



S O C I A L E C O L O G Y W O R K I N G P A P E R 1 9 4

Anna Köstinger

**Die Materialflüsse und Inputs in die
sozioökonomischen Materialbestände
Österreichs 1918-2015. Eine erweiterte Material-
und Energieflussanalyse**

Anna, Köstinger (2021):

Die Materialflüsse und Inputs in die sozioökonomischen Materialbestände Österreichs 1918-2015. Eine erweiterte Material- und Energieflussanalyse*
Social Ecology Working Paper 194
Vienna, April 2021

ISSN 1726-3816

Social Ecology Working Papers
Editorial Board: Fridolin Krausmann, Barbara Smetschka
sec.workingpapers@boku.ac.at

Institute of Social Ecology Vienna (SEC)
Department of Economics and Social Sciences (WiSo)
University of Natural Resources & Life Sciences, Vienna (BOKU)
Schottenfeldgasse 29
1070 Vienna, Austria
<https://boku.ac.at/wiso/sec>

© 2021 by Institute of Social Ecology Vienna

**Die Materialflüsse und Inputs in die
sozioökonomischen Materialbestände Österreichs
1918-2015.
Eine erweiterte Material- und Energieflussanalyse***

von

Anna Köstinger

* Masterarbeit verfasst am Institut für Soziale Ökologie, Studium der Sozial- und Humanökologie. Diese Arbeit wurde von Univ.-Prof. Dr. Fridolin Krausmann betreut. (Die vorliegende Fassung ist eine geringfügig überarbeitete Version der Masterarbeit.)

Zusammenfassung

Der gesellschaftliche Ressourcenverbrauch hat sich im Zuge der industriellen Transition vervielfacht und verursacht Umweltveränderungen und Nachhaltigkeitsprobleme. Zunehmend wird die Schlüsselrolle der langlebigen Materialbestände (Gebäude, Infrastrukturen, Maschinen usw.) für den sozialen Metabolismus und die damit zusammenhängenden Flüsse von Materialien, Energie, Abfällen und Emissionen erkannt.

In dieser Arbeit wurden die Materialflüsse (inländische Entnahme, Importe und Exporte, Materialverbrauch) für Österreich von 1918 bis 2015 anhand einer wirtschaftsräumlichen Materialflussanalyse (ew-MFA) bilanziert. Darüber hinaus war ein Ziel der Arbeit die Verteilung des Materialverbrauchs (DMC) nach ihrer Nutzung zu untersuchen, mit besonderem Fokus auf die Quantifizierung der in Aufbau und Erhaltung von gesellschaftlichen Materialbeständen fließenden Materialien. Insgesamt wurden dazu fünf Nutzungsarten und 14 Typen von Materialbestandsinputs unterschieden. Weiters wurde auf Basis der zusammengestellten Daten eine existierende Zeitreihe zum sozialökologischen Energieverbrauch ergänzt und aktualisiert.

Die Materialflussrechnung zeigt einen Anstieg des Materialverbrauchs in Österreich um das 7-fache, von 27 Mio. t 1918 auf 192 Mio. t in 2015, und der Materialbestandsinputs um das 10-fache, von 10 Mio. t 1918 auf 94 Mio. t in 2015. Zugleich hat sich auch die Zusammensetzung des Materialverbrauchs grundlegend verändert, von einem zu Beginn noch deutlich von Biomasse geprägten metabolischen Regime zu einem industriellen Regime auf der Basis von fossilen und mineralischen Rohstoffen. Damit ging auch eine Verschiebung von energetischen zu materiellen Nutzungen von Materialien einher: Der Anteil der materiellen Nutzung am DMC stieg auf 67 % und der Anteil der Materialbestandsinputs am DMC von 36 % auf 49 %. Die Entwicklung des Materialverbrauchs wurde mit dem Bruttoinlandprodukt (GDP) und dem Energieverbrauch in Beziehung gesetzt, um Fragen der Entkoppelung zu diskutieren, und mit der Entwicklung in anderen industrialisierten Ländern verglichen.

Die Arbeit stellt die erste langfristige Zusammenstellung von Materialflussdaten für Österreich dar und die Ergebnisse können als Grundlage für eine Modellierung von Materialbeständen in nachfolgenden Forschungsarbeiten verwendet werden.

Abstract

In the course of the industrial transition society's consumption of resources has multiplied and emerged as one of the main causes of anthropogenic environmental change and sustainability problems. The key role of long-lived material stocks (buildings, infrastructures, machines, etc.) for the metabolism of industrial societies, i.e. for the flows of materials, energy, waste, and emissions is increasingly recognized.

In this paper, the material flows through the Austrian economy (domestic extraction, imports and exports, material consumption) from 1918 to 2015 are investigated applying economy-wide material flow analysis (ew-MFA). A special focus was put on the distribution of domestic material consumption (DMC) according to major types of use and in particular on the quantification of the materials that were used for the construction and maintenance of in-use material stocks. Therefore, five types of use and 14 types of material inputs to stocks were differentiated and quantified. Furthermore, an existing time series of socio-ecological energy consumption was extended and updated on the basis of the compiled data.

The results of the MFA show a sevenfold increase in DMC, from 27 million t in 1918 to 192 million t in 2015, and a tenfold increase in material inputs to stocks, from 10 million t in 1918 to 94 million t in 2015. During this period, the composition of material consumption in Austria changed fundamentally. The metabolic regime that was dominated by the use of biomass at the beginning transformed into an industrial regime based on fossil and mineral materials. This was accompanied by a shift from energy to material uses: the proportion of material uses in DMC rose to 67 % and of material inputs to stocks from 36 % to 49 %. In the analysis, the development of material consumption and material inputs was related to economic development (gross domestic product (GDP)) and energy consumption in order to discuss issues of decoupling. Moreover, the results for Austria were compared with findings for other industrialized countries.

This thesis represents the first long-term compilation of material flow data for Austria and the results can be used as a basis for modeling material stocks in future research.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Forschungsfragen und Ziele	8
2	Die Materialflussanalyse Österreichs 1918-2015 und ihre Erweiterung.....	10
2.1	Der soziale Metabolismus.....	10
2.1.1	Metabolische Profile und Transitionen	11
2.1.2	Wege zu einem nachhaltigen Metabolismus	11
2.2	Methoden	12
2.2.1	Die Material- und Energieflussanalyse.....	13
2.2.2	Wirtschaftsräumliche Analysen und ihre Indikatoren	14
2.2.3	Materialnutzung und Inputs in die Materialbestände	17
2.3	Datengrundlage und Datenqualität.....	20
2.3.1	Quellen der MEFA	20
2.3.2	Zusätzliche Quellen für die Erweiterung der MFA	22
2.4	Die empirische Durchführung der österreichischen MEFA und ihrer Erweiterung	22
2.4.1	Berechnung der Materialflüsse Österreichs.....	22
2.4.1.1	Biomasse.....	22
2.4.1.2	Metalle.....	24
2.4.1.3	Nicht-metallische Mineralien	25
2.4.1.4	Fossile Energieträger	31
2.4.1.5	Außenhandel.....	31
2.4.2	Berechnungen zur Erweiterung der MFA.....	32
2.4.2.1	Nutzungsarten des Materialverbrauchs	32
2.4.2.2	Inputs in die Materialbestände.....	34
2.4.2.2.1	Biomasse	37
2.4.2.2.2	Metalle	38
2.4.2.2.3	Nicht-Metallische Mineralien.....	39
2.4.2.2.4	Fossile Energieträger	40
3	Ergebnisse: Der österreichische Stoffwechsel.....	42
3.1	Die Materialflüsse Österreichs	42
3.2	Der Materialverbrauch nach Art der Nutzung 1918-2015	45
3.3	Inputs in die Materialbestände Österreichs 1918-2015	47
3.4	Die Energieflüsse Österreichs 1830-2015	49
3.5	Metabolische Raten und Profile.....	50
4	Diskussion	53
4.1	Koppelung und Entkoppelung	53
4.1.1	Wirtschaftliche Entkoppelungen	55
4.1.2	Energetische Entkoppelungen.....	56
4.1.3	Metabolische und wirtschaftliche Raten	58
4.2	Metabolische Transitionen	59
4.2.1	Die industrielle Transition Österreichs.....	59
4.2.2	Die industrielle Transition im Ländervergleich	61
4.2.3	Nachhaltige Transitionen	65
5	Conclusio	66
6	Literatur- und Quellenverzeichnis	67
7	Abbildungsverzeichnis	75
8	Tabellenverzeichnis	76
9	Abkürzungsverzeichnis	77

1 Einleitung

Gesellschaften brauchen, um sich selbst reproduzieren und erhalten zu können, fortlaufend Materialien und Energie, auch biophysische Flüsse genannt, die sie durch soziale Prozesse reguliert aus ihrer physischen Umwelt entnehmen, umwandeln und nutzen (Fischer-Kowalski and Erb 2016). Dies wird in der Nachhaltigkeitsforschung mit dem Konzept des *sozialen Metabolismus* (auch gesellschaftlicher Stoffwechsel) beschrieben (Haberl et al. 2019). Der hohe und vielfach gewachsene Ressourcenverbrauch von Gesellschaften, als sozioökonomische Systeme, stößt zunehmend an planetare Grenzen (Rockström et al. 2009; Krausmann et al. 2017a) und führt einerseits zu Versorgungs- und andererseits zu Umweltproblemen (Behrens et al. 2007). Darum ist eine Änderung der Verbrauchs- und Nutzungsmuster dringend notwendig. Die Ressourcenflüsse zu messen ist ein erster Schritt, um den Verbrauch beobachten, verstehen und verändern zu können.

Die Material- und Energieflussanalyse oder -rechnung (MEFA) ist eine etablierte Methode zur systematischen Beobachtung und Quantifizierung der biophysischen Flüsse und zur Erforschung und Operationalisierung des sozialen Metabolismus. Dabei wurden bisher vor allem Ressourcen an den Systemgrenzen, zwischen Gesellschaft und Natur und zwischen Wirtschaftsräumen, gemessen. Neben der menschlichen Bevölkerung und allen Nutztieren, gehören die Materialbestände zu den biophysischen Strukturen einer Gesellschaft (Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2018; Fischer-Kowalski and Erb 2016; Krausmann et al. 2016). Für die Weiterentwicklung der analytischen Aussagekraft der Methodik nehmen langlebige Materialbestände zunehmend eine Schlüsselrolle ein (Streeck et al. 2020). In den letzten Jahrzehnten wurden mehrere methodische und theoretische Ansätze entwickelt, die sich mit der Erfassung und Modellierung von Materialbeständen und ihrer Rolle für eine nachhaltige Entwicklung des Ressourcenverbrauchs beschäftigen (Wiedenhofer et al. 2018; Augiseau and Barles 2017). Als Materialbestände werden in dieser Arbeit die gesellschaftlich genutzten Gebäude, Straßen, Infrastrukturen, Maschinen und andere langlebige Produkte (*in-use materialstocks*) zusammengefasst. Verschiedene Bedürfnisse der Gesellschaft, wie zum Beispiel Wohnen, Mobilität oder Kommunikation, werden durch Materialbestände befriedigt, indem sie biophysische Flüsse in Funktionen und Services transformieren (Haberl et al. 2017; Krausmann et al. 2017c; Streeck et al. 2020). Zusätzlich zu den bestandsbildenden Materialien (*stock-building materials*), die zum Aufbau und zum Erhalt der Bestände jährlich benötigt und angehäuft werden, sind für die Nutzung weitere Material- und Energieflüsse an die Materialbestände gebunden und auch Abfallflüsse sowie die Kreislaufschließung im Sinne einer *Circular Economy* werden wesentlich durch Bestandsdynamiken beeinflusst. Durch ihre Langlebigkeit bestimmen die aktuellen Bestände die Ressourcenflüsse bis weit in die Zukunft (Streeck et al. 2020; Krausmann et al. 2017c; Wiedenhofer 2017).

Mit der industriellen Transformation kam es zu bedeutenden quantitativen und qualitativen Veränderungen im gesellschaftlichen Ressourcenverbrauch und den metabolischen Profilen, indem die solarenergetischen Schranken der Agrargesellschaft durch die Nutzung von fossilen Energieträgern überwunden wurden (Sieferle 2003). Durch historische Langzeitanalysen der biophysischen Flüsse können die Übergangsphasen verschiedener Gesellschaften beobachtet und verglichen werden. Aufgrund der langen Lebensdauer von Materialbeständen ist für ihre Analyse eine langzeitige Perspektive sinnvoll und kann weitere Erkenntnisse zur Dynamik des Industrialisierungsprozesses liefern.

Erste Studien, die Materialbestände basierend auf wirtschaftsräumlichen Materialflussanalysen (*economy-wide material flow analysis*, ew-MFA) modelliert haben, kommen zum Ergebnis, dass aktuell über die Hälfte des globalen Materialverbrauchs in den Aufbau und die Instandhaltung von Materialbeständen fließen (Krausmann et al. 2017c, 2018;

Wiedenhofer et al. 2018). Der bestandsbildende Anteil des nationalen Verbrauchs von reichen Industrieländern ist im Vergleich geringer und lag zum Beispiel im Vereinigten Königreich (UK) in den letzten Jahren bei über 40 % (Streeck et al. 2020) und in den USA bei ca. 36 % (Dammerer 2020). Basis dieser Studien waren historische MFA-Zeitreihen und eine konsistente Erweiterung der Methode mit dem MISO-Modell, einem dynamischen, massenausgleichenden und zufluss-gesteuerten Ansatz zur Modellierung von systeminternen Flüssen und Beständen, das die Entwicklung von Materialinputs, -beständen und -outputs (**Material Input Stock Output**) verfolgt (Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2017c, 2018; Streeck et al. 2020; Dammerer 2020).

1.1 Forschungsfragen und Ziele

Die MFA ist mittlerweile fester Bestandteil in der Umweltberichterstattung des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat 2020a) und der Statistik Austria (ÖSTAT 2020a). Diese wird, wie auch die Energieflussanalyse (*energy flow analysis*, EFA) (ÖSTAT 2020b; Eurostat 2020a) und ihre Zeitreihen, jährlich um die neuesten Daten ergänzt. Bisherige langfristige-historische Studien analysierten die Materialflüsse in Österreich ab 1960 (Schandl 1998; Schandl et al. 2000; BMLFUW et al. 2015), während Energieflussanalysen bereits für den Zeitraum von 1830-2010 zur Verfügung stehen (Krausmann and Haberl 2002; Krausmann 2001b; Krausmann et al. 2008b; Sieferle et al. 2006; Krausmann and Wiedenhofer 2012).

Die vorliegende Arbeit versucht einen weiteren Beitrag zum aktuellen Forschungsstand zu leisten. Die leitenden Forschungsfragen dazu lauten:

- Wie entwickelte sich der Materialverbrauch Österreichs im Zeitraum 1918-2015?
 - Wie verteilte er sich auf die sozialökologischen Hauptnutzungsarten und welcher Anteil floss jährlich in die gesellschaftlichen Materialbestände?
- Wie haben sich Größe und Zusammensetzung der Inputs in die gesellschaftlichen Materialbestände verändert?
- In welcher Relation stehen die Entwicklungen vom Materialverbrauch und den Materialbestandsinputs zur wirtschaftlichen Entwicklung Österreichs und zum Energieverbrauch?
- Welche Erkenntnisse können durch die langfristige Betrachtung von Materialverbrauch und Materialbestandsinputs sowie den Vergleich mit anderen Länderstudien zur industriellen Transition Österreichs gewonnen werden?

Der Hauptfokus der Arbeit liegt auf der Erstellung einer ew-MFA, in der die langzeitige Entwicklung des Materialverbrauchs von Österreich von 1918 bis 2015 bilanziert wird. Dargestellt werden die Verläufe der Inlandsentnahme (DE), des physischen Außenhandels (Importe und Exporte) und des Materialverbrauchs (DMC). Die Forschungsarbeit fügt sich damit in eine Reihe von historischen Langzeitstudien zum sozialen Metabolismus unterschiedlicher Nationalstaaten (Schandl and Schulz 2002; Krausmann et al. 2011; Gierlinger 2011; Gierlinger and Krausmann 2012; Gaugl 2016; Krausmann et al. 2016a; Kovanda and Hak 2011) und des globalen Systems (Krausmann et al. 2008a; Schaffartzik et al. 2014) ein. Das Ziel dieser Langzeitforschungen ist es, ein besseres Verständnis der vergangenen Prozesse zu erarbeiten, um es für eine bessere Planung der Ressourcennutzung und eine zukünftige Transition Richtung nachhaltigerem Metabolismus nutzbar machen zu können (Krausmann et al. 2016a).

Darüber hinaus wird der Rahmen der ew-MFA erweitert und die Verteilung des Materialverbrauchs nach Art der Nutzung untersucht. Welcher Anteil des Materialverbrauchs als Inputs in die Materialbestände floss, ist dabei von besonderem Interesse. Dazu werden

fünf Nutzungsarten und 14 Materialbestandsinputs definiert und kalkuliert. Somit werden erstmals die Materialbestandsinputs von Österreich analysiert und mit den bestandsbildenden Anteilen des Materialverbrauchs anderer Wirtschaftsräume (Dammerer 2020; Streeck et al. 2020; Krausmann et al. 2018) verglichen. Eine Modellierung der Materialbestände und der damit im Zusammenhang stehenden Abfall- und Recyclingflüsse würde über den Rahmen der Arbeit hinausgehen.

Im Zuge der Arbeit wird auch die vorhandene energetische Zeitreihe von 1830-2010 (Krausmann and Haberl 2002; Krausmann 2001b; Krausmann et al. 2008b; Siefert et al. 2006; Krausmann and Wiedenhofer 2012) um weitere fünf Jahre erweitert. Es werden die Zusammenhänge des Materialverbrauchs und der Materialbestandsinputs mit den Energieflüssen und der wirtschaftlichen Entwicklung Österreichs im Kontext der industriellen Transition diskutiert. Die historischen Perspektiven bisheriger Studien ermöglichten bereits Erkenntnisse zur Entwicklung der österreichischen Ressourcenflüsse und sozialmetabolischen Profile während des Übergangs von einer Agrar- zur Industriegesellschaft¹ (Siefert et al. 2006; Fischer-Kowalski and Haberl 2007; Krausmann et al. 2008b; Wiedenhofer et al. 2013). Die durchgeführten Analysen sollen weitere Einsichten in den Industrialisierungsprozess liefern. Im zweiten Kapitel werden die Theorien, Methoden, Datenquellen und das empirische Vorgehen dargelegt, woraus die in Kapitel 3 präsentierten Ergebnisse resultieren. Im folgenden Kapitel werden Koppelungen und Trends der Entwicklungen und Muster der industriellen Transition diskutiert sowie die Ergebnisse mit anderen Ländern verglichen. Die Conclusio fasst die Resultate nochmals zusammengefasst.

¹ Bisher wurde kein dauerhaft stabiles, sozialmetabolisches Regime einer Industriegesellschaft erreicht, weshalb von der industriellen Transformation oder Transition gesprochen wird (Siefert 2003).

2 Die Materialflussanalyse Österreichs 1918-2015 und ihre Erweiterung

2.1 Der soziale Metabolismus

Der soziale Metabolismus (auch bekannt als sozioökonomischer, industrieller oder gesellschaftlicher Metabolismus oder Stoffwechsel) ist ein Kernkonzept der Sozialen Ökologie und beschreibt die biophysischen Wechselbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur (Fischer-Kowalski and Erb 2016; Wiedenhofer 2017). Er umfasst die biophysischen Bestände und Flüsse sowie regulierende Mechanismen des sozialen Systems mit dem Ziel der Systemerhaltung und -reproduktion (Fischer-Kowalski and Erb 2016). Der Gesellschaft kommen als sozioökonomischen System Schlüsselfunktionen zur Erhaltung einer bestimmten Bevölkerung in einem definierten Gebiet zu. Natur wird als die Umwelt des sozialen Systems begriffen, woraus Ressourcen entnommen und wohin Abfälle und Emissionen zurückgegeben werden (Fischer-Kowalski and Erb 2016). Dieses Konzept kann auf diverse Größenordnungen (z. B. Haushalt, Region, Staat, Welt) und auf alle historischen Perioden angewendet werden. Theorien und Konzepte aus verschiedenen wissenschaftlichen Feldern prägten die Entwicklung des sozialen Metabolismus, wobei die ursprüngliche Anwendung in der Biologie und Ökologie zur Darstellung lebenserhaltender biochemischer Reaktionen von Zellen oder Organismen zu verorten ist (Fischer-Kowalski 1998). Wie natürliche Organismen werden Gesellschaften als Subsysteme ihrer Umwelt verstanden, die von einem ständigen Material- und Energiedurchlauf abhängig sind. Diese Analogie wird durch die Namensgebung hervorgehoben (Behrens et al. 2007). Die Ressourcenflüsse werden in Input-, Output- und interne Flüsse des sozialen Systems unterschieden. Revolutionär war die Einführung des Prinzips der Massenerhaltung aus der Thermodynamik in die Betrachtung von Gesellschaften durch die Arbeiten zum industriellen Metabolismus von (Ayres and Kneese 1969; Fischer-Kowalski 1998; Krausmann et al. 2017a). Die Inputs müssen in dieser Logik den Outputs entsprechen und im System können zwischen diesen beiden Prozessen Bestände angelegt werden. Im System selbst können weder Materialien noch Energie geschaffen werden, sondern sind von außen zuzuführen und können daraufhin umgewandelt werden. González de Molina und Toledo (2014) unterteilen den Stoffwechsel in fünf metabolische Prozesse: Aneignung, Transformation, Zirkulation, Konsum und Ausscheidung – bei denen jeweils Abfälle und Emissionen anfallen (González de Molina and Toledo 2014). Innerhalb des Systems sind auch Recyclingflüsse möglich, wodurch sekundäre Materialinputs geschaffen und Kreisläufe geschlossen werden (Haas et al. 2015).

Zu den biophysischen Beständen, auch biophysische Strukturen genannt, zählen die menschliche Bevölkerung, alle Nutztiere und die Materialbestände, worunter alle menschengemachten Infrastrukturen, Gebäude, Maschinen und andere langlebige Produkte zusammengefasst werden (Fischer-Kowalski and Erb 2016; Wiedenhofer 2017). In anderen Arbeiten werden sie auch als Artefakte (*artifacts*) (Fischer-Kowalski and Erb 2016; Krausmann et al. 2016; Wiedenhofer 2017), in Nutzung befindliche Materialbestände (*in-use material stocks*) (Krausmann et al. 2017c) oder Sachkapitalbestände (*stocks of manufactured capital*) (Krausmann et al. 2018; Wiedenhofer et al. 2018) bezeichnet. Die Materialbestände stellen die physische Produktions- und Verbrauchsinfrastruktur und damit die materielle Grundlage für gesellschaftlichen Wohlstand dar (Haberl et al. 2017). Verschiedene Bedürfnisse der Gesellschaft, wie zum Beispiel Wohnen, Mobilität oder Kommunikation, werden durch die Nutzung von Materialbestände erfüllt, indem biophysische Flüsse in Funktionen und Serviceleistungen transformiert werden (Haberl et al. 2017; Krausmann et al. 2017c; Streeck et al. 2020). Die Wechselbeziehungen der Materialbestände zu den Flüssen und Services

werden auch als Stock-Flow-Service-Nexus bezeichnet und untersucht (Haberl et al. 2017). Die Funktionalität, die spezifischen Eigenschaften und der jeweilige Standort der Bestände sind bestimmend für die benötigten Ressourcenflüsse, um diese einerseits aufbauen, instand halten, betreiben, aber auch entsorgen oder recyceln zu können (Haberl et al. 2017). Durch ihre Langlebigkeit beeinflussen sie Verbrauchsmuster und Entwicklungsverläufe dauerhaft (Haberl et al. 2017; Streeck et al. 2020; Krausmann et al. 2017c; Wiedenhofer 2017).

2.1.1 *Metabolische Profile und Transitionen*

Während der Metabolismus zwischen Mensch und Natur auf biologischer, individueller Ebene (endosomatischer Metabolismus) historisch vergleichbar konstant ist, ist der Stoffwechsel auf sozialer, kollektiver Ebene (exosomatischer Metabolismus) sehr variabel und unter anderem abhängig von Technologien und Gesellschaftsstrukturen (González de Molina and Toledo 2014). Gemeinsam ergeben sie das allgemeine Bild des metabolischen Prozesses. Verschiedene Gesellschaftsformen haben unterschiedliche metabolische Profile. Bekannt ist die Unterscheidung in die drei sozialmetabolischen Regime nach Sieferle (2003). Dieser unterscheidet in (1) die Jäger- und Sammlergesellschaft in der Solarenergie unkontrolliert genutzt wird, (2) die Agrargesellschaften mit kontrollierten Aneignungsformen der Solarenergie und (3) die Industriegesellschaften, welche die solaren Grenzen durch die Nutzung fossiler Energieträger überwinden. Die jeweiligen energetischen Beschränkungen sind, neben der lokalen Ressourcenverfügbarkeit und gesellschaftlichen Organisationsstruktur, bestimmend für das Ausmaß der Mobilisierung weiterer Materialien. Metabolische Transitionen beschreiben grundlegende und weitreichende Veränderung im metabolischen Profil einer Gesellschaft (Fischer-Kowalski and Haberl 2007; Krausmann et al. 2017a). In den Beobachtungszeitraum der Arbeit fällt die industrielle Transition Österreichs. Sie gilt – aus einer sozialmetabolischen Perspektive – als bis heute noch nicht abgeschlossener Prozess und wird von Sieferle (2003) als fortlaufender Übergangsprozess mit noch ungewissem Ausgang interpretiert. Gewiss ist, dass das derzeitige Verbrauchsmuster aufgrund ökologischer und energetischer Schranken nicht unbegrenzt fortgeführt werden kann. Eine Transition zu einem nachhaltigeren industriellen Stoffwechsel (Reduktion des Ressourcenverbrauchs und des Anteils an nicht-erneuerbaren Ressourcen) wird eingefordert, da die Auswirkungen für Gesellschaft und Natur sowie die Möglichkeiten der menschlichen Kontrolle über komplexe natürliche Prozesse ansonsten ungewiss sind (IPCC 2014; Rockström et al. 2009; Costanza et al. 2007). Der soziale Metabolismus ist ein Eckpfeiler der Nachhaltigkeitswissenschaften (Haberl et al. 2017), in denen Forschungen zu Materialbeständen und systeminternen Flüssen zunehmen.

2.1.2 *Wege zu einem nachhaltigen Metabolismus*

Durch den kontinuierlichen Abbau von Materialien aus natürlichen Lagerstätten, zum Beispiel Metalle oder seltene Erden, wurden und werden anthropogene Bestände angehäuft und natürliche Lagerstätten reduziert. Einige gesellschaftlichen Lager übersteigen die natürlichen, meist nicht erneuerbaren Quellen mittlerweile, weshalb die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Materialien aus den bereits vorhandenen, nicht mehr genutzten Beständen an Bedeutung gewinnt (BMLFUW et al. 2015). Dieser Prozess ist auch als städtischer Bergbau (*urban mining*) bekannt (BMLFUW et al. 2011).

Für die Entwicklung eines nachhaltigen gesellschaftlichen Stoffwechsels sind weitere Forschungen zu den Materialbeständen und ihren systeminternen Flüssen notwendig. Die Kreislaufwirtschaft (*circular economy*) ist eine Strategie (Haas et al. 2015; Krausmann et al. 2017c), die anstrebt Ressourcen durch die gezielte Schließung von Kreisläufen so lange wie

möglich im System in Verwendung zu halten. Der Begriff ist entweder auf biologische Stoffströme, die nach der Entsorgung für ökologische Kreisläufe erneut verfügbar sind, oder auf Materialien, die innerhalb des sozioökonomischen Systems durch Wiederverwendung und technischem Recycling zirkulieren sollen, anwendbar (Haas et al. 2015). Die Produktion soll auf die biologischen und technischen Kreisläufe abgestimmt werden. Der Begriff der Ökoeffektivität (*eco-effectiveness*) (McDonough and Braungart 2002) steht für den konzeptuellen Übergang der Perspektive auf Stoffkreisläufe „Von der Wiege bis zur Wiege“ (*cradle to cradle*) anstelle von der „Wiege bis zur Bahre“ (*cradle to grave*) und zur effektiven anstelle einer effizienten Planung.

Recycling beschreibt die Wiederaufbereitung von Abfällen in sekundäre Rohstoffe für eine erneute Produktion und Konsumtion, woraus danach wieder Materialien und Produkte wie in der Erstnutzung entstehen (z. B. Glas, Papier, Stahl...). Downcycling unterscheidet hingegen jene Materialien, die nach der Wiederaufbereitung eine minderwertigere Qualität als in der Erstnutzung aufweisen und daher nur für eine kleinere Produktpalette und andere Nutzungen zum Einsatz kommen (z. B. sekundäre Aggregate aus gebrochenen Ziegeln und Beton, die wie primärer Sand und Schotter als Füllmaterial in Tragschichten verwendet werden) (Wiedenhofer et al. 2018). Um Materialien nach ihrer (Erst-)Nutzung zu sekundären Rohstoffen aufbereiten und erneut verfügbar machen zu können werden zusätzliche Ressourcen benötigt. Eine energetische Nutzung ist nur einmal innerhalb des sozioökonomischen Systems möglich bzw. an die Gesetze der Energieumwandlung und an biologische Kreisläufe gebunden. Sie kann aber optimiert und ebenfalls zur Schließung von Kreisläufen führen, zum Beispiel durch eine bessere Nutzung von Abwärme verschiedener industrieller Prozesse oder kürzere Nahrungsketten (BMLFUW et al. 2015).

Ausscheidungen aus dem System, als Abfälle und Emissionen, sind mit allen Verarbeitungsschritten und Nutzungen verbunden. Für einen nachhaltigen Metabolismus dringend notwendig sind eine generelle Reduktion des Verbrauchs, eine Steigerung der Wieder- und Weiterverwendung von weiterhin nutzbaren Produkten oder Reparaturmaßnahmen anstelle vorzeitiger Entsorgungen, ein Wechsel zu erneuerbaren Energiequellen und andere Effizienz- und Effektivitätssteigerungen im Ressourcenverbrauch (Haas et al. 2015). Ein wachsendes politisches Bewusstsein und Interesse für sozialökologische Zusammenhänge sind klar erkennbar. Der soziale Metabolismus wurde bereits auf internationaler (zum Beispiel in den *Sustainable Development Goals* (SDG) der Vereinten Nationen), supranationaler (EU) und nationaler Ebene (zum Beispiel in Österreich oder Japan) in die Strategien und Standardstatistiken, zum Beispiel anhand der Material- und Energieflussanalyse, integriert (Wiedenhofer 2017). Gründe dafür lassen sich in der diagnostischen Stärke des Konzeptes finden, die es durch die Vereinfachung der metabolischen Prozesse erhält. Dadurch können Entwicklungen beobachtet und politische Ziele für einen nachhaltigen Metabolismus klarer formuliert und bewertet werden. Große Potenziale werden in der Entkoppelung der Ressourcennutzung vom Wirtschaftswachstum, der Ressourceneffizienz, gesehen (Wiedenhofer 2017), auf die in Kapitel 4.1.1. genauer eingegangen wird. Im nächsten Kapitel werden die methodischen Hintergründe der durchgeführten Analysen geklärt.

2.2 Methoden

Der soziale Metabolismus wird durch die Material- und Energieflussanalyse (MEFA) operationalisiert. Zuerst werden die Grundlagen und Zusammenhänge der Material- (MFA) und Energieflussanalyse (EFA) und ihrer Indikatoren beschrieben. Danach wird die Basis der methodischen Erweiterung zur Beobachtung und Messung der Materialflüsse nach Art der

Nutzung und der Materialbestandsinputs erläutert sowie die gewählten Datenquellen und ihre Qualität. Abschließend wird das konkrete empirische Vorgehen im Detail beschrieben.

2.2.1 Die Material- und Energieflussanalyse

Die Material- und Energieflussanalyse oder -bilanzierung (MEFA) ist eine etablierte Methode zur Erforschung von Gesellschaft-Natur-Beziehungen und ermöglicht die systematische Beobachtung und Quantifizierung der biophysischen Flüsse, die von sozialen Systemen aus der Natur in einem bestimmten Zeitraum entnommen und genutzt werden (Fischer-Kowalski and Erb 2016). Es handelt sich dabei um eine nicht zwingend notwendige Kombination der Materialflussanalyse (MFA) und der Energieflussanalyse (EFA), wobei erstere die systemüberschreitenden Flüsse in Masseeinheiten und letztere in Energieeinheiten misst. Dazu wurden in dieser Studie die Einheit Tonne pro Jahr (Gesamtverbrauch meist in Mio. t/a) für Materialflüsse und Joules pro Jahr (Gesamtverbrauch meist in PJ/a) für Energieflüsse gewählt.

Für die Analysen werden in der Regel dieselben Systemgrenzen angenommen, die im folgenden Kapitel erläutert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Perspektiven auf die Materialeigenschaften sind die Beobachtungsfelder nicht deckungsgleich, überlappen sich allerdings zum Teil. Einerseits ist nur ein Teil der beobachteten Materialien auch energetisch verwertbar und andererseits werden Primärenergiequellen für Elektrizität, wie zum Beispiel Wasser-, Wind- oder Atomkraft, nicht materiell erfasst.

Die in vier Hauptgruppen zusammengefassten Materialien sind:

- Biomasse: Darunter fallen biogene Rohstoffe, die von Menschen und Nutztieren aus der natürlichen Umwelt entnommen werden. Sie werden energetisch (Nahrung, Futter, technische Energieerzeugung) oder in nicht-energetischen Anwendungen (z. B. Textilien, Papier) verwendet.
- Fossile Energieträger: Dies sind gasförmige, flüssige oder feste mineralische Materialien biogenen Ursprungs, die aufgrund ihrer hohen Energiedichte hauptsächlich zur Energieumwandlung durch Verbrennung verwendet, aber auch für materielle Anwendungen genutzt werden (z. B.: Plastik, Bitumen, Düngemittel).
- Metalle: Darunter werden Roherze und andere Materialien aus dem Bergbau aggregiert.
- Nicht-metallische Mineralien: Darunter fallen diverse Industrie- und Baumineralien, die ebenfalls in ihrem abgebauten Rohzustand erfasst werden (z. B.: Sand und Schotter, Kalkstein oder Lehm) (BMLFUW et al. 2015).

Die in den Gruppen Biomasse und fossile Energieträger aggregierten Materialien weisen unterschiedliche Energiegehalte auf. Sie sind sowohl materiell als auch energetisch erfassbar und können mit den entsprechenden Konversionsfaktoren² von Material- in Energieflüsse umgerechnet werden und umgekehrt. Durch die verschiedenen Brennwerte der Materialien kommt es zwischen den Ergebnissen der MFA und EFA zu unterschiedlichen Gewichtungen der verschiedenen Flüsse. Zum Beispiel ist die Masse der Weidebiomasse in der MFA dominant, nimmt in der EFA wegen der geringen Energiedichte (15 MJ/kg) aber nur einen kleineren Anteil am Gesamtfluss ein (Gaugl 2016). Erdöl ist mit einer Energiedichte von 44 MJ/kg ein gegenteiliges Beispiel und beansprucht höhere Anteile im energetischen Verbrauch (Gaugl 2016). Metalle und Mineralien haben hingegen keine materialspezifischen Brennwerte und werden in energetischen Darstellungen nicht einbezogen (Haberl 2001).

² Materialspezifische Brennwerte/Energiegehalt (*Gross Calorific Value* (GCV))

Nicht in der MFA inkludiert sind die Primärenergieflüsse aus Wasserkraft, Kernspaltung, Geothermie, Solarenergie oder Windkraft, die zur Erzeugung von Elektrizität oder mechanischer Energie dienen. Auch importierte oder exportierte Elektrizität wird in einer MFA nicht abgebildet, muss in eine EFA hingegen einbezogen werden (Haberl 2001). Die EFA geht über die herkömmliche statistische Energiebilanz hinaus, die allein den technischen Energieverbrauch – d. h. die Energie zur Bereitstellung von Wärme, Licht, mechanischer Arbeit und Datenverarbeitung – erfasst (Gaugl 2016). Bei der EFA sind auch die Energieflüsse aus Nahrung für menschliche und tierische Organismen inkludiert (Haberl 2001). Es wird die Primärenergie betrachtet, die alle potentiell energetisch nutzbaren Materialien und Energieformen umfasst, egal welche tatsächliche Art der Nutzung sie danach erfahren (Krausmann and Schandl 2006).

2.2.2 Wirtschaftsräumliche Analysen und ihre Indikatoren

Die wirtschaftsräumliche MFA (economy-wide MFA, ew-MFA) ist eine mittlerweile weit ausgereifte und harmonisierte Methode zur Beobachtung sozioökonomischer Materialflüsse, deren Grundsätze in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen definiert sind (Krausmann et al. 2016, 2017b; Eurostat 2012). Die Wahl dieser Methode war für die vorliegende Arbeit naheliegend, da als sozioökonomisches System der österreichische Nationalstaat und Wirtschaftsraum bestimmt wurde. In Folge wird in dieser Arbeit ausschließlich Bezug auf die ew-MFA genommen, die zur Vereinfachung als MFA abgekürzt wird. Gleiches gilt für die EFA.

Um die Flüsse in und aus einem sozioökonomischen System quantifizieren zu können, müssen dessen Systemgrenzen genau definiert werden. Als Systemgrenzen in der MEFA gelten einerseits die Grenze zwischen Natur und Gesellschaft und andererseits Grenzen zwischen gesellschaftlichen Systemen (Fischer-Kowalski et al. 2011; Krausmann et al. 2016). Das bedeutet, dass zum einen inländische Entnahmen aus der natürlichen Umwelt und zum anderen der physische Außenhandel mit anderen Wirtschaftsräumen als Importe und Exporte erfasst werden (siehe Abbildung 1) (Krausmann et al. 2016; Wiedenhofer 2017; Krausmann et al. 2018; Wiedenhofer et al. 2018).

Die Grenzziehung zwischen den Systemen Natur und Gesellschaft sind Gegenstand von methodischen Aushandlungen. Interne Flüsse, d.h. Flüsse innerhalb des Systems (z. B. zwischen zwei Sektoren), gelten als Transfer und scheinen in der Flussrechnung in der Regel nicht auf (Krausmann et al. 2016). Beispielsweise werden kultivierte Pflanzen oder Agrarökosysteme nicht als Teil des Systems definiert und geerntete Biomasse daher als Entnahme aus der Umwelt gewertet. Das von Nutztieren aufgenommene Futter gilt somit als Input, während tierische Produkte wie z. B. Milch dagegen innergesellschaftliche Flüsse darstellen (Krausmann et al. 2016).

Theoretisch müssen alle Ressourcenflüsse erfasst werden, die der Bestandserhaltung dienen (Fischer-Kowalski et al. 2011). Dazu zählen alle festen, flüssigen und gasförmigen Materialien, welche die Systemgrenzen übertreten. Wasser und Luft werden davon ausgenommen und exkludiert, da ihr Ausmaß das der anderen Materialien deutlich übersteigt (Krausmann et al. 2016, 2017b). Die anderen Materialien werden basierend auf ihren Eigenschaften und Strukturen in die vier Hauptmaterialgruppen unterteilt. Dabei sollen die Inputs des sozioökonomischen Systems, die Materialbestandsveränderungen und die Outputs in die Umwelt und andere Wirtschaftsräume untereinander konsistent und das Prinzip der Massenerhaltung darauf anwendbar sein (Krausmann et al. 2016, 2017b). Die Summe der Inputs über einen Zeitraum hat der Menge der Outputs, zuzüglich der Bestandszunahmen und abzüglich der Bestandsabgänge, zu entsprechen.

Als Formel ausgedrückt:

$$\text{Input} = \text{Output} + \text{Bestandsinputs} - \text{Bestandsoutputs}$$

(Krausmann et al. 2016)

In Abbildung 1 ist der Rahmen der MFA mit ihren Grenzen und derzeitigen Leitindikatoren (mit * markiert) zu sehen. Als Inputs gelten Entnahmen aus der natürlichen Umwelt (*domestic extraction*, DE) und Importe aus anderen sozioökonomischen Systemen (*import*), als Outputs Emissionen und Abfälle (*domestic processed output*, DPO) und Exporte (*export*).

Im sozioökonomischen System eingebettet sind die biophysischen Strukturen der Gesellschaft (*biophysical structures of society*) mit jährlichen Bestandsveränderungen (*stock changes*). Wieso sie bisher meist als Black Box behandelt werden und wie diese geöffnet werden kann, wird im nächsten Kapitel geklärt.

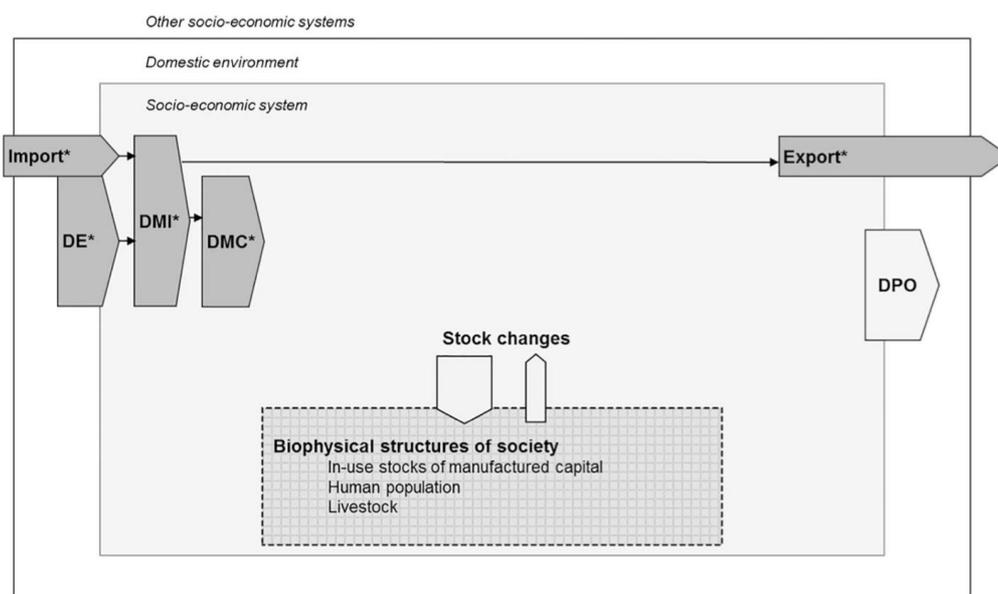


Abbildung 1: Grundstruktur der MFA: Inländische Entnahmen (DE) und Importe ergeben den direkten Materialinput (DMI) und abzüglich Exporte den Materialverbrauch (DMC) und werden standardmäßig bilanziert. Bestandsveränderungen (stock changes), Outputs (DPO) und die Bestände (biophysical structures of society) werden bisher nicht systematisch gemessen.

Quelle: Wiedenhofer et al. 2018

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Hauptindikatoren der MFA und EFA. Der direkte Materialinput (*direct material input*, DMI) ist die Summe aus DE und Importen. Der inländische Materialverbrauch (*domestic material consumption*, DMC) resultiert aus der DE plus der physischen Handelsbilanz (*physical trade balance* $PTB = import - export$), die als materielles Spiegelbild der monetären Handelsbilanz verstanden werden kann. Der DMC bezeichnet den Materialverbrauch aus Produktionsperspektive, nicht den tatsächlichen Endverbrauch, sowie das nationale Abfallpotential, das nach der Nutzung als Abfälle, Emissionen oder ausgebrachte Materialien (z. B. Dünger) an die Umwelt abgegeben wird (*domestic processed output*, DPO). Das energetische Gegenstück zum DMC ist der Primärenergieumsatz (*domestic energy consumption*, DEC). Der DEC umfasst, im Gegensatz zum technischen Primärenergieaufkommen (*Total primary energy supply*, TPES), neben der Energie zur

technischen Energienutzung auch den Energiegehalt aus der primären landwirtschaftlichen Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel (Wiedenhofer et al. 2013).

Tabelle 1: Leitindikatoren MFA und EFA

Abkürzung	Englisch	Deutsch	Beschreibung
DE	<i>Domestic extraction</i>	Inlandsentnahmen	Die Menge der (genutzten) inländisch entnommenen Materialien.
	<i>Import</i>	Importe	direkter, physischer Materialinput aus Handel
	<i>Export</i>	Exporte	direkter, physischer Materialoutput durch Handel
DMI	<i>Direct material input</i>	Direkter Materialinput	DE + Importe
PTB	<i>Physical trade balance</i>	Physische Handelsbilanz	Importe – Exporte
DMC	<i>Domestic material consumption</i>	Inländische Materialverbrauch	DE + Importe – Exporte
DEC	<i>Domestic energy consumption</i>	Inländische (Primär-) Energieumsatz	Energetische DE + Importe – Exporte
TPES	<i>Total primary energy supply</i>	Technisches Primärenergieaufkommen	DEC exklusive landwirtschaftlicher Biomasse für Katabolismus

All diese extensiven Indikatoren³ können mit anderen Berechnungsgrößen zu intensiven Indikatoren⁴ umgewandelt werden. Zum Beispiel ergeben sich durch die Verrechnung mit Bevölkerungszahlen Material- oder Energieverbrauchszahlen pro Kopf (DMC/cap) oder DEC/cap), mit Landesflächen die Flächenintensität (DMC/ha oder DEC/ha) und mit dem Bruttoinlandsprodukt (BIP oder *gross domestic product*, GDP) beispielsweise die Materialintensität (DMC/GDP) oder, als inverser Wert, die Ressourceneffizienz (oder Materialproduktivität) (GDP/DMC) (Krausmann et al. 2016).

Als Untersuchungszeitraum wurde die Zeitspanne ab der Gründung der ersten Republik Österreichs 1918 bis 2015 gewählt. Die Staatsgrenzen waren, bis auf die Unterbrechung von 1938 bis 1945 aufgrund des Anschlusses Österreichs an das Deutsche Reich, ab 1921 gültig und wurden für den gesamten Beobachtungszeitraum angenommen. Es wurde nur ein Teil des metabolischen Austausches untersucht. Der Forschungsfokus lag auf den Inputs des sozioökonomischen Systems und der Materialbestände. Eine vollständige Bilanzschließung für Österreich, wie bei Steil (2017), wurde in dieser Arbeit nicht angestrebt. Daher wurden Outputs an die Umwelt oder die für eine Bilanzschließung erforderlichen Flüsse von Wasser und Luft (*balancing items*) nicht weiter betrachtet. Auch ungenutzte Entnahmen (*unused extraction*) und die Vorleistungen gehandelter Produkte (*raw material equivalents*, RME) wurden in dieser Arbeit nicht quantifiziert (Krausmann et al. 2016, 2017b). Letztere verbleiben in den Analysen meist in den Bilanzen der Herstellerländer, statt als indirekte Flüsse bei den Ländern mit dem Endverbrauch verrechnet zu werden und stellen ein eigenständiges Forschungsfeld dar (Wiedenhofer 2017; Eisenmenger et al. 2016).

³ Die Werte sind hierbei direkt von der Größe des sozioökonomischen Systems abhängig.

⁴ Die Werte sind unabhängig von der Größe des jeweiligen Systems und erlauben Vergleiche mit Werten aus anderen Systemen.

In den Kapiteln 2.3 und 2.4 werden die herangezogenen Quellen und Schätzverfahren im Detail beschrieben.

2.2.3 Materialnutzung und Inputs in die Materialbestände

Konzeptuell sind systeminterne Bestandsveränderungen und Abflüsse aus dem sozioökonomischen System (DPO) in der MFA fest verankert. Praktisch haben sich bisher vergleichsweise wenige Studien damit befasst und die entsprechenden Indikatoren und Bilanzierungsmethoden sind weder ausgereift noch standardisiert (Wiedenhofer et al. 2018). Das ist unter anderem auf das Fehlen konsistenter, umfassender und zusammenhängender Datenquellen zu Prozessen, Beständen und den weiteren Verlauf der Materialnutzung im System zurückzuführen (Wiedenhofer 2017; Wiedenhofer et al. 2018). Aufbauend auf der Annahme einer Schließung der Massenbilanz ($\text{Output} = \text{Input} \pm \text{Bestandsveränderung}$) wurden die Bestandsveränderungen bisher meist als ein reiner Masseausgleich zwischen Inputs und Outputs des Systems geschätzt, während Bestandsinputs und -outputs selbst nicht erfasst wurden. Das heißt, sie wurden durch die Gegenüberstellung des Materialverbrauchs (DMC) und Informationen zu den Systemabgängen (DPO) unter Einbeziehung von Daten aus beschränkt aussagekräftigen und fragmentierten Abfallstatistiken bilanziert (Wiedenhofer et al. 2018). Diese vereinfachte Darstellung der Bestände und ihrer Flüsse in der MFA wird auch als Black Box im Modell bezeichnet (Wiedenhofer 2017; Wiedenhofer et al. 2018).

In den letzten Jahren nehmen Forschungen zu Materialbeständen deutlich zu und umfassen Untersuchungen spezifischer Materialien und Substanzen bis hin zu verschiedenen Modellierungsansätzen, die in einigen Arbeiten auch verglichen werden (Wiedenhofer et al. 2018; Augiseau and Barles 2017). Eine vielversprechende Variante zur Modellierung und Untersuchung der Dynamik langlebiger Materialbestände ist das als konsistente Erweiterung der MFA entwickelte, dynamische, top-down-Prinzip- und Input-gesteuerte MISO-Modell (*Material Inputs, Stocks and Outputs*) (Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2017c, 2018). Es steht in vollem Einklang mit den Grundsätzen der MFA in Bezug auf die Definition der Bestände, Materialflüsse und den angewandten Systemgrenzen (Krausmann et al. 2017c Si; Wiedenhofer et al. 2018). Durch die Erweiterung können bestandsbildende Materialflüsse (*stock-building materials*), ihre Akkumulation als Materialbestände (*in-use stocks of materials*), Abfälle aus Verarbeitung, Herstellung, Bau und Verbrauch sowie daraus rückgewonnene Recyclingflüsse quantifiziert werden (Krausmann et al. 2018).

Dafür ist in einem ersten Arbeitsschritt ein Perspektivenwechsel in der Differenzierung der Materialien von den Materialeigenschaften zu den Nutzungsarten notwendig (Wiedenhofer et al. 2018). Danach können in einem zweiten Arbeitsschritt die Anhäufung der bestandsbildenden Materialien (primäre und sekundäre Ressourcen) im dynamischen inputgesteuerten Rahmen nachverfolgt und das jährliche Niveau der Materialbestände und ihrer Abgänge modelliert werden. Dazu werden verschiedenen Materialbestandstypen mehrere Parameter zugeordnet, wie anfallende Herstellungs- und Verarbeitungsabfälle und -verluste, Nutzungsdauern und Re-/Downcyclingraten (Wiedenhofer et al. 2018).

Bislang gibt es hierfür noch keine standardisierten Verfahren, sondern sind fortlaufend Weiterentwicklungen in Modell, Methodik und Datenquellen zu beobachten. Modellierungen von Materialbeständen gibt es auf globaler, regionaler und nationaler Ebene (Haas et al. 2015; Krausmann et al. 2017c, 2018; Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2020; Dammerer 2020). In der Modellierung der globalen Materialflüsse und Bestände von 1900 bis 2015 von Krausmann et al. (2018) wurden neben den Materialbeständen auch die menschliche Bevölkerung und Nutztiere integriert. Bevölkerungs- und Bestandszahlen wurden ergänzt und

die für den Stoffwechsel nötigen Materialflüsse wie Futter, Nahrung oder Exkremente und Emissionen verbunden.

Für die vorliegende Arbeit wurden nur die Materialbestände betrachtet und das Vorgehen von Wiedenhofer et al. (2018) als Vorbild gewählt. Diese empfehlen eine Fokussierung auf fünf Schlüsselstadien oder -prozesse, die in Abbildung 2 dargestellt werden (Wiedenhofer et al. 2018).

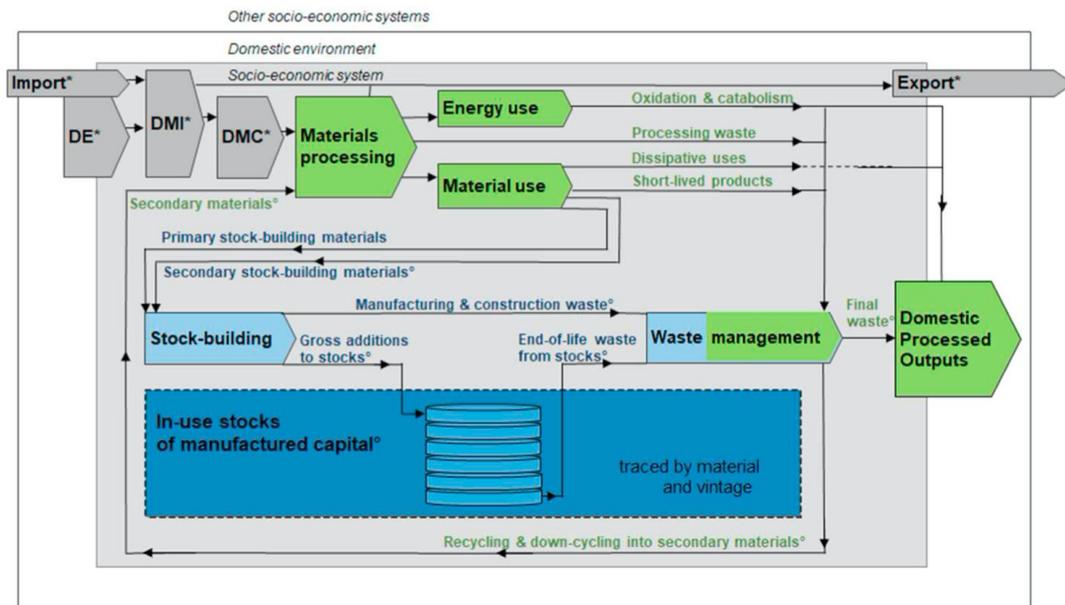


Abbildung 2: Modellerweiterung der MFA mit dem darin eingebetteten MISO-Modell. Elemente in Grau zeigen die Indikatoren der MFA, in Grün Erweiterungen der Bilanzierungsmethoden und in Blau das Modellierungsmodell dafür relevanten Informationen.

Quelle: Wiedenhofer et al. 2018

Die grauen Elemente zeigen die bereits bekannten Indikatoren der MFA und deren Systemgrenzen. Die Prozesse und Flüsse an der Schnittstelle zwischen MFA und MISO-Modell sind in Grün gekennzeichnet, wo die Materialien nach ihren Hauptnutzungsarten differenziert werden (1. Arbeitsschritt). In Blau abgebildet sind das MISO-Modellierungsmodell und die in der Modellierung berücksichtigten Prozesse und Indikatoren (2. Arbeitsschritt).

Folgende Prozesse werden unterschieden (Wiedenhofer et al. 2018):

- In der Materialverarbeitung (*materials processing*) fließen die primären Rohstoffe aus der MFA und die rückgewonnenen, sekundären Materialien zusammen. Erste Verarbeitungsverluste und Abfälle (*processing losses and wastes*) werden den Rohmaterialien abgezogen. Dazu zählen beispielsweise taubes Gestein und Schlacken aus der Metallgewinnung, CO₂ vom Kalkbrennen oder Wasserdampfverluste aus der Ziegelproduktion. Sie gelten als nicht wiederverwendbar und fließen direkt ins Abfallmanagement (*waste management*). Der Rest wird den verschiedenen Nutzungsarten zugeordnet.
- Unter die energetische Nutzung (*energy use*) fallen alle Nahrungs- und Futtermittel (*food and feed*) und der Anteil von Biomasse und fossilen Energieträgern, der zur technischen Energiegewinnung (*technical energy*) genutzt wird. Durch Oxidation und Katabolismus wird die in den Materialien gespeicherte Energie umgewandelt, verbraucht und Emissionen sowie flüssige und feste Abfälle aus dem System ausgeschieden oder im Abfallmanagement weiterbearbeitet.

- Zur materiellen Nutzung (*material use*) kommen alle Materialien, die nicht als Energieträger genutzt werden. Sie werden weiter unterschieden:
 - Dissipative Nutzungen (*dissipative uses*) umfassen verschiedene Materialien, die bei ihrer Nutzung direkt in die Umwelt ausgebracht werden und damit als DPO das System verlassen. Darunter fallen zum Beispiel Saatgut, Dünger, Schmiermittel oder Salz und Schotter zur Streuung auf Straßen (Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2018).
 - Kurzlebige Produkte (*short-lived products*) fassen alle Produkte zusammen, die innerhalb eines Jahres verbraucht und entsorgt werden. Dazu zählen zum Beispiel Zeitungen, Verpackungen oder Hygieneartikel.
 - Primäre und sekundäre bestandsbildende Materialien (*primary and secondary stock-building materials*) sind alle Materialien, die zur Herstellung von Produkten mit einer Nutzungsdauer von über einem Jahr verwendet werden. Dazu zählen Industrieholz, Metallerze, Sand und Schotter und andere Rohmaterialien zur Herstellung von Beton, Asphalt, Glas, Ziegel und Plastik (Krausmann et al. 2018). Diese Materialien fließen weiter zum Bestandsaufbau (*stock-building*).
- Im Bestandsaufbaustadium (*stock-building*) werden die bestandsbildenden Materialien als Inputs ins MISO-Modell geführt, worin sie weiterverfolgt werden (2. Arbeitsschritt). Die bestandsbildenden Materialien fließen nach Abzug weiterer Herstellungs- und Bauverluste (*manufacturing and construction losses*) als Bruttobestandszuwächse (*gross additions to stocks*), in die Materialbestände und akkumulieren in diesen als verschiedene Materialbestandstypen von Infrastruktur, Gebäude, Maschinen und Haushaltsgeräten. Jedem Bestandstyp werden spezifische Nutzungsdauern zugeordnet. Während dieser Zeit werden die Materialbestände zur Bereitstellung verschiedener Dienste und Services für die Gesellschaft genutzt. Nach Ablauf der jeweiligen Nutzungsdauer werden die Materialbestände entsorgt, abgebaut oder verbleiben als ungenutzte Bestände vor Ort. Am Ende der Nutzungsdauer fließen die Überreste (*end-of-life waste from stock*) (z. B. Bauschutt oder Altmetall) im Modell ins Abfallmanagement.
- Das Abfallmanagement (*waste management*) umfasst alle Emissionen und Abfallflüsse aus der Nutzung und Verarbeitung von Materialien und Materialbeständen (*end of life wastes from stock*). Ein Teil dieser Abfälle wird als Sekundäre Rohstoffe (*secondary materials*) durch Re- und Downcycling einer erneuten Verwendung (im Modell zurück ins *materials processing*) zugeführt. Alle anderen (*final waste*) werden als DPO (*direct processed outputs*) aus dem System ausgeschieden.
- Zu den Outputs in die Umwelt (DPO) zählen deponierte und unkontrollierte Abfälle und Emissionen. Manche Materialbestände bleiben am Ende ihrer Nutzung ohne Funktion und weitere Instandhaltungsarbeiten als ungenutzte (*hibernating*) Bestände vor Ort zurück. Sie sind Gegenstand derzeitiger Forschungen und als sekundäre Materiallager interessant. Aufgrund fehlender Daten werden auch sie im MISO-Modell als *final waste* behandelt.

In der vorliegenden Arbeit wurde nur der erste Arbeitsschritt für die Materialflüsse Österreichs umgesetzt und die Perspektive auf die Verwendung der Materialien aus der MFA erweitert. Im Forschungsfokus stand die Entwicklung der Materialbestandsinputs. Dazu wurden 5 Nutzungsarten des DMCs und 14 bestandsbildende Materialien definiert und quantifiziert. Sie werden in Kapitel 2.4.2. im Detail beschrieben. Eine Modellierung des

jährlichen Niveaus der Materialbestände, der Bestandsoutputs und der sekundären Materialflüsse (2. Arbeitsschritt) wurde in dieser Arbeit nicht vorgenommen.

2.3 Datengrundlage und Datenqualität

2.3.1 Quellen der MEFA

Die Datenquellen für die MEFA Österreichs setzen sich aus einer Reihe von nationalen und internationalen Statistiken und weiteren Quellen zusammen.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine bereits vorhandene EFA-Datensammlung von 1830 bis 2010 von Krausmann (2016) zur Verfügung gestellt. Die methodischen Hintergründe, Datenquellen und Ergebnisse der EFA wurden für den Zeitraum bis 1995 bzw. 2000 mehrmals veröffentlicht (Haberl 2001; Krausmann and Haberl 2002; Haberl et al. 2004; Krausmann et al. 2004, 2003, 2008b; Krausmann and Schandl 2006; Sieferle et al. 2006). Das Update von Krausmann und Wiedenhofer (2012) für die Jahre von 2000 bis 2010 wurde bisher noch nicht publiziert. Diese Datenreihen wurden bis 2015 konsistent ergänzt und stimmen mit den Systemgrenzen und Berechnungsverfahren der ebenfalls erstellten MFA überein. Die Daten für die Erweiterung der Datenreihen stammen aus diversen Landwirtschafts-, Energie- und Handelsstatistiken (Statistik Austria 2014, 2016a; UN Statistics Division 2017; IEA 2020; Statistik Austria 2016b).

Ein Teil dieser Datensammlung diene als Basis für die Berechnung des Gewichts der verbrauchten Biomasse für die MFA. Informationen für die Jahre 2011-2015 wurden aus entsprechenden Statistiken oder über konsistente Schätzverfahren ergänzt. Tabelle 2 zeigt eine Auflistung der verwendeten Hauptdatenquellen und der zusätzlichen Quellen für die Analyse der Materialflüsse.

Als Hauptquelle für die Materialgruppen Metalle, nicht-metallische Mineralien und fossile Energieträger diene das Österreichische Montan-Handbuch (kurz MH) (BMHV 1920ff), das beinahe den gesamten Untersuchungszeitraum abdeckt. Seit 1855 gibt diese geschlossene Reihe Auskunft über den Bergbau in Österreich, die in der österreich-ungarischen Monarchie begann⁵ und nach dem beiden Weltkriegen in der Republik Österreich weitergeführt und schrittweise reformiert wurde.

Als Quelle für den Außenhandel von 1920 bis 1963 und für Schätzungen zu Extraktion und Verbrauch von Baumineralien diene das Statistische Handbuch für die Republik Österreich (kurz SHB) (Bundesamt für Statistik 1920ff), das in der Ersten Republik vom Bundesamt für Statistik (1920-1938) und in der Zweiten Republik vom Statistischen Zentralamt⁶ (1950-1991) herausgegeben wurde. Für die vorliegende Arbeit blieben die Datenlücken des Außenhandels während des Zweiten Weltkrieges leer. Ab 1964 sind die Daten aus dem SHB ident mit der digital verfügbaren Handelsdatenbank der Vereinten Nationen „*United Nation Commodity Trade Statistics*“ (kurz Comtrade) (UN Statistics Division 2017), die ab 1965 als Hauptquelle für den Außenhandel genutzt wurde.

⁵ Vorgänger: Montan-Handbuch des österreichischen Kaiserthums 1857-1867; Österreichisches Montan-Handbuch 1875-1913;

⁶ Nachfolger: Statistik Austria (Bundesanstalt Statistik Österreich (ÖSTAT)) seit 2000

Tabelle 2: Datenquellen und ergänzende Quellen der MFA nach Materialkategorien und zusätzlicher Indikatoren

Materialkategorien	Hauptdatenquellen und ergänzende Quellen		
Biomasse	Datensammlung 1918-2010 (Krausmann and Wiedenhofer 2012) aufbauend auf (Schandl 1998; Schandl et al. 2000; Matthews et al. 2000; Krausmann 2001a; Haberl 2001; Krausmann and Haberl 2002; Krausmann et al. 2003, 2004, 2008b; Krausmann and Schandl 2006; Sieferle et al. 2006; Krausmann and Wiedenhofer 2012).		Statistik der Landwirtschaft 2011-2015 (Statistik Austria 2014, 2016a; BMLFUW 2016)
Fossile Energieträger	Montan-Handbuch 1918-2015 (BMHV 1920ff) Ergänzungen: IEA (IEA 2020)		
Metalle	Montan-Handbuch 1918-2015 (BMHV 1920ff) Vergleiche: USGS (USGS 2017a, 2017b), ÖSTAT (Statistik Austria 2017), EUROSTAT (Eurostat 2020b)		
Nicht-metallische Mineralien	Montan-Handbuch 1918-2015 (BMHV 1920ff) Ergänzungen: IEA (OECD/IEA 2015), Cembureau (Cembureau 1998, 2011, 2017), Statistisches Handbuch (Bundesamt für Statistik 1920ff), (Eurostat 2017) Vergleiche: USGS (USGS 2017a, 2017b), ÖSTAT (Statistik Austria 2017), EUROSTAT (Eurostat 2020b)		
Physischer Außenhandel	Statistisches Handbuch für den Bundesstaat Österreich. 1920-1938 (Bundesamt für Statistik 1920ff)	Statistisches Handbuch für die Republik Österreich. 1947-1964 (Österreichisches Statistisches Zentralamt 1950ff)	Comtrade 1963-2015 (UN Statistics Division 2017) Ergänzungen: IEA (IEA 2020), EUROSTAT (Eurostat 2020c)
Bevölkerung	Maddison Project Database 1918-2015 (Bolt et al. 2018) Vergleiche: ÖSTAT (Statistik Austria 2020a); FAO (FAO 2020)		
Bruttoinlandsprodukt (Real GDP in 2011US\$)	Maddison Project Database 1918-2015 (Bolt et al. 2018) Vergleiche: World Economics (World Economics 2017)		

Die Materialströme wurden in den ersten Jahrzehnten vor allem in Meterzentnern ($q=100$ kg) dokumentiert. Ab den 1950ern wurde zunehmend zu Angaben in Tonnen (t) oder 1000 t übergegangen. Über den gesamten Zeitraum hinweg kam es zu mehreren Änderungen in den Systematiken und Klassifikationen, die zu einer besseren internationalen Harmonisierung führten. Prinzipiell war ein steigender Detailgrad in der Berichterstattung festzustellen.

Die Daten aus den Hauptquellen wurden mit Angaben aus internationalen Datenbanken wie der *United Nation Commodity Trade Statistics* (Comtrade), *Statistical Office of the European Union* (Eurostat), *European Cement Association* (Cembureau), *International Energy Agency* (IEA), *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) oder *U.S. Geological Survey* (USGS) ergänzt und abgeglichen. Bei Abweichungen, wie zum Beispiel unterschiedlichen Annahmen zur Dichte von Erdgas (IEA 2020), wurden nationalen Zahlen der Vorrang gegeben, da diese generell als detaillierter und weniger fehlerbehaftet angesehen werden. Zur Überprüfung der Plausibilität wurden andere MFA-Datensammlungen zu Österreich herangezogen (Schandl 1998; Schandl et al. 2000; Statistik Austria 2017; BMLFUW et al. 2015; Eurostat 2020b).

Als Quelle für die Bevölkerungszahlen und das Bruttoinlandsprodukt diente die *Maddison Project Database* (Bolt et al. 2018) mit ihren aufbereiteten statistischen Langzeitdatenreihen.

2.3.2 Zusätzliche Quellen für die Erweiterung der MFA

Zusätzlich zu den Daten aus der MFA wurden weitere Produktions- und Handelsdaten sowie Studien und Informationen zur Produktion und Verarbeitung der verschiedenen Materialbestandsinputs für Analyse herangezogen, die in Kapitel 2.4.2.2 und Tabelle 13 genauer beschrieben werden. Im Allgemeinen sind die Produktionsdaten heterogen und stammen aus mehreren Quellen. Das SHB (Bundesamt für Statistik 1920ff) bot mehrere relevante Daten aus Produktions- und Handelsstatistiken. Für den gesamten Beobachtungszeitraum gibt es keine konsistente Datenbank. Als hilfreich für die Quellensuche und Schätzung von Materialbestandsinputs und Verarbeitungsverlusten erwiesen sich Studien zur Modellierung von Materialbeständen, die als Leitfäden dienten (Krausmann et al. 2017c; Wiedenhofer et al. 2018; Dammerer 2020).

2.4 Die empirische Durchführung der österreichischen MEFA und ihrer Erweiterung

2.4.1 Berechnung der Materialflüsse Österreichs

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das konkrete Vorgehen und die Spezifika bei der Durchführung der MFA für Österreich 1918-2015. Es werden die Datenaushebungen und Berechnungen für die MFA dargestellt, unterteilt in DE und Außenhandel. Die Bearbeitung der inländischen Extraktionen wird unterteilt in die vier Hauptmaterialgruppen beschrieben.

Die Ergebnisse daraus werden in Kapitel 3.1 präsentiert.

Als methodischer Leitfaden für die Sammlung und Bearbeitung von Primärdaten sowie für Schätzungen und die Strukturierung des MFA Datensatzes diente die Anleitung „*Economy-wide Material Flow Accounting. Introduction and Guide. Version 1.1.*“ (Krausmann et al. 2016), eine Weiterentwicklung des „*Compilation Guides*“ der Eurostat (Eurostat 2012). Daraus wurde auch die Klassifikation der Materialien (MFA Codes) im folgenden Text und den kommenden Tabellen⁷ übernommen. Der Fokus der Beschreibungen lag auf den bestandsbildenden Materialien. Alle statistischen Daten und Schätzungen wurden für die Analyse vereinheitlicht und als metrische Tonnen [t] oder Millionen Tonnen [Mio. t] dargestellt.

2.4.1.1 Biomasse

Für die Berechnung der Biomasse von 1918 bis 2010 konnten aggregierte Datenreihen (Krausmann 2016) der Erntemengen, Anbauflächen sowie diverser Umrechnungsfaktoren (z. B. Koeffizienten zum Wassergehalt des geernteten Frischgewichts) übernommen werden. Sie gehen auf mehrere Energieflussanalysen zurück (Schandl 1998; Schandl et al. 2000; Matthews et al. 2000; Krausmann 2001a; Haberl 2001; Krausmann and Haberl 2002; Krausmann et al. 2003, 2004, 2008b; Krausmann and Schandl 2006; Sieferle et al. 2006; Krausmann and Wiedenhofer 2012). Für 2011-2015 wurden Daten aus den landwirtschaftlichen Statistiken ergänzt (Statistik Austria 2014, 2016a).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die erfassten und mit MFA-Codes klassifizierten Biomasseerträge. Darin aufgelistet ist auch die Auswahl der ausgehobenen Feldfrüchte. Die Erntemenge der restlichen Feldfrüchte (A.1.1.10. *Other crops*) wurde geschätzt, indem zuerst die Differenz zwischen der Anbaufläche der erfassten Feldfrüchte zum gesamten Ackerland

⁷ Einen Überblick über die verwendeten MFA Codes geben zum Beispiel die Tabellen 3, 6, 7 und 12.

gebildet wurde. Die Erntemenge dieser übrigen Fläche wurde anschließend anhand des durchschnittlichen jährlichen Flächenertrags der erfassten Feldfrüchte berechnet. Der geschätzte Anteil an der gesamten Feldfrüchternte betrug in den Jahren 2000 bis 2015 zwischen 7-13 %. Für den Nachanbau (*second crops*; ebenfalls unter A.1.1.10.) wurde ab 1995 ein konstanter Wert angenommen.

Tabelle 3: Zuordnung Biomasse MFA Codes (DE)

A.1.1. <i>Primary crops</i>	A.1.1.1. <i>Cereals</i>	Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Mais
	A.1.1.2. <i>Roots, Tubers</i>	Kartoffeln
	A.1.1.3. <i>Sugar crops</i>	Zuckerrüben
	A.1.1.6. <i>Oil bearing crops</i>	Raps
	A.1.1.8. <i>Fruits</i>	Wein- und Obsternte
	A.1.1.10. <i>Other Crops</i>	andere Feldfrüchte, Nachanbau
A.1.2. <i>Crop residues (used)</i>	A.1.2.1. <i>Straw</i>	Stroh
	A.1.2.2. <i>Other crop residues</i>	Blätter von Zucker- und Futterrüben
A.1.3. <i>Fodder crops and grazed biomass</i>	A.1.3.1. <i>Fodder crops</i>	Silo- und Grünmais, Futterrüben, Klee
	A.1.3.2. <i>Grazed biomass</i>	Wiesen (inkl. Wiesenheu), Weide, Almweide, Brachweide, Stoppelweide, Wiesennachhut
A.1.4. <i>Wood</i>	A.1.4.1. <i>Timber (industrial roundwood)</i>	Industrieholz
	A.1.4.2. <i>Wood fuel and other extraction</i>	Brennholzanteil (ohne Recycling)

Bis zum Jahr 2005 entsprachen die Zahlen zur Obsternte in der landwirtschaftlichen Statistik jenen aus extensiv und intensiv bewirtschafteten Obstanlagen und ab 2006 nur noch jenen aus Intensivanlagen. Um die Erntezahlen zu korrigieren und die Datenreihe konsistent fortzuführen, wurde das Verhältnis der Gesamternte vom Jahr 2006 zu 2005 berechnet und die Erntezahlen ab 2006 mit dem daraus resultierenden Koeffizienten (3,2) extrapoliert. Die in Hektoliter [hl] gemessene Weinernte wurde mit dem aus den Vorjahren abgeleiteten Faktor 15 [t Trauben/hl Wien] in das Gewicht der geernteten Trauben umgerechnet.

Die landwirtschaftliche Statistik berichtete über die Strohernte (A.1.2.1. *Straw*). Andere genutzte Erntenebenprodukte (A.1.2.2. *Other crop residues*) resultierten aus Schätzungen auf Basis der Zucker- und Futterrübenenernte. Der Erntefaktor (0,542 [t/ha/a]) wurde aus dem Verhältnis des Zucker- und Futterrübenenertrags zur Ernte an Rübenblättern im Jahr 2010 abgeleitet.

Neben den Futterpflanzen fallen unter die Kategorie A.1.3. (*fodder crops and grazed biomass*) auch Grünfutter, Heu und Weidebiomasse von Wiesen und anderen Flächen, die in Tabelle 4 aufgelistet sind. Bis auf Gras und Heu von Wiesen, deren Erntedaten aus der Landwirtschaftsstatistik stammten, wurden die jeweiligen potenziellen Entnahmen aus Flächenangaben zur Bodennutzung (Statistik Austria 2014, 2016a) mit flächenspezifischen Faktoren zu Ertrag und Wassergehalt geschätzt.

Tabelle 4: Flächen mit grasartigem Futterpflanzenenertrag und Holz mit zugehörigen Erntefaktoren, Wassergehalt und Brennwert für Österreich

	Flächenspezifische Ertragsfaktoren (Frischgewicht) [t/ha/a]	Wassergehalt %	Brennwert bei Trockenmasse [MJ/kg]
Wiese	Dynamisch; 2,2 - 8,0 (1918-2015)	14	17,9
Weide	4,3 (ab 1995) (Trockenmasse); Davor dynamisch	14	17,9
Almen	0,55	14	17,9
Brachweide	0,22	14	17,9
Stoppelweide	0,15	14	17,9
Wiesennachhut aus Wiesen	0,29	14	17,9
Holz		25	19,5

Quellen: Krausmann 2016; Krausmann and Wiedenhofer 2012; Krausmann and Haberl 2002

Zur Fortführung der Datenreihe zur Holzentnahme wurde für die Jahre ab 2011 die Holzerntemenge aus den Holzeinschlagsnachweisen (HEN) des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW 2016) ergänzt. Wie aus den Holzbilanzen der Statistik Austria für verschiedene Jahre hervorging, unterschätzte der HEN die tatsächlich entnommene Holzmenge. Um diese Unterschätzung auszugleichen, wurde aus den Holzbilanzen ein Faktor (1,5) abgeleitet, mit dem die gesamte Erntemenge aus den HEN-Daten extrapoliert wurde; d.h., es wurde angenommen, dass die tatsächliche Holzernte um 50 % über den im HEN angegebenen Einschlagsmengen lag. Anschließend wurden die korrigierten Zahlen von Festmetern in Petajoule (PJ) und t umgerechnet und zwischen Bau- und Brennholz unterschieden. Der Brennholzanteil (41 %) vom Jahr 2000 wurde für die Folgejahre übernommen.

Daten zu Jagd und Fischerei wurden nicht miteinbezogen.

Für die Ergänzung der EFA-Datenreihen konnten für die Jahre 2011 bis 2015 aus dem Frischgewicht der Biomasse, anhand vom durchschnittlichen Wassergehalt und Brennwerten, die jeweilige Trockenmasse (Krausmann 2001a; Haberl 1995) und energetischen Flüsse in PJ berechnet werden. Als methodologische Basis für die Gegenüberstellung der MFA und EFA dienten die Arbeiten von Haberl (2001) und Haberl et al. (2004).

2.4.1.2 Metalle

Daten zum inländischen Roherzabbau und dessen länderspezifischen Metallgehalten stammen aus den Jahrgängen des MH (BMHV 1920ff), woraus Zeitreihen mit dynamischen Metallanteilen hervorgingen (siehe Tabelle 5).

Als wichtigste und mengenstärkste inländische Erzgewinnung konnte sich über den gesamten Untersuchungszeitraum der Abbau von Eisenerz (A.2.1. *Iron ores*) deutlich hervorheben. Neben den bereits in der Monarchie betriebenen Metallerzbergbauen wurden im 20. Jahrhundert einige Lagerstätten neu erschlossen und deren Abbau in die Statistik aufgenommen, wie zum Beispiel die Metallerze Bauxit, Antimon und Wolfram. Da die verschiedenen Lagerstätten in Österreich aber meist klein und international wenig kompetitiv waren, wurde der Abbau der meisten Erze im Untersuchungszeitraum wieder aufgegeben (BMHV 1920ff). Seit 1994 beschränkte sich der Abbau allein auf Eisen und Wolfram.

Tabelle 5: Metallgehalte der wichtigsten Erze Österreichs 1918-2015 in %

Metall	Metallgehalt
Eisen	30-36
Mangan	2-3
Kupfer	1-4
Blei	1-9
Zink	0,2-7
Bauxit	51-56
Antimon	2-12
Wolfram	0,4-2

Quelle: BMHV 1920ff

Tabelle 6 zeigt eine Auflistung der Abbauzeiträume aller in die MFA aufgenommen Metallerze nach MFA Codes. Einige Erze enthielten mehrere Metalle. Mehrmetallerze konnten im MH identifiziert und das gemeinsame Roherz mithilfe der dokumentierten Metallgehalte, wie von Krausmann et al. (2016) empfohlen, verhältnismäßig auf die Metalle aufgeteilt werden. Darunter fielen das Paar Eisen-Mangan sowie die Gruppen Blei-Zink-Molybdän und Kupfer-Silber-Quecksilber.

Tabelle 6: Metallerze im Montan-Handbuch mit Abbauzeiträumen nach MFA-Codes

MFA Code (DE)	Metalle (Abbauzeitraum)
A.2.1. <i>Iron ores</i>	Eisen (1918-2015) inkl. Eisenglimmer (ab 1928) und erzhaltige Farberden & Steine (1928-1955)
A.2.2.1. <i>Copper ores</i>	Kupfer (1918-1976)
A.2.2.3. <i>Lead ores</i>	Blei 1918-1993)
A.2.2.4. <i>Zinc ores</i>	Zink (1918-1993)
A.2.2.6. <i>Silver ores</i>	Silber (1928-1964)
A.2.2.7. <i>Bauxite and other aluminium ores</i>	Bauxit (1941-1964)
A.2.2.9. <i>Other metal ores</i>	Andere Metalle: Mangan (1918-1984), Quecksilber (1928-1964), Molybdän (1928-1964), Antimon (1928-1990), Wolfram (1957-2015)

Quelle: BMHV 1920ff

2.4.1.3 Nicht-metallische Mineralien

Im Untersuchungszeitraum stieg die Anzahl der dokumentierten Mineralien im MH (BMHV 1920ff) fortlaufend (siehe Tabelle 7).

Zur Entnahme von Mineralien für industrielle Nutzungen waren in vielen Fällen langzeitliche Datenreihen vorhanden. Gründe dafür sind zum Beispiel ein höheres wirtschaftliches Interesse und das Verhältnis zwischen Preis und Menge (Krausmann et al 2016). Was Mineralien für Bauzwecke (v. a. Sand, Schotter, Steine) betrifft, nahmen die Aufzeichnungen hingegen erst seit den 1970ern langsam und fragmentiert zu. Die Unterteilung in Bau- und Industriemineralien ist keine eindeutige, da einige Stoffe für beide Zwecke Verwendung finden, wie zum Beispiel Ton, Sand, Gips oder Kalk. Häufig stellen die dokumentierten Daten daher auch Untererfassungen dar, da nur die Extraktion für bestimmte Nutzungen erfasst wurde (siehe z. B. BGBl. Nr. 355./1990 1990).

Tabelle 7: Überblick über die chronologische Aufnahme von nicht-metallischen Mineralien im Montan-Handbuch mit MFA-Codes

Jahr	MFA Code (DE)	Nicht-metallische Mineralien
1918	A.3.6. <i>Chemical and fertilizer minerals</i>	Schwefel & Schwerspat;
	A.3.7. <i>Salt</i>	Salz
	A.3.8. <i>Other mining and quarrying products n.e.c.</i>	Ölschiefer, Graphit, Talk & Magnesit
1937	A.3.5. <i>Clays and kaolin</i>	Ton & Kaolin
	A.3.8.	Quarz, Kieselgur, Glimmer, Feldspat, Trass, Farberden
1949	A.3.2. <i>Limestone, gypsum, chalk, and dolomite</i>	Gips & Anhydrit
1960	A.3.8.	Asbest
1979	A.3.2.	Dolomit
1991	A.3.1. <i>Ornamental or building stone</i>	Diabas
	A.3.2.	Kalkstein
	A.3.5.	Mergel
2002	A.3.1.	diverse Neuzugänge; Neue Unterteilung in Fest- und Lockergesteine
	A.3.4. <i>Gravel and sand</i>	Sand und Schotter

Quelle: BMHV 1920ff

Die Kategorien „Mineralische Chemikalien und Dünger“ (A.3.6. *Chemical and fertilizer minerals*) und „Andere Bergbau- und Steinbruchprodukte“ (A.3.8. *Other mining and quarrying products n.e.c.*) fassen mehrere Datenreihen aus dem MH zusammen (siehe Tabelle 7). Die Salzsole (A.3.7. *Salt*) war von Volumeinheiten (Normkubikmeter m³n) ins entsprechende Rohsalzgewicht in t umzurechnen, wofür ein Rohsalzgehalt von 30-32 % (1928-1949) (BMHV 1920ff) berichtet und auch für die folgenden Jahre angenommen wurde.

Für Bautätigkeiten wurden große Mengen von Mineralien genutzt, die auch in die Materialbestände flossen, aber in den Statistiken nicht entsprechend aufschienen. Darum wurde der Materialverbrauch zur Produktion von Beton, Asphalt und Ziegel sowie für Untergründe und Tragschichten von Gebäuden und Straßen und der Abbau von Natursteinen geschätzt.

Natursteine

Natursteine (A.3.1. *Ornamental or building stones*) umfassen verschiedene Steinarten. Die Zahlen der Jahre 1965-1990 gehen auf Daten zu „Ausgewählten Erzeugnissen des Großgewerbes“ aus dem SHB (Bundesamt für Statistik 1920ff) zurück (z. B. Bruchsteine, Naturwerksteine oder Brechprodukte). Da neben dem Großgewerbe auch andere Akteure Steine abbauten, handelt es sich hierbei um eine Untererfassung, die aus Mangel an weiteren Informationen akzeptiert wurde. Ab 1991 nahm das MH (BMHV 1920ff) zunehmend verschiedene Gesteine (z. B.: Diabas, Basalt, Serpentin, Granit, Sandstein,...) auf. Für den Zeitraum 1918-1964 wurde die Extraktion pro Kopf von 1965 mit den Bevölkerungszahlen aus dem Maddison Projekt (Bolt et al. 2018) extrapoliert.

Kalk, Ton und Gips zur Zementproduktion u. a.

Die Hauptbestandteile von Zement sind Kalk, Ton und Gips, denen je nach Zementart weitere Bestandteile beigemischt werden (Nisbet 1996; Miatto et al. 2016). In Österreich wird in den Zementwerken, je nach Standort, anstelle oder gemeinsam mit Ton auch Mergel zur

Herstellung verwendet (Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2017; BGBl. Nr. 355./1990 1990).

Erst mit der Berggesetznovelle 1990 (BGBl. Nr. 355./1990 1990) wurden Kalkstein (für Branntkalk, Zement und metallurgische Prozesse) und Mergel (zur Zementherstellung) in das MH aufgenommen und die Dokumentation von Ton für weitere Verwendungszwecke (z. B. für Zemente und Ziegel) erweitert. Für Gips gab es Zahlen ab 1949.

Vor allem für die fehlenden Zeiträume boten sich Schätzungen, basierend auf den Produktionszahlen von Zement, an. Das Cembureau (1998, 2011, 2017) hat Produktions- und Verbrauchszahlen für Österreich von 1920 bis 2014 veröffentlicht, unterbrochen allein für den Zeitraum um den Zweiten Weltkrieg 1939-1946. Die Zahlen daraus waren meist deckungsgleich mit den Daten aus dem SHB. Die Produktionsmenge von 2015 stammt aus dem Emissionsbericht der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (kurz VÖZ) (Mauschitz 2016).

Für die Schätzung des Rohmaterialverbrauchs bei der Zementherstellung wurden drei Empfehlungen verglichen, die in Tabelle 8 veranschaulicht werden. Nisbet (1996) zufolge wird, um eine Einheit Zement herzustellen, 1,22 Einheiten Kalk und 0,30 Einheiten Ton benötigt, die durch Entsäuerung und Sinterung um 0,57 Einheiten reduziert werden und so 0,95 Klinker ergeben, dem anschließend 0,05 Einheiten Gips beigemischt werden. Miatto et al. (2016) bauen darauf auf und bieten für das Verhältnis zwischen verwendeten Rohmaterialien und dem fertigen Zement (*cement cooked*; Cc) einen Verhältniswert von 1,57 an. Im Guide von Krausmann et al. (2016) werden Schätzungen von 1,19 t Kalkstein und ein Tonanteil von 20 % je produzierter Tonne Zement vorgeschlagen.

Die Entscheidung für die Schätzungen in dieser Arbeit fiel auf die Koeffizienten zur Berechnung des Rohmaterialverbrauchs (*cement raw*; Cr) von Miatto et al. (2016), da sich viele aktuelle Studien auf diesen Artikel beziehen (Krausmann et al. 2018, 2020; Wiedenhofer et al. 2018). Außerdem fehlt eine Empfehlung für den Gipsanteil im Guide (Krausmann et al. 2016) und man erkennt, dass der darin angegebene Faktor für Ton eher dem verarbeiteten als dem rohen Tonanteil aus Miatto et al. (2016) entspricht.

Tabelle 8: Überblick der Koeffizienten zur Schätzung der Rohstoffe zur Zementherstellung aus verschiedenen Quellen

Bestandteile [t]	Nisbet (1996)	Miatto et al. (2016)		Krausmann et al. (2016)
		Zement verarbeitet (Cc)	Zement roh (Cr) = Cc*1,57	
	Zement roh			Zement
Kalk	1,22	0,77	1,21	1,19
Ton	0,30	0,20	0,31	0,20
Verarbeitung	<u>-0,57</u> = 0,95 Klinker			
Gips	0,05	0,03	0,05	

Die Gruppe A.3.2. (*Limestone, gypsum, chalk, and dolomite*) umfasst Kalkstein, Gips und Dolomit. Aufgrund der weiteren Einsatzgebiete lagen die Schätzungen auf Basis der Zementproduktion im Vergleich deutlich unter den Angaben aus dem MH: 17-40 % Kalk (1991-2015) und 18-51 % Gips (1949-2015). Darum wurden die geschätzten Zahlen ausschließlich für die fehlenden Jahre herangezogen und basierend darauf der zusätzliche Rohstoffverbrauch für andere Verwendungen extrapoliert. Dazu wurde das Verhältnis von

1991 (40 %) für Kalkstein und 1949 (49 %) für Gips bis 1920 zur Extrapolation konstant gehalten.

Der geschätzte Tongewinnung für die Zementproduktion wurde mit der Hochschätzung für die Ziegelproduktion und den dokumentierten Tonarten summiert (A.3.5. *Clays and kaolin*), auf die im Anschluss eingegangen wird.

Ton für die Ziegelproduktion

Das MH dokumentierte die Extraktion von Ton seit 1937 nur für spezielle, industrielle Verwendungszwecke und war dadurch bis 1990 deutlich untererfasst. Ab der Berggesetznovelle 1991 verzeichnete die Statistik auch den Abbau von Ton für die Produktion von Ziegel und Zement. Die aufgezeichneten Tonmengen stiegen von 1990 auf 1991 um das 17-fache. Wenn man die Gewinnung von Mergel ebenfalls berücksichtigt, deren Aufzeichnungen ebenfalls 1991 begannen, gab es sogar eine 29-fache Zunahme. Letzterer ist in Österreich, wie bereits erwähnt, ein Rohmaterial für die Zementherstellung. Er wurde, gemeinsam mit den Daten zu Ton und Kaolin, dem MFA-Code A.3.5. zugeordnet.

Ziegel werden in Österreich aus tonhaltigem Lehm gebrannt, wodurch sich der Wassergehalt (26 %) ändert und quasi ein künstlicher Stein entsteht. Erste Zahlen zur nationalen Ziegelproduktion gab es ab 1937 und waren ab 1947 jährlich vorhanden. Tabelle 9 zeigt Art, Einheit und Quellen der jährlichen Ziegelproduktionserzeugnisse sowie die jeweiligen Faktoren (Krausmann et al. 2016) zur Berechnung des Tonverbrauchs in t.

Tabelle 9: Faktoren zur Schätzung des Tonverbrauchs von Ziegelerzeugnissen und Quellen der Produktionszahlen

Ziegelerzeugnisse	Einheit	Tonnen	Quellen
Mauerziegel MNU (Stück) (= Mauerziegel in Normalformat (25 x 12 x 6,5 cm=1950 cm ³))	1000 Stück	3,4	1937-1990: Statistisches Handbuch für die Republik Österreich (Bundesamt für Statistik 1920ff) 1991-1994: Industrie- und Gewerbestatistik (Österreichisches Statistisches Zentralamt 1992ff) 1995-2015: Produktionsstatistiken (= PRODCOM) (Eurostat 2017)
Dachziegel DFU (Stück) (Dachziegel von denen 15 Stück 1 m ² Dachfläche decken)	1000 Stück	2,73	
Deckenhohlziegel	1 m ²	0,22	
23321110 - Non-refractory clay building bricks (in m ³)	1 m ³	2,2	
23321130 - Non-refractory clay flooring blocks, support or filler tiles and the like (in kg)	1 t	1,05	

Quelle: Krausmann et al. 2016

Die Erste Republik (1918-1938) war von einer regen Bautätigkeit geprägt, wie die heute noch bestehenden Großprojekte des sozialen Wiener Gemeindebaus zeigen (Stadt Wien - Wiener Wohnen 2017). Ziegel stellten einen der Hauptbaustoffe dieser Bauten dar. Vor 1937 waren keine Daten zur nationalen Ziegelproduktion vorzufinden. Aus diesem Grund wurde anhand des Pro-Kopf-Verbrauchs von 1937 und den Bevölkerungszahlen aus dem Maddison Projekt (Bolt et al. 2018) der Verbrauch für 1918-1937 extrapoliert.

Die Summen der Gruppe A.3.5. ergeben sich schlussendlich aus den Hochschätzungen für die Ziegel- und Zementproduktion gemeinsam mit den im MH (BMHV 1920ff) gesammelten Daten zur Ton- und Kaolingewinnung. Von 1991 bis 1994 waren die Daten aus der Statistik für Ton (inklusive Ton und Mergel für Bautätigkeiten) mit den Schätzungen (Ton für Zement und

Ziegel) vergleichbar und in der Datenreihe angeführt. Mit dem Wechsel der Quelle zur Ziegelproduktion 1995 auf die PRODCOM (Statistiken über die Herstellung von Industrieerzeugnissen, *PROduction COMMunautaire*) (Eurostat 2017) lagen die Schätzungen erneut über der Statistik (20-50 %).

Sand und Schotter zur Herstellung von Beton und Asphalt und in Tragschichten

In den Statistiken waren Zahlen zur Entnahme von Sand und Schotter, auch Aggregat genannt, nur sehr fragmentiert vorzufinden (Österreichisches Statistisches Zentralamt 1992ff). Das MH inkludierte ab 2002 Sand und Schotter (BMHV 1920ff), aber deutlich unter den durchgeführten Schätzungen. Um den Verbrauchstrend über das Jahrhundert möglichst konsistent darzustellen, wurde auf eine Einbeziehung der statistischen Zahlen verzichtet und stattdessen Schätzungen für drei ausgewählte Einsatzgebiete von Sand und Schotter durchgeführt. Auf Basis anderer Studien (Krausmann et al. 2017c; Wiedenhofer et al. 2018; Dammerer 2020) konzentrierte sich diese Arbeit auf den Einsatz in Beton, Asphalt und Tragschichten von Gebäuden und Straßen. Die Endsummen für „Sand und Schotter“ (A.3.4 *Gravel and sand*) ergeben sich aus den Ergebnissen der drei Schätzungen.

- **Beton**

Beton besteht hauptsächlich aus Wasser, Zement, Sand und Schotter. Anhand des Zementverbrauchs (1920-2014: (Cembureau 1998, 2011, 2017), 2015: VÖZ (Mauschitz 2016)) lässt sich der Bedarf an Sand und Schotter ermitteln. Dazu wurde der österreichische Zementkonsum mit dem Koeffizienten 6,09 multipliziert und angenommen, dass Beton aus etwa 86 % Aggregat und 14 % Zement besteht (Krausmann et al. 2016).

- **Asphalt**

Der Baustoff Asphalt entsteht bei der Vermischung von 95 % mineralischen Aggregaten mit 5 % heißem Bitumen – einem petrochemischen Produkt als Bindemittel. Krausmann et al. (2016) nehmen ein Verhältnis von 20:1 an und empfehlen eine Hochschätzung für Sand und Schotter in Straßen basierend auf dem inländischen Bitumenverbrauch. Dieses Verhältnis wurde übernommen mit der zuzüglichen Annahme, dass nur 85 % des Bitumenverbrauchs für den Straßenbau verwendet wird (Pyshyev et al. 2016). Die restlichen 15 % für andere Anwendungen (z. B. zur Wasserisolation oder Bedachung) wurden für die Schätzungen ausgeschlossen. Die Ergebnisse aus dieser Hochrechnung passen gut mit den Produktionszahlen von heißem und warmen Mischasphalt von 2008 bis 2015 zusammen (Larsen and Epa 2016).

Die Zahlen zum Bitumenkonsum stammen für 1960-2010 aus der Datenbank der IEA (IEA 2020) und für die Folgejahre aus Berichten des Fachverbands der Mineralölindustrie Österreichs (FVMI 2015, 2016, 2014, 2013, 2011). Für die Jahre 1955 bis 1959 wurden Produktionszahlen aus dem SHB (Bundesamt für Statistik 1920ff) herangezogen und Importe hochgerechnet.

Gussasphalt kam bereits in der Monarchie zum Einsatz (Zirkler 2001). Allerdings ist zu dieser Zeit vom Einsatz des günstigen und reichlich vorhandenen Steinkohlenteeres und nicht von Bitumen, dem Nebenprodukt aus der Erdölgewinnung, auszugehen. Nach dem Ersten Weltkrieg stagnierte der Straßenbau und gesundheitliche Bedenken gegen Teer sowie die zunehmende Rohöldestillation ab den 1930ern machten Bitumen als Rohstoff attraktiver (Zirkler 2001).

Die Unsicherheit (Unterschätzung) der Hochschätzungen für Sand und Schotter im Straßenbau basierend auf dem Bitumenverbrauch wird höher, je weiter man in die Vergangenheit geht. Außerdem ist von einem anderen Straßenaufbau als heute auszugehen, der durch diese

Methode nicht erfasst wird, wie z. B. Makadamstraßen oder Pflasterungen. Aufgrund der schlechten Datenlage wurde mit dem Pro-Kopf-Verbrauch von 1955 und den Bevölkerungszahlen aus dem Maddison Projekt (Bolt et al. 2018) der Aggregatsverbrauch für Straßen für 1918-1954 extrapoliert.

- **Tragschichten und Unterbau**

Die meisten MFAs erfassten bisher nicht den Verbrauch von Sand und Schotter in Tragschichten von Gebäuden und dem Unterbau von Straßen. Dennoch stellen sie für die langlebigen Materialbestände einen gewichtigen Inputfluss dar, weshalb der zusätzlich notwendige Aggregatsverbrauch – aufbauend auf den Verbrauch von Ziegel, Beton und Asphalt – geschätzt wurde. Für die Berechnung des Unterbaus von Beton- und Ziegelgebäuden wurden konstante Multiplikatoren von Krausmann et al. (2017b SI) verwendet (siehe Tabelle 10). Damit wurde angenommen, dass durchschnittlich pro t Beton 0,07 t Aggregat und je t gebrannter Ziegel 0,045 t Sand und Schotter verbaut werden. Der Betonverbrauch wurde nicht weiter differenziert und allein der Verwendung in Gebäuden zugeordnet.

Tabelle 10: Überblick der Koeffizienten zur Berechnung des Sand- und Schotterverbrauchs aus dem Verbrauch von Beton, Ziegel und Asphalt

Pro Tonne:	Tonnen Sand und Schotter für Tragschicht
Beton	0,07
Ziegel	0,045
Asphalt	5 – 2,56 (zeitabhängig)

Quelle: Krausmann et al. 2017c

Zum Extrapolieren des Aggregatsverbrauchs im Unterbau von Asphaltstraßen wurde der dynamische, zeitabhängige Koeffizient von Krausmann et al. (2017b SI) angewandt. Dieser berücksichtigt, dass Asphalt im 20. Jahrhundert zunehmend auch zur Sanierung eingesetzt wurde. Daraus erfolgte die Annahme, dass bis 1940 der Bedarf an Sand und Schotter konstant 100 t pro t Asphalt ausmachte, von 1940-1988 sukzessive auf 50 t sank und seit 1985 auf diesem Niveau verharrte (Krausmann et al. 2017c). Das Straßennetz hat sich von 27.159 km (1921) (Bundesamt für Statistik 1920ff) auf eine Länge von 124.588 km (2015) mehr als vervierfacht und wächst nach wie vor (vergleiche Tabelle 11) (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2020)

Tabelle 11: Länge Straßennetz Österreich in km

Jahr	Bundesstraßen in km (Autobahnen + Schnellstraßen)	Straßennetz insgesamt in km
1921	-	27159
1927	-	34203
1938	Baubeginn Autobahn	-
1960	139	-
1970	439	-
1980	968	-
1990	1685	-
2000	1934	-
2010	2145	110206
2015	2192	124588

Quellen: Bundesamt für Statistik 1920ff; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2020

Es ist üblich, den Bedarf an Aggregat für Tragschichten zum Teil auch aus wiederverwerteten Baurestmassen zu substituieren. In dieser Arbeit wurde jedoch nicht zwischen primären und sekundären Rohstoffen unterschieden, weshalb die durchgeführten Schätzungen eine Überschätzung des primären Verbrauchs darstellen. Ein genaueres Resultat wäre beispielsweise durch eine Modellierung der rückläufigen Bestände wie bei Krausmann et al. (2017b) zu erreichen.

2.4.1.4 Fossile Energieträger

Für die DE fossiler Energieträger wurden hauptsächlich Daten aus dem MH herangezogen und mit Daten der IEA (IEA 2020) verglichen und ergänzt.

Für Braunkohle (A.4.1. *Brown coal*) und Steinkohle (A.4.2. *Hard coal*) gab es bis zur Einstellung ihrer Förderung durchgehende Datenreihen. Der Abbau von Steinkohle wurde 1967 Großteils eingestellt. Geringe Fördermengen wurden nochmals von 1990 bis 1995 dokumentiert. Die Extraktion von Braunkohle endete 2006. Die Gewinnung von Erdöl (A.4.3. *Petroleum (including natural gas liquids)*) und Erdgas (A.4.4. *Natural Gas*) ist seit 1922 gesetzlich geregelt (BGBl 446/1922 1922). Das MH erfasste die Fördermengen ab den 1930ern.

Die im MH in 1000m³ ⁸ angegebene Erdgasförderung wurde mit dem Faktor 0,76 in t umgewandelt. Die errechneten Werte lagen aufgrund unterschiedlicher Faktoren zur Umrechnung unter den Produktionsangaben der IEA (ca. 5 %).

2.4.1.5 Außenhandel

Im Unterschied zu den Inlandsentnahmen waren Handelsgüter mit unterschiedlichen Verarbeitungsstufen zu erfassen. Das SHB wies ab 1920 Daten zum Außenhandel auf (Bundesamt für Statistik 1920ff). Durch den Anschluss an das Deutsche Reich und den Zweiten Weltkrieg gibt es eine Datenlücke für die Jahre 1938-1946. 1947 waren wenige, unvollständige Daten vorhanden. Von 1948 bis 1950 wurden neben der kommerziellen Einfuhr auch „*direct aid*“-Einfuhren im Zuge des „*European Recovery Program*“ (ERP)⁹ gesondert ausgewiesen und addiert. Von 1951-1955 wurde die Gesamteinfuhr inklusive ERP aufgelistet. Ab 1956 verwendete die österreichische Statistik die internationalen UN-Codes. Diese entsprechen weitgehend den „*SITC rev.1-Codes*“ der UN-Handelsdatenbank Comtrade (UN Statistics Division 2017), woraus die Daten ab 1964 stammen. Die Datenbank führt meist sowohl das physische Gewicht (kg; 1000t) als auch den monetären Handelswert (US\$) an. Dadurch konnten vereinzelte Lücken in den Gewichtsdatenreihen (z. B. bei einzelnen Jahren unter folgenden Code-Nummern: Import: 281, 221, 283, 673, 941, 689; Export: 265, 275, 283, 341, 514, 665, 689, 221;) anhand der vorhandenen Geldwerte linear interpoliert werden. Die Berechnung basierte auf dem Verhältnis zwischen kg/US\$ der angrenzenden Jahre.

Da die Handelszahlen der Kategorie „341 *Gas, natural and manufactured*“ ab 1995 unregelmäßig waren, wurden sie mit Daten weiterer Quellen (Eurostat 2020c; IEA 2020) verglichen. In Folge wurden für mehrere Jahre Daten der Eurostat (2020) für den Import (1997-2002 und 2006) sowie den Export (1998 und 2011-2013) übernommen.

⁸ „Bei der Mengeneinheit m³ handelt es sich um Normkubikmeter. Ein Normkubikmeter (Abkürzung: Nm³ oder vereinfacht oft auch Nm3) ist die Menge, die einem Kubikmeter Gas bei einem Druck von 1,01325 bar, einer Luftfeuchtigkeit von 0% (trockenes Gas) und einer Temperatur von 0° C (DIN 1343) bzw. 15° C (ISO 2533) entspricht (im Falle Österreichs gelten die 0° C).“ (BMWFW 2016)

⁹ Auch bekannt unter dem Namen Marshall-Plan, benannt nach dem amerikanischen Außenminister George C. Marshall, der als Initiator gilt. Dabei handelte es sich um ein Hilfsprogramm der USA für 16 europäische Länder von 1948-1952 mit dem Ziel, die europäischen Industrie- und Geschäftspraktiken zu modernisieren, Handelsbeschränkungen abzubauen und Kommunismus und Nationalismen zurückzudrängen (Ritschl 2008). Daneben konnte auch die amerikanische Wirtschaft durch den Export profitieren.

2.4.2 Berechnungen zur Erweiterung der MFA

Der Materialverbrauch (DMC) quantifiziert die Menge nach grundlegenden Materialeigenschaften, er gibt aber keinen Aufschluss über die Verwendung der Materialien. In dieser Arbeit wurde der DMC in fünf Nutzungsarten bzw. Typen systeminterner Materialflüsse unterteilt. Des Weiteren wurden 14 Materialbestandsinputs identifiziert, um die Masse der jährlichen Zuflüsse in die Materialbestände abzuschätzen. Die Berechnungen basierten auf weitere Statistiken und Literaturrecherchen. Einige Studien dienten als Leitfaden (Krausmann et al. 2017c; Wiedenhofer et al. 2018; Dammerer 2020). Erst folgt eine Darstellung der Unterteilung des DMCs nach Art der Nutzung. Im zweiten Teil werden die ausgewählten bestandsbildenden Materialien und damit zusammenhängende Verarbeitungsverluste charakterisiert.

2.4.2.1 Nutzungsarten des Materialverbrauchs

Als Ausgangspunkt für die Zuordnung der fünf Nutzungsarten diente der Materialverbrauch aus der MFA. Die Definition der verschiedenen Nutzungen und Verluste orientierte sich an vorhergehenden Studien (Wiedenhofer et al. 2018; Krausmann et al. 2018, 2017c; Haas et al. 2015). Kapitel 2.2.3 beschreibt ausführlich die verschiedenen Nutzungsarten nach Wiedenhofer et al. (2018). Im Unterschied dazu fasst die hier gewählte Kategorie „andere Nutzungen und Verluste“ kurzlebige Produkte, dissipative Nutzungen und andere Verluste und Abfälle zusammen.

Die Materialkategorien aus der MFA wurden folgenden Nutzungsarten zugeordnet:

- Nahrungs- und Futtermittel (*food and feed, NF*),
- technische Energie (*technical energy, TE*),
- bestandsbildende Materialinputs (*stock-building material inputs, BB*),
- andere Nutzungen und Verluste (*other uses and losses, AN*),
- Verarbeitungsverluste (*processing losses, VV*)

Nahrungs- und Futtermittel und technische Energie bilden den energetisch genutzten Anteil des Materialverbrauchs ab. Bestandsbildende Materialien und andere Nutzungen und Verluste ergeben die materielle Nutzung. Als Verarbeitungsverluste wurden hier ausschließlich Verluste und Abfälle aus ersten Prozessschritten der Produktion von bestandsbildenden Materialien definiert. Darunter fielen zum Beispiel CO₂ aus der Zementherstellung oder Abfallgestein aus der Metallgewinnung (siehe Kapitel 2.4.2.2). Weitere in der Herstellung oder Konstruktion anfallende Verluste wurden nicht berücksichtigt. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die analysierten Materialkategorien und ihre jeweilige Verteilung auf die Nutzungsarten. Es handelt sich bei der Zuordnung um eine Simplifizierung. Für präzisere Aussagen über die Nutzungsarten der jeweiligen Gruppen in der Analyseperiode wären detailliertere Daten und Informationen erforderlich.

Tabelle 12: Zuteilung des DMC zu Nutzungsarten nach MFA Materialkategorien. Angaben in % des DMC der MFA-Kategorie oder Zusammenfassung des Schätzverfahrens.

MFA Code DMC	Bezeichnung	Nahrungs- & Futtermittel	Technische Energie	Verarbeitungsverluste (VV)	Bestands-bildende Material-inputs (BB)	Andere Nutzungen und Verluste (AN)
1.1.	Primary crops	90	-	-	Input: Textilien	10 % 1.1. abzgl. BB (= ø 10 %)
1.2.	Crop residues	50	-	-	-	50
1.3.	Fodder crops	100	-	-	-	-
1.4.	1.4.1. Timber	-	-	Verluste: Massivholz; Papier und Karton	Inputs: Massivholz; Papier und Karton	1.4.1. abzgl. BB & VV (=ø 20 %)
	1.4.2. Wood fuel	-	100	-	-	-
1.5.	Fish capture, ...	100	-	-	-	-
1.6.	Hunting and gathering	100	-	-	-	-
1.7.	Live animals	100	-	-	-	-
1.8.	Products mainly from biomass	Zuordnung der Produkte p.J.	-	-	-	Zuordnung der Produkte pro Jahr (= ø 71 %)
2.1.	Iron ores	-	-	Verluste: Eisen/Stahl	Input: Eisen/Stahl	-
2.2.1.	Copper	-	-	Verluste: Kupfer	Input: Kupfer	-
2.2.9.	Bauxit	-	-	Verluste: Aluminium	Input: Aluminium	-
2.2.9.	Other metals	-	-	Verluste: Andere Metalle	Input: andere Metalle	-
2.3.	Products mainly from metals	-	-	-	-	100
3.1.	Ornamental or building stone	-	-	-	Inputs: Sand, Schotter und Steine	-
3.2.	Limestone, gypsum, chalk, and dolomite	-	-	Verluste: Beton/ Zement	Inputs: Beton, Hohl- und Flachglas	3.2. abzgl. BB & VV (ø 63 %)
3.4.	Gravel and sand	-	-	-	Inputs: Sand, Schotter und Steine; Beton; Asphalt	-
3.5.	Clays and kaolin	-	-	Verluste: Ziegel	Inputs: Ziegel, (Anteil Beton bei 3.2.)	3.5. abzgl. BB & VV (= ø 33 %)
3.6.	Chemical and fertilizer minerals	-	-	-	-	100
3.7.	Salt	-	-	-	-	100
3.8.	Other mining and quarrying products n.e.c.	-	-	Verluste: Hohl- und Flachglas	Inputs: Hoh- und Flachglas	3.10. abzgl. BB & VV (= ø 71 %)
3.10	Products mainly from non-metallic minerals	-	-	-	-	100
4.1.	Brown coal	-	100	-	-	-
4.2.	Hard coal	-	100	-	-	-
4.3.	Petroleum	-	4.3. abzgl. BB und AN	-	Inputs: Plastik; Asphalt	Plastikverbrauch laut FCIO (2017) abzgl. BB Plastik (= ø 5 %)
4.4.	Natural gas	-	100	-	-	-
4.5.	Peat	-	100	-	-	-
4.6.	Products mainly from fossil energy carriers	-	-	-	-	100
5.	Other products	-	-	-	-	100
6.	Waste imported	-	-	-	-	100

Einige Materialgruppen wurden einheitlich einer Form der Nutzung zugeordnet. Diese Fälle sind mit der Angabe 100 % in der Tabelle gekennzeichnet, wie beispielsweise die Futterernten (1.3. *Fodder crops*) zu den Nahrungs- und Futtermitteln oder Braunkohle (4.1. *Brown coal*) zur technischen Energie.

Für primäre Erntekulturen (1.1. *Primary crops*) und Erntenebenprodukte (1.2. *Crop residues*) wurden aus der Studie von Haas et al. (2015) die Prozentsätze der Länder EU27 im Jahr 2005 übernommen und über den Untersuchungszeitraum konstant gehalten. 90 % der *Primary crops* wurden als Nahrungs- und Futtermittel definiert (Haas et al. 2015). Der als materielle Nutzung definierte Anteil von 10 % (z. B. biogene Rohstoffe für die chemische Industrie) fiel den anderen Nutzungen und Verlusten zu. Ein gewisser Anteil zur technischen Energienutzung (Biotreibstoffe) wäre anzunehmen, aber wurde in dieser Analyse vernachlässigt. Die Kategorie Textilien umfasst pflanzliche und tierische Fasern sowie Gewebe und vergleichbare Produkte. Sie wurde als Materialbestandsinput definiert und vom materiell genutzten Anteil der 1.1. *Primary crops* subtrahiert. Synthetische Fasern und Produkte daraus (wie z. B. Polyester) wurden aufgrund unzureichender Daten nicht als Textilien berücksichtigt.

Bei (Fertig-)Produkten aus dem Außenhandel (1.8. *Products mainly from biomass*, 4.6. *Products mainly from fossil energy carriers* und 5. *Other products*) wurde das niedrigere Aggregationslevel der MFA betrachtet. Die Gruppen 4.6. (z. B. Kunststoffe, organische Chemikalien, synthetische Fasern) und 5. (z. B. chemische Materialien und Produkte, Farben, Möbel) wurden als andere Nutzungen kategorisiert. Der Nettoimporte der Produkte aus Biomasse (1.8.) wurden den Kategorien Nahrungs- und Futtermitteln (z. B. Getränke oder Süßwaren) und anderen Nutzungen (z. B. Papier- oder Gummiwaren) pro Jahr zugeordnet.

Daten zu den bestandsbildenden Materialinputs und den zugehörigen Verarbeitungsverlusten stammen aus eigenen Berechnungen der Inputs in die Materialbestände, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird. Die geschätzten Materialbestandsinputs und Verarbeitungsverluste wurden dem entsprechenden DMC der jeweiligen MFA-Kategorien zugeordnet und davon subtrahiert. Falls daraus Differenzen hervorgingen (= DMC – bestandsbildende Materialinputs – Verarbeitungsverluste) wurden diese der Nutzungsgruppe „andere Nutzungen und Verluste“ zugeordnet. Dies war bei mehreren MFA-Kategorien der Fall. Diese Restgrößen entsprachen im Untersuchungszeitraum durchschnittlich 20 % bei 1.4.1 *Timber*, 63 % bei 3.2 *Limestone gypsum, chalk, and dolomite*, 33 % bei 3.5 *Clays and kaolin* sowie 71 % bei 3.8 *Other mining and quarrying products n.e.c.*

Erdöl (4.3. *Petroleum*) war bei der Zuordnung ein Sonderfall. Einerseits gab es einen bestandsbildenden Anteil beim Verbrauch, der sich aus Bitumen für die Asphaltherstellung und langlebigen Plastikprodukten zusammensetzte. Andererseits waren Zahlen zum Verbrauch verarbeiteter Kunststoffe in Österreich vorhanden (FCIO 2017), die nach Abzug des bestandsbildenden Anteils den anderen Nutzungen zugerechnet wurden. Dies wurde als die materielle Nutzung von Erdöl interpretiert, sodass der verbleibende Anteil des Erdölverbrauchs als technischer Energieverbrauch gedeutet wurde.

Im nächsten Kapitel werden die Schätzverfahren der Materialbestandsinputs und Verarbeitungsverluste beschrieben.

2.4.2.2 Inputs in die Materialbestände

In dieser Arbeit wurden die österreichischen Materialbestandsinputs (*material inputs to stocks*) anhand von 14 Materialbestandstypen geschätzt und den vier Hauptmaterialgruppen zugeteilt. Zu den Materialbestandstypen zählen Massivholzprodukte, Papier und Karton, Textilien, Stahl, Kupfer, Aluminium, andere Metalle, Beton, Ziegel, Sand und Schotter in Tragschichten und Steine, Hohlglas, Flachglas, Plastik und Asphalt. Sie machen mehr als 98 % der gesamten Materialbestände aus (Krausmann et al. 2017c).

Es gab dabei unterschiedliche Vorgehensweisen, um die Materialbestandsinputs und die ersten Verarbeitungsverluste abzuschätzen, wie auch Kombinationen der Zugänge für unterschiedliche Perioden. Zum einen wurden die DMC Daten der MFA als Ausgangsbasis gewählt und Verlustfaktoren davon abgezogen (z. B. bei Metallen und Ziegeln). Zum anderen gab es aus Statistiken Daten zu Produktion, Handel oder Verbrauch von Materialbestandstypen, auf die ebenfalls Verlustfaktoren aus der Literatur für Hochrechnungen angewandt wurden (z. B. Massivholz, Papier, Hohl- und Flachglas). Zudem gab es noch Fälle, für die aufgrund ihrer Materialeigenschaften (Sand, Schotter und Steine) oder aus Datenmangel (Plastik und Textilien) keine Verarbeitungsverluste angenommen wurden.

In Tabelle 13 sind die Materialbestandsinputs, die als bestandsbildender Anteil des DMCs gelten, mit den zugehörigen MFA-Codes der bestandsbildenden primären Rohmaterialien (*stock-building materials*) und identifizierbare erste Verarbeitungsverluste (*processing losses*) abgebildet.

Verarbeitungsverluste umfassen diverse identifizierbare Verluste und Abfälle aus ersten Verarbeitungsschritten der Rohmaterialien (zum Beispiel das taube Gestein aus der Metallgewinnung; Rinde und Sägeverluste aus der Rundholzbearbeitung; CO₂ aus der Kalkbrennerei; Wasserdampf aus Ton bei der Brennung von Ziegeln). Sie stellen somit die Differenz zwischen den bestandsbildenden primären Rohmaterialien (z. B. Metallerze, Kalkstein, Rundholz) und den dann in weitere Verarbeitungsprozesse gehende Materialien (Stahl, Zement, Sägeholz und Papier) dar. Sie wurden je nach Ausgangspunkt der Berechnungen – dem Rohmaterialienverbrauch aus der MFA oder dem Verbrauch laut Produktions- und Handelsstatistiken – abgezogen oder aufgeschlagen. Dazu wurden vor allem konstante Verlustfaktoren aus der Literatur übernommen und bei Metallen teilweise Angaben zum Metallgehalt aus den Statistiken verwendet. Weitere Verluste in der Herstellung und Anwendung (*manufacturing and construction losses*) (siehe Abbildung 2) blieben in den Schätzungen ausgeschlossen.

Es ist wichtig hier festzuhalten, dass diese Analyse die bestandsbildenden Anteile an den Materialverbrauchsflüssen überschätzt. Dies ist aus zweierlei einander ergänzenden Gründen der Fall. Erstens unterschieden die verwendeten Quellen meist nicht zwischen primären und sekundären Materialien und zweitens differenzierte und modellierte diese Arbeit keine Down- und Recycling- oder Abfallflüsse. Das heißt, dass die sekundären Materialien, die den Verbrauch substituieren, nicht berücksichtigt und die primären Materialflüsse deswegen teilweise überschätzt wurden.

Aufgrund der unterschiedlichen Quellen und Annahmen, wird auf die Inputs der einzelnen Materialbestandstypen im Detail eingegangen.

