

GWS DISCUSSION PAPER 2017/07

Der Einsatz von MRIO zur Berechnung der Fußabdrücke von Nationen

Eine Anwendung der EXIOBASE-Daten-
bank

Markus Flaute
Christian Lutz
Martin Distelkamp

Impressum

AUTOREN

Dr. Markus Flaute

Tel: +49 (541) 40933-295, E-Mail: flaute@gws-os.com

Dr. Christian Lutz

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

Martin Distelkamp

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

TITEL

Der Einsatz von MRIO zur Berechnung der Fußabdrücke von Nationen – Eine Anwendung der EXIOBASE-Datenbank

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, Dezember 2017

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

Die 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	Input-Output-Methodik und MRIO	3
2.1	Input-Output-Tabellen	3
2.2	Input-Output-Analyse	6
2.3	Überblick über MRIO-Datensätze	8
3	Berechnung eines THG-Fußabdrucks mit EXIOBASE	11
3.1	Methodik der Fußabdruck-Berechnung mit MRIO	11
3.2	Anwendung des EXIOBASE-Datensatzes	16
3.3	Erste Ergebnisse	19
4	Zusammenfassung und Ausblick	24
	Literaturverzeichnis	27

1 EINLEITUNG

Der internationale Handel von Gütern und Dienstleistungen hat sich zwischen 1970 und 2010 nahezu verfünzfacht und ist deutlich schneller gewachsen als die globale Wirtschaftsleistung (vgl. Kanemoto & Murray 2013). Zugleich stößt die menschliche Nutzung der globalen Ökosysteme zunehmend an ihre Grenzen (Steffen et al. 2015). Die Umweltinanspruchnahme geht dabei so weit, dass eine vollständige Regeneration durch die Erde nicht mehr gewährleistet werden kann (vgl. Galli et al. 2011). Zu nennen sind hier Probleme wie Nahrungsmittelknappheit, fehlender Zugang zu Energie, Vermüllung oder auch Wasserknappheit in Form sinkender Grundwasserspiegel oder austrocknender Seen und Flüsse sowie schrumpfende Wälder. Ein viel diskutiertes Problem sind die stetig wachsenden Treibhausgasemissionen (THG) auf der Erde, die sich in der Atmosphäre akkumulieren und so den Treibhauseffekt verstärken. Zuletzt wurde auf der UN-Klimakonferenz in Paris 2015 beschlossen, die Emissionen von THG in der Zukunft soweit zu reduzieren, dass die Erderwärmung möglichst auf unter 1,5 °C im Vergleich zum Niveau vor der Industrialisierung begrenzt wird. Dafür muss die Welt die Nettoemissionen zwischen 2045 und 2060 auf null zurückfahren und zusätzlich zuvor zu viel ausgestoßenes CO₂ aus der Erdatmosphäre entfernen.

Weltweites Handeln in Sachen Klimaschutz ist nötig, um die Ziele von Paris erreichen zu können. Der Treibhauseffekt ist ein globales Problem und auch die zunehmende internationale Verflechtung der wirtschaftlichen Abläufe und damit einhergehend die Emissionen von THG machen eine globale Analyse notwendig. In der internationalen Berichterstattung werden die THG nach dem Territorialprinzip dem Land zugerechnet, in dem die Emissionen etwa durch Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen.

Aus verschiedenen Gründen werden zunehmend auch nachfrageseitige oder konsumbasierte Zurechnungsverfahren diskutiert (vgl. Kanemoto & Murray 2013). Heimischer Konsum ist heutzutage häufig auch mit wachsendem Wohlstand, Beschäftigungseffekten und zugleich Umweltinanspruchnahmen im produzierenden Ausland verbunden. Dabei ermöglicht der nationale und internationale Handel, dass Produzenten und Konsumenten räumlich zunehmend weiter auseinander liegen. In einer globalisierten Welt wird es damit immer schwieriger, die Umweltinanspruchnahme zu regulieren und unter Kontrolle zu halten. Es gibt Hinweise darauf, dass die THG-intensive Produktion aus Ländern mit hohen Umweltauflagen unter den aktuell geltenden klimapolitischen Rahmenbedingungen in Länder mit niedrigen Löhnen und weniger strengen Umweltauflagen verlagert wird, während der Konsum weiterhin in reichen industrialisierten Ländern stattfindet (vgl. Galli et al. 2011). Die tatsächliche Dimension dieser Verlagerung – das sogenannte *Carbon Leakage* – ist zwar umstritten und empirische Analysen deuten nur auf einen begrenzten Zusammenhang, zugleich ist die zunehmende Arbeitsteilung in der globalisierten Welt aber unbestritten. Die mit dem Konsum einhergehenden negativen Umweltwirkungen müssen deshalb weltweit sichtbar gemacht werden (vgl. Weinzettel et al. 2011). Entsprechende Politikmaßnahmen können helfen, die Konsumenten auf die Problematik aufmerksam zu machen und zum Handeln zu bewegen (vgl. Wood et al. 2015).

Die Berechnung von sog. Fußabdrücken bietet eine Möglichkeit, die entsprechenden Zusammenhänge sichtbar zu machen und Handlungsempfehlungen zu erarbeiten, die Produktion und Konsum gleichermaßen berücksichtigen (vgl. Galli et al. 2011, Giljum et al. 2016). In den letzten Jahren wurde zur Analyse der Umweltfolgen wirtschaftlicher Aktivitäten eine Vielzahl an (multiregionalen) Input-Output-Modellen entwickelt. Die Verflechtung der globalen Wirtschaft macht es dabei erforderlich, dass diese Modelle nicht nur die Struktur der nationalen Wirtschaft abbilden, sondern auch die internationalen Handelsverflechtungen berücksichtigen. Mit diesen Modellen können sog. Fußabdrücke berechnet werden.

Ein THG-Fußabdruck ist ein Maß für die Gesamtmenge an THG-Emissionen, die direkt und indirekt durch eine Aktivität verursacht werden oder sich über die Lebensdauer eines Produktes akkumulieren. Dabei werden die durch Konsum von Gütern und Dienstleistungen verursachten Emissionen durch private Haushalte, den Staat und andere Endnachfrager berücksichtigt. Auch die den international gehandelten Gütern und Dienstleistungen zurechenbaren Emissionen werden erfasst. Der Fußabdruck eines Landes ergibt sich aus der Summe der durch Konsum und Investitionen verursachten Emissionen im In- und Ausland. Fußabdrücke unterscheiden sich damit von der territorial abgegrenzten Sichtweise auf die Emissionen der internationalen THG-Berichterstattung (vgl. Galli et al. 2011).

Die Bioökonomie spielt für den globalen Klimaschutz eine entscheidende Rolle. Ohne die Senkenfunktion von Wäldern sind negative Nettoemissionen zum Ende des Jahrhunderts kaum vorstellbar. Die Verwendung von Biomasse für Energiezwecke vermeidet THG-Emissionen – umgekehrt entstehen durch die gegenwärtige landwirtschaftliche Produktion große Mengen an THG. Die Bioökonomie bietet eine Möglichkeit, die bisher stark auf fossilen Energieträgern basierte Weltwirtschaft auf natürliche Kreisläufe umzustellen. Dabei ist mit Blick auf die natürliche Umgebung zu berücksichtigen, dass neben der Begrenzung der THG-Emissionen weitere Herausforderungen im 21. Jahrhundert bestehen. Eine wachsende Weltbevölkerung muss auf begrenzten Nutzflächen ausreichend und gesund ernährt werden, womit der zunehmende Verlust an Biodiversität und Bodenfruchtbarkeit Gegenmaßnahmen erfordert. Die Endlichkeit fossiler Rohstoffe macht die Erschließung neuer Rohstoffquellen notwendig. Die wissenschaftsbasierte Bioökonomie soll den Strukturwandel von einer auf endlichen fossilen Quellen basierenden Wirtschaft hin zu einer auf nachwachsenden Ressourcen basierenden Wirtschaft ermöglichen (vgl. BMEL 2014).

An diesem Punkt setzt SYMOBIO an – ein Forschungsprojekt im Rahmen des Konzepts „Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Die Förderung dient dazu, die Bioökonomie als inter- und transdisziplinäres Forschungsfeld zu verankern und eine an gesellschaftlichen Herausforderungen orientierte Perspektive auf die Bioökonomie zu eröffnen. Das Projekt entwickelt die wissenschaftlichen Grundlagen für ein systemisches Monitoring und für die Modellierung der Bioökonomie in Deutschland unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten auf nationaler und internationaler Ebene. Teil der Forschungsarbeit wird es sein, Fußabdrücke der Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen, von Wald, Wasser und THG sowie die sozio-ökonomische Bilanz der Bioökonomie zu ermitteln.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Input-Output-Tabellen und ihre Anwendung im Rahmen der Input-Output-Analyse zur Berechnung von Fußabdrücken. In Kapitel 2 wird nach einer Einführung in die Systematik der Input-Output-Tabellen und die Input-Output-

Analyse ein Überblick über die aktuell in der Wissenschaft eingesetzten multiregionalen Input-Output-Modelle (MRIO) gegeben. In Kapitel 3 wird die Theorie der Berechnung von Fußabdrücken erläutert und mit dem EXIOBASE-Datensatz ein THG-Fußabdruck für Deutschland berechnet. Nach einem kurzen Fazit wird in Kapitel 4 ein Ausblick auf anstehende Forschungsarbeiten gegeben.

2 INPUT-OUTPUT-METHODIK UND MRIO

2.1 INPUT-OUTPUT-TABELLEN

Input-Output-Tabellen (IOT) werden für viele Länder von den jeweiligen statistischen Ämtern kostenfrei veröffentlicht. In Deutschland werden sie vom Statistischen Bundesamt erstellt (Destatis 2017b). Sie sind ein integraler Bestandteil der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR). Als sog. Sekundärstatistik ist die Input-Output-Rechnung vollständig mit den Ergebnissen der Inlandsproduktberechnung abgestimmt. Sie basiert auf einer Vielzahl von Daten wie Kostenstrukturerhebungen sowie der Produktions- und Dienstleistungsstatistik. Wichtige Eckdaten kommen aus der Entstehungs- und Verwendungsrechnung des Bruttoinlandsprodukts. IOT sind nur alle fünf Jahre an Eurostat zu liefern, werden vom Statistischen Bundesamt jedoch für jedes Berichtsjahr erstellt und veröffentlicht. Sie bilden eine wichtige Grundlage für Strukturuntersuchungen in einer Volkswirtschaft sowie zur Unterstützung von wirtschaftspolitischen Entscheidungen. Je nach Anwendungszweck können sich die IOT und die Analysemethoden unterscheiden.

Eine IOT stellt die Lieferungen zwischen definitorisch abgegrenzten Sektoren in einem festgelegten Zeitraum systematisch dar. Je nach Analyse können unterschiedliche sektorale Gliederungen und Bezugszeiträume untersucht werden. Im klassischen Fall der Betrachtung einer gesamten Volkswirtschaft stellt eine IOT die Waren- und Dienstleistungsströme dar, die zwischen einzelnen Wirtschaftsbereichen einer Volkswirtschaft innerhalb eines Kalenderjahres fließen. Sie fasst das Aufkommen und die Verwendung der Güter einer Volkswirtschaft zusammen und beschreibt detailliert den inländischen Produktionsprozess sowie die Gütertransaktionen innerhalb einer Volkswirtschaft (vgl. Kuhn 2010). Die einzelnen Lieferungen und Bezüge zwischen den Sektoren werden in Geldeinheiten bewertet.

Symmetrische IOT können entweder in der Form „Güter mal Güter“ oder „Sektor mal Sektor“ erstellt werden. Eine IOT der Form „Güter mal Güter“ enthält die monetär bewerteten Transaktionen zwischen den Gütergruppen, während die „Sektor mal Sektor“-IOT die monetären Transaktionen zwischen wirtschaftlichen Sektoren abbildet. Die beiden Tabellen unterscheiden sich inhaltlich, weil manche Sektoren andere bzw. zusätzliche Güter produzieren als die standardisierten Güter, welche für die IOT nach Gütergruppen abgegrenzt werden (vgl. Weinzettel et al. 2011). Für die Gütergruppen wird vereinfachend angenommen, dass ein einheitliches homogenes Gut, z. B. ein Durchschnittsauto, hergestellt wird.

In einem Produktionssektor werden verschiedene Inputs zur Herstellung des jeweiligen Gutes benötigt. Neben Vorleistungen aus anderen Produktionssektoren können auch nicht produzierbare Güter (z. B. Arbeit) oder nicht in der betrachteten Volkswirtschaft produzier-

bare Güter (Importe) zum Einsatz kommen. Diese Güter werden als primäre Inputs bezeichnet. Auf der Lieferseite werden zum einen Lieferungen an andere Produktionssektoren und zum anderen Lieferungen an die Endnachfrage (Konsum, Investitionen, Exporte) unterschieden. Bestimmte Güter werden auch ohne weitere Bearbeitung an die Endnachfrage geliefert.

