



Indikatorensystem zur Bewertung der Nachhaltigkeit der deutschen Bioökonomie

Arbeitspapier
vom **23.03.2018**

Vincent Egenolf und Stefan Bringezu

Mit Beiträgen von Anna Schomberg, Susanne Wagner, Stephan Piotrowski und
Urs Moesenfechtel

Center for Environmental Systems Research (CESR)
Universität Kassel

1 Inhalt

Abbildungsverzeichnis:.....	i
Tabellenverzeichnis:.....	i
Abkürzungsverzeichnis:.....	ii
1 Einleitung.....	1
2 Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren.....	4
3 Das DPSIR-Konzept.....	6
4 Informationsaggregation und Handlungsebenen.....	7
5 Leitziele der Bioökonomie.....	9
6 Indikatoren zu den Leitziele der Bioökonomie.....	11
6.1 Soziale Nachhaltigkeit.....	11
6.2 Ökonomische Nachhaltigkeit.....	14
6.3 Ökologische Nachhaltigkeit.....	18
6.4 Integrative Leitziele der Nachhaltigkeit.....	21
7 Fußabdrücke der Ressourcen- und Klimabelastung.....	26
7.1 Fußabdruckkonzepte in der aktuellen Literatur.....	26
7.2 Definition der Konzepte für Ressourcenfußabdrücke in den Projekten.....	26
7.2.1 Agrarflächenfußabdruck.....	26
7.2.2 Forstfußabdruck.....	29
7.2.3 Wasserfußabdruck.....	29
7.2.4 Materialfußabdruck.....	31
7.2.1 Treibhausgasfußabdruck.....	32
8 Ressourcenfußabdrücke als Indikatoren der integrativen Leitziele.....	33
8.1 Übersichtscharakter der Ressourcenfußabdrücke.....	33
8.2 Bewertung der Ressourcenfußabdrücke im Hinblick auf Nachhaltigkeitskriterien.....	34
9 Schlussfolgerung und Ausblick.....	38
10 Literaturverzeichnis:.....	40

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Schematischer Wirkungszusammenhang der Ressourcennutzung und Umweltbelastungen.	6
Abbildung 2: Aggregations-, Skalierungsebenen und Informationsflüsse des Indikatorensystems	7
Abbildung 3: Leitziele der Bioökonomie	10
Abbildung 4: Ressourcenfußabdrücke als Leitindikatoren der integrativen Leitziele der Bioökonomie	34

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der sozialen Nachhaltigkeit.....	12
Tabelle 2: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der ökonomischen Nachhaltigkeit.....	15
Tabelle 3: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der ökologischen Nachhaltigkeit	19
Tabelle 4: Integrative Leitziele, Kriterien und Indikatoren der Nachhaltigkeit	22
Tabelle 5: Überblick über Fußabdruckkonzepte und Autoren	28
Tabelle 6: Orientierungswerte der nachhaltigen jährlichen Ressourcennutzung.....	36

Abkürzungsverzeichnis:

BIP	Bruttoinlandsprodukt
CBD	Convention on Biological Diversity (Übereinkommen über biologische Vielfalt)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen)
FTE	Full time equivalent (Vollzeitäquivalent)
iLUC	Indirect land use change (indirekte Landnutzungsänderung)
LCIA	Live cycle impact assessment (Wirkungsanalyse der Lebenszyklusanalyse)
LUC	Land use change (Landnutzungsänderung)
NAI	Net annual increment (jährlicher Netto-Holzzuwachs)
RMC	Raw material consumption (Rohstoffverbrauch)
RMI	Raw material input (Rohstoffeinsatz)
SDG	Sustainable development goal (Nachhaltigkeitsziel)
THG	Treibhausgas(e)
TMC	Total material consumption (Primärmaterialverbrauch)
TMR	Total material requirement (Primärmaterialaufwand)
UNICEF	United nations children's fund (Kinderhilfswerk der Vereinten Nationen)
WB	World Bank (Weltbank)
WHO	World health organisation (Weltgesundheitsorganisation)
WSI	Water scarcity index (Wasser-Knappheits-Index)

1 Einleitung

Mit der verstärkten Nutzung biogener Ressourcen sind Erwartungen an ein „grünes“ Wirtschaftswachstum, Innovationsschübe durch Biotechnologie, Entwicklungsoptionen für den ländlichen Raum und eine verstärkt regenerativ ausgelegte Ressourcenbasis verbunden, die zugleich klimaneutral ist. Die „Bioökonomie“ umfasst nach der Definition des Bioökonomierats „die Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen (auch Wissen), um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen“¹.

Doch seit einigen Jahren nehmen die Anzeichen unbeabsichtigter wie unerwünschter Nebenwirkungen zu. Weltweit dehnt sich die Anbaufläche zu Lasten von natürlichen Ökosystemen wie tropischen Regenwäldern aus, um die wachsende Bevölkerung zu ernähren und mit Energie zu versorgen (Fischer *et al.* 2017, Bruckner *et al.* 2017, Bringezu *et al.* 2012a). Dies führt u.a. zu Verlusten an Biodiversität (Wilting *et al.* 2017, Chaudhary *et al.* 2016, De Baan *et al.* 2013) und zu vermehrten Klimagasemissionen (De Schutter & Giljum 2014, EEA 2013, Lapola *et al.* 2010).

Die ausgedehnte Nutzung von agrarischen Flächen für die Bereitstellung von Endenergie hierzulande beinhaltet ökonomische Vorteile für die Landwirtschaft und scheint auf den ersten Blick auch gut für die Klimabilanz zu sein. Doch in einer Situation zunehmender Knappheit von Anbauflächen weltweit verstärkt sie die Flächenumwandlung, insbesondere in den Herkunftsregionen deutscher Importe, was den gesetzten Zielen des Klima- und Ressourcenschutzes auch im Sinne internationaler Verantwortung zuwiderläuft (Bird *et al.* 2013, Meyfroidt *et al.* 2013). Das IPCC definiert direkte Landnutzungsänderungen (dLUC) als Änderung der Nutzung bzw. des Managements von Landflächen durch menschlichen Einfluss, der zu einer Änderung der Landbedeckung führen kann. Indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) beziehen sich auf Änderungen der Landnutzung von Flächen, die durch eine Verschiebung von Produktionsmengen bzw. –Orten auf anderen Flächen induziert werden (Allwood *et al.* 2014).

Infolge der Globalisierung sind die Orte der Produktion und des Konsums häufig weit auseinandergerückt. Gleichwohl sind Produktion und Konsum durch Prozess- und Wertschöpfungsketten miteinander verbunden (Haberl *et al.* 2009, Erb *et al.* 2009). Produzenten und Konsumenten können sich teilweise über Produktzertifizierungen orientieren, um über ihre Nachfrage nachhaltigere Wirtschaftsweisen zu unterstützen. Doch insbesondere hier besteht weiterer Forschungsbedarf, da die Kennzeichnungen oft komplex sind und der Begriff der „Nachhaltigkeit“ für verschiedene Produkte unterschiedlich definiert ist (Schaller *et al.* 2012). Es stellt sich die Frage, wie die Bilanz der deutschen „Bioökonomie“ insgesamt ausfällt, wenn sie anhand umfassender Kriterien der Nachhaltigkeit aus verschiedener Perspektive beleuchtet wird.

Auf internationaler Ebene wurde 2015 die „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ publiziert. Dieser Aktionsplan der Vereinten Nationen umfasst 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (*Sustainable Development Goals [SDGs]*), in denen 169 Indikatoren Beachtung

¹ biooekonomierat.de/biooekonomie/

finden (European Commission 2017). Behandelt werden Themengebiete wie „SDG 2: Kein Hunger“, „SDG 13: Maßnahmen zum Klimaschutz“ und „SDG 12: nachhaltige/r Konsum und Produktion“. Die 169 Indikatoren, die bei der Verabschiedung der SDGs gelistet wurden, stellen eher einen Ausgangspunkt als ein vollständiges Indikatorensystem dar. Wesentliche Informationen darüber, wie die Indikatoren genutzt werden können, um die SDGs zu erreichen, fehlen bislang. Die Erfassung der Auswirkungen nationaler Aktivitäten auf Regionen in anderen Ländern mittels geeigneter Indikatoren (z. B. Ressourcenfußabdrücke) erscheint als sinnvolle Grundlage, bevor an weitere Maßnahmen in Richtung Erreichung der SDGs gedacht werden kann.

Zur Vorbereitung weiterer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten wurden 2015 drei „Sachstandsberichte über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie“ vom Wuppertal Institut (O'Brien et al. 2015), dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) (Adler et al. 2015) und dem Institut für Weltwirtschaft (IfW) (Delzeit et al. 2015) veröffentlicht. In den Sachstandsberichten werden, wie auch bei den SDGs, Zielfragen und Indikatoren zur Bewertung von Fortschritten bei der Steigerung der Nachhaltigkeit von Produktion und Lebensweise formuliert. Darin wurde darauf verwiesen, dass insbesondere hinsichtlich der Erfassung und Modellierung von Ressourcenfußabdrücken Entwicklungsbedarf besteht.

In den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekten BEPASO und SYMOBIO werden Indikatoren eingesetzt, um die deutsche Bioökonomie im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit zu charakterisieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes BEPASO werden auf Basis der gegenwärtigen Land- und Ressourcennutzung, der Verfügbarkeit von Biomasse sowie der zu Verfügung stehenden Technologien drei mögliche Szenarien einer zukünftigen Bioökonomie im Jahr 2050 erstellt. Die dort festgelegten Parameter werden für die Modellierung in dem erzeugten Modellverbund der Modelle GFPM, MAGNET, BENSIM und LandSHIFT genutzt. Im thematisch verwandten Projekt SYMOBIO geht es um die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen für ein Monitoring und eine Modellierung der Bioökonomie auf Basis der bestehenden Modelle LandSHIFT, WaterGAP, GINFORS, Panta Rhei, den Sektormodellen zu Forst und Landwirtschaft, sowie des im Projekt zu entwickelnden Materialflussmodells.

In Arbeitspaket 1 von SYMOBIO wurden die Ziele der Agenda 2030 und die Strategiepapiere der EU und der deutschen Bundesregierung ausgewertet. Auch eine Stakeholderbefragung wurde durchgeführt, um die für eine Monitoring relevanten prioritären Aspekte der Bioökonomie zu ermitteln (Thrän et al. 2018).

Das im Folgenden vorgestellte Indikatorensystem soll

- einen umfassenden Rahmen zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Bioökonomie abstecken, der alle relevanten Leitziele und wesentliche Kriterien für das ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeitsgebiet enthält;
- die Brücke zu den davon abzuleitenden Indikatoren bilden und auf solche Indikatoren fokussieren, bei denen besonderer Entwicklungsbedarf besteht, insbesondere den „Fußabdruck“-Indikatoren;

- eine Basis für die Entwicklung eines Monitorings der Bioökonomie liefern, das unterschiedlich aggregierte Informationen jeweils auf verschiedenen Handlungsebenen nutzt bzw. liefert, wobei auf die nationale Ebene fokussiert wird, einschließlich der globalen Auswirkungen nationalen Handelns.

Die vorgestellten Kriterien und Indikatoren sollen dazu dienen, die Ergebnisse der Modellierung der in den Arbeitspaketen 2 und 3 von BEPASO erzeugten Szenarien auf ihren Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit der deutschen Bioökonomie hin zu bewerten. Dadurch soll eine gesellschaftliche Beurteilung von Zielkonflikten als auch eine Priorisierung der Einsatzbereiche verfügbarer erneuerbarer Ressourcen möglich werden. Das Indikatorensystem ist zugleich Grundlage für den konzeptionellen Rahmen zur Modellierung der Bioökonomie im Arbeitspaket 2 von SYMOBIO.

Da die Auswirkungen, die Deutschland durch seine (Bio)Ökonomie auf den Rest der Welt hat, bislang häufig vernachlässigt wurden und hierzu verstärkter Forschungsbedarf besteht, stehen diese im Zentrum des Interesses.

Dieses Arbeitspapier umreißt ein Indikatorensystem, das als Grundlage und Rahmen für ein Monitoring von Fortschritten der Bioökonomie in Deutschland in Richtung Nachhaltigkeit dienen soll. Es wird Wert daraufgelegt, ein zum einen sachlich relevantes und zum anderen verständliches, gut kommunizierbares und auf mehreren Skalenebenen anwendbares Indikatorensystem zu entwickeln.

Im ersten Teil werden die Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren im Allgemeinen beschrieben. Danach wird deren systematische Einbindung in das DPSIR-Konzept² und die mehrskalige Anwendbarkeit des Indikatorensystems erklärt. Anschließend werden die Leitziele der Bioökonomie den drei Säulen ökonomische Nachhaltigkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Nachhaltigkeit zugeordnet. Darauf folgend wird eine Auflistung und Zuordnung der für die Quantifizierung der Leitziele notwendigen Indikatoren gezeigt.

Im dann folgenden Abschnitt werden die Definitionen der verschiedenen Konzepte der Ressourcenfußabdrücke im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs erläutert und eine den Projektansprüchen angepasste Konzeptualisierung beschrieben. Anschließend wird die besondere Bedeutung der Ressourcenfußabdrücke als Übersichtsindikatoren der integrativen Leitziele der Bioökonomie dargestellt und ihre Rolle bei der Nachhaltigkeitsbewertung beschrieben. Im letzten Abschnitt wird ein kurzer Ausblick gegeben, in dem die Anwendung und Bedeutung des Indikatorensystems für das Projekt BEPASO umrissen werden.

² Drivers-Pressure-State-Impact-Response, Erläuterung in Abschnitt 3

2 Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren

Mit der Vereinbarung der *Sustainable Development Goals* der Vereinten Nationen wurde ein international anerkanntes politisches Konzept entwickelt, welches das Leitbild der Nachhaltigkeit umfassend abbilden soll. Im Jahr 2015 hat die UN ein Mandat an die „Inter-agency and Expert Group on SDG Indicators“ (IAEG-SDGs) erteilt, dieses globale Zielsystem und zusammen mit einem ersten Set an Indikatoren in Abstimmung mit den nationalen statistischen Behörden und Institutionen zu erarbeiten (UN 2017, Statistisches Bundesamt 2017). Dazu wurden in der Agenda 2030 der UN (UN 2015) *17 Leitziele* und *169 dazugehörige Unterziele* für eine nachhaltige globale Entwicklung verfasst (UN-Nachhaltigkeitsziele), welche sich den Nachhaltigkeitsgebieten Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft zuordnen lassen. Die Umsetzung der SDGs auf nationaler Ebene und die Weiterentwicklung des Indikatorensets dauert an und vollzieht sich in einem dynamischen Prozess, der von den jeweiligen nationalen Prioritäten, den jeweiligen Möglichkeiten der Datenbeschaffung und des Berichtswesens und nicht zuletzt von weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Verbesserung der Wissensbasis und des Monitorings abhängt.

Vorteile des Konzepts der SDGs sind die auf internationaler Ebene vergleichbaren Indikatorensets und deren größtenteils bereits vorhandene allgemeine Datenbasis. Zusätzlich zu den globalen Anforderungen sind auch die Zielvorstellungen der EU und von Deutschland zu berücksichtigen, insbesondere in Bereichen, die von dem bisherigen Indikatorenset der UN noch unzureichend abgebildet werden.

Um den Fortschritt im Sinne der SDGs auf nationaler Ebene unter Berücksichtigung der globalen Implikationen verfolgen und beziffern zu können, ist es notwendig, in den prioritären Themenfeldern Messgrößen zu definieren, die in repräsentativer Form empirische Aussagen über den zu beschreibenden Sachverhalt liefern (Statistisches Bundesamt 1999).

Die Auswahl der einzubeziehenden Indikatoren sollte so getroffen werden, dass diese zunächst hinreichend valide die jeweilige Zielfragestellung beantworten (Fort- und Rückschritte bezogen auf wesentliche Charakteristika einer nachhaltigen Bioökonomie abzubilden). Eine zu geringe Anzahl vermindert die Detailtiefe der Aussage, während eine zu große Anzahl der getroffenen Aussage den Übersichtscharakter nimmt. Zusätzlich ist es notwendig, dass die Indikatoren gewisse Qualitätskriterien erfüllen. Diese wurden im Rahmen des Berichts „Nachhaltigkeitsindikatoren auf EU, Bundes- und Länderebene – eine Übersicht“ ausgearbeitet (Schostock 2015). Grundlage der Betrachtung sind 16 Nachhaltigkeitsanalysen, die im Zeitraum von 2010 bis 2014 veröffentlicht wurden. Bei der Analyse konnten folgende essenzielle Kriterien für Nachhaltigkeitsindikatoren identifiziert werden:

Terminierte und quantifizierte Ziele:

Die Zielvorgaben an einen Indikator sollten terminierbar und quantifizierbar und entsprechend der SMART-Kriterien (Doran 1981) formuliert sein. Diese sind: spezifisch (für die Beantwortung bestimmter Zielfragen), messbar, akzeptiert, realistisch und terminiert

Robustheit:

Die gewählten Indikatoren müssen dahingehend widerstandsfähig sein, dass die gewünschte Aussage trotz externer Störfaktoren in ausreichender Informationsschärfe abgebildet wird.

Kommunizierbarkeit:

Die Kommunizierbarkeit der Indikatoren muss sowohl innerhalb des Projektverbundes als auch im Austausch mit Gesellschaft, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gegeben sein. Dies impliziert, dass der Indikator einen Sachverhalt schnell, klar und verständlich abbildet.

Vertikale Integration:

Das Indikatorensystem muss über die Skalierungsebenen (lokal, regional oder sektoral, national, international) hinweg konsistent anwendbar sein.

Kohärenz:

Alle im Indikatorensystem aufgeführten Indikatoren sollen inhaltlich und logisch zusammenhängend dem Ziel der Nachhaltigkeitssteigerung dienen.

Datenverfügbarkeit:

Es muss eine ausreichende Datenverfügbarkeit gegeben sein, um wissenschaftlich valide Aussagen treffen zu können.

3 Das DPSIR-Konzept

Das DPSIR-Konzept wurde in den 1990er Jahren entwickelt (Smeets und Weterings 1999). Kern des Konzepts sind sozioökonomische Treiber (*Drivers*) wie Produktion, Konsumverhalten und die Errichtung und der Betrieb von Infrastrukturen. Diese können einen schädigenden Einfluss auf die Umwelt, der in diesem Konzept in Form von Belastungsfaktoren (*Pressures*) dargestellt wird, haben. In der Folge ändert sich der Istzustand (*State*) der Umwelt, was wiederum Auswirkungen auf Gesellschaften und Umweltsysteme (*Impacts*), wie zum Beispiel den Klimawandel, Landnutzungsänderungen und Biodiversitätsverluste, erzeugt. Die Reaktion darauf (*Response*) erfolgt vonseiten der Politik bzw. Gesellschaft in Form eines regelnden Einflusses auf sowohl Treiber als auch Belastungen und Wirkungen. Da eine effektive Verminderung der Umweltwirkungen in erster Linie über technische oder organisatorische Maßnahmen entlang der Produktions-Konsum-Kette erfolgt, ist in Abbildung 1 bewusst der Fokus auf den regulierenden Einfluss auf diese ursächlichen Treiber (Produktion, Infrastrukturen und Konsum) gelegt.

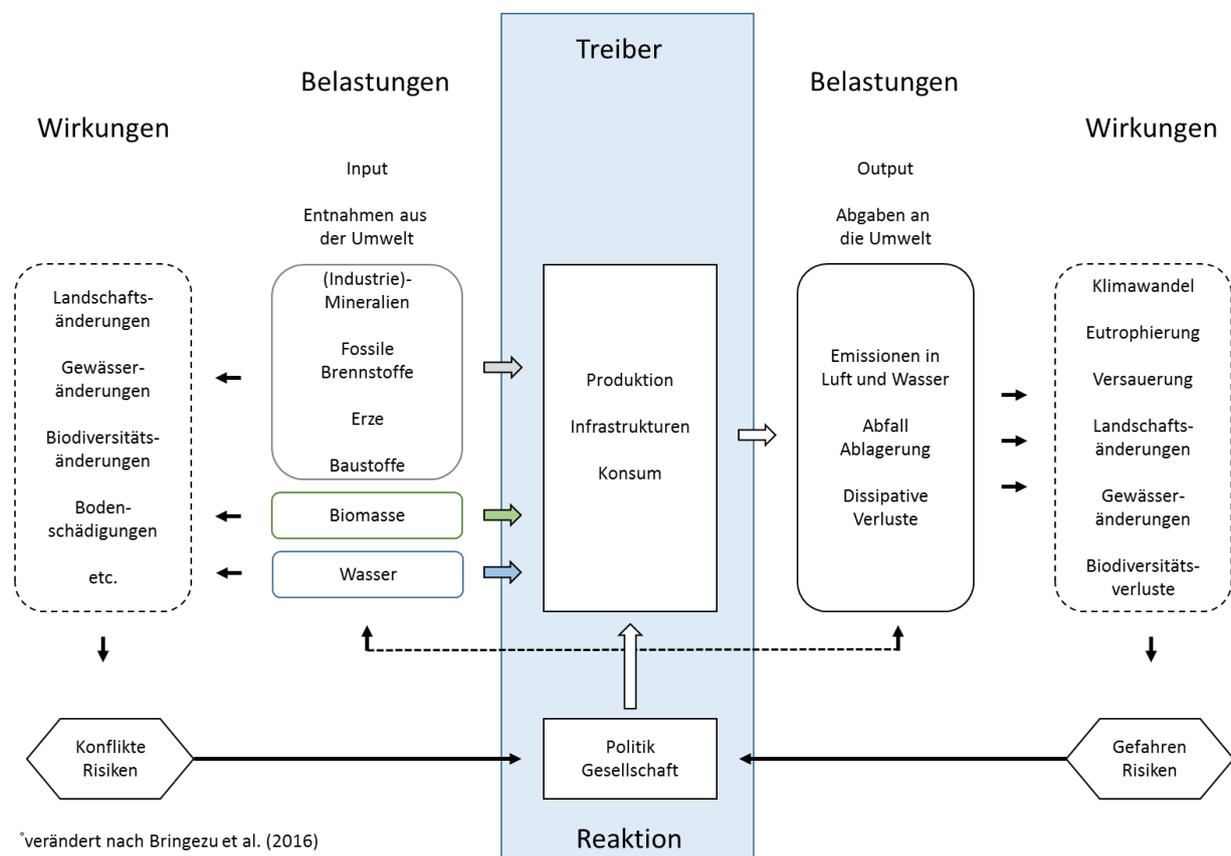


Abbildung 1: Schematischer Wirkungszusammenhang der Ressourcennutzung und Umweltbelastungen.

Die Ressourceninputs bestimmen dabei den Umfang des stofflichen Durchsatzes im Produktions- und Konsumsystem und haben damit einen direkten Einfluss auf die Größenordnung der mit Extraktion/Ernte (Input) und Emission/Abfällen (Output) verbundenen Umweltbelastungen. Zusätzlich zu den genutzten Ressourcen ist die von Produktions- und Konsumsystem direkt und indirekt in Anspruch genommene Anbaufläche ein weiterer wichtiger Belastungsfaktor. Dies wird in Abschnitt 8.2 genauer erläutert.

4 Informationsaggregation und Handlungsebenen

Der thematische Rahmen des Indikatorensystems wird von den drei Säulen der Nachhaltigkeit Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft vorgegeben. Jeder der drei Säulen sind Leitziele zugeordnet. Zur Quantifizierung der Leitziele dient ein passendes Indikatorenset. Dieses ist Teil einer Informationspyramide, von der hier drei *Ebenen der Informationsaggregation* herausgegriffen werden, die im Wesentlichen der Basis, der Mitte und der Spitze der Pyramide entsprechen, auch wenn es teilweise fließende Übergänge dabei gibt. Oben stehen die Übersichts- bzw. Leitindikatoren, darunter folgen die spezifischen Indikatoren und den Sockel bilden die Basisdaten (Abbildung 2).

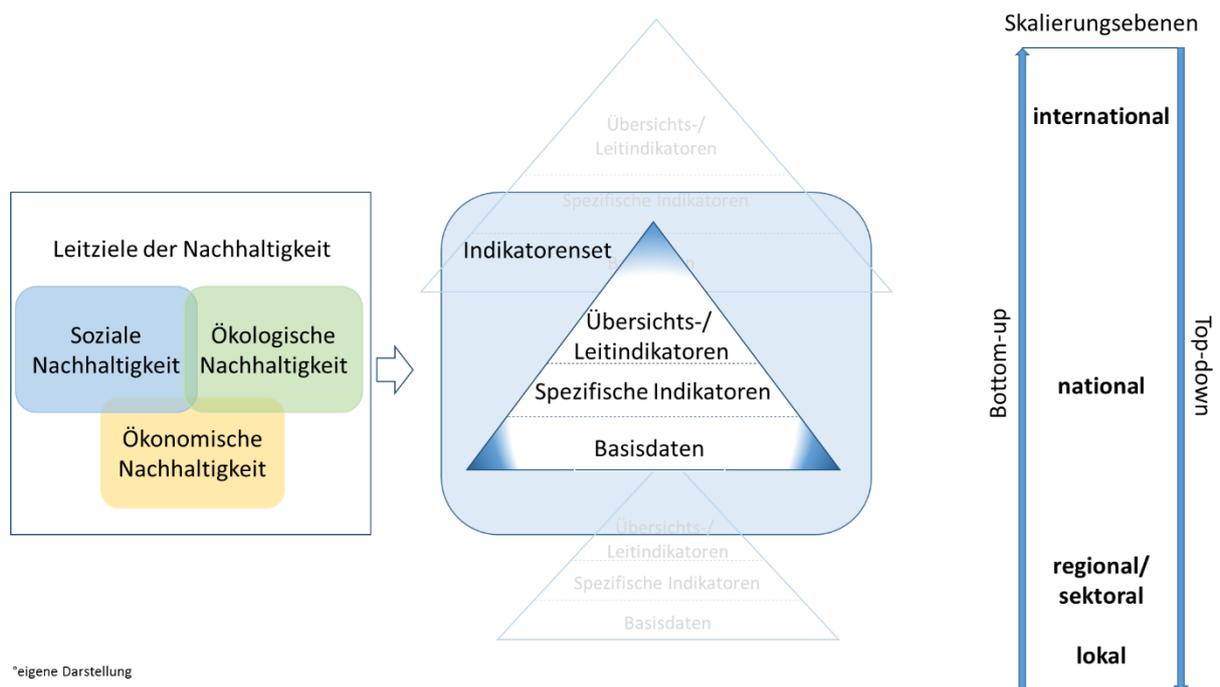


Abbildung 2: Aggregations-, Skalierungsebenen und Informationsflüsse des Indikatorensystems

Leitindikatoren fassen bestimmte Sachverhalte in übersichtlicher Form zusammen, sodass Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch sie gebündelt abgebildet werden können. Leitindikatoren sollen über wesentliche Charakteristika eines Systems informieren. In Verbindung mit Ziel- bzw. Referenzwerten zeigen sie Entscheidungsträgern die Notwendigkeit von Änderungsmaßnahmen an. Leitindikatoren dienen auch der Information der breiten Öffentlichkeit. Sie besitzen deshalb einen hohen Aggregationsgrad an Information und eine entsprechend geringe Detailtiefe. Zu den Leitindikatoren gehören in diesem Arbeitspapier die Ressourcenfußabdrücke, die genutzt werden, um wichtige integrative Leitziele der Nachhaltigkeit (Bestandteil mehrerer Säulen) bemessen zu können. Ein bekannter ökonomischer Leitindikator ist das BIP.

Spezifische Indikatoren dienen dazu, die Information der Leitindikatoren zu verbreitern und zu vertiefen. Sie sind enger definiert, haben aber immer noch den Charakter von Indikatoren, die als solche über bestimmte Charakteristika ausreichend informieren. Ein Beispiel ist der Indikator Selbstversorgungsgrad mit Holzressourcen. Im sozialen Bereich könnte z. B. der Grad

der Integration behinderter Menschen in die Bioökonomie (etwa über Behindertenwerkstätten) als Indikator dienen.

Die unterste Ebene der Informationspyramide stellen die Basisdaten dar. Diese dienen der Berechnung der spezifischen Indikatoren und der Leitindikatoren. Sie können teilweise als eigene Kennwerte genutzt werden und haben einen hohen Grad an Detailliertheit.

Von der Aggregation von Information, die über die Ebenen der Informationspyramide dargestellt wird, sind die *Skalierungsebenen der Akteure und des jeweiligen Monitorings* zu unterscheiden. Diese umfassen die Spanne von lokalen, regional/nationalen bis globalen Akteuren. Auf *jeder* dieser Skalierungsebenen gibt es Monitoring(-elemente), wobei wiederum Informationspyramiden unterschieden werden können. Dabei können sich je nach den örtlichen Bedingungen die Leitindikatoren lokaler Informationssysteme unterscheiden.

Entscheidend für das hier vorgestellte Indikatorensystem ist seine skalenübergreifende Relevanz und Anwendbarkeit. Diese ergibt sich aus der Betrachtung aller drei Säulen der Nachhaltigkeit und dem daraus abgeleiteten umfassenden Indikatorenrahmen. Dieser ermöglicht es Nutzern des Systems, Fragestellungen zur nachhaltigen Entwicklung auf großskaliger, internationaler Ebene, bis zu regionalen kleinskaligen Handlungsebenen beantworten zu können. Die jeweilige Betrachtungsebene ergibt sich aus der zu beantwortenden Fragestellung. Entscheidend ist, dass Ziele z. B. auf nationaler Ebene nur umgesetzt werden können, wenn diese samt den dazu nötigen Informationen auch an Handlungsebenen niedrigerer Skalierung weitergegeben und dort im jeweiligen Monitoring abgebildet werden können. Umgekehrt müssen wesentliche Erfordernisse und Entwicklungen auf lokaler/regionaler Ebene in den Zielen, Bewertungskriterien bzw. Monitoringmaßnahmen auf höherer Skalierungsebene ihren Niederschlag finden. Im Hinblick auf die Informationsflüsse zwischen den Skalierungsebenen muss deshalb sowohl eine Top-Down Durchlässigkeit an Informationen als auch eine Bottom-Up Informationsgenerierung und -weitergabe möglich sein. Wie oben bereits erwähnt, müssen zentral bedeutsame Indikatoren über verschiedene Ebenen hinweg konsistent anwendbar sein, um Monitoring, Handlungsanreize und Evaluation zielgerichtet zu unterstützen.

Dies lässt gleichwohl die Option offen, dass es auf den verschiedenen Skalen- bzw. Handlungsebenen auch unterschiedliche Prioritäten innerhalb der Ziele gibt, die Auswirkungen auf das benötigte Set an Indikatoren haben. Der Gedanke dahinter ist, dass auf jeder Ebene eine eigene Informationspyramide existiert, die mit denen auf anderen Ebenen durch konsistente Indikatoren und einen Datenaustausch verbunden sind.

Im Vordergrund dieses Arbeitspapiers steht ein Indikatorensystem, das auf nationaler Ebene anwendbar ist, sich in einen internationalen Rahmen einfügt und auch auf regionaler bis lokaler Ebene umsetzbar bzw. integrierbar ist.

5 Leitziele der Bioökonomie

Dieses Arbeitspapier basiert zum einen auf einer zusammenfassenden Auswertung der im Rahmen der drei Sachstandsberichte von Adler et al. (2015), Delzeit et al. (2015) und O'Brien et al. (2015) angesprochenen Leitziele für eine nachhaltige Entwicklung der Bioökonomie. Diese gehen im Wesentlichen zurück auf die Strategiepapiere des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF 2010) und des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMBF und BMEL 2014).

Zum anderen reflektiert die folgende Ausarbeitung Ergebnisse des jeweiligen Arbeitspakets 1 der Projekte SYMOBIO und BEPASO zur Ermittlung von Aspekten, die für ein Monitoring der Bioökonomie unter Nachhaltigkeitsaspekten von prioritärer Bedeutung sein sollten (Thrän et al. 2018). Danach zeigte ein textanalytischer Vergleich der Agenda 2030 mit Strategiepapieren zur Bioökonomie der EU und der deutschen Regierung komplementäre Schwerpunktsetzungen auf. Während die Vereinten Nationen die Vermeidung von Hunger und die Entwicklung von Entwicklungsländern voranstellen, stehen bei den Strategien der Bundesregierung und der EU die (sozio-)ökonomischen und technisch-innovativen Potenziale der Bioökonomie im Vordergrund. Die Befragung von Stakeholdern aus dem Bereich Wirtschaft, NGOs und Wissenschaft wiederum ergab das Bild einer umfassenden Perspektive aus deutscher Sicht, bei dem die internationalen Auswirkungen nationalen Handelns ins Blickfeld gerückt wurden. Als besonders prioritär wurde von den Stakeholdern ebenfalls die globale Bekämpfung des Hungers eingeordnet, was im Bereich der Bioökonomie u. a. bedeutet, dass der Produktion von Nahrungsmitteln der Vorzug vor der Produktion von Non-Food-Produkten gegeben werden sollte („Food First“). Als ebenfalls besonders prioritär wurde die Entwicklung von nachhaltigen Konsum- und Produktionsstrukturen eingestuft. Als ebenfalls besonders bedeutsam wurde der Schutz der Biodiversität in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen erachtet, ebenso wie der Erhalt einer guten Wasserqualität. Das hier vorgestellte Indikatorensystem wird diesen Gesichtspunkten daher in besonderer Weise Rechnung tragen. Die hier vorgestellten Leitziele der Bioökonomie werden angelehnt an das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (Enquete-Kommission Umwelt 1998) und damit den Kategorien „ökologische Nachhaltigkeit“, „ökonomische Nachhaltigkeit“ und „soziale Nachhaltigkeit“ zugeordnet. Der direkte Bezug zu den Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDG) wird im nächsten Kapitel des Arbeitspapiers dargestellt.

Unterschieden wird zwischen spezifischen und integrativen Leitzielen. Die spezifischen Leitziele sind säulenspezifisch, wie zum Beispiel das Leitziel der Arbeitsbedingungen für die Säule der sozialen Nachhaltigkeit. Integrative Leitziele lassen sich mindestens zwei Säulen gleichzeitig zuordnen und liegen damit in den Schnittbereichen der Säulen. Hervorzuheben sind hier die Leitziele Ernährungssicherung, nachhaltiger finaler Konsum, nachhaltige Produktion und nachhaltige Infrastrukturen. Der integrative Charakter dieser vier Leitziele ergibt sich daraus, dass sie relevant für alle drei Säulen der Nachhaltigkeit sind (Abbildung 3).

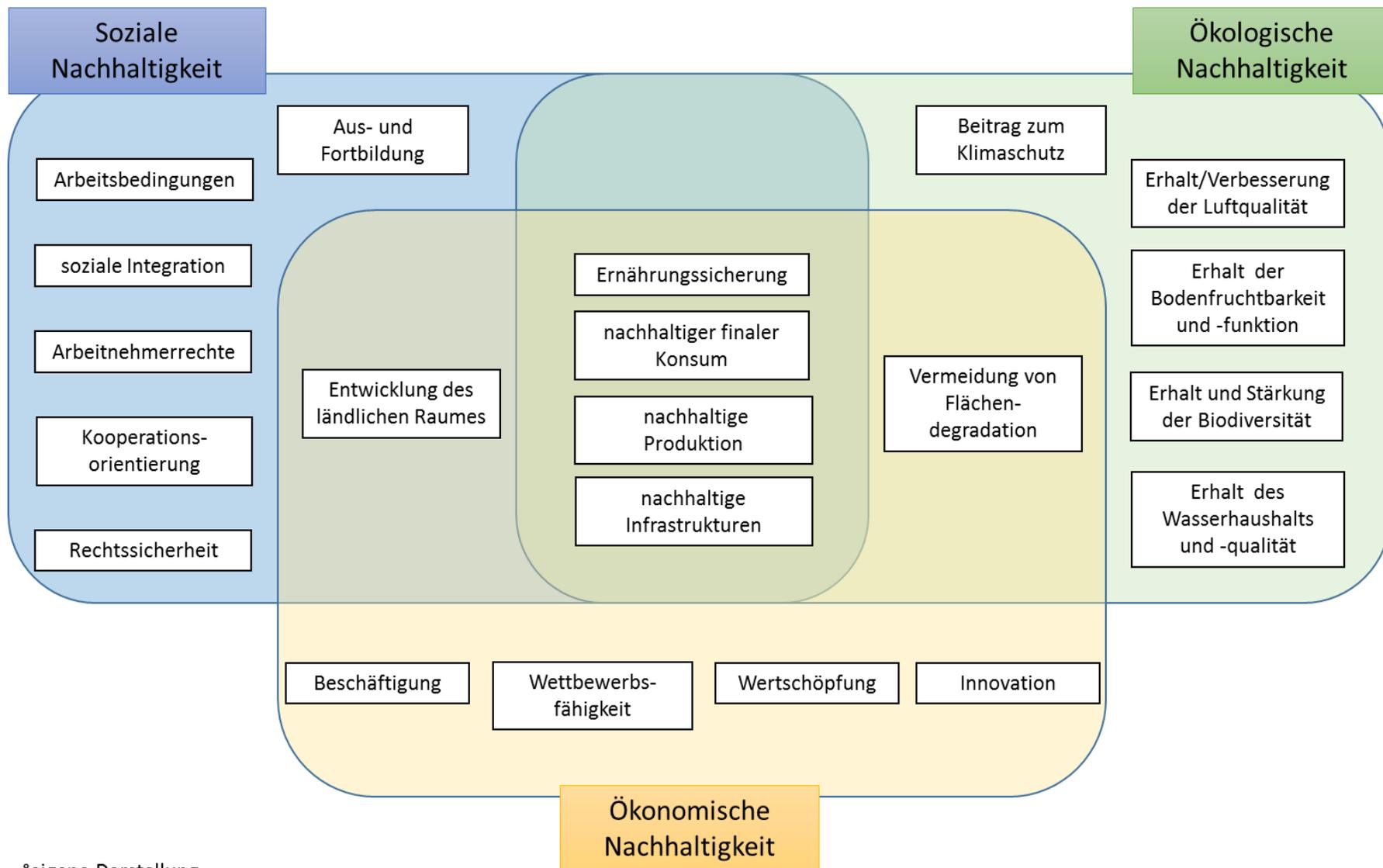


Abbildung 3: Leitziele der Bioökonomie

6 Indikatoren zu den Leitzielen der Bioökonomie

Um den Fortschritt innerhalb der Leitziele der Bioökonomie (Abbildung 3) beziffern zu können, ist es notwendig, ihnen Kriterien und Indikatoren zuzuordnen. Die aufgeführten Leitziele, Kriterien und Indikatoren gehen auf die in Abschnitt 5 beschriebenen Analysen zurück.

6.1 Soziale Nachhaltigkeit

Nationale und internationale Richtlinien zur wirtschaftlichen Nutzung natürlicher Ressourcen betrachten nicht nur ökologische- und ökonomische-, sondern auch kulturelle- und soziale Nachhaltigkeit (Axelsson *et al.* 2013, Forest Europe 2011, Littig & Griessler 2005).

Die relevanten Leitziele der sozialen Nachhaltigkeit sind in Tabelle 1 aufgeführt. Den Leitzielen werden Kriterien zugeordnet, welche wiederum durch Indikatoren quantifiziert werden. In der letzten Spalte der Tabelle werden die Skalierungsebene und mögliche Datenquellen dargestellt. Kriterien, die auch im Themenkatalog der SDGs explizit erwähnt werden, sind unter Angabe der jeweiligen Nummer gesondert aufgeführt. Aspekte, die mit einem Sternchen (*) markiert sind, wurden in der Stakeholderanalyse des Projekts SYMOBIO als besonders relevant klassifiziert. Indikatoren, die mit (") markiert sind, sind kein Bestandteil regelmäßiger Datenerhebungen, sondern beziehen sich auf Ergebnisse einzelner Berichte.

Die Kriterien der sozialen Nachhaltigkeit basieren auf Unternehmens- bzw. Beschäftigungsstatistiken. Die Erhebungsmethode sind in der Regel empirische Untersuchungen.

Die ausreichende Bereitstellung von Aus- und Fortbildungsmöglichkeiten ist dabei der Schlüssel, um den hohen Bedarf an Fachkräften im Bereich einer wissensbasierten Bioökonomie decken zu können. Indikatoren die zur Quantifizierung der beiden genannten Kriterien herangezogen werden können sind beispielsweise die „Anzahl und Quote betrieblicher Auszubildender“ und die „Anzahl Erwerbstätiger, die in den letzten 12 Monaten an berufsbezogener nicht-formaler Bildung/Weiterbildung teilgenommen haben“. Der Bioökonomierat empfiehlt: „Neue Ausbildungsprogramme und Fördermaßnahmen, insbesondere interdisziplinäre Forschungsprogramme, helfen, die Absolventen zu motivieren, sich über Disziplingrenzen hinauszuwagen“ (Bioökonomierat 2013).

Tabelle 1: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der sozialen Nachhaltigkeit

Leitziel	Kriterien	SDG	Indikatoren	Ebene / Quelle
Aus- und Fortbildung	Ausbildung	4.3	Anzahl und Quote betrieblicher Auszubildender	national/ Destatis ³ EU/ Eurostat ⁴
	Fortbildung	4.3	Anzahl Erwerbstätiger, die in den letzten 12 Monaten an berufsbezogener nicht-formaler Bildung/Weiterbildung teilgenommen haben	national/ Destatis EU/ Eurostat
Arbeitsbedingungen	Arbeitssicherheit	8.8	Anzahl Unfälle und Todesfälle bei der Arbeit	national/ Destatis EU/ Eurostat International/ ILO ⁵ ,
	Internationale Arbeitsstandards	8.7	Kinderarbeit / Zwangsarbeit	national/ Destatis international/ Alliance8.7 ⁶
		8.8	Durchschnittliche geleistete Wochenarbeitsstunden	National/ Destatis EU/ Eurostat international/ ILO
Soziale Integration	Gender	5.5	Anzahl weibliche / transgender Beschäftigte	national/ Destatis EU/ Eurostat International/ ILO
		5.a, 8.5	Geschlechtsspezifisches Verdienstgefälle	national/ Destatis EU/ Eurostat international/ ILO

³ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

⁴ <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

⁵ http://www.ilo.org/ilostat/faces/ilostat-home/home?_adf.ctrl-state=qf12b52w7_4&_afLoop=564038192793459#!

⁶ <http://www.alliance87.org/2017ge/>

	Inklusion	4.a	Anteil Beschäftigter mit Behinderung	national/ Destatis EU/ Eurostat international/ ILO ⁷
	Integration	10.7	Anteil Beschäftigter mit Migrationshintergrund	national/ Destatis EU/ Eurostat
Arbeitnehmerrechte	Gewerkschaftliche Organisation	8.8	Anzahl Beschäftigter mit Tarifvertrag	national/ Destatis ⁸ EU/ Eurostat ⁹ international/ Weltbank ¹⁰
			Anzahl Beschäftigter in Gewerkschaften	national / Destatis EU/ Eurostat international/ Weltbank
Kooperationsorientierung	Stakeholder Beteiligung		Einbindung von Stakeholdern bei Strategieentwicklung und Planung (qualitativ)“	
	Projektkooperation		Kooperation im Rahmen von PPP Projekten, Forschungsprojekten und NGOs (qualitativ)	national/ BMF ¹¹
			Patentschutzaspekte (qualitativ)	national/ DPMA ¹²
Zugang zu Wissen (qualitativ)“	national/ BMBF ¹³			
Rechtssicherheit	Landrechte	1.4, 5.a	Verankerung und Umsetzung der Landrechte im Rechtssystem (qualitativ)	International/ FAO ¹⁴

⁷ http://www.ilo.org/ilostat/faces/ilostat-home/home?_adf.ctrl-state=qf12b52w7_4&_afLoop=564038192793459#!

⁸ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

⁹ <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

¹⁰ <https://data.worldbank.org>

¹¹ <https://www.ppp-projektdatenbank.de/index.php?id=9>

¹² <https://www.dpma.de/recherche/index.html>

¹³ <https://www.bmbf.de/de/open-access-das-urheberrecht-muss-der-wissenschaft-dienen-846.html>

¹⁴ <http://www.fao.org/gender-landrights-database/en/>

Die Arbeitsbedingungen von Beschäftigten im Bereich der Bioökonomie sind ein wichtiges Bewertungskriterium insbesondere, wenn man sich die Arbeitsbedingungen in manchen Entwicklungsländern vor Augen hält. Kriterien dafür sind die Arbeitssicherheit und die Analyse internationaler Arbeitsstandards. Mögliche Indikatoren der Arbeitssicherheit sind beispielsweise die Anzahl „Anzahl Unfälle und Todesfälle bei der Arbeit“ und „Anzahl von Ausfallstunden, die durch Arbeitsunfälle entstehen“. Indikatoren für das Kriterium internationale Arbeitsstandards sind die „Erfassung von Kinder- und Zwangsarbeit“ sowie „durchschnittlich geleistete Wochenarbeitsstunden“. Im Rahmen des Leitziels der sozialen Integration ist die Inklusion behinderter Menschen, die Integration von Menschen mit Migrationshintergrund und der korrekte Umgang mit Genderaspekten zu beachten. Ein Indikator für diese Kriterien ist die jeweilige Anzahl Beschäftigter innerhalb der Bioökonomie, auf die das Kriterium zutrifft. Die gewerkschaftliche Organisation von Arbeitnehmern innerhalb der Bioökonomie ist im Rahmen des Leitziels „Arbeitnehmerrechte“ zu erfassen. Zudem muss die Verankerung der Arbeitnehmerrechte in der Rechtsprechung erfasst werden.

Im Rahmen des Leitziels „Kooperationsorientierung“ soll die Kommunikation und Kooperation zwischen (allen) Beteiligten im Bereich Bioökonomie gefördert werden. Von Interesse ist hierbei die Kooperation im Rahmen von öffentlich-privaten Partnerschaften (ÖPP) und Forschungsprojekten und zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen und Nichtregierungsorganisationen bzw. der Privatwirtschaft. Zusätzlich ist zu erfassen, in welchem Rahmen Stakeholder bei der Planung und Strategieentwicklung mit einbezogen werden. Weitere Kriterien sind der Zugang zu Wissen sowie Patentschutzaspekte. Die Gewährleistung von Rechtssicherheit mit dem besonderen Fokus auf Landrechte findet Erwähnung in den SDGs und ist ein wichtiges Leitziel für die Bioökonomie. Ein Indikator dafür ist die „Verankerung und Umsetzung der Landrechte im Rechtssystem“.

6.2 Ökonomische Nachhaltigkeit

Den vier Leitzielen der ökonomischen Nachhaltigkeit werden Kriterien und Indikatoren zugeordnet (Tabelle 2). In der letzten Spalte der Tabelle werden die Skalierungsebene und mögliche Datenquellen dargestellt. Kriterien, die auch im Themenkatalog der SDGs explizit erwähnt werden, sind unter Angabe der jeweiligen Nummer gesondert aufgeführt. Aspekte, die mit einem Sternchen (*) markiert sind, wurden in der Stakeholderanalyse des Projekts SYMOBIO als besonders relevant klassifiziert. Die Indikatoren der ökonomischen Nachhaltigkeit basieren maßgeblich auf Unternehmens- bzw. Beschäftigungsstatistiken und werden durch statistische Erhebungen erfasst. Indikatoren, die mit (") markiert sind, sind kein Bestandteil regelmäßiger Datenerhebungen, sondern beziehen sich auf Ergebnisse einzelner Berichte.

Tabelle 2: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der ökonomischen Nachhaltigkeit

Leitziel	Kriterien	SDG	Indikatoren	Ebene / Quelle
Beschäftigung	Beschäftigungsverhältnisse	(9.5), 8.5	Anzahl der Beschäftigten in FTE	national/ Destatis ¹⁵ EU/ Eurostat ¹⁶ international/ Weltbank ¹⁷ , EORA ¹⁸
			Arbeitnehmer mit befristetem Arbeitsvertrag	national/ Destatis EU/ Eurostat
			Anzahl informeller Beschäftigungsverhältnisse	international/ ILO ¹⁹
	Qualifikation		Anzahl Beschäftigter nach Qualifikation	national/ Destatis EU/ Eurostat international/ ILO
	Existenzminimum	1.2	Anzahl Beschäftigter unter dem Existenzminimum	EU/ Eurostat international / ILO
	Einkommen	8.5, 10.1	Durchschnittliches monatliches Einkommen	national/ Destatis EU/ Eurostat international / ILO
	Einkommensspreizung	10.2	Gini-Koeffizient	national/ Destatis EU/ Eurostat international/ OECD ²⁰
Wettbewerbsfähigkeit	Produktbezogen		Global Competitiveness Index	international/ Weltbank
	Personalbezogen		Global Competitiveness Index	international/ Weltbank

¹⁵ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

¹⁶ <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

¹⁷ <http://databank.worldbank.org>

¹⁸ <http://www.worldmrio.com/>

¹⁹ http://www.ilo.org/ilostat/faces/ilostat-home/home?_adf.ctrl-state=qf12b52w7_4&_afLoop=564038192793459#!

²⁰ <http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=IDD>

Wertschöpfung	Brutto-/ Nettowertschöpfung	8.2	Wertschöpfung der ausgewählten Bioökonomiesektoren	national/ Destatis ²¹ EU/ Eurostat ²² international/ Weltbank ²³
Innovation	Gesellschaftliche Innovation		Anteil Umsatz von Unternehmen in der Öko- und Kreislaufwirtschaft am Gesamtumsatz	international/ Eco Innovation Observatory ²⁴
	Prozessinnovation	9.b	Anzahl der ISO 14001 registrierten Unternehmen	international/ Eco Innovation Observatory
	Produktinnovation	9.b	Anzahl Patente im Zusammenhang mit Öko-Innovationen	international/ Eco Innovation Observatory
	Förderung KMU	9.3	Anzahl geförderter Forschungs- und Entwicklungsprojekte in KMUs“	national/ ZIM (BMWI) ²⁵
	Zugang zu Kapital durch KMU	9.3	Maximal förderfähige Kosten“	national / ZIM (BMWI)

²¹ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

²² <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

²³ <http://databank.worldbank.org>

²⁴ https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/index_en

²⁵ <https://www.zim-bmwi.de/>

Die Analyse des Leitziels „Beschäftigung innerhalb der Bioökonomie“ erfordert die Erfassung spezifischer Kriterien zu den Arbeitnehmern (Beschäftigungsverhältnisse, Qualifikation, Existenzminimum, Einkommen), eine allgemeine Untersuchung der Einkommensverteilung (Einkommensspreizung) sowie eine Aufschlüsselung der genannten Daten nach Wirtschaftszweigen. Die genannten Kriterien werden durch spezielle Indikatoren quantifiziert. Ein Beispiel dafür ist der Indikator „Anzahl der Beschäftigten in FTE“ innerhalb des Kriteriums der Beschäftigungsverhältnisse.

Bei der Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Branchen wird zwischen den zwei Kategorien produktbezogene Wettbewerbsfähigkeit (Produktionskosten pro Produkt) und personalbezogene Wettbewerbsfähigkeit (Arbeitsproduktivität, Lohnkosten, etc.) unterschieden. Beide Kriterien können indirekt über den Indikator „Global Competitiveness Index“ abgebildet werden. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft betont, dass „die Sicherung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Bioökonomie in Deutschland und die Wachstumspotenziale auf den internationalen Märkten“ stets zu beachten seien (BMEL 2016).

Eine Analyse der Wertschöpfung bzw. Wertschöpfungsketten ist essenziell für die Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit. Ein Teil davon ist der direkte Beitrag der Bioökonomie zum Bruttoinlandsprodukt (BIP). Für die Analyse von Trends ist im Rahmen eines Monitorings allerdings nicht nur der Gesamtanteil am BIP interessant, sondern auch die detailliertere Aufschlüsselung des Beitrags der einzelnen Branchen. Erfasst werden sollen Kennzahlen wie zum Beispiel Umsatz, Anzahl der Unternehmen und Trends. Die für die Bioökonomie relevanten Branchen sind nach Einschätzung von BMBF und BMEL (2014):

- Automobilbranche
- Bauindustrie
- Chemie
- Energie
- Land- und Forstwirtschaft
- Maschinenbau
- Ernährungsindustrie
- Pharmaindustrie
- Textilien
- Konsumgüter

Dies ist mit amtlichen Statistiken allerdings derzeit nicht möglich, da weder sektoral noch auf Ebene produzierter Güter effektive Anteile der Bioökonomie zugeordnet werden können. Für ein Monitoring ökonomischer Indikatoren der oben aufgeführten Branchen muss daher erst eine Methodik entwickelt werden, um diese Anteile abzuschätzen. Ansätze hierfür sind in den letzten Jahren erarbeitet worden und werden im Rahmen des Projektes „Ermittlung wirtschaftlicher Kennzahlen und Indikatoren für ein Monitoring des Voranschreitens der

Bioökonomie ²⁶ “ weiterentwickelt. Auch das Projekt SYMOBIO wird hierfür einen systematischen Ansatz entwickeln.

Innovationspotenziale der Bioökonomie müssen frühzeitig erkannt und genutzt werden. Ein wichtiges Kriterium dafür ist die gesellschaftliche bzw. soziale Innovation. Beispiele sind Konzepte zur Mobilität wie Carsharing oder zur Ressourcenschonung wie 2Good2Go. Hier müssen die Ausgaben der Unternehmen im Bereich Forschung und Entwicklung erfasst und nach Sektoren unterschieden werden.

Um den Grad der Prozessinnovation der Bioökonomie bestimmen zu können, muss die Steigerung der Rohstoffproduktivität [BIP/Rohstoffinput] und der Energieproduktivität [BIP/Energieinput] durch Innovationen erfasst werden. Der Grad der Produktinnovation kann angezeigt werden durch den Export von Hochtechnologien und ihren Neuheitsgrad.

Zusätzlich sind im Rahmen des Leitziels „Innovation“ die Kriterien der „Förderung KMU“ und „Zugang zu Kapital durch KMU“ wichtig. Hierfür wäre der Anteil, den KMU (kleine und mittlere Unternehmen) an Umsatz und Bruttowertschöpfung haben, sowie ihr Zugang zu Finanzmitteln, zu ermitteln.

6.3 Ökologische Nachhaltigkeit

Die Säule der ökologischen Nachhaltigkeit bezieht sich auf die Lebensgrundlagen des Menschen (Tabelle 3). Dabei ist das übergeordnete Ziel, den Einfluss menschlicher Aktivitäten, die sich nachteilig auf diese Lebensgrundlagen auswirken, auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Die biophysikalischen Annahmen auf denen die Indikatoren der ökologischen Nachhaltigkeit basieren stammen aus verschiedenen Datenquellen wie zum Beispiel die FAOSTAT Datenbank. In der letzten Spalte der Tabelle werden die Skalierungsebene und mögliche Datenquellen dargestellt. Kriterien, die auch im Themenkatalog der SDGs explizit erwähnt werden, sind unter Angabe der jeweiligen Nummer gesondert aufgeführt. Aspekte, die mit einem Sternchen (*) markiert sind, wurden in der Stakeholderanalyse des Projekts SYMOBIO als besonders relevant klassifiziert. Indikatoren, die mit (") markiert sind, sind kein Bestandteil regelmäßiger Datenerhebungen, sondern beziehen sich auf Ergebnisse einzelner Berichte.

²⁶ https://www.cesifo-group.de/de/ifoHome/research/Projects/Archive/Projects_EUR/2019/proj_Biooekonomie_ekr.html

Tabelle 3: Leitziele, Kriterien und Indikatoren der ökologischen Nachhaltigkeit

Leitziel	Kriterien	SDG	Indikatoren	Ebene / Quelle
Beitrag zum Klimaschutz	Ausstoß klimawirksamer Gase	13, 9.4	Menge und Art der THG Emissionen	national/ Destatis ²⁷ EU/ Eurostat ²⁸ international/ IPCC ²⁹ , IIASA ³⁰
	Kohlenstoffspeicher		Menge des in Grünland und Waldflächen gespeicherten Kohlenstoffs	national/ Umweltbundesamt ³¹ international/ IIASA ³²
Erhalt und Verbesserung der Luftqualität	Gasförmige Schadstoffemissionen in der Atmosphäre (außer THG)		Gesamtemission nach Schadstoff	international/ OECD ³³
	Feinststaub	11.6	Feinststaubemissionen PM _{2,5}	national/ Destatis EU/ Eurostat international/ WHO ³⁴
Erhalt Wasserhaushalt und -qualität	Wasserqualität	6.3	Phosphorfracht [und Nitrateintrag ³⁵] in Grund- und Oberflächenwasser	national/ WaterGAP ³⁶ EU/WaterGAP international/ WaterGAP

²⁷ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

²⁸ <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

²⁹ <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>

³⁰ <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/EnergyCarbonDatabase.en.html>

³¹ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#textpart-4>

³² <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/EcosystemsServicesandManagement/GlobalForestDB.en.html> *nur für Walddaten

³³ <https://stats.oecd.org>

³⁴ http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

³⁵ [Die Implementierung in das Modell WaterGAP wird in Betracht gezogen]

³⁶ <https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/en/cesr/research/projects/active/watergap.html>

	Wasserquantität	6.4	Entnahme von Grund- und Oberflächenwasser	national/ WaterGAP EU/ WaterGAP international/ WaterGAP
			Wasserknappheitsindex (WSI)	national/ WaterGAP EU/ WaterGAP international/ WaterGAP
Erhalt und Stärkung der Biodiversität*	Biodiversität der Ökosysteme	14,	Diversität als Vorhandensein von Indikatorspezies	international/ IUCN ³⁷
		15.5	Anteil invasiver Arten an Gesamtdiversität	international/ IUCN
	Agro-Biodiversität	2.4	Diversität verwendeter Nutzpflanzen	international/ CBD ³⁸
			Anzahl gentechnisch veränderter Organismen	International/ IIASA ³⁹
	Habitate	14.5, 15.1	Grünlandanteil bewirtschafteter Agrarflächen	international/ LandSHIFT ⁴⁰
			Schutzflächenanteil an der Gesamtfläche	international/ LandSHIFT
Einsatz von Agrarchemikalien		Art und Menge der eingesetzten Chemikalie	international/ FAO ⁴¹	
Erhalt Bodenfruchtbarkeit und –funktion*	Bodenfruchtbarkeit		Anteil organischer Kohlenstoff	international/ FAO
	Bodenstruktur		Trockenrohdichte	international/ FAO
	Erosion	15.3	Mittlere jährliche Bodenabtragsmenge	international/ FAO

³⁷ <http://www.iucnredlist.org/>

³⁸ <https://www.cbd.int/reports/search/?type=nr-03>

³⁹ <http://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>

⁴⁰ <https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/en/cesr/research/projects/finished/landshift.html>

⁴¹ <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

Ein wichtiges Leitziel in diesem Zusammenhang ist der Klimaschutz. Relevantes Kriterium hierfür ist der Ausstoß klimawirksamer Gase wie zum Beispiel Kohlendioxid und Methan. Ein weiterer wichtiger Indikator ist die Menge des in Grünland und Waldflächen gebundenen Kohlenstoffs. Auch der Erhalt bzw. die Verbesserung der Luftqualität ist ein wichtiges Leitziel der ökologischen Nachhaltigkeit. Zur Beurteilung der Luftqualität sind als Indikatoren die Menge des Ausstoßes von Feinstaub und die Art und Menge der nicht zu den Treibhausgasen gehörenden Schadstoffemissionen zu ermitteln.

Bezogen auf die lebensnotwendige Ressource Wasser ist sowohl dessen regionale Verfügbarkeit (Quantität) als auch die jeweilige Qualität zu berücksichtigen. Hier sind maßgebliche Indikatoren die „Entnahme von Grund- und Oberflächenwasser“, der „Wasserknappheitsindex WSI“ und die „Phosphorfracht in Grund- und Oberflächenwasser“.

Die Biodiversität der Erde ist ein schützenswertes Gut und ihr Erhalt wird deshalb als Leitziel aufgeführt. Dazu sollte die Diversität der Ökosysteme auf verschiedenen Ebenen überwacht werden. Denn es wäre wünschenswert, dass sowohl innerhalb der einzelnen Ökosysteme eine hohe Artenvielfalt vorhanden ist, als auch eine große Vielfalt an verschiedenartigen Ökosystemen existiert. Vielfach stehen bislang jedoch hauptsächlich Daten zur Speziesdiversität zu Verfügung. Die Kartierung von Biomen kann genutzt werden, um das Biodiversitätspotenzial abzuschätzen. Um beispielsweise Habitats diesbezüglich zu klassifizieren, könnte man sich der MODIS Land Cover Datenbank⁴² für Landbedeckung bedienen und diese mit den Informationen der WDPA Datenbank⁴³ für Schutzflächen verknüpfen. Invasive Arten werden als Negativposten geführt. Auch der Einsatz von Agrarchemikalien wird als Risikofaktor für die Biodiversität gesehen. Zu berücksichtigen ist auch die Agro-Biodiversität der genutzten land- und forstwirtschaftlichen Flächen.

Der Erhalt der Bodenfunktion und -fruchtbarkeit ist von hoher Wichtigkeit für den Agrar- und Forstsektor und damit auch substantiell für die Bioökonomie. Zu erfassende Kriterien hierfür sind die Bodenqualität, die Bodenstruktur und Faktoren der Bodenschädigung, wie z. B. Bodenabtragung durch Erosion.

6.4 Integrative Leitziele der Nachhaltigkeit

Das „Drei-Säulen-Modell“ der Nachhaltigkeit ist mittlerweile auch einer breiten Öffentlichkeit bekannt und ermöglicht so eine leichter verständliche Kommunikation der Leitziele einer nachhaltigen (Bio-)Ökonomie. Einige Ziele lassen sich mehr als einem Nachhaltigkeitsgebiet zuordnen. Hierbei handelt es sich nicht zuletzt wegen ihres integrativen Charakters um besonders wichtige Ziele (Abbildung 3, Tabelle 4). Kriterien, die auch im Themenkatalog der SDGs explizit erwähnt werden, sind unter Angabe der jeweiligen Nummer gesondert aufgeführt. Aspekte, die mit einem Sternchen (*) markiert sind, wurden in der Stakeholderanalyse des Projekts SYMOBIO als besonders relevant klassifiziert. Indikatoren, die mit (") markiert sind, sind kein Bestandteil regelmäßiger Datenerhebungen, sondern beziehen sich auf Ergebnisse einzelner Berichte.

⁴² <http://glcf.umd.edu/data/lc/>

⁴³ <https://www.iucn.org/theme/protected-areas/our-work/quality-and-effectiveness/world-database-protected-areas-wdpa>

Tabelle 4: Integrative Leitziele, Kriterien und Indikatoren der Nachhaltigkeit

Leitziel	Kriterien	SDG	Indikatoren	Ebene/Quellen
Entwicklung des ländlichen Raumes (LR)	Arbeitsbedingungen im LR	9.1, 11.2	Zugang des ländlichen Raumes zu ÖPNV	national/ Destatis ⁴⁴
	Beschäftigung im LR		Anzahl der Beschäftigten im LR in FTE	national/ Destatis
	Wertschöpfung im LR	(9.3)	Wertschöpfung der ausgewählten Bioökonomiesektoren im LR	national/ Destatis
Ernährungssicherheit*	Preisentwicklung	2.c	Entwicklung der Verbraucherpreise für Nahrungsmittel	national/ Destatis EU/ Eurostat ⁴⁵ international/ FAO ⁴⁶
	Ernährungssituation	2.1	FAO Indikatoren für Ernährungssicherheit	international/FAO
	Selbstversorgungsgrad		Anteil des Nahrungsmittelkonsums, der durch die inländische Produktion gedeckt werden kann	national/ BLE ⁴⁷
Vermeidung von Flächendegradation im In- und Ausland*	Flächeninanspruchnahme	2.4, 14.5, 15.1, 15.2	Verhältnis von Nutzungskategorien zur gesamten Landfläche	national/ LandSHIFT ⁴⁸ EU/ LandSHIFT international/ LandSHIFT
			Anteil degradiertes Anbauflächen	International/ FAO ⁴⁹
	Landnutzungsänderung (LUC)	2.4, 15.1, 15.2	Verlust von Agrarfläche	national/ LandSHIFT EU/ LandSHIFT international/ LandSHIFT
			Verlust von Waldfläche	national/ LandSHIFT EU/ LandSHIFT international/ LandSHIFT

⁴⁴ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

⁴⁵ <http://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>

⁴⁶ <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

⁴⁷ <https://datenzentrum.ble.de/versorgung/>

⁴⁸ <https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/en/cesr/research/projects/finished/landshift.html>

⁴⁹ <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>

	Indirekte Landnutzungsänderung (iLUC)		Verlust von Agrarfläche	national/ LandSHIFT ⁵⁰ EU/ LandSHIFT international/ LandSHIFT
			Verlust von Waldfläche	national/ LandSHIFT EU/ LandSHIFT international/ LandSHIFT
Nachhaltige(r)* <ul style="list-style-type: none"> • Produktion • Infrastrukturen • finaler Konsum 	Ressourcenaufwand und-verbrauch	8.4, 12.2	(Anbau-) Land Fußabdruck Forst Fußabdruck Wasser Fußabdruck THG Fußabdruck Material Fußabdruck	international/ IRP ⁵¹
	Ressourcenproduktivität		BIP pro Ressourcenaufwendung, Gesamtrohstoffproduktivität	national/EU/Eurostat ⁵²
	Abfallwirtschaft	11.6, 12.5	Abfallmenge Recyclingrate des Siedlungsabfalls	national/ Destatis ⁵³
	Produktionskaskaden		Biomassennutzungsfaktor“	national/ BMUB ⁵⁴
	Zertifizierung		Anteil der für nachhaltige Produktion zertifizierten Produkte am Endverbrauch“	national/ BioSt-NachVO ⁵⁵

⁵⁰ <https://www.uni-kassel.de/einrichtungen/en/cesr/research/projects/finished/landshift.html>

⁵¹ <http://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>

⁵² <http://ec.europa.eu/eurostat/web/europe-2020-indicators/resource-efficient-europe>

⁵³ <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Datenbanken/Datenbanken.html>

⁵⁴ http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3713_44_100_biomassekaskaden_bf.pdf

⁵⁵ http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Standardartikel/biomassestrom_nachhaltigkeitsv.html

Beispielsweise ist die „Entwicklung des ländlichen Raumes“ ein Leitziel, das sowohl der sozialen wie auch der ökonomischen Nachhaltigkeitsbewertung durch die räumlich differenzierte Darstellung von Kriterien wie Arbeitsbedingungen, Beschäftigung und Wertschöpfung zuzuordnen ist.

Ernährungssicherheit ist ein Leitziel, das mit dem Wachstum der Erdbevölkerung immer wichtiger wird. So hat auch innerhalb der Bioökonomie die Ernährungssicherung höchste Priorität. Um diese gewährleisten zu können, müssen Kriterien aus allen drei Säulen untersucht und beobachtet werden. Dazu gehören Preisentwicklung, Ernährungssituation und Selbstversorgungsgrad. Ihnen können Indikatoren wie zum Beispiel die „Entwicklung der Verbraucherpreise für Nahrungsmittel“, der „Anteil des Nahrungsmittelkonsums, der durch die inländische Produktion gedeckt werden kann“ und die „FAO Indikatoren für Ernährungssicherheit“ zugeordnet werden. Letztere unterteilen sich in vier verschiedene Kategorien. Die erste Kategorie umfasst Indikatoren für die „Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln“ wie zum Beispiel die „durchschnittliche Ernährungsenergieversorgung“, der „durchschnittliche Wert der Nahrungsmittelproduktion und die „durchschnittliche Zufuhr von Protein tierischen Ursprungs“. Die zweite Kategorie Indikatoren bezieht sich auf den „Zugang zu Nahrungsmitteln“. Hier sind zum Beispiel die Indikatoren die „Prävalenz der Unterernährung“, das „Bruttoinlandsprodukt pro Kopf“ in Kaufkraftäquivalenten und die „Höhe des Nahrungsmitteldefizits“ angeführt. Die dritte Kategorie trägt die Überschrift „Stabilität“. Hier werden beispielsweise Indikatoren wie „Importabhängigkeit von Getreide“, „Wert der Nahrungsmittelimporte über die gesamten Warenexporte“ und „Variabilität der Nahrungsmittelproduktion pro Kopf“ aufgeführt. Die vierte Kategorie Indikatoren quantifiziert den „Einsatz von Nahrungsmitteln“. Aufgeführte Indikatoren sind zum Beispiel der „Zugang zu verbesserten Wasserquellen“, der „Zugang zu verbesserten Sanitäranlagen“ und der „Anteil an Kindern unter fünf Jahren die untergewichtig sind“. Die hier von der FAO gelisteten Indikatoren gehen hier auf Datenquellen der WHO, UNICEF und WB zurück. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sieht die Aufgabe der Bioökonomie in diesem Kontext in der „Sicherstellung der Versorgung mit qualitativ hochwertigen Lebensmitteln für die deutsche Bevölkerung und – im Rahmen der Möglichkeiten – Leisten eines Beitrags zur Welternährung einer wachsenden Menschheit“ (BMEL 2016). Vorgabe ist dabei, dass die Verwendung von biogenen Rohstoffen für die Ernährungssicherung Vorrang vor der Verwendung in anderen Industriezweigen bzw. zur Bereitstellung von Endenergie hat.

Ein weiteres wichtiges Leitziel ist die Vermeidung von Flächendegradation im Sinne einer „Land degradation neutrality“ (Orr *et al.* 2017, Cowie *et al.* 2018). Gemeint ist, dass sich z. B. Siedlungsflächen nicht zu Lasten von Agrarflächen und diese wiederum nicht zu Lasten von Wald- und Naturflächen ausdehnen, um den ökologischen und letztlich auch ökonomisch wertvollen Bestand zu erhalten. Im ersten Schritt wird dafür die reale Flächeninanspruchnahme Deutschlands, unterteilt in die fünf Hauptkategorien der Flächennutzung Siedlungs- und Verkehrsflächen, landwirtschaftliche Flächen, Forstflächen, Wasserflächen und „andere Flächen“, wie z.B. Schutzflächen (Naturschutzgebiete, Nationalparke und Biosphärenreservate), dargestellt. Im zweiten Schritt werden Kriterien anzuwenden sein, die auf direkte und indirekte Landnutzungsänderungen (*LUC und iLUC*) abzielen, die mit Aktivitäten innerhalb Deutschlands im In- und Ausland verbunden sind, insbesondere Verluste an agrarischen und forstlichen Flächen. Die Ermittlung dieser Daten erfolgt in Zusammenhang mit der Quantifizierung der Flächenfußabdrücke, denn es geht bei

den indirekt induzierten Verlusten darum, die Flächeninanspruchnahme zu ermitteln, die durch die Produktnachfrage des deutschen inländischen Konsums im Ausland ausgelöst wird. In der Flächennutzungskategorie der agrarischen Anbaufläche ist auch zu prüfen, inwieweit Anteile davon z.B. durch Erosion degradiert sind.

Ein wichtiges Ziel der Bioökonomie ist die Stärkung der Nachhaltigkeit in Produktion, Infrastrukturen und Konsum. Insbesondere die deutschen Stakeholder messen diesem Ziel eine besonders hohe Bedeutung zu (Thrän *et al.* 2018). Um dieser Erwartung gerecht zu werden, ist es notwendig, das Indikatorenset der SDGs insofern zu erweitern, als dass hinreichende Aussagen zu den Kriterien Ressourcenaufwand, -verbrauch und -effizienz getroffen werden können. Aktuell wird hierzu lediglich die Materialintensität als Variante des Materialfußabdrucks berücksichtigt. Um Aussagen über den gesamten Ressourcenaufