahlerzeugung erfolgt die Reduktion von Eisenerzen mit Koks und Sinter im Hochofen und die anschließende Umwandlung von Roheisen zu Rohstahl im Sauerstoffstahlwerk. Bei der Sekundärstahlerzeugung wird hauptsächlich Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl verarbeitet [22]. Neben der Herstellung im Hochofen kann Eisenerz auch in Direktreduktionsanlagen zu Eisenschwamm reduziert und im Elektrolichtbogenofen weiterverarbeitet werden. Dieses Herstellungsverfahren wird aktuell wenig eingesetzt [22, 23]. Der entstehende Rohstahl liegt flüssig vor und wird anschließend in Gießereianlagen zu Rohstahlformen (Vorblock, Knüppel, Bramme) weiterverarbeitet. Hier kann zwischen dem Strang- und dem Blockguss unterschieden werden, wobei ersteres häufiger umgesetzt wird. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Verarbeitung der Rohstahlformen in Warmwalzwerken zu Halbfertigerzeugnissen (Profil, Stab, Blech, Warmband) sowie teilweise die Weiterverarbeitung dieser Erzeugnisse durch bspw. Kaltwalzen oder Beschichten zu Fertigerzeugnissen. Da ein Teil der Stahlerzeugnisse als Halbfertigerzeugnisse gehandelt werden, ist die Unterscheidung nicht immer trennscharf. Sowohl die Halbfertig- als auch die Fertigerzeugnisse können nach Lang- und Flachprodukten unterschieden werden. Zu den Langprodukten zählen Betonbewehrungsstäbe, warmgewalzte Stäbe, Walzdraht, Gleismaterial, Profile sowie nahtlose Rohre und zu den Flachprodukten Bleche, Warmband, Elektroblech, Zinnmühlenprodukte, sonstige metallbeschichtete Bleche, nichtmetallisch beschichtete Bleche sowie geschweißte Rohre [22]. Die Herstellung von Langprodukten erfolgt im Wesentlichen basierend auf der

² Materialeffizienz umfasst Maßnahmen entlang des Produktlebenszyklus, welche den Materialbedarf reduzieren, bspw. durch Design oder Nutzungsintensivierung [16].

³ Materialsubstitution umfasst Maßnahmen, welche gezielt bestimmte Materialien mit hohen Umweltauswirkungen (bspw. assoziierten Treibhausgasemissionen) substituieren [17].

Sekundärstahlerzeugung [22, 24]. Im dritten Abschnitt der Wertschöpfungskette erfolgt die nutzungsspezifische Verarbeitung der Halbfertig- und Fertigerzeugnisse zu Endverwendungsgütern (Gebäude, Infrastruktur, Personen- und Lastkraftwagen, Schiffe und andere Fahrzeuge, mechanisches und elektrisches Equipment, Metallwaren, Haushaltsprodukte, Verpackungen). Im letzten Abschnitt werden die hergestellten Endverwendungsgüter der Nutzung zugeführt [22]. Während die Zementherstellung bis zur Endverwendung ebenfalls in vier Schritte entlang der Wertschöpfungskette unterteilt werden kann, unterscheidet diese sich strukturell von der Stahlherstellung, da es weniger Verarbeitungsstufen gibt. Zunächst erfolgt die Herstellung von Klinker aus Kalkstein, der zusammen mit Schiefer und Tonmineralien in einem Drehrohren gesintert wird. Im zweiten Abschnitt wird der Klinker anschließend gemahlen und mit anderen Materialien (bspw. Flugasche aus Kohlekraftwerken) zu Zement vermischt [25]. Es kann zwischen 5 Hauptzementarten hauptsächlich abhängig vom Klinkeranteil unterschieden werden (CEM I, CEM II, CEM III-V). Im dritten Abschnitt der Wertschöpfungskette erfolgt die Verarbeitung des Zements zu Beton. Hier kann zwischen Transportbeton und Betonfertigteilen unterschieden werden. Während ersteres die Verarbeitung des Betons am Verwendungsort für die entsprechende Nutzung voraussetzt, werden bei letzterem fertige Bauteile geliefert. Der letzte Abschnitt beschreibt dann die Zuführung der beschriebenen Endprodukte zur Nutzung, die ausschließlich im Bausektor erfolgt [25].

Da sowohl die Stahl- als auch die Zementherstellung energieintensiv ist und einen Großteil der industriellen Treibhausgasemissionen verursacht, kann die Kreislaufwirtschaft durch die zuvor beschriebenen Strategien zur Treibhausgasemissionsreduktion im Bausektor beitragen. Eine Steigerung der Materialeffizienz durch intensivere und zielgerichtete Nutzung von Gebäuden und Infrastruktur kann sowohl den Bedarf an Stahl und Zement perspektivisch senken [2]. Während die Kreislaufführung von Materialien, also das Recycling, bei Zement eine untergeordnete Rolle spielt, wird dies bei der Stahlherstellung aktuell schon umgesetzt. Jedoch gibt es auch hier noch weitere Potentiale zur Erhöhung des Anteils der schrottbasierten Stahlherstellung und somit zur Vermeidung der energieintensiveren Herstellung von Roheisen im Hochofen [26, 27]. Eine maßgebliche Herausforderung ist hier die Verbesserung der Erfassung und Sortierung von Altschrotten um sortenreinere Schrotte für hochwertige Stahlanwendungen nutzen zu können sowie die zukünftige Verfügbarkeit von Stahlschrott als limitierender Faktor. Bei der Herstellung von Zement ist perspektivisch insbesondere die Materialsubstitution von Bedeutung, da keine Alternative zur energie- und treibhausgasemissionsintensiven Herstellung von Klinker verfügbar ist. Hierbei wird der Einsatz von Klinker bei der Zementherstellung durch Materialien wie bspw. innovative Bindemittel substituiert [28].

Für die Untersuchung der beschriebenen Maßnahmen und der Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen gibt es drei methodische Ansätze: die Input-Output-Analyse, die Lebenszyklusanalyse und die Materialflussanalyse [29]. Während die Input-Output-Analyse im Wesentlichen zur Abbildung ökonomischer Interdependenzen genutzt wird, bilden die Lebenszyklus- und die Materialflussanalyse produkt- bzw. materialspezifische Informationen ab. Erstere nimmt einen Produktfokus über den gesamten Lebenszyklus ein, während letztere Flüsse und Bestände aus Systemperspektive abbildet [29 bis 32]. Insbesondere die Materialflussanalyse bietet sich für die Entwicklung prospektiver Szenarien an [29, 30]. Folglich wird diese in aktuellen Untersuchungen zu prospektiven Treibhausgaseminderungspotentialen durch materialbasierte Strategien eingesetzt [2, 9, 20, 21, 33]. Die Materialflussanalyse kann außerdem in einen flussgetriebenen und einen bestandsgetriebenen Ansatz unterschieden werden. I.d.R. wird ersterer für retrospektive Betrachtungen genutzt, da auf statistische Daten zurückgegriffen werden kann, um Flüsse innerhalb eines Systems zu bestimmen. Basierend auf Lebensdauerverteilungen können Bestände errechnet werden [30]. Für prospektive Betrachtungen wird häufig der bestandsgetriebene Ansatz genutzt. Hierbei wird über den Bedarf nach einer bestimmten Dienstleistung die Menge des benötigten Endverwendungsgutes, also ein Bestand, bestimmt. Hieraus kann anschließend unter Berücksichtigung von Lebenszeitverteilungen der Fluss errechnet werden. Dies bietet sich gegenüber der Fortschreibung von Flüssen aufgrund der geringeren Fluktuationssensitivität für prospektive Betrachtungen an [30, 34].

Im folgenden Beitrag werden Stahl- und Zementfluss in der EU durch eine Materialflussanalyse quantifiziert sowie theoretische Treibhausgasminierungspotentiale ausgewählter Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen im Bausektor abgeschätzt und den Materialflüssen zugeordnet. Dies erfolgt als retrospektive, flussgetriebene Analyse für das Jahr 2019, um die methodische Eignung zu bestätigen und Herausforderungen für die Betrachtung prospektiver Dekarbonisierungsszenarien zu identifizieren. Somit wird die Forschungsfrage beantwortet: *Wie kann der Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Dekarbonisierung des EU-Bausektors und der zugehörigen Grundstoffindustrien für ein aktuelles Basisjahr abgebildet werden und welche methodischen Herausforderungen lassen sich für prospektive Betrachtungen ableiten?*

2 Methodische Vorgangsweise und Daten

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird ein zweiteiliges Vorgehen umgesetzt. Zunächst werden die Stahl- und Zementflüsse sowie zugehörige Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen in der EU für ein Basisjahr quantifiziert. Anschließend werden beispielhafte Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft den Materialflüssen, Energiebedarfen und Treibhausgasemissionen zugeordnet. Hierdurch kann das Potenzial der Treibhausgasemissionsminderung abgeschätzt werden [21, 25]. Es wird angestrebt die Gesamtheit der Strategien (Recycling, Materialsubstitution, Materialeffizienz) abzubilden. Basierend auf diesen Ergebnissen und insbesondere den Einschränkungen können Herausforderungen für die Betrachtung prospektiver Szenarien abgeleitet werden.

2.1 Materialflussmodellierung

Für die Quantifizierung der Materialflüsse sowie der dazugehörigen Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen wird für Stahl eine dynamische Materialflussanalyse basierend auf [21] umgesetzt und für Zement auf eine bestehende statische Materialflussanalyse aus [21] und [20] zurückgegriffen. Angelehnt an die grundsätzliche Struktur der Materialflussanalyse aus [32] wird die in Abbildung 1 dargestellte Modellstruktur genutzt. Die Systemgrenze entspricht hierbei der geographischen Abgrenzung der EU-28 Mitgliedsstaaten. Der Außenhandel wird durch Handelssalden abgebildet. Für die Umsetzung der Modellierung wird unter anderem das Software-Framework ODYM als auch zusätzliche Rechnungen genutzt [5]. Die Umsetzung und die Datenherkunft sind in den folgenden Abschnitten für Stahl ausführlich beschrieben, während für Zement auf Unterschiede zu [21] und [20] verwiesen wird. Sowohl der Stahl- als auch der Zementfluss werden als Stoffstrombild für das Basisjahr 2019 dargestellt, da dies das aktuellste Jahr mit ausreichender Datenverfügbarkeit ist.

Die Modellierung des Stahlflusses in der EU wird als eine flussgetriebene, dynamische Materialflussanalyse umgesetzt. Der dynamische Ansatz ist hier notwendig, da wesentliche Mengen Stahl aus Sekundärmaterial hergestellt werden und somit die Schrottverfügbarkeit nach Ende der Nutzungsphase eine wesentliche Bedeutung hat [26]. Die in Abbildung 1 dargestellte Struktur ergibt sich aus der einleitend beschriebenen Struktur der Stahlherstellung, den verfügbaren Daten bereitgestellt durch den globalen Branchenverband der Stahlindustrie, World Steel Association (WSA) [35], sowie aus den verfügbaren Daten zu Verlusten der einzelnen Prozessstufen und zur Aufteilung auf die Endverwendungsgüter aus [22]. Die WSA stellt jährlich in Form eines statistischen Jahrbuchs länderspezifische Daten der vergangenen zehn Jahre zu Produktions-, Import- und Exportmengen sowie zum sichtbaren und tatsächlichen Stahlverbrauch in unterschiedlichen Aggregationsstufen bereit [35]. Die Jahrbücher der Jahre 2001 bis 2018 und 2020 wurden für diesen Beitrag genutzt, um statistische Daten für die Jahre 1991 bis 2019 abzubilden [27, 36 bis 53]. Bis 2005 werden die Daten für die EU-28 länderspezifisch und aggregiert angegeben. Für die Jahre 1991 bis einschließlich 2004 werden die Daten für die Länder, welche zu diesem Zeitpunkt nicht Teil der EU waren, zum EU Aggregat addiert. Daten vor 1991 werden linear zum Jahr 1900 interpoliert unter der Annahme, dass die Stahlherstellung dort bei null lag. Die Handelssalden werden vor 1991 nicht berücksichtigt.

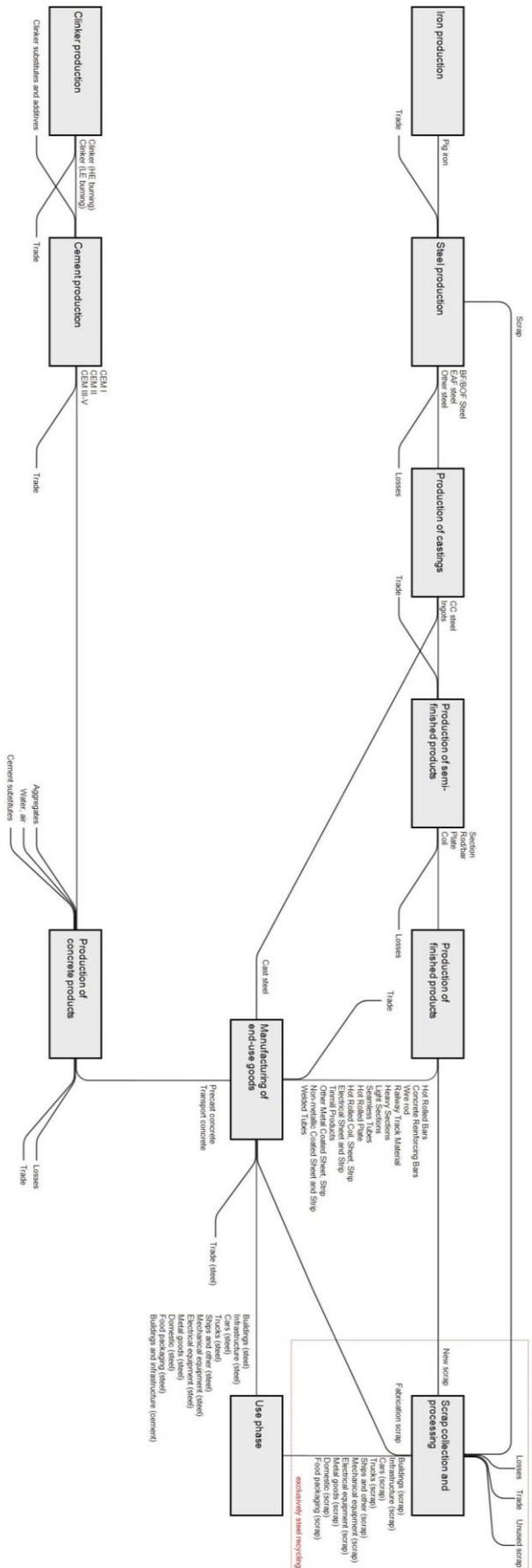


Abbildung 1: Modellstruktur

Bei der Herstellung von Eisen wird lediglich die primäre Herstellungsrouten im Hochofen berücksichtigt, da der Direktreduktion nur einen sehr geringen Anteil hat [23, 27]. Dem Hochofen wird außerdem die Herstellung von Koks und Sinter im Rahmen der Rohstoffvorbereitung zugeordnet. Die Daten der Roheisenherstellung von der WSA werden folglich um produktbezogene Koks- und Sintereinsätze ergänzt⁴. Der Sintereinsatz wurde basierend auf dem Jahr 2015 berechnet. Als Datenbasis dienen die Aktivitätsdaten der Vereinten Nationen sowie die Produktionsdaten der WSA [27, 55]. Für den Kokseinsatz wurde ein analoges Verfahren basierend auf der Energiestatistik der Vereinten Nationen und den Produktionsdaten der WSA gewählt [27, 54].

Für die Stahlherstellung werden die Daten der WSA um produktbezogene Materialeinsätze aus [22] ergänzt, um den Schrotteinsatz über eine Massenbilanz zu bestimmen⁵. Die Differenz zwischen Zu- und Abfluss werden als prozessstufenspezifische Verluste berücksichtigt.