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer IOT

		Input der Produktionsbereiche			Letzte Verwendung			Gesamte Verwendung
		Sektor 1	Sektor 2	...	Konsum	Investit.	Exporte	
Output	Sektor 1	...	...	...	...	...	...	...
	Sektor 2	.. Vorleistungsmatrix ..			Endnachfragematrix			Σ

Komponenten der Wertschöpfung		...	...	...	Gesamtes Aufkommen =			Gesamte Verwendung
Matrix der Primärintputs		...	...	...	
Gesamtes Aufkommen		...	Σ	...				

Quelle: eigene Darstellung

Eine IOT ist in unterschiedliche Quadranten unterteilt (Abbildung 1). Im ersten Quadranten (auch Vorleistungsmatrix genannt) werden die Vorleistungsverflechtungen der Volkswirtschaft abgebildet. Für die einzelnen Produktionsbereiche ist detailliert dargestellt, welche Güter aus inländischer Produktion und welche importiert als Input im Produktionsprozess eingesetzt werden. Der zweite Quadrant (auch Endnachfragematrix genannt) verdeutlicht die Nachfrage der Güter in der letzten Verwendung, unterteilt nach Konsum, Investitionen und Exporten. Der dritte Quadrant (Matrix der Primärintputs) enthält die im Rahmen der Produktion entstandene Wertschöpfung nach Komponenten. Zu diesen primären Inputfaktoren bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen zählen z. B. Abschreibungen (Kapitalkosten), Arbeitnehmerentgelte (Lohnkosten) und der Betriebsüberschuss (Gewinne einschließlich Selbstständigeneinkommen). Außerdem findet ein Übergang von Herstellungspreisen zu Anschaffungspreisen bei den Vorleistungen der Produktionsbereiche statt (plus Gütersteuern minus Gütersubventionen). Auch die importierten Vorleistungen werden zu den Primärintputs gezählt. Die Spaltensummen (das gesamte Aufkommen) entspricht den Zeilensummen (die gesamte Verwendung).

Die IOT in Deutschland sind nicht institutionell abgegrenzt (Produktionsverflechtungen zwischen Unternehmen), sondern als Darstellungseinheit werden homogene Produktionseinheiten verwendet. Diese lassen sich nicht unmittelbar aus Ergebnissen statistischer Erhebungen zusammenstellen, in denen Unternehmen mit heterogenem Output befragt werden (vgl. Kuhn 2010). Vielmehr handelt es sich bei der Darstellung in den IOT um eine idealtypische Betrachtung, die einer vereinfachten Darstellung der realen Wirtschaftswelt entspricht. Bei der Erstellung der IOT werden Unternehmen mit zwar gleichen Endprodukten, aber unterschiedlichen Produktionsprozessen in einem Sektor zusammengefasst. Die Zuordnung der einzelnen Unternehmen zu den jeweiligen Sektoren ist mit Unsicherheiten verbunden (vgl. Vendries-Algarin et al. 2014).

Die länderspezifischen IOT werden von den jeweiligen nationalen statistischen Ämtern veröffentlicht. Diese Ein-Länder-IOT (*single-region input-output table, SRIO*) enthalten wie oben dargestellt nur die Vorleistungsverflechtungen, die Endnachfrage, die Primärintputs

und die Importe und Exporte für ein Land bzw. eine Region. Mit SRIO-Tabellen können somit nur die Wertschöpfungsketten für diese eine Region analysiert werden. In einer SRIO-Tabelle fehlen die Informationen darüber, was mit den exportierten Gütern und Dienstleistungen im Ausland passiert (z. B. Einsatz als Vorleistungsgüter oder Endnachfrage?), wohin sie geliefert werden und wie genau die importierten Güter und Dienstleistungen im Ausland produziert werden (vgl. Giljum et al. 2013, Kanemoto & Murray 2013). Neben den rein monetären IOT gibt es in seltenen Fällen auch physische IOT. Als Zwischenstufe können auch IOT erstellt werden, die sowohl Wert- als auch Mengenströme enthalten (sog. hybride IOT). In bestimmten Zeilen der Tabelle werden die Wertangaben durch Mengenangaben ersetzt, z. B. in Energiebereichen. Vorteile werden u. a. darin gesehen, dass inhomogene Güterströme mit signifikant unterschiedlichen Durchschnittspreisen durch Mengenangaben den Endnachfragegütern besser zugerechnet werden können und mit den Wertangaben eine weitere Disaggregation (z. B. der Energiebereiche) vorgenommen werden kann (vgl. Mayer & Flachmann 2011). Durch die Angabe von Heizwerten als Mengeneinheit bei Energiegrößen können bspw. auch unmittelbar die Kohlendioxid-Emissionen zugerechnet werden.

Aus den länderspezifischen SRIO-Tabellen kann unter Berücksichtigung der internationalen Handelsströme zwischen den einzelnen Ländern eine Welt-IOT (WIOT) bzw. eine mehrregionale Input-Output(MRIO)-Tabelle erstellt werden (vgl. Timmer et al. 2016). Eine solche MRIO-Tabelle für die Welt enthält neben den auf der Hauptdiagonalen liegenden inländischen Güterverflechtungen für alle Länder auch die Importe an Gütern und Dienstleistungen, die im jeweiligen inländischen Produktionsprozess eingesetzt werden. Es kann somit nachvollzogen werden, welche Produktionsprozesse im Ausland explizit an der Erstellung der Importe beteiligt waren und für welche Produktionsprozesse im Ausland die Exporte eines Landes verwendet werden (vgl. Kanemoto & Murray 2013).

MRIO-Modelle können insbesondere zur Analyse von international gehandelten Gütern verwendet werden. Eine globale IOT unterscheidet n Länder mit jeweils m Gütergruppen und hat somit $n \times m$ Zeilen und $n \times m$ Spalten. Sie bildet den gesamten internationalen Handel und die wirtschaftliche Verflechtung in allen Ländern in einer einzigen Tabelle ab. Entlang der Hauptdiagonalen der MRIO-Tabelle stehen jeweils die nationalen IOT der inländischen Produktion. Die Felder rechts und links der Hauptdiagonalen enthalten die in ausländischer Produktion eingesetzten heimischen Vorleistungsgüter und -dienstleistungen (Vorleistungsexporte). Die Felder ober- und unterhalb der Hauptdiagonalen enthalten die zur inländischen Produktion eingesetzten importierten Güter und Dienstleistungen für jeden einzelnen internationalen Handelspartner. Abbildung 2 verdeutlicht die Zusammenhänge grafisch.

Abbildung 2: Schematische Darstellung einer MRIO-Tabelle (hellgrau: länderspezifische IOT, dunkelgrau: bilaterale Handelsverflechtungen).

		Sektoren			Endnachfrage		
		Region 1	Region 2	...	Region 1	Region 2	...
Sektoren	Region 1	Vorleistungen	⋮	⋮	Endnachfrage	⋮	⋮
	Region 2	Importierte Vorleistungen	Vorleistungen	⋮	Importierte Endnachfrage	Endnachfrage	⋮
	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Wertschöpfung		Wertschöpfung	Wertschöpfung	⋮			

Quelle: eigene Darstellung

Für die Erstellung einer MRIO-Tabelle ist es empfehlenswert (aber nicht Voraussetzung), dass alle abgebildeten Länder eine einheitliche sektorale Gliederung haben. Auch Daten für die Importe und Exporte müssen vorliegen oder berechnet werden. Da die statistische Aufbereitung der nationalen IOT für die einzelnen Länder nicht einheitlich erfolgt, muss für eine Harmonisierung gesorgt werden (vgl. Owen et al. 2014). Eine solche Harmonisierung bietet Raum für Unsicherheit, da verschiedene Ansätze zur Harmonisierung gewählt werden können. Unterschiedliche Techniken der Harmonisierung sorgen somit für unterschiedliche MRIO-Tabellen, was wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen bei deren Anwendung führt (vgl. Owen 2013, Inomata & Owen 2014).

Anhand einer MRIO-Tabelle kann der Produktionsprozess eines einzelnen Gutes entlang aller beteiligten Sektoren in allen abgebildeten Ländern hinweg analysiert werden (vgl. Galli et al. 2011). Wenn der Land-, Energie- oder Wasserverbrauch, die THG-Emissionen sowie die Rohstoffextraktionen je Produktionssektor in jedem Land bekannt sind, können mit der MRIO-Tabelle Flächen-, Wasser-, THG- und Material-Fußabdrücke berechnet werden (vgl. Hertwich & Peters 2010).

2.2 INPUT-OUTPUT-ANALYSE

IOT beschreiben den inländischen Produktionsprozess und die Gütertransaktionen innerhalb einer Volkswirtschaft für ein bestimmtes Berichtsjahr. Bei den dargestellten Verflechtungen handelt es sich jedoch nur um die direkten Verflechtungen zwischen einzelnen Wirtschaftssektoren und der Endnachfrage. Mit diesen IOT können somit ex-post-Analysen vorgenommen werden. Es können strukturelle Zusammenhänge einer Volkswirtschaft untersucht und Vorleistungsverflechtungen sichtbar gemacht werden (vgl. hier und im Folgenden Holub & Schnabel 1994).

Neben den direkten Verflechtungen sind auch die indirekten wirtschaftlichen Verflechtungen in einer Volkswirtschaft von Bedeutung. Eine erhöhte Nachfrage nach einem Gut erhöht seine Produktion. Mit dieser erhöhten Produktion ist unmittelbar ein erhöhter Bedarf an Vorleistungen verbunden, was wiederum zu einer erhöhten Produktion an Vorleistungen führt. Zusätzlich zu diesem direkten Effekt stellen sich weitere indirekte Effekte dadurch ein, dass die Produzenten der Vorleistungen ebenfalls Güter und Dienstleistungen als Inputs zur Produktion beziehen. Auf der zweiten Stufe erhöht sich somit die Nachfrage nach den für die Produktion der Vorleistungen benötigten Gütern und Dienstleistungen. Diese Verflechtungen können über weitere Stufen abgebildet werden.

Dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie führt eine erhöhte Nachfrage nach Autos zu zusätzlichen Lieferungen aus der Stahl-, Gummi-, Elektro-, Textil-, Mineralöl- und weiteren Industriezweigen an die Automobilindustrie. Damit diese Lieferungen ausgeführt werden können, benötigen diese vorgelagerten Industrien ihrerseits zusätzliche Lieferungen aus dem Erzbergbau, der Eisen- und Metallverarbeitung, der Stromerzeugung usw. Wird davon ausgegangen, dass die Automobilindustrie Vorleistungen aus über 30 vorgelagerten Industriezweigen bezieht und diese ihrerseits wieder je von über 10 Zulieferindustrien beliefert werden, dann ergeben sich durch eine erhöhte Nachfrage nach Autos bereits nach der zweiten Stufe der Lieferkette über 300 zusätzliche Güterströme. Die einzelnen Industriezweige beziehen ihrerseits wiederum zusätzliche Autos aus der Automobilindustrie und sorgen damit für Rückwirkungen auf den auslösenden Sektor Automobilindustrie. Die Berechnung der Gesamtwirkung der auslösenden Nachfrageerhöhung nach Autos ist durch die zirkulären Zusammenhänge nicht trivial.

Die Input-Output-Analyse (IOA) versucht, dieses Problem unter Verwendung von IOT zu lösen. Entwickelt wurde sie hauptsächlich von Wassily Leontief, der u. a. für diese Arbeiten im Jahr 1973 mit dem Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften ausgezeichnet wurde. Über das rein deskriptive Beschreiben der wirtschaftlichen Verflechtungen hinaus werden mit der IOA die von veränderten ökonomischen Größen ausgehenden Veränderungen der Gesamtwirkungen quantifiziert. Dazu werden bestimmte Annahmen zur Vereinfachung unterstellt. Während ein Produktionsprogramm in der Realität auch von der produzierten Menge abhängig ist, gilt bei der IOA typischerweise eine Proportionalitätsannahme bzw. eine lineare Produktionstechnologie: Die Produktionsfaktoren stehen in einem festen Verhältnis zueinander und zum Output (sog. Leontief-Produktionsfunktion). Von möglichen Kapazitätsgrenzen bei der Produktion wird abstrahiert.

Beim statischen offenen Mengenmodell werden die für die Produktion notwendigen Inputs unabhängig von der Höhe der produzierten Menge proportional mit dem jeweiligen Output verknüpft. Die Größen der Endnachfrage werden exogen im Modell vorgegeben („offenes“ Modell). Es gibt keine Rückkopplungen im Modell mit der Endnachfrage, d. h. mögliche Einkommenssteigerungen durch eine erhöhte Produktion resultieren nicht in einem erhöhten Konsum. Das Modell heißt statisch, weil der Faktor Zeit nicht explizit berücksichtigt wird. Alle Größen im Modell beziehen sich auf die gleiche Zeitperiode, typischerweise auf ein Jahr. Im Folgenden wird das mathematische Modell für die IOA dargestellt.

