



SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH

GWS DISCUSSION PAPER 2021/3

Globale Fußabdrücke der Umweltinanspruchnahme

Aktuelle Methoden und Datensätze

Mark Meyer

Martin Distelkamp

Christian Lutz

Impressum

AUTOREN

Mark Meyer

Tel: +49 541 40933-290, E-Mail: m.meyer@gws-os.com

Martin Distelkamp

Tel: +49 541 40933-160, E-Mail: distelkamp@gws-os.com

Dr. Christian Lutz

Tel: +49 541 40933-120, E-Mail: lutz@gws-os.com

TITEL

Globale Fußabdrücke der Umweltinanspruchnahme – aktuelle Methoden und Datensätze

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, Juni 2021

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung des Verfassers/der Verfasser und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

FÖRDERHINWEIS

Das Arbeitspapier und die darin präsentierten eigenen Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das BMBF geförderten Forschungsprojekts SYMOBIO erarbeitet.



HERAUSGEBER DER GWS DISCUSSION PAPER SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 1867-7290

Das Discussion Paper im Überblick

1	Einleitung	1
2	Berechnung von Fußabdruck-Indikatoren mit (multi-regionalen) Input-Output-Analysen	2
2.1	Umweltbilanzierung unter Anwendung von Fußabdruck-Indikatoren	2
2.2	Aktuelle Wissenschaftliche Entwicklungen	4
2.3	Im Projekt SYMOBIO angewandte MRIO-Methodik	7
3	Aktuelle Berechnungsmethoden der UGR	11
3.1	Hybrider IO-Ansatz zur Modellierung von Energie und Treibhausgasen	11
3.2	Hybrider IO-Ansatz zur Modellierung von Rohstoffäquivalenten	12
3.3	Flächenbelegung von Ernährungsgütern	14
3.3.1	Ernährungsgüter pflanzlichen Ursprungs	14
3.3.2	Ernährungsgüter tierischen Ursprungs	16
4	Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung von Daten und Methoden für ein verstetigtes BÖM	19
5	Literaturverzeichnis	22
	Anhang 1: Empirische Sensitivität MRIO-basierter Fußabdruck-Berechnungen für Deutschland	28
	Anhang 2: Grundidee sogenannter Single country National Accounts Consistent Footprints	31

1 EINLEITUNG

Zur Begutachtung der Entwicklung der deutschen Bioökonomie unter internationalen Nachhaltigkeitsaspekten wurden im Forschungskonsortium SYMOBIO verschiedene prototypische Methoden zur Berechnung sogenannter Fußabdruck-Indikatoren entwickelt. Die Anwendung dieser Methoden ermöglicht eine Berichterstattung über die global ausgelösten Umweltinanspruchnahmen durch Produktionsaktivitäten der deutsche Bioökonomie sowie durch die heimische Endnachfrage nach Erzeugnissen der Bioökonomie. Neben weiteren Forschungsoutputs des SYMOBIO-Konsortiums wurden erste Ergebnisse entsprechender Berechnungen im „Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie“ (Bringezu et al. 2020) sowie in Bringezu et al. (2021) veröffentlicht. Fußabdrücke werden für THG-Emissionen, Wasser, Landnutzung sowie für Wertschöpfung und Beschäftigung ausgewiesen.

Für eine mögliche Verstetigung des Bioökonomie-Monitorings (BÖM) stellen sich Fragen nach der passenden Datenbasis ebenso wie nach einer möglichen Verbesserung der Methode der Fußabdruckberechnung. Die internationale Forschung zu Fußabdruckberechnungen der Bioökonomie befindet sich aktuell ebenso in einer dynamischen Entwicklung wie die multi-regionalen Input-Output(MRIO)-Datensätze, die die Basis dieser Berechnungen sind. Parallel zu den bisherigen Arbeiten in SYMOBIO haben sich die Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR) des Statistischen Bundesamtes mit dem Thema der Auslandseffekte von Ernährungsgütern auseinandergesetzt und auch THG-Fußabdrücke berechnet. Im Folgenden werden diese Entwicklungen als Überblick aktuell verfügbarer Daten und Methoden zusammengefasst, um zukünftige Optionen für ein verstetigtes BÖM identifizieren zu können.

Exemplarisch werden hierzu die methodischen Grundlagen und die in der Anwendung zu beachtenden statistischen Herausforderungen für folgende Fußabdruck-Indikatoren zusammengefasst:

- Emissionen von Treibhausgasen,
- Inanspruchnahme biotischer Rohstoffe,
- Landnutzung für Ernährungsgüter.

Die Vorgehensweise basiert dabei auf einer Gegenüberstellung der im SYMOBIO-Projekt entwickelten Methoden mit thematisch vergleichbaren Berichterstattungen. Hierzu werden in Kapitel 2 zunächst die inhaltlichen, methodischen und empirischen Grundlagen der im Projekt SYMOBIO angewandten Berechnungsmethoden vorgestellt. Im Anschluss folgen aktuelle Entwicklungen bei den MRIO-Datensätzen und bei der Berechnung von Fußabdrücken sowie ein Überblick zu thematisch verwandten Berichterstattungsaktivitäten des Statistischen Bundesamtes. Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung möglicher Ansatzpunkte für eine Verzahnung der Arbeiten in Rahmen des Monitorings der Bioökonomie mit Arbeiten der UGR.

2 BERECHNUNG VON FUßABDRUCK-INDIKATOREN MIT (MULTI-REGIONALEN) INPUT-OUTPUT-ANALYSEN

2.1 UMWELTBILANZIERUNG UNTER ANWENDUNG VON FUßABDRUCK-INDIKATOREN

Fußabdruck-Indikatoren wurden im Bereich der angewandten Nachhaltigkeitsforschung bereits in den frühen 1990er Jahren konzeptionell entwickelt.¹ Seither wurden dank der schnell wachsenden Rechnerleistungen vielfältige Anwendungen dieses Konzepts in der wissenschaftlichen Literatur publiziert. Hoekstra & Wiedmann (2014) geben eine zusammenfassende Vorstellung des grundsätzlichen Konzepts sowie einen thematisch strukturierten Überblick entsprechender Anwendungen. In vergleichbaren internationalen Analysen der agrarwirtschaftlichen Landnutzung werden entsprechende Berechnungen häufig auch als „Telecoupling“-Ansatz bezeichnet (s. bspw. Schaffartzik et al. 2015). Um eine einheitliche Darstellung beizubehalten, wird der Fußabdruck-Begriff auch in diesem Papier für entsprechende Arbeiten verwendet.

Allgemein formuliert dient die Berechnung eines Fußabdruck-Indikators dazu, die durch regionale Produktions- oder Konsumaktivitäten global ausgelösten Umweltinanspruchnahmen abzubilden. Zentrale Umweltaspekte (wie beispielsweise Treibhausgasemissionen oder Ressourceninanspruchnahmen) sollten unter einer globalen Perspektive beurteilt werden (vgl. auch Liu et al. 2015). Zur Berechnung der Fußabdrücke werden daher für ausgewählte Wirtschaftsbereiche bzw. Produktgruppen, die aus internationalen Lieferverflechtungen resultierenden globalen Handelsströme detailliert analysiert – im Idealfall unter Berücksichtigung sämtlicher Wertschöpfungsstufen.

Bruckner et al. (2015) unterscheiden grundsätzlich drei Ansatzmöglichkeiten zur Berechnung von Fußabdruck-Indikatoren:

- **Umweltökonomische Kalkulationsroutinen (environmental-economic accounting)** basieren in ihrem Kern auf Anwendungen und Auswertungen monetärer Statistiken. Hierzu zählen insbesondere Anwendungen von (um umweltrelevante Produktionsintensitäten erweiterte) Input-Output-Analysetechniken, welche die mit Zahlungsströmen individueller Nachfragekategorien assoziierten Umweltinanspruchnahmen ausweisen (z. B. Flaute et al. 2017). Wie die schematische Darstellung in Abbildung 1 verdeutlicht, zeichnen sich Input-Output-Tabellen durch eine vollständige Abbildung der Vorleistungsverflechtungen zwischen sämtlichen Wirtschaftsbereichen einer betrachteten Volkswirtschaft aus. Die Analyse einer Input-Output-Tabelle ermöglicht es daher, die durch die Nachfrage nach Endprodukten ausgelösten Zahlungsströme unter Berücksichtigung sämtlicher Lieferketten systematisch abzubilden.

¹ Siehe die Einleitung in Kitzes et al. (2009) für einen kurzen Überblick zur konzeptionellen Entwicklung der Fußabdruck-Idee sowie weiterer wissenschaftlicher Referenzen.

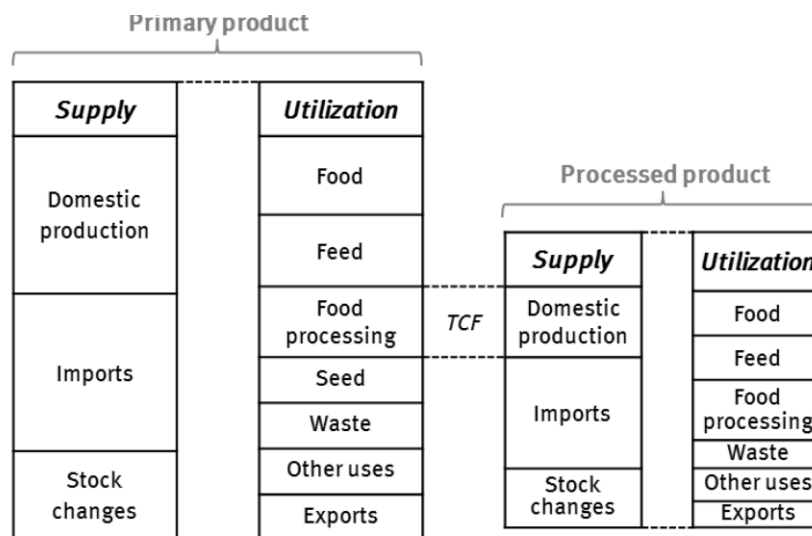
Abbildung 1: Schematische Darstellung des Informationsumfangs von Input-Output-Tabellen

Output an: Input von:	Produktionssektoren						Zwischennachfrage beziehungsweise Summen der primären Inputs	Endnachfrage-Bereiche				Endnachfrage	Produktionswerte beziehungsweise Gesamt-Outputs	
	1	2	3	...	j	...		n	1	2	...			m
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1j}	...	x_{1n}	x_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1m}	y_1	x_1
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2j}	...	x_{2n}	x_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2m}	y_2	x_2
3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	...	x_{3j}	...	x_{3n}	x_3	y_{31}	y_{32}	...	y_{3m}	y_3	x_3
...
I	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
...
II	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
i	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	...	x_{ij}	...	x_{in}	x_i	y_{i1}	y_{i2}	...	y_{im}	y_i	x_i
...
...
n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nj}	...	x_{nn}	x_n	y_{n1}	y_{n2}	...	y_{nm}	y_n	x_n
Vorleistungskäufe beziehungsweise Endnachfrage-Bezüge	x_{-1}	x_{-2}	x_{-3}	...	x_{-j}	...	x_{-n}	x_{-}	y_{-1}	y_{-2}	...	y_{-m}	y_{-}	x_{-}
1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	...	p_{1j}	...	p_{1n}	p_{1-}	q_{11}	q_{12}	...	q_{1m}	q_{1-}	x_{p1}
2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	...	p_{2j}	...	p_{2n}	p_{2-}	.	.	.	.	.	x_{p2}
...
III	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
...
IV	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
k	p_{k1}	p_{k2}	p_{k3}	...	p_{kj}	...	p_{kn}	p_{k-}	.	.	.	.	.	x_{pk}
Primäre Inputs	p_1	p_2	p_3	...	p_i	...	p_n	p_{-}	q_1	q_2	...	q_m	q_{-}	x_n
Produktionswerte beziehungsweise Gesamt-Inputs	x_1	x_2	x_3	...	x_j	...	x_n	x	x_{y1}	x_{y2}	...	x_{ym}	x_y	z

Quelle: Kaumanns & Lauber (2016)

- Physische Berechnungsansätze (biophysical accounting)** basieren auf der Anwendung und Auswertung physischer Statistiken. Im Gegensatz zu einer Betrachtung von Zahlungsströmen stehen die jeweils gehandelten Mengen (beispielsweise gemessen in Tonnen, Hektar, Joule, ...) im Fokus der Betrachtung. Bruckner et al. (2015) verweisen beispielsweise auf Kastner et al. (2014) als eine entsprechende Referenz. Im Bereich der Landnutzung können als weitere Beispiele unter anderem Steger (2005) oder Schuh (2018) genannt werden. Da entsprechende Statistiken in der Regel nicht in der zuvor gezeigten Struktur einer Input-Output-Tabelle veröffentlicht werden, basieren diese Ansätze in erster Linie auf einer detaillierten Zusammenführung umfangreicher Produktions- und Handelsstatistiken. Für primäre Inputs stehen dabei im Vergleich zu monetären Statistiken in der Regel wesentlich umfangreichere Detailinformationen zur Verfügung. Für höher verarbeitete Güter erweist sich allerdings der Ausweis individueller Vorleistungsinputs häufig als herausfordernd (siehe Abbildung 2 für eine schematische Darstellung).