Ein ähnliches Vorgehen wird auch für die Berechnung der Halbfertigerzeugnisse genutzt, da die Produktionsdaten für die Prozessstufen *Production of semi-finished products* und *Production of finished products* lediglich als Aggregat vorliegen. Hierfür wird einerseits die Menge der hergestellten Halbfertigerzeugnisse ausgehend von der Menge der verwendeten Rohstahlformen anhand der in Tabelle 1 dargestellten Verteilung bestimmt. Andererseits wird der Bedarf an Halbfertigerzeugnissen ausgehend von den angegebenen Produktionsmengen der Fertigerzeugnisse über die in Tabelle 2 dargestellten Materialeinsätze bestimmt. Die Produktkategorien aus [22] werden zu diesem Zweck bei abweichenden Bezeichnungen den Produktkategorien der WSA zugeordnet. Diese Berechnung ist notwendig, da ein Teil der Halbfertigerzeugnisse als Fertigerzeugnisse gehandelt wird, während der Rest zu Fertigerzeugnissen weiterverarbeitet wird [22]. Die Differenz zwischen der statistischen Menge der Gießereiprodukte und der errechneten Menge der Halbfertigerzeugnisse werden als Verluste und die Differenz zwischen der errechneten Menge der Halbfertigerzeugnisse und der statistischen Menge der produzierten Fertigerzeugnisse als Neuschrott berücksichtigt. Auch die Handelsdaten für diese Prozessstufen liegen lediglich als nicht-produktspezifisches Aggregat vor. Daher wird angenommen, dass die Handelsanteile den Produktionsanteilen entsprechen.

Tabelle 1: Verteilung der Rohstahlformen auf Halbfertigerzeugnissen nach [22]

	Section	Rod/bar	Plate	Coil
CC steel	0,08	0,40	0,11	0,45
Ingots	0,06	0,59	0,08	0,18

Tabelle 2: Produktbezogene Materialeinsätze in t/t für die Herstellung von Fertigerzeugnissen nach [22]

	Concrete reinforcing bars	Hot rolled bars	Wire rod	Railway track material	Heavy sections	Light sections	Seamless tubes	Hot rolled plate	Hot rolled coil, sheet and strip	Electrical sheet and strip	Tinmill products	Other metal coated sheet and strip	Non-metallic coated sheet and strip	Welded tubes
Section	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rod/bar	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Plate	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07
Coil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,05	1,13	1,08	1,10	0,00

⁴ Produktbezogener Kokseinsatz: 0,92 t/t; produktbezogener Sintereinsatz: 0,39 t/t [27, 54, 55].

⁵ Produktbezogener Materialeinsatz BF/BOF steel: 1,12 t/t; EAF steel: 1,15 t/t; Other steel: 1,15 t/t [22].

Für die Verteilung der Fertigerzeugnisse auf die Endverwendungsgüter wird wiederum [22] herangezogen. Auch hierfür wird die Zuordnung der Produktkategorien genutzt. Die dort angegebene Verteilung auf Endverwendungsgüter wird mit einem Korrekturfaktor umgerechnet, da aufgrund von Rundungsgenauigkeiten Abweichungen von bis zu 0,7 Prozent entstehen. Zusätzlich wird für die Herstellung der Endverwendungsgüter vereinfacht ein mittlerer Verlust in Höhe von 1 Prozent angenommen. Die hierdurch entstehende Differenz wird als Fabrikationsschrott berücksichtigt. Es ergibt sich die in Tabelle 3 dargestellte Verteilung von Fertigerzeugnissen zu Endverwendungsgütern.

Tabelle 3: Verteilung der Fertigerzeugnisse auf Endverwendungsgüter nach [22]

	Buildings	Infrastructure	Cars	Trucks	Ships and other	Mechanical equipment	Electrical equipment	Metal goods	Domestic products	Food packaging
<i>Von Fertigerzeugnis zu Endverwendungsgut</i>										
Concrete reinforcing bars	0,52	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hot rolled bars	0,03	0,01	0,13	0,03	0,01	0,37	0,04	0,38	0,00	0,00
Wire rod	0,29	0,25	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05	0,31	0,00	0,00
Railway track material	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Heavy sections	0,76	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Light sections	0,75	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Seamless tubes	0,46	0,14	0,18	0,04	0,04	0,11	0,04	0,00	0,00	0,00
Hot rolled plate	0,05	0,01	0,00	0,00	0,30	0,30	0,04	0,30	0,00	0,00
Hot rolled coil, sheet and strip	0,50	0,16	0,00	0,05	0,00	0,23	0,01	0,05	0,00	0,00
Electrical sheet and strip	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00
Tinmill products	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99
Other metal coated sheet and strip	0,06	0,02	0,85	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Non-metallic coated sheet and strip	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00
Welded tubes	0,22	0,39	0,00	0,02	0,02	0,27	0,06	0,02	0,00	0,00
Cast steel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00

Für den indirekten Stahlhandel, also den Handel der Endverwendungsgüter, wird ein zum Handel der Halbfertig- und Fertigerzeugnisse identischer Ansatz genutzt. Hierfür wird jedoch zunächst die Gesamtmenge des indirekten Handels als Differenz des sichtbaren⁶ und des tatsächlichen Stahlverbrauchs⁷ errechnet. Die Nutzungsdauer der Endverwendungsgüter, also der Verbleib als Bestand in der Nutzungsphase, wird über eine normalverteilte Lebensdauer bestimmt [56]. Hierfür werden die in Tabelle 4 dargestellten Lebensdauern berücksichtigt [57]. Der Abfluss aus der Nutzungsphase wird als Altschrott berücksichtigt. Unter Berücksichtigung nutzungsspezifischer Sammlungsfaktoren wird über eine Massenbilanz der nicht verwendete Schrottanteil bestimmt. Um den getroffenen Annahmen zu validieren werden die Ergebnisse mit einschlägigen Publikationen und Statistiken verglichen.

⁶ Der sichtbare Stahlverbrauch ist die Differenz zwischen der Herstellung von Stahlfertigerzeugnissen und dem Nettoexport (Export abzüglich Import) von Stahlfertigerzeugnissen [27].

⁷ Der tatsächliche Stahlverbrauch ist die Differenz zwischen dem sichtbaren Stahlverbrauch und dem Nettoexport des indirekten Handels (Handel mit Endverwendungsgütern) [27].

Tabelle 4: Lebensdauern und Standardabweichungen nach [57]

	Durchschnitt	Standardabweichung
Buildings	60	30
Infrastructure	60	30
Cars	17	5,1
Trucks	17	5,1
Ships and other*	17	5,1
Mechanical equipment	17	5,1
Electrical equipment	17	5,1
Metal goods	7	2,1
Domestic products	7	2,1
Food packaging*	7	2,1
*Annahme		

Während es grundsätzlich möglich ist den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen als zusätzliche Ebene der Materialflussanalyse zu errechnen [30], kann dies auf Grundlage der dargestellten Daten nicht direkt umgesetzt werden, da keine statistische Zuordnung der Flüsse über die beschriebenen Prozesse hinweg stattfindet. Daher wird eine vereinfachte Berechnung für Energiebedarf und Treibhausgasemissionen bis zur Prozessstufe *Production of finished products* für das Basisjahr 2019 durchgeführt. Hierfür wird anhand der Menge der produzierten Fertigerzeugnisse aus [27] und der Materialeinsätze der einzelnen Verarbeitungsstufen aus [22] der Materialbedarf für das jeweilige Produkt bestimmt. Zudem wird wie in einer vergleichbaren Untersuchung die Annahme getroffen, dass alle Langprodukte aus *EAF steel* und alle Flachprodukte aus *BF/BOF steel* hergestellt werden [58]. Um dies zu validieren, wurden die Stahlerzeugungskapazitäten aus der VDeH Steel Plantfacts Datenbank ausgewertet [59]. Die Ergebnisse zeigen, dass rund 86 Prozent des Primärstahlerzeugung Brammen und rund 88 Prozent der Sekundärstahlerzeugung Knüppel erzeugen [59]. Brammen werden hauptsächlich für die Erzeugung von Flachprodukten und Knüppel für die Erzeugung von Langprodukten eingesetzt [22]. Bei der Erzeugung von Blöcken ist sie Zuordnung zur Sekundärstahlerzeugung mit 59 Prozent weniger eindeutig [59]. Diese werden jedoch ausschließlich für die Herstellung von Langprodukten eingesetzt [22]. Dies zeigt, dass die angenommene Vereinfachung zur Zuordnung von Lang- und Flachprodukten zur Sekundär- bzw. Primärstahlerzeugung im Rahmen der Betrachtung angemessen ist. Auch die Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen für die Rohstoffe Koks und Sinter werden im Rahmen Eisenherstellung berücksichtigt. Die abgeleiteten produktbezogenen Materialeinsätze je Fertigerzeugnis sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Reihenfolge der Prozessstufen entspricht der Flussrichtung aus Abbildung 1 und der Wert bildet den prozessstufenspezifischen Materialeinsatz je Produkteinheit ab. Folglich durchläuft der Fluss für ein Fertigerzeugnis nicht alle Produktstufen. Die jeweils relevanten Produktstufen sind daher ebenfalls aus Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Produktbezogene Materialeinsätze entlang der Wertschöpfungskette in t/t nach [22]

	BF	BOF	EAF	PRM*	SEM	RBM	PLM	HSM	STP	TWP	CRM	GP	TM	OCP
Concrete reinforcing bars			1,00	1,08		1,06								
Hot rolled bars			1,00	1,08		1,06								
Wire rod			1,00	1,08		1,06								

	BF	BOF	EAF	PRM*	SEM	RBM	PLM	HSM	STP	TWP	CRM	GP	TM	OCP
Railway track material			1,00	1,08	1,11									
Heavy sections			1,00	1,08	1,11									
Light sections			1,00	1,08	1,11									
Seamless tubes			1,00	1,08		1,06			1,08					
Hot rolled plate	1,00	1,15		1,08			1,11							
Hot rolled coil, sheet and strip	1,00	1,15		1,08				1,04						
Electrical sheet and strip	1,00	1,15		1,08				1,04			1,05			
Tinmill products	1,00	1,15		1,08				1,04			1,05		1,07	
Other metal coated sheet and strip	1,00	1,15		1,08				1,04			1,05	1,03		
Non-metallic coated sheet and strip	1,00	1,15		1,08				1,04			1,05	1,03		1,02
Welded tubes	1,00	1,15		1,08			1,11			1,07				

* ausschließlich Barren
 BF - Blast furnace, BOF - Basic oxygen steelmaking, EAF - Electric arc furnace, PRM - Primary mill/Bloom, slab, billet mill, SEM - Section mill, RBM - Rod/bar mill, PLM - Plate mill, HSM - Hot strip mill incl. Pickling line, STP - Seamless tube/machining plant, TWP - Tube welding plant/stamping, CRM - Cold rolling mill, GP - Galvanising plant, TM - Tinmill/Skin mill, OCP - Organic coating plant

Für die Berechnung der Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen werden zusätzlich die Daten aus [60], [61] und [62] genutzt und anhand der Best Available Technologies aus [63] validiert. Die energieträgerspezifischen Emissionsfaktoren (CO₂-Emissionsäquivalente) aus [64] und die Energieträgerverteilung aus [60] werden außerdem verwendet. Eine Übersicht der resultierenden Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen ist in Tabelle 6 dargestellt. Da für einen Teil der Verarbeitungsstufen keine Daten verfügbar waren, werden Annahmen basierend auf vergleichbaren Verarbeitungsstufen getroffen. Eine Berücksichtigung der Prozesse zur Herstellung nahtloser und geschweißter Rohre erfolgt aufgrund mangelnder Daten und geringer Produktionsmengen nicht [27]. Die Darstellung erfolgt tabellarisch als Summe für jede Verarbeitungsstufe. Die Berechnung erfolgt für die einzelnen Prozessstufen sowie kumuliert für die Stahlfertigerzeugnisse.

Tabelle 6: Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen der Verarbeitungsstufen

	Energiebedarf in GJ/t	Direkte Treibhausgasemissionen in t CO ₂ äq./t	Indirekte Treibhausgasemissionen in t CO ₂ äq./t
Coke	3,32 [60]	Unter BF/BOF angegeben	0,192 [60, 61, 64]
Sinter	2,37 [60]	0,067 [60]	0,251 [60, 61, 64]

	Energiebedarf in GJ/t	Direkte Treibhausgasemissionen in t CO ₂ äq./t	Indirekte Treibhausgasemissionen in t CO ₂ äq./t
BF/BOF	12,24 [60]	0,015 [60]	1,259 [60, 61, 64]
EAF	3,26 [60]	0,007 [60]	0,321 [60, 61, 64]
PRM	1,783 [61]	n/a	0,123* [60, 61, 64] (Energieträgerverteilung wie RBM)
SEM	0,500* (wie RBM)	n/a	0,035* [60, 64] (Energieträgerverteilung wie RBM)
RBM	0,500 [65]	n/a	0,035 [60, 64, 65]
PLM	2,45* (wie HSM)	n/a	0,141* [60, 64] (Energieträgerverteilung wie HSM)
HSM	2,45 [60]	n/a	0,141* [60, 64]
CRM	0,743 [61]	n/a	0,043* [60, 61, 64] (Energieträgerverteilung wie HSM)
GP	0,550 [63]	n/a	0,060 [63, 64]
TM	0,079 [62]	n/a	0,005* [60, 62, 64] (Energieträgerverteilung wie HSM)
OCP	0,758 [61]	n/a	0,082* [61, 63, 64] (Energieträgerverteilung wie GP)
*Annahme BF - Blast furnace, BOF - Basic oxygen steelmaking, EAF - Electric arc furnace, PRM - Primary mill/Bloom, slab, billet mill, SEM - Section mill, RBM - Rod/bar mill, PLM - Plate mill, HSM - Hot strip mill incl. Pickling line, STP - Seamless tube/machining plant, TWP - Tube welding plant/stamping, CRM - Cold rolling mill, GP - Galvanising plant, TM - Tinmill/Skin mill, OCP - Organic coating plant			

Die Modellierung des Zementflusses in der EU wird als flussgetriebene, statische Materialflussanalyse für das Basisjahr 2019 umgesetzt, da die Verwendung von Sekundärmaterial im Bausektor nicht üblich ist [20, 25]. Die in Abbildung 1 dargestellte Struktur des modellierten Materialflusses und die Annahmen zur Verteilung basieren auf [20] und wurden um die aktuellen Produktionsmengen des globalen Branchenverbandes der Zement- und Betonindustrie, Global Cement and Concrete Association [66], sowie um die Import- und Exportmengen aus Prodcorn ergänzt [67]. Auch die Berechnung des Energiebedarfes und der Treibhausgasemissionen erfolgt nach dem in [20] beschriebenen Ansatz

2.2 Treibhausgasminderungspotentiale

Die Anwendung der Methode zur Quantifizierung der Treibhausgasminderungspotentiale von beispielhaften Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen im Bausektor basiert auf [20] und [21]. Hier wurden anhand der Kriterien Wirkung, Anwendbarkeit, Machbarkeit und Messbarkeit zwei relevante Maßnahmen für den Stahlfluss und zwölf für den Zementfluss identifiziert und quantifiziert. Diese können den einleitend identifizierten Strategien (Recycling, Materialeffizienz, Materialsubstitution) zugeordnet werden. Da wie zuvor beschrieben die Verwendung von Sekundärmaterial für die Stahlherstellung bereits umgesetzt wird [26], können methodische Herausforderungen bei der Abbildung des Recyclings bereits durch die Materialflussmodellierung erarbeitet werden. Folglich wird bei der Betrachtung der Treibhausgasminderungspotentiale in diesem Beitrag auf Strategien zur Materialeffizienzsteigerung und zur Materialsubstitution fokussiert. Hierfür werden zwei Beispiele für Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen aus [20] und [21] ausgewählt und mithilfe der dort ebenfalls beschriebenen Methode modelliert. Wesentliche Herausforderung im Rahmen der beschriebenen Methode ist die Quantifizierung der Modellierungsparameter. Während für den vorliegenden Beitrag auf die Daten aus [20] und [21] zurückgegriffen wird, sollten diese für weitere Analysen validiert werden.

Beispielhaft für die Steigerung von Materialeffizienz wird die Wiederverwendung von Stahl im Bausektor, also eine Verlängerung der Nutzungsdauer, ausgewählt. Hierbei wird von einer Nachfragereduktion von 65 Prozent für Stahlfertigerzeugnisse zur Verwendung im Bausektor ausgegangen [21]. Eine beispielhafte Maßnahme zur Materialsubstitution wird für den Zementfluss implementiert. Hierfür wird der Einsatz innovativen Betons als Substitut für herkömmlichen Beton für Fertigbetonteile betrachtet. Im Gegensatz zur vorherigen Maßnahme erfolgt hierdurch keine Reduktion des Materialflusses, sondern die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen können um bis zu 70 Prozent reduziert werden [21]. Die Maßnahmen werden der jeweiligen Prozessstufe in Abbildung 1 zugeordnet und die Modellierung entsprechend angepasst. Durch die Anpassung der Modellierung können die veränderten Materialflüsse und die resultierenden Energiebedarfs- und Treibhausgas-minderungen unter der Annahme der vollständigen Diffusion der jeweiligen Maßnahme bestimmt werden. Eine Berücksichtigung der Interaktion der Maßnahmen erfolgt nicht. Abschließend erfolgt die graphische Aufbereitung im Stahlflussbild. Auf eine Darstellung des Zementflusses wird verzichtet, da dieser sich, wie beschrieben, nicht verändert.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise zweigeteilt gegliedert. Zunächst erfolgt die Darstellung des Stoffstrombildes für Stahl und Zement für das Basisjahr 2019. Anschließend erfolgt die Zusammenfassung der ausgewählten Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen sowie die Einordnung der Maßnahmen in das bestehende Stoffstrombild. In diesem Zusammenhang erfolgt auch die Darstellung der theoretischen Treibhausgas-minderungspotentiale der Maßnahmen. Die methodischen Herausforderungen werden im jeweiligen Absatz beschrieben und im folgenden Kapitel zusammengefasst.

3.1 Stahl- und Zementfluss in der EU

Die modellierten Materialflüsse für Stahl und Zement sind in Abbildung 2 und 3 dargestellt. Die Abbildung erfolgt im Gegensatz zur dargestellten Modellstruktur (Abbildung 1) getrennt, da sich die Größenordnungen der Stahl- und Zementherstellung unterscheiden und eine Darstellung im richtigen Größenverhältnis zu Informationsverlust führen würde. Gleiches gilt für die Darstellung der Handelssalden im Zementflussbild. Aus den dargestellten Materialflüssen ist ersichtlich, dass im Jahr 2019 in der EU 66.790 Kilotonnen bzw. 45 Prozent des hergestellten Stahls (*Buildings* und *Infrastructure*) und 946.570 Kilotonnen bzw. 100 Prozent des hergestellten Betons in Endverwendungsgütern genutzt wurden, die dem Bausektor zuzuordnen sind. Weitere 82.335 Kilotonnen bzw. 55 Prozent des hergestellten Stahls werden für Endverwendungsgüter anderer Nutzungssektoren eingesetzt. Nach Angaben des europäischen Branchenverbands der Stahlindustrie, Eurofer, werden rund 38 Prozent des Stahls im Bausektor verwendet. Hierbei erfolgt jedoch die getrennte Erfassung von Rohren mit einem Anteil von rund 10 Prozent, die ebenfalls dem Bausektor zugeführt werden können. Die Ergebnisse der Stahlflussmodellierung können somit validiert werden. Eine solche Validierung entfällt für den Zementfluss, da dieser ausschließlich im Bausektor genutzt wird. Die einleitende Feststellung, dass dem Bausektor ein wesentlicher Anteil des Materialeinsatzes zuzuordnen ist, kann somit bestätigt werden.

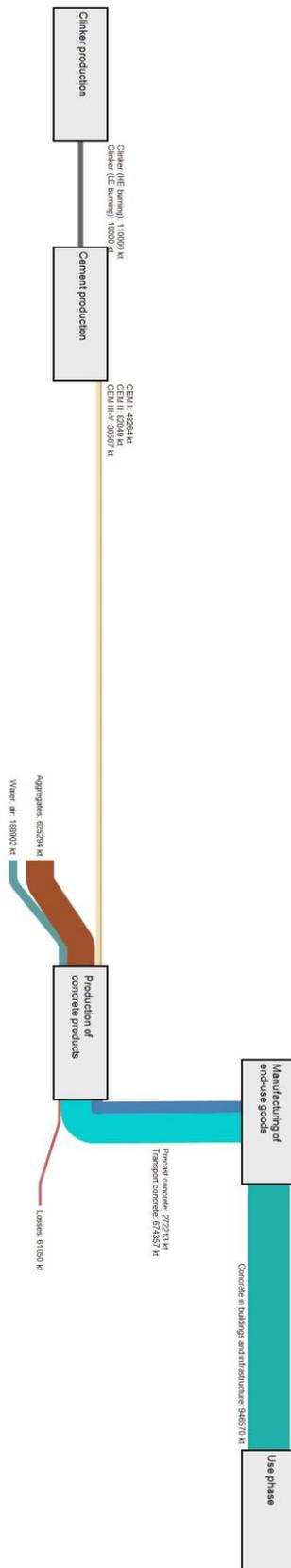


Abbildung 3: Zementfluss in den EU-28 im Jahr 2019

Basierend auf dem modellierten Stahlfluss wurden 2019 für die Stahlherstellung in der EU 90.036 Kilotonnen Schrott eingesetzt. Dies entspricht einer Recyclingrate von 59,4 Prozent unter Berücksichtigung des verfügbaren Neu-, Fabrikations- und Altschrotts sowie einer Sekundärmaterialeinsatzquote von 50,5 Prozent. Unter der Annahme, dass die Verwendung des Neu- und Fabrikationsschrotts stets und innerhalb der EU stattfindet, wurden 68.290 Kilotonnen Altschrott eingesetzt. Eurofer gibt an, dass rund 56 Prozent des Stahls in der EU aus Schrott hergestellt werden [68]. Dies liegt zwar in einer vergleichbaren Größenordnung zur berechneten Sekundärmaterialeinsatzquote, macht aber deutlich, dass eine Verbesserung der Schrottmodellierung notwendig ist. Hierfür zeigen Dworak und Fellner in [26] erste Ansätze auf, indem zeitliche Änderungen der Verteilung von Fertigerzeugnissen auf die Endverwendungsgüter und der prozessspezifischen Verluste berücksichtigt werden. Auch werden weitere historische Daten ausgewertet. Für 2017 werden so rund 42.000 Kilotonnen Neu- und Fabrikationsschrott sowie eine Wiederverwendung von 68.000 Kilotonnen Altschrott bestimmt und ist somit in einer vergleichbaren Größenordnung mit den hier erzielten Ergebnissen [26]. Während also die Modellierungsergebnisse für Altschrott vergleichbar sind, muss die Betrachtung von Neu- und Fabrikationsschrott überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Dies umfasst auch eine Betrachtung der Eigenschrottnutzung innerhalb der Prozessstufen.

In Tabelle 7 sind die berechneten Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen der Grundstoffherstellungsverfahren (BF/BOF und EAF, Klinker- und Zementherstellung) und in Tabelle 8 die kumulierten Werte für die Endprodukte (Stahlfertigerzeugnisse, Transportbeton und Betonfertigteile) für die EU im Jahr 2019 dargestellt. Eine Berechnungen des kumulierten Energiebedarfs ist im Modellierungsansatz aus [20] und [21] nicht vorgesehen, weswegen die Werte ausschließlich für die Treibhausgasemissionen dargestellt werden. Es wird deutlich, dass für die Herstellung von Fertigerzeugnissen aus Stahl entlang der Wertschöpfungskette insbesondere die Primärstahlerzeugung (inkl. Koks und Sinter) einen Großteil der Treibhausgasemissionen ausmacht (ca. 81 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen). Im Gegensatz hierzu hat die Sekundärherstellung einen deutlich geringeren Anteil (ca. 0,1 Prozent), der nicht nur auf den geringen Produktionsanteil, sondern viel mehr auf das Herstellungsverfahren selbst rückzuführen ist [60]. Da im Bausektor zu großen Teilen (siehe Tabelle 2) lange Stahlprodukte eingesetzt werden und somit die Herstellung im Elektrolichtbogenofen überwiegt, ist der Anteil am Energiebedarf und den Treibhausgasemissionen für die Roheisenherstellung im Verhältnis zum Materialanteil geringer. So können dem Bausektor rund 31 Prozent der Treibhausgasemissionen aus der Primärherstellung und 64 Prozent aus der Sekundärherstellung zugeordnet werden. Auch bei der Herstellung der Stahlfertigerzeugnisse zeigt sich, dass den Langprodukte deutlich niedrigere kumulierte spezifische Treibhausgasemissionen zuzuordnen sind. Zudem werden die Langprodukte in der Regel als Halbfertigerzeugnisse also ohne weitere Bearbeitung genutzt [22]. Im Gegenzug hierzu lassen sich der gesamte Energiebedarf und die gesamten Treibhausgasemissionen des Zementflusses dem Bausektor zuordnen. Bei der Betrachtung des Energiebedarfes und der Treibhausgasemissionen des Zementflusses wird deutlich, dass zwar Klinker- und Zementherstellung beim Energiebedarf eine vergleichbare Größenordnung haben, bei den Treibhausgasemissionen überwiegt jedoch der Anteil der Klinkerherstellung. Im Gegensatz zu den spezifischen kumulierten Treibhausgasemissionen der Endprodukte bei der Stahlherstellung sind die Werte für Betonprodukte deutlich niedriger. Dies ist auf den in Abbildung 3 dargestellten Materialfluss und insbesondere den großen Anteil eingesetzter Aggregate bei der Betonherstellung rückzuführen, denen keine Treibhausgasemissionen zugeordnet werden. Im Gegensatz zu Stahl zeigt sich außerdem, dass es kaum nennenswerte Unterschiede zwischen den Produkten gibt.

Die Aussagekraft der dargestellten Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen ist sowohl durch die Berechnung separiert von den Materialflüssen als auch durch die Annahmen zur Verteilung der Materialflüsse über die einzelnen Prozessschritte limitiert. Während die Summen durch letzteres nicht beeinflusst werden, sind also die sektorspezifischen Angaben für Stahl durch weitere Recherchen und eine angepasste Modellierung zu validieren. Ziel ist hierbei die Modellierung der Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen als Ebene der Materialflussmodellierung.

Tabelle 7: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Grundstoffherstellung in den EU-28 in 2019

	Energiebedarf in PJ (Gesamt/Bausektor)		Treibhausgasemissionen in Mt CO ₂ äq. (Gesamt/Bausektor)	
	Gesamt	Bausektor	Gesamt	Bausektor
<i>Stahl</i>				
Primärstahlherstellung (BF/BOF, Koks, Sinter)	1.695	519	177	54
Sekundärherstellung (EAF)	223	142	22	14
<i>Zement</i>				
Herstellung von Klinker	494	494	117	117
Herstellung von Zement	509	509	1	1
BF - Blast furnace, BOF - Basic oxygen steelmaking, EAF - Electric arc furnace				

Tabelle 8: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Endprodukte in den EU-28 in 2019

	Kumulierter Energiebedarf		Kumulierte Treibhausgasemissionen	
	in PJ	in GJ/t	in Mt CO ₂ äq.	in t CO ₂ äq./t
<i>Stahl</i>				
Concrete reinforcing bars	57	4,49	5	0,43
Hot rolled bars	52	4,49	5	0,43
Wire rod	94	4,49	9	0,43
Railway track material	10	4,58	1	0,44
Heavy sections	44	4,58	4	0,44
Light sections	0	4,58	0	0,44
Hot rolled plate	240	21,75	24	2,15
Hot rolled coil, sheet and strip	796	20,58	79	2,03
Electrical sheet and strip	31	22,39	3	2,18
Tinmill products	92	24,02	9	2,34
Other metal coated sheet and strip	675	23,51	66	2,30
Non-metallic coated sheet and strip	127	24,75	12	2,43
<i>Zement</i>				
Transportbeton	n/a	n/a	78	0,12
Fertigbetonteile	n/a	n/a	42	0,16

3.2 Potentiale der Kreislaufwirtschaft

Der angepasste Materialfluss für Stahl ist in Abbildung 4 dargestellt. Es wird im Gegensatz zu Abbildung 2 auf Handelssalden sowie die Schrottmodellierung verzichtet. Aus dem dargestellten Materialfluss ist ersichtlich, dass eine Reduktion des Bedarfs an Fertigerzeugnissen im Bausektor um 65 Prozent den Gesamtbedarf um rund 29 Prozent reduzieren würde. Dies würde außerdem zu einem reduzierten Bedarf an Halbfertigerzeugnissen (-28 Prozent), Rohstahlformen (-29 Prozent), Stahl (-28 Prozent) und Roheisen (-20 Prozent) unter Annahme einer gleichbleibenden Sekundärmaterialeinsatzquote von 50,5 Prozent führen.

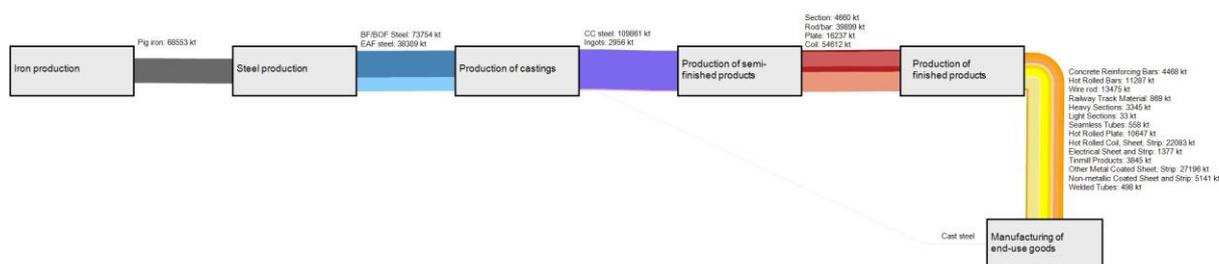


Abbildung 4: Stahlfluss in den EU-28 im Jahr 2019 nach Materialeffizienzsteigerung

Neben der Reduktion des Materialbedarfes wäre auch eine Reduktion des Energiebedarfes und der Treibhausgasemissionen festzustellen. Diese ist in den Tabellen 9 und 10 dargestellt. Da der Großteil im Bausektor verwendeter Fertigerzeugnisse den Langprodukten zuzuordnen ist, wäre insbesondere eine Reduktion des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen für die Sekundärstahlerzeugung festzustellen (beides -41 Prozent). Da jedoch auch ein Teil Flachprodukte verwendet wird, könnten rund 20 Prozent Energie und 22 Prozent Treibhausgasemissionen bei der Primärstahlerzeugung vermieden werden. Die spezifischen Werte in Tabelle 10 bleiben unverändert, da die Materialeffizienzsteigerung ausschließlich die Produktionsmenge beeinflusst.