Für alle n Sektoren ergibt sich der gesamte Output X_i eines Sektors i als Summe aus den gelieferten Vorleistungen X_{ij} sowie der Endnachfrage Y_i nach den Gütern des Sektors:

$$X_1 = X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} + Y_1$$

$$X_n = X_{n1} + X_{n2} + \dots + X_{nn} + Y_n$$

Input-Koeffizienten beschreiben für jeden Produktionsbereich die zur Produktion erforderlichen Inputs (bzw. die Kostenstruktur). Die Inputs werden jeweils in Relation zu den entsprechenden Produktionswerten ausgedrückt:

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j}$$

Ersetzt man die X_{ij} in obigem Gleichungssystem, dann ergibt sich ein System von n inhomogenen linearen Gleichungen:

$$X_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + Y_1$$

$$X_n = a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n + Y_n$$

In Matrixschreibweise stellt sich das Gleichungssystem wie folgt dar:

$$x = Ax + y$$

A ist die quadratische nichtnegative Matrix der Inputkoeffizienten, x der n -elementige Spaltenvektor der Outputs und y der n -elementige Spaltenvektor der gesamten Endnachfrage. Durch Isolation des Output-Vektors x ergibt sich

$$(I - A)x = y$$

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

Die Matrix $(I - A)^{-1}$ wird Leontief-Inverse genannt. Bei bekannter Endnachfrage y und bekannter Koeffizientenmatrix A können die sektoralen Outputs x berechnet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Matrix $(I - A)^{-1}$ existiert; vgl. z. B. Holub & Schnabel 1994 für eine Darstellung der Bedingungen, unter welchen Voraussetzungen die Matrix $(I - A)^{-1}$ existiert. In Kapitel 3.1 wird der hier vorgestellte Ansatz zur Berechnung der mit der Endnachfrage y verbundenen Emissionen verwendet.

2.3 ÜBERBLICK ÜBER MRIO-DATENSÄTZE

Die Erstellung einer multiregionalen IOT erfordert viele Einzeldaten und ist sehr rechenintensiv. Für eine detaillierte multiregionale IOT wäre es notwendig, dass die monetären Transaktionen weltweit zwischen allen Wirtschaftssektoren konsistent und einheitlich gemessen würden. Da ein solches Vorgehen nicht umsetzbar ist, werden MRIO-Tabellen mit den länderspezifischen IOT und internationalen Handelsdaten konstruiert. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie mit der Aufbereitung der Ursprungsdaten, der Abgrenzung der Wirtschaftssektoren und der Umsetzung umgegangen werden kann. Im Folgenden werden einige Probleme dargestellt, die bei der Erstellung einer MRIO-Tabelle auftreten (vgl. im Folgenden Peters 2007 und Owen 2013):

- Länderspezifische IOT liegen jeweils in nationaler Währung vor und müssen für eine MRIO-Tabelle auf eine einheitliche monetäre Basis gebracht werden. Dabei ergeben sich Unsicherheiten durch verschiedene Wechselkurse, die Bewertung von Importen und Exporten etc.
- Damit eine MRIO-Tabelle die Welt als geschlossenes System abbilden kann, werden nicht explizit abgebildete Länder in einer Region „Rest der Welt“ zusammengefasst. Zwar kann die Summe der Transaktionen für diese Region berechnet werden, es fehlt aber an einer detaillierten Abbildung der Wirtschaftsstruktur.
- Die internationalen Handelsdaten helfen, die Import- und Exportbeziehungen zwischen einzelnen Ländern detailliert abbilden zu können. Im Idealfall sollten Importe und Exporte zwischen zwei Ländern jeweils gleich sein. Tatsächlich entsprechen die von einem Land A an Land B gemeldeten Exporte in der Regel nicht exakt den von Land B aus Land A gemeldeten Importen. Gründe können u. a. unterschiedliche Bewertungsmethoden, zeitliche Verzögerungen zwischen Export und Import, unterschiedliche Abgrenzung der Sektoren etc. sein.
- Zeilen- und Spaltensummen einer MRIO-Tabelle müssen identisch sein (vgl. Abbildung 1). Bei der ursprünglichen Erstellung einer MRIO-Tabelle ist dies typischerweise nicht der Fall. Mit verschiedenen mathematischen und ökonometrischen Methoden wie z. B. RAS werden die Einträge der Zeilen und Spalten dabei so angepasst, dass die Zeilen- und Spaltensummen identisch sind. Je nach verwendeter Methode ergeben sich unterschiedliche Einträge in der MRIO-Tabelle.

Im Folgenden werden fünf verschiedene MRIO-Datensätze vorgestellt. Jeder Datensatz wurde für spezielle Fragestellungen mit jeweils unterschiedlichen Intentionen entwickelt. Bei der Erstellung wurden jeweils unterschiedliche Methoden verwendet.

Eora

Der Eora-Datensatz enthält multiregionale IOT für den Zeitraum von 1990 bis 2012. Es werden 187 Länder unterschieden. Die sektorale Gliederung der einzelnen Länder ist unterschiedlich und variiert zwischen 25 und 500 Sektoren (vgl. Lenzen et al. 2013).

EXIOBASE

Der EXIOBASE-Datensatz wurde im Rahmen mehrerer Projekte des europäischen Forschungsrahmenprogramms entwickelt (Projekte EXIOPOL, CREEA, DESIRE). In der aktuellen Version 3 stellt der Datensatz die heute detaillierteste Datengrundlage dar, um die Umwelt-Performance europäischer Länder in ihrem globalen Kontext zu analysieren (vgl. Giljum et al. 2016). EXIOBASE v3 deckt aktuell einen zeitlichen Rahmen von 1995 bis 2011 ab und berücksichtigt alle EU-28 Länder sowie die 16 wichtigsten Handelspartner der EU. Der Rest der Welt wird zusammengefasst in fünf Gruppen abgebildet (Asia and Pacific, America, Europe, Africa, Middle East). Insgesamt werden 163 Wirtschaftszweige und 200 Gütergruppen unterschieden. Der Datensatz enthält zusätzlich eine Vielzahl verschiedener Umweltdaten wie Energieverbrauch, Wasserentnahme sowie Luft- und Wasserverschmutzung.

GTAP

Das GTAP-MRIO Modell ist ein multiregionales Input-Output-Modell, welches mit Hilfe des GTAP-Datensatzes erstellt wurde. Der GTAP-Datensatz enthält Daten, welche den bilateralen Handel, die Produktion, den Konsum sowie den Einsatz als Vorleistungen von Gütern und Dienstleistungen zwischen den enthaltenen Ländern abbilden (vgl. Hertel 1997). Entwickelt wurde der GTAP-Datensatz im Jahr 1992 mit dem Ziel, diesen in CGE-Modellen zur Analyse von Handelspolitik und Handelsströmen einzusetzen (vgl. Arto et al. 2014). Aktuell ist der Datensatz in der neunten Version verfügbar. Der GTAP-Datensatz ermöglicht es ebenfalls, ein multiregionales Input-Output-Modell zu erstellen. In der aktuellen GTAP-Version 9 sind die Jahre 2004, 2007 und 2011 enthalten. Es werden 140 Länder und 57 Sektoren unterschieden (vgl. Aguiar et al. 2016).

OECD

Die OECD-Input-Output-Tabelle (*inter-country input-output table, ICIO*) wurde während eines OECD-WTO-Projekts entwickelt, um die im Handel enthaltene Wertschöpfung (Trade in Value Added, TiVA) näher zu untersuchen. Der aktuelle Datensatz in der Ausgabe von 2016 enthält 63 Länder (35 OECD-Länder, 28 Nicht-OECD-Länder) sowie Informationen zu China, Mexico und einem Aggregat „Rest of the world“. Es werden 34 Industriesektoren unterschieden, davon 16 Sektoren des verarbeitenden Gewerbes und 14 Sektoren aus dem Dienstleistungssektor. Zeitlich werden die Jahre von 1995 bis 2011 abgedeckt.

Tabelle 1: Übersicht über fünf MRIO-Datensätze

MRIO	regional	Auflösung sektoral	zeitlich
Eora	187	Variiert zwischen den Ländern; von 26 bis 511 Sektoren	1990–2012
EXIOBASE v3	44 Länder, 5 Rest of the World	163 Wirtschaftszweige, 200 Gütergruppen	1995–2011
GTAP (Open EU) v9	140 Regionen	57 Sektoren	2004, 2007, 2011
OECD ICIO	63 Länder + China, Mexico und Rest of the World	34 Sektoren	1995–2011
WIOD, Release 2016	43 Länder	56 Sektoren	2000–2014

Quelle: eigene Darstellung

WIOD

Eine erste Version des WIOD-Datensatzes wurde im Rahmen des offiziellen WIOD-Projekts, das von der Europäischen Kommission gefördert wurde, veröffentlicht. Das Projekt lief ab Mai 2009 und endete im April 2012. Der Datensatz wurde im Jahr 2012 offiziell vorgestellt. Die aktuelle Version des Datensatzes wurde 2016 veröffentlicht. Der WIOD-Datensatz umfasst die Jahre 2000 bis 2014. Es werden 43 Länder unterschieden, darunter alle 28 Länder der Europäischen Union sowie 15 weitere große Volkswirtschaften. Diese 43 Länder decken über 85 % des weltweiten Bruttoinlandsprodukts ab. Der sog. „Rest der Welt“ wird ebenfalls berücksichtigt. Die *World Input-Output-Tables* (WIOT) sind in der Form „Sektor mal Sektor“. Insgesamt werden 56 Sektoren unterschieden (vgl. Timmer et al. 2016).

Zur besseren Nutzung von Ressourcen und zur Vermeidung von Doppelarbeit wird aktuell der Ansatz eines globalen MRIO-Lab-Konzepts diskutiert (vgl. Lenzen et al. 2017). Ziel eines solchen Forschungsgruppen übergreifenden Ansatzes ist es, zeit- und arbeitsintensive Aufgaben unter mehreren Forschungsteams aufzuteilen und dabei gleichzeitig die bekanntesten oben genannten MRIO-Datenbanken der Welt kontinuierlich liefern zu können.

3 BERECHNUNG EINES THG-FUßABDRUCKS MIT EXIOBASE

3.1 METHODIK DER FUßABDRUCK-BERECHNUNG MIT MRIO

Das Interesse an der Nutzung von multiregionalen Input-Output-Modellen ist vor dem Hintergrund der Globalisierung und dem zunehmenden internationalen Handel in der Vergangenheit stetig gewachsen. Mit MRIO-Modellen können die globalen Wertschöpfungsketten nachvollzogen und analysiert werden (vgl. Kanemoto & Murray 2013). Aber auch umweltökonomische Analysen wie die Berechnung der durch Konsum verursachten CO₂-Emissionen in einem bestimmten Land können mit MRIO-Modellen durchgeführt werden. Im Rahmen der Debatten um die Ausgestaltung und Wirksamkeit von internationalen Klimaabkommen treten Fragen bzgl. der Verteilung von Emissionen zwischen Produktion und Konsum in unterschiedlichen Ländern sowie der Verschiebung von Emissionen durch internationalen Handel in den Vordergrund (vgl. Arto et al. 2014). Auch die Problematik des *Carbon Leakage* wird mit Hilfe von konsumbasierten Ansätzen näher untersucht (vgl. Wood & Moran 2014). Insbesondere in der Politikberatung kommen die MRIO-Ansätze zunehmend zum Einsatz, um die Entstehung der globalen CO₂-Emissionen besser nachvollziehen zu können und die politischen Strategien entsprechend daran auszurichten (vgl. Owen et al. 2014). Wiedmann & Barrett 2013 geben einen Überblick, wie MRIO-Modelle in der Politik Anwendung finden.

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls und des Pariser Klimaabkommens werden die THG-Emissionen für einzelne Länder nach territorialer Abgrenzung bilanziert. Bei der produktionsbasierten Bilanzierung werden die THG-Emissionen dem Land zugerechnet, in dem die Produktion erfolgt. Anders verhält es sich bei der verbrauchs- bzw. konsumbasierten Zuordnung von THG-Emissionen. Ein THG-Fußabdruck ist ein Maß für die Gesamtmenge dieser Emissionen, die direkt und indirekt durch eine Aktivität verursacht werden oder sich über

die Lebensdauer eines Produktes akkumulieren. Dabei werden die durch heimische Endnachfrage (privater und staatlicher Konsum sowie Investitionen) verursachten Emissionen berücksichtigt. Auch die den international gehandelten Gütern und Dienstleistungen zurechenbaren Emissionen werden eingerechnet. Der Fußabdruck eines Landes ergibt sich aus der Summe der durch Konsum und Investitionen verursachten Emissionen im In- und Ausland. Fußabdrücke unterscheiden sich damit von der territorial abgegrenzten Sichtweise auf die Emissionen bei den Inventaren der THG-Emissionen in der internationalen Berichterstattung (vgl. Galli et al. 2011). Neben dem THG-Fußabdruck können auch solche für Wasser, Material und Landnutzung bestimmt werden.

Konsum hat unterschiedliche umweltbedingte Auswirkungen: Ein direkter Effekt stellt sich unmittelbar durch den Verbrauch bestimmter Güter ein, z. B. durch die Verbrennung fossiler Energieträger. Ein indirekter Effekt entsteht durch die bei der Produktion der verkauften Güter entstehenden Emissionen. Werden die im Inland verbrauchten Güter auch im Inland produziert, dann kann mit nationalen politischen Maßnahmen auf die Emissionen reagiert werden. Der stark gewachsene internationale Handel hat jedoch dazu geführt, dass immer mehr Produkte aus dem Ausland importiert werden und damit auch die bei der Produktion entstehenden Emissionen. Da die Umweltwirkungen der Emissionen ein globales Problem sind, ist das Interesse an Methoden zur Untersuchung dieser gehandelten Emissionen in der Vergangenheit gewachsen (vgl. Hertwich & Peters 2010, Giljum et al. 2013).

Fußabdruck-Analysen mit MRIO-Tabellen ermöglichen es, genau diese konsumbasierten Emissionen oder Ressourceninanspruchnahmen zu bestimmen, indem alle bei der Produktion anfallenden Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen dem tatsächlich letzten Konsum zugerechnet werden können – unter Berücksichtigung aller vorgelagerten Stufen der Produktion und aller eingesetzten Vorleistungen (vgl. Weinzettel et al. 2011). Erst die Betrachtung sowohl der territorial abgegrenzten Umweltindikatoren als auch der Fußabdruck-Indikatoren liefert ein vollständiges Bild der Ressourceninanspruchnahme und Emissionen eines Landes (vgl. Giljum et al. 2013).

Die ersten Ansätze einer MRIO-Methodik wurden im Jahr 1951 von Walter Isard entwickelt (vgl. Isard 1951). Seitdem wurde der Ansatz weiterentwickelt und für immer neue Anwendungen eingesetzt. Etwa seit dem Jahr 2005 wird der MRIO-Ansatz zur Untersuchung von umweltökonomischen Fragestellungen verwendet (vgl. Kanemoto & Murray 2013).

Giljum et al. 2013 unterscheiden drei Methoden, wie ein Fußabdruck berechnet werden kann:

1. Ein erster Ansatz basiert auf der IOA (vgl. Kapitel 2.2). Die Verflechtungen zwischen den einzelnen Wirtschaftssektoren werden mit physischen Daten über Ressourcennutzung (Material, Wasser, Landdaten) oder Emissionen (z. B. THG-Emissionen für einen THG-Fußabdruck) kombiniert. Die Input-Output-Ansätze können entweder für ein Land (SRIO) oder für mehrere Länder (MRIO) betrachtet werden. Es handelt sich um einen Top-down-Ansatz.
2. Eine zweite Methode bildet die Lebenszyklusanalyse (LCA) der Produkte. Dabei werden Ressourcen- und Emissionsintensitäten für einzelne Produkte oder Produktgruppen unter Berücksichtigung der globalen Produktionsketten bestimmt. Mit den jeweiligen LCA-Koeffizienten können Fußabdrücke bestimmt werden. Ausgehend von einzelnen Produkten handelt es sich hierbei um einen Bottom-up-Ansatz.

3. Der dritte ist ein hybrider Ansatz aus der IOA und der koeffizientenbasierten Analyse. Beim hybriden Ansatz wird die Gesamtheit der zu untersuchenden Produkte aufgeteilt und jeweils ein Teil mit der IOA und der andere (besonders interessierende) Teil mit dem koeffizientenbasierten Ansatz untersucht.

Bei der IOA werden neben dem direkten Einsatz im Produktionsprozess eines zu analysierenden Sektors auch die indirekten Lieferungen aus Vorleistungsverflechtungen mit den anderen Sektoren berücksichtigt. So kann der gesamte Input (direkt und indirekt), der zur Produktion einer bestimmten Endnachfrage benötigt wird, bestimmt werden. Zusammen mit Daten zur Ressourcennutzung bzw. zu Emissionen können die zur Befriedigung der Endnachfrage benötigten Ressourcen oder anfallenden Emissionen für jeden Sektor berechnet werden. Beim koeffizientenbasierten Ansatz werden die physikalischen Mengen, die zur Produktion eines Gutes benötigt werden, mit einem Faktor multipliziert, der die Ressourcenintensität bzw. die Emissionsintensität widerspiegelt. Ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zur Verwendung von I-O-Modellen ist, dass der koeffizientenbasierte Ansatz ein hohes Detailreichtum ermöglicht und nicht auf grobe sektorale Abgrenzungen angewiesen ist. Damit lassen sich Footprint-Vergleiche bis auf Produktebene durchführen.

Die Erstellung einer multiregionalen IOT bzw. eines MRIO-Datensatzes erfordert sehr viele Einzeldaten. Um dieses Datenproblem zu umgehen, können die den Importen zurechenbaren Emissionen in einem ersten Ansatz näherungsweise bestimmt werden, indem für die importierten Produkte aus dem Ausland ein ähnlicher Produktionsprozess und Energieverbrauch unterstellt wird wie im Inland (sog. *domestic technology assumption*), und die in einem solchen Produktionsprozess anfallenden Emissionen den Importen zugerechnet werden (vgl. Giljum et al. 2013 sowie Lenzen et al. 2010 für einen Überblick über die Anwendung dieses Ansatzes). Zwar reduziert die Import-Annahme den Bedarf an Daten deutlich, allerdings führt der Ansatz auch zu ungenauen Ergebnissen (vgl. Hertwich & Peters 2010). Die Methode stellt eine starke Vereinfachung der Realität dar und kann als ein theoretisches Konstrukt verstanden werden (vgl. Arto et al. 2014). Gerade die unterschiedlichen Produktionsprozesse mit unterschiedlichen Ressourcen- und Energieintensitäten in den einzelnen Ländern sind ein wesentlicher Grund für internationalen Handel (vgl. Giljum et al. 2013). Insofern lassen sich bei Verwendung eines MRIO-Datensatzes und einer detaillierten Berücksichtigung der internationalen Handelsverflechtungen genauere Ergebnisse erzielen.

Im Folgenden wird der Ansatz zur Berechnung der konsumbasierten Emissionen auf Grundlage des MRIO-Ansatzes kurz erläutert.

Der mit der inländischen Endnachfrage y verbundene globale Output x lässt sich wie in Kapitel 2.2 dargestellt mittels der Leontief-Inversen der globalen MRIOT bestimmen. Im Falle einer $p \times p$ -MRIOT mit 200 Produktionsbereichen/Gütergruppen und 49 Ländern/Regionen handelt es sich bei y um einen 9800-Element-Vektor, der die inländische Endnachfrage differenziert nach Gütergruppen und Herkunft in monetären Einheiten (Mio. Euro) darstellt. Bei x handelt es sich dann ebenfalls um einen 9800-Element-Vektor, der die mit der inländischen Endnachfrage verbundene Produktion differenziert nach Produktionsbereichen und Ländern/Regionen, in denen diese Produktion zu verorten ist, abbildet.

Zur Berechnung der mit der inländischen Endnachfrage verbundenen Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen muss diese Berechnung mit einem Intensitätsvektor e_c erweitert werden, welcher für die einzelnen in- und ausländischen Produktionssektoren die Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen f pro produzierter Einheit Output enthält (vgl. u. a. Peters 2007, Hertwich & Peters 2010, Weinzettel et al. 2011 sowie Budzinski et al. 2017):

$$e_c = f \hat{x}^{-1}$$

Durch Multiplikation des Intensitätsvektors mit dem Produktionsvektor x aus der Leontief-Analyse

$$p = e_c x$$

können somit die konsumbasierten Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen bestimmt werden, die sich durch die inländische Endnachfrage ergeben. Das Ergebnis ist ein „Verschmutzungs“-Vektor p , der je nach Intensitätsvektor eine unterschiedliche Größe aufweist.

Die MRIO-Berechnungen beruhen somit auf drei zentralen Datenquellen: Der Endnachfragematrix, der Produktions- und Handelsverflechtung in der MRIOT und den Emissions- bzw. Umnutzungskoeffizienten. Die produktionsseitige Verflechtung ist dabei deutlich komplexer und schwieriger zu bestimmen als z. B. die Endnachfrage. Auch die Bestimmung der direkten Emissionen und Ressourceninanspruchnahmen ist komplex und fällt in Abhängigkeit der jeweiligen Zielsetzung der einzelnen MRIO-Modelle jeweils unterschiedlich aus. Die Verwendung unterschiedlicher Datenquellen, die Anpassung der Datenstrukturen auf die Klassifizierung des MRIO-Modells oder der Umgang mit lückenhaften Datenquellen bieten jeweils Spielraum für unterschiedliche Herangehensweisen und sorgen folglich auch für unterschiedliche Ergebnisse (vgl. Owen et al. 2014, Wood & Moran 2014).

Die unter Kapitel 2.3 genannten MRIO-Datensätze wurden mehrfach zur Berechnung von Fußabdrücken bzw. zur Berechnung von in internationalem Handel enthaltenen Emissionen verwendet. Giljum et al. 2013 liefert einen Überblick, in welchen Studien in den letzten Jahren welche Ansätze zur Berechnung von Fußabdruck-Indikatoren zum Einsatz gekommen sind. Insbesondere bei der Berechnung von Emissions-Fußabdrücken werden zum überwiegenden Teil Input-Output-Modelle verwendet. Bei Land-Fußabdrücken kommt hingegen häufiger der Koeffizientenansatz zum Einsatz, da hier ein hohes Disaggregationsniveau für verschiedene Produkte besonders wichtig ist.

Verschiedene empirische Untersuchungen verdeutlichen, dass sich die mit den genannten MRIO-Modellen berechneten Emissions-Fußabdrücke jeweils unterscheiden. Wood & Moran 2014 vergleichen die Ergebnisse von vier MRIO-Datensätzen (OpenEU (GTAP), Eora, WIOD und EXIOBASE) miteinander. Die maximale Abweichung der mit den Modellen berechneten konsumbasierten Emissionen beträgt je nach regionaler Abgrenzung 10 bis 20 %. Owen et al. 2014 untersuchen, warum es beim Einsatz von unterschiedlichen MRIO-Datensätzen zur Analyse von konsumbasierten CO₂-Emissionen jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen kommt. Dazu wurden für das Jahr 2007 die mit den MRIO-Datenbanken Eora, GTAP und WIOD berechneten konsumbasierten CO₂-Emissionen miteinander verglichen und mit statistischen Methoden untersucht, welche Größen für die Unterschiede in

den Ergebnissen verantwortlich sind. Wesentlichen Einfluss auf die unterschiedlichen Ergebnisse haben dabei insbesondere die unterschiedlichen totalen globalen CO₂-Emissionen in den Datensätzen (im Jahr 2007 in GtCO₂: Eora 28,23; GTAP 22,80; WIOD 25,26) sowie Unterschiede in der totalen globalen Endnachfrage und der Leontief-Inversen.

Steen-Olsen et al. 2014 untersuchen, welchen Einfluss der Grad der Aggregation der Sektoren einer multiregionalen IOT auf die Ergebnisse der konsumbasierten Emissionen hat. Eine hohe Heterogenität bei den einzelnen Unternehmen innerhalb eines Sektors kann nur durch einen hohen Grad an Disaggregation berücksichtigt werden. Problematisch daran ist jedoch der erhöhte Bedarf an Daten, der mit der Anzahl an Sektoren zunimmt. Arto et al. 2014 untersuchen zwei MRIO-Modelle (GTAP-MRIO und WIOD) für die Berechnung eines globalen CO₂-Fußabdrucks von einzelnen Ländern. Mit Hilfe der strukturellen Dekomposition (*structural decomposition analysis*) werden die Teile der Datensätze bestimmt, die bei der Berechnung der Fußabdrücke für unterschiedliche Ergebnisse sorgen. 75 bis 80 % der Daten sind ähnlich. Insbesondere die Unterschiede in den Datensätzen von vier Ländern (USA, China, Russland und Indien) erklären fast 50 % der Unterschiede der CO₂-Fußabdrücke, die mit den beiden Datensätzen berechnet wurden. Branchenbedingt können 50 % der Unterschiede durch die Unterschiede in der Elektrizitäts-, Raffinerie- und Transportindustrie erklärt werden. Ein Vergleich zwischen einer Berechnung mit der *domestic technology assumption* und einem echten Mehr-Länder-Modell bei Lenzen et al. 2010 zeigt, dass sich die Ergebnisse für die dänischen CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der unterstellten Endnachfrage um 20 bis 50 % unterscheiden. Um dieser Problematik besser begegnen zu können, werden vermehrt MRIO-Modelle zur Berechnung von ökonomischen, sozialen und ökologischen Effekten des internationalen Handels eingesetzt (vgl. Arto et al. 2014). Der Datenbedarf ist bei MRIO-Modellen im Vergleich zu SRIO entsprechend um ein Vielfaches höher und die Berechnung von Fußabdrücken mit MRIO-Modellen erfordert spezielle mathematische Fähigkeiten und Kenntnisse (vgl. Giljum et al. 2013).