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Informationsumfangs physischer Kalkulationsansätze



Quelle: Bruckner et al. (2015)

- Zu den sogenannten **hybriden Ansätzen** zählen sämtliche Berechnungsmethoden, welche auf einer umfassenden Nutzung sowohl monetärer als auch physischer Daten basieren (z. B. Schoer et al. 2012).

2.2 AKTUELLE WISSENSCHAFTLICHE ENTWICKLUNGEN

Multi-regionale Input-Output(MRIO)-Datensätze bilden die ökonomischen Verflechtungen volkswirtschaftlicher Produktionsbereiche innerhalb wie auch zwischen den jeweils abgebildeten Wirtschaftsregionen ab. Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) repräsentiert derzeit die einzige internationale Organisation, welche in regelmäßigen Abständen global harmonisierte monetäre MRIO-Tabellen veröffentlicht.² Aktuell berichten diese sogenannten Inter-Country Input-Output (ICIO) Tables der OECD für 36 Produktgruppen und Wirtschaftszweige in 64 Volkswirtschaften und einer „Rest der Welt“-Region über nationale und internationale Lieferverflechtungen.³ In der bislang noch nicht veröffentlichten 2021-Edition wird der Berichtsumfang insbesondere auf 45 Produktgruppen und Wirtschaftszweige erweitert und auf die Jahre 1995 bis 2018 ausgedehnt. Eine Ausweitung der Berichterstattung durch Einbindung weiterer afrikanischer Volkswirtschaften wird für zukünftige Publikationsaktivitäten angestrebt.

Harmonisierte monetäre Tabellen für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie die Vereinigten Staaten und zugehörige Außenhandelsdaten für eine „Rest der Welt“-Region wurden von Eurostat gemeinsam mit dem Joint Research Centre (JRC) der

² Siehe hierzu <https://www.oecd.org/sti/ind/inter-country-input-output-tables.htm>.

³ Siehe <http://stats.oecd.org/wbos/fileview2.aspx?IDFile=c0787cf5-ec31-4130-8ddf-8667773e66ed> für ergänzende Klassifikationsdetails.

Europäischen Kommission erstmals im Jahr 2018 veröffentlicht.⁴ Die sogenannten FIGARO-Tabellen zeichnen sich im Vergleich zu den ICIO-Tabellen der OECD durch einen höheren Detailgrad bei der Abbildung von Wirtschaftsstrukturen aus (64 Produktgruppen und Wirtschaftszweige).⁵ Der Berichtszeitraum ist bislang auf das Referenzjahr 2010 beschränkt. Für dieses Jahr wird eine Veröffentlichung historischer Zeitreihen der Jahre 2010 bis 2016 erwartet sowie mittelfristig eine Integration der europäischen FIGARO-Tabellen in die nicht-europäischen Datensätze der OECD.⁶ Wirtschaftliche Strukturen der Bioökonomie können in den OECD-Publikationen wie auch in den FIGARO-Tabellen nur auf einem hoch aggregierten Niveau betrachtet werden. So berichten die FIGARIO-Tabellen beispielsweise in den primären Wirtschaftszweigen nur über die aggregierten Abteilungen „Landwirtschaft, Jagd und damit verbundene Tätigkeiten“, „Forstwirtschaft und Holzeinschlag“ sowie „Fischerei und Aquakultur“.

Detailliertere globale, monetäre MRIO-Tabellen werden im Rahmen individueller Forschungsprojekte erstellt. Im Auftrag des International Resource Panel (IRP) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen erarbeiten Forschungsteams der Wirtschaftsuniversität Wien sowie der Universität Sydney derzeit eine aktuelle MRIO für die IRP Global Material Flows Database⁷. Die Veröffentlichung dieser Datenbank ist für das zweite Halbjahr 2021 mit einem Berichtsumfang von 163 Ländern und 97 Wirtschaftszweigen für den Berichtszeitraum 1990 bis 2018 vorgesehen. Das angewandte Klassifikationsschema unterscheidet (unter anderem) 15 landwirtschaftliche Wirtschaftszweige, 4 Produktionssektoren der Viehzucht sowie ca. 10 Produktionsbereiche der Lebensmittelverarbeitung. In der Vergangenheit wurde vom IRP die weiter disaggregierte MRIO-Datenbank Eora zu Berechnung globaler Fußabdruckindikatoren angewandt (UNEP 2016). Die im Vergleich zu Eora reduzierte Sektorklassifikation der aktuell für das IRP erstellten MRIO ist vermutlich dem Umstand geschuldet, dass bei der Erstellung höher disaggregierter MRIO-Datenbanken inhaltliche Datenevaluationen ersetzt werden – tendenziell verstärkt durch statistische Bilanzierungsverfahren und Optimierungsalgorithmen. In Expertenkreisen wird daher beispielsweise den (relativ hoch aggregierten) OECD-ICIO-Veröffentlichungen eine ausgesprochen hohe Datenqualität zugesprochen, da auf diesem Aggregationsniveau noch eine umfassende Harmonisierung grundlegender Konzepte und Daten der Ursprungsdaten der jeweiligen Berichtsländer gewährleistet ist.

Zudem wurden zuletzt verschiedene Forschungsaktivitäten zur Verknüpfung unterschiedlicher Informationsumfänge bereits veröffentlichter Forschungsdatenbanken vorangetrieben (s. bspw. Tukker et al. (2020) für einen Überblick zu den globalen MRIO-Datenbanken WIOD, Eora, Global Trade Analysis Project (GTAP), EXIOBASE sowie der bereits erwähnten OECD-ICIO Datenbank). Da auch die Länderauflösung zukünftig für das BÖM deutlich

⁴ Siehe hierzu <https://ec.europa.eu/eurostat/web/experimental-statistics/figaro>.

⁵ Siehe https://ec.europa.eu/eurostat/documents/7894008/8850223/ReadMe_V4.xlsx für eine Übersicht konkreter Klassifikationsdetails.

⁶ Siehe hierzu sowie zu weiterführenden methodischen Details Remond-Tiedrez, Rueda-Cantuche et al. (2019).

⁷ <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>

zu erhöhen ist, repräsentiert die kürzlich veröffentlichte R-MRIO-Datenbank von Cabernard & Pfister (2021) eine diesbezüglich interessante Entwicklung. In dieser Anwendung wird die geografische Abdeckung der EXIOBASE-Datenbank von 44 Ländern und 5 „Rest der Welt“-Regionen für das Jahr 2010 auf 189 Länder erhöht. Mit einem Berichtsumfang von maximal 221 Regionen und 6357 Wirtschaftszweigen zeichnet sich daneben das Global MRIO Lab (Lenzen et al. 2017) als besonders detailliertes Forschungsprojekt aus. Die Datenbank integriert unter anderem Informationen der bereits existierenden MRIO-Datensätze Eora, EXIOBASE und WIOD in flexiblen Klassifikationsdetails. Der historische Berichtsumfang wird aktuell auf das Berichtsjahr 2019 ausgeweitet. Für die kommenden beiden Jahre sind zusätzliche Updates geplant.

Durch Ausweitung der geografischen Berichtsdetails existierender MRIO-Datenbanken können grundsätzlich auch auf subnationaler Ebene Fußabdruck-Berechnungen durchgeführt werden. Einen Literaturüberblick zu Ansätzen und Datengrundlagen sogenannter Spatially-explicit-MRIO-Anwendungen bieten Sun et al. (2019). Eine EXIOBASE-basierte Vorgehensweise zur expliziten Berücksichtigung subnationaler Verteilungsmuster von Anbau- und Zuchtstätten für 40 Pflanzen- und sechs Nutztierkategorien stellen Sun et al. (2020) vor.

Auf EU-Ebene wurden im Jahr 2015 umfassende Forschungsarbeiten zur Erfassung von Biomasseströmen und zu deren ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen initiiert.⁸ Mehrere JRC-Abteilungen beschäftigen sich seitdem aktiv mit der Entwicklung und Anwendung entsprechender Daten, Modelle und Analysen. Die Weiterentwicklung eines GTAP-basierten Modellieransatzes zur detaillierteren Abbildung relevanter Sektoren der Bioökonomie ist in Philippidis et al. (2018a) sowie Philippidis et al. (2018b) beschrieben. Fußabdruck-Berechnungen unter Anwendung einer hybriden Version der MRIO-Datenbank EXIOBASE (Beylot et al. 2019) sowie eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit nicht-MRIO-basierten Fußabdruck-Assessments wurden von Sala et al. (2019) vorgestellt. Guillen et al. (2019) beschreiben einen Ansatz zur MRIO-basierten Erfassung globaler Lieferketten für Fisch und Meeresfrüchte. Kuosmanen et al. (2020) entwickeln unterschiedliche Ansätze zur (Teil-)Zuordnung ökonomischer Sektoren zur Bioökonomie. Dabei bestimmen sie den Anteil der Bioökonomie an der Wertschöpfung für die einzelnen Mitgliedsstaaten. Mit einem Input-Output-Ansatz auf Basis entsprechender OECD-Daten ermitteln Cengiz et al. (2021) im Rahmen des BioMonitor-Vorhabens ebenfalls die Wertschöpfungsanteile der Bioökonomie in den EU-Staaten.

Ein hybrider Ansatz, welcher die monetären Informationen der EXIOBASE-Datenbank mit biophysikalischen Daten des LANDFLOW-Modells verknüpft, wurde von Bruckner et al. (2019) zur Abschätzung des globalen Ackerland-Fußabdrucks der Nachfrage nach Nicht-Nahrungsmitteln in der Europäischen Union (EU) vorgestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die Importabhängigkeit der EU als größte Verbrauchsregion von ackerbaulich erzeugten Non-Food-Produkten.

⁸ https://knowledge4policy.ec.europa.eu/projects-activities/jrc-biomass-mandate_en

Physische MRIO-Tabellen zur Abbildung globaler Stoffströme von Agrar-, forstwirtschaftlichen sowie Lebensmittelprodukten wurden von Bruckner et al. (2019) veröffentlicht. Die sogenannte FABIO-Datenbank deckt 191 Weltregionen, 130 Produktgruppen mit direktem Bezug zur Bioökonomie sowie annähernd 100 weitere Produktgruppen ab und berichtet über Entwicklungen des Zeitraums 1986 bis 2013. Eine Ausweitung des Berichtszeitraums bis zum Jahr 2018 ist bereits geplant. Helander et al. (2021) wenden diese Datenbank beispielsweise an, um die Auswirkungen unterschiedlicher Ernährungsweisen auf den Fußabdruck des deutschen Lebensmittelkonsums abzuschätzen.

2.3 IM PROJEKT SYMOBIO ANGEWANDTE MRIO-METHODIK

Im SYMOBIO-Projekt wurden umweltökonomische Kalkulationsroutinen zum Ausweis eines Treibhausgas-Fußabdrucks, eines sozioökonomischen Fußabdrucks von Wertschöpfung und Beschäftigung sowie eines Fußabdrucks der globalen Inanspruchnahme biotischer Rohstoffe der deutschen Bioökonomie entwickelt (Bringezu et al. 2021) und darauf aufbauend auch Land- und Wasserfußabdrücke. Das Vorgehen in SYMOBIO ist in Flaute et al. (2017) sowie Bringezu et al. (2021) beschrieben. Die folgenden Seiten fassen wesentliche Strukturen dieses Ansatzes zusammen. Dabei orientieren sich die algebraischen Darstellungen im Wesentlichen an entsprechenden Dokumentationen in Flaute et al. (2017) sowie Wiebe et al. (2012).

Wie in Abbildung 1 gezeigt, berichten nationale Input-Output-Tabellen für ein gegebenes Berichtsjahr über sämtliche Gütertransaktionen innerhalb einer betrachteten Volkswirtschaft in monetären Größen. Die Berücksichtigung individueller Produktionsbereiche erlaubt dabei eine systematische Erfassung der Vorleistungsverflechtungen. Wenn zur einleitenden Vorstellung der Grundidee einer Input-Output-Analyse vereinfachend von einer geschlossenen Volkswirtschaft ausgegangen wird, gilt definitorisch für jeden Produktionsbereich i , dass der gesamte Output x_i dieses Produktionsbereichs der Summe sämtlicher Vorleistungslieferungen $\sum_{j=1}^K x_{i,j}$ zuzüglich der Endnachfrage nach Erzeugnissen dieses Produktionsbereichs y_i entspricht. Bezeichne x den K -dimensionalen Vektor der jeweiligen Produktionswerte, y den K -dimensionalen Vektor der Endnachfrage und A die $K \times K$ -Matrix der Inputkoeffizienten⁹

$$A = \begin{pmatrix} \frac{x_{11}}{x_1} & \dots & \frac{x_{1K}}{x_K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_{K1}}{x_1} & \dots & \frac{x_{KK}}{x_K} \end{pmatrix},$$

lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen algebraisch ausdrücken:

$$x = Ax + y.$$

⁹ Inputkoeffizienten erfassen die Vorleistungslieferungen $(x_{i,j})$ eines beliebigen liefernden Produktionsbereichs i an einen beliebigen produzierenden Produktionsbereich j in Relation zum Produktionswert des produzierenden Produktionsbereichs (x_j) .