Tabelle 9: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Stahlherstellung nach Materialeffizienz

	Energiebedarf in PJ		Treibhausgasemissionen in Mt CO ₂ äq.	
	Gesamt	Bausektor	Gesamt	Bausektor
<i>Stahl</i>				
Primärstahlerstellung (BF/BOF, Koks, Sinter)	1.351	185	139	19
Sekundärherstellung (EAF)	131	50	13	5
BF - Blast furnace, BOF - Basic oxygen steelmaking, EAF - Electric arc furnace				

Tabelle 10: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Endprodukte nach Materialeffizienz

	Kumulierter Energiebedarf		Kumulierte Treibhausgasemissionen	
	in PJ	in GJ/t	in Mt CO ₂ äq.	in t CO ₂ äq./t
<i>Stahl</i>				
Concrete reinforcing bars	20	4,49	2	0,43
Hot rolled bars	51	4,49	5	0,43
Wire rod	60	4,49	6	0,43
Railway track material	4	4,58	0	0,44
Heavy sections	15	4,58	1	0,44
Light sections	0	4,58	0	0,44
Hot rolled plate	232	21,75	23	2,15
Hot rolled coil, sheet and strip	455	20,58	45	2,03
Electrical sheet and strip	31	22,39	3	2,18
Tinmill products	92	24,02	9	2,34
Other metal coated sheet and strip	639	23,51	62	2,30
Non-metallic coated sheet and strip	127	24,75	12	2,43

Die steht im Gegensatz zur Materialsubstitution in der Wertschöpfungskette der Zementherstellung. Während, wie zuvor beschrieben, keine Veränderung des Materialflusses durch den Einsatz innovativer Zementarten für die Herstellung von Betonfertigteilen sichtbar ist, verändern sich spezifischen Treibhausgasemissionen und der Energiebedarf. Folglich wird auf die Darstellung des Zementflusses verzichtet und die Ergebnisse ausschließlich in den Tabellen 11 und 12 abgebildet. Aufgrund eines Anteils von Betonfertigteilen in Höhe von 29 Prozent an den Endprodukten, könnten rund 20 Prozent der Treibhausgasemissionen und des Energiebedarfes der gesamten Wertschöpfungskette eingespart werden. Diese sind wiederum insgesamt dem Bausektor zuzuordnen.

Tabelle 11: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Zementherstellung nach Materialsubstitution

	Energiebedarf in PJ		Treibhausgasemissionen in Mt CO ₂ äq.	
	Gesamt	Bausektor	Gesamt	Bausektor
<i>Zement</i>				
Herstellung von Klinker	395	395	93	93
Herstellung von Zement	407	407	1	1

Tabelle 12: Energiebedarf und Treibhausgasemissionen der Endprodukte nach Materialsubstitution

	Kumulierter Energiebedarf		Kumulierte Treibhausgasemissionen	
	in PJ	in GJ/t	in Mt CO ₂ äq.	in t CO ₂ äq./t
<i>Zement</i>				
Transportbeton	n/a	n/a	78	0,12
Fertigbetonteile	n/a	n/a	13	0,05

Sowohl die Strategie zur Materialeffizienzsteigerung als auch die der Materialsubstitution können folglich den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der Grundstoffindustrien senken, obwohl sie die modellierten Materialflüsse, Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen an unterschiedlicher Stelle beeinflussen. Nichtsdestotrotz ist dies eine vereinfachte Betrachtung, da eine Interaktion der Maßnahmen untereinander (bspw. des Stahlrecyclings und der Materialeffizienzsteigerung) vernachlässigt wurde. Zudem sollte die Quantifizierung der vorgestellten Maßnahmen und somit die Ergebnisse weiter validiert werden.

4 Schlussfolgerungen

Während bereits einleitend festgestellt wurde, dass für prospektive Dekarbonisierungsszenarien die bestandgetriebene Materialflussanalyse zielführend ist, konnten in diesem Beitrag zusätzlich Herausforderungen für die Modellierung festgestellt werden. Zunächst wurde festgestellt, dass die Modellierung der Stahlschrottverfügbarkeit aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit historischen Daten und produktspezifischer Daten herausfordernd ist. Dies gilt insbesondere für die angenommenen Nutzungsdauern der Endverwendungsgüter, denen im Rahmen des bestandgetriebenen Ansatzes auch für die Bestimmung von Materialnachfrage Bedeutung zukommt. Bei der Modellierung der Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen sollte wie beschrieben die Berechnung als Ebene der Materialflussanalyse und nicht als separate Berechnung durchgeführt werden, um Diskrepanzen zwischen den Ansätzen zu vermeiden. Hierfür ist eine Validierung der Zuordnung der Flüsse über die Prozessstufen hinweg notwendig. Durch die zugrundeliegende Logik des bestandgetriebenen Ansatzes wird dies jedoch erleichtert, da keine statistischen Abweichungen zwischen den Prozessstufen vorliegen können. Nichtsdestotrotz müssen spezifische Informationen zu einzelnen

Prozessstufen vorliegen. Neben den methodischen Herausforderungen bei Umsetzung der Materialflussmodellierung gibt es Herausforderungen bei der Implementierung der Methode zur Quantifizierung der Auswirkung von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen. Neben der Interaktion zwischen den Maßnahmen ist die Quantifizierung der Modellierungsparameter ausschlaggebend für die Aussagekraft der Ergebnisse. Zusammenfassend ist also eine der wesentlichen Herausforderungen der Materialflussmodellierung der hohe Datenbedarf. Durch die Modellierung des Stahl- und des Zementflusses in der EU für das Basisjahr 2019 sowie die Bestimmung theoretischer Treibhausgasemissionspotentiale durch Kreislaufwirtschaft, konnte jedoch bestätigt werden, dass diese Methode sowohl heterogene Wertschöpfungsketten als auch die unterschiedlichen Typen von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen (Recycling, Materialeffizienz, Materialsubstitution) abbilden kann.

Unter Berücksichtigung der hier dargestellten Herausforderungen und methodischen Anpassungen kann der vorgestellte Ansatz Grundlage für weitere Untersuchungen zur Dekarbonisierung des EU Bausektors und dazugehöriger Grundstoffindustrien sein. Aufbauend auf der dargestellten Modellierung können durch einen bestandsgetriebenen Ansatz prospektive Szenarien für Material- und Energiebedarf sowie Treibhausgasemissionen der Grundstoffnutzung im Bausektor entwickelt werden. Hierfür werden im Gegensatz zur dargestellten Modellierung keine Daten zu den vorhandenen Flüssen, sondern zu den Materialbeständen im Bausektor benötigt. Neben den dargestellten Materialien Stahl und Zement ist prospektiv auch die Abbildung weiterer relevanter Materialien (insbesondere Dämmstoffe) erstrebenswert. Auch weiterer allgemeine und materialspezifische Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen sollten berücksichtigt werden. Durch Einbindung in weitere Modellierungsansätze zur Energiesystembetrachtung aber auch zur Gebäudebestandsentwicklung kann die Kreislaufwirtschaft so in die Analyse von Treibhausgasemissionspfaden integriert werden. Diese Analysen können wie einleitend beschrieben den politischen Prozess unterstützen.

Literatur

- [1] Quantifying the benefits of circular economy actions on the decarbonisation of EU economy, Final report, Trinomics, 2018
- [2] Pauliuk, S., Heeren, N., Berrill, P., Fishman, T., Nistad, A., Tu, Q., Wolfram, P. u. Hertwich, E. G.: Global Scenarios of Resource and Emissions Savings from Systemic Material Efficiency in Buildings and Cars (2020)
- [3] Blomsma, F. u. Brennan, G.: The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology* 21 (2017) 3, S. 603–614
- [4] Di Maio, F., Rem, P. C., Baldé, K. u. Polder, M.: Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach. *Resources, Conservation and Recycling* 122 (2017), S. 163–171
- [5] A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, In-depth analysis in support of the commission communication COM(2018) 773, European Commission, Brussels 2018
- [6] European Environment Agency: Approximated estimates for greenhouse gas emissions, 2020. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/approximated-estimates-for-greenhouse-gas-emissions-2>, abgerufen am: 01.09.2021
- [7] Busch, J., Dawson, D. u. Roelich, K.: Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach. *Journal of Cleaner Production* 149 (2017), S. 751–761
- [8] Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D. u. Heinz, M.: How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology* 19 (2015) 5, S. 765–777
- [9] Material efficiency in clean energy transitions, International Energy Agency, 2019
- [10] Boulding, K. E.: The Economics of the Coming Spaceship Earth. *Industrial Ecology* open online course (1966)

- [11] Ghisellini, P., Cialani, C. u. Ulgiati, S.: A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* 114 (2016), S. 11–32
- [12] Kirchherr, J., Reike, D. u. Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017), S. 221–232
- [13] Prieto-Sandoval, V., Jaca, C. u. Ormazabal, M.: Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production* 179 (2018), S. 605–615
- [14] Lieder, M. u. Rashid, A.: Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production* 115 (2016), S. 36–51
- [15] Sauv e, S., Bernard, S. u. Sloan, P.: Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development* 17 (2016), S. 48–56
- [16] Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, Hertwich, E. G., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., Ali, S., Tu, Q., Ardente, F., Berrill, P., Fishman, T., Kanaoka, K., Kulczycka, J., Makov, T., Masanet, E. u. Wolfram, P., 2020
- [17] Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elsland, R., Klingler, A.-L., Manz, P. u. Eidelloth, S.: A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Reviews* 22 (2018), S. 237–254
- [18] A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe, Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European Commission, 2020
- [19] Kullmann, F., Markewitz, P., Stolten, D. u. Robinius, M.: Combining the worlds of energy systems and material flow analysis: a review. *Energy, Sustainability and Society* 11 (2021) 1
- [20] Rehfeldt, M., Herbst, A. u. Porteron, S.: Modelling circular economy action impacts in the building sector on the EU cement industry. *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings* (2020), S. 133–143
- [21] Quantification methodology for, and analysis of, the decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions, Final report, Le Den, X., Porteron, S., Collin, C., Hvid Horup Sorensen, L., Herbst, A., Rehfeldt, M., Pfaff, M., Hirschnitz-Garbers, M. u. Velten, E., 2020
- [22] Cullen, J. M., Allwood, J. M. u. Bambach, M. D.: Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods. *Environmental science & technology* 46 (2012) 24, S. 13048–13055
- [23] Vogl, V.,  hman, M. u. Nilsson, L. J.: Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production* 203 (2018), S. 736–745
- [24] Vogl, V.,  hman, M. u. Nilsson, L. J.: The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy* 21 (2021) 1, S. 78–92
- [25] Shanks, W., Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Lupton, R. C., Serrenho, A. u. Allwood, J. M.: How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conservation and Recycling* 141 (2019), S. 441–454
- [26] Dworak, S. u. Fellner, J.: Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition. *Resources, Conservation and Recycling* 173 (2021), S. 105692
- [27] Steel statistical yearbook 2020. extended version, World Steel Association, 2020
- [28] Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO2-Roadmap f ur die deutsche Zementindustrie, Verein Deutscher Zementwerke e.V., D usseldorf 2020
- [29] Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carre on, J. R. u. Worrell, E.: Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling* 151 (2019), S. 104498
- [30] Concise description of application fields for different MFA approaches and indicators. Deliverable D3.2, Villalba, G., Iglesias, M. u. Gabarrell, X., 2018

- [31] Lonca, G., Muggéo, R., Imbeault-Tétreault, H., Bernard, S. u. Margni, M.: Does material circularity rhyme with environmental efficiency? Case studies on used tires. *Journal of Cleaner Production* 183 (2018), S. 424–435
- [32] Pauliuk, S., Majeau-Bettez, G. u. Müller, D. B.: A General System Structure and Accounting Framework for Socioeconomic Metabolism. *Journal of Industrial Ecology* 19 (2015) 5, S. 728–741
- [33] *The Circular Economy. a Powerful Force for Climate Mitigation*, Material Economics, Stockholm 2018
- [34] Lauinger, D., Billy, R. G., Vásquez, F. u. Müller, D. B.: A general framework for stock dynamics of populations and built and natural environments. *Journal of Industrial Ecology* (2021)
- [35] World Steel Association: Statistical reports. <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>, abgerufen am: 27.08.2021
- [36] Steel statistical yearbook 2018, World Steel Association, 2018
- [37] Steel statistical yearbook 2017, World Steel Association, 2017
- [38] Steel statistical yearbook 2016, World Steel Association, 2016
- [39] Steel statistical yearbook 2015, World Steel Association, 2015
- [40] Steel statistical yearbook 2014, World Steel Association, 2014
- [41] Steel statistical yearbook 2013, World Steel Association, 2013
- [42] Steel statistical yearbook 2012, World Steel Association, 2012
- [43] Steel statistical yearbook 2011, World Steel Association, 2011
- [44] Steel statistical yearbook 2010, World Steel Association, 2010
- [45] Steel statistical yearbook 2009, World Steel Association, 2009
- [46] Steel statistical yearbook 2008, World Steel Association, 2008
- [47] Steel statistical yearbook 2007, International Iron and Steel Institute, 2007
- [48] Steel statistical yearbook 2006, International Iron and Steel Institute, 2006
- [49] Steel statistical yearbook 2005, International Iron and Steel Institute, 2005
- [50] Steel statistical yearbook 2004, International Iron and Steel Institute, 2004
- [51] Steel statistical yearbook 2003, International Iron and Steel Institute, 2003
- [52] Steel statistical yearbook 2002, International Iron and Steel Institute, 2002
- [53] Steel statistical yearbook 2001, International Iron and Steel Institute, 2001
- [54] United Nations: Energy Statistics Database. Coke oven coke - production. United Nations Statistics Division, New York 2015. <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3AOK>, abgerufen am: 01.09.2021
- [55] United Nations: Flexible GHG Data queries. Sinter (2.C.1.3.) Annual Activity Data in t. United Nations Framework Convention on Climate Change., 2015. <http://unfccc.int/di/FlexibleQueries/Event.do?event=go>, abgerufen am: 01.09.2021
- [56] Pauliuk, S., Wang, T. u. Müller, D. B.: Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling* 71 (2013), S. 22–30
- [57] Herbst, A.: Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem „bottom-up“ Energienachfrage-Modell für die Industrie. Eine Fallstudie über die Stahlindustrie, Europa-Universität Flensburg Dissertation. Flensburg 2017
- [58] Assessment of Cumulative Cost Impact for the Steel Industry. Final report, Renda, A., Pelkmans, J., Egenhofer, C., Marcu, A., Schrefler, L., Luchetta, G., Simonelli, F., Valiante, D., Mustilli, F., Infelise, F., Stoefs, W., Teusch, J., Wiczorkiewicz, J., Fumagalli, A., Zavatta, R., Giannotti, E. u. Stecchi, G. M., 2013
- [59] Steel Plantfacts, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2015
- [60] Rehfeldt, M., Fleiter, T. u. Toro, F.: A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency* 11 (2018) 5, S. 1057–1082
- [61] Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO2 Emissions in the EU Iron & Steel Industry. Re-edition, Pardo N, Moya JA u. Vatopoulos K, 2012
- [62] Sato, F. E. K. u. Nakata, T.: Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. *Energies* 13 (2020) 9, S. 2396

- [63] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry. Working Draft in Progress, JRC, 2019
- [64] CO2 Emission Factors for Fossil Fuels. CLIMATE CHANGE 28/2016, Jurich, K., 2016
- [65] Sustainability Report, ArcelorMittal, Mexico 2016
- [66] Global Cement and Concrete Association: GNR Project Reporting CO2, 2021.
<https://gccassociation.org/gnr/>
- [67] Eurostat: Verkaufte Produktion, Exporte und Importe je PRODCOM Liste (NACE Rev. 2) - Jährliche Daten [DS-066341], 2020.
<https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/prodcom/data/database>, abgerufen am: 15.01.2021
- [68] Eurofer: Circular economy, 2020. <https://www.eurofer.eu/issues/environment/circular-economy/>, abgerufen am: 30.08.2021