Die Vorteile der Nutzung von MRIO-Ansätzen, u. a. zur Fußabdruck-Berechnung, sind vielfältig (vgl. Weinzettel et al. 2011, Giljum et al. 2013, Kanemoto & Murray 2013):

- Länderspezifische Produktionsfaktoren und die Verknüpfung der Länder über die Abbildung der internationalen Handelsbeziehungen verbessern die Qualität und den Umfang der Fußabdruck-Berechnungen. Mit MRIO-Tabellen können globale Wertschöpfungs- und Lieferketten detailliert abgebildet und analysiert werden.
- MRIO-Tabellen bilden einen in sich geschlossenen und konsistenten Rahmen. Nur durch diesen einheitlichen Rahmen lässt sich die internationale Vergleichbarkeit der Berechnungs-Ergebnisse gewährleisten.
- Nur auf Grundlage von MRIO-Berechnungen lässt sich die Konsistenz der Berechnungs-Ergebnisse überprüfen. So müssen beispielsweise die Fußabdrücke der inländischen Endnachfrage der einzelnen Länder/Regionen jeweils zu den globalen Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen addiert werden.
- MRIO-Tabellen nutzen den gleichen analytischen Rahmen wie nationale SRIO-Tabellen. Es können die gleichen bekannten Techniken zur Auswertung verwendet werden.
- Strukturelle Pfadanalysen (*Structural Path Analysis*) ermöglichen es im MRIO-Rahmen, spezifische internationale Wertschöpfungs- und Lieferketten detailliert zu untersuchen.

- Auswirkungen von Politikmaßnahmen können mittels Szenarioanalysen simuliert werden.
- MRIO-Tabellen sind ebenfalls ein passendes Analysetool für international agierende Konzerne, die auf mehreren Märkten in unterschiedlichen Branchen tätig sind. Mit MRIO-Tabellen ist es möglich, die Fußabdrücke für einzelne Produkte zu berechnen. Mit den sektoralen Lieferketten kann ein solcher Produkt-Fußabdruck abgeschätzt werden, ohne dass eine detaillierte Analyse der genauen Lieferkette erfolgen muss.

Neben den genannten Vorteilen sind mit der Verwendung von MRIO-Modellen auch Einschränkungen und Nachteile verbunden (vgl. Weinzettel et al. 2011 und Kanemoto & Murray 2013):

- Die sektorale Gliederung der IOT stellt eine vereinfachte Abbildung der Realität dar. Um alle Produkte und Branchen einer Volkswirtschaft abzubilden, werden diese in einer IOT einer übergeordneten Kategorie zugeordnet. Dabei können nicht alle unterschiedlichen Produktionsprozesse in der höchsten Auflösung berücksichtigt werden. Diese Einteilung führt somit teilweise zu falschen oder unvollständigen Datensätzen für die einzelnen Sektoren.
- IOT werden erst mit einem zeitlichen Verzug von mehreren Jahren durch die nationalen statistischen Ämter veröffentlicht. Da die IOT die Grundlage für die Berechnung von Fußabdrücken bilden, verhindert dieser zeitliche Verzug eine aktuelle Berechnung von Fußabdrücken.
- IOT enthalten die Verflechtungen innerhalb der Volkswirtschaft, dargestellt in monetären Größen. Für die Abbildung der Verflechtungen müssen die physischen Güterströme somit monetär bewertet werden. Bei der Bewertung entstehen Unsicherheiten, insbesondere bei Preisveränderungen im Zeitablauf sowie bei der Bewertungseinheit für unterschiedliche physikalische Güterströme. Der monetäre Wert einer physischen Einheit steigt über internationale Produktionsstufen teils dramatisch an.

3.2 ANWENDUNG DES EXIOBASE-DATENSATZES

Im Folgenden wird mit Hilfe des EXIOBASE-Datensatzes dargestellt, wie ein THG-Fußabdruck berechnet werden kann. EXIOBASE ist wie oben beschrieben ein globaler multiregionaler Input-Output-Datensatz. Die folgende Tabelle zeigt seine Entwicklung.

Tabelle 2: Entwicklung des EXIOBASE-Datensatzes

Projekt	Datensatz	Jahre	Verfügbarkeit	Gütergruppen / Industriezweige	Regionen
EXIOPOL	EXIOBASE v1	2000	2012	129 / 129	44
CREEA	EXIOBASE v2	2007	2014	200 / 163	48
DESIRE	EXIOBASE v3	1995–2011	2015	200 / 163	49

Quelle: Wood & Moran 2014

In der aktuellen Version 3 deckt der EXIOBASE-Datensatz die Jahre 1995 bis 2011 ab. Die räumliche Gliederung umfasst 44 Länder sowie 5 Länder-Aggregate für den Rest der Welt (RoW Asia and Pacific, RoW America, RoW Europe, RoW Africa, RoW Middle East). Bei der sektoralen Gliederung können zwei Versionen unterschieden werden: Die MRIO-Tabellen liegen sowohl in der Form „Industrie mal Industrie“ als auch in der Form „Güter mal Güter“ vor, wobei 163 Industriezweige bzw. 200 Gütergruppen unterschieden werden.

Um die konsumbasierten THG-Emissionen berechnen zu können, müssen die entsprechenden Daten aus dem EXIOBASE-Datensatz ausgelesen und weiterverarbeitet werden. Die Dimension des Datensatzes macht es erforderlich, dass spezielle Software für die Bearbeitung zum Einsatz kommt. Die multiregionale IOT (nach Industriezweigen gegliedert) enthält die Handelsverflechtungen zwischen 49 Ländern bzw. Ländergruppen mit jeweils 163 Industriezweigen, was einer Matrix mit ca. 63,8 Millionen Einträgen (7987 x 7987) entspricht. In der Gliederung nach 200 Gütergruppen enthält die Matrix ca. 96 Millionen Einträge. Die Endnachfrage im EXIOBASE-Datensatz gliedert sich ebenfalls für die 49 Länder bzw. Ländergruppen in 163 Industriezweige bzw. 200 Gütergruppen und es werden acht Endnachfragekategorien unterschieden. Für die einzelnen Industriezweige und Gütergruppen je Land werden über 400 unterschiedliche Emissionsarten ausgewiesen.

Der unter Abschnitt 3.1 für ein Land dargestellte Ansatz kann mit einer MRIO-Tabelle auf mehrere Länder erweitert werden. Die folgende Gleichung verdeutlicht für die Gliederung nach Industriezweigen, wie die einzelnen Elemente der Matrizen jeweils interpretiert werden können.

Abbildung 3: Interpretation der Matrixelemente bei einem MRIO-Ansatz

	(7987 × 49)	(7987 × 7987)	(7987 × 49)
	Austrian exports to satisfy foreign demand	Domestic IO multiplier matrices	Domestic FD matrices in EUR
Austrian domestic production to satisfy domestic demand	$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1c} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{c1} & x_{c2} & \dots & x_{cc} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} I - A_{11} & -A_{12} & \dots & -A_{1c} \\ -A_{21} & I - A_{22} & \dots & -A_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A_{c1} & -A_{c2} & \dots & I - A_{cc} \end{pmatrix}^{-1}$	$\begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{c1} & y_{c2} & \dots & y_{cc} \end{pmatrix}$
Imports to satisfy Austrian domestic demand		Imported IO multiplier matrices by exporting country	Imported FD matrices in EUR by exporting country

Quelle: in Anlehnung an Wiebe et al. 2012

Die Endnachfragematrix y enthält aufgeschlüsselt für die 163 Industriezweige in den 49 Ländern die aggregierte Endnachfrage der einzelnen Länder. Auf der Hauptdiagonalen stehen jeweils die Vektoren, welche die heimische Nachfrage nach heimischen Gütern enthalten. Abseits der Hauptdiagonalen steht in den Spalten jeweils die Importnachfrage der Länder nach ausländischen Gütern. Angewendet auf den EXIOBASE-Datensatz enthält der Vektor y_{11} also die Endnachfrage Österreichs nach heimisch produzierten Gütern, der Vektor y_{22} stellt die Endnachfrage Belgiens nach in Belgien produzierten Gütern dar. usw. Der Vektor y_{21} enthält die Endnachfrage Österreichs nach in Belgien produzierten Gütern und der Vektor y_{12} beschreibt die Endnachfrage Belgiens nach in Österreich produzierten Gütern. Insgesamt enthält die Matrix der Endnachfrage somit 7987 x 49 Einträge.

Zur Berechnung der Leontief-Inversen L wird die Technologiematrix A verwendet. Analog zur Interpretation der Endnachfrage werden auf der Hauptdiagonalen die Technologiematrizen mit den heimischen Input-Output-Koeffizienten verwendet. Die Leontief-Inverse enthält mit der Gliederung nach Industriezweigen 7987 x 7987 Einträge.

Durch Multiplikation der Leontief-Inversen mit der Matrix der Endnachfrage ergibt sich die für diese Endnachfrage erforderliche Gesamtproduktion. Das Ergebnis ist eine Matrix der Größe 7987 x 49. Die einzelnen in der Matrix stehenden Vektoren können entsprechend interpretiert werden. Auf der Hauptdiagonalen steht jeweils nach Industriezweigen gegliedert die einheimische Produktion der Länder. Abseits der Hauptdiagonalen stehen in den Spalten jeweils die Importe der einzelnen Länder. Der Vektor x_{11} enthält die Produktion Österreichs (aufgeschlüsselt nach Sektoren), die in Österreich weiterverarbeitet wird oder die Endnachfrage befriedigt. Der Vektor x_{21} enthält die Produktion Belgiens, die von Österreich zur Weiterverarbeitung und für die Endnachfrage importiert wird usw. Zeilenweise werden die Exporte der einzelnen Länder abgebildet.

Zur Bestimmung der mit dieser Produktion einhergehenden THG-Emissionen wird die Gleichung mit einer Matrix E mit THG-Intensitäts-Koeffizienten erweitert, um den Übergang von monetären Größen zu physischen Einheiten der Emissionen zu vollziehen. Je nach Ausgestaltung und Dimensionierung der Emissionsmatrix fällt die Darstellung der Verschmutzungs-Matrix P unterschiedlich aus. In nachstehender Abbildung findet sich das Beispiel der CO₂-Emissionen dargestellt. Synonyme Berechnungen lassen sich auf Grundlage von EXIOBASE auch für die Emissionen von Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆) durchführen.

Für die einzelnen Länder können die THG-Intensitäten als Zeilenvektoren oder als Matrizen auf der Hauptdiagonalen der großen E -Matrix abgebildet werden. Als Zeilenvektor enthalten die länderspezifischen Vektoren jeweils die THG-Intensitäten je Einheit Output für jeden Industriezweig. In diesem Fall hat die E -Matrix insgesamt 49 x 7987 Einträge. Bei der Matrixdarstellung stehen die THG-Intensitäten je Einheit Output für jeden Industriezweig jeweils auf der Hauptdiagonalen. Die E -Matrix hat dann insgesamt eine Größe von 7987 x 7987. Abseits der Zeilenvektoren bzw. abseits der Hauptdiagonalen sind die Einträge der E -Matrix jeweils Null.

Abbildung 4: Interpretation der Matrixelemente der Verschmutzungsmatrix P für CO₂-Emissionen

	(49 × 49)	(49 × 7987)		
Size of matrices	(7987 × 49)	(7987 × 7987)	(7987 × 7987)	(7987 × 49)

CO₂ emissions associated with Austrian production to satisfy Austrian demand

CO₂ emissions on Austrian imports

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1c} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{c1} & p_{c2} & \dots & p_{cc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & E_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I - A_{11} & -A_{12} & \dots & -A_{1c} \\ -A_{21} & I - A_{22} & \dots & -A_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A_{c1} & -A_{c2} & \dots & I - A_{cc} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{c1} & y_{c2} & \dots & y_{cc} \end{pmatrix}$$

CO₂ intensity coefficients

CO₂ emissions on Austria's exports

Quelle: in Anlehnung an Wiebe et al. 2012

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist die sog. Verschmutzungs-Matrix P . Sie enthält die mit der zur Befriedigung der weltweiten Endnachfrage y einhergehenden produktionsbedingten Emissionen, entweder dargestellt zwischen Ländern und Ländern (49 x 49) oder zwischen allen weltweiten Industriezweigen und Ländern (7987 x 49). Demnach sind die länderspezifischen Matrixeinträge p_{ij} entweder Skalare oder Spaltenvektoren. Auf der Hauptdiagonalen stehen die THG-Emissionen, die mit der inländischen Produktion zur Weiterverarbeitung oder Endnachfrage im Inland entstehen. Abseits der Hauptdiagonalen stehen spaltenweise die THG-Emissionen, die jeweils den Importen der einzelnen Länder zugerechnet werden können. Zeilenweise enthalten die Matrixeinträge die jeweils den Exporten der Länder zurechenbaren THG-Emissionen.

Mit dem dargestellten Ansatz lassen sich die produktionsbedingten THG-Emissionen für eine gegebene inländische Endnachfrage berechnen. Für die Abbildung eines vollständigen länderspezifischen THG-Fußabdrucks müssen neben den produktionsbedingten THG-Emissionen der Industrie und des Dienstleistungssektors auch noch die durch die Konsumenten selbst emittierten Treibhausgase berücksichtigt werden. Diese sind im EXIOBASE-Datensatz enthalten und müssen entsprechend zu den produktionsbedingten THG-Emissionen hinzuaddiert werden.

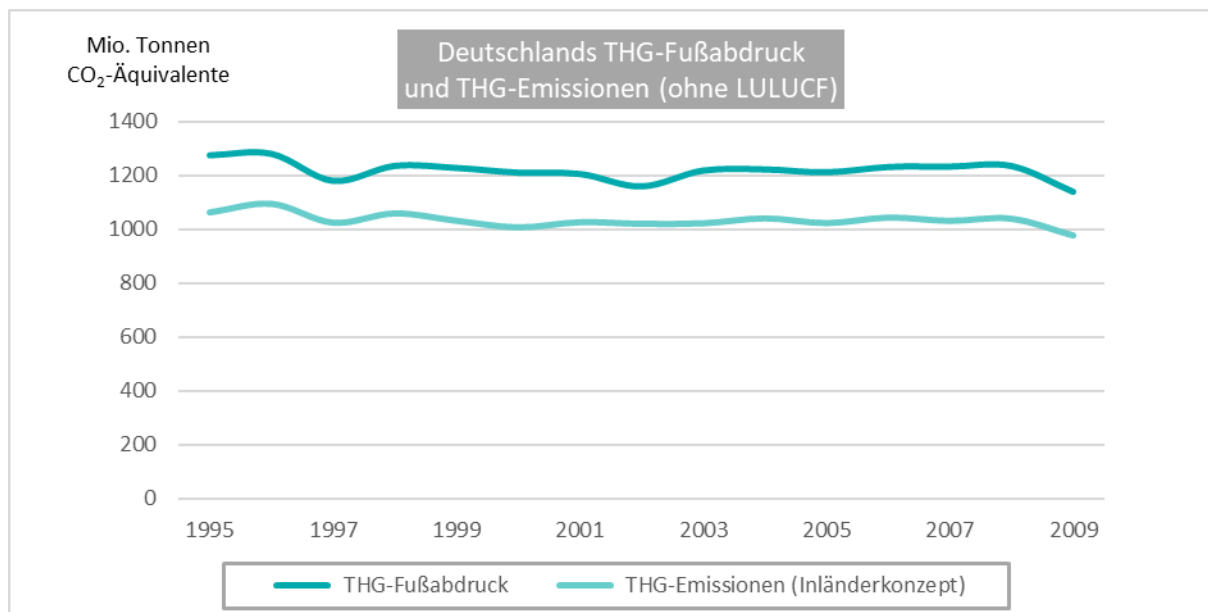
Die Berechnung des THG-Fußabdrucks der inländischen Endnachfrage ist nur eine Möglichkeit, wie der obige MRIO-Ansatz verwendet werden kann. Auf diese Möglichkeiten gilt es im Folgenden einzugehen, um anschließend erste Beispiele für Analyse-Ergebnisse auf Grundlage von EXIOBASE vorzustellen.

3.3 ERSTE ERGEBNISSE

Die folgende Abbildung 5 stellt den THG-Fußabdruck der deutschen Endnachfrage und die THG-Emissionen Deutschlands nach dem Inländerkonzept auf Basis der EXIOBASE-Daten für den Zeitraum 1995 bis 2009 dar. Der THG-Fußabdruck umfasst die THG-Emissionen, die aufgrund deutscher Nachfrage global anfallen. Die endnachfragebedingten THG-Emissionen Deutschlands liegen über den gesamten Zeitraum in einer Größenordnung von 14 % bis 20 % oder 140 bis 215 Mio. t. CO₂-Äquivalenten höher als die THG-Emissionen der Inländer. Deutschland ist nach dieser Berechnung Nettoimporteur von THG-Emissionen. Im Folgenden werden die Ergebnisse etwas aufgeschlüsselt und auch im internationalen Vergleich betrachtet.

Die Anteile der verschiedenen THG haben sich im betrachteten Zeitverlauf nur wenig geändert. Die Methanemissionen sind zwischen 1995 und 2009 etwas zurückgegangen, der Anteil von HFCs und PFCs hat sich auf niedrigem Niveau fast verdreifacht. Auch beim THG-Fußabdruck sind die Anteilsverschiebungen begrenzt und am größten wiederum bei den HFCs und PFCs.

Abbildung 5: THG-Fußabdruck und THG-Emissionen Deutschlands in Mio. t CO₂-eq



Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

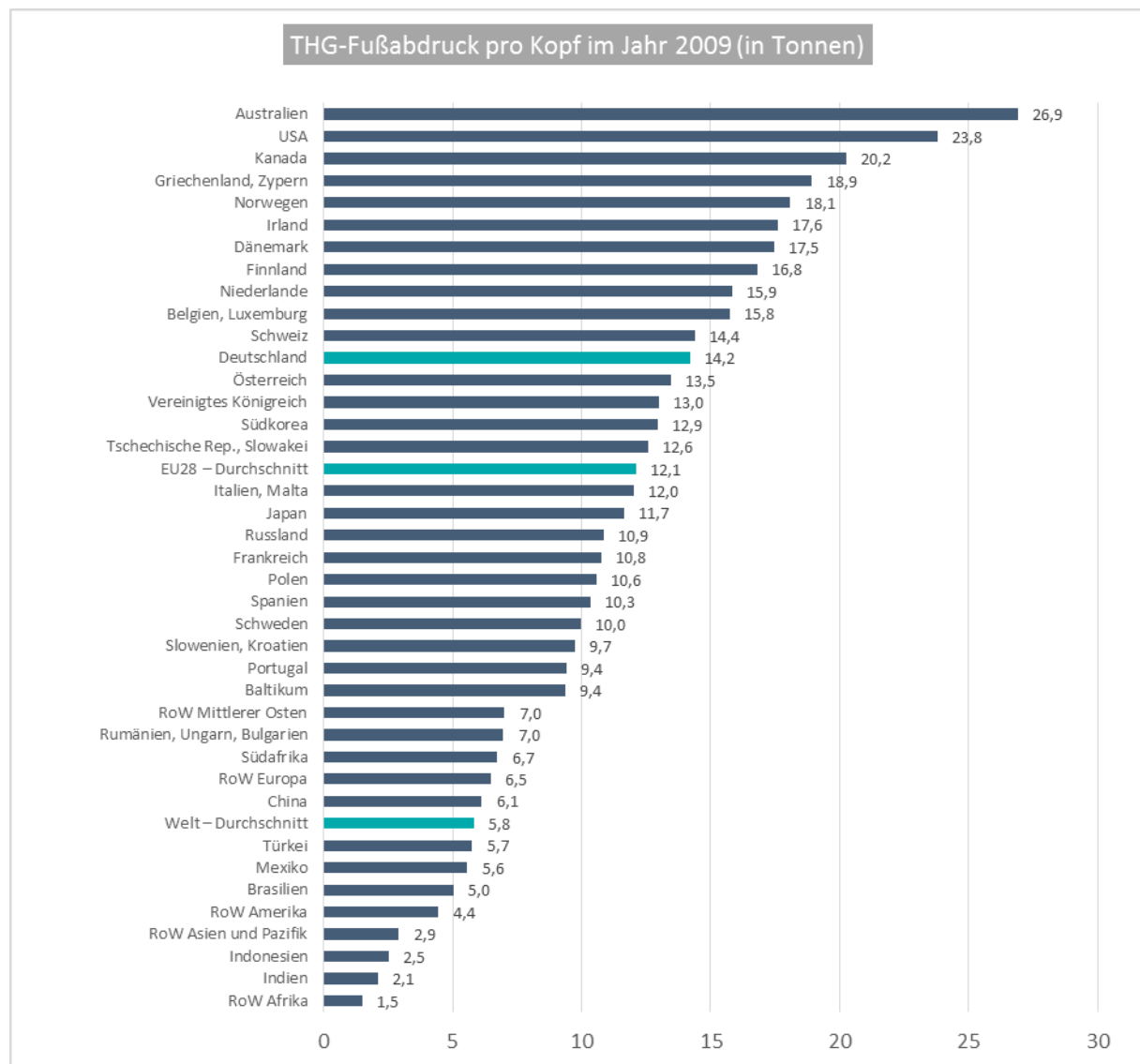
Im internationalen Vergleich liegt Deutschland im Jahr 2009 im Feld der Industrieländer mit 14,2 t CO₂-eq pro Kopf noch über dem EU-Durchschnitt und mehr als doppelt so hoch wie der Weltdurchschnitt von 5,8 t pro Kopf (Abbildung 6).

Bei der Entwicklung von 1995 bis 2009 liegt Deutschland dagegen hinter Japan und Schweden mit einer Minderung um 11 % auf dem dritten Platz der größten Minderungen. Global hat der THG-Fußabdruck pro Kopf im gleichen Zeitraum dagegen um 10,8 % zugenommen.

Tabelle 3: THG-Emissionen und THG-Fußabdruck Deutschlands nach Gasen

	THG-Emissionen (Inländerkonzept)		THG-Fußabdruck	
	1995	2009	1995	2009
CO ₂	90,4 %	89,8 %	84,5 %	82,9 %
CH ₄	5,5 %	4,5 %	10,6 %	10,8 %
N ₂ O	2,8 %	3,0 %	3,5 %	3,9 %
HFCs und PFCs	0,6 %	2,0 %	0,8 %	2,1 %
SF ₆	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,4 %

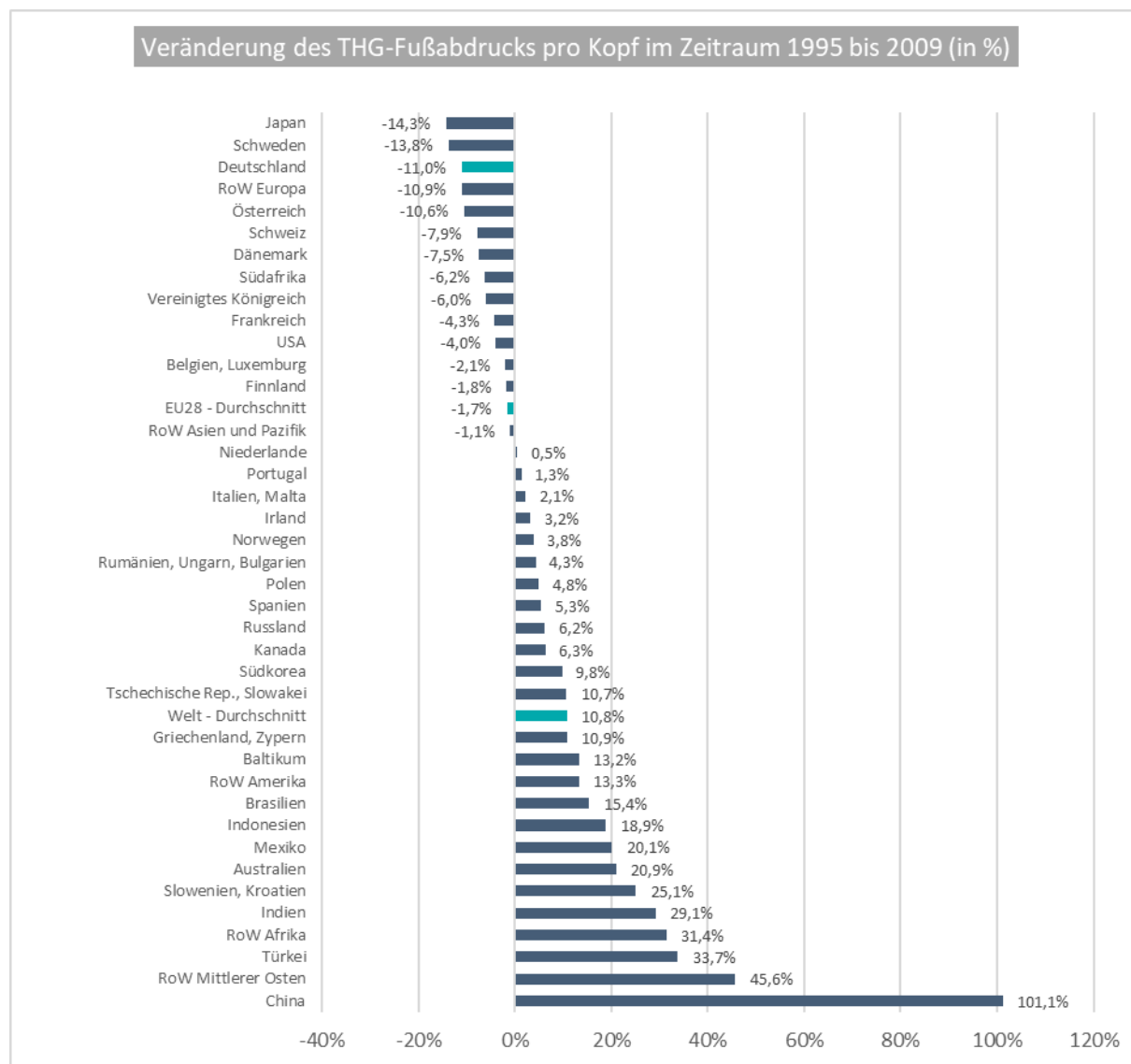
Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

Abbildung 6: THG-Fußabdrücke pro Kopf im internationalen Vergleich in t CO₂-eq

Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

THG-Emissionen nach dem Inländerkonzept in EXIOBASE unterscheiden sich von der THG-Berichterstattung des Umweltbundesamts (UBA) an UNFCCC, welche dem Inlands-konzept folgt, insbesondere durch Zurechnung der Emissionen der internationalen Ver-kehre. Anders als in der internationalen THG-Berichterstattung, in der die Emissionen von internationalem Flug- und Schiffsverkehr separat ausgewiesen werden, erfolgt hier eine Zurechnung zum Ursprungsland. Dieses Verfahren wird auch für den internationalen Lkw-Verkehr angewandt. Für Länder mit großen Reedereien, Fluggesellschaften und Speditio-nen bedeutet dies deutlich höhere Emissionen nach Inländerkonzept als nach Inlands-konzept. Dies zeigt sich in Abbildung 6 insbesondere für Griechenland/Zypern mit energiebe-dingten CO₂-Emissionen nach dem Inlands-konzept von 8,1 bzw. 9,4 t (IEA 2017), während der THG-Fußabdruck nach dem Inländerkonzept bei 18,9 t im Jahr 2009 liegt. Für die Be-rechnung umfassender Fußabdrücke ist das Inländerkonzept besser geeignet als das In-landskonzept.

Abbildung 7: Dynamik der THG-Fußabdrücke pro Kopf im internationalen Vergleich

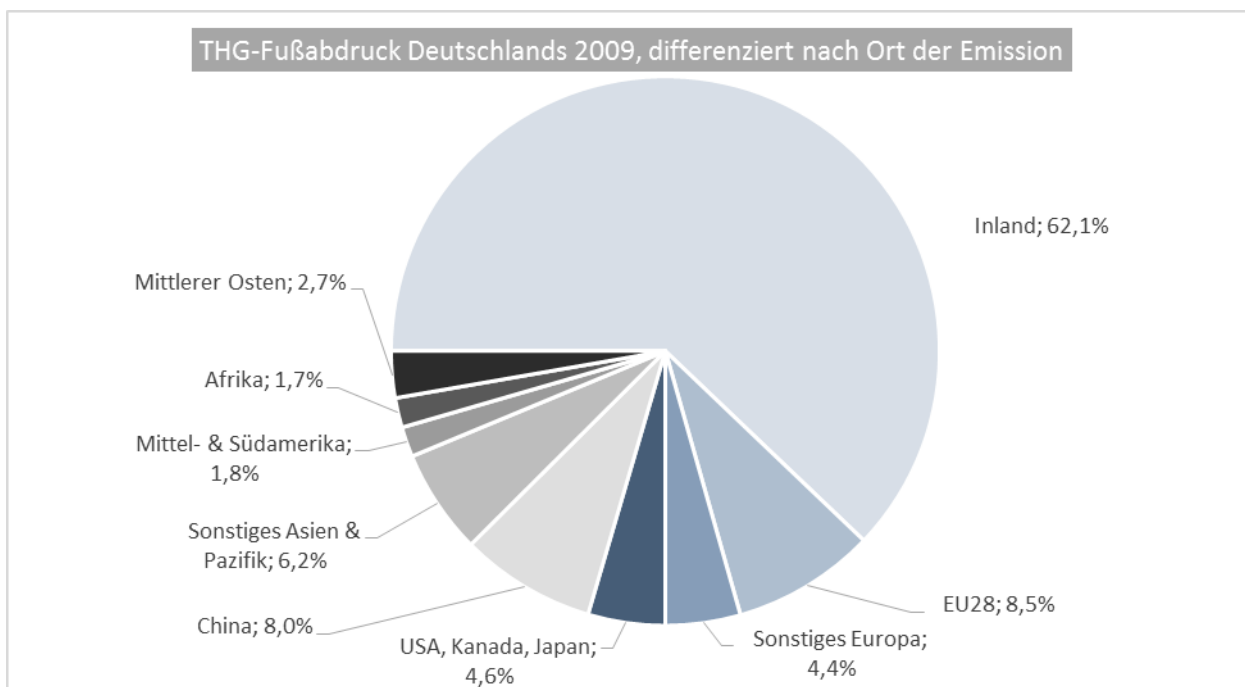


Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

Die aggregierten Ergebnisse der MRIO-Berechnung des THG-Fußabdrucks lassen sich weiter aufspalten, um regionale Herkunft und sektorale Auslöser zu differenzieren. 61,2 % des deutschen THG-Fußabdrucks gehen auf Emissionen im Inland zurück, für weitere 8,5 ist die übrige EU verantwortlich und 8 % stammen aus China (Abbildung 8).

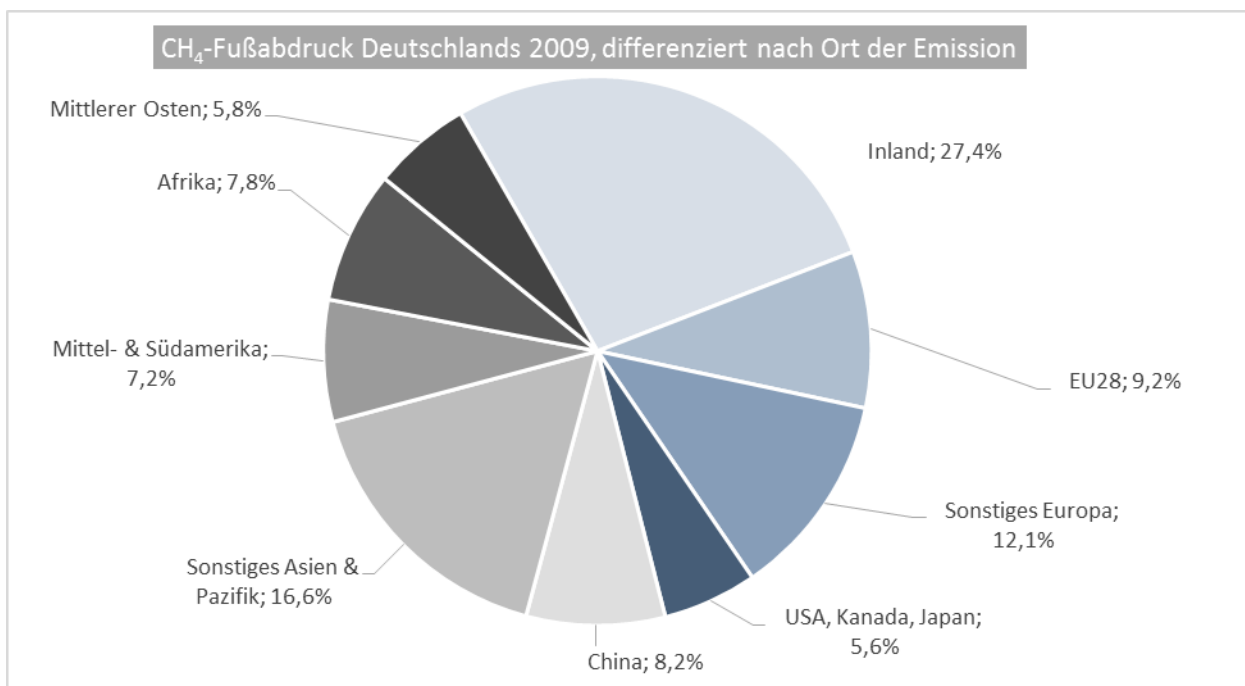
Ein deutlich anderes Bild ergibt sich, wenn die Betrachtung auf Methan beschränkt wird (Abbildung 9). Dann kommen nur noch 27,4 % der Emissionen aus dem Inland. Dagegen ist der Anteil der Nichtindustrieländer sehr viel größer.

Abbildung 8: Deutschlands THG-Fußabdruck differenziert nach Ort der Emission



Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

Abbildung 9: Deutschlands Methan-Fußabdruck differenziert nach Ort der Emission

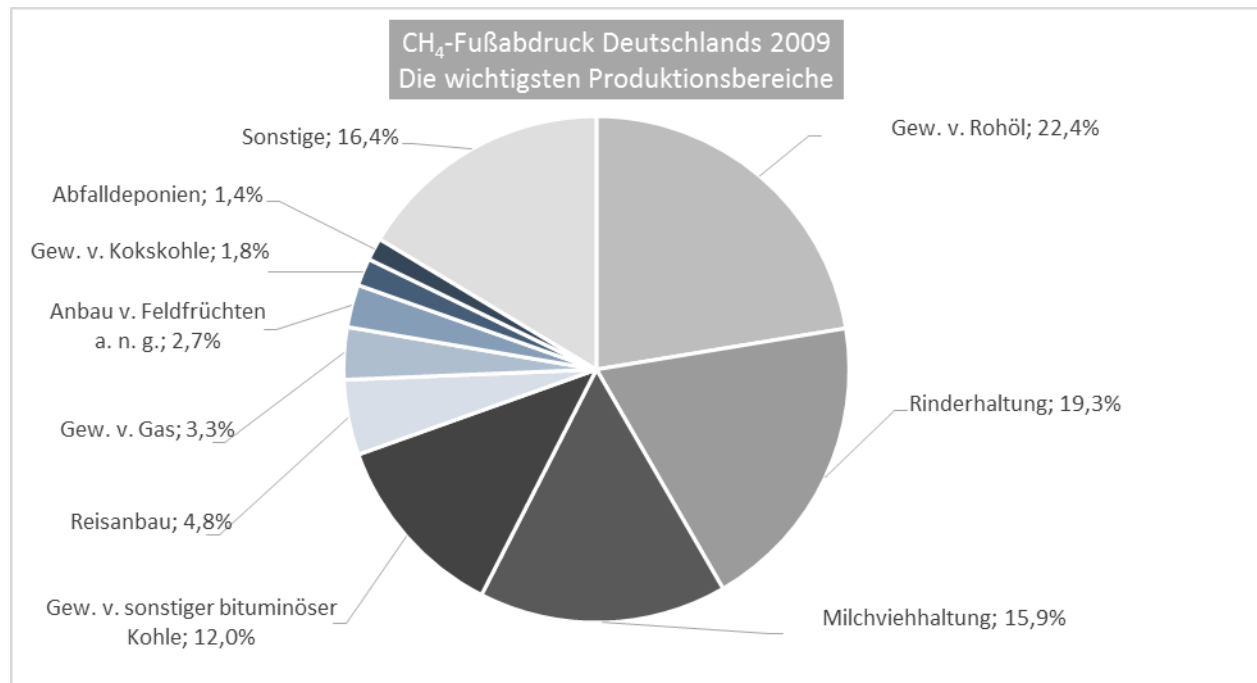


Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

Schließlich kann der Datensatz auch danach weiter aufgegliedert werden, welche Güternachfrage im Inland vor allem den THG-Fußabdruck bestimmt und bei der Produktion welcher Güter die Emissionen auftreten. Die folgende Abbildung 10 zeigt die Aufteilung des deutschen Methanfußabdrucks auf verschiedene Produktionsbereiche. Die fossile Energiegewinnung und die Landwirtschaft dominieren die CH₄-Emissionen, die für die deutsche

Endnachfrage global entstehen. Rinderhaltung, Milchviehhaltung und Reisanbau sind die mit Blick auf die Methanemissionen größten Bereiche, die der Landwirtschaft und damit der Bioökonomie zuzurechnen sind.

Abbildung 10: Welche globalen Produktionsbereiche sind bedeutsam für Deutschlands Methan-Fußabdruck?



Quelle: eigene Berechnungen auf Grundlage von EXIOBASE 3.3

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Globalisierung und die wachsenden internationalen Umweltprobleme haben das Interesse an der Nutzung von MRIO-Modellen zur Analyse der globalen Wertschöpfungsketten stetig wachsen lassen. Dazu wurden in der Vergangenheit verschiedene MRIO-Datenbanken entwickelt und für unterschiedliche Untersuchungen und Analysen eingesetzt. Fußabdruck-Analysen mit MRIO-Tabellen ermöglichen es, konsumbasierte Emissionen oder Ressourceninanspruchnahmen zu bestimmen. Dabei werden alle weltweit bei der Produktion anfallenden Emissionen bzw. Ressourceninanspruchnahmen dem tatsächlich letzten Konsum zugerechnet, unter Berücksichtigung aller vorgelagerten Stufen der Produktion und aller eingesetzten Vorleistungen.

Der THG-Fußabdruck umfasst die THG-Emissionen, die aufgrund deutscher Nachfrage global anfallen. Die auf Basis der EXIOBASE-Daten berechneten endnachfragebedingten THG-Emissionen Deutschlands liegen über den Zeitraum 1995 bis 2009 in einer Größenordnung von 14 bis 20 % oder 140 bis 215 Mio. t. CO₂-Äquivalenten höher als die THG-Emissionen der Inländer, womit Deutschland nach dieser Berechnung Nettoimporteur von THG-Emissionen ist. Bei Methan fällt der überwiegende Teil der Emissionen im Ausland an.

In Abschnitt 3.2 wird jeweils der Fußabdruck der gesamten inländischen Endnachfrage berechnet. Hierbei handelt es sich jedoch nur um ein Anwendungsbeispiel. Genauso gut lassen sich auch einzelne Bestandteile dieses Gesamtindikators analysieren, indem einzelne Elemente der inländischen Endnachfrage betrachtet werden. Somit lässt sich beispielweise folgenden Fragen nachgehen:

- Wie verteilt sich der gesamte Fußabdruck der inländischen Endnachfrage auf seine verschiedenen Komponenten: den Konsum der privaten Haushalte, der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck, des Staates und auf die Bruttoinvestitionen?
- Welchen Beitrag zum gesamten Fußabdruck der inländischen Endnachfrage leistet die inländische Endnachfrage nach den einzelnen Wirtschaftsbereichen (im $i \times i$ -Fall) bzw. nach den einzelnen Produktgruppen (im $p \times p$ -Fall)?
- Wie fällt der Beitrag der inländischen Endnachfrage nach Produkten aus einzelnen Ländern/Regionen am Fußabdruck aus?
- Welchen Beitrag zum globalen Fußabdruck leisten die globale und die inländische Endnachfrage nach den einzelnen Wirtschaftsbereichen (im $i \times i$ -Fall) bzw. nach den einzelnen Produktgruppen (im $p \times p$ -Fall)?

Zudem lassen sich auf Grundlage von MRIO-Analysen auch weitere (Umwelt-)Indikatoren der globalen Dimension nationalen Wirtschaftens berechnen. Da diese Konzepte bis dato im Kontext der Primärrohstoffindikatoren am häufigsten angewendet werden, wird im Folgenden die etablierte Nomenklatur für dieses Themengebiet zugrunde gelegt. Die E -Matrix ist in diesen Fällen als inländische, verwertete Rohstoffentnahme (DEU) je Einheit monetärer Output definiert.

- (1) Exporte in Rohmaterialäquivalenten (RME): Um die Exporte in RME zu berechnen, wird die Endnachfragematrix y umdefiniert. Statt der inländischen Endnachfrage repräsentiert sie nun die Exportnachfrage. Aus Sicht des exportierenden Landes ist es hierbei nicht von Belang, ob die exportierten Güter und Dienstleistungen im Zielland als Vorleistungsgüter oder als Endnachfragegüter Verwendung finden.
- (2) Primärrohstoffeinsatz (RMI): Der RMI ergibt sich als Summe aus dem Materialfußabdruck der letzten inländischen Verwendung (= RMC) zuzüglich der Exporte in Rohmaterialäquivalenten. Er gibt nicht – wie häufig missinterpretiert – den Primärrohstoffbedarf für die heimische Produktion, sondern den Primärrohstoffbedarf der gesamten letzten Verwendung wieder. Beim Indikator RMI ist zudem zu bedenken, dass dieser über Länder/Regionen nicht additiv ist, da er Doppelzählungen enthält. So ist beispielsweise der Primärrohstoffbedarf für in Deutschland endgefertigte und nach Frankreich exportierte Pkw sowohl im RMI Deutschlands als auch im RMI Frankreichs enthalten.
- (3) Importe in Rohmaterialäquivalenten (RME): Die Importe in RME lassen sich sowohl residual als auch bottom-up bestimmen. Bei der residualen Bestimmung ergeben sich die Importe in RME als Differenz aus RMI und inländischer, verwerteter Rohstoffentnahme (DEU). Bei der Bottom-up-Bestimmung wird die Endnachfragematrix y als gesamte Endnachfrage (Konsum, Investitionen, Exporte) definiert. Gleichzeitig wird bei der Anwendung die E -Matrix für das zu analysierende Land gleich null gesetzt. D. h., die heimischen Extraktionen für die gesamte Endnachfrage werden nicht gezählt.

- (4) Der Primärrohstoffbedarf für die heimische Produktion (von Endnachfragegütern) ist bis dato in der Indikatordiskussion nicht etabliert und es gibt auch noch keine Konvention für die Benennung des Indikators. Dieser lässt sich jedoch wie folgt auf Grundlage eines MRIO-Ansatzes berechnen: Die Endnachfragematrix y ist in diesem Fall als gesamte Endnachfrage nach heimischen Gütern und Dienstleistungen definiert. Sie enthält also weder die Importe von Gütern und Dienstleistungen für die inländische Endnachfrage (wie bei der RMC-Berechnung), noch die exportierten Güter und Dienstleistungen, die im Ausland als Vorleistungsgüter genutzt werden (wie bei der RME-Berechnung).

Entsprechende Berechnungen mit dem EXIOBASE-Datensatz sind auch für Landnutzung, Wasserentnahme und – wie oben dargestellt – für THG-Emissionen möglich. Ihre einheitliche Berechnung wird im Rahmen von SYMOBIO angestrebt. Neben der genauen Definition des zu betrachtenden Fußabdrucks stellen sich dabei zwei weitere zentrale Forschungsfragen:

Zum einen geht es um den Vergleich des oben ermittelten THG-Fußabdrucks mit Ergebnissen anderer Berechnungen. Hierzu liegen auf nationaler Ebene Ergebnisse des Statistischen Bundesamtes vor, sowohl für die Methan- und Lachgasemissionen der Landwirtschaft (Statistisches Bundesamt 2014) als auch für die CO₂-Emissionen insgesamt (Statistisches Bundesamt 2017a). Nach den Analysen der umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) ist Deutschland Nettoexporteur von THG-Emissionen. Zu einem gegenteiligen Ergebnis kommen verschiedene internationale Berechnungen auf Basis von MRIO-Datensätzen einschließlich der oben beschriebenen. Hier besteht Klärungsbedarf, inwieweit die verschiedenen methodischen Ansätze, die Abgrenzung nach Inlands- oder Inländerkonzept und die zugrundeliegenden Datensätze die Unterschiede in den Ergebnissen hervorrufen.

Zweitens konzentriert sich SYMOBIO auf die Bioökonomie, die mit den THG-Emissionen in vielfältiger Weise verbunden ist: Einerseits dient sie als THG-Senke und Emissionsminderungsoption, andererseits entstehen durch landwirtschaftliche Produktion selbst große Mengen an THG-Emissionen. Um unerwünschte Verteilungseffekte zu vermeiden, darf Bioökonomie nicht auf Kosten der Nahrungsmittelversorgung erfolgen, wie dies bei den Biokraftstoffen unter dem Schlagwort „Tank versus Teller“ diskutiert wird. In einem nächsten Schritt ist zu definieren, welche Güter und Gütergruppen zur Bioökonomie gezählt werden. Dies ist bei der Land- und Forstwirtschaft einfach, weil sie vollständig der Bioökonomie zuzurechnen sind. Bei Wirtschaftssektoren, die nur teilweise biobasierte Produkte einsetzen, müssen entsprechende Anteile festgelegt werden. Während diese Anteile z. B. in der Energiewirtschaft bekannt sind, weil Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomassekraftwerken getrennt erfasst werden, ist die Zurechnung in anderen Wirtschaftszweigen schwieriger.

LITERATURVERZEICHNIS

- Aguiar, A., Narayanan, B. & McDougall, R. (2016): An Overview of the GTAP 9 Data Base. *Journal of Global Economic Analysis* 1(1), S. 181–208.
- Arto, I., Rueda-Cantuche, J. M. & Peters, G. P. (2014): Comparing the GTAP-MRIO and WIOD databases for carbon footprint analysis. *Economic Systems Research* 26(3), S. 327–353.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.
- Budzinski, M., Bezama, A. & Thrän, D. (2017): Monitoring the progress towards bioeconomy using multi-regional input-output analysis: The example of wood use in Germany. *Journal of Cleaner Production* 161, S. 1–11.
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B. & Giljum, S. (2011): Integrating Ecological, Carbon and Water Footprint: Defining the „Footprint Family“ and its Application in Tracking Human Pressure on the Planet. *One Planet Economy Network (OPEN: EU)*.
- Giljum, S., Lieber, M., Lutter, S. & Gözet, B. (2016): Nachhaltiger Konsum. Inputpapier für die Implementierung von RESET2020. Forschungsgruppe „Nachhaltige Ressourcennutzung“, Institute for Ecological Economics, Wirtschaftsuniversität Wien (WU), Wien.
- Giljum, S., Lutter, S., Bruckner, M. & Aparcana, S. (2013): State-of-play of national consumption-based indicators. A review and evaluation of available methods and data to calculate footprint-type (consumption-based) indicators for materials, water, land and carbon. *Sustainable Europe Research Institute (SERI)*. Wien.
- Hertel, T. W. (1997) (Hrsg.): *Global Trade Analysis: Modeling and Applications*. Cambridge University Press.
- Hertwich, E. & Peters, G. P. (2010): *Multiregional Input-Output Database*. Technical Document. *One Planet Economy Network (OPEN: EU)*.
- Holub, H.-W. & Schnabl, H. (1994): *Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse: Einführung*. Oldenbourg Verlag, München.
- International Energy Agency (IEA) (2017): *CO₂ Emissions from Fuel Combustion*. Paris.
- Inomata, S. & Owen, A. (2014): Comparative evaluation of MRIO databases. *Economic Systems Research* 26(3), S. 239–244.
- Isard, W. (1951): Interregional and Regional Input-Output Analysis: A Model of a Space-Economy. *The Review of Economics and Statistics* 33(4), S. 318–328.
- Kanemoto, K. & Murray, J. (2013): What is MRIO: Benefits and Limitations. In: Murray, J. & Lenzen, M. (Hrsg.): *The Sustainability Practitioner's Guide to Multi-Regional Input-Output Analysis*.

- Kuhn, A. (2010): Input-Output-Rechnung im Überblick. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Lenzen, M., Geschke, A., Rahman, M. D. A., Xiao, Y., Fry, J., Reyes, R., Dietzenbacher, E., Inomata, S., Kanemoto, K., Los, B., Moran, D., Schulte in den Bäumen, H., Tukker, A., Walmsley, T., Wiedmann, T., Wood, R. & Yamano, N. (2017): The Global MRIO Lab – charting the world economy. *Economic Systems Research* 29(2), S. 158–186.
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K. & Geschke, A. (2013): Building Eora: a global multi-region input-output database at high country and sector resolution. *Economic Systems Research* 25(1), S. 20.
- Lenzen, M., Pade, L. & Munksgaard, J. (2010): CO₂ Multipliers in Multi-region Input-Output Models. *Economic Systems Research* 16(4), S. 391–412.
- Mayer, H. & Flachmann, C. (2011): Erweitertes Input-Output Modell für Energie und Treibhausgas. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Owen, A. (2013): Uncertainty and Variability in MRIO Analysis. In: Murray, J. & Lenzen, M. (Hrsg.): *The Sustainability Practitioner's Guide to Multi-Regional Input-Output Analysis*.
- Owen, A., Steen-Olsen, K., Barrett, J., Wiedmann, T. & Lenzen, M. (2014): A structural decomposition approach to comparing MRIO databases. *Economic Systems Research* 26(3), S. 262–283.
- Peters, G. P. (2007): Opportunities and challenges for environmental MRIO modelling: Illustrations with the GTAP database. IIOA Conference Istanbul 2007.
- Statistisches Bundesamt (2014): Methan- und Lachgasemissionen von Ernährungsgütern 2012. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017a): Umweltökonomische Gesamtrechnungen – direkte und indirekte CO₂-Emissionen in Deutschland 2005–2013. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017b): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Input-Output-Rechnung. Fachserie 18, Reihe 2, Wiesbaden.
- Steen-Olsen, K., Owen, A., Hertwich, E. & Lenzen, M. (2014): Effects of sector aggregation on CO₂ multipliers in multiregional input-output analyses. *Economic Systems Research* 26(3), S. 284–302.
- Timmer, M., Los, B., Stehrer, R. & de Vries, G. (2016): An Anatomy of the Global Trade Slowdown based on the WIOD 2016 Release. GGDC Research Memorandum 162, Groningen.
- Vendries-Algarin, J., Hawkins, T. R., Marriott, J., Matthews, H. S. & Khanna, V. (2014): Disaggregating the Power Generation Sector for Input-Output Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology* 19(4), S. 666–675.
- Weinzettel, J., Steen-Olsen, K., Galli, A., Cranston, G., Ercin, E., Hawkins, T., Wiedmann, T. & Hertwich, E. (2011): Footprint Family Technical Report: Integration into MRIO model. One Planet Economy Network (OPEN: EU).

- Wiebe, K. S., Bruckner, M., Giljum, S. & Lutz, C. (2012): Calculating energy-related CO₂ emissions embodied in international trade using a global input-output model. *Economic Systems Research* 24(2), S. 113–139.
- Wiedmann, T. & Barrett, J. (2013): Current and Future Policy Applications of MRIO Research. In: Murray, J. & Lenzen, M. (Hrsg.): *The Sustainability Practitioner's Guide to Multi-Regional Input-Output Analysis*.
- Wood, R. & Moran, D. (2014): Convergence between the EORA, WIOD, EXIOBASE, and OPENEU's consumption-based carbon accounts. *Economic Systems Research* 26(3), S. 245–261.
- Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., de Koning, A., Kuenen, J., Schütz, H., Acosta-Fernández, 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, S. 138–163.