Der obige Ausdruck kann leicht zur Bestimmung der Produktionswerte aufgelöst werden. Der resultierende Zusammenhang $x = (I - A)^{-1}y$

verdeutlicht, dass sich über die sogenannte Leontief-Inverse $(I - A)^{-1}$ sämtliche beobachteten Produktionsaktivitäten der gesamtwirtschaftlichen Endnachfrage zurechnen lassen (I bezeichnet dabei eine $K \times K$ -Einheitsmatrix).

Wenn die mit der Produktion einhergehenden direkten Umweltbelastungen zudem für sämtliche Produktionsbereiche bekannt sind, können jeder Endnachfragekategorie auch die über sämtliche Lieferketten ausgelösten Umweltbelastungen zugerechnet werden. Bezeichne beispielsweise f einen K -dimensionalen Intensitätsvektor der direkten (CO_2 -)Emissionen e_i je Outputeinheit x_i der individuellen Produktionsbereiche i

$$f = \begin{pmatrix} \frac{e_1}{x_1} \\ \vdots \\ \frac{e_K}{x_K} \end{pmatrix},$$

so lassen sich durch folgenden Ausdruck die durch einzelne Endnachfragekomponenten ausgelösten Emissionen bestimmen:

$$e = \begin{pmatrix} \frac{e_1}{x_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{e_2}{x_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & & \frac{e_K}{x_K} \end{pmatrix} (I - A)^{-1}y = \text{diag}(f)(I - A)^{-1}y.$$

Mit der zuvor eingeführten Notation des statischen, offenen Mengenmodells einer einzelnen Volkswirtschaft lässt sich auch der formale Ansatz einer globalen MRIO-Analyse übersichtlich algebraisch zusammenfassen: Bezeichne N die Anzahl sämtlicher in der Analyse betrachteter Weltregionen, so lässt sich für jede abgebildete Volkswirtschaft c der Vektor der Endnachfrage y_c inhaltlich nach Herkunftsländern partitionieren:

$$y_c = \begin{pmatrix} y_{1,c} \\ y_{2,c} \\ \vdots \\ y_{N,c} \end{pmatrix}.$$

Die Teilvektoren $y_{i,c}$ fassen dabei jeweils die Ausgaben für im Land c verwendete Endnachfragekomponenten zusammen, welche aus Land i importiert wurden. Für $i=c$ wird die heimische Endnachfrage für im Inland produzierte Endprodukte betrachtet. Wenn die entsprechend strukturierten Endnachfragevektoren y_c nun für sämtliche Weltregionen in einer einzelnen Matrix zusammengefasst werden, lassen sich die durch die globalen heimischen Endnachfrageentwicklungen über sämtliche Lieferketten ausgelösten Produktionsaktivitäten in Analogie zur vorherigen Darstellung berechnen als $X = (I - A)^{-1}Y$:

$$\begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \dots & x_{N,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A_{1,1} & -A_{1,2} & \dots & -A_{1,N} \\ -A_{2,1} & I - A_{2,2} & \dots & -A_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A_{N,1} & \dots & \dots & I - A_{N,N} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & y_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N,1} & y_{N,2} & \dots & y_{N,N} \end{pmatrix}.$$

Die globale Koeffizientenmatrix A setzt sich dabei aus inländischen Input-Koeffizientenmatrizen $A_{c,c}$ sowie partitionierten Import-Koeffizientenmatrizen $A_{i,c}, i \neq c$ zusammen. Mit I sind wiederum passend dimensionierte Einheitsmatrizen bezeichnet.

Wenn die jeweiligen Intensitätsvektoren individueller Länder c mit f_c bezeichnet werden, können nun beispielsweise die globalen Emissionen durch eine Berechnung von

$$F(I - A)^{-1}Y,$$

$$F = \begin{pmatrix} f_1 & 0 & \dots & \\ 0 & f_2 & 0 & \dots \\ \vdots & & \ddots & \\ \vdots & & & f_N \end{pmatrix}$$

individuellen nationalen Endnachfrageentwicklungen zugerechnet werden. In der resultierenden sogenannten Verschmutzungsmatrix P kennzeichnen die einzelnen Elemente $p_{i,j}$ jeweils in Land i auftretende Emissionen, welche durch heimische Produktionstätigkeiten zur Erfüllung der Endnachfrage in Land j generiert wurden.

Die obigen Anmerkungen verdeutlichen, dass zur empirischen Anwendung eines globalen MRIO-Ansatzes regional harmonisierte Informationen über die Strukturen der Endnachfrage (Matrix Y), der Produktions- und Handelsverflechtung (Matrix A) sowie der umweltrelevanten Produktionsintensitäten (Matrix F) vorliegen müssen. Da diese Informationen nicht global harmonisiert erfasst werden, können empirische MRIO-Datensätze nur durch eine Verknüpfung der aus nationalen Input-Output-Berichterstattungen verfügbaren Informationen mit internationalen Handelsdaten konstruiert werden. Mehrere internationale Forschungskonsortien konnten entsprechende Datenarbeiten unter Anwendung unterschiedlicher Vorgehensweisen erfolgreich abschließen. Siehe Tukker & Dietzenbacher (2013) für einen grundlegenden Überblick zu diesen Entwicklungen.

Vor Hintergrund langjähriger eigener MRIO-Analysen (Wiebe et al. 2012, Meyer et al. 2018) und unter Berücksichtigung der Datennotwendigkeiten für weitere, in diesem Papier nicht näher vorgestellte Fußabdruck-Berechnungen (vgl. u. a. Egenolf & Bringezu 2019) wurde im Projekt SYMOBIO die MRIO-Datenbank EXIOBASE genutzt.¹⁰ Die in Bringezu et al. (2020, 2021) dokumentierten eigenen Berechnungen basieren auf einer durch eigenständige Datenanalysen aktualisierten Variante der 2018 veröffentlichten EXIOBASE-Version 3.4. Im Berichtszeitraum 1995 bis 2011 stellt dieser Datensatz Informationen über die weltwirtschaftlichen Entwicklungen in und zwischen 200 Produktionsbereichen für 49 nationale Volkswirtschaften und Weltregionen zur Verfügung. Jüngere Entwicklungen für fehlende Berichtsjahre ab 2012 wurden eigenständig abgeschätzt. Als stützende Information wurde dabei auf öffentlich publizierte Rahmendaten für die Berichtsjahre 2012 bis 2017 zurückgegriffen.

Die Fußabdruck-Berechnungen erfolgen sowohl für inländische Endnachfrage (Konsum, Investitionen) als auch für die Exportnachfrage. Die nach Pflanzen und Herkunftsregionen differenzierten Fußabdruckabschätzungen bilden die zentrale Schnittstelle für

¹⁰ Die Datenbank EXIOBASE wurde im Rahmen mehrerer aufeinander aufbauender europäischer Forschungskoperationen kontinuierlich (weiter-)entwickelt (Tukker et al. 2009, Wood et al. 2015, Stadler et al. 2018).

Abschätzungen der (Agrar-)Land- und der Wasserfußabdrücke der deutschen Bioökonomie mit den Modellen LandShift und WaterGap. Die Abschätzung der Agrar-Biomasse-Fußabdrücke erfolgt bisher differenziert nach acht Primäranbaupflanzen (Reis / Weizen / sonstiges Getreide / Obst, Gemüse, Nüsse / ölhaltige Pflanzen / Zuckerpflanzen / Faserpflanzen / Stimulanzien, Gewürze) und vier weiteren Kategorien (Stroh / sonstige Pflanzenrückstände / Futterpflanzen / geweidete Biomasse). Die Abschätzung des Forst-Biomasse-Fußabdrucks erfolgt nicht in t, sondern in m³ und unterscheidet nach Nadel- und Laubhölzern. Das Monitoring der Bioökonomie umfasst zudem eine Abschätzung der THG-Fußabdrücke der Nachfrage nach Bioökonomie-Produkten als auch sozioökonomische Indikatoren der Bioökonomie. Für diese Berechnungen beschränkten sich die eigenen Aktualisierungen der EXIOBASE-Datenbank nicht nur auf eine Erweiterung des historischen Berichtszeitraums: Datenmängel in EXIOBASE im Hinblick auf die Berichterstattung zu den Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft (in den EU-Ländern) oder im Hinblick auf die genutzte Entnahme, Biomasse oder Forstwirtschaft in Deutschland wurden auf Grundlage von entsprechenden Primärstatistiken von Eurostat oder dem Statistischen Bundesamt behoben.

Derzeit laufende Forschungsaktivitäten konzentrieren sich einerseits auf ein Update unter Berücksichtigung der aktuellen EXIOBASE-Version 3.8 vom November 2020 mit dem Berichtszeitraum 1995 bis 2021 sowie auf eine verbesserte Berücksichtigung von direkten physischen Handelsströmen biotischer Rohstoffe auf Grundlage von primärstatistischen Auswertungen der FAOSTAT-Datenbasis. Die dabei adressierten statistischen Herausforderungen lassen sich inhaltlich folgendermaßen zusammenfassen:

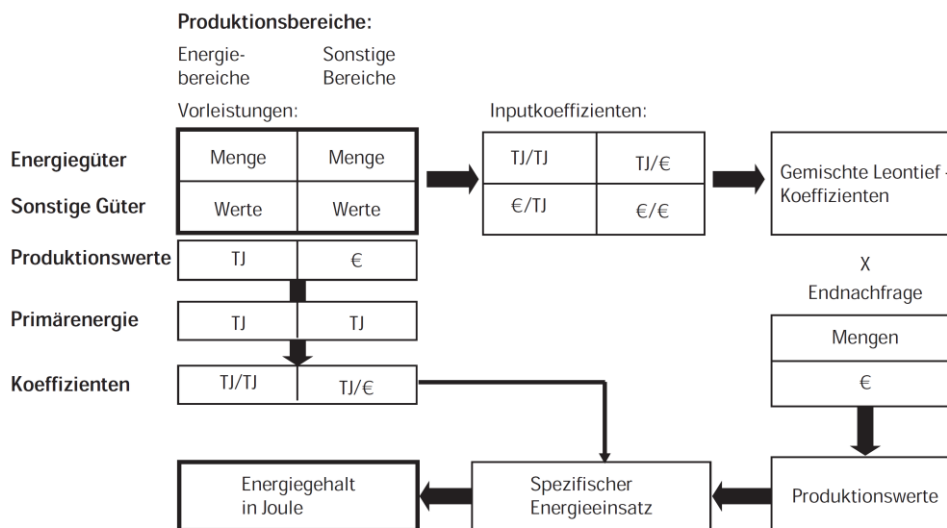
- 1) Die Außenhandelsstatistik berichtet – sofern es sich um Re-Exporte handelt – nicht über die „wahre“ Herkunft der Güter. Dieser als Rotterdam-Effekt bezeichnete Umstand würde bei einer direkten Verwendung der Statistik dazu führen, dass einige biotische Rohstoffe als Ursprung ein Land aufweisen würden, das diesen Rohstoff gar nicht produziert, wie beispielsweise Kakao aus den Niederlanden. Eine Methode zur Bereinigung von Außenhandelsverflechtungs-Daten um diesen Effekt findet sich dokumentiert bei Kastner et al. 2011.
- 2) Eine Reihe von Agrarerzeugnissen wird so gut wie gar nicht als unverarbeitete Rohstoffe, sondern nach Durchlaufen eines ersten Verarbeitungsschrittes international gehandelt. Dies gilt beispielsweise für ölhaltige Pflanzen, die in aller Regel als Ölkuchen oder Öl, nicht aber als unverarbeitete Pflanzen exportiert und importiert werden. In diesen Fällen reicht eine Auswertung der physischen Handelsströme mit dem Primäranbaupflanzen nicht aus, um eine verbesserte Berücksichtigung von primärstatistischen Daten zu erreichen.

Jede multi-nationale, statistische Analyse agrarwirtschaftlicher Handelsverflechtungen wird mit diesen Herausforderungen konfrontiert. Auch in der amtlichen Berichterstattung der UGR wurden daher für vergleichbare Fußabdruckberechnungen unterschiedliche Methoden zur Berücksichtigung dieser Effekte entwickelt. Im Vergleich zu den eigenen MRIO-basierten Berechnungen weisen diese hybride, beziehungsweise Biophysical-accounting-Ansätze einen komplementären Charakter auf. Das folgende Kapitel umfasst eine eigenständige Vorstellung dieser Methoden.

3 AKTUELLE BERECHNUNGSMETHODEN DER UGR

3.1 HYBRIDER IO-ANSATZ ZUR MODELLIERUNG VON ENERGIE UND TREIBHAUSGASEN

Abbildung 3: Energie und Treibhausgase, hybrider IO-Ansatz der UGR



Quelle: Flachmann et al. (2020)

Das derzeit in den UGR angewandte Analysemodell für Energie und Treibhausgase (THG) basiert auf einer hybriden Input-Output Rechnung. Wie Abbildung 3 verdeutlicht, werden hierzu die hinsichtlich der Verwendung von Energie relevanten Einträge in der monetären Input-Output-Tabelle durch physische Mengenangaben ersetzt. Algebraisch kann diese Tabelle dann unmittelbar verwendet werden, um über die Leontief-Inverse die inländische Produktion und über die Berücksichtigung von Produktionsintensitäten gesamtwirtschaftliche THG-Emissionen zu bestimmen.

In der ursprünglichen monetären Input-Output-Tabelle für Deutschland werden 72 Produktionsbereiche ausgewiesen. Durch Rückgriff auf detaillierte physische Informationen der Energieflussrechnungen sowie der Energiebilanz werden die für die Berechnungen besonders relevanten Produktionsbereiche mit hohem Energiebedarf genauer disaggregiert. Da im Gegenzug Dienstleistungsbereiche mit geringem Energiebedarf zusammengefasst werden, berücksichtigt das Analysemodell insgesamt 67 Produktionsbereiche (für Details vgl. Flachmann et al. 2020, S. 30–33). Da eine umfassende Abbildung des Welthandels nicht angestrebt wird, beschränkt sich die Erfassung der deutschen Importe auf eine Betrachtung von 17 ausgewählten Herkunftsländern sowie eine „Rest der Welt“-Region. Generell werden die in den Herkunftsländern durch deutsche Importnachfragen wiederum ausgelösten Importströme (mit Ausnahme der Importe von Roh- oder Sekundäraluminium) nicht berücksichtigt. „Die durch die deutschen Importe bei den unmittelbaren Lieferländern ausgelösten Importe auf vorgelagerten Produktionsstufen („backward linkages“) und der dabei bewirkte Energieeinsatz wird bei diesem Ansatz vollständig dem unmittelbaren Lieferland zugerechnet“ (Flachmann et al. 2020, S. 18).

Unter Rückgriff auf die in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eingeführte formale Notation bedeutet dies, dass für die unmittelbar betrachteten Importländer grundsätzlich sämtliche Import-Koeffizientenmatrizen $A_{i,c}, i \neq c$ mit Nullen besetzt sind. Zudem wird für die Herkunftsländer unterstellt, dass ihre Produktionsstrukturen den deutschen Strukturen ähnlich sind. Unter Rückgriff auf die in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eingeführte Notation kann diese Vorgehensweise so verstanden werden, dass für sämtliche der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten Herkunftsregionen zunächst unterstellt wird, dass die jeweiligen monetären Input-Koeffizientenmatrizen $A_{c,c}$ mit der entsprechenden deutschen Inputkoeffizientenmatrix identisch sind. „Für die Herkunftsländer der Importe [wird] in Hinblick auf die Technologie grundsätzlich nicht von den tatsächlichen Produktionsverhältnissen der Länder ausgegangen [...], sondern die Verwendung der deutschen Technologie unterstellt“ (Flachmann et al. 2020, S. 29).

Diese „domestic technology assumption“ wird für (in der Modellierung im Mittelpunkt stehende) energierelevante Bereiche allerdings aufgehoben. Durch Verwendung individueller physischer Mengenangaben „bei allen Energiebereichen, bei energieintensiven Sektoren und bei weiteren ausgewählten Bereichen der Industrie und der Landwirtschaft“ (Flachmann et al. 2020, S. 29) werden daher die im Mittelpunkt der Analyse stehenden Emissionsentwicklungen unter Berücksichtigung wesentlicher nationaler Strukturunterschiede abgebildet. Die hierzu notwendigen Daten basieren im Fall der europäischen Länder im Wesentlichen auf Energiebilanzen von EUROSTAT. Für China, Japan, Russland, die Vereinigten Staaten und Brasilien dienen Energiebilanzen der Internationalen Energieagentur (IEA) als zentrale Datenquelle. Bei der Berechnung individueller CO₂-Emissionskoeffizienten werden zudem weiterführende statistische Informationen der Vereinten Nationen genutzt. „Für die „restliche Welt“ liegen außer den Importangaben keine spezifischen Angaben vor. Die Emissionsfaktoren wurden schätzungsweise und unter Verwendung von Angaben aus einem MIOA-Modell (CREEA) ermittelt.“ (Flachmann et al. 2020, S. 29). Detailliertere Darstellungen der jeweiligen Datenquellen und Berechnungsschritte können bei Flachmann et al. (2020, S. 47–55) nachgelesen werden.

3.2 HYBRIDER IO-ANSATZ ZUR MODELLIERUNG VON ROHSTOFFÄQUIVALENTEN

Die Berechnung sogenannter Rohstoffäquivalente ermöglicht eine Abschätzung des gesamtwirtschaftlichen Aufkommens sowie der gesamtwirtschaftlichen Verwendung von aus der Umwelt entnommenen Primärrohstoffen unter Berücksichtigung sämtlicher weiterführender Wertschöpfungsketten. Entsprechende Abschätzungen werden unter Nachhaltigkeitsaspekten durchgeführt, um Stoffstromindikatoren zur Abbildung der gesamtwirtschaftlichen Umweltinanspruchnahme berechnen zu können (Kaumanns & Lauber 2016, S. 25 f., Giljum et al. 2015). Die entsprechenden Methoden wurden innerhalb der UGR in

Forschungsprojekten für das Umweltbundesamtes entwickelt.¹¹ Da diese Projekte nicht auf einen dezidierten Ausweis der globalen Verwendung von Rohstoffen in einzelnen Produktionsbereichen abzielten, beschränkt sich die UGR beim Ausweis der Im- und Exporte in Rohstoffäquivalenten sowie den Zurechnungen des gesamten Rohstoffaufkommens (RMI) bzw. des gesamten Rohstoffkonsums (RMC) auf eine Betrachtung von fünf Nachfragekategorien der letzten Verwendung (Konsum, Investitionen in Ausrüstungen und sonstige Anlagen, Bauinvestitionen, Vorratsveränderungen, Exporte) für 24 Gütergruppen.¹² Diese Informationen liegen derzeit als konsistente Zeitreihen für die Berichtsjahre 2010 bis 2016 vor.

Die Modellrechnungen der UGR kombinieren physischen Informationen der Rohstoff- und Materialflussrechnung mit monetären Input-Output-Analysen. Dabei werden Informationen der jährlich aktualisierten amtlichen Berichterstattung zum gesamtwirtschaftlichen Materialkonto um Abschätzungen der Rohstoffe ergänzt, die in sämtlichen Wertschöpfungsketten der gesamtwirtschaftlich produzierten und konsumierten Güter (national wie international) Verwendung finden. Sie weisen damit einen hybriden Charakter auf und sind nicht Bestandteil der regelmäßigen Berichterstattung (Maier 2018, S. 24).

Die aus der Berichterstattung zum gesamtwirtschaftlichen Materialkonto vorliegenden physischen Informationen berichten über die genutzte inländische Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt, direkte Rohstoffimporte sowie direkte Rohstoffexporte. Zudem ermöglichen sie eine Abschätzung des mengenmäßigen Einsatzes individueller Rohstoffe am Anfang der jeweiligen Wertschöpfungsketten.¹³ Die Weiterverarbeitung dieser Rohstoffe sowie die in importierten und exportierten Gütern gebundenen Rohstoffströme werden dann mittels monetärer Input-Output-Analysen abgeschätzt.

Nachfolgend werden diese Input-Output-Analysen näher vorgestellt. Der Rechenansatz ist in Maier (2018) samt exemplarischer Ergebnisvorstellung dargestellt. Eine vollständige Dokumentation des gesamten Berechnungsansatzes bieten Kaumanns & Lauber (2016). Jüngere methodische Anpassungen dieses Rechenansatzes sind in Flachmann et al. (2020, S. 105–124) dokumentiert.

Grundsätzlich basieren die Input-Output-Analysen wiederum auf einer Anwendung der „domestic technology assumption“. Auf Basis des geschätzten physischen Einsatzes der analysierten Rohstoffe am Anfang der jeweiligen Wertschöpfungsketten wird in der Regel für

¹¹ Projekt „Evaluierung des Ressourcenverbrauchs: Ursachenanalyse und Entwicklung von Indikatoren auf Makro- und Mesoebene“ (Förderkennzeichen 3711 12 102), Projekt „Globale Umweltinanspruchnahme durch Konsum, Produktion und Importe, Teilvorhaben 1: Datenbasis“ (Förderkennzeichen 3716 12 105 1)

¹² In den grundlegenden physischen Berechnungen werden ca. 100 Rohstoffe, beziehungsweise Rohstoffgruppen abgebildet. Die angewandte Input-Output-Tabelle unterscheidet 72 Produktionsbereiche. Da diese Gliederungen allerdings nicht durchgängig auf sämtlichen Rechenstufen angewandt werden können, wird der Detailgrad der Ergebnisdarstellung entsprechend angepasst.

¹³ „Die ersten Verarbeitungsschritte von Rohstoffen werden auf Basis nationaler Materialströme tabellarisch abgebildet. Diese umfassen neben der inländischen Entnahme auch Importe und Exporte. Dabei werden direkte Importe, direkte Exporte und teilweise auch andere letzte Verwendungen bereits an dieser Stelle mitberücksichtigt.“ (Flachmann et al. 2020, S. 105).

jeden betrachteten Rohstoff folgende Vorgehensweise verfolgt: „... für diese Produktionsbereiche [werden] direkte Rohstoffintensitäten (Rohstoffeinsatz in Bezug auf den Produktionswert) berechnet. Die so ermittelten Rohstoffintensitäten werden auch den Importen unterstellt. Mithilfe einer Leontief-Analyse, basierend auf den monetären Importangaben und den IOT, werden die monetären Vorleistungen der Einfuhren bestimmt und mittels der zuvor bestimmten Rohstoffintensitäten in das jeweilige Rohstoffäquivalent umgerechnet.“ (Kaumanns & Lauber 2016, S. 29). Die berechneten Rohstoffäquivalente informieren dann darüber, „wie viele einheimische Rohstoffe durch den Import von Halb- und Fertigwaren eingespart wurden“ (Maier 2018, S. 28).

Für Güter, welche nicht im Inland hergestellt, sondern ausschließlich importiert werden, können mit diesem Ansatz allerdings keine Abschätzungen der Rohstoffäquivalente vorgenommen werden. Gleiches gilt für Rohstoffe, welche im Inland nicht direkt verwendet werden. In diesen Fällen erfolgt daher ein Rückgriff auf Lifecycle-Informationen für ausgewählte Güter-Repräsentanten, um entsprechende Berechnungen unter Berücksichtigung des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) durchzuführen.

Weitere Spezialrechnungen werden für Energieträger (insbesondere durch die getrennte Berücksichtigung eines durchschnittlichen ausländischen Strommixes für importierte Güter) sowie beim Ausweis mengenmäßig relevanter Sekundärrohstoffe (Metallschrotte, Glas, Holz, Papier, mineralische Baustoffe) durchgeführt.

3.3 FLÄCHENBELEGUNG VON ERNÄHRUNGSGÜTERN

Zur Abschätzung der Flächeninanspruchnahme zur Herstellung von Ernährungsgütern wurden von der UGR zwei Methoden entwickelt, mit denen die Flächeninanspruchnahmen für Ernährungsgüter pflanzlichen Ursprungs sowie die Flächeninanspruchnahmen für Ernährungsgüter tierischen Ursprungs berechnet werden.

3.3.1 ERNÄHRUNGSGÜTER PFLANZLICHEN URSPRUNGS

Der Ansatz zur Berechnung der internationalen Flächeninanspruchnahme für Ernährungsgüter pflanzlichen Ursprungs basiert auf einer Abschätzung länderspezifischer Import- und Exportmengen für individuelle Agrarrohstoffe. Unter Berücksichtigung länderspezifischer Ernteertrag-Koeffizienten können daraufhin die in den jeweiligen Anbauländern benötigten Anbauflächen berechnet werden. Als Datengrundlage dienen in der Außenhandelsstatistik erfasste Agrarprodukte, Ernährungsgüter und Futtermittel. Als Ansatzpunkte für die Berechnung der Anbauflächen wurden in dieser Statistik 508 sechsstellige Warennummern identifiziert. „Hierbei erfolgte a priori eine Einschränkung auf die Kapitel 07 bis 23 des Warenverzeichnisses für die Außenhandelsstatistik [...]. Somit ist sichergestellt, dass sowohl die Ernährungsgüter als auch die Futtermittel fast vollständig abgedeckt sind. Ebenfalls enthalten sind die Produkte zur energetischen Verwendung“ (Schuh 2018, S. 120).

Zentrale Rechenschritte konzentrieren sich auf die Abschätzung der Anteile einzelner Agrarrohstoffe der analysierten Güter und die Bestimmung der Anbauländer der jeweiligen Agrarrohstoffe (vgl. ausführlich dazu Schuh 2018, Flachmann et al. 2020, S. 84–97). In den Berechnungen wird grundsätzlich zwischen Agrarrohstoffen und weiterverarbeiteten Gütern unterschieden. Bei den weiterverarbeiteten Gütern erfolgt eine Unterteilung in

Produkte, welche aus einem Agrarrohstoff bestehen (Verarbeitungsstufe 1) sowie Gütern, welche mehrere pflanzliche Bestandteile aufweisen (Verarbeitungsstufe 2). Die Produkte der Verarbeitungsstufe 1 sind dadurch gekennzeichnet, dass sie aus einem einzigen Agrarrohstoff hergestellt werden können. Während die überwiegende Anzahl der analysierten Güter in der Praxis zumeist weitere Bestandteile aufweist, erfasst diese Gruppe auch Güter, bei denen „es quantitativ vertretbar ist, die weiteren Zutaten nicht zu berücksichtigen“ (Flachmann et al. 2020, S. 89). Für diese Produkte können dann die insgesamt eingesetzten Rohstoffmengen unter Anwendung von Konversionsfaktoren der FAO direkt berechnet werden. Für Produkte der Verarbeitungsstufe 2 müssen die individuellen Anteile unterschiedlicher Bestandteile abgeschätzt werden. Ca. 13 % der gesamten Importmengen sowie 14 % der gesamten Exportmengen sind dieser Produktkategorie zugeordnet. Zur Schätzung der Bestandteile werden UGR-eigene, im Detail nicht näher dokumentierte Vorgehensweisen angewandt. „Eine wichtige Informationsquelle stellt hierfür die 'Verbindliche Zolltarifauskunft' dar“ (Flachmann et al. 2020, S. 91). Eine länderspezifische Abschätzung dieser Bestandteile wird aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeiten nicht durchgeführt.

Für weiterverarbeitete Importe kann nicht vorausgesetzt werden, dass die in den jeweiligen Produkten enthaltenen Rohstoffe auch im betrachteten Lieferland angebaut wurden. Auch bei importierten Agrarrohstoffen geben empirische Schwächen der Außenhandelsstatistik Anlass, die dort gemeldeten Werte durch eigenständige Abschätzungen unter expliziter Berücksichtigung internationaler Lieferketten zu ersetzen.¹⁴ Für insgesamt 151 Warennummern führt das Statistische Bundesamt entsprechende Berechnungen unter Anwendung der COMTRADE-Datenbank der Vereinten Nationen durch.¹⁵ Für die deutschen Importe aus den EU-28-Ländern, der Schweiz sowie Serbien werden dabei die jeweiligen Importstrukturen dieser Länder folgendermaßen explizit berücksichtigt: „Die Grundidee ist, dass die Handelsmengen gemäß der Struktur der COMTRADE-Datenbank auf die vorgelegten Lieferländer aufgeteilt werden. Sollte die Zurückverfolgung der Lieferketten auf eines der 30 betrachteten Länder verweisen und der Agrarrohstoff dort nicht angebaut werden, so wird die Lieferkette ein zweites Mal zurückverfolgt. In diesem zweiten Schritt werden zusätzlich aus der COMTRADE-Struktur alle Länder ausgeschlossen, in denen kein Anbau des Agrarrohstoffs stattfindet. Somit ist sichergestellt, dass nach der zweiten Lieferkette nicht auf ein europäisches Land verwiesen wird, in dem kein Anbau des Agrarrohstoffs stattfindet. Bei der Zurückverfolgung der Lieferketten werden unwichtige Länder der Lieferkette, die einen Anteil von weniger als 5 % ausweisen, nicht berücksichtigt. [...]“ (Flachmann et al. 2020, S. 87).

¹⁴ Das UGR-Methodenhandbuch verweist in diesem Zusammenhang beispielhaft auf statistisch erfasste Importe von Kaffeebohnen aus den Niederlanden: Wenn die Außenhandelsstatistik über entsprechende Importe mit den Niederlanden als Ursprungsland berichtet, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Re-Exporte handelt – die Kaffeebohnen also zuvor in die Niederlande importiert wurden.

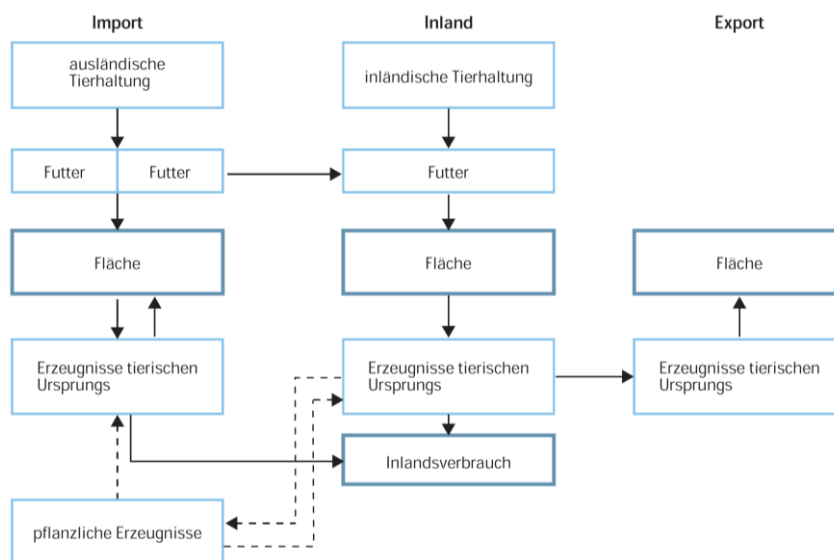
¹⁵ Das UGR-Methodenhandbuch beschreibt drei Kriterien, anhand derer festgelegt wird, ob für eine beliebige Warengruppe eine entsprechende Rückverfolgung der Lieferketten erfolgt: für importierte Agrarrohstoffe mit einem Importanteil am Gesamtaufkommen im Lieferland von mindestens 90 %; für sämtliche Importe weiterverarbeiteter Produkte und für Exportgüter, deren Agrarrohstoffe nicht in Deutschland angebaut werden.

Bei weiterverarbeiteten Produkten wird bei den Abschätzungen der jeweiligen nationalen Importmengen zunächst eine Aufteilung nach Maßgabe des Inlands- sowie des Importanteils des betrachteten Agrarrohstoffs vorgenommen. Lediglich für den so berechneten Importanteil erfolgt dann eine Rückverfolgung der Lieferkette nach Maßgabe der COMTRADE-Strukturen. Da dem Algorithmus keine statistischen Informationen über nationale Produktionsstrukturen zur Verfügung stehen, beruhen sämtliche Berechnungen für weiterverarbeitete Produkte generell auf der Annahme, dass die exportierenden Länder zur Herstellung ihrer Exportgüter keine verarbeiteten Zwischenprodukte importieren.

Für die deutschen Re-Exporte wird anschließend eine inhaltliche Konsistenzprüfung vorgenommen. Ausgangspunkt ist dabei die Summe aller statistisch gemeldeten Re-Exporte nach Warennummern. Für diese wird zunächst geprüft, ob sie die entsprechenden jährlichen Import- oder Exportmengen übersteigen. Falls dies der Fall ist, werden die Re-Exporte entsprechend angepasst. Für nicht in Deutschland angebaute Rohstoffe werden zudem die jeweiligen Re-Exporte auf Höhe der Exporte angehoben.

3.3.2 ERNÄHRUNGSGÜTER TIERISCHEN URSPRUNGS

Abbildung 4: Berechnung der Flächenbelegung für inländisches Nutzvieh und Ernährungsgüter tierischen Ursprungs



Quelle: Flachmann et al. (2020)

Der für Ernährungsgüter tierischen Ursprungs berechnete Flächen-Fußabdruck basiert auf einer Abschätzung der Flächeninanspruchnahme für Futtermittel der inländischen Nutztierhaltung. Durch Addition der Flächenbelegung für importierte Ernährungsgüter tierischen Ursprungs und Subtraktion der Flächenbelegung für entsprechende exportierte Ernährungsgüter wird hieraus die Flächenbelegung des Inlandsverbrauchs der Erzeugnisse tierischen Ursprungs berechnet.

Die in diesen Berechnungen zu berücksichtigenden Wirkungszusammenhänge werden in der obigen Abbildung schematisch dargestellt. Gestrichelte Linien verweisen dabei auf Einflussgrößen, welche von den derzeitigen Berechnungsroutinen aktuell nicht erfasst werden.

Tabelle 1: Gliederung der Futtermittel nach Futterarten

Gruppe	Untergruppe	Futterarten
Getreide		Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Körnermais, anderes Getreide
Hülsenfrüchte		Futtererbsen, Ackerbohnen, andere Hülsenfrüchte
Kraftfutter	Ölkuchen	Ölkuchen
	Sonstiges Kraftfutter	Ölsaaten, Trockengrünfutter, Kleien, Trockenschnitzel, Nebenprodukte der Maisverarbeitung, Melasse, pflanzliche Öle und Fette, Nebenprodukte der Brauereien und Brennereien, Kartoffelpulpe (bis 2002 Fisch- und Tiermehl)
Hackfrüchte		Zuckerrüben-, Futterrübenblatt, Futterhackfrüchte, Kartoffeln
Grünfutter	Silomais	Silomais
	Sonstiges Grünfutter	Klee und Luzerne, Weisen und Weiden, sonstige Futterpflanzen im Hauptanbau
Stroh		Stroh
Milch	Molke	Molke
	Sonstige Milch	Vollmilch, Magermilch, Milch- und Molkepulver

Quelle: Flachmann et al. (2020)

Der Detailgrad der erfassten Futterarten kann der dritten Spalte in Tabelle 1 entnommen werden. Zur Bestimmung von Flächenkoeffizienten wird für das inländische Aufkommen dieser Futtermittel auf Angaben der Agrarstatistik zurückgegriffen. Die Berechnung der Flächenkoeffizienten importierter Futtermittel ist nicht im Detail dokumentiert, kann grundsätzlich aber unter Anwendung des zuvor beschriebenen Rechenansatzes für Ernährungsgüter pflanzlichen Ursprungs vorgenommen werden. Da einzelne Agrarerzeugnisse (wie beispielsweise Weizen) nicht ausschließlich als Futtermittel verwendet werden, erfolgt dabei eine Abschätzung der jeweiligen Verwendungsanteile (Futtermittel, Ernährungsmittel, industrielle sowie energetische Nutzung).

Die in den ersten beiden Spalten der Tabelle 1 vorgenommene Zuordnung einzelner Futterarten zu Futtergruppen dient dazu, die Flächeninanspruchnahme nach Tierarten abzuschätzen. Das UGR-Methodenhandbuch fasst diese Rechenschritte folgendermaßen zusammen: „Auf der Ebene der Futtergruppen liegt ein Verteilungsschlüssel nach Tierarten vor. Mit Hilfe dieses Verteilungsschlüssels und der berechneten Hektarerträge wird die Flächenbelegung nach Tierarten bestimmt. Dabei wurden Angaben des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zur Futtermittelverwendung nach Tierarten aus dem Jahrbuch 2002 für das Berichtsjahr 1997/1998 herangezogen. Diese Angaben wurden mit den Veränderungen der Tierbestände fortgeschrieben und deren Verlauf an die veränderten Futterrationen angepasst. Anschließend wurde durch eine Verknüpfung der Futtermengen mit Flächenkoeffizienten für das In- und Ausland die Flächenbelegung nach einzelnen Tierarten ermittelt“ (Flachmann et al. 2020, S. 99).

In Ergänzung zu dem beschriebenen Rechenansatz zur Bestimmung des Flächen-Fußabdrucks der heimischen Nutztierhaltung wird auch der Flächen-Fußabdruck des heimischen Konsums von Ernährungsgütern tierischen Ursprungs abgeschätzt. Als zentrale Datengrundlagen dienen dabei Informationen zu Schlachtungen von Nutztieren und

Schlachtmengen, Produktionsmengen von Erzeugnissen tierischen Ursprungs sowie der Produktion von Milcherzeugnissen.

Der Berechnungsalgorithmus berücksichtigt die drei Produktgruppen „marktfähiges Fleisch“ (Kuhfleisch, sonstiges Rinderfleisch, Fleisch von Schweinen, Schafen/Ziegen, Geflügel), „Wurstwaren“ (aus Kuhfleisch, übrigem Rindfleisch, Schweinefleisch, Schaffleisch, Fleisch von Geflügel) sowie Milcherzeugnisse (Milch u. Rahm, eingedickt und nicht eingedickt, Buttermilch, Joghurt, Molke, Butter, Fettstoffe, Käse und Quark). Die Berechnung der Flächeninanspruchnahme für unterschiedliche Milcherzeugnisse erfolgt über eine Umrechnung der jeweiligen Milchprodukte in Milchfetteinheiten. Die Berechnung der Flächeninanspruchnahme für marktfähiges Fleisch und Wurstwaren basiert wiederum auf verfügbaren statistischen Informationen zu Schlachtmengen. Die Flächenbelegung für Futtermittel wird für die Schlachtmengen über die gesamte Lebensdauer der Tiere abgeschätzt. Da die Produktionsmengen für Wurstwaren aus der Produktionsstatistik bekannt sind,¹⁶ kann die Gruppe marktfähiges Fleisch residual durch Abzug von Wurstwaren und Abfällen von der gesamten Schlachtmenge bestimmt werden.¹⁷

Im- und Exportmengen von Fleisch- und Milcherzeugnissen werden der Außenhandelsstatistik auf Basis von sechs- und vierstelligen Warenpositionen entnommen. Für die Berechnung des Flächenfußabdrucks deutscher Importe von Ernährungsgütern tierischen Ursprungs werden dabei in der Regel keine länderspezifischen Informationen der Lieferländer berücksichtigt. Als Grundannahme wird stattdessen davon ausgegangen, dass sich der jeweilige Flächenfußabdruck der importierten Fleisch- und Milchprodukte nicht vom deutschen Flächenfußabdruck unterscheidet. Lediglich für Rindfleisch wird diese Annahme aufgehoben: „Da beträchtliche Mengen an Rindfleisch aus dem außereuropäischen Ausland eingeführt werden, zum Beispiel aus Brasilien und Argentinien, und dort eine extensive Nutztierhaltung dominiert, wird hier ein höherer spezifischer Flächenfußabdruck angenommen. Hier werden Angaben zum Flächenfußabdruck für Rindfleisch aus der WWF-Studie „Fleisch frisst Land“ herangezogen“ (Flachmann et al. 2020, S. 104).

¹⁶ In der Produktionsstatistik werden Kleinbetriebe nicht berücksichtigt. Daher werden den gemeldeten Angaben zur Herstellung von Wurstwaren unterschiedliche Zuschläge nach Maßgabe der Handwerkserhebung (Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 7.2: Unternehmen, tätige Personen und Umsatz im Handwerk 2008) zugerechnet.

¹⁷ Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass bei Herstellung von Fleisch 10 % Abfälle und bei der Herstellung von Wurstwaren weitere 10 % Abfälle anfallen.

4 ANSATZPUNKTE ZUR WEITERENTWICKLUNG VON DATEN UND METHODEN FÜR EIN VERSTETIGTES BÖM

In diesem Papier wurden die methodischen und empirischen Grundlagen eigener Arbeiten zur Berechnung globaler Fußabdrücke der deutschen Bioökonomie vorgestellt. Der in Abschnitt 2.2 erfolgte Überblick aktueller internationaler Entwicklungen belegt ein anhaltendes Forschungsinteresse an der (Weiter-)Entwicklung der diesen Berechnungen zugrundeliegenden globalen MRIO-Datensätze. Da die OECD gegenwärtig als einzige offizielle multinationale Institution regelmäßig international harmonisierte MRIO-Datensätze veröffentlicht, sind für eine längerfristige Verstetigung des Bioökonomie-Monitorings insbesondere diejenigen Forschungsprojekte interessant, welche ergänzend auf weitere regelmäßige Berichterstattungen abzielen bzw. den Detailgrad der bisherigen OECD-Publikationen dauerhaft ausbauen wollen. Letzteres trifft beispielsweise auf das FIGARO-Projekt zu, welches eine mittelfristige Integration europäischer Input-Output-Tabellen (mit einem in der amtlichen europäischen Statistik üblichen Auflösungsgrad) mit den nicht-europäischen Datensätzen der OECD-ICIO-Veröffentlichungen anstrebt. Daneben hat zumindest die derzeit im Auftrag des IRP erstellte MRIO-Datenbank das Potenzial, sich (mit einem deutlich detaillierteren Fokus auf Ressourceninanspruchnahmen) mittelfristig als weitere zentrale Datenbasis zu etablieren.¹⁸ Durch die institutionelle Etablierung einer entsprechend detaillierten MRIO-Datenbank würde die empirische Basis des eigenen BÖM-Ansatzes deutlich gefestigt.

Die eigenen Vorarbeiten zum BÖM im Forschungsprojekt SYMOBIO basieren auf einer prototypischen Anwendung der MRIO-Datenbank EXIOBASE. Die dabei gewonnenen empirischen Erfahrungen bestätigen den auch in der wissenschaftlichen Literatur dokumentierten Befund (siehe hierzu Anhang 1), dass insbesondere die in entsprechenden Forschungsdatenbanken hinterlegten umweltrelevanten Angaben (wie Treibhausgasemissionen oder auch genutzte Materialentnahmen) mitunter deutlich von offiziell berichteten Referenzwerten abweichen. Entsprechende Datenschwächen können ohne größeren Aufwand identifiziert werden. Für die SYMOBIO-Assessments wurden die diesbezüglich notwendigen Datenrevisionen durch Einbindung der für europäische Berichtsländer offiziell gemeldeten Werte umfassend umgesetzt. Weitere, in der wissenschaftlichen Literatur weniger ausführlich diskutierte empirische Herausforderungen von MRIO-Anwendungen betreffen den Rotterdam-Effekt, der die Zuverlässigkeit von Außenhandelsdaten einschränkt, sowie die angemessene Berücksichtigung agrarwirtschaftlicher Kuppelproduktionen in statistischen Modellierungen. Für ein verlässliches BÖM ist eine hinreichende Berücksichtigung beider Effekte durch die jeweils angewandten Methoden unabdingbar. Unser Papier

¹⁸ Da die Informationsbasis der vierjährig aktualisierten zentralen IRP-Publikation „Global Resources Outlook“ durch regelmäßige Aktualisierungen dieser Datenbank wesentlich verfestigt würde, erscheint es zumindest nicht unplausibel, dass das IRP eine weitergehende Verstetigung dieser Datenarbeiten anstreben wird. Siehe <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook> für ergänzende Details zum „Global Resources Outlook“.

zeigt, dass die UGR des Statistischen Bundesamtes diesbezüglich über eine langjährig etablierte Expertise verfügt.

Die dazu von uns betrachteten hybriden IO-Analysen der UGR sind durch eine methodische Nähe zu den im Rahmen des Monitorings der deutschen Bioökonomie (SYMOBIO) entwickelten MRIO-Ansätzen gekennzeichnet. Aufgrund ihrer thematischen Nähe geben auch die UGR-Berechnungen von Land-Fußabdrücken zielführende Hinweise auf Ansatzpunkte zur komplementären Erweiterung der monetären SYMOBIO-Berechnungen um physische Berichtselemente.

Als zentrale Erkenntnis halten wir dabei fest, dass die in SYMOBIO prototypisch angewandten Methoden für das BÖM insbesondere durch eine eigenständige **Auswertung von Handelsdaten von COMTRADE und der FAO** weiterentwickelt werden können, um monetäre wie auch physische Ströme von Biomassegütern bzw. Ernährungsgütern als detaillierte Untergruppen weltweit zu erfassen. Derzeit laufende Arbeiten in SYMOBIO haben bereits eine stärkere Einbeziehung von Handelsdaten aus FAOSTAT zum Gegenstand. Hierbei werden die im Berechnungsalgorithmus für den Materialfußabdruck enthaltenen Informationen zu den direkten Importen und Exporten von biotischen Rohstoffen durch die entsprechenden Informationen aus der Handelsstatistik ersetzt und in ihrer räumlichen Auflösung verfeinert. Derzeit unterscheiden sich die jeweiligen Ansätze in ihrem Berichtsumfang insbesondere in folgenden Punkten:

- Die Abschätzungen zu den biotischen Materialfußabdrücken in SYMOBIO münden in einen Datensatz, der diesen Fußabdruck (RMC) sowohl räumlich als auch im Hinblick auf die Rohstoffe differenziert. Grundsätzlich erfasst der MRIO-Ansatz die vollständigen Lieferketten, verwendet allerdings monetäre Ströme und Zusammenhänge als Proxy für physische Größen. Bisher werden hierbei 49 Herkunftsländer und -regionen sowie 8 Agrarprodukte, Stroh und andere Pflanzenrückstände, Futterpflanzen, geweidete Biomasse und Holz unterschieden. Diese Differenzierung ist insbesondere auch für die Schnittstellen zu den Modellen für die Abschätzungen der Land- und Wasserfußabdrücke (LandShift und WaterGap) relevant.
- Die Berechnungen der UGR zu den Ernährungsgütern sind sehr viel differenzierter, was die betrachteten Waren auf der Sechssteller-Ebene wie die Handelspartner angeht. Dort werden zunächst 508 unterschiedliche Güter betrachtet (Schuh & Flachmann 2018). Die deutsche Außenhandelsstatistik erfasst wesentlich mehr Partnerländer als EXIOBASE. So kann die 1. Lieferstufe sehr viel differenzierter ermittelt werden als in SYMOBIO. Allerdings weist die UGR darauf hin, dass Lieferland und Anbauland häufig nicht übereinstimmen. Zur aufwändigen Nachverfolgung dieser Zusammenhänge, die aktuell auf 30 Länder begrenzt ist, wird auf COMTRADE-Daten zurückgegriffen.
- Das systemische Monitoring im Rahmen von SYMOBIO ist explizit darauf angelegt, die Fußabdruck-Abschätzungen sowohl für einen hinreichend langen historischen Zeitraum (in der derzeitigen Projektphase 1995 bis 2017) als auch auf Grundlage einer Trendprojektion für die mittelfristige Zukunft (derzeit bis 2030) durchzuführen.

Die im Vergleich zu bisherigen eigenen Berechnungen weitergehenden Informationsdetails der UGR-Routinen können grundsätzlich durch Integration öffentlich verfügbarer statistischer Daten auch in den SYMOBIO-Berechnungsalgorithmen genutzt werden.

Entsprechende Weiterentwicklungen des derzeitigen BÖM können dabei als eine erste Stufe zur Entwicklung sogenannter „single country national accounts consistent“(SNAC)-Fußabdrücke angesehen werden. Wie in Anhang 2 etwas ausführlicher dargestellt ist, diskutiert die wissenschaftliche Literatur unter diesem Stichwort nationale Rechenansätze, bei denen sämtliche Informationen der amtlichen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen in MRIO-basierte globale Monitoring-Routinen integriert werden. Im Idealfall wird dadurch eine **konsistente Verzahnung globaler MRIO-Berechnungen mit statistischen Informationen und darauf aufbauenden Sonderrechnungen nationaler statistischer Ämter** erreicht.

Das SYMOBIO-Projekt war nicht dafür konzipiert, entsprechend umfangreiche eigene statistische Methodenentwicklungen voranzutreiben. Die Referenz zu den (SNAC)-Fußabdrücken dient uns daher als ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder. Zukünftige Forschungsaktivitäten könnten darüber hinaus darauf abzielen, Vor- und Nachteile von IO-Modellen basierend auf der „domestic technology assumption“ sowie von MRIO-Modellen umfassend zu analysieren. Dieser inhaltliche Unterschied zwischen dem BÖM in SYMOBIO im Vergleich zu den Fußabdruckberechnungen der UGR wird auf absehbare Zeit verbleiben: Während der SYMOBIO-Ansatz in seinen Strukturen darauf abzielt, globale Produktions- und Nachfragestrukturen der deutschen Bioökonomie vollständig zu erfassen, berechnet die UGR die globale Umweltinanspruchnahme durch Produktion, Konsum und Importe sowie die Flächeninanspruchnahme durch in Deutschland konsumierte und produzierte Ernährungsgüter unter (teilweiser) Anwendung von „domestic technology assumptions“. Da in der Literatur dokumentiert ist, dass die Ergebnisse einzelner MRIO-Analysen durch Anwendung entsprechender Annahmen deutlich beeinflusst werden können (u. a. Lenzen et al. 2010 oder Marin et al. 2012), sollte dieser inhaltliche Unterschied bei Interpretation der jeweiligen Berechnungsergebnisse zunächst grundsätzlich beachtet werden. In welchem Umfang quantitative Befunde des derzeitigen BÖM durch die „domestic technology assumption“ (welche den Arbeitsaufwand empirischer Studien erheblich reduziert) tatsächlich beeinflusst würden, kann bislang aber nicht verlässlich abgeschätzt werden. Hierzu wären weitergehende Fallstudien notwendig, welche nicht Gegenstand des SYMOBIO-Projekts waren.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- Beylot, A., Secchi, M., Cerutti, A., Merciai, S., Schmidt, J. & Sala, S. (2019): Assessing the environmental impacts of EU consumption at macro-scale. *Journal of Cleaner Production* 216, pp. 382–393.
- Bringezu, S., Banse, M., Ahmann, L., Bezama, N. A., Billig, E., Bischof, R., Blanke, C., Brosowski, A., Brüning, S., Borchers, M., Budzinski, M., Cyffka, K.-F., Distelkamp, M., Egenolf, V., Flaute, M., Geng, N., Giesecking, L., Graß, R., Hennenberg, K., Hering, T., Iost, S., Jochem, D., Krause, T., Lutz, C., Machmüller, A., Mahro, B., Majer, S., Mantau, U., Meisel, K., Moesenfechtel, U., Noke, A., Raussen, T., Richter, F., Schaldach, R., Schweinle, J., Thrän, D., Uglik, M., Weimar, H., Wimmer, F., Wydra, S. & Zeug, W. (2020): Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. Hrsg. vom Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel, Kassel 2020.
- Bringezu, S., Distelkamp, M., Lutz, C., Schaldach, R., Wimmer, F., Hennenberg, K., Egenolf, V. (2021): Environmental and socioeconomic footprints of the German Bioeconomy. *Nature Sustainability*, DOI:10.1038/s41893-021-00725-3.
- Bruckner, M., Fischer, G., Tramberend, S. & Giljum, S. (2015): Measuring telecouplings in the global land system: A review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. *Ecological Economics* 114, pp. 11–21.
- Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C. & Wiebe, K. (2012): Materials embodied in international trade – global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Global Environmental Change* 22, pp. 568–576.
- Bruckner, M., Häyhä, T., Giljum, S., Maus, V., Fischer, G., Tramberend, S., & Börner, J. (2019): Quantifying the global cropland footprint of the European Union's non-food bioeconomy. *Environmental Research Letters* 14, 045011. doi.org/10.1088/1748-9326/ab07f5.
- Bruckner, M., Wood, R., Moran, D., Kuschnig, N., Wieland, H., Maus, V. & Börner, J. (2019). FABIO – The Construction of the Food and Agriculture Input-Output Model. *Environmental Science & Technology* 53(19), pp. 11302–11312. DOI: 10.1021/acs.est.9b03554.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) & Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin/Bonn 2020.
- Cabernard, L. & Pfister, S. (2021): A highly resolved MRIO database for analyzing environmental footprints and Green Economy Progress. *Science of The Total Environment* 755(1), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142587>.
- Cingiz, K., Gonzalez-Hermoso, H., Heijman, W. & Wesseler, J. H. H. (2021): A Cross-Country Measurement of the EU Bioeconomy – an Input–Output Approach. *Sustainability* 13, 3033, <https://doi.org/10.3390/su13063033>.

- Distelkamp, M. & Meyer, M. (2019): Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. *Ecological Economics* 155, pp. 88–104.
- Edens, B., Hoekstra, R., Zult, D., Lemmers, O., Wilting, H. & Wu, R. (2015): A method to create carbon footprint estimates consistent with national accounts. *Economic Systems Research* 27(4), pp. 440–457.
- Egenolf, V. & Bringezu, S. (2019): Conceptualization of an Indicator System for Assessing the Sustainability of the Bioeconomy. *Sustainability* 11, pp. 1–20. <https://symo-bio.de/wp-content/uploads/2019/01/sustainability-11-00443.pdf>.
- Flachmann, C., Junglewitz, G., Maier, L., Mayer, H., & Schuh, M. D. (2020): Umweltökonomische Gesamtrechnungen – Methode der Berechnungen zur globalen Umweltinanspruchnahme durch Produktion, Konsum und Importe. Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020.
- Flaute, M., Lutz, C. & Distelkamp, M. (2017): Der Einsatz von MRIO zur Berechnung der Fußabdrücke von Nationen – eine Anwendung der EXIOBASE-Datenbank. GWS Discussion Paper 2017/7, Osnabrück.
- Giljum, S., Behrens, A., Hinterberger, F., Lutz, C. & Meyer, B. (2008): Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. *Environmental Science & Policy* 11, pp. 204–216.
- Giljum, S., Bruckner, M. & Martinez, A. (2015): Material Footprint Assessment in a Global Input-Output Framework. *Journal of Industrial Ecology* 19, pp. 792–804.
- Giljum, S., Lutz, C. & Jungnitz, A. (2008): The Global Resource Accounting Model (GRAM) – a methodological concept paper. SERI Studies 8, Vienna.
- Guillen, J., Natale, F., Carvalho, N., Casey, J., Hofherr, J., Druon, J.-N., Fiore, G., Gibin, M., Zanzi, A., & Martinsohn, J. T. (2019): Global seafood consumption footprint. *Ambio* 48, pp. 111–122. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1060-9>.
- Hambÿe, C., Hertveldt, B. & Michel, B. (2018): Does consistency with detailed national data matter for calculating carbon footprints with global multi-regional input–output tables? A comparative analysis for Belgium based on a structural decomposition. *Economic Structures* 7(11).
- Helander, H., Bruckner, M., Leipold, S., Petit-Boix, A. & Bringezu, S. (2021): Eating healthy or wasting less? Reducing resource footprints of food consumption. *Environmental Research Letters* 16, 054033.
- Hoekstra, R., Edens, B., Zult, D. & Wilting, H. (2014): Reducing the variation of environmental footprint estimates based on multiregional input-output databases. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal* 5(3), pp. 325–345.
- Hoekstra, A. Y. & Wiedmann, T. O. (2014): Humanity’s unsustainable environmental footprint. *Science* 344, pp. 1114–1117.
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (IFEU) (2007): Ermittlung und Bereitstellung von Koeffizienten zum Rohstoffeinsatz bei Importgütern. Heidelberg.

- Kanemoto, K. & Murray, J. (2013): What is MRIO – Benefits and Limitations. In: Murray, J. & Lenzen, M. (Eds.): *The Sustainability Practitioner's Guide to Multi-Regional Input-Output Analysis*, Champaign, pp. 1–9.
- Kastner, T., Erb, K.-H. & Haberl, H. (2014): Rapid growth in agricultural trade – effects on global area efficiency and the role of management. *Environmental Research Letters* 9, 034015.
- Kastner, T., Kastner, M. & Nonhebel, S. (2011): Tracing distant environmental impacts of agricultural products from a consumer perspective. *Ecological Economics* 70, pp. 1032–1040.
- Kaumanns, S. C. & Lauber, U. (2016): *Rohstoffe für Deutschland. Bedarfsanalyse für Konsum, Investition und Export auf Makro- und Mesoebene*. UBA Texte 62/2016, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Kitzes, J. (2013): An Introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis. *Resources* 2(4), pp. 489–503.
- Kitzes, J., Galli, A., Bagliani, M., Barrett, J., Dige, G., Ede, S., Erb, K., Giljum, S., Haberl, H., Hails, C., Jolia-Ferrier, L., Jungwirth, S., Lenzen, M., Lewis, K., Loh, J., Marchettini, N., Messinger, H., Milne, K., Moles, R., Monfreda, C., Moran, D., Nakano, K., Pyhälä, A., Rees, W., Simmons, C., Wackernagel, M., Wada, Y., Walsh, C., & Wiedmann, T. (2009): A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. *Ecological Economics* 68(7), pp. 1991–2007.
- Kuosmanen, T., Kuosmanen, N., El Meligi, A., Ronzon, T., Gurria Albusac, P., Iost, S. & M'barek, R. (2020): How big is the bioeconomy? EUR 30167 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/144526.
- Lenzen, M., Geschke, A., Rahman, M. D. A., Xiao, Y., Fry, J., Reyes, R., Dietzenbacher, E., Inomata, S., Kanemoto, K., Los, B., Moran, D., in den Bäumen, H. S., Tukker, A., Walmsley, T., Wiedmann, T., Wood, R. & Yamano, N. (2017): The Global MRIO Lab – charting the world economy. *Economic Systems Research* 29(2), pp. 158–186.
- Lenzen, M., Pade, L. & Munksgaard, J. (2010): CO₂ Multipliers in Multi-Region Input-Output Models. *Economic Systems Research* 16(4), S. 391–412.
- Liu, J., Mooney, H., Hull, V., Davis, S.J., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K.C., Gleick, P., Kremen, C., Li, S. (2015): Systems integration for global sustainability. *Science* 347(6225):1258832.
- Lutter, S., Giljum, S. & Lieber, M. (2016): *Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Maier, L. (2018): *Rohstoffe weltweit im Einsatz für Deutschland. Berechnung von Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten*. *Wirtschaft und Statistik* 2018(2), S. 23–36.
- Mayer, H. & Flachmann, C. (2011): *Erweitertes Input-Output Modell für Energie und Treibhausgase – Methoden und Ergebnisse*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Marin, G., Mazzanti, M., & Montini, A. (2012): Linking NAMEA and Input Output for 'consumption vs. production perspective' analyses – evidence on emission efficiency

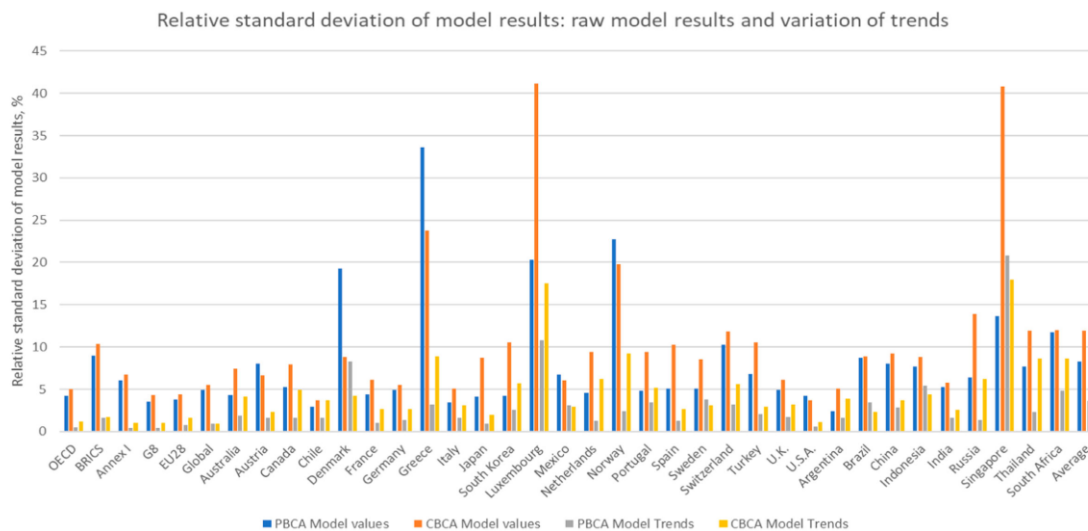
- and aggregation biases using the Italian and Spanish environmental accounts. *Ecological Economics* 74, pp. 71–84.
- Meyer, M., Hirschnitz-Garbers, M. & Distelkamp, M. (2018): Contemporary Resource Policy and Decoupling Trends – Lessons Learnt from Integrated Model-Based Assessments. *Sustainability* 10(6), 1858.
- Owen, A., Wood, R., Barrett, J. & Ewans, A. (2016): Explaining value chain differences in MRIO databases through structural path decomposition. *Economic Systems Research* 28(2), pp. 243–272.
- Philippidis, G., Bartelings, H. & Smeets, E. (2018a): Sailing into uncharted waters: Plotting a course for EU bio-based sectors. *Ecological Economics* 147, pp. 410–421.
- Philippidis, G., Bartelings, H., Helming, J., M'barek, R., Ronzon, T., Smeets, E., van Meijl, H. & Shutes, L. (2018b): The MAGNET model framework for assessing policy coherence and SDGs – Application to the bioeconomy. Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-81792-2, doi:10.2760/560977.
- Remond-Tiedrez, I., Rueda-Cantuche, J., Afonso, A., Amores, A., Ferreira, P., Lara, M., Bouwmeester, M., Stehrer, R., Bolivar, A., Rocchi, P. & Valderas Jaramillo, J. (2019): European Union inter-country supply, use and input-output tables — Full international and global accounts for research in input-output analysis (FIGARO). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Sala, S., Benini, L., Beylot, A., Castellani, V., Cerutti, A., Corrado, S., Crenna, E., Diaconu, E., Sanyé-Mengual, E., Secchi, M., Sinkko T. & Pant, R. (2019): Consumption and Consumer Footprint – methodology and results. Indicators and Assessment of the environmental impact of EU consumption. Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-97256-0, doi:10.2760/98570.
- Schaffartzik, A., Haberl, H., Kastner, T., Wiedenhofer, D., Eisenmenger, N. & Erb, K. H., (2015): Trading Land – A Review of Approaches to Accounting for Upstream Land Requirements of Traded Products. *J Ind Ecol.* 19(5), pp. 703–714.
- Schoer, K., Weinzettel, J., Kovanda, J., Giegrich, J. & Lauwigi, C. (2012): Raw Material Consumption of the European Union – Concept, Calculation Method, and Results. *Environmental Science & Technology* 46, pp. 8903–8909.
- Schuh, M. D. (2018): Flächenbelegung durch Importe pflanzlicher Erzeugnisse. *Wirtschaft und Statistik* 2018(3), S. 118–127.
- Schuh, M. & Flachmann, C. (2018): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Flächenbelegung von Ernährungsgütern – Methoden und Konzepte. *Umweltökonomische Gesamtrechnungen*, Statistisches Bundesamt.
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Bruckner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J. H., Theurl, M. C., Plutzer, C., Kastner, T., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., de Koning, A. & Tukker, A. (2018): EXIOBASE 3 – Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal of Industrial Ecology* 22, pp. 502–515.

- Statistisches Bundesamt (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Methode des gesamtwirtschaftlichen Materialkontos. Wiesbaden.
- Steger, S. (2005): Der Flächenrucksack des europäischen Außenhandels mit Agrarprodukten. Welche Globalisierung ist zukunftsfähig? Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy (Hrsg.). Wuppertal Paper 152, Wuppertal.
- Sun, Z., Scherer, L., Tukker, A. & Behrens, P. (2020): Linking global crop and livestock consumption to local production hotspots. *Global Food Security* 25, 100323.
- Sun, Z., Tukker, A. & Behrens, P. (2019): Going Global to Local – Connecting Top-Down Accounting and Local Impacts. A Methodological Review of Spatially Explicit Input–Output Approaches. *Environmental Science & Technology* 53(3), pp. 1048–1062.
- Tukker, A., de Koning, A., Owen, A., Lutter, S., Bruckner, M., Giljum, S., Stadler, K., Wood, R. & Hoekstra, R. (2018): Towards Robust, Authoritative Assessments of Environmental Impacts Embodied in Trade – Current State and Recommendations. *Journal of Industrial Ecology* 22, pp. 585–598.
- Tukker, A. & Dietzenbacher, E. (2013): Global multiregional input–output frameworks – An introduction and outlook. *Economic Systems Research* 25, pp. 1–19.
- Tukker, A., Wood, R. & Schmidt, S. (2020): Towards accepted procedures for calculating international consumption-based carbon accounts. *Climate Policy* 20(S1), pp. 90–106.
- Tukker, A., Poliakov, E., Heijungs, R., Hawkins, T., Neuwahl, F., Rueda-Cantuche, J. M., Giljum, S., Moll, S., Oosterhaven, J. & Bouwmeester, M. (2009): Towards a global Multi-Regional Environmentally Extended Input–Output database. *Ecological Economics* 68(7), pp. 1928–1937.
- Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996): Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth. New Society Publishers, Gabriola Island, British Columbia, Canada.
- Walker, A. N., Zult, D., Hoekstra, R., van den Berg, M. & Dingena, G. (2017): Footprint Calculations using a Dutch National Accounts Consistent Exiobase. CBS / Statistics Netherlands.
- Wiebe, K. S., Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C. & Polzin, C. (2012): Carbon and Materials Embodied in the International Trade of Emerging Economies. A Multiregional Input–Output Assessment of Trends Between 1995 and 2005. *Journal of Industrial Ecology* 16, pp. 636–646.
- Wiebe, K. & Yamano, N. (2016): Estimating CO₂ Emissions Embodied in Final Demand and Trade Using the OECD ICIO 2015 – Methodology and Results. OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2016/05, OECD Publishing, Paris.
- Wiedmann, T. & Lenzen, M. (2018): Environmental and social footprints of international trade. *Nature Geoscience* 11, pp. 314–321.
- Wood, R., Moran, D. D., Rodrigues, J. F. D. & Stadler, K. (2019): Variation in trends of consumption-based carbon accounts. *Scientific Data* 6, p. 99.

Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., de Koning, A., Kuenen, J., Schuetz, H., Acosta-Fernandez, J., Usubiaga, A., Simas, M., Ivanova, O., Weinzettel, J., Schmidt, J. H., Merciai, S. & Tukker, A. (2015): Global Sustainability Accounting – Developing EXIOBASE for Multi-Regional Footprint Analysis. *Sustainability* 7, pp. 138–163.

ANHANG 1: EMPIRISCHE SENSITIVITÄT MRIO-BASIERTER FUßABDRUCK-BERECHNUNGEN FÜR DEUTSCHLAND

Abbildung 5: Relative Abweichungen nationaler CO₂-Fußabdruck Berechnungen unter Anwendung unterschiedlicher MRIO-Datenbanken



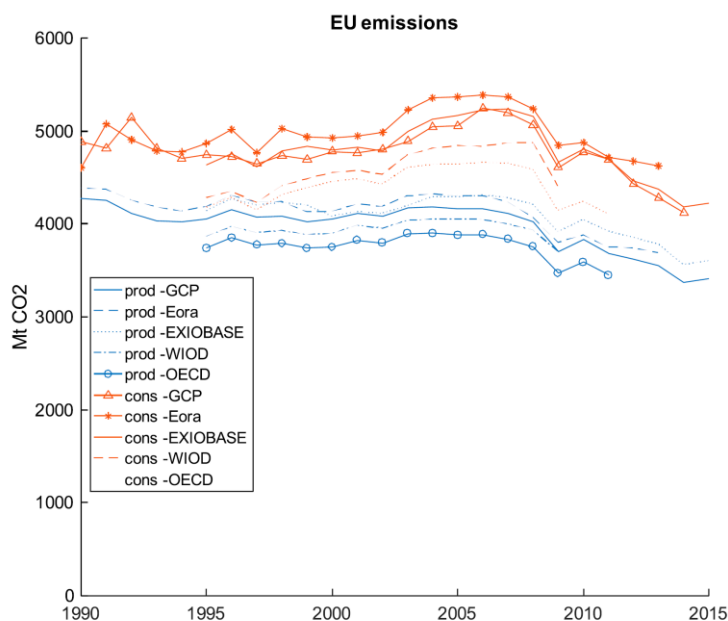
Quelle: Tukker et al. (2020)

In den vergangenen Jahren wurden mehrere empirische Analysen zur Beurteilung der Robustheit von Forschungsbefunden bei Anwendung unterschiedlicher MRIO-Datenbanken veröffentlicht. Siehe beispielsweise Tukker et al. (2018) oder Tukker et al. (2020) für jüngere entsprechende Überblicksartikel.

Die beobachtbare Sensitivität einzelner Länderbefunde variiert dabei deutlich zwischen unterschiedlichen Volkswirtschaften. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt beispielhaft Abweichungen zwischen unterschiedlichen Berechnungen für Emissionsfußabdrücke. Die Abbildung ist Tukker et al. (2020) entnommen und basiert auf Vorarbeiten von Wood et al. (2019). Die jeweiligen Balken visualisieren die im Vergleich unterschiedlicher Anwendungen beobachtbaren Standardabweichungen in den Ergebnissen. Unterschieden werden dabei produktionsseitige (PBCA) und verwendungsseitige (CBCA) Fußabdruckberechnungen in absoluten Niveaus (values) sowie für harmonisierte Berechnungen (Trends), bei denen die Emissionsniveaus für sämtliche Datenbankanwendungen zunächst auf ein Basisjahr kalibriert wurden.

Insgesamt zeigt dieser Ergebnisvergleich, dass bei Betrachtung einzelner Niveauewerte im Vergleich zu den harmonisierten Trendberechnungen tendenziell deutlich höhere Standardabweichungen zu beobachten sind. Während also die absolut ausgewiesenen Fußabdrücke bei Anwendung unterschiedlicher Datenbanken für einzelne Länder und Regionen im Niveau relativ deutlich voneinander abweichen können, erweisen sich die jeweils resultierenden Abschätzungen der Entwicklungsdynamiken im Zeitablauf als recht robust. Für Deutschland wird beim Vergleich der Niveauschätzungen eine relative Standardabweichung von ca. 5 % ausgewiesen. Bei der Betrachtung von Entwicklungstrends reduziert sich dieses Maß ungefähr auf die Hälfte.

Abbildung 6: Beispielhafter Vergleich MRIO-basierter Abschätzungen des europäischen CO₂-Fußabdrucks



Quelle: Tukker, Wood & Schmidt (2020).

Gemäß der Darstellung bei Tukker et al. (2020) lassen sich die beobachtbaren Ergebnisvariationen insbesondere auf unterschiedliche Datenquellen der in den jeweiligen Datenbanken verwendeten umweltrelevanten Daten zurückführen. So greifen unterschiedliche MRIO-Datenbankversionen beispielsweise in ihrer Berichterstattung über Emissionswerte auf verschiedene statistische Quellen zurück. Beobachtbare Variationen zwischen den jeweiligen CO₂-Fußabdruckberechnungen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für beispielhafte EU-weite Berechnungen) können daher zu weiten Teilen auf konzeptionelle Unterschiede in der jeweiligen Erfassung der Emissionswerte zurückgeführt werden.

Dieser Befund kann allerdings nicht unmittelbar auf andere Fußabdruck-Indikatoren übertragen werden. So gelten beispielsweise Material-Fußabdruckberechnungen unter diesem Aspekt als wesentlich robuster. Die vom International Resource Panel bereitgestellten harmonisierten globalen Extraktionsdaten repräsentieren in diesem Sinne ein positives Beispiel einer international akzeptierten und allgemein genutzten umweltrelevanten Datenquelle.

Als weitere Sensitivitätsquelle werden von Tukker et al. (2020) Variationen des sektoralen Detailgrads zwischen den jeweiligen MRIO-Datenbanken benannt. Die im SYMOBIO-Projekt angewandte EXIOBASE-Datenbank zeichnet sich dabei durch eine ausgesprochen detaillierte sektorale Auflösung aus. Es lässt sich nicht pauschal abschätzen, ob und in welchem Maße die Ergebnisse des SYMOBIO-Monitorings durch Anwendungen hoher aggregierter Klassifikationsmuster beeinflusst würden. Hierzu müssten eigenständige Simulationsrechnungen durchgeführt werden, welche nicht Gegenstand des SYMOBIO-Projekts waren.

Der im Kontext dieses Papiers wichtigste Aspekt zur Beurteilung der Robustheit von MRIO-basierten Fußabdruckberechnungen verweist auf die generelle Bedeutung einer validen Erfassung nationaler Wirtschafts- und Handelsdaten. Als offensichtlich notwendige, aber anscheinend nicht immer gewährleistete Anforderung halten Tukker et al. (2020) fest, dass die in MRIO-Datenbanken abgebildeten Beiträge einzelner Volkswirtschaften zum globalen Bruttoinlandsprodukt auf offizielle Statistiken abzustimmen sind. Darüber hinaus wird aber insbesondere betont, dass die detaillierten Strukturinformationen der jeweiligen nationalen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen in volkswirtschaftlichen Fußabdruck-Berechnungen für einzelne Länder umfassend integriert werden sollten.

ANHANG 2: GRUNDIDEE SOGENANNTER SINGLE COUNTRY NATIONAL ACCOUNTS CONSISTENT FOOTPRINTS

Textbox 1: „Kochbuch“ zur Nutzung der amtlichen Statistik in globalen Fußabdruck-Berechnungen

1. *Take an existing MRIO (e.g., EXIOBASE, ICIO, GTAP, Eora, or WIOD). The choice may be guided by the type of footprint to be calculated—for water and land, a high level of agricultural detail is required, as given by GTAP and EXIOBASE, while for carbon and value added more aggregated databases like WIOD and ICIO may be appropriate.*
2. *For the country for which the footprints have to be calculated, use the I-O data and extensions from existing national accounts as provided by the relevant NSI [National Statistical Institutes].*
3. *“Plug in” these national accounts data in the MRIO, fix them, and rebalance the total MRIO in such a way that, in the resulting MRIO, the country for which footprints have to be calculated data fit precisely with national accounts.*
4. *Use this SNAC MRIO to calculate the footprint of consumption.*

Quelle: Tukker et al. (2018, p. 593f)

Als umfassender Ansatz zur Minimierung empirischer Unsicherheiten von MRIO-gestützten Fußabdruckberechnungen werden in der Literatur sogenannte „single country national accounts consistent“(SNAC)-Berechnungen diskutiert. Die inhaltliche Vorgehensweise zur Berechnung von SNAC-Fußabdrücken ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Das Zitat von Tukker et al. (2018) orientiert sich an dem Ideal einer umfassenden Verwendung sämtlicher verfügbarer Informationen der amtlichen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen in nationalen Fußabdruckberechnungen. Der offensichtliche Vorteil dieser Vorgehensweise ist dadurch gegeben, dass inländische Entwicklungen mit größtmöglicher Detailtiefe abgebildet werden (Punkt 2 im Textbox-Zitat). So könnten im Prinzip auch sämtliche in Kapitel 3 angesprochenen Sonderrechnungen des Statistischen Bundesamtes zur detaillierten Abschätzung direkter Außenhandelsverflechtungen sowie inländischer Nachfragestrukturen in entsprechenden Rechenansätzen weiterhin genutzt werden.

Die wesentliche inhaltliche Herausforderung wird durch Punkt 3 des oben wiedergegebenen Zitats angesprochen: Die ursprünglich international harmonisierte MRIO-Datenbank muss nach Aktualisierung der nationalen Daten des berichtenden Landes neu kalibriert werden. Technisch kann hierzu auf Algorithmen zur multidimensionalen Optimierung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen (in diesem Fall die aktualisierten Länderinformationen) zurückgegriffen werden. Entsprechende Ansätze wurden bereits von Edens et al. (2015) für die Niederlande sowie Hambÿe et al. (2018) für Belgien angewandt.¹⁹ Während

¹⁹ Für weitergehende Referenzen zu früheren Fußabdruck-Abschätzungen nationaler statistischer Ämter verweisen Tukker et al. auf Hoekstra et al. (2014).

Edens et al. (2015) wie auch Hambÿe et al. (2018) die konsistente Integration nationaler Statistiken zunächst am Beispiel der WIOD-Datenbank vorstellten, konzentrierten sich spätere Arbeiten des Statistischen Amtes der Niederlande auf entsprechende Überarbeitungen der EXIOBASE-Datenbank (Walker et al. 2017).