Tabelle 13: Überblick der 14 Materialbestandsinputs mit den zugehörigen MFA-Codes, bestandsbildenden Rohmaterialien, Verarbeitungsverlusten aus ersten Rohstoffverarbeitungsschritten in % sowie den Jahrgängen und Datenquellen in denen statistische Daten verfügbar waren

	MFA Code DMC	Bestandsbildende Rohmaterialien	Materialbestandsinputs	Verarbeitungsverluste	Datenverfügbarkeit (Schätzungen)	Datenquellen (inkl. Vergleiche)
1	1.4.1	<i>Industrial roundwood</i>	Massivholz (<i>Solid wood</i>)	54 % (v. a. Feuchtigkeit, Entrinden, Verluste in Sägeindustrie und Zellstoffproduktion)	1926-2015 (1918-1925)	(FAOSTAT 2017; Bundesholzwirtschaftsrat 1970; Bundesamt für Statistik 1920ff)
2			Papier und Karton (<i>Paper and paperboard</i>)		1920-2015	
3	2.1	<i>Iron ore</i>	Eisen und Stahl (<i>Iron and steel</i>)	79 % (davon 64 % Abfallgestein aus Erz)	1918-2015	(Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; World Steel Association 2019; UN Statistics Division 2017; Dammerer 2020)
4	2.2.1	<i>Copper ore</i>	Kupfer (<i>Copper</i>)	96-99 % (Abfallgestein aus Erz)	1918-2015	(Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; UN Statistics Division 2017)
5	2.2.7	<i>Bauxit</i>	Aluminium	49-46 % (Abfallgestein aus Erz (1941-1964))	1920-2015	(Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; UN Statistics Division 2017)
6	2.2 (2.2.3.-2.2.9)	<i>Other ores</i>	Andere Metalle (<i>Other metals</i>)	Abfallgestein aus gehandelten Erzen 94 % und aus inländischen Erzen laut Metallgehalt aus MH	1918-2015	(Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; UN Statistics Division 2017)
7	3.2 + 3.4 + 3.5	<i>Limestone, Gypsum + Sand and Gravel + Clays</i>	Beton (<i>Concrete</i>)	36 % (CO2 aus der Zementherstellung)	1920-2015	(BMHV 1920ff; Cembureau 1998, 2011, 2017)
8	3.5	<i>Clays</i>	Ziegel (<i>Bricks</i>)	26 % (v.a. Feuchtigkeitsverlust)	1937-2015 (1920-1936)	(Bundesamt für Statistik 1920ff; Eurostat 2017; UN Statistics Division 2017)
9	3.4 + 3.1	<i>Sand and gravel + Ornamental and building stones</i>	Sand und Schotter für Untergründe und Tragschichten von Gebäuden und Straßen & Natursteine (<i>Aggregates used as subbase or base-course layers in construction + stones</i>)	0 %	(1918-2015)	(Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017)
10	3.2 + 3.8	<i>Limestone + Silica Sands, Soda Ash, Feldspar</i>	Hohlglas (<i>Container glass</i>)	17 % (v.a. Gase aus Schmelze)	1954-1990; 2010-2015; (1920-1953)	(Bundesamt für Statistik 1920ff; Eurostat 2017; Fachverband der Glasindustrie, WKO 2015; UN Statistics Division 2017)
11	3.2 + 3.8	<i>Limestone + Silica sands, Soda ash</i>	Flachglas (<i>Flat glass</i>)	20 % (v.a. Gase aus Schmelze)	1954-1990; 1995-2015; (1920-1953)	(Bundesamt für Statistik 1920ff; Eurostat 2017; UN Statistics Division 2017)
12	4.3	<i>Crude oil</i>	Plastik (<i>Plastics</i>)	Keine Annahmen	1950-2015	(FCIO 2017; Eygen et al. 2016)
13	3.4 + 4.3	<i>Sand and Gravel + Crude oil (Bitumen)</i>	Asphalt (<i>Asphalt</i>)	0 %	1955-2015 (1918-1954)	(Bundesamt für Statistik 1920ff), (IEA 2020), (FVMI 2015, 2016, 2014, 2013, 2011), (Larsen and Eapa 2016)
14	1.1.9 + 1.7.4. + 5.	<i>Fibres, primary and processed + Other products from animals+ Other products</i>	Textilien (Garne, Gewebe,...) (<i>textiles</i>)	Keine Annahmen	(1920-)1995-2015	(Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017; Eurostat 2017)

2.4.2.2.1 Biomasse

Massivholz

Der Begriff Massivholz (*solidwood*) umfasst den Verbrauch mehrerer Holzprodukte, der aus Berechnungen basierend auf Produktions- und Handelsdaten hervorgeht (Bundesholzwirtschaftsrat 1970; FAOSTAT 2017; Bundesamt für Statistik 1920ff). Bis 1950 wurden die Produktionszahlen als Verbrauch angenommen, da Daten zum Außenhandel erst ab 1951 für einfach bearbeitetes Holz verfügbar waren (Bundesamt für Statistik 1920ff). Angaben in m³ wurden mit dem Koeffizienten 0,55 in t umgerechnet.

Die Materialbestandsinputs für 1918-1925 wurden aus dem Pro-Kopf-Verbrauch von 1926 mit den jährlichen Bevölkerungszahlen aus dem Maddison Projekt (Bolt et al. 2018) extrapoliert. 1926-1960 waren Daten zur Schnittholzerzeugung vorhanden (Bundesholzwirtschaftsrat 1970). Der Verbrauch anderer Massivholzprodukte in diesem Zeitraum wurden basierend auf das Verhältnis von 1961 von 63 % Schnittholz zu 37 % anderen Verwendungen (FAOSTAT 2017) hochgeschätzt.

Von 1961 bis 2015 resultierte der Verbrauch aus Produktions- und Handelszahlen der FAO Forststatistik (FAOSTAT 2017) folgender Gruppen: Schnittholz (1872 *sawn wood*), worunter gesägte Produkte aus Baumstämmen summiert wurden; Holzplatten (1873 *wood-based panels*), wie Furniere, Speerholz- und andere Holzfaserplatten sowie Industrieholz für andere Zwecke (1871 *other industrial products*).

Für Massivholz wurden Verarbeitungsverluste von 54 % angenommen, worunter Feuchtigkeit, Rinde und Verluste der Sägeindustrie und der Zellstoffproduktion fallen (Dammerer 2020). Industrielles Rundholz (1.4.1. *Industrial roundwood/Timber*) galt für diese Studie als Rohmaterial und der Recyclinganteil als vernachlässigbar.

Papier und Karton

Im SHB (Bundesamt für Statistik 1920ff) waren Daten zur Produktion von Papier und Pappe von 1921-1990 und zum Außenhandel von 1920-1967 (inklusive Papierwaren) vorhanden. Ab 1967 ergänzten Zahlen aus der Comtrade (UN Statistics Division 2017) die Zeitreihe. Die FAO (FAOSTAT 2017) wies 1961-2015 Zahlen für Zeitungspapier, Druck- und Schreibpapier und andere Papiere und Karton ohne weiterbearbeitete Papier- und Kartonprodukte zusammengefasst in der Gruppe Papier und Karton (1876 *Paper and paperboard*) aus.

Der Vergleich zwischen den Daten der SHB und FAO zeigte: 1961-1965 entsprachen die Verbrauchszahlen der FAO ca. 55 % des SHB. Ab 1966 kam es zu einer Harmonisierung, wobei die Zahlen der FAO um ca. 5 % höher lagen. 1983-1990 hingegen war der Verbrauch laut SHB zum Teil höher, aufgrund höherer Handelsdaten in der FAO-Datenbank.

Die Bestandsinputs für Papier und Karton basieren von 1920-1965 auf das SHB und von 1966-2015 auf die Daten der FAO und entsprechen den errechneten Verbräuchen. Es wurden wie beim Massivholz 54 % Verarbeitungsverluste (Dammerer 2020) angenommen, hochgeschätzt und dem MFA-Code 1.4.1. *Industrial roundwood* zugeordnet.

Die Datenquellen unterschieden nicht zwischen primärer und sekundärer Produktion noch zwischen bestandsbildenden und kurzlebigen Produkten. Letztere beinhalten unter anderem kurzlebige Produkte wie Zeitungspapier, Hygiene- und Haushaltspapiere und Verpackungsmaterial. Der bestandsbildende Anteil aus der MFA zu Papier und Karton wird vermutlich überschätzt, da zum Beispiel Zeitungspapier zumindest teilweise in die Berechnungen eingeschlossen war.

Textilien

Die Kategorie Textilien umfasst biotische Fasern sowie Garne, Gewebe und vergleichbare Produkte. Kleidung und andere Endprodukte wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

Handelsdaten von 1920-1964 stammen aus dem SHB (Bundesamt für Statistik 1920ff) und danach aus der Comtrade (UN Statistics Division 2017). Bis 1994 entsprachen die Bestandsinputs den Nettoimporten. Produktionszahlen konnten ab 1995 der PRODCOM (Eurostat 2017) entnommen und der jährliche Verbrauch mit den Handelsdaten berechnet werden.

Bislang erschienene Arbeiten analysierten Textilien nicht als Materialbestandsinputs, obwohl eine Nutzungsdauer von über einem Jahr wahrscheinlich ist. Annahmen zu den anfallenden Verarbeitungsverlusten wurden keine getroffen. Die Rohstoffe und Produkte wurden zur Vereinfachung bei der Aufteilung nach Nutzungsart einheitlich unter dem MFA-Code 1.1. *Primary crops* angeführt. Der MFA-Logik folgend wäre aber eine Unterteilung in die Materialkategorien 1.1.9 *Fibres, primary and processed* 1.7.4. *Other products from animals* und 5. *Other products* ebenfalls möglich.

2.4.2.2.2 Metalle

Eisen und Stahl

In Österreich gibt es eine große Stahlindustrie mit hohem Eisenerzverbrauch. Eisenerz wurde bis in die 1970er vorwiegend im Land abgebaut, aber seit den 1980ern überwogen die Importe die inländischen Extraktionen. Währenddessen wurden zunehmende Mengen an Eisen- und Stahl(-produkten) exportiert.

Der inländische Verbrauch von Stahl wurde als Input in die Materialbestände definiert. Dieser wurde auf Basis von Daten zur Rohstahlproduktion (Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; World Steel Association 2019) und Handelsdaten mit Eisen- und Stahlprodukten (Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017) berechnet. Der Handel mit Eisenerzen sowie Eisen- und Stahlprodukten – darunter wurden Roheisen und -stahl sowie Eisen- und Stahlprodukte zusammengefasst – konnten in den Quellen unterschieden werden. Als Verarbeitungsverluste zur Stahlproduktion wurden im verbrauchten Eisenerz 64 % Abfallgestein (BMHV 1920ff) und 15 % weitere Verluste im Verarbeitungsprozess des Roheisens/Stahls (Stahlherstellung, Gießen, Walzen oder Formen) angenommen (Dammerer 2020). Stahl und Eisenerz als Rohmaterial war dem MFA-Code 2.1 *Iron ores* zuzuordnen.

Kupfer

Der aus Produktions- und Handelsdaten berechnete Kupferverbrauch galt als Bestandsinput von Kupfer (Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b; UN Statistics Division 2017). Der Handel mit Kupfererzen war sehr gering und daher vernachlässigbar.

Die Produktionszahlen unterschieden nicht zwischen der Produktion aus primären und sekundären Rohstoffen, aber die primäre Produktion von Kupfer aus inländischen Erzen konnte aus der MFA abgeleitet werden (1918-1976). Bei der Kupferherstellung aus Erz fielen aufgrund des geringen Metallgehalts des Erzes zwischen 96-99 % Abfallgestein an. Andere Verluste bei der Schmelze und anderen Prozessen zur Metallherstellung waren aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Größe zu vernachlässigen (Dammerer 2020). Der Verarbeitungsverlust wurde dem Abfallgestein (*waste rock*) der inländischen Erze gleichgesetzt.

Kupfer wurde dem MFA-Code 2.2.1. *Copper ores* zugeordnet. Der bestandsbildende Anteil entspricht demnach dem Metallgehalt aus dem von 1918-1979 extrahierten Kupfererz plus importiertes Kupfer minus exportiertes Kupfer.

Aluminium

Die Aluminium-Bestandsinputs entsprechen dem aus Produktions- und Handelsdaten berechneten Aluminiumverbrauch (Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division

2017; USGS 2017b). Quellen enthielten Produktionszahlen aus primären und sekundären Rohstoffen, ein Handel mit Erzen wurde nicht gesondert dokumentiert.

Bauxit wurde in Österreich nur von 1941-1964 abgebaut. Das in diesem Zeitraum aus der Verarbeitung von Bauxit anfallende Abfallgestein (44-49 %) wurde als Verarbeitungsverlust berechnet. Andere Verluste blieben aufgrund der geringen Menge ausgeschlossen. Die Aluminiuminputs und Verarbeitungsverluste wurden der MFA-Kategorie 2.2.7. *Bauxit* zugeordnet.

Andere Metalle

Produktionsdaten anderer Metalle waren, bis auf Blei (Bundesamt für Statistik 1920ff; USGS 2017b), kaum verfügbar. Darum wurde die Summe der anderen im Inland extrahierten Metalle aus der MFA (siehe Kapitel 2.4.1.2) – Blei, Zink, Mangan, Wolfram, Silber, Quecksilber, Antimon und Molybdän – als primäre inländische Produktion zusammengefasst. Für gehandelte Erze (Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017) wurde ein einheitlicher Metallgehalt von 6 % angenommen (Krausmann et al. 2017c; Dammerer 2020). Der Materialbestandsinput anderer Metalle entspricht dem Verbrauch extrahierter und gehandelter Metalle. Als Verarbeitungsverlust wurde alleine das Abfallgestein aus den verbrauchten Metallerzen definiert. Beides wurde den MFA-Code 2.2. *other ores* zugeordnet. Handelswaren aus Metall (2.3. *Products mainly from metals*) blieben aus den Berechnungen ausgeschlossen.

2.4.2.2.3 Nicht-Metallische Mineralien

Hohlglas und Flachglas

Die Inputs von 1920-1953 wurden auf Basis des Pro-Kopf-Verbrauchs von 1954 mit den jährlichen Bevölkerungszahlen (Bolt et al. 2018) extrapoliert. Von 1954-1990 waren für beide Materialbestandstypen die Inputs als Verbrauch aus Produktions- und Handelsdaten (Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017) zu berechnen. Da eine detaillierte Unterscheidung der Handelsdaten datenbasiert nicht möglich war, wurden die Aufzeichnungen für „Glas“ dem Flachglas und Daten für „Glaswaren“ dem Hohlglas zugeordnet. Angaben zu Flachglas in m² wurden mit der Annahme von 15 kg/m² bzw. 15 t/1000 m² in t konvertiert (UNICPS 2017).

Ab 1995 lieferte die PRODCOM (Eurostat 2017) Daten zu Produktion und Handel von Glas in verschiedenen Verarbeitungsstufen. Darin waren Daten zu Produktion und Handel von Flachglas identifizierbar. Für Hohlglas schätzungen waren die Daten der PRODCOM unzureichend. Die Produktionssummen des Verpackungsglassektors (Fachverband der Glasindustrie, WKO 2015) dienten von 2010-2015 als Quelle. Handelsdaten wurden aus Comtrade (UN Statistics Division 2017) und Eurostat (2017) abgeleitet. Die Produktionszahlen für die fehlenden Zeitspannen zwischen den Quellen, einerseits von 1991-1994 und andererseits 1991-2009, wurden linear interpoliert.

Als Rohstoffe für Flachglas gelten vor allem Quarzsand, Soda und Kalkstein und für Hohlglas noch ein Zusatz von Feldspat. Basierend auf dem Mischverhältnis von Ruth and Dell'Anno (1997) ergeben sich Verarbeitungsverluste von 17 % bei Hohlglas und 20 % bei Flachglas (Dammerer 2020). Es wurden keine weiteren Verluste angenommen (Dammerer 2020) sowie Glasrecycling nicht berücksichtigt.

Die Extraktionsdaten für Quarz und Quarzite (unter A.3.8.) wurden mit Hochschätzungen für den Sandverbrauch zur Produktion von Flach- und Hohlglas (Bundesamt für Statistik 1920ff; Eurostat 2017) verglichen, bei der Annahme, dass pro Tonne Glas 730 kg Quarzsand benötigt werden (Krausmann et al. 2018 SI). Die statistischen Zahlen waren höher als die Schätzungen.

Ziegel

Die Masse der inländischen Ziegelproduktion wurde basierend auf den für die MFA geschätzten Tonbedarf (3.5. *Clays*) (in Kapitel 2.4.1.3. beschrieben) berechnet, wofür 26 % Wassergehalt als Verarbeitungsverlust durch Verdampfung angenommen wurde (Dammerer 2020; Krausmann et al. 2017c). Der Ziegelinput in die Bestände entspricht dem Ziegelverbrauch, der mit Handelsdaten zu Ziegeln und Ziegelerzeugnissen (Bundesamt für Statistik 1920ff; UN Statistics Division 2017) berechnet wurde.

Beton

Jährliche Zahlen zum Zementverbrauch sind vom Cembureau (1998, 2011, 2017) verfügbar. Darauf basierend wurde der verbrauchte Sand und Schotteranteil (für die MFA, wie in Kapitel 2.4.1.3.1 beschrieben) berechnet. Beide Verbräuche addiert ergaben die produzierten Betonmengen pro Jahr, wovon eine Verwendung vor Ort angenommen wurde und damit die Produktionszahlen den Bestandsinputs entsprechen. Aufbauend auf Schätzungen der Rohmaterialien zur Zementproduktion wurden hier Verarbeitungsverluste von 36 % (CO₂ aus dem Kalkstein, Kapitel 2.4.1.3.) und keine Verluste bei Sand und Schotter angenommen. Die Inputs wurden folgenden MFA-Codes zugeordnet: 3.2. *Limestone, Gypsum*, 3.4. *Sand and Gravel* und 3.5. *Clays*.

Sand und Schotter für Tragschichten und Steine

Die Schätzungen zum Abbau von Sand und Schotter für Tragschichten von Beton- und Ziegelgebäuden sowie für den Unterbau von Asphaltstraßen entsprechen jenen aus Kapitel 2.4.1.3. Für die in der MFA zusammengetragenen Daten und Schätzungen zum Abbau verschiedener Natursteine (A.3.1. *Ornamental or building stones*) wurde ebenfalls eine Anhäufung in langlebigen Beständen angenommen, die als Inputs erfassbar sind.

Die Steine wurden mit Sand und Schotter zusammengefasst, da Handelsdaten unter „*stone, sand and gravel*“ in der Comtrade-Datenbank (UN Statistics Division 2017) gemeinsam geführt und für beide Gruppen keine Verarbeitungsverluste und gemeinsame Re-/Downcyclingflüsse angenommen wurden.

2.4.2.2.4 Fossile Energieträger

Asphalt

Wie in Kapitel 2.4.1.3. beschrieben, wurde der Anteil von Sand und Schotter im Asphalt basierend auf den Bitumenkonsum von 1955-2015 extrapoliert. Beides zusammen ergab den geschätzten Asphaltkonsum, der in die Materialbestände floss. Für die Jahre 1918-1954 wurde basierend auf den Pro-Kopf-Verbrauch von 1955 ein Aggregatsverbrauch im Straßenbau ohne Bitumenanteil mithilfe der Bevölkerungszahlen (Bolt et al. 2018) geschätzt. Es wurden keine Verarbeitungsverluste angenommen (Krausmann et al. 2017c; Dammerer 2020) und die Materialbestandsinputs verteilten sich auf die MFA-Codes 3.4. *Sand and Gravel* und 4.3. *Crude oil*.

Plastik

Ab den 1930ern wurden zunehmend Kunststoffe in Österreich produziert. Der große Aufschwung der Kunststoffindustrie folgte aber erst nach dem Zweiten Weltkrieg (FCIO 2017). Die Entwicklung des österreichischen Verbrauchs an verarbeiteten Kunststoffen konnte ab 1950 mithilfe von punktuellen Daten zum Pro-Kopf-Verbrauch (siehe Tabelle 14) des Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs (FCIO 2017) interpoliert und für die Gesamtbevölkerung (Bolt et al. 2018) extrapoliert werden. Die Verbrauchszahlen vor 1950 wurden bis 1945 konstant gehalten und davor als vernachlässigbar angesehen. Die Schätzung

für den Gesamtverbrauch von 2010 (1,3 Mio. t gesamt bzw. 160 kg pro Kopf) stimmt mit den Verbrauchszahlen in FCIO (2017) und Eygen et al. (2016) gut überein.

Tabelle 14: Pro-Kopf-Verbrauch an verarbeiteten Kunststoffen in Österreich

	1950	1955	1960	1970	1980	2000	2020
kg pro Kopf	0,3	2,4	8,7	37,6	98,8	180,2	150

Quelle: FCIO 2017

Krausmann et al. (2017b) gingen davon aus, dass ca. ein Viertel der globalen Plastikproduktion in langlebige Produkte wie Kabelmäntel, Rohre oder Isolationen und ein Drittel in Verpackungen und andere kurzlebige Produkte fließen. Sie nahmen an, dass der Rest Elektronikprodukte, Möbel und andere Anwendungen mit einer mittleren Lebensdauer umfasst. In Österreich floss 2010 ein Drittel des Verbrauchs in „Bestände“, wovon die Hälfte auf den Bausektor entfiel (Eygen et al. 2016). In der vorliegenden Arbeit wurde basierend darauf angenommen, dass ein Viertel des österreichischen Verbrauchs in langlebige Bestände floss. Der Rest wurde als andere Nutzungen und Verluste definiert. Verarbeitungsverlust wurden aus Mangel an Daten keine angenommen und die Inputs dem MFA-Code 4.3. *Crude oil* zugeteilt.

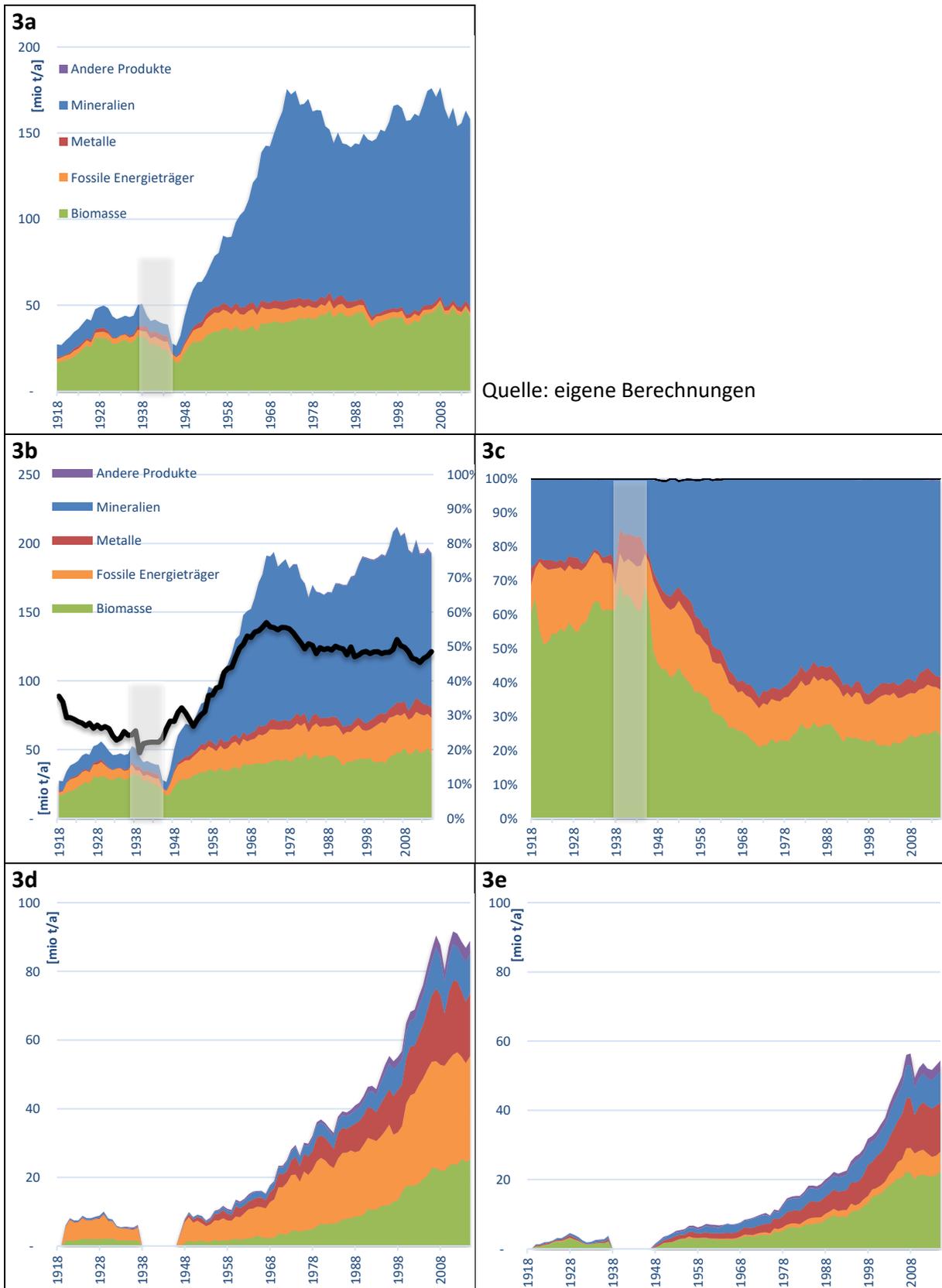
3 Ergebnisse: Der österreichische Stoffwechsel

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der MFA für Österreich von 1918 bis 2015 und der daraus abgeleiteten Indikatoren präsentiert. Danach folgen Darstellungen der Resultate aus den erweiterten Betrachtungen zum jährlichen Materialverbrauch nach Art der Nutzung sowie zu den bestandsbildenden Materialinputs, die fortlaufend als Materialbestände angehäuft wurden. Die Energieflüsse und metabolischen Raten und Profile Österreichs werden im Anschluss präsentiert.

3.1 Die Materialflüsse Österreichs

Der Materialverbrauch (DMC) setzt sich aus den inländischen Materialentnahmen (DE) und dem physischen Handel (Importe und Exporte) zusammen. In Abbildung 3 (a-e) werden die einzelnen Entwicklungen dargestellt. Als Hinweis auf die schlechtere Datenlage und größeren Unsicherheiten während des Zweiten Weltkrieges wurden in den Abbildungen transparente Balken über die Ergebnisse dieser Phase gelegt. Es ist ersichtlich, dass die inländischen Entnahmen (3a) den Großteil zum Materialverbrauch (3b und 3c) beitragen, aber auch, dass ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Außenhandel (3d und 3e) signifikant zunahm und sich die Handelsabhängigkeit (PTB in % des DMC) von 8 % des Materialverbrauchs 1950 auf 18 % in 2015 mehr als verdoppelte. Importierte Produkte, die aus verschiedenen Materialien bestehen, wurden der darin dominanten Hauptmaterialgruppe zugeordnet oder in der Kategorie „andere Produkte“ aggregiert.

Der österreichische Ressourcenverbrauch war in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts geprägt von den beiden Weltkriegen, geopolitischen Umstrukturierungen und die durch den Börsenkrach von 1929 ausgelöste Weltwirtschaftskrise. Diese Ereignisse hatten schwerwiegende wirtschaftliche und soziale Folgen, da die Wirtschaftsleistung dadurch mehrmals einbrach und die Bevölkerung vermehrt mit Arbeitslosigkeit, Armut und Kriegsfolgen zu kämpfen hatte. Das Maximum der Inlandsentnahmen von 50 Mio. t und des Materialverbrauchs mit 56 Mio. t wurde in diesem Zeitraum im Jahr 1929 erreicht. Die Importe (3d) überstiegen die Exporte (3e) in dieser Phase um das Zwei- bis Dreifache. Biomasse hatte einen Anteil von 50-70 % des Gesamtverbrauchs (3c). Die höchsten Biomasseanteile sind direkt nach den Kriegsenden (1918 und 1945), nach dem Börsenkrach (1929) und zum Beginn des Zweiten Weltkrieges (1939) zu verzeichnen. Dies verdeutlicht die essentielle Rolle von Biomasse für Bevölkerung und Nutztiere, worauf auch in Krisenzeiten nur schwer verzichtet werden kann (Krausmann et al. 2009). Der Anteil der fossilen Energieträger am DMC lag in dieser Phase meist zwischen 10-20 %. In dieser noch überwiegend agrarisch geprägten Periode der industriellen Transition war neben Biomasse Kohle ein wichtiger Energielieferant. Diese stellte einen Großteil der Importe dar, wiewohl auch Erdöl zunehmend an Bedeutung gewann. Der Verbrauch von mineralischen Rohstoffen nahm ca. 25 % des DMCs ein. Schätzungen zum Verbrauch nicht-metallischer Mineralien wie Sand, Schotter oder Steine werden umso unsicherer, desto weiter man in die Vergangenheit geht. Metallerze stellten den kleinsten Posten, erreichten maximal 3 Mio. t/a und ihr Anteil am Gesamtverbrauch blieb im gesamten Untersuchungszeitraum im einstelligen Bereich, wobei er nur in den Kriegsjahren über 5 % stieg.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 3: Jährliche Materialflüsse in Österreich von 1918-2015 in Mio. t in Hauptmaterialgruppen: Inlandsentnahmen von Rohmaterialien (DE) (3a); Materialverbrauch in absoluten Zahlen (DMC) und Anteil der Materialbestandsinputs am DMC (%) (3b); Prozentuelle Verteilung des Materialverbrauchs (3c); Importe (3d) und Exporte (3e) von Rohstoffen und Produkten; Die Grafiken 3 a-e haben unterschiedliche Maßstäbe in Mio. t pro Jahr.

In den Jahren des Anschlusses an das Deutsche Reich und des Zweiten Weltkrieges (1938-1945) ging der Verbrauch laut Statistik zurück. Es fehlen in dieser Periode jedoch Daten zum Außenhandel sowie Basisdaten für Schätzungen. Die Auswirkungen von kriegerischen Konflikten, wie zum Beispiel die Geheimhaltung von sensiblen Daten, beeinflussen die Aussagekraft des errechneten Materialverbrauchs für die Kriegsjahre zusätzlich, sodass er in dieser Periode deutlich unterschätzt sein dürfte.

Unmittelbar nach Kriegsende durchlebte Österreich, wie andere europäische Länder, einen Mangel an industriellen Rohstoffen und vor allem an Energie, der unter anderem durch wirtschaftliche Entwicklungsimpulse – insbesondere durch das *European Recovery Program* (ERP) – und Importe von günstigem Erdöl aus dem Nahen Osten überwunden wurde (Groß 2012). Getragen von der wirtschaftlichen Entwicklung in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg stieg der Ressourcenverbrauch, von ca. 65 Mio. t in 1950 auf 191 Mio. t in 1972, um das Dreifache an. Pfister (1994) prägte für diese Phase des rasanten Anstiegs des Ressourcenverbrauchs den Begriff „1950er-Syndrom“, womit eine grundlegende Veränderung der Lebensweise und Lebensstandards einherging. Besonders der Verbrauch von mineralischen Rohstoffen wuchs in dieser Phase deutlich an und machte seitdem zwei Drittel des Materialverbrauchs aus. Der Anteil der Biomasse am DMC sank gleichzeitig auf unter 30 % und fossile Energieträger hielten ihren Anteil zwischen 10-20 %.

Der steile Anstieg im DMC brach im Jahr 1972 mit der ersten Ölkrise¹⁰ abrupt ab und führte im Zusammenhang mit dem drastisch gestiegenen Ölpreis und einer weiteren Ölkrise 1979 in den 1970ern zu einem Rückgang im Verbrauch. In den 1980ern hielten sich der DMC bei ca. 165 Mio t/a. Erst in den 1990er Jahren kam es bei den inländischen Entnahmen wieder zu Wachstumsschüben, die die DE bis 2006 erneut auf das Niveau von 1972 stiegen ließen. Seit der globalen Finanzkrise 2008 ist der Trend allerdings wieder rückläufig und der DMC lag zwischen 190 und 200 Mio. t/a.

Während die Inlandsentnahmen bereits in den 1970er und 1980er-Jahren stagnierten oder rückläufig waren (Abbildung 3a), stieg der Außenhandel bis 2007 kontinuierlich weiter an (Abbildung 3c und 3d) und die Rolle der Importe zur Deckung des Ressourcenbedarfs nahm deutlich zu. Aus physischer Perspektive gilt Österreich als ein Nettoimporteur, da seine Importe die Exporte stets überstiegen. Die Nettoimporte – d. h. die Differenz zwischen Importen und Exporten – stiegen von 4,7 Mio. t in 1920 auf 34,6 Mio. t in 2015. Direkt nach den beiden Weltkriegen ist eine erhöhte Handelsabhängigkeit des Materialverbrauchs (PTB in % vom DMC) zu beobachten. Von 1930 bis 1975 lag die Handelsabhängigkeit meist im einstelligen Bereich, ab 1976 über 10 % und seit 2000 zwischen 15-20 %. Erst die Wirtschaftskrise 2008 setzte dem Wachstum des Außenhandels ein Ende und führte zu einer Stabilisierung der Handelsabhängigkeit auf dem Niveau von 2007. Einen Anstieg gab es im Handel bei allen Materialgruppen in absoluten Zahlen. Anteilsmäßig ging die Dominanz der fossilen Energieträger an den Importen von über 70 % (z. B. 1918 oder 1950) auf ca. 30 % (2015) zurück. Bei den Exporten stieg der Anteil der fossilen Energieträger hingegen auf über 10 % und die Biomasse hielt den Hauptanteil ab 1950 beinahe konstant bei über 40 %.

In Abbildung 3b wird zusätzlich zur Entwicklung des Materialverbrauchs auch die des Anteils an bestandsbildenden Materialien am DMC dargestellt, welche auf der Berechnung der Materialbestandsinputs basiert. Während die Materialbestandsinputs bis 1950 meist zwischen 20-30 % des Materialverbrauchs ausmachten, stieg dieser Anteil danach, bis 1972, rasch auf bis zu 57 % und stagnierte seit 1980 bei ca. 50%.

¹⁰ Zwischen 1973 und 1980 stieg der Rohölpreis um mehr als den Faktor 10 von unter 5 US Dollar/Barrel auf über 55 US Dollar/Barrel (Sieferle et al. 2006). Die politischen Ursachen der Ölkrisen im Überblick: 1973 Yom Kippur Krieg; 1979 Revolution im Iran, Golf Krieg 1991.

Der DMC wurde mit den Ergebnissen anderer Studien zum österreichischen Materialverbrauch verglichen (Abbildung 4). Dazu wurde einerseits ein Datensatz der Statistik Austria für die Jahre 1960-2012 herangezogen, auf dem der österreichische Ressourcenbericht von 2015 basiert (BMLFUW et al. 2015), und andererseits die aktuell zugänglichen Daten der Materialflussrechnung aus der Eurostat-Datenbank für die Jahre 1990-2019 (Eurostat 2020b). Letztere entsprechen den aktuellen von der Statistik Austria berichteten Zahlen nach einer Revision der Daten (Statistik Austria 2020b). Ihre Entwicklungen werden in Abbildung 4 in Rot sowie Orange dargestellt.

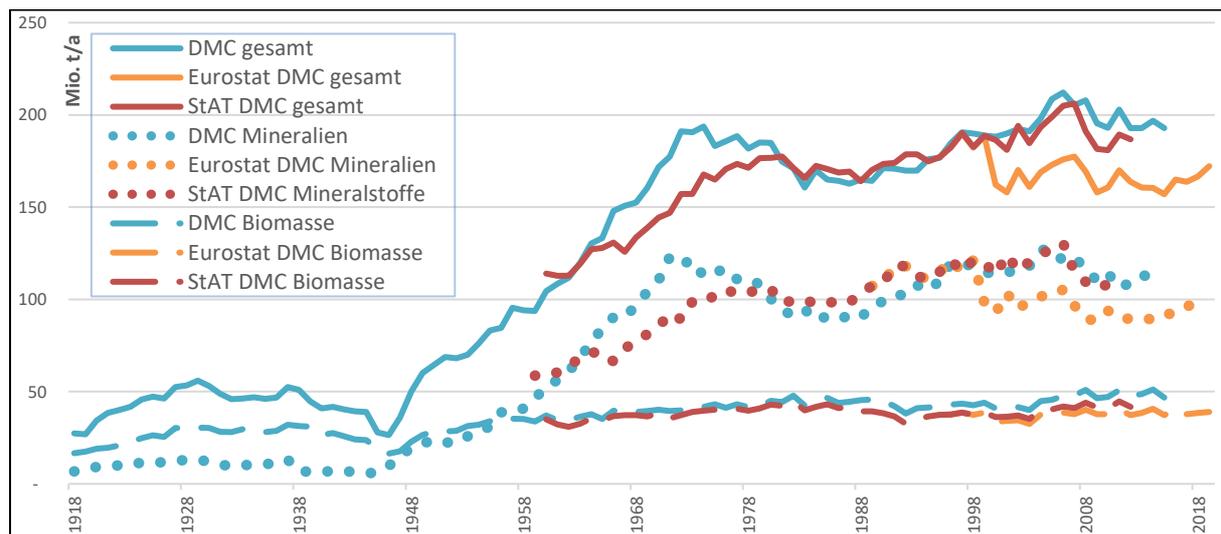


Abbildung 4: Materialverbrauch (DMC) gesamt und der Materialgruppen nicht-metallischer Mineralien und Biomasse im Vergleich mit Materialflussdaten der Statistik Österreich (1960-2012) und der Eurostat (1990-2019)

Quellen: StAT aus BMLFUW et al. 2015; Eurostat 2020b; eigene Berechnungen

Bis auf das Jahr 1963 weichen die Zahlen von 1960-1980 mit einer Differenz von bis zu 34 Mio. t im Jahr 1972 deutlich voneinander ab. Während die Verbrauchszahlen von Metallen und fossilen Energieträgern in den verschiedenen Quellen sehr konsistent sind, sind die Abweichungen vor allem bei den nicht-metallischen Mineralien und der Biomasse in manchen Jahren beträchtlich und auf unterschiedliche Schätzverfahren für wichtige Materialflüsse (z.B. Sand und Schotter, Weidebiomasse) zurückzuführen. Ab 1981 harmonisieren die Entwicklungen der Zeitreihe der Statistik Austria von 1960-2012, bis auf einige Schwankungen von maximal 10 Mio t/a, zumeist. Die Orangen Linien zeigen die von der Statistik Austria (2020b) überarbeiteten Zeitreihen. Die statistischen Verbrauchszahlen sind dadurch seit 2000 um 20-30 Mio. t/a niedriger und liegen damit deutlich unter den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Die Gründe für die Differenzen lassen sich ebenfalls auf Veränderungen in den Schätzverfahren für die DE von mineralischen und biotischen Rohstoffverbräuchen zurückführen.

3.2 Der Materialverbrauch nach Art der Nutzung 1918-2015

Der Materialverbrauch unterteilt nach den definierten Nutzungsarten in Abbildung 5 zeigt, dass es mit der Beschleunigung des Materialverbrauchs ab 1950 zeitgleich zu einer deutlichen Verschiebung in der Zusammensetzung kam.

Technische Energie und Nahrungs- und Futtermittel bilden den Anteil der Materialien zur energetischen Nutzung. Er (ca. 60 %) lag in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts über jenem zur materiellen Nutzung (ca. 34 %). Nahrungs- und Futtermittel stellten für den Zeitraum von 1918 bis 1949 mit durchschnittlich 39 % den größten Anteil der Materialnutzung dar, gefolgt von den bestandsbildenden Materialien mit 26 % und Materialien zur technischen Energienutzung an dritter Stelle mit 22 %. Unter die bestandsbildenden Materialien fielen vor allem metallische und nicht-metallische Mineralien, die in Gebäuden, Infrastruktur und anderen langlebigen Artefakten akkumuliert wurden (siehe nächstes Kapitel). Den kleinsten Anteil machten die mit den bestandsbildenden Materialien zusammenhängenden Verarbeitungsverluste mit 6 % aus. Knapp darüber mit 8 % lagen die zusammengefassten anderen Nutzungen (v. a. kurzlebige und dissipative Nutzungen wie Düngemittel, Salz, Einstreu) und Verluste (z. B. Schwund).

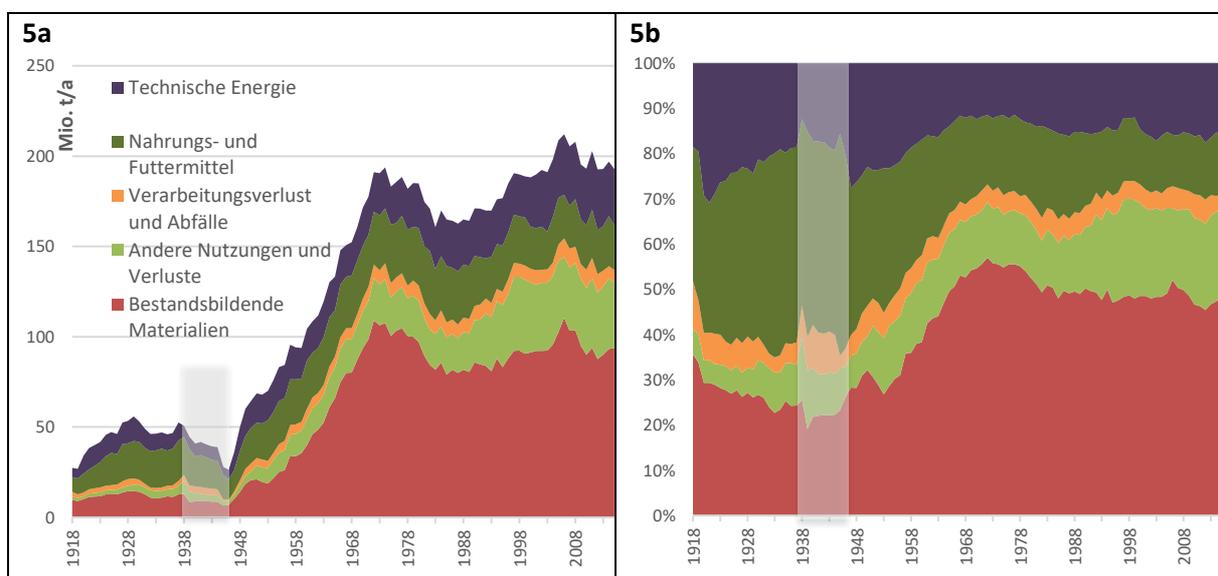


Abbildung 5: Materialverbrauch nach fünf Nutzungsarten in absoluten Zahlen (5a) und Anteile in % (5b) von 1918-2015

Quelle: eigene Berechnungen

Ab 1948 setzte eine Verschiebung im Verhältnis ein und seit 1957 dominierte die materielle Nutzung und lag ab 1964 zwischen 60-70 %. Den Großteil davon machten ab 1964 die bestandsbildenden Materialien mit ca. 50 % aus, aber auch der Anteil der anderen Nutzungen und Verluste hatte sich verdoppelt und schwankte zwischen 12-22 %. Der Anteil der Nahrungs- und Futtermittel schrumpfte hingegen auf 11-20 %. Die Materialien zur technischen Energie machten gewichtsmäßig seit 1964 zwischen 11-17 % der Materialnutzung aus und überwogen seit 2000 die Nahrungs- und Futtermittel. Der Anteil der Verarbeitungsverluste hat sich hingegen kaum verändert.

Die Verlagerung von der Nutzung hauptsächlich kurzlebiger Materialien, die innerhalb eines Jahres verbraucht werden (z. B. Nahrung und technische Energie), hin zu einem hohen Bestandteil an bestandsbildenden Materialien ist ein weiterer Aspekt der industriellen Transition im 20. Jahrhundert (Krausmann et al. 2009). Im nächsten Kapitel wird analysiert, welche Mengen und Materialien in den gesellschaftlichen Materialbeständen angehäuft wurden.

3.3 Inputs in die Materialbestände Österreichs 1918-2015

Die Ergebnisse zu den Materialbestandsinputs in den Abbildungen 6a-d entsprechen dem bestandsbildenden Anteil am Materialverbrauch in Abbildung 3b und den bestandsbildenden Materialien in den Abbildungen 5a-b.

Die Entwicklung der Mengen und Zusammensetzung der 14 Materialbestandstypen ist aus Abbildung 6a abzulesen. Während sie in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts insgesamt maximal 15 Mio. t im Jahr erreichten, stieg ihr Verbrauch von ca. 21 Mio. t im Jahr 1950 auf 109 Mio. t im Jahr 1972 an. Das entspricht einer Steigerung um den Faktor 5. Bis 1983 gingen die Inputs in die Materialbestände sukzessive auf ein Niveau von ca. 82 Mio t/a zurück und stagnierten bis 1993. Für die folgenden zehn Jahre blieben die Materialbestandsinputs stabil auf ca. 92. Mio. t/a. Von 2004 bis 2008 kam es zu einem kurzen Anstieg und einem Höchststand von 110 Mio. t in 2006. Seitdem schwankten die Inputs zwischen 87-95 Mio. t/a. Den Großteil der Inputs bildeten die Baumineralien. Darunter fielen Beton mit einem Höchstwert von ca. 43 Mio. t/a, Sand, Schotter und Steine mit einem Maximum von 48 Mio. t/a, Asphalt mit 12 Mio. t/a und Ziegel mit 5 Mio. t/a. Bis 1950 stellten diese Materialien zusammen zwischen 70-83 % und danach ca. 90 % der Inputs dar. In den letzten fünf Jahren verzeichneten sie einen Rückgang auf ca. 86 %.

Abbildung 6e zeigt die Entwicklung der Materialbestandstypen exklusive Baumineralien. Die mengenstärksten Inputs darunter sind Massivholz mit einem Höchstwert von 4 Mio. t/a, Eisen und Stahl mit über 5 Mio. t/a und Papier mit 2,4 Mio. t/a. Alle anderen Inputflüsse blieben unter 0,6 Mio. t/a, wobei Kupfer und Textilien als kleinste Materialbestandsinputs nur selten über 0,1 Mio. t/a erreichten. Aus Abbildung 6d geht hervor, dass der Anteil von Massivholz als Bestandsinput deutlich zurückging. Von 1918 bis 1950 fiel sein Anteil von ca. 25 % auf 14 % und stellt seitdem meist zwischen 2-4 % der Materialbestandsinputs. Eisen konnte hingegen ein paar Prozent hinzugewinnen und stand zuletzt bei ca. 6 %.

Die Materialbestandstypen wurden den vier Hauptmaterialgruppen zugeordnet, deren Ergebnis in Abbildung 6c und 6d zu sehen ist. Sie zeigen die klare Dominanz der nicht-metallischen Mineralien. Ihr Anteil stieg in den fast hundert Jahren von ca. 70 % auf ca. 90 %. Darunter fielen die Baumineralien und Hohl- und Flachglas. Der Bitumenanteil wurde vom Asphalt abgezogen und ergibt mit dem Plastik-Input den bestandsbildenden Anteil der fossilen Energieträger. Dieser wurde erst ab 1945 erfasst und hält seit 1963 bei ca. 1 % der Inputs. Massivholz, Papier und Textilien bilden den Biomasseanteil, der von fast 30 % auf unter 10 % sank. Die Metalle haben ihren Anteil verdoppelt, blieben aber dennoch im einstelligen Prozentbereich (abgesehen von den Kriegsjahren; allerdings sind hier die Daten unsicher).

Die bestandsbildenden Materialien machen einen entscheidenden Teil der mit den Materialbeständen in Zusammenhang stehenden Ressourcenflüsse aus, die zum Aufbau, dem Erhalt und der Nutzung der Materialbestände notwendig sind (Wiedenhofer et al. 2016). Die Qualität und Quantität der Materialbestände sowie die gewünschten Funktionen der Bestände sind bestimmend für weitere Investitionen (Wiedenhofer et al. 2016). Aus der Beobachtung der Inputs können Rückschlüsse auf die Entwicklung der Materialbestände im Kontext der industriellen Transformation gezogen werden.

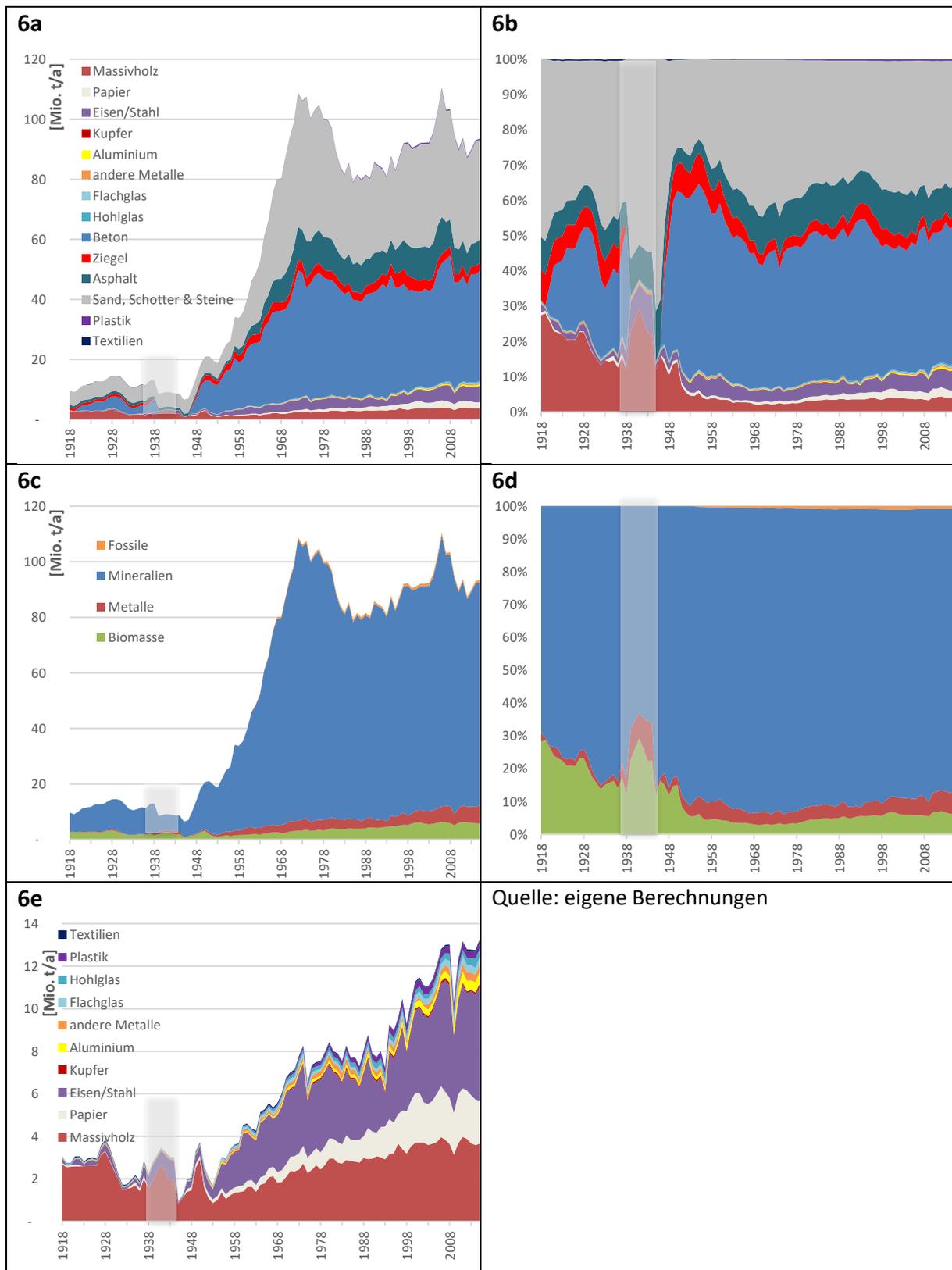


Abbildung 6: Jährliche Inputs in die gesellschaftlichen Materialbestände (Infrastrukturen, Gebäude, sonstige langlebige Güter) Österreichs 1918-2015 nach 14 Materialbestandstypen (6a absolut und 6b in %) und 4 Hauptmaterialgruppen (6c absolut und 6d in %) sowie die Materialbestandstypen exklusive Baumineralien (6e).

3.4 Die Energieflüsse Österreichs 1830-2015

Als zwei wesentliche Elemente der Energietransition westlicher Industrieländer gelten (1) die Ablöse der Biomasse durch Kohle als wichtigstem Energieträger in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und (2) der Bedeutungsgewinn von Erdöl und Erdgas ab 1900, aber vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg (Schaffartzik et al. 2014). In den Abbildungen 7a und 7b, welche die Entwicklung des Energieumsatzes (DEC) von Österreich von 1830 bis 2015 zeigen, lassen sich beide Faktoren klar erkennen.

Der Energieumsatz umfasst neben verschiedenen Energieträgern zur Gewinnung technischer Energie (Holz, Kohle, u. a.) auch Nahrungs- und Futtermittel, die als landwirtschaftliche Biomasse zusammengefasst wurden. Unter die Kategorie „Erneuerbare/Stromhandel“ fallen heimische Energieerzeugung aus Wasser-, Wind-, Solar- und geothermischen Anlagen und (netto-)importierte Elektrizität. Die Kategorie „Produkte“ umfasst den Energiegehalt gehandelter Produkte aus Biomasse oder fossilen Energieträgern.

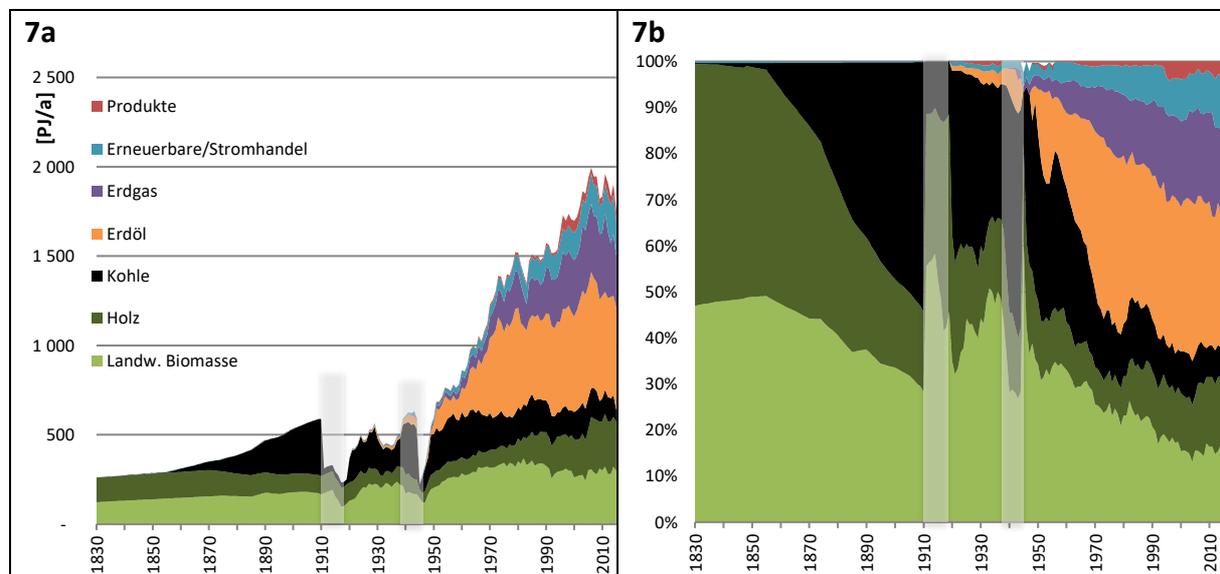


Abbildung 7: Primärenergieverbrauch (Energieumsatz) insgesamt (7a) und Anteil einzelner Energieträger/Formen am Primärenergieverbrauch insgesamt (7b) 1830-2015 in PJ (Gross Calorific Value).

Quellen: Haberl 2001; Krausmann and Haberl 2002; Haberl et al. 2004; Krausmann et al. 2004, 2003, 2008b; Krausmann and Schandl 2006; Siefert et al. 2006; Krausmann and Wiedenhofer 2012; ab 2011 eigene Berechnungen. Zu beachten: Für die Jahre des 1. Weltkriegs fehlen Daten zum Import von Energieträgern, daher der geringe Verbrauch an fossilen Energieträgern.

Die bis 1850 geringe Nutzung von Kohle nahm in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kontinuierlich zu und machte 1910 mit 320 PJ bereits über die Hälfte des Energieumsatzes aus. Die Energie aus Biomasse blieb währenddessen in absoluten Zahlen weitgehend konstant bei ca. 260 PJ/a. Die beiden Weltkriege führten zu deutlichen Einbrüchen. Für den ersten Weltkrieg fehlen vermehrt Importdaten aus anderen Teilen der Monarchie, woraus drastische statistische Rückgänge hervorgehen. Das Vorkriegsniveau im Energieverbrauch von 1910 konnte in der Zwischenkriegszeit (1918-1938), auch mit Erdöl und Strom als neue Energiequellen, nicht mehr erreicht werden.

Der energetische Transformationsprozess zum ausgeprägten industriellen Metabolismus beschleunigte sich in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg. Der Primärenergieumsatz verdoppelte sich von 594 PJ in 1950 bis 1972 auf 1302 PJ. Ein wichtiger Treiber für die bisher

unbekannte Wachstumsdynamik war die Ausbreitung von Automobilen und des damit verbundenen Verkehrssystems, das ermöglichte, die Landesfläche weitflächig zu erschließen, Materialien günstig über weite Strecken zu transportieren und die individuelle Mobilität deutlich zu steigern (Groß 2012). Für den Anstieg des Energieumsatzes außerdem verantwortlich sehen Sieferle et al. (2006) folgende Technologien und Innovationsprozesse: die zunehmende Ausstattung der Haushalte mit energieverbrauchenden Haushaltsgeräten und Zentralheizungen, die allgemeine Motorisierung, die Entkoppelung des Energie- und Produktionssystems von der menschlichen Arbeit durch die zunehmende Mechanisierung von Prozessen und den Reboundeffekt¹¹ bei Effizienzsteigerungen im Energieverbrauch. Der Verbrauch von Primärenergie aus Kohle ging seitdem sukzessive zurück, während die Energiegewinnung aus anderen Energieträgern anstieg und ab 1968 die meiste Energie aus Erdöl umgesetzt wurde.

Bei Sieferle et al. (2006) wird ein mögliches Ende des physischen Wachstums ab den 1970er-Jahren diskutiert, da der Verbrauch ab den Ölpreisschocks über zwei Jahrzehnte relativ stabil blieb. Die eintretende Stagnation im Energieverbrauch ist aber auch im Hinblick auf die De-Industrialisierung in Österreich zu bewerten, die im Zuge einer globalisierten Auslagerung der Industrieproduktion in andere Regionen der Welt zu verstehen ist (Sieferle et al. 2006). Die aktuellen Zahlen zeigen jedoch einen weiteren Anstieg im Energieverbrauch von ca. 40 % von 1535 PJ in 1994 auf 2153 PJ in 2012. Der Energieverbrauch in Form von Erdöl geht seit 2006 und von Erdgas seit 2013 zurück. Diese beiden Energieträger wechseln sich in den letzten 10 Jahren in absoluten Zahlen und anteilmäßig am ersten Platz ab. Während der Erdölanteil 2006 zum Beispiel bei einem Gesamtumsatz von ca. 2100 PJ/a mit 649 PJ/a (31 %) an erster Stelle lag, machte er 2011 nur noch 549 PJ/a (26 %) aus. Der Gesamtumsatz hatte 2009 einen kleinen Einbruch und ist seit 2013 rückläufig.

Strom wurde in Österreich parallel zu thermischen Kraftwerken bereits früh aus Wasserkraftwerken gewonnen und weiter intensiviert. Der zunehmende Ausbau von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (z. B. Wind- oder Solarenergie) führte zu einem Anstieg ihres Anteils am Primärenergieumsatz, der im Jahr 2015 12 % erreichte.

3.5 Metabolische Raten und Profile

Als sozialmetabolische Regime werden in der Sozialen Ökologie dynamische Gleichgewichte von Wechselbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur bezeichnet. Sie sind durch typische Muster von Material- und Energieflüssen gekennzeichnet (metabolische Profile) (Krausmann et al. 2008a). Aus dieser Perspektive erscheint die Industrialisierung als ein Übergangsprozess vom Agrar- zum Industrieregime, wobei Österreich als exemplarisch für die Transition vieler westlicher Industriegesellschaften verstanden werden kann (Schaffartzik et al. 2014). Die Betrachtung des Ressourcenverbrauchs pro Kopf hat sich zur Beobachtung historischer Verschiebungen und für den internationalen Vergleich bewährt. Die Mengen an Material und Energie, die jährlich pro Kopf in einem sozioökonomischen System verbraucht werden, werden auch als metabolische Raten bezeichnet (Krausmann et al. 2009).

Laut Volkszählung belief sich die österreichische Bevölkerung 1920/21 auf 6,4 Millionen Menschen und das neue Staatsgebiet umfasste seitdem rund 83.879 km² (Rumpler and Schmied-Kowarzik 2014). Seither wurde ein beinahe konstanter jährlicher Wachstumstrend (unter 1 %) bei den Bevölkerungszahlen – Kriegsjahre ausgenommen – über das gesamte 20.

¹¹ Die positiven Effekte von ressourcenschonenden Effizienzsteigerungen werden durch ansteigende Nutzungen reduziert (Bibliographisches Institut GmbH 2017). Es wurden zwar deutliche Verbesserungen in der Energieeffizienz erzielt, die allerdings, u. a. durch den Reboundeffekt, nie zu einem absoluten Rückgang des Energieverbrauchs führten.

und angefangene 21. Jahrhundert dokumentiert (Statistik Austria 2016c). Bis 2015 stieg die Bevölkerung auf 8,6 Millionen, woraus sich ein Anstieg der Bevölkerungsdichte von 80 auf 102 Personen pro km² ergibt, wobei die Zuwächse vor allem in den urbanen Zentren zu verzeichnen waren.

In Abbildung 8a wird die Entwicklung des Materialverbrauchs pro Kopf ab 1918 und in Abbildung 8b die des Energieumsatzes pro Kopf ab 1830 anhand ausgewählter Jahre dargestellt. Die Entwicklungen des Verbrauchs der Materialien in t und der Energie in GJ weisen einige Ähnlichkeiten in ihrem Verlauf auf. Seit 1930 haben sich die metabolischen Raten verdreifacht.

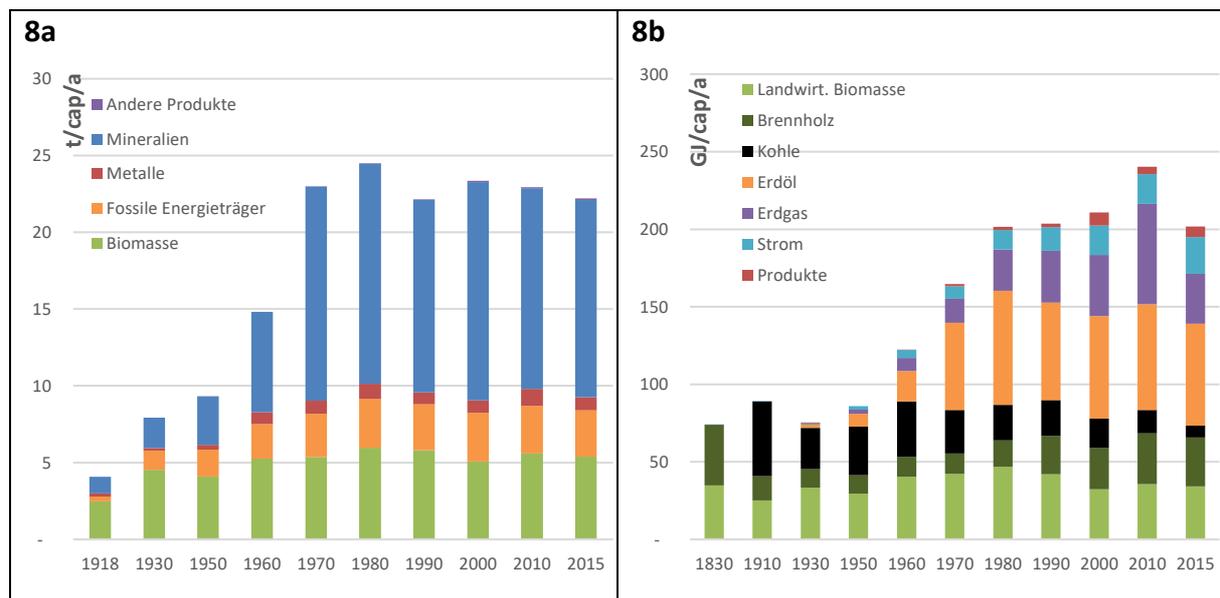


Abbildung 8: Metabolische Raten für ausgewählte Jahre: Materialverbrauch (DMC) pro Kopf [t/cap/a] (9a) und jährlicher Energieumsatz (DEC) pro Kopf [GJ/cap/a] (9b)

Quellen: DEC bis 2010 aus Krausmann and Wiedenhofer 2012; eigene Berechnungen

Das agrarisch geprägte Verbrauchsmuster in den frühen Jahren lässt sich an der klaren Dominanz der Biomasse in den Profilen erkennen. 1830 basierte der Energieverbrauch (Abbildung 8b) noch beinahe ausschließlich auf biogenen Rohstoffen, aber bereits 1910 stammten 54 % der Energie aus Kohle und die aus Biomasse gewonnene Energie sank von 74 auf 41 GJ/cap/a. In der Zwischenkriegszeit stieg der biogene Energieanteil durch den Rückgang im Verbrauch fossiler Energieträger wieder auf ca. 60 %. Das zeitgleiche Auftreten der Energiequellen Erdöl, Erdgas und Strom kennzeichnet den Beginn der zweiten Phase der energetischen Transition. Der Anteil dieser neuen Energieformen blieb aber anteilmäßig noch im einstelligen Bereich. Nach dem Zweiten Weltkrieg ersetzten sie Kohle in ihrer Bedeutung und führten zu einem schnellen Wachstum des Energieverbrauches und waren Grundlage für die zweite Phase der industriellen Transition. 1950 setzte sich das Energieprofil bei einer Gesamtmenge von 86 GJ pro Kopf noch zu 48 % Biomasse, 37 % Kohle, 10 % Erdöl und je 3 % Erdgas und Strom zusammen. Ab etwa 1980 blieb der Energieumsatz relativ stabil, und stieg erst zwischen 2000 und 2010 noch einmal deutlich an, um danach wieder zu sinken. Es lassen sich dabei fortlaufende Verschiebungen im Profil von fossilen Energieträgern in Richtung Energie aus erneuerbaren Energiequellen ablesen. Zum Beispiel setzte sich 1980 der DEC bei einem Gesamtumsatz von 202 GJ pro Kopf noch aus 11 % Kohle, 36 % Erdöl, 13 % Erdgas, 23 % landwirtschaftlicher Biomasse, 9% Brennholz und 6 % Strom zusammen. Bis zum

vergleichbar hohen Gesamtumsatz von 202 GJ pro Kopf im Jahr 2015 hatte sich der fossile Anteil um ca. 6 % reduziert, mit 7 % Kohle, 22 % Erdöl und 25 % Erdgas. Die Anteile von Brennholz (15 %) und Strom (12 %) haben sich hingegen in etwa verdoppelt, während landwirtschaftliche Biomasse auf 17 % zurückging.

Zu Beginn der Analyse des Materialverbrauchs im Jahr 1918 (Abbildung 8a) waren die solarenergetischen Schranken des Agrarregimes bereits klar überschritten, aber Biomasse machte dennoch noch über 60 % des DMCs aus. Bis 1930 kam es anteilmäßig nur geringfügig zu Verschiebungen im Materialverbrauch mit leichten Zunahmen bei der Nutzung fossiler Energieträger, während die absoluten Mengen aller Materialtypen stiegen. Danach folgten die Jahrzehnte des schnellen Wachstums, das materiell vor allem bei den nicht-metallischen Mineralien sichtbar wird. Ab den 1970ern entsprach die Zusammensetzung des Materialverbrauchs dem typischen Profil hoch-industrialisierter Länder (Schaffartzik et al. 2014) mit einem Anteil von ca. zwei Dritteln an Mineralien für den Aufbau, Erhalt und die Nutzung von Gebäuden, Infrastrukturen und langlebiger Produkte, während der Biomasseanteil auf unter 30 % abfiel. Seitdem blieb der Materialverbrauch pro Kopf und seine Zusammensetzung weitgehend konstant.

Im nächsten Kapitel werden unter anderem Relationen zwischen der materiellen und energetischen Entwicklung besprochen.

4 Diskussion

In diesem Kapitel werden zuerst Zusammenhänge zwischen der Entwicklung des Materialverbrauchs und der Materialbestandsinputs mit der wirtschaftlichen und energetischen Entwicklung in Österreich analysiert. Danach folgen Vergleiche der österreichischen Entwicklung des Materialverbrauchs und der darin enthaltenen bestandsbildenden Materialien mit weiteren Länderstudien und eine Kontextualisierung der Beobachtungen im industriellen sozialmetabolischen Transformationsprozess.

4.1 Koppelung und Entkoppelung

Der Begriff Koppelung bezeichnet eine Verflechtung oder Beziehung und Entkoppelung die Auflösung einer solchen. Zusammenhänge zwischen Indikatoren können entweder durch den direkten Vergleich oder anhand von intensiven Indikatoren, die Indikatoren miteinander in Beziehung setzen, wie z. B. die Ressourceneffizienz (auch Materialproduktivität genannt) und definiert als GDP/DMC , beobachtet werden. In Kontext nachhaltiger Ressourcennutzung wird unter Entkoppelung meist die Loslösung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch und den damit zusammenhängen negativen Umwelteinflüssen diskutiert (Krausmann et al. 2017a). Dabei wird zwischen einer (1) relativen und einer (2) absoluten Entkoppelung unterschieden. Beides geht mit einer Verbesserung der Ressourceneffizienz einher, mit dem Unterschied, dass die Entkoppelung vom Wirtschaftswachstum bei (1) ohne und bei (2) mit einer absoluten Reduktion des Ressourcenverbrauchs auftritt (Krausmann et al. 2017a).

In diesem Kapitel werden Verbindungen und mögliche Entkoppelungen des Materialverbrauchs von materiellen, wirtschaftlichen und energetischen Indikatoren besprochen. Als Ausgangspunkt für die folgenden Beobachtungen wurde das Jahr 1950 als Indexjahr ($1950=1$) gewählt. 1918 als Ausgangsjahr zur Beobachtung der Entwicklungen in diesem Kapitel wäre wenig repräsentativ, da es stark von der besonderen Situation am Ende des Ersten Weltkrieges und nach dem Zerfall der Habsburger Monarchie geprägt war. Aufgrund der turbulenten Entwicklung Österreichs in den folgenden Jahrzehnten (Wirtschaftskrise, dem Anschluss an das Deutsche Reich und dem Zweiten Weltkrieg) fiel die Entscheidung auf das Jahr 1950. Die Wachstumsfaktoren verschiedener Indikatoren von 1918 und 1950 bis 2015 können in Tabelle 15 verglichen werden.

Mit 1950 startet die Analyse am Beginn der Phase des schnellen physischen Wachstums und wirtschaftlichen Aufschwungs nach dem Zweiten Weltkrieg. In Abbildung 9 werden die Entwicklungen des Materialverbrauchs und der Materialbestandsinputs (Mio. t/a) dem Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum gegenübergestellt. Diese gelten als wichtige Treiber des physischen Anstiegs. Zur Darstellung der Wirtschaftsleistung, oder des Wohlstands, wurde das reale GDP (auch BIP) zu konstanten Preisen in 2011 US\$ (Bolt et al. 2018) gewählt. Damit werden Verzerrungen durch Preisveränderungen (z. B. durch Inflation) in der langzeitigen Analyse ausgeglichen.

Über den festgelegten Zeitraum (1950-2015) sind Wachstumstrends mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu beobachten. So nahmen zum Beispiel die Wirtschaft und der Materialverbrauch (DMC) in den ersten beiden Jahrzehnten zwar in etwa gleich schnell um das Dreifache zu. Allerdings stagniert der Materialverbrauch seitdem annähernd auf hohem Niveau, während das GDP bis 2008 beinahe ununterbrochen linear weiter anstieg und sich bis 2015 verachtfachte. Die Bevölkerung wuchs im Untersuchungszeitraum kontinuierlich, aber nur sehr gering (bis zu 1 % jährlich). Das Wachstum der Hauptkategorien des

Materialverbrauchs (DMC Biomasse, Fossile, Metalle und Mineralien) lässt deutliche Unterschiede in den Entwicklungen erkennen.

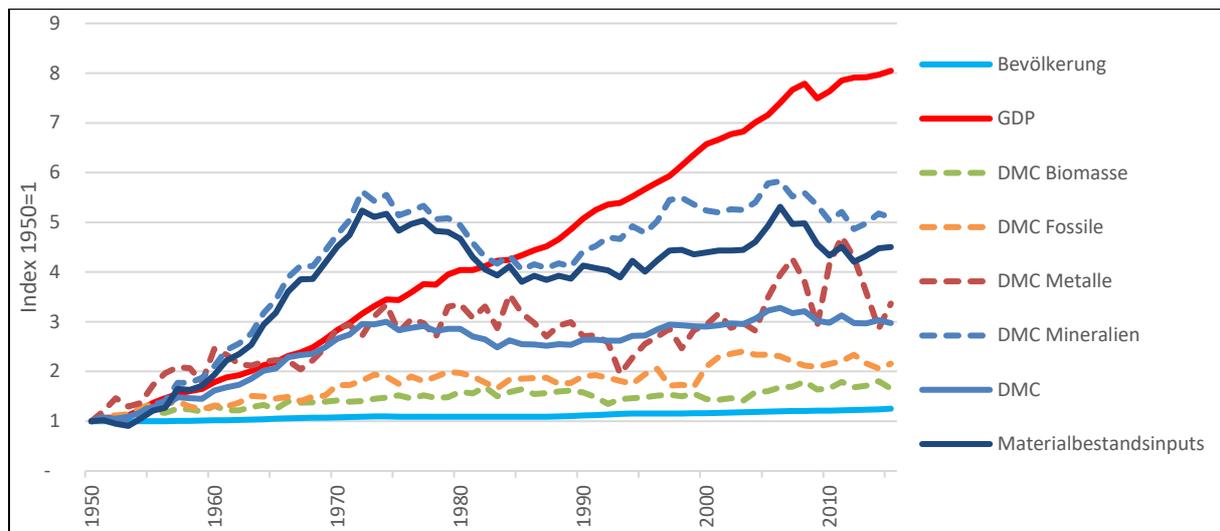


Abbildung 9: Indexierte Entwicklung (1950=1) des Materialverbrauchs (DMC) gesamt und nach Hauptmaterialgruppen, der Materialbestandsinputs, des Bruttoinlandsprodukts (GDP) und der Bevölkerungszahlen 1950-2015

Quellen: Bevölkerung und GDP aus Bolt et al. 2018; eigene Berechnungen

Das industrielle Wachstum steht einerseits in Verbindung mit dem Bevölkerungswachstum und andererseits mit dem Anstieg des Ressourcenverbrauchs pro Kopf (Wiedenhofer et al. 2013). Direkte Zusammenhänge zwischen dem Bevölkerungswachstum und dem Materialverbrauch lassen sich am ehesten anhand der Biomasse identifizieren, da diese unweigerlich an die Nahrungsversorgung gebunden ist. Biomasse aber auch fossile Energieträger haben sich im Vergleich weniger rasant entwickelt als die Erze (Metalle) und Mineralien. Der Biomasseverbrauch und die Bevölkerung erreichten, anders als die fossilen Energieträger, die sich bis in die 1970er verdoppelten und 2000 nochmal sprunghaft anstiegen, keine Verdoppelung. Der Verbrauch von Erzen/Metallen verdoppelte sich im ersten Jahrzehnt rasant, stieg danach erst wieder ab 1968 und erreichte in den 1970er-Jahren das dreifache Niveau, welches bis 1990 anhielt. Nach einem kurzen Einbruch 1993 und zwei sprunghaften raschen Auf- und Abschwüngen mit Höchstwerten in 2007 und 2011 befand sich der Metallverbrauch zuletzt wieder auf einem Stand wie in den 1970er Jahren. Die nicht-metallischen Mineralien nahmen deutlich schneller zu und stiegen bis 1972 um mehr als das Fünffache an. Dies ist auf den Bau großer Infrastrukturen (Straßennetz, Entsorgungssysteme, Staudämme) und zunehmende Urbanisierung und Bautätigkeiten im ländlichen Raum zurückzuführen (BMLFUW et al. 2011). Ab 1972 ging der Verbrauch nicht-metallischer Mineralien bis 1983 um 26 % zurück, auf das vierfache Niveau von 1950, und gewann ab 1990 erneut deutlich dazu. 2006 erreichten die Mineralien nochmals den Höchstwert von 1972 bei einer Vervielfachung um den Faktor 5,8 und sanken bis 2015 um 13 %. Die Koppelung der Entwicklung der Materialbestandsinputs an die Mineralien ist deutlich erkennbar. In den 1990ern lässt sich eine leichte Entkoppelung erkennen, als die Mineralien weiter anstiegen, aber die Inputs leicht zurückfielen. Die Trends folgten weiterhin einem ähnlichen Verlauf, aber der Abstand vergrößerte sich, was auf eine Zunahme anderer Inputs als Baumineralien zurückzuführen ist.

4.1.1 Wirtschaftliche Entkoppelungen

Das Wirtschaftswachstum ist eng mit dem Verbrauch natürlicher Ressourcen sowie daraus resultierenden Abfällen und Emissionen verknüpft (Krausmann et al. 2017a). Politische Strategien streben mit dem Ziel der Verbesserung der Ressourceneffizienz nach einer Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch und Fortschritten in Richtung Nachhaltigkeit (z. B.: in den Sustainable Development Goals (SDG) der UN, dem österreichischen Ressourceneffizienz-Aktionsplan (REAP) oder der österreichischen Initiative Reset2020-Ressourcen.Effizienz.Technologien (Reset2020)) (BMK 2020; Haberl et al. 2017). Das heißt, die Ressourceneffizienz soll gesteigert werden, indem weniger Ressourcen pro Wirtschaftseinheit verbraucht werden oder anders ausgedrückt, der wirtschaftliche Output pro Masseinheit steigt. Das Wirtschaftswachstum soll sich unabhängig vom Ressourcenverbrauch, quasi dematerialisiert, weiterentwickeln (BMLFUW et al. 2011). Konzepte wie Grünes Wachstum (*green growth*) sowie politische Richtlinien zur nachhaltigen Ressourcennutzung zielen auf diese Entkoppelung ab (Krausmann et al. 2017a).

Abbildung 10 zeigt einerseits die indexierte Entwicklung von GDP, DMC und der daraus berechneten Ressourceneffizienz ab 1950 und andererseits die der Materialbestandsinputs und der Effizienz der Inputs, die in Anlehnung an die Ressourceneffizienz, die Entwicklung der wirtschaftlichen Leistung pro kg der Inputs in die Materialbestände anzeigt.

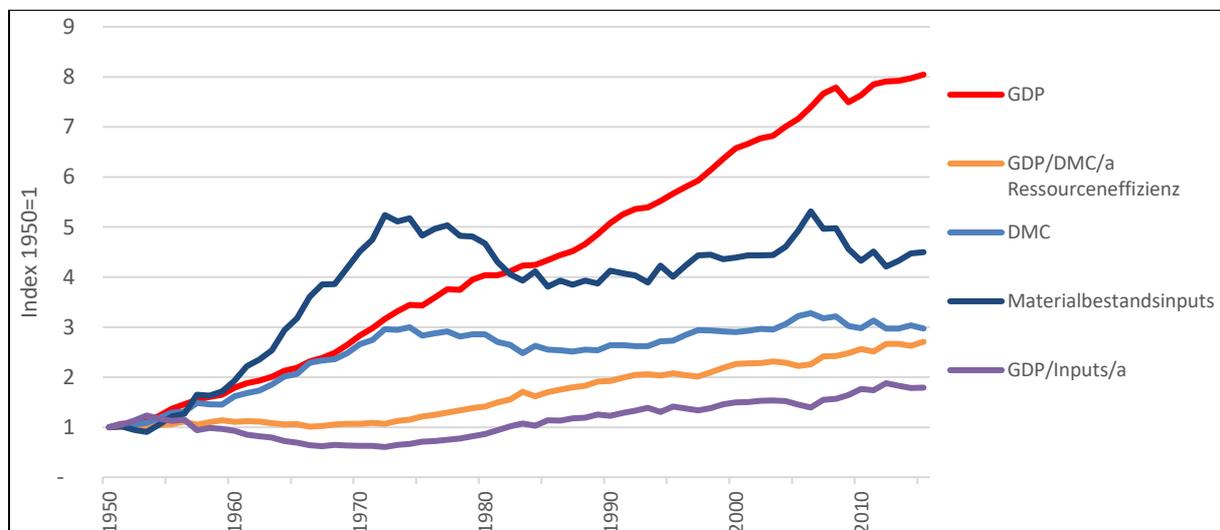


Abbildung 10: Indexierte Entwicklung des Materialverbrauchs (DMC), Bruttoinlandsprodukts (GDP), der Ressourceneffizienz (GDP/DMC), der Materialbestandsinputs und der Effizienz der Materialbestandsinputs (GDP/Inputs) 1950-2015

Quellen: GDP aus Bolt et al. 2018; eigene Berechnungen

Die Ressourceneffizienz ist von 1950 bis 2015 um den Faktor 2,7 gestiegen, von 690 auf 1.867 erwirtschafteten US\$ pro kg Materialeinsatz im Jahr. Der Anstieg der Ressourceneffizienz ist ein Zeichen für eine zunehmende Entkoppelung zwischen dem Wirtschaftswachstum und dem Ressourcenverbrauch. In den ersten beiden Jahrzehnten nahmen beide Indikatoren parallel linear schnell zu und verdreifachten sich. 1974 setzte eine deutliche Entkoppelung ein, als das Wirtschaftswachstum sich bis 2008 fortsetzte. Der Materialverbrauch hingegen sank oder stagnierte von 1975-1995, worauf sich eine Phase mit gemäßigttem Wachstum bis 2008 einstellte und seitdem auf dem dreifachen Niveau von 1950 stockte. Ab den 1970er Jahren kann von einer relativen Entkoppelung gesprochen werden, da sowohl Wirtschaftsleistung als auch Materialverbrauch zunahm, wobei die Wachstumsrate der Wirtschaftsleistung höher

lag. In den Jahren 1975 bis 1983 kam es zu den signifikantesten Rückgängen im Materialverbrauch, wobei aber auch die Wirtschaft leichte Einbrüche zu verzeichnen hatte, weshalb man nur bedingt von einer absoluten Entkoppelung sprechen kann.

Die wirtschaftliche Effizienz der Materialbestandsinputs zeigt einen Rückgang bis 1972, da Materialbestandsinputs bis dahin deutlich schneller zunahm als die Wirtschaftsleistung. Durch die Verringerung der Inputs in den folgenden 10 Jahren wurde 1982 wieder das Ausgangsniveau und einige Jahre der absoluten Entkoppelung erreicht. Die Effizienz stieg währenddessen beinahe kontinuierlich weiter bis zum Faktor 1,8 an. Die jährliche wirtschaftliche Leistung pro kg Materialbestandsinput konnte von 2139 US\$ im Jahr 1950 bis 2015 auf 3825 US\$ gesteigert werden.

Die Rolle von Wirtschaftswachstum für eine nachhaltige Entwicklung, Wohlstand, Lebensqualität und Wohlbefinden wird kontrovers diskutiert und damit auch die der Ressourceneffizienz (Krausmann et al. 2017a). Das Wachstumsparadigma der vorherrschenden Wirtschaftspolitik wird von verschiedenen Richtungen (z. B. von Degrowth- und Suffizienz-Ansätzen) in Frage gestellt und muss vor dem Hintergrund positiver und negativer Folgen bewertet werden (BMLFUW et al. 2015). Global haben Verbesserungen der Ressourceneffizienz bisher zu keiner Reduktion des Materialverbrauchs führen können, da sie von Wirtschaftswachstum und Reboundeffekten überkompensiert wurden (Haberl et al. 2017). Um die notwendige fundamentale Veränderung der Verbrauchsmuster zugunsten einer nachhaltigen Entwicklung einleiten und beobachten zu können, braucht es daher andere Strategien und Wohlstandskonzepte. Große Potenziale werden zum Beispiel im Stock-Flow-Service-Nexus gesehen. Darin wird die Beziehung zwischen Materialflüssen und Materialbeständen betrachtet, die in Kombination Services (z. B. Wohnen, Mobilität, Kommunikation) zur Befriedigung gesellschaftlicher Bedürfnisse und zur Steigerung des Wohlbefindens bereitstellen (Haberl et al. 2017). Indikatoren zu Services und Wohlbefinden versprechen alternative Erkenntnisse zu den wirtschaftlichen Effizienzaussagen des Ressourcenverbrauchs, indem die zugrundeliegenden Zusammenhänge zwischen den Ressourcenflüssen, Materialbeständen und Services in den Vordergrund gerückt werden.

4.1.2 Energetische Entkoppelungen

Weitere Erkenntnisse über Zusammenhänge des Materialverbrauchs und der Materialbestandsinputs können durch die Gegenüberstellung mit der Entwicklung von Energieflüssen, wie in Abbildung 11, gewonnen werden. Der Primärenergieumsatz (DEC) schließt zusätzlich zur technischen Energie, die mit dem technischen Primärenergieaufkommen (TPES) dargestellt wird, noch die landwirtschaftliche Biomasse ein, die für den Stoffwechsel der lebenden Bestände benötigt wird. Das TPES wuchs im Untersuchungszeitraum schneller als der DEC. Ihren Höchststand erreichten beide Indikatoren 2012, wobei der TPES um den Faktor 4,5 und der DEC um 3,6 seit 1950 angewachsen waren.

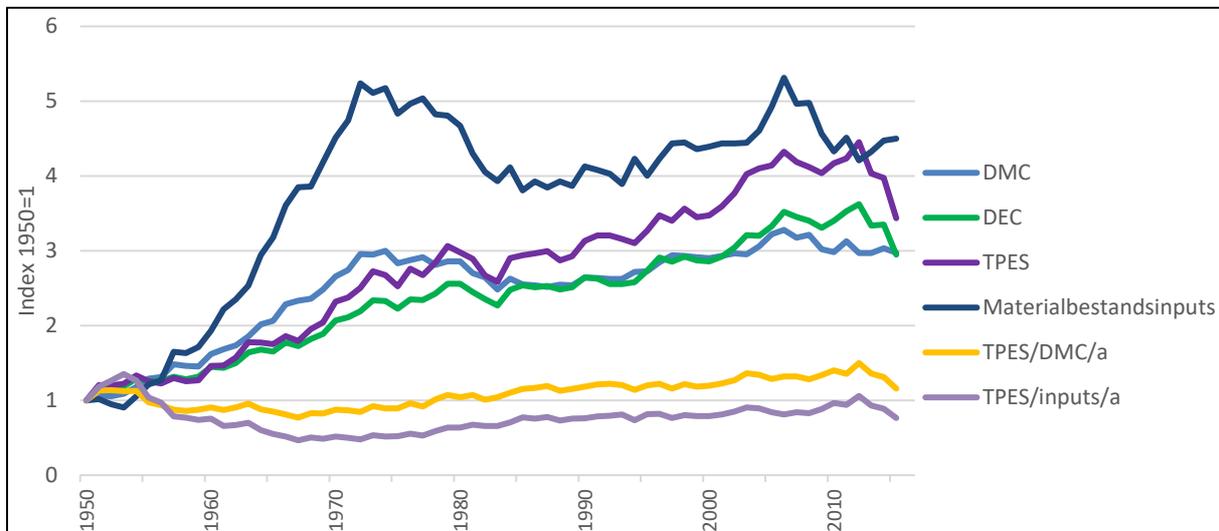


Abbildung 11: Indexierte Entwicklung (1950=1) des Materialverbrauchs (DMC) gesamt und der Hauptmaterialgruppen, der Materialbestandsinputs, des Primärenergieumsatz (DEC), des technischen Primärenergieaufkommen (TPES = DEC exklusive landwirtschaftliche Biomasse), und der Energieeffizienz (DEC/DMC) und (TPES/Materialbestandsinputs) 1950-2015

Quellen: DEC und TPES bis 2010 aus Krausmann and Wiedenhofer 2012; eigene Berechnungen

Der Zusammenhang der Entwicklung des DMC Biomasse mit dem DEC, wie auch jener des DMC Fossile mit dem DEC und dem TPES, lassen sich im Entwicklungsverlauf gut erkennen (Vgl. Abbildung 9 und 11). Ebenfalls stark an die technische Energie gekoppelt sind der Verbrauch der Mineralien und die Materialbestandsinputs, was sich an den Trends in Abb. 11 ablesen lässt. Zum Abbau, Transport und zur Verarbeitung der großen Mengen an Mineralien, die seit 1950 um das Fünffache angestiegen sind, wird viel Energie benötigt. Außerdem werden für das steigende Verkehrsaufkommen, wobei 50 % der transportierten Güter mineralische Rohstoffe sind, neue Infrastrukturen benötigt, wodurch das Wachstum weiter vorangetrieben wird (BMLFUW et al. 2011).

Die Materialbestandsinputs und der TPES wuchsen schneller als DMC und DEC. Um die Energieintensität des Materialverbrauchs, also die Energie je Einheit DMC, und die Energieintensität der Materialbestandsinputs, Energie je Einheit Inputs, zu analysieren wurde der TPES herangezogen. Bis 2012 stieg der TPES um den Faktor 4,5, bevor er danach wieder auf das 3,4-fache Niveau von 1950 zurück ging.

Die Energieintensität des Materialverbrauchs ist in den ersten beiden Jahrzehnten gesunken, da der DMC schneller als der TPES zunahm. Danach näherten sich beide Entwicklungen an und erreichten 1978-1983 erneut die Intensität von 1950, da sich die beiden Entwicklungen hier beinahe deckten. Seitdem stieg die Intensität kontinuierlich leicht an, da das Wachstum des TPES den DMC überholte und erreichte ihren Höhepunkt 2012 bei einem Anstieg um 50% seit 1950. Danach sank der TPES und schlussendlich betrug die Energieintensität des Materialverbrauchs sowohl 1950 als auch 2015 6 GJ/t/a. Es lässt sich somit eine leichte relative Entkoppelung erkennen, die zuletzt allerdings rückläufig war.

Die Inputs in die Materialbestände nahmen bis 1973 deutlich schneller zu als das technische Primärenergieaufkommen, weshalb sich die Energieintensität der Inputs bis dahin in etwa halbierte. Obwohl das Wachstum der Inputs danach deutlich absank und folgend stagnierte, während der TPES weiter anstieg, steigerte sich die Effizienz nur langsam. Von 1990 bis 2009 lassen sich Ähnlichkeiten in den Verläufen erkennen worauf eine Entkoppelung folgte, da der TPES weiter anstieg, während die Inputs sanken. Danach folgte aber sofort eine Trendumkehr

und seit 2013 fiel der TPES ab und die Inputs stiegen an. Seit 1950 hat sich die Energieintensität der Materialbestände von 17 GJ/t/a auf 13 GJ/t/a im Jahr 2015 reduziert.

4.1.3 Metabolische und wirtschaftliche Raten

In Abbildung 12 werden die energetische (grüne Linie), materielle (blaue Linie) und wirtschaftliche (rote Linie) Entwicklung pro Kopf von 1830 bis 2015 gegenübergestellt. Diese Relationen wurden für Österreich bereits von Wiedenhofer et al. (2013) untersucht (siehe Figure 2) und mit anderen Ländern verglichen. Hier wurden im Unterschied die aktuellen Ergebnisse des DMCs und DECs sowie das GDP laut neuester Datenbank des Maddison Projektes (Bolt et al. 2018) herangezogen.

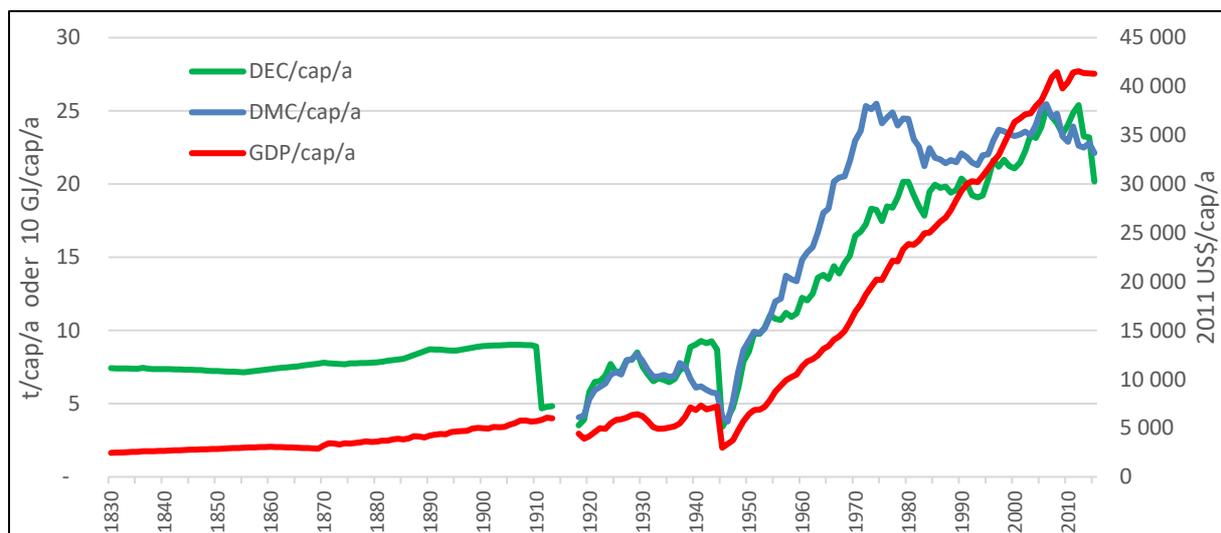


Abbildung 12: Jährliche Pro-Kopf-Verbräuche von Material (DMC/cap/a) in t, Energie (DEC/cap/a) in GJ und das GDP pro Kopf (GDP/cap/a) in 2011 US\$/cap/a von 1918-2015

Quellen: Bevölkerung und GDP aus Bolt et al. 2018; DEC bis 2010 aus Krausmann and Wiedenhofer 2012; eigene Berechnungen

Bis 1950 lassen sich ähnliche Verläufe in der Entwicklung der drei Indikatoren erkennen, die auf eine enge Koppelung von Ressourcenverbrauch und wirtschaftlicher Entwicklung schließen lassen. Nach einem Einbruch am Ende des Zweiten Weltkriegs kam es bei allen Indikatoren zu einem starken linearen Wachstum, wobei der DMC und GDP von 1950 bis 1970 um durchschnittlich 5 % und der DEC um 3 % pro Jahr zunahm. Die Ölpreiskrisen in den 1970er Jahren und die damit verbundenen Rezessionen standen im Zusammenhang mit einer gewissen Dematerialisierung der wirtschaftlichen Entwicklung und einer Stabilisierung der Ressourcenverbräuche. Beim Materialverbrauch setzte 1972 eine Trendwende ein, der DEC brach nach 1980 ein und stagnierte vor einer erneuten Wachstumsphase, während der GDP bis 2008 kontinuierlich weiter zunahm und sich seit dem kurzen, aber deutlichen Einbruch bei ca. 41.000 (2011) US\$ hielt.

Durch die gestiegene Energieverfügbarkeit nach dem Zweiten Weltkrieg konnten große Materialmengen mobilisiert und in Materialbeständen angelegt werden, die wieder weitere Material- und Energieflüsse zur Nutzung und Instandhaltung nach sich zogen und die zukünftigen Verbrauchsmuster nachhaltig mitbestimmten und auf hohem Niveau hielten. Die Weltwirtschaftskrise 2008 führte neben der Stagnation der Wirtschaft zu einem Rückgang des DMC und DEC pro Kopf, was wiederum auf eine enge Koppelung von Ressourcenverbrauch

und wirtschaftlicher Entwicklung hindeutet. Perioden wirtschaftlicher Stagnation oder Rezession ziehen in der Regel einen deutlichen und oft länger andauernden Rückgang im Ressourcenverbrauch nach sich. Doch der Zusammenhang zwischen GDP, DMC und DEC kann durch verschiedene Faktoren verzerrt werden. Besonders Verschiebungen der Produktion und Industrie ins Ausland und die zunehmende Wertschöpfung aus dem Dienstleistungssektor führen dazu, dass Koppelungen aufgeweicht werden. Zusätzlich zur Frage der Ressourceneffizienz sind auch jene nach einer Dematerialisierung, Deindustrialisierung und Sättigung mit Materialbeständen im Entwicklungsverlauf und mögliche Wendepunkte zu stellen.

4.2 Metabolische Transitionen

4.2.1 Die industrielle Transition Österreichs

Der industrielle Übergang verlief international unterschiedlich schnell, aber es lässt sich eine Abfolge von vier typischen Transitionsphasen in der quantitativen Entwicklung ausgewählter Indikatoren erkennen, die eine typische S-Kurve zeichnen (siehe Abbildung 13) (Wiedenhofer et al. 2013).

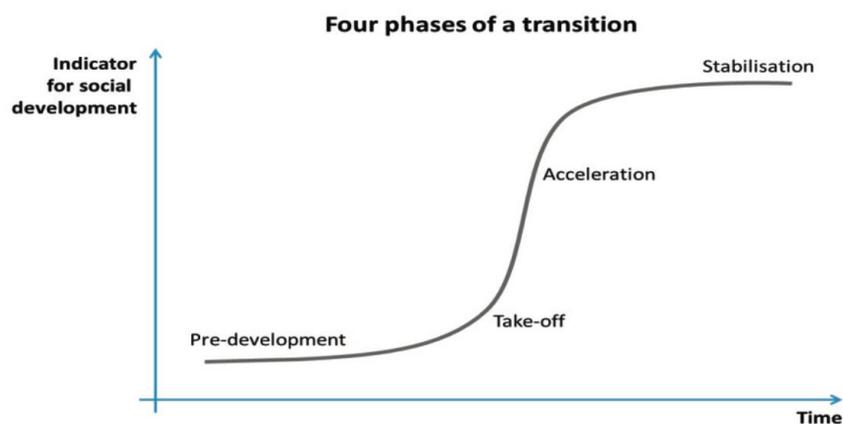


Abbildung 13: Die vier typischen Phasen einer Transition

Quelle: Wiedenhofer et al. 2013

Für Österreich kann dieser Verlauf im Materialverbrauch, im Primärenergieumsatz und bei den Materialbestandsinputs insgesamt, pro Kopf und indexiert (Abbildungen 6-12) beobachtet werden, mit einer Vorentwicklung ab 1850, einem gehemmten Take-off in der Zwischenkriegszeit und einer klaren Beschleunigungsphase nach dem Zweiten Weltkrieg. Beim DMC und den Materialbestandsinputs ist eine Stabilisierung ab den 1970ern zu verorten. Beim Primärenergieumsatz lassen sich ab 1980 Stagnation aber auch noch Wachstumsphasen erkennen, weshalb erst die nächsten Jahre eine klare Aussage über dessen Stabilisierungsniveau zulassen werden.

In Tabelle 15 werden wichtige Indikatoren und Ergebnisse der durchgeführten Analysen zusammengefasst und den vier Phasen zugeordnet.

Tabelle 15: Schlüsselindikatoren zu ausgewählten Zeitpunkten in den vier Übergangsphasen und die jeweiligen Wachstumsfaktoren von 1918 und 1950 bis 2015.

Indikatoren	Einheit	Vorentwicklung			Take-off	Beschleunigung		Stabilisierung			Wachstums-faktoren	
		1830	1910	1918	1930	1950	1970	1980	2000	2015	2015/ 1918	2015/ 1950
Bevölkerung	[1000 cap]	3538	6614	6727	6684	6935	7467	7549	8059	8684	1,3	1,3
Bruttoinlandsprodukt (BIP oder GDP)	[Mio. 2011 US\$]	8711	37733	29801	41554	44564	126192	180089	293049	358597	12	8
Ressourcen-effizienz (GDP/DMC)	[US\$/t]	-	-	1089	785	690	735	975	1563	1868	3	2
Materialverbrauch DMC	[Mio t/a]	-	-	27	53	65	172	184	188	192	7	3
Materialverbrauch pro Kopf	[t/cap/a]	-	-	4	8	9	23	24	23	22	5	2
Anteil Biomasse DMC/cap	[%]	-	-	61	57	44	23	24	22	24	3	2
Anteil Metalle DMC/cap	[%]	-	-	5	2	3	4	4	3	4	5	3
Anteil Mineralien DMC/cap	[%]	-	-	26	25	34	61	59	61	58	16	5
Anteil Fossile DMC/cap	[%]	-	-	8	16	19	12	13	14	14	12	2
PTB	[Mio. t/a]	-	-	-	5	5	15	22	31	35	-	7
Handelsabhängig-keit (PTB in % von DMC)	[%]	-	-	-	9	8	9	12	17	18	-	2
Materialbestands-inputs	[Mio t/a]	-	-	10	14	21	94	97	91	94	10	5
Bestandsbildender Anteil am DMC	[%]	-	-	36	27	32	55	53	49	49	-	-
Materialanteil zur materiellen Nutzung am DMC	[%]	-	-	41	34	40	67	65	69	67	-	-
Materialanteil zur energetischen Nutzung am DMC	[%]	-	-	48	60	54	29	31	27	29	-	-
DEC Energieumsatz	[PJ]	263	590	237	504	594	1230	1521	1699	1752	7	3
Energieverbrauch pro Kopf	[GJ/cap/a]	74	89	35	75	86	165	202	211	202	6	2
Anteil Biomasse am DEC/cap	[%]	99	46	88	60	48	34	32	28	33	-	-
Anteil Kohle am DEC/cap	[%]	0,3	54	12	35	37	17	11	9	4	-	-
Anteil Erdöl am DEC/cap	[%]	0	0	0	3	10	34	36	31	33	-	-
Anteil Erdgas am DEC/cap	[%]	0	0	0	0	3	9	13	19	16	-	-
Anteil Strom am DEC/cap	[%]	0	0	0	1	3	5	6	9	12	-	-
Anteil Produkte am DEC/cap	[%]	0	0	0	1	0	1	1	4	3	-	-
Energieeffizienz DEC/DMC	[GJ/t]	-	-	9	10	9	7	8	9	9	1	1

Quellen: Bevölkerung und GDP aus Bolt et al. 2018; DEC und TPES aus Krausmann and Wiedenhofer 2012; eigene Berechnungen

Neben den mengenmäßigen Zunahmen hat sich auch die Qualität der Flüsse im Zuge der Industrialisierung verändert. Zum Beispiel lösten mineralische Materialien die Biomasse als mengenstärkste Kategorie des DMCs während der Beschleunigungsphase ab und der Anteil der materiellen Nutzung überzog seitdem den energetisch genutzten Anteil des DMCs. Ein wesentlicher Treiber für die Zunahme an mineralischen Materialien war das massive Wachstum der Materialbestandsinputs um den Faktor 5 seit 1950 (bzw. 10 seit 1918), und der bestandsbildende Anteil macht seitdem in etwa die Hälfte des DMCs aus. Diese Entwicklungen sind alle auf den besonders stark zunehmenden Verbrauch von Braurohstoffen in Phasen des schnellen wirtschaftlichen Wachstums zurückzuführen, der zu einer fortschreitenden Industrialisierung und Urbanisierung beitrug (BMLFUW et al. 2011). Zusätzlich wurden in wirtschaftlich schwachen Phasen Investitionen in große Bauprojekte auch als Instrument zur Ankurbelung der Wirtschaft genutzt und der Verbrauch dadurch weiter gesteigert (BMLFUW et al. 2011). Die Instandhaltung der aufgebauten Bestände an Gebäuden, Infrastrukturen und Maschinen hält den Ressourcenverbrauch in industrialisierten Ländern weiter hoch, neben einer weiteren Expansion der Bestände sowie fortlaufenden Anpassungen der Materialbestände an sich verändernde gesellschaftliche Bedürfnisse und Standards. Der Anteil der Mineralien am DMC lag ab den 1970ern bei ca. 60 % und der DMC pro Kopf bei ca. 16 t 1970 und 13 t 2015. Aus der Beobachtung der Inputs können Rückschlüsse auf die Entwicklung der Materialbestände im Kontext der industriellen Transformation gezogen werden. Die Inputs lassen auf hohe Instandhaltungsleistungen und weitere Neuanlagen schließen. Die hier zusammengestellten Daten können in zukünftigen Analysen auch dazu genutzt werden, die Entwicklung der materiellen Bestände in Österreich zu berechnen, etwa mit Hilfe des MISO Modells (Wiedenhofer et al. 2019).

Die Industrialisierung wurde getragen von der Energie aus fossilen Energieträgern und damit verbundenen Technologien. Der Aufschwung von Kohle, Erdöl und Erdgas und ihre wechselnde Relevanz im Energiemix lassen sich aus der Zusammensetzung des DEC in Tabelle 15 ablesen. Während sich ein Ende des Energieumsatzes aus Kohle bereits abzeichnet, auch im Hinblick auf internationale und nationale Klimaziele, lassen die jüngsten Veränderungen in der Zusammensetzung des DEC auf einen weiter voranschreitenden Übergang von fossilen Energieträgern zu erneuerbaren Quellen hoffen.

Hohe Verfügbarkeit von Energie, zunehmend vernetzte Infrastrukturen, Mobilitätstechnologien und Massenproduktion können als die biophysischen Voraussetzungen für die zunehmende Globalisierung der Materialflüsse verstanden werden. Aus der gestiegenen Nachfrage nach Rohstoffen und Handelswaren aus aller Welt resultierte eine Verdoppelung der Importabhängigkeit im österreichischen DMC von 9 % im Jahr 1930 auf 18 % in 2015.

Die Produktionsverhältnisse und Konsumgewohnheiten der Industriegesellschaft führten zu Ressourcenverbräuchen deutlich über denen von Agrargesellschaften. Eine erneute Transformation dieser sozio-ökologischen Verhältnisse wird notwendig sein, um den Verbrauch auf ein nachhaltiges Niveau zu reduzieren, wobei auch die Schließung von materiellen Kreisläufen (Kreislaufwirtschaft) eine wichtige Rolle spielt.

4.2.2 Die industrielle Transition im Ländervergleich

Um die Größenordnung und den Verlauf des österreichischen Materialverbrauchs besser einschätzen zu können, wurde der jährliche Materialverbrauch pro Kopf jenem der USA (Gierlinger and Krausmann 2012), des Vereinigten Königreichs (UK) (Schandl and Schulz 2002; Gingrich 2011; UNEP-IRP 2018) und von Japan (Krausmann et al. 2011) gegenübergestellt (Abbildung 14a). Bestimmte Aspekte der Entwicklungen von DMC, DEC und GDP pro Kopf in

Österreich und anderen Ländern wurden auch in Wiedenhofer et al. (2013) untersucht. Die österreichische Entwicklung des DMCs konnte im Zuge dieser Arbeit um die Jahre 1918-1959 und 2001-2015 erweitert werden.

Alle Datensätze für die Länder wurden nach den Grundsätzen der MFA zusammengestellt, aber Unterschiede in den Datengrundlagen und den angewandten Schätzverfahren erschweren die direkte Vergleichbarkeit. Bei der Berechnung des Materialverbrauchs für Österreich wurde, im Gegensatz zu den anderen Arbeiten, zum Beispiel auch die zusätzlichen Baumineralien in Tragschichten eingeschlossen – was tendenziell dazu führt, dass die Werte für Österreich im Vergleich relativ höher liegen.

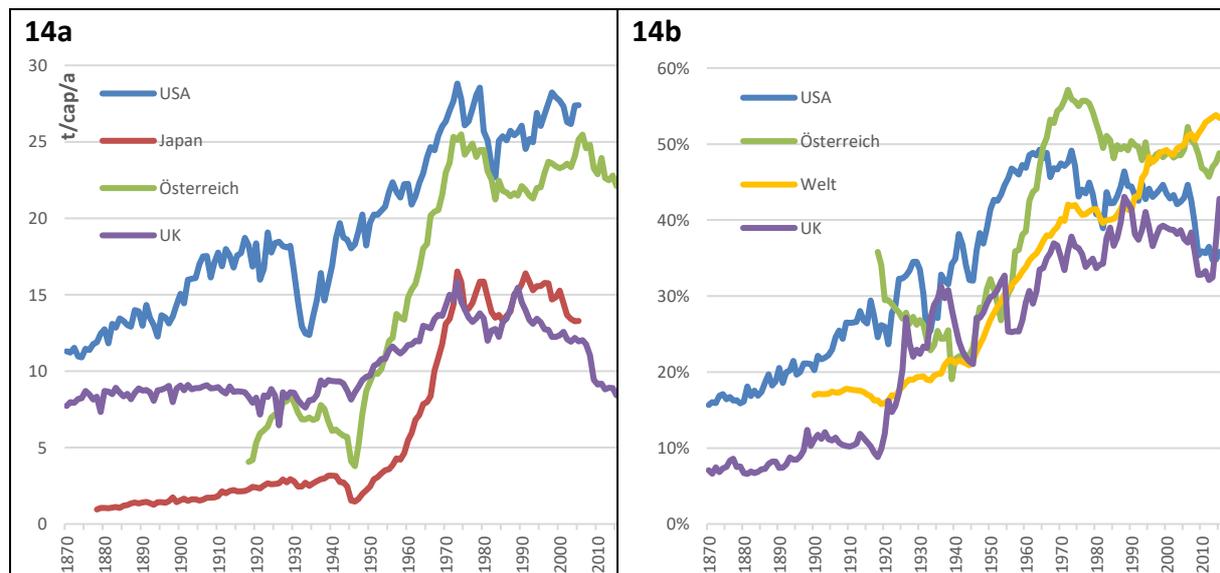


Abbildung 14: Materialverbrauch pro Kopf von Österreich (1918-2015), USA (1870-2005), UK (1870-2015) und Japan (1878-2005) [t/cap/a] (13a) und Anteil der Materialbestandsinputs (Bestandsbildenden Materialien) am DMC von Österreich (1918-2015), USA (1870-2015), UK (1870-2015) und global (1900-2015) [%] (13b)

Quellen: 14a: USA aus Gierlinger and Krausmann 2012; Japan aus Krausmann et al. 2011; UK aus Schandl and Schulz 2002, Gingrich 2011 und UNEP-IRP 2018; Österreich aus eigenen Berechnungen; 14b: USA aus Dammerer 2020; UK aus Streeck et al. 2020; Welt aus Krausmann et al. 2018; Österreich aus eigenen Berechnungen

Die sozialmetabolische Transition verlief in den Ländern unterschiedlich schnell und auf unterschiedlichem Niveau, aber für alle Länder lassen sich ähnliche Trajektorien mit den vier Phasen einer Transition erkennen (siehe Abbildung 14). Während das Vereinigte Königreich und die USA als Vorreiter der industriellen Transition gelten und die Vorentwicklungen der Transformationsprozesse bis ins mittlere 18. Jahrhundert zurückgehen, gehören Österreich und Japan zu den Nachzüglern unter den Industriestaaten, mit bescheidenen Anfängen der Nutzung fossiler Energieträger ab 1850. Dies lässt sich am deutlichsten am sehr steilen Anstieg des Materialverbrauchs nach dem Zweiten Weltkrieg der beiden Länder ablesen. Davor waren die metabolischen Profile von Österreich und vor allem Japan noch stärker agrarisch geprägt, aber erste Industrialisierungsprozesse führten bereits zu Zunahmen im Materialverbrauch. Dagegen verlief der Anstieg in den anderen beiden Ländern kontinuierlicher und der Materialverbrauch lag bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf einem hohen Niveau mit stabilen 8 t/cap/a im UK und bis zum Börsenkrach 1928 deutlich zunehmenden Verbräuchen von 13 auf 18 t/cap/a in den USA. In der in allen vier Ländern sichtbaren

Beschleunigungsphase nach dem Zweiten Weltkrieg war der Anstieg in den USA und im UK deutlich weniger rasant als in Österreich und Japan. Von 1950 bis 1972 stiegen die Verbräuche pro Kopf der Länder um folgende Wachstumsfaktoren: USA 1,4; UK 1,5; Österreich 3; Japan 6. Damit etablierte sich in allen vier Ländern ein typisches industrielles sozialmetabolisches Profil. Wiedenhofer et al. (2013) definierten einen Materialverbrauch von 3-6 t/cap/a als typisch für ein agrarisches metabolisches Profil und von 15-25 t/cap/a für das industrielle Regime.

Seit den 1970er Jahren kam es in allen Länderbeispielen zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Rückgängen im Verbrauch, aber auch erneute Anstiege, die nochmals in etwa zu den Höchstzahlen der 1970er führten. Im UK wurde das zweite Hoch 1990, in Japan 1992, in den USA 2000 und in Österreich 2008 erreicht. Seitdem gingen die Verbrauchszahlen erneut zurück, die des UK, mit einer Reduktion von 62 % seit 1990 von jährlich ca. 15 auf 8 t pro Kopf bis 2015, am deutlichsten. In Österreich ging der Verbrauch hingegen seit 2008 um ca. 3 t pro Kopf zurück, was einen Rückgang von ca. 11% in 7 Jahren entspricht.

Für den Beginn der Stabilisierung kann keine gemeinsame Bruchstelle im internationalen Vergleich gefunden werden, weshalb von mehreren zugrundeliegenden Ursachen auszugehen ist (Wiedenhofer et al. 2013). Ein wesentlicher Ausgangspunkt für den einsetzenden Strukturwandel in den Ressourcenflüssen sind die Ölpreisschocks, die sich im österreichischen Verbrauch vor allem 1972 und 1979 niederschlugen, und zu stärkeren Anstrengungen in der Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in Unternehmen, Gebäuden und im Verkehrssystem führten (Wiedenhofer et al. 2013). Weitere Gründe für eine Dematerialisierung in den ausgewählten Ländern können unter anderem Verschiebungen in den Wirtschaftssektoren mit einer zunehmenden Auslagerung von Produktionsprozessen in Entwicklungsländer und Trends hin zu Dienstleistungen und Informations- und Kommunikationstechnologien sein (Wiedenhofer et al. 2013). Mutigere Interpretationen könnten in dieser Entwicklung auch den Beginn einer neuen sozialmetabolischen Transition sehen (Wiedenhofer et al. 2013), die im besten Fall zu deutlich nachhaltigeren Verbrauchsmustern führen könnte. Ob der beobachtete Rückgang in den letzten Jahren dauerhaft ist, wird sich allerdings erst zeigen.

Neben den Studien zum Materialverbrauch wurden auch bereits die Materialbestände der USA (Dammerer 2020), des UK (Streeck et al. 2020) und des globalen Systems (Krausmann et al. 2018) untersucht. Aus diesen Arbeiten lassen sich auch Daten zu den bestandsbildenden Materialien ableiten und mit den Ergebnissen für Österreich vergleichen. In Abbildung 14b werden die bestandsbildenden Anteile am Materialverbrauch von Österreich mit jenen der USA, des Vereinigten Königreichs und der Welt verglichen, wobei einige Unterschiede in den dargestellten Kategorien zu beachten sind. Bei den Materialbestandsinputs von Österreich handelt es sich um Bruttobestandszuflüsse (*gross additions to stocks*) bei denen nur bestimmte Prozess- und Verarbeitungsverluste am Beginn der Prozesskette in Abschlag gebracht und nicht zwischen primären und sekundären Materialien unterschieden wurde.

Beim UK werden die geschätzte Anteile Bruttozuwächse am DMC herangezogen, welche primäre und sekundäre Flüsse umfassen und von denen bereits Herstellungsverluste (*manufacturing losses*) abgezogen wurden (Streeck et al. 2020). Die Schätzungen der Anteile zur USA stammen von Dammerer (2020), die den primären und sekundären Nettozuwächsen (*net additions to stocks*) der Materialbestände vor Abzug weiterer Herstellungs- und Bauverluste entsprechen. Dadurch bildet der Anteil der USA alleine den Bestandszuwachs und keine weiteren Erhaltungsflüsse ab. Da aber gleichzeitig noch keine Verarbeitungsverluste abgezogen wurde ist die Vergleichbarkeit mit den anderen Entwicklungen zusätzlich schwer einzuschätzen.

Die Zahlen zum globalen bestandsbildenden Anteil am DMC gehen auf die Arbeit von Krausmann et al. (2018) zurück und entsprechen der darin beschriebenen und kalkulierten Nutzungsart „*Stock building*“ Materialien. Sie gehen auf Schätzungen der primären Materialbestandsinputs zurück und Verarbeitungsverluste wurden exkludiert.

Weitere Details über die unterschiedlichen Schätzungen und Zusammensetzungen der Materialbestände können in den jeweiligen Arbeiten nachgelesen werden. Trotz dieser Unterschiede sind die grundlegenden Trends und auch die Dimensionen der Flüsse vergleichbar.

Bis zum Ersten Weltkrieg ist der bestandsbildende Anteil am DMC in den USA von 16 % 1870 auf 27 % 1917 angestiegen, ebenso hat der DMC deutlich zugenommen. Im UK stieg der Anteil weniger schnell von 7 % auf 11 % im Jahr 1915 während der DMC beinahe konstant bei ca. 8 t/cap/a blieb, was auf eine Reduktion in anderen Verbrauchsbereichen deutet. Auf globaler Ebene wurde der Anteil der Inputs in die Materialbestände in den ersten beiden Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts auf 17 % geschätzt. Nach kleinen Rückgängen während des Ersten Weltkrieges folgten danach in den zusätzlichen Fallstudien deutliche Zuwächse in den bestandsbildenden Anteilen mit Ausnahme vom Zweiten Weltkrieg (bestandsbildende Anteile am DMC (1925 auf 1950): UK (20 auf 30 %); USA (32 % auf 41 %); Weltweit (18 % auf 27 %)), während sich jener von Österreich von 35 % 1918 auf 19 % im Jahr 1939 verkleinerte und erst nach dem Zweiten Weltkrieg auf ca. 30 % 1950 aufholte.

Nach dem Zweiten Weltkrieg erfolgte in allen Fallbeispielen ein weiterer Anstieg und schließlich in den drei Ländern (aber nicht auf globaler Ebene) nach einem Peak ein langsamer Rückgang des Anteils. Der Anstieg nach dem Zweiten Weltkrieg ist vor allem auf den massiven Ausbau von Infrastrukturen und Urbanisierungsprozesse zurückzuführen und spiegelt sich vor allem auch in einem gestiegenen Verbrauch an mineralischen Materialien in den metabolischen Profilen wider. Der Rückgang im Anteil der bestandsbildenden Materialien bei gleichzeitiger Stabilisierung im DMC (Abbildung 14a) deutet auf eine neuerliche Verschiebung in der Struktur der Materialnutzung hin und möglicherweise auch auf eine Verlangsamung oder sogar Sättigung hinsichtlich des Aufbaus von Beständen. In den Ländern sind im Beobachtungszeitraum unterschiedliche Höhepunkte der bestandsbildenden Anteile am DMC und darauffolgende langsame Rückgänge zu erkennen. In den USA wurde der Peak in den 1960ern bei ca. 47 %, im UK 1988 mit 43 % und in Österreich 1972 mit 57 % erreicht. Danach fielen die Anteile in den USA auf ca. 40 %, im UK auf ca. 37 % und in Österreich auf ca. 50 %. 2008 löste in allen drei Ländern einen Einbruch aus, wovon sich Österreich und das UK wieder erholten, welcher in den USA jedoch zu einer Stagnation bei ca. 35 % führte.

Im Vergleich mit den Länderbeispielen gab es auf globaler Ebene keinen ausgeprägten Peak und Rückgang, sondern einen steigenden Trend im Zusammenhang mit global voranschreitenden Infrastrukturausbauten und Urbanisierungstrends, vor allem in Schwellen- und Entwicklungsländern. Das Wachstum wurde allein in den 1970ern durch die Einbrüche der westlichen Industrieländer bei ca. 40 % gebremst, aber konnte bereits in den 1980ern weiter steigen und erreichte zuletzt 53 %.

Zusammengefasst lassen sich die Phasen der Transition und der Übergang zu einem industriellen sozialmetabolischen Profil sowohl am DMC als auch im Verlauf der bestandsbildenden Anteile am DMC der Industrieländer erkennen; Österreich weist dabei eine für industrialisierte Ökonomien typische Entwicklung auf. Eine Überschneidung mit der nächsten metabolischen Transition ist bereits in Ansätzen zu erkennen. Einige Kurven stagnieren oder biegen sich bereits durch erste Reduktionen im Verbrauch, wie es Rufe nach einer nachhaltigen Entwicklung fordern. Es werden allerdings noch einige Jahrzehnte

vergehen, bevor diese nächste Phase der Transition rückblickend analysiert und interpretiert werden kann.

4.2.3 Nachhaltige Transitionen

Für die allseits geforderte Transition zu einem nachhaltigen gesellschaftlichen Stoffwechsel sind fundamentale Veränderungen der Ressourcennutzungsmuster notwendig (Haberl et al. 2017). Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass die Materialbestandsinputs eine wichtige Rolle im industriellen Materialverbrauch spielen und in Österreich seit 1980 die Hälfte aller Materialflüsse ausmachen. Arbeiten zur Entwicklung von Materialbeständen weisen weiter darauf hin, dass Dynamik und Design von Materialbeständen sehr langfristige Auswirkungen auf den Material- und Energiebedarf haben, aber auch auf den Anfall von Abfällen und damit auch auf die Möglichkeiten einer Kreislaufwirtschaft (Krausmann et al. 2017, Wiedenhofer et al. 2019).

Anstatt weiterhin primär nach einer Verbesserung der Ressourceneffizienz zu streben können neue servicebasierte Perspektiven hilfreich sein, um mögliche Potenziale zur Reduktion der Ressourcenflüsse identifizieren zu können. Dabei ist nach den zugrundeliegenden Ressourcenflüssen und Verknüpfungen zwischen Materialbeständen, Ressourcenflüssen und Services zur Befriedigung grundlegender materieller Bedürfnisse zu fragen (Haberl et al. 2017). Eine zentrale Frage dabei ist, wie diese Bedürfnisse bei einem geringeren Ressourcenverbrauch und weniger und effizienter genutzten Materialbeständen gestillt werden können bzw. Lebensqualität bei einem reduzierten Metabolismus sogar gesteigert werden kann. Die mit den Materialbeständen verbundenen Ressourcenflüsse sind abhängig vom jeweiligen Standort, der Funktion und den spezifischen Eigenschaften des Materialbestandstyps (Haberl et al. 2017). Grundlegend für eine umfassende nachhaltige Transition und Strategie ist eine Verbesserung der Datenlage und des Wissensstands zu den Materialbeständen, ihren Merkmalen und ihrer Verfügbarkeit für Recyclingkreisläufe.

Um Nachhaltigkeitsziele und eine Transition in die gewünschte Richtung erreichen zu können, werden weitreichende gesellschaftliche Veränderungen und politische Interventionen notwendig sein. Eine nachhaltige Transition ist dabei als komplexer und langwieriger Prozess zu verstehen, der mehrere Übergänge beinhaltet. Ghisellini and Ulgiati (2019) sprechen von Subtransitionen der nachhaltigen Transition, worunter unter anderem die Energietransition, mit dem Übergang von der Nutzung fossiler Energieträger zu erneuerbaren Energiequellen, oder die Transition zu einer Kreislaufwirtschaft fallen. Systematische ressourcenschonende Strategien zur Verlängerung von Lebensdauern, Verbesserung der Instandhaltung und Stabilisierung oder Reduzierung der Materialbestände sind ein Angelpunkt zur Entwicklung nachhaltigerer Natur-Gesellschafts-Interaktionen (Wiedenhofer et al. 2016). Der Weg zu einem nachhaltigen Übergang wird über weitere Forschungen in Wissenschaft und Wirtschaft sowie politisches und soziales Engagement und einem gesellschaftlichen kritischen Paradigmenwechsel führen (Wiedenhofer et al. 2016).

5 Conclusio

Im Zuge der industriellen Transition hat sich der soziale Stoffwechsel von Österreich gesamt und pro Kopf sowohl quantitativ als auch qualitativ deutlich verändert, wobei der Übergang in der Phase der Beschleunigung von 1950 bis 1972 am markantesten war. Österreich zählt zu den Nachzüglern der industriellen Transformation unter den Industrieländern und seine Verbräuche des ersten Halbjahres des 20. Jahrhunderts und der Beginn der Nutzung von Erdöl und Erdgas wurden zusätzlich von den beiden Weltkriegen und der Weltwirtschaftskrise von 1929 gehemmt. Der österreichische Materialverbrauch und der Primärenergieumsatz vervielfachten sich seit 1918 um das Siebenfache (27 Mio. t/a oder 237 PJ/a) und um das Dreifache seit 1950 (65 Mio. t/a oder 594 PJ/a) und lagen 2015 bei 192 Mio. t/a und 1752 PJ/a. Das von Biomasse geprägte agrarische metabolische Profil hat sich durch die Nutzung fossiler Energieträger zu einem vor allem von Baumineralien bestimmten industriellen Verbrauchsmuster entwickelt. Der Anteil der mineralischen Materialien am DMC ist von 26 % auf 58 % gestiegen. Damit einher ging eine in Zusammenhang stehende Steigerung der materiellen Nutzung auf 67 % und des Anteiles der Materialbestandsinputs am Materialverbrauch von 36 % auf 49 %. Die Anteile der energetisch genutzten Materialien und der kurzlebigen, innerhalb eines Jahres verbrauchten Materialien sanken währenddessen signifikant. Energie aus erneuerbaren Quellen, die nicht in der MFA abgebildet werden, stieg anteilmäßig unterdessen auf 12 %.

Damit kann, wie in anderen Industrieländern und global, auch in Österreich eine Verlagerung auf einen hohen Anteil an bestandsbildenden Materialien im DMC als ein weiterer Aspekt der industriellen Transition beobachtet werden. Die nicht-metallischen Mineralien dominieren die Materialbestandsinputs klar, aber auch die Erze/Metalle konnten an Bedeutung gewinnen, während die Anteile der Biomasse und darunter vor allem jene von Massivholz abflauten. Mengenmäßig sind die Materialbestandsinputs mit 94 Mio. t/a 10-mal so hoch wie 1918 und in etwa 5-mal so hoch wie 1950.

Die Rolle der Materialbestände für den sozialen Metabolismus und die langzeitige Entwicklung der Ressourcenflüsse wird zunehmend erkannt und weitere Forschungen sind notwendig, um eine Transition zu einem nachhaltigen metabolischen Profil und damit eine Eindämmung der vom Menschen verursachten Umweltprobleme vorantreiben zu können. Seit den 1970ern kann eine relative Entkoppelung zwischen dem wirtschaftlichen Wachstum und dem Materialverbrauch festgestellt werden. Dementsprechend nahm die Ressourceneffizienz zu und auch die wirtschaftliche Effizienz der Materialbestandsinputs (Inputs/GDP) stieg seit 1950 um den Faktor 1,8. Diese Effizienzsteigerungen sind allerdings für eine nachhaltige Transition nicht ausreichend. Vielfach wird daher gefordert, vom Fokus auf wirtschaftliches Wachstum abzurücken und andere Formen der Definition und Messung von Wohlstand anstelle des GDP zu etablieren. Der Stock-Flow-Service-Nexus und die Kreislaufwirtschaft stellen für die Beobachtung und Analyse dieser Prozesse fruchtbare Ansätze dar. Sie verschieben den Fokus der bisher meist flusszentrierten MEFA und könnten helfen, die zukünftige Gestaltung der Materialbestände und der damit zusammenhängenden Ressourcenflüsse in eine nachhaltige Richtung zu lenken. Dazu ist eine fundamentale Reduktion des aktuellen Niveaus notwendig. Methodisch kann die Erweiterung der MFA durch das MISO-Modell diesen Prozess unterstützen. Auf der Basis der hier zusammengestellten Daten könnten Modellierungen der Materialbestände mit dem MISO Modell für Österreich vorgenommen werden und dadurch ein besseres Verständnis der Stock-Flow-Service Relationen erreicht werden. Diese Arbeit hat versucht einen ersten Beitrag dazu zu leisten.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Augiseau, V. and S. Barles. 2017. Studying construction materials flows and stock: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 123: 153–164.
- Ayres, R.U. and A.V. Kneese. 1969. Production, Consumption, and Externalities. *The American Economic Review* 59(3): 282–297.
- Behrens, A., S. Giljum, J. Kovanda, and S. Niza. 2007. The material basis of the global economy: Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies. *Ecological Economics* 64(2): 444–453.
- BGBI 446/1922. 1922. Bundesgesetz vom 7. Juli 1922, betreffend die Abänderung des § 3 des allgemeinen Berggesetzes vom 23. Mai 1854, R. G. Bl. Nr. 146, und die Gewinnung von Erdöl und Erdgas (Erdöl- und Erdgasgesetz). July 7. https://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=BgblAlt&Dokumentnummer=bgbl1922_0446_00917. Accessed June 3, 2020.
- BGBI. Nr. 355./1990. 1990. Bundesgesetz vom 7. Juni 1990, mit dem das Berggesetz 1975 geändert wird. June 29. https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1990_355_0/1990_355_0.pdf. Accessed June 1, 2020.
- Bibliographisches Institut GmbH. 2017. Duden | Re-bound-ef-fekt | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft. December 16. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Reboundeffekt>. Accessed December 16, 2017.
- BMHV. 1920ff. *Österreichisches Montan-Handbuch*. Österreichisches Montan-Handbuch. Wien: Bundesministerium für Handel und Verkehr; Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMWFV). <https://www.bmlrt.gv.at/bergbau/Montanhandbuch.html>. Accessed June 3, 2020.
- BMK, B. für K., Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 2020. Ressourceneffizienz. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz.html. Accessed December 3, 2020.
- BMLFUW. 2016. Holzeinschlagsmeldung. <https://www.bmlfuw.gv.at/forst/oesterreich-wald/wirtschaftsfaktor/rohstoff-holz/hem2015.html>. Accessed November 5, 2017.
- BMLFUW, BMWFJ, N. Eisenmenger, A. Schaffartzik, F. Krausmann, and E. Milota. 2011. *Ressourcennutzung in Österreich - Bericht 2011*. Wien.
- BMLFUW, BMWFV, A. Schaffartzik, N. Eisenmenger, F. Krausmann, and E. Milota. 2015. *Ressourcennutzung in Österreich - Bericht 2015*. Wien, October.
- BMWFV. 2016. *Energiestatus 2016. Abteilung III/2*. Wien. <https://www.bmlrt.gv.at/service/publikationen/energie/energiestatus-oesterreich-2016.html>. Accessed June 3, 2020.
- Bolt, J., R. Inklaar, H. de Jong, and J. Luiten von Zanden. 2018. Maddison Project Database, Version 2018. *University of Groningen*. <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2018>. Accessed June 14, 2020.
- Bundesamt für Statistik, Ö. 1920ff. *Statistisches Handbuch für die Republik Österreich*. Wien.
- Bundesholzwirtschaftsrat. 1970. *4 Jahrzehnte Österreichs Forst- und Holzwirtschaft. Die österreichische Holzbilanz im Zeitraum 1926 bis 1968*. In: *Holzkurier XXV. Jahrgang Nr. 7, 1970, 1-31*.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. 2020. *Statistik Straße und Verkehr*. <https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:8bcea905-fb79-4acf-88cc-ba7ab644019e/Statistik%20Stra%C3%9Fe%20und%20Verkehr2020.pdf>. Accessed October

- 20, 2020.
- Cembureau. 1998. *World Statistical Review - Special Edition - Cement Production, Trade, Consumption Data*. Brüssel: Cembureau.
- Cembureau. 2011. *World Statistical Review 1999-2009*.
- Cembureau. 2017. *World Statistical Review 2004-2014*.
- Costanza, R., L. Graumlich, and W.L. Steffen. 2007. *Sustainability or collapse?: An integrated history and future of people on Earth*. Mit Press.
- Dammerer, Q. 2020. *Material stocks and sustainable resource use in the United States of America from 1870 to 2017*. Social ecology working paper 182. Vienna: Institute of Social Ecology Vienna.
- Eisenmenger, N., D. Wiedenhofer, A. Schaffartzik, S. Giljum, M. Bruckner, H. Schandl, T.O. Wiedmann, M. Lenzen, A. Tukker, and A. Koning. 2016. Consumption-based material flow indicators—Comparing six ways of calculating the Austrian raw material consumption providing six results. *Ecological Economics* 128: 177–186.
- Eurostat. 2012. Economy-wide material flow accounts (EW-MFA). Compilation guide 2012. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/methodology>. Accessed January 1, 2016.
- Eurostat. 2017. PRODCOM - Eurostat Statistiken über die Produktion von Waren. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/database>. Accessed November 6, 2017.
- Eurostat. 2020a. Datenbank - Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>. Accessed November 8, 2020.
- Eurostat. 2020b. Eurostat - Data Explorer: Materialflussrechnung. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_ac_mfa&lang=de. Accessed November 29, 2020.
- Eurostat. 2020c. EU Handel nach SITC seit 1988. <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=DS-018995&lang=de>. Accessed June 5, 2020.
- Eygen, E., J. Feketitsch, D. Laner, H. Rechberger, and J. Fellner. 2016. Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria. *Resources, Conservation and Recycling* 117.
- Fachverband der Glasindustrie, WKO. 2015. *Jahresbericht 2015. Fachverband der Glasindustrie Wirtschaftskammer Österreich*. <https://www.wko.at/branchen/industrie/glasindustrie/Jahresbericht-Glasindustrie-2015.pdf>. Accessed October 18, 2020.
- FAO. 2020. FAOSTAT Population module. Annual Population. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/OA>. Accessed June 15, 2020.
- FAOSTAT. 2017. Forestry Production and Trade. Statistical Databases of the Food and Agriculture Organisation of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Accessed November 6, 2017.
- FCIO. 2017. FCIO - Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs. November 6. http://fcio.at/Default.aspx?site=kunststoffe.fcio.at&menu=Die_Branche#Historische_Entwicklung. Accessed November 6, 2017.
- Fischer-Kowalski, M. 1998. Society's metabolism: the intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860–1970. *Journal of Industrial Ecology* 2(1): 61–78.
- Fischer-Kowalski, M. and K.-H. Erb. 2016. Core Concepts and Heuristics. In *Social Ecology*, 29–61. Springer.
- Fischer-Kowalski, M. and H. Haberl. 2007. Conceptualizing, observing and comparing socioecological transitions. *Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*: 1–30.

- Fischer-Kowalski, M., F. Krausmann, S. Giljum, S. Lutter, A. Mayer, S. Bringezu, Y. Moriguchi, H. Schütz, H. Schandl, and H. Weisz. 2011. Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting. *Journal of Industrial Ecology* 15(6): 855–876.
- FVMI. 2011. Mineralölbericht 2011. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/fachverband-mineraloelindustrie-mineraloelbericht-2011.pdf>. Accessed November 6, 2017.
- FVMI. 2013. Mineralölbericht 2013. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/fachverband-mineraloelindustrie-mineraloelbericht-2013.pdf>. Accessed November 6, 2017.
- FVMI. 2014. Mineralölbericht 2014. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/fachverband-mineraloelindustrie-mineraloelbericht-2013.pdf>. Accessed November 6, 2017.
- FVMI. 2015. *Branchenreport Mineralöl* 2015. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/Mineraloelbericht-2015.pdf>. Accessed November 6, 2017.
- FVMI. 2016. *Branchenreport Mineralöl* 2016. <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/Mineraloelbericht-2015.pdf>. Accessed November 6, 2017.
- Gaugl, B. 2016. Material- und Energieflussanalyse der UdSSR sowie ihrer Vorgängerstaaten und der Russischen Föderation im Zeitraum 1900 bis 2009. Wien.
- Ghisellini, P. and S. Ulgiati. 2019. Managing the transition to the circular economy. In , Draft Chapter. August 29.
- Gierlinger, S. 2011. *Die langfristigen Trends der Material-und Energieflüsse in den USA in den Jahren 1850 bis 2005*. Inst. of Social Ecology, IFF-Fac. for Interdisciplinary Studies, Alpen-Adria-Univ.
- Gierlinger, S. and F. Krausmann. 2012. The physical economy of the United States of America. *Journal of Industrial Ecology* 16(3): 365–377.
- Gingrich, S. 2011. Foreign Trade and Early Industrialization in the Habsburg Monarchy and the United Kingdom—Two Extremes in Comparison. *Ecological Economics : The Journal of the International Society for Ecological Economics* 70: 1280–1288.
- González de Molina, M. and V.M. Toledo. 2014. The Basic Model. In *The Social Metabolism. A Socio-Ecological Theory of Historical Change*, 59–86. Environmental history ; 3. Cham [u.a.]: Springer.
- Groß, R. 2012. Wie das 1950er Syndrom in die Täler kam. *Umwelthistorische Überlegungen Zur Konstruktion von Wintersportlandschaften Am Beispiel Damüls in Vorarlberg (How the 1950s Syndrome Entered Alpine Valleys. Environmental Historian Considerations on the Construction of Winter Sport Landscapes)*. Roderer, Regensburg.
- Haas, W., F. Krausmann, D. Wiedenhofer, and M. Heinz. 2015. 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(5): 765–777.
- Haberl, H. 1995. *Menschliche Eingriffe in den natürlichen Energiefluß von Ökosystemen:[sozio-ökonomische Aneignung von Nettoprimärproduktion in den Bezirken Österreichs]*. Interuniversitäres Inst. für Interdisziplinäre Forschung u. Fortbildung (IFF)-Abt. Soziale Ökologie.
- Haberl, H. 2001. The energetic metabolism of societies part I: accounting concepts. *Journal of Industrial Ecology* 5(1): 11–33.
- Haberl, H., M. Fischer-Kowalski, F. Krausmann, H. Weisz, and V. Winiwarter. 2004. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and

- energy flow accounting (MEFA) can offer. *Land Use Policy* 21(3): 199–213.
- Haberl, H., D. Wiedenhofer, K.-H. Erb, C. Görg, and F. Krausmann. 2017. The Material Stock–Flow–Service Nexus: A New Approach for Tackling the Decoupling Conundrum. *Sustainability (Switzerland)* 9.
- Haberl, H., D. Wiedenhofer, S. Pauliuk, F. Krausmann, D.B. Müller, and M. Fischer-Kowalski. 2019. Contributions of sociometabolic research to sustainability science. *Nature Sustainability* 2(3): 173–184.
- IEA. 2020. Energy Statistics and balances of OECD and Non-OECD Countries. International Energy Agency. June 3. <https://www.iea.org/>. Accessed June 3, 2020.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: mitigation of climate change*. Ed. by Ottmar Edenhofer. Cambridge, UK & New York, USA: Cambridge University Press.
- Kovanda, J. and T. Hak. 2011. Historical perspectives of material use in Czechoslovakia in 1855–2007. *Ecological Indicators* 11(5): 1375–1384.
- Krausmann, F. 2001a. Rekonstruktion der Entwicklung von Materialflüssen im Zuge der Industrialisierung: Biomasse Materialflüsse in Österreich von 1830 bis 1998. *Breuninger Stiftung, Stuttgart*.
- Krausmann, F. 2001b. Land use and industrial modernization: an empirical analysis of human influence on the functioning of ecosystems in Austria 1830–1995. *Using and Shaping the Land* 18(1): 17–26.
- Krausmann, F. 2016. Persönliche Kommunikation. August 1.
- Krausmann, F., M. Fischer-Kowalski, H. Schandl, and N. Eisenmenger. 2008a. The Global Sociometabolic Transition. *Journal of Industrial Ecology* 12(5–6): 637–656.
- Krausmann, F., B. Gaugl, J. West, and H. Schandl. 2016a. The metabolic transition of a planned economy: Material flows in the USSR and the Russian Federation 1900 to 2010. *Ecological Economics* 124: 76–85.
- Krausmann, F., S. Gingrich, N. Eisenmenger, K.-H. Erb, H. Haberl, and M. Fischer-Kowalski. 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics* 68(10): 2696–2705.
- Krausmann, F., S. Gingrich, and R. Nourbakhch-Sabet. 2011. The Metabolic Transition in Japan. *Journal of Industrial Ecology* 15(6): 877–892.
- Krausmann, F. and H. Haberl. 2002. The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism: Socioeconomic energy flows in Austria 1830–1995. *Ecological Economics* 41(2): 177–201.
- Krausmann, F., H. Haberl, K.-H. Erb, and M. Wackernagel. 2004. Resource flows and land use in Austria 1950–2000: using the MEFA framework to monitor society–nature interaction for sustainability. *Land Use and Sustainability Indicators* 21(3): 215–230.
- Krausmann, F., C. Lauk, W. Haas, and D. Wiedenhofer. 2018. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change* 52: 131–140.
- Krausmann, F. and H. Schandl. 2006. Der soziale Metabolismus der Industrialisierung: Die Überwindung der energetischen Schranken des agrarischen Wirtschaftens. *GAI/ Ecological Perspectives for Science and Society* 15(4): 285–293.
- Krausmann, F., H. Schandl, N. Eisenmenger, S. Giljum, and T.D. Jackson. 2017a. Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources* 42(1). <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-102016-060726>. Accessed December 17, 2017.
- Krausmann, F., H. Schandl, N. Eisenmenger, S. Giljum, and T.D. Jackson. 2017b. Material

- Flow Accounting: Global Material Use and Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources* 42(1).
- Krausmann, F., H. Schandl, and N. Schulz. 2003. *Vergleichende Untersuchung zur langfristigen Entwicklung von gesellschaftlichem Stoffwechsel und Landnutzung in Österreich und dem Vereinigten Königreich, Der Europäische Sonderweg*. Stuttgart: Breuninger-Stiftung.
- Krausmann, F., H. Schandl, and R.P. Sieferle. 2008b. Socio-ecological regime transitions in Austria and the United Kingdom. *Ecological Economics* 65(1): 187–201.
- Krausmann, F., H. Weisz, N. Eisenmenger, H. Schütz, W. Haas, and A. Schaffartzik. 2016. *Economy-wide Material Flow Accounting Introduction and Guide. Version 1.1*. Tech. rep., Institute of Social Ecology, Vienna, https://www.uni-klu.ac.at/socec/downloads/WP_151_online.pdf.
- Krausmann, F. and D. Wiedenhofer. 2012. Update Energieflussanalyse Österreichs 1830-2010. Von Fridolin Krausmann persönlich zur Verfügung gestellt.
- Krausmann, F., D. Wiedenhofer, and H. Haberl. 2020. Growing stocks of buildings, infrastructures and machinery as key challenge for compliance with climate targets. *Global Environmental Change* 61: 102034.
- Krausmann, F., D. Wiedenhofer, C. Lauk, W. Haas, H. Tanikawa, T. Fishman, A. Miatto, H. Schandl, and H. Haberl. 2017c. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*: 201613773.
- Larsen, J.K. and P. Eapa. 2016. EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION: 9.
- Matthews, E., C. Amann, S. Bringezu, W. Hüttler, C. Ottke, E. Rodenburg, D. Rogich, H. Schandl, E. Van, and D. Voet. 2000. The weight of nations-material outflows from industrial economies. In *World Resources Institute*. Citeseer.
- Mauschitz, G. 2016. *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie*. Emissionsbericht. Wien: Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien. https://www.zement.at/downloads/downloads_2017/Emissionen_2016.pdf. Accessed June 3, 2020.
- McDonough, W. and M. Braungart. 2002. Remaking the way we make things: Cradle to cradle. *New York: North Point Press. ISBN 1224942886*: 104.
- Miatto, A., H. Schandl, T. Fishman, and H. Tanikawa. 2016. Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. *Journal of Industrial Ecology* 21(4): 924–937.
- Nisbet, M.A. 1996. *The reduction of resource input and emissions achieved by addition of limestone to Portland cement*. Portland Cement Association.
- OECD/IEA. 2015. International Energy Agency. <https://www.iea.org/statistics/>. Accessed November 5, 2017.
- ÖSTAT. 2020a. Materialflussrechnung. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/umwelt/materialflussrechnung/index.html. Accessed November 8, 2020.
- ÖSTAT. 2020b. Physische Energieflussrechnungen (PEFA). https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/physische_energieflussrechnungen/index.html. Accessed November 8, 2020.
- Österreichisches Statistisches Zentralamt, ed. 1997. *Industrie- und Gewerbestatistik*.

- Beiträge Zur Österreichischen Statistik / Industrie- Und Gewerbestatistik.*
<http://permalink.obvsg.at/AC00151167>.
- Österreichisches Statistisches Zentralamt. 1950ff. *Statistisches Handbuch für die Republik Österreich*. Ed. by Österreichisches Statistisches Zentralamt Österreich. Wien.
- Österreichisches Statistisches Zentralamt. 1992ff. *Industrie- und Gewerbestatistik : Teil 1 : Mengen und Werte der Produktion in detaillierter warenmäßiger Gliederung, Beschäftigte (Industrie und Großgewerbe) sowie Auftragseingänge und -bestände und Energieverbrauch der Industrie mit Vergleichszahlen*. Wien.
- Pfister, C. 1994. Das 1950er Syndrom Die Epochenschwelle der Mensch-Umwelt-Beziehung zwischen Industriegesellschaft und Konsumgesellschaft. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 3(2): 71–90.
- Pyshyev, S., V. Gunka, Y. Grytsenko, and M. Bratychak. 2016. Polymer modified bitumen: Review. *Chemistry & Chemical Technology* 10: 631–636.
- Ritschl, A. 2008. The Marshall Plan, 1948–1951. Encyclopedie. *EH.Net*.
<http://eh.net/encyclopedia/the-marshall-plan-1948-1951/>. Accessed November 14, 2017.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F.S. Chapin III, E. Lambin, T. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, and H.J. Schellnhuber. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2).
- Rumpler, H., 1935- [HerausgeberIn] and A. Schmied-Kowarzik 1968- [HerausgeberIn]. 2014. *Die Habsburgermonarchie und der Erste Weltkrieg | 2. Teilband. Weltkriegsstatistik Österreich-Ungarn 1914 - 1918 : Bevölkerungsbewegung, Kriegstote, Kriegswirtschaft*. Vol. 11. Die Habsburgermonarchie 1848-1918. Wien: Verl. der Österr. Akad. der Wiss. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=4542378&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Ruth, M. and P. Dell'Anno. 1997. An industrial ecology of the US glass industry. *Resources Policy* 23(3): 109–124.
- Schaffartzik, A., A. Mayer, S. Gingrich, N. Eisenmenger, C. Loy, and F. Krausmann. 2014. The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010. *Global Environmental Change* 26: 87–97.
- Schandl, H. 1998. *Materialfluß Österreich: die materielle Basis der österreichischen Gesellschaft im Zeitraum 1960 bis 1995*. Interuniversitäres Inst. für Interdisziplinäre Forschung (IFF)-Abt. Soziale Ökologie.
- Schandl, H. and N. Schulz. 2002. Changes in the United Kingdom's natural relations in terms of society's metabolism and land-use from 1850 to the present day. *Ecological Economics* 41(2): 203–221.
- Schandl, H., H. Weisz, and B. Petrovic. 2000. Materialflussrechnung für Österreich 1960 bis 1997. *Statistische Nachrichten* 55(2): 128–137.
- Sieferle, R.P. 2003. *Nachhaltigkeit in universalhistorischer Perspektive*. Ed. by W. Siemann. Vol. Umweltgeschichte Themen und Perspektiven. Beck.
- Sieferle, R.P., F. Krausmann, H. Schandl, and V. Winiwarter. 2006. *Das Ende der Fläche: Zum gesellschaftlichen Stoffwechsel der Industrialisierung*. Böhlau.
- Stadt Wien - Wiener Wohnen. 2017. Geschichte des Wiener Gemeindebaus - Wiener Wohnen - Gemeindewohnungen. November 5.
<http://www.wienerwohnen.at/wiener-gemeindebau/geschichte.html>. Accessed November 5, 2017.
- Statistik Austria. 2014. *Statistik der Landwirtschaft*.
- Statistik Austria. 2016a. *Statistik der Landwirtschaft*.

- Statistik Austria. 2016b. *Energiedaten Österreich 2015*. Wien.
- Statistik Austria. 2016c. Jahresdurchschnittsbevölkerung seit 1870. Statistik des Bevölkerungsstandes. June 14. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/bevoelkerungsstand_und_veraenderung/bevoelkerung_im_jahresdurchschnitt/022311.html.
- Statistik Austria. 2017. STATcube - Tabellenansicht: Materialflussrechnung ab 2000. <http://statcube.at/statistik.at/ext/statcube/jsf/tableView/tableView.xhtml>. Accessed November 16, 2017.
- Statistik Austria. 2020a. Statistik des Bevölkerungsstandes. Bevölkerung im Jahresdurchschnitt. Erstellt am 21.05.2019. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/bevoelkerungsstand_und_veraenderung/bevoelkerung_im_jahresdurchschnitt/022311.html. Accessed June 15, 2020.
- Statistik Austria. 2020b. *Umweltgesamtrechnungen Modul Materialflussrechnung. Zeitreihe 2000 bis 2018. Projektbericht*. Wien. https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectio nMethod=LatestReleased&dDocName=120334. Accessed December 14, 2020.
- Steil, S.E. 2017. Schließen der Material-Bilanz: Erfassung der physischen Outputflüsse der österreichischen Ökonomie. Masterarbeit, Klagenfurt: Alpen-Adria-Universität Klagenfurt, February. <http://ubdocs.uni-klu.ac.at/open/hssvoll/AC13748589.pdf>. Accessed December 17, 2017.
- Streeck, J., D. Wiedenhofer, F. Krausmann, and H. Haberl. 2020. Stock-flow relations in the socio-economic metabolism of the United Kingdom 1800–2017. *Resources, Conservation and Recycling* 161: 104960.
- UN Statistics Division. 2017. UN Comtrade: International Trade Statistics. <https://comtrade.un.org/data>. Accessed November 5, 2017.
- UNEP-IRP. 2018. Global Material Flows Database. January 24. <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>. Accessed December 4, 2020.
- UNICPS. 2017. United Nations Industrial Commodity Production Statistics Dataset. <https://unstats.un.org/unsd/industry/default.asp>. Accessed November 6, 2017.
- USGS. 2017a. Bureau of Mines Minerals Yearbook (1932-1993). United States Geological Survey (USGS). <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/usbmmyb.html>. Accessed November 5, 2017.
- USGS. 2017b. Minerals Information: Europe and Central Eurasia. The Mineral Industry of Austira 1994-2014. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/europe.html#au>. Accessed November 5, 2017.
- Wiedenhofer, D. 2017. Opening the black box of economy-wide material and energy flows: from accounting to stock modeling and input-output analysis. Klagenfurt: Alpen Adria Universität Klagenfurt, June.
- Wiedenhofer, D., T. Fishman, C. Lauk, W. Haas, and F. Krausmann. 2018. *Integrating Material Stock Dynamics Into Economy-Wide Material Flow Accounting: Concepts, Modelling, and Global Application for 1900-2050*. Vol. 156. September 25.
- Wiedenhofer, D., W. Haas, M. Neundlinger, and N. Eisenmenger. 2016. Material Stocks and Sustainable Development. In , 277–291. July 2.
- Wiedenhofer, D., E. Rovenskaya, W. Haas, F. Krausmann, I. Pallua, and M. Fischer-

- Kowalski. 2013. Is there a 1970s Syndrome? Analyzing Structural Breaks in the Metabolism of Industrial Economies. *European Geosciences Union General Assembly 2013, EGUDivision Energy, Resources & the Environment, ERE 40(Supplement C): 182–191.*
- World Economics. 2017. Austria GDP (PPP, Current & Real) on World Economics. *World Economics*. <https://www.worldeconomics.com/GrossDomesticProduct/Austria.gdp>. Accessed December 18, 2017.
- World Steel Association. 2019. Total production of crude steel. https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/P1_crude_steel_total/CHN/IND/AUT. Accessed October 25, 2020.
- Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2017. VÖZ - Zementerzeugung. November 5. <http://www.zement.at/der-baustoff/zement/zementerzeugung>. Accessed November 5, 2017.
- Zirkler, E. 2001. *Asphalt: ein Werkstoff durch Jahrtausende.*

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundstruktur der MFA: Inländische Entnahmen (DE) und Importe ergeben den direkten Materialinput (DMI) und abzüglich Exporte den Materialverbrauch (DMC) und werden standardmäßig bilanziert. Bestandsveränderungen (stock changes), Outputs (DPO) und die Bestände (biophysical structures of society) werden bisher nicht systematisch gemessen.....	15
Abbildung 2: Modellerweiterung der MFA mit dem darin eingebetteten MISO-Modell. Elemente in Grau zeigen die Indikatoren der MFA, in Grün Erweiterungen der Bilanzierungsmethoden und in Blau das Modellierungsmodell dafür relevanten Informationen.	18
Abbildung 3: Jährliche Materialflüsse in Österreich von 1918-2015 in Mio. t in Hauptmaterialgruppen: Inlandsentnahmen von Rohmaterialien (DE) (3a); Materialverbrauch in absoluten Zahlen (DMC) und Anteil der Materialbestandsinputs am DMC (%) (3b); Prozentuelle Verteilung des Materialverbrauchs (3c); Importe (3d) und Exporte (3e) von Rohstoffen und Produkten; Die Grafiken 3 a-e haben unterschiedliche Maßstäbe in Mio. t pro Jahr.	43
Abbildung 4: Materialverbrauch (DMC) gesamt und der Materialgruppen nicht-metallischer Mineralien und Biomasse im Vergleich mit Materialflussdaten der Statistik Österreich (1960-2012) und der Eurostat (1990-2019).....	45
Abbildung 5: Materialverbrauch nach fünf Nutzungsarten in absoluten Zahlen (5a) und Anteile in % (5b) von 1918-2015	46
Abbildung 6: Jährliche Inputs in die gesellschaftlichen Materialbestände (Infrastrukturen, Gebäude, sonstige langlebige Güter) Österreichs 1918-2015 nach 14 Materialbestandstypen (6a absolut und 6b in %) und 4 Hauptmaterialgruppen (6c absolut und 6d in %) sowie die Materialbestandstypen exklusive Baumineralien (6e).	48
Abbildung 7: Primärenergieverbrauch (Energieumsatz) insgesamt (7a) und Anteil einzelner Energieträger/Formen am Primärenergieverbrauch insgesamt (7b) 1830-2015 in PJ (Gross Calorific Value).	49
Abbildung 8: Metabolische Raten für ausgewählte Jahre: Materialverbrauch (DMC) pro Kopf [t/cap/a] (9a) und jährlicher Energieumsatz (DEC) pro Kopf [GJ/cap/a] (9b).....	51
Abbildung 9: Indexierte Entwicklung (1950=1) des Materialverbrauchs (DMC) gesamt und nach Hauptmaterialgruppen, der Materialbestandsinputs, des Bruttoinlandsprodukts (GDP) und der Bevölkerungszahlen 1950-2015	54
Abbildung 10: Indexierte Entwicklung des Materialverbrauchs (DMC), Bruttoinlandsprodukts (GDP), der Ressourceneffizienz (GDP/DMC), der Materialbestandsinputs und der Effizienz der Materialbestandsinputs (GDP/Inputs) 1950-2015.....	55
Abbildung 11: Indexierte Entwicklung (1950=1) des Materialverbrauchs (DMC) gesamt und der Hauptmaterialgruppen, der Materialbestandsinputs, des Primärenergieumsatz (DEC), des technischen Primärenergieaufkommen (TPES = DEC exklusive landwirtschaftliche Biomasse), und der Energieeffizienz (DEC/DMC) und (TPES/Materialbestandsinputs) 1950-2015	57
Abbildung 12: Jährliche Pro-Kopf-Verbräuche von Material (DMC/cap/a) in t, Energie (DEC/cap/a) in GJ und das GDP pro Kopf (GDP/cap/a) in 2011 US\$/cap/a von 1918-2015....	58
Abbildung 13: Die vier typischen Phasen einer Transition	59
Abbildung 14: Materialverbrauch pro Kopf von Österreich (1918-2015), USA (1870-2005), UK (1870-2015) und Japan (1878-2005) [t/cap/a] (13a) und Anteil der Materialbestandsinputs (Bestandsbildenden Materialien) am DMC von Österreich (1918-2015), USA (1870-2015), UK (1870-2015) und global (1900-2015) [%](13b).....	62

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leitindikatoren MFA und EFA.....	16
Tabelle 2: Datenquellen und ergänzende Quellen der MFA nach Materialkategorien und zusätzlicher Indikatoren	21
Tabelle 3: Zuordnung Biomasse MFA Codes (DE)	23
Tabelle 4: Flächen mit grasartigem Futterpflanzenertrag und Holz mit zugehörigen Erntefaktoren, Wassergehalt und Brennwert für Österreich	24
Tabelle 5: Metallgehalte der wichtigsten Erze Österreichs 1918-2015 in %	25
Tabelle 6: Metallerze im Montan-Handbuch mit Abbauzeiträumen nach MFA-Codes	25
Tabelle 7: Überblick über die chronologische Aufnahme von nicht-metallischen Mineralien im Montan-Handbuch mit MFA-Codes	26
Tabelle 8: Überblick der Koeffizienten zur Schätzung der Rohstoffe zur Zementherstellung aus verschiedenen Quellen.....	27
Tabelle 9: Faktoren zur Schätzung des Tonverbrauchs von Ziegelerzeugnissen und Quellen der Produktionszahlen.....	28
Tabelle 10: Überblick der Koeffizienten zur Berechnung des Sand- und Schotterverbrauchs aus dem Verbrauch von Beton, Ziegel und Asphalt	30
Tabelle 11: Länge Straßennetz Österreich in km	30
Tabelle 12: Zuteilung des DMC zu Nutzungsarten nach MFA Materialkategorien. Angaben in % des DMC der MFA-Kategorie oder Zusammenfassung des Schätzverfahrens.....	33
Tabelle 13: Überblick der 14 Materialbestandsinputs mit den zugehörigen MFA-Codes, bestandsbildenden Rohmaterialien, Verarbeitungsverlusten aus ersten Rohstoffverarbeitungsschritten in % sowie den Jahrgängen und Datenquellen in denen statistische Daten verfügbar waren	36
Tabelle 14: Pro-Kopf-Verbrauch an verarbeiteten Kunststoffen in Österreich	41
Tabelle 15: Schlüsselindikatoren zu ausgewählten Zeitpunkten in den vier Übergangsphasen und die jeweiligen Wachstumsfaktoren von 1918 und 1950 bis 2015.....	60

9 Abkürzungsverzeichnis

Cembureau	The European Cement Association
Comtrade	United Nations Commodity Trade Statistics Database
DE	Domestic Extraction oder Inlandsextraktionen
DEC	Domestic Energy Consumption oder Primärenergieumsatz
DMC	Domestic Material Consumption oder Materialverbrauch
EFA	Energieflussanalyse
ERP	European Recovery Program, auch Marschall-Plan
EU	Europäische Union
EUROSTAT	Statistisches Amt der Europäischen Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GDP oder BIP	Gross Domestic Product oder Bruttoinlandsprodukt
GJ/cap/a	Gigajoule pro Kopf pro Jahr; Einheit für jährlichen Energieverbrauch
IEA	International Energy Agency
MFA	Materialflussanalyse
MEFA	Material- und Energieflussanalyse
ew-MFA	Wirtschaftsräumliche Materialflussanalyse
MH	Montan Handbuch Österreich
Mio. t	Millionen Tonnen; Einheit für Materialverbrauch
ÖSTAT	Statistik Austria
PJ	Petajoule; Einheit für Energieverbrauch
PRODCOM	Produktionsstatistik der EU (<i>PROduction COMmunautaire</i>)
PTB	Physical Trade Balance (Physische Handelsbilanz)
SDG	UN Sustainable Development Goals (Nachhaltige Entwicklungsziele)
SHB	Statistisches Handbuch der Republik Österreich
t/cap/a	Tonnen pro Kopf pro Jahr; Einheit für jährlichen Materialverbrauch
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
USGS	United States Geological Survey

Kontakt

Anna Köstinger

anna.koestinger@gmx.at

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 1

Umweltbelastungen in Österreich als Folge menschlichen Handelns. Forschungsbericht gem. m. dem Österreichischen Ökologie-Institut.

Fischer-Kowalski, M., Hg.; Wien (1987)

Band 2

Environmental Policy as an Interplay of Professionals and Movements - the Case of Austria. Paper to the ISA Conference on Environmental Constraints and Opportunities in the Social Organisation of Space, Udine 1989.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (1989)

Band 3

Umwelt & Öffentlichkeit. Dokumentation der gleichnamigen Tagung, veranstaltet vom IFF und dem Österreichischen Ökologie-Institut in Wien, (1990)

Band 4

Umweltpolitik auf Gemeindeebene. Politikbezogene Weiterbildung für Umweltgemeinderäte.

Lackner, C.; Wien (1990)

Band 5

Verursacher von Umweltbelastungen. Grundsätzliche Überlegungen zu einem mit der VGR verknüpfbaren Emittenteninformationssystem.

Fischer-Kowalski, M., Kisser, M., Payer, H., Steurer A.; Wien (1990)

Band 6

Umweltbildung in Österreich, Teil I: Volkshochschulen. Fischer-Kowalski, M., Fröhlich, U.; Harauer, R., Vymazal R.; Wien (1990)

Band 7

Amtliche Umweltberichterstattung in Österreich.

Fischer-Kowalski, M., Lackner, C., Steurer, A.; Wien (1990)

Band 8

Verursacherbezogene Umweltinformationen. Bausteine für ein Satellitensystem zur österr. VGR. Dokumentation des gleichnamigen Workshop, veranstaltet vom IFF und dem Österreichischen Ökologie-Institut, Wien (1991)

Band 9

A Model for the Linkage between Economy and Environment. Paper to the Special IARIW Conference on Environmental Accounting, Baden 1991.

Dell'Mour, R., Fleissner, P., Hofkirchner, W.; Steurer A.; Wien (1991)

Band 10

Verursacherbezogene Umweltindikatoren - Kurzfassung. Forschungsbericht gem. mit dem Österreichischen Ökologie-Institut.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Payer, H.; Steurer, A., Zangerl-Weisz, H.; Wien (1991)

Band 11

Gezielte Eingriffe in Lebensprozesse. Vorschlag für verursacherbezogene Umweltindikatoren. Forschungsbericht gem. m. dem Österreichischen Ökologie-Institut.

Haberl, H.; Wien (1991)

Band 12

Gentechnik als gezielter Eingriff in Lebensprozesse. Vorüberlegungen für verursacherbezogene Umweltindikatoren. Forschungsbericht gem. m. dem Österr. Ökologie-Institut.

Wenzl, P.; Zangerl-Weisz, H.; Wien (1991)

Band 13+

Transportintensität und Emissionen. Beschreibung österr. Wirtschaftssektoren mittels Input-Output-Modellierung. Forschungsbericht gem. m. dem Österr. Ökologie-Institut.

Dell'Mour, R.; Fleissner, P.; Hofkirchner, W.; Steurer, A.; Wien (1991)

Band 14

Indikatoren für die Materialintensität der österreichischen Wirtschaft. Forschungsbericht gem. m. dem Österreichischen Ökologie-Institut.

Payer, H. unter Mitarbeit von K. Turetschek; Wien (1991)

Band 15

Die Emissionen der österreichischen Wirtschaft. Systematik und Ermittelbarkeit. Forschungsbericht gem. m. dem Österr. Ökologie-Institut.

Payer, H.; Zangerl-Weisz, H. unter Mitarbeit von R.Fellinger; Wien (1991)

Band 16

Umwelt als Thema der allgemeinen und politischen Erwachsenenbildung in Österreich.

Fischer-Kowalski M., Fröhlich, U.; Harauer, R.; Vymazal, R.; Wien (1991)

Band 17

Causer related environmental indicators - A contribution to the environmental satellite-system of the Austrian SNA. Paper for the Special IARIW Conference on Environmental Accounting, Baden 1991.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Payer, H., Steurer, A.; Wien (1991)

Band 18

Emissions and Purposive Interventions into Life Processes - Indicators for the Austrian Environmental Accounting System. Paper to the ÖGBPT Workshop on Ecologic Bioprocessing, Graz 1991.

Fischer-Kowalski M., Haberl, H., Wenzl, P., Zangerl-Weisz, H.; Wien (1991)

Band 19

Defensivkosten zugunsten des Waldes in Österreich. Forschungsbericht gem. m. dem Österreichischen Institut für Wirtschaftsforschung.

Fischer-Kowalski et al.; Wien (1991)

Band 20*

Basisdaten für ein Input/Output-Modell zur Kopplung ökonomischer Daten mit Emissionsdaten für den Bereich des Straßenverkehrs.

Steurer, A.; Wien (1991)

Band 22

A Paradise for Paradigms - Outlining an Information System on Physical Exchanges between the Economy and Nature.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Payer, H.; Wien (1992)

Band 23

Purposive Interventions into Life-Processes - An Attempt to Describe the Structural Dimensions of the Man-Animal-Relationship. Paper to the Internat. Conference on "Science and the Human-Animal-Relationship", Amsterdam 1992.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H.; Wien (1992)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 24

Purposive Interventions into Life Processes: A Neglected "Environmental" Dimension of the Society-Nature Relationship. Paper to the 1. Europ. Conference of Sociology, Vienna 1992.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H.; Wien (1992)

Band 25

Informationsgrundlagen struktureller Ökologisierung. Beitrag zur Tagung "Strategien der Kreislaufwirtschaft: Ganzheitl. Umweltschutz/Integrated Environmental Protection", Graz 1992.

Steurer, A., Fischer-Kowalski, M.; Wien (1992)

Band 26

Stoffstrombilanz Österreich 1988.

Steurer, A.; Wien (1992)

Band 28+

Naturschutzaufwendungen in Österreich.

Gutachten für den WWF Österreich. Payer, H.; Wien (1992)

Band 29+

Indikatoren der Nachhaltigkeit für die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung - angewandt auf die Region.

Payer, H. (1992). In: KudlMudl SonderNr. 1992:Tagungsbericht über das Dorfsymposium "Zukunft der Region - Region der Zukunft?"

Band 31+

Leerzeichen. Neuere Texte zur Anthropologie.

Macho, T.; Wien (1993)

Band 32

Metabolism and Colonisation. Modes of Production and the Physical Exchange between Societies and Nature.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H.; Wien (1993)

Band 33

Theoretische Überlegungen zur ökologischen Bedeutung der menschlichen Aneignung von Nettoprimärproduktion.

Haberl, H.; Wien (1993)

Band 34

Stoffstrombilanz Österreich 1970-1990 - Inputseite.

Steurer, A.; Wien (1994)

Band 35

Der Gesamtenergieinput des Sozio-ökonomischen Systems in Österreich 1960-1991. Zur Erweiterung des Begriffes "Energieverbrauch".

Haberl, H.; Wien (1994)

Band 36

Ökologie und Sozialpolitik.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (1994)

Band 37

Stoffströme der Chemieproduktion 1970-1990.

Payer, H., unter Mitarbeit von Zangerl-Weisz, H. und Fellingner, R.; Wien (1994)

Band 38

Wasser und Wirtschaftswachstum. Untersuchung von Abhängigkeiten und Entkoppelungen, Wasserbilanz Österreich 1991.

Hüttler, W., Payer, H. unter Mitarbeit von Schandl, H.; Wien (1994)

Band 39

Politische Jahreszeiten. 12 Beiträge zur politischen Wende 1989 in Ostmitteleuropa.

Macho, T.; Wien (1994)

Band 40

On the Cultural Evolution of Social Metabolism with Nature. Sustainability Problems Quantified.

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H.; Wien (1994)

Band 41

Weiterbildungslehrgänge für das Berufsfeld ökologischer Beratung. Erhebung u. Einschätzung der Angebote in Österreich sowie von ausgewählten Beispielen in Deutschland, der Schweiz, Frankreich, England und europaweiten Lehrgängen.

Rauch, F.; Wien (1994)

Band 42+

Soziale Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung.

Fischer-Kowalski, M., Madlener, R., Payer, H., Pfeffer, T., Schandl, H.; Wien (1995)

Band 43

Menschliche Eingriffe in den natürlichen Energiefluß von Ökosystemen. Sozio-ökonomische Aneignung von Nettoprimärproduktion in den Bezirken Österreichs.

Haberl, H.; Wien (1995)

Band 44

Materialfluß Österreich 1990.

Hüttler, W., Payer, H.; Schandl, H.; Wien (1996)

Band 45

National Material Flow Analysis for Austria 1992. Society's Metabolism and Sustainable Development.

Hüttler, W., Payer, H., Schandl, H.; Wien (1997)

Band 46

Society's Metabolism. On the Development of Concepts and Methodology of Material Flow Analysis. A Review of the Literature.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (1997)

Band 47+

Materialbilanz Chemie-Methodik sektoraler Materialbilanzen.

Schandl, H., Weisz, H. Wien (1997)

Band 48

Physical Flows and Moral Positions. An Essay in Memory of Wildavsky.

Thompson, M.; Wien (1997)

Band 49

Stoffwechsel in einem indischen Dorf. Fallstudie Merkar.

Mehta, L., Winiwarter, V.; Wien (1997)

Band 50+

Materialfluß Österreich- die materielle Basis der Österreichischen Gesellschaft im Zeitraum 1960-1995.

Schandl, H.; Wien (1998)

Band 51+

Bodenfruchtbarkeit und Schädlinge im Kontext von Agrargesellschaften.

Dirlinger, H., Fliegenschnee, M., Krausmann, F., Liska, G., Schmid, M. A.; Wien (1997)

Band 52+

Der Naturbegriff und das Gesellschaft-Natur-Verhältnis in der frühen Soziologie.

Lutz, J. Wien (1998)

Band 53+

NEMO: Entwicklungsprogramm für ein Nationales Emissionsmonitoring.

Bruckner, W., Fischer-Kowalski, M., Jorde, T.; Wien (1998)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 54+

Was ist Umweltgeschichte?

Winiwarter, V.; Wien (1998)

Band 55+

Agrarische Produktion als Interaktion von Natur und Gesellschaft: Fallstudie SangSaeng.

Grünbühel, C. M., Schandl, H., Winiwarter, V.; Wien (1999)

Band 56+

MFA 1996 - Implementierung der nationalen Materialflußrechnung

in die amtliche Umweltberichterstattung

Payer, H., Hüttler, W., Schandl, H.; Wien (1998)

Band 57+

Colonizing Landscapes: Human Appropriation of Net Primary Production and its Influence on Standing Crop and Biomass Turnover in Austria.

Haberl, H., Erb, K.H., Krausmann, F., Loibl, W., Schulz, N. B., Weisz, H.; Wien (1999)

Band 58+

Die Beeinflussung des oberirdischen Standing Crop und Turnover in Österreich durch die menschliche Gesellschaft.

Erb, K. H.; Wien (1999)

Band 59+

Das Leitbild "Nachhaltige Stadt".

Astleithner, F.; Wien (1999)

Band 60+

Materialflüsse im Krankenhaus, Entwicklung einer Input-Output Methodik.

Weisz, B. U.; Wien (2001)

Band 61+

Metabolismus der Privathaushalte am Beispiel Österreichs.

Hutter, D.; Wien (2001)

Band 62+

Der ökologische Fußabdruck des österreichischen Außenhandels.

Erb, K.H., Krausmann, F., Schulz, N. B.; Wien (2002)

Band 63+

Material Flow Accounting in Amazonia: A Tool for Sustainable Development.

Amann, C., Bruckner, W., Fischer-Kowalski, M., Grünbühel, C. M.; Wien (2002)

Band 64+

Energieflüsse im österreichischen Landwirtschaftssektor 1950-1995, Eine humanökologische Untersuchung.

Darge, E.; Wien (2002)

Band 65+

Biomasseeinsatz und Landnutzung Österreich 1995-2020.

Haberl, H.; Krausmann, F.; Erb, K.H.; Schulz, N. B.; Adensam, H.; Wien (2002)

Band 66+

Der Einfluss des Menschen auf die Artenvielfalt. Gesellschaftliche Aneignung von Nettoprimärproduktion als Pressure-Indikator für den Verlust von Biodiversität.

Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Schulz, N. B., Plutzer, C., Erb, K.H., Krausmann, F., Loibl, W., Weisz, H.; Sauberer, N., Pollheimer, M.; Wien (2002)

Band 67+

Materialflussrechnung London.

Bongardt, B.; Wien (2002)

Band 68+

Gesellschaftliche Stickstoffflüsse des österreichischen Landwirtschaftssektors 1950-1995, Eine humanökologische Untersuchung.

Gaube, V.; Wien (2002)

Band 69+

The transformation of society's natural relations: from the agrarian to the industrial system. Research strategy for an empirically informed approach towards a European Environmental History.

Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Schandl, H.; Wien (2003)

Band 70+

Long Term Industrial Transformation: A Comparative Study on the Development of Social Metabolism and Land Use in Austria and the United Kingdom 1830-2000.

Krausmann, F., Schandl, H., Schulz, N. B.; Wien (2003)

Band 72+

Land Use and Socio-economic Metabolism in Preindustrial Agricultural Systems: Four Nineteenth-century Austrian Villages in Comparison.

Krausmann, F.; Wien (2008)

Band 73+

Handbook of Physical Accounting Measuring bio-physical dimensions of socio-economic activities MFA – EFA – HANPP.

Schandl, H., Grünbühel, C. M., Haberl, H., Weisz, H.; Wien (2004)

Band 74+

Materialflüsse in den USA, Saudi Arabien und der Schweiz.

Eisenmenger, N.; Kratochvil, R.; Krausmann, F.; Baart, I.; Colard, A.; Ehgartner, Ch.; Eichinger, M.; Hempel, G.; Lehner, A.; Müllauer, R.; Nourbakhch-Sabet, R.; Paler, M.; Patsch, B.; Rieder, F.; Schembera, E.; Schieder, W.; Schmiedl, C.; Schwarzlmüller, E.; Stadler, W.; Wirl, C.; Zandl, S.; Zika, M.; Wien (2005)

Band 75+

Towards a model predicting freight transport from material flows.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (2004)

Band 76+

The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption.

Weisz, H., Krausmann, F., Amann, Ch., Eisenmenger, N., Erb, K.H., Hubacek, K., Fischer-Kowalski, M.; Wien (2005)

Band 77+

Arbeitszeit und Nachhaltige Entwicklung in Europa: Ausgleich von Produktivitätsgewinn in Zeit statt Geld?

Proinger, J.; Wien (2005)

Mit + gekennzeichnete Bände sind unter <http://short.boku.ac.at/sec-workingpapers> Im PDF-Format und in Farbe downloadbar.

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 78+

Sozial-Ökologische Charakteristika von Agrarsystemen. Ein globaler Überblick und Vergleich.

Lauk, C.; Wien (2005)

Band 79+

Verbrauchsorientierte Abrechnung von Wasser als Water-Demand-Management-Strategie. Eine Analyse anhand eines Vergleichs zwischen Wien und Barcelona.

Machold, P.; Wien (2005)

Band 80+

Ecology, Rituals and System-Dynamics. An attempt to model the Socio-Ecological System of Trinket Island.

Wildenberg, M.; Wien (2005)

Band 81+

Southeast Asia in Transition. Socio-economic transitions, environmental impact and sustainable development.

Fischer-Kowalski, M., Schandl, H., Grünbüchel, C., Haas, W., Erb, K.-H., Weisz, H., Haberl, H.; Wien (2004)

Band 83+

HANPP-relevante Charakteristika von Wanderfeldbau und anderen Langbrachesystemen.

Lauk, C.; Wien (2006)

Band 84+

Management unternehmerischer Nachhaltigkeit mit Hilfe der Sustainability Balanced Scorecard.

Zeithofer, M.; Wien (2006)

Band 85+

Nicht-nachhaltige Trends in Österreich: Maßnahmenvorschläge zum Ressourceneinsatz.

Haberl, H., Jasch, C., Adensam, H., Gaube, V.; Wien (2006)

Band 87+

Accounting for raw material equivalents of traded goods. A comparison of input-output approaches in physical, monetary, and mixed units.

Weisz, H.; Wien (2006)

Band 88+

Vom Materialfluss zum Gütertransport. Eine Analyse anhand der EU15 – Länder (1970-2000).

Rainer, G.; Wien (2006)

Band 89+

Nutzen der MFA für das Treibhausgas-Monitoring im Rahmen eines Full Carbon Accounting-Ansatzes; Feasibilitystudie; Endbericht zum Projekt BMLFUW-UW.1.4.18/0046-V/10/2005.

Erb, K.-H., Kastner, T., Zandl, S., Weisz, H., Haberl, H., Jonas, M.; Wien (2006)

Band 90+

Local Material Flow Analysis in Social Context in Tat Hamelt, Northern Mountain Region, Vietnam.

Hobbes, M.; Kleijn, R.; Wien (2006)

Band 91+

Auswirkungen des thailändischen logging ban auf die Wälder von Laos.

Hirsch, H.; Wien (2006)

Band 92+

Human appropriation of net primary production (HANPP) in the Philippines 1910-2003: a socio-ecological analysis.

Kastner, T.; Wien (2007)

Band 93+

Landnutzung und landwirtschaftliche Entscheidungsstrukturen. Partizipative Entwicklung von Szenarien für das Traisental mit Hilfe eines agentenbasierten Modells.

Adensam, H., V. Gaube, H. Haberl, J. Lutz, H. Reisinger, J. Breinesberger, A. Colard, B. Aigner, R. Maier, Punz, W.; Wien (2007)

Band 94+

The Work of Konstantin G. Gofman and colleagues: An early example of Material Flow Analysis from the Soviet Union.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (2007)

Band 95+

Partizipative Modellbildung, Akteurs- und Ökosystemanalyse in Agrarintensivregionen; Schlußbericht des deutsch-österreichischen Verbundprojektes.

Newig, J., Gaube, V., Berkhoff, K., Kaldrack, K., Kastens, B., Lutz, J., Schlußmeier, B., Adensam, H., Haberl, H., Pahl-Wostl, C., Colard, A., Aigner, B., Maier, R., Punz, W.; Wien (2007)

Band 96+

Rekonstruktion der Arbeitszeit in der Landwirtschaft im 19. Jahrhundert am Beispiel von Theyern in Niederösterreich.

Schaschl, E.; Wien (2007)

Band 97+

Arbeit, gesellschaftlicher Stoffwechsel und nachhaltige Entwicklung.

Fischer-Kowalski, M.; Schaffartzik, A., Wien (2007)

Band 98+

Local Material Flow Analysis in Social Context at the forest fringe in the Sierra Madre, the Philippines.

Hobbes, M., Kleijn, R. (Hrsg); Wien (2007)

Band 99+

Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) in Spain, 1955-2003: A socio-ecological analysis.

Schwarzlmüller, E.; Wien (2008)

Band 100+

Scaling issues in long-term socio-ecological biodiversity research: A review of European cases.

Dirnböck, T., Bezák, P., Dullinger S., Haberl, H., Lotze-Campen, H., Mirtl, M., Peterseil, J., Redpath, S., Singh, S., Travis, J., Wijdeven, S.M.J.; Wien (2008)

Band 101+

Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) in the United Kingdom, 1800-2000: A socio-ecological analysis.

Musel, A.; Wien (2008)

Band 102 +

Wie kann Wissenschaft gesellschaftliche Veränderung bewirken? Eine Hommage an Alvin Gouldner, und ein Versuch, mit seinen Mitteln heutige Klimapolitik zu verstehen.

Fischer-Kowalski, M.; Wien (2008)

Band 103+

Sozialökologische Dimensionen der österreichischen Ernährung – Eine Szenarianalyse.

Lackner, M.; Wien (2008)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 104+

Fundamentals of Complex Evolving Systems: A Primer.
Weis, E.; Wien (2008)

Band 105+

Umweltpolitische Prozesse aus diskurstheoretischer Perspektive: Eine Analyse des Südtiroler Feinstaubproblems von der Problemkonstruktion bis zur Umsetzung von Regulierungsmaßnahmen.
Paler, M.; Wien (2008)

Band 106+

Ein integriertes Modell für Reichraming. Partizipative Entwicklung von Szenarien für die Gemeinde Reichraming (Eisenwurzten) mit Hilfe eines agentenbasierten Landnutzungsmodells.
Gaupe, V., Kaiser, C., Widenberg, M., Adensam, H., Fleissner, P., Kobler, J., Lutz, J., Smetschka, B., Wolf, A., Richter, A., Haberl, H.; Wien (2008)

Band 107+

Der soziale Metabolismus lokaler Produktionssysteme: Reichraming in der oberösterreichischen Eisenwurzten 1830-2000.
Gingrich, S., Krausmann, F.; Wien (2008)

Band 108+

Akteursanalyse zum besseren Verständnis der Entwicklungsoptionen von Bioenergie in Reichraming. Eine sozialökologische Studie.
Vrzak, E.; Wien (2008)

Band 109+

Direktvermarktung in Reichraming aus sozial-ökologischer Perspektive.
Zeithofer, M.; Wien (2008)

Band 110+

CO₂-Bilanz der Tomatenproduktion: Analyse acht verschiedener Produktionssysteme in Österreich, Spanien und Italien.
Theurl, M.; Wien (2008)

Band 111+

Die Rolle von Arbeitszeit und Einkommen bei Rebound-Effekten in Dematerialisierungs- und Dekarbonisierungsstrategien. Eine Literaturstudie.
Bruckner, M.; Wien (2008)

Band 112+

Von Kommunikation zu materiellen Effekten - Ansatzpunkte für eine sozial-ökologische Lesart von Luhmanns Theorie Sozialer Systeme.
Rieder, F.; Wien (2008)

Band 114+

Across a Moving Threshold: energy, carbon and the efficiency of meeting global human development needs.
Steinberger, J. K., Roberts, J.T.; Wien (2008)

Band 115

Towards a low carbon society: Setting targets for a reduction of global resource use.
Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M., Steinberger, J.K., Ayres, R.U.; Wien (2010)

Band 116+

Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely - a scoping study.
Erb, K-H., Haberl, H., Krausmann, F., Lauk, C., Plutzer, C., Steinberger, J.K., Müller, C., Bondeau, A., Waha, K., Pollack, G.; Wien (2009)

Band 117+

Gesellschaftliche Naturverhältnisse: Energiequellen und die globale Transformation des gesellschaftlichen Stoffwechsels.
Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M.; Wien (2010)

Band 118+

Zurück zur Fläche? Eine Untersuchung der biophysischen Ökonomie Brasiliens zwischen 1970 und 2005.
Mayer, A.; Wien (2010)

Band 119+

Das nachhaltige Krankenhaus: Erprobungsphase.
Weisz, U., Haas, W., Pelikan, J.M., Schmied, H., Himpelmann, M., Purzner, K., Hartl, S., David, H.; Wien (2009)

Band 120+

**LOCAL STUDIES MANUAL
A researcher's guide for investigating the social metabolism of local rural systems.**
Singh, S.J., Ringhofer, L., Haas, W., Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M.; Wien (2010)

Band 121+

Sociometabolic regimes in indigenous communities and the crucial role of working time: A comparison of case studies.
Fischer-Kowalski, M., Singh, S.J., Ringhofer, L., Grünbühel C.M., Lauk, C., Remesch, A.; Wien (2010)

Band 122+

Klimapolitik im Bereich Gebäude und Raumwärme. Entwicklung, Problemfelder und Instrumente der Länder Österreich, Deutschland und Schweiz.
Jöbstl, R.; Wien (2012)

Band 123+

Trends and Developments of the Use of Natural Resources in the European Union.
Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M., Steinberger, J.K., Schaffartzik, A., Eisenmenger, N., Weisz, U.; Wien (2011)

Band 125+

Raw Material Equivalents (RME) of Austria's Trade.
Schaffartzik, A., Eisenmenger, N., Krausmann, F., Weisz, H.; Wien (2013)

Band 126+

Masterstudium "Sozial- und Humanökologie": Selbstevaluation 2005-2010.
Schmid, M., Mayer A., Miechtner, G.; Wien (2010)

Band 127+

Bericht des Zentrums für Evaluation und Forschungsberatung (ZEF). Das Masterstudium „Sozial- und Humanökologie“.
Mayring, P., Fenzl, T.; Wien (2010)

Band 128+

Die langfristigen Trends der Material- und Energieflüsse in den USA in den Jahren 1850 bis 2005.
Gierlinger, S.; Wien (2010)

Band 129+

Die Verzehrssteuer 1829 – 1913 als Grundlage einer umwelthistorischen Untersuchung des Metabolismus der Stadt Wien. Hauer, F.; Wien (2010)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

- Band 130+
Human Appropriation of Net Primary Production in South Africa, 1961- 2006. A socio-ecological analysis.
Niedertscheider, M.; Wien (2011)
- Band 131+
The socio-metabolic transition. Long term historical trends and patterns in global material and energy use.
Krausmann, F.; Wien (2011)
- Band 132+
„Urlaub am Bauernhof“ oder „Bauernhof ohne Urlaub“? Eine sozial-ökologische Untersuchung der geschlechtsspezifischen Arbeitsteilung und Zeitverwendung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Gemeinde Andelsbuch, Bregenzerwald.
Winder, M.; Wien (2011)
- Band 133+
Spatial and Socio-economic Drivers of Direct and Indirect Household Energy Consumption in Australia.
Wiedenhofer, D.; Wien (2011)
- Band 134+
Die Wiener Verzehrungssteuer. Auswertung nach einzelnen Steuerposten (1830 – 1913).
Hauer, F.,
Gierlinger, S., Nagele, C., Albrecht, J., Uschmann, T.,
Martsch, M.; Wien (2012)
- Band 135+
Zeit für Veränderung? Über die geschlechtsspezifische Arbeitsteilung und Zeitverwendung in landwirtschaftlichen Betrieben und deren Auswirkungen auf Landnutzungsveränderungen in der Region „Westlicher Wienerwald“. Eine sozial-ökologische Untersuchung.
Madner, V.; Wien (2013)
- Band 136+
The Impact of Industrial Grain Fed Livestock Production on Food Security: an extended literature review.
Erb, K-H., Mayer, A., Kastner, T., Sallet, K-E., Haberl, H.;
Wien (2012)
- Band 137+
Human appropriation of net primary production in Africa: Patterns, trajectories, processes and policy implications.
Fetzel, T., Niedertscheider, M., Erb, K-H., Gaube, V.,
Gingrich, S., Haberl, H., Krausmann, F., Lauk, C., Plutzer,
C.; Wien (2012)
- Band 138+
VERSCHMUTZT – VERBAUT – VERGESSEN: Eine Umweltgeschichte des Wienflusses von 1780 bis 1910.
Pollack, G.; Wien (2013)
- Band 139+
Der Fleischverbrauch in Österreich von 1950-2010. Trends und Drivers als Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage.
Willerstorfer, T.; Wien (2013)
- Band 140+
Veränderungen im sektoralen Energieverbrauch ausgewählter europäischer Länder von 1960 bis 2005.
Draxler, V.; Wien (2014)
- Band 141+
Wie das ERP (European Recovery Program) die Entwicklung des alpinen, ländlichen Raumes in Vorarlberg prägte.
Groß, R.; Wien (2013)
- Band 142+
Exploring local opportunities and barriers for a sustainability transition on a Greek island.
Petridis, P., Hickisch, R., Klimek, M., Fischer, R., Fuchs, N.,
Kostakiotis, G., Wendland, M., Zipperer, M., Fischer-
Kowalski, M.; Wien (2013)
- Band 143+
Climate Change Mitigation in Latin America: A Mapping of Current Policies, Plans and Programs.
Ringhofer, L., Singh, S.J., Smetschka, B.; Wien (2013)
- Band 144+
Arbeitszeit und Energieverbrauch: Grundsatzfragen diskutiert an der historischen Entwicklung in Österreich.
Weisz, U., Possanner, N.; Wien (2013)
- Band 145+
Barrieren und Chancen für die Realisierung nachhaltiger Mobilität. Eine Analyse der Zeitabhängigkeit von Mobilitätsmustern am Beispiel von Krems/Donau.
Gross, A.; Wien (2013)
- Band 147+
The rise of the semi-periphery: A physical perspective on the global division of labour. Material flow analysis of global trade flows (1970-2005).
Loy, C.; Wien (2013)
- Band 148+
Historische Energietransitionen im Ländervergleich. Energienutzung, Bevölkerung, Wirtschaftliche Entwicklung.
Pallua, I.; Wien (2013)
- Band 149+
Socio-Ecological Impacts of Land Grabbing for Nature Conservation on a Pastoral Community: A HANPP-based Case Study in Ololosokwan Village, Northern Tanzania.
Bartels, L. E.; Wien (2014)
- Band 150+
Teilweise waren Frauen auch Traktorist. Geschlechtliche Arbeitsteilung in landwirtschaftlichen Betrieben Ostdeutschlands heute – Unterschiede in der biologischen und konventionellen Bewirtschaftung.
Fehlinger, J.; Wien (2014)
- Band 151+
Economy-wide Material Flow Accounting Introduction and guide.
Krausmann, F., Weisz, H., Schütz, H., Haas, W.,
Schaffartzik, A.; Wien (2014)
- Band 152+
Large scale societal transitions in the past. The Role of Social Revolutions and the 1970s Syndrome.
Fischer-Kowalski, M., Hausknost, D. (Editors); Wien (2014)
- Band 153+
Die Anfänge der mineralischen Düngung in Österreich-Ungarn (1848-1914).
Mayrhofer, I.; Wien (2014)
- Band 154+
Environmentally Extended Input-Output Analysis.
Schaffartzik, A., Sachs, M., Wiedenhofer, D., Eisenmenger,
N.; Wien (2014)
- Band 155+
Rural Metabolism: Material flows in an Austrian village in 1830 and 2001.
Haas, W., Krausmann, F.; Wien (2015)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 156+

A proposal for a workable analysis of Energy Return On Investment (EROI) in agroecosystems. Part I: Analytical approach.

Tello, E., Galán, E., Cunfer, G., Guzmán-Casado, G.I., Gonzales de Molina, M., Krausmann, F., Gingrich, S., Sacristán, V., Marco, I., Padró, R., Moreno-Delgado, D.; Wien (2015)

Band 157+

Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Landwirtschaft und Landnutzung in der LEADER Region Mostviertel-Mitte.

Riegler, M.; Wien (2014)

Band 158+

Ökobilanzierung im Zierpflanzenbau. Treibhausgasemissionen der Produktion von Zierpflanzen am Beispiel eines traditionellen Endverkaufsbetriebs in Österreich.

Wandl, M. T.; Wien (2015)

Band 159+

CO₂-Emissionen und Ressourcennutzung im Bergtourismus. Zur Frage der nachhaltigen Bewirtschaftung einer alpinen Schutzhütte und des Carbon Footprint ihrer Gäste.

Fink, R.; Wien (2015)

Band 160+

Social Multi-Criteria Evaluation (SMCE) in Theory and Practice: Introducing the software OPTamos.

Singh, S. J., Smetschka, B., Grima, N., Ringhofer, L., Petridis, P., Biely, K.; Wien (2016)

Band 161+

„Und dann war das Auto auch wieder weg“ – Biografische Betrachtung autofreier Mobilität.

Sattlegger, L.; Wien (2015)

Band 162+

Die Konstruktion von traditional ecological knowledge: Eine kritische Analyse wissenschaftlicher Umwelt- und Naturschutzdiskurse.

Andrej, M.; Wien (2015)

Band 163+

Stickstoffflüsse von der landwirtschaftlichen Produktion bis zum Lebensmittelverzehr in Österreich von 1965 bis 2010.

Sinnhuber, L.; Wien (2015)

Band 164+

Socio-ecological Impacts of Brick Kilns in the Western Ghats: A socio-metabolic Analysis of small-scale Brick Industries in the Mumbai Metropolitan Region, Maharashtra, India.

Noll, D.; Wien (2015)

Band 165+

Wachsende Fahrradnutzung in Wien und ihre Relevanz für Klima und Gesundheit.

Maier, P.; Wien (2015)

Band 166+

Auswirkungen von Krieg und Besatzung auf die Ressourcennutzung auf dem Truppenübungsplatz Döllersheim/Allentsteig in den Jahren 1938-1957.

Mittas, S.; Wien (2016)

Band 167+

Zwischen Kolonie und Provinz. Herrschaft und Planung in der Kameralprovinz Temeswarer Banat im 18. Jahrhundert.

Veichtlbauer, O.; Wien (2016)

Band 168+

The Relevance of Governance Quality for Sustainable Resource Use. Greece as a Case Study.

Kolar, J.; Wien (2016)

Band 169+

Environmental Conflicts in Austria from 1950 to 2015

Wendering, S.; Wien (2016)

Band 170+

Die sozial-ökologischen Auswirkungen der Palmölproduktion in ländlichen Gemeinden. Eine regionale Materialflussanalyse in der Mikroregion Tomé-Açu, Brasilien.

Kottusch, C.; Wien (2016)

Band 171+

Die Versorgung der Zivilbevölkerung mit Lebensmitteln und Ersatzlebensmitteln während des Ersten Weltkriegs.

Hallwirth, L.; Wien (2016)

Band 172+

Erntenebenprodukte als Ressource. Produktionsmengen, Verwendung und Nutzungspotentiale von Erntenebenprodukten des Zuckerrohrs.

Buchberger, A.; Wien (2017)

Band 173+

Ernährungsempfehlungen in Österreich. Analyse von Webinhalten der Bundesministerien BMG und BMLFUW hinsichtlich Synergien zwischen gesunder und nachhaltiger Ernährung.

Bürger, C.; Wien (2017)

Band 174+

Kraftwerke, Flussbäder und Hochwässer. Eine Umweltgeschichte des mittleren Kamp ab 1890.

Spitzbart-Glasl, C.; Wien (2018)

Band 175+

Von Überlebensstrategie zur biologischen Landwirtschaft. Eine HANPP-Analyse des Landnutzungswandels in Montenegro von 1962 bis 2011.

Koppensteiner, S.; Wien (2018)

Band 176+

Treibhausgasemissionen österreichischer Ernährungsweisen im Vergleich. Reduktionspotentiale vegetarischer Optionen.

Wolbart, N.; Wien (2019)

Band 177+

Environmental inequality in Austria: How equally is the air pollution burden spread in Styria?

Brenner, A.-K.; Wien (2019)

Band 178+

5th Summer School on “Aquatic and Social Ecology” on Samothraki, Greece.

Fischer-Kowalski, M., Petridis, P. (Editors); Wien (2019)

Band 179+

Das Verkehrssystem im Stock-Flow-Service-Nexus. Analyse der Materialbestände und -flüsse für verschiedene Formen von Mobilität in Wien.

Virág, D.; Wien (2019)

Band 180+

Der Wolf und das Waldviertel. Sozial-ökologische Betrachtung der Mensch-Wolf-Interaktion.

Herzog, O. I.; Wien (2019)

WORKING PAPERS SOCIAL ECOLOGY

Band 181+

Die Lausmädchen. Frauen in der österreichischen Anti-Atom-Bewegung. Ca. 1970 bis 1990.

Hosp, L., Wien (2019)

Band 182+

Material stocks and sustainable resource use in the United States of America from 1870 to 2017.

Dammerer, Q., Wien (2020)

Band 183+

Vienna's GHG emissions from a production vs. consumption-based accounting perspective - A comparative analysis.

Schmid, F., Wien (2020)

Band 184+

6th Summer School on "Aquatic and Social Ecology" on Samothraki, Greece

Petridis, P., Fischer Kowalski, M. (Eds.), Wien (2020)

Band 185+

Cars for Future? Zukunftsvorstellungen über (Auto)Mobilität von Seiten technikwissenschaftlicher Akteur*innen.

Krenmayr, N., Wawerda, E., Wien (2020)

Band 186+

Wie Städte von urbaner Landwirtschaft profitieren können: eine Typologie, Nachhaltigkeitsanalyse und Ökobilanzierung gängiger urbaner Anbauformen, mit Fallbeispielen aus Wien

Dietl, A., Wien (2020)

Band 187+

A Socio-Metabolic Assessment of Material Stocks in the Electricity Infrastructure

Thunshirn, P., Wien (2020)

Band 188+

"Hochwasserschutz statt Enteignung?" Eine sozial-ökologische Konfliktperspektive auf den Hochwasserschutz im Eferdinger Becken

Thalhammer, M., Wien (2020)

Band 189+

„Energieautonomie Vorarlberg“ – Regionale Energietransition im Schnittfeld von Klimaschutz, Gesellschaft, Energie- und Standortpolitik

Jochum, M., Wien (2020)

Band 190+

More water, more prosperity? Land Concentration Processes in Irrigated Areas and its Implications for Food Sovereignty

Alter, E., Wien (2020)

Band 191+

Eine umwelthistorische Betrachtung der Abfallentsorgung am Land zwischen 1951-1990 am Beispiel der Gemeinde Rainbach im Mühlkreis

Stadler, S., Wien (2021)

Band 192+

Effects of agroforestry on the carbon dynamics of an agroecological landscape: Human Appropriation of Net Primary Production in two land use scenarios in the Eisenwurzen region, Austria

Bertsch-Hörmann, B., Wien (2021)

Band 193+

Measures to foster active mobility and co-benefits for climate and health in Vienna

Chiu Shuen, K., Wien (2021)

Band 194+

Die Materialflüsse und Inputs in die sozioökonomischen Materialbestände Österreichs 1918-2015.

Eine erweiterte Material- und Energieflussanalyse

Köstinger, A., Wien (2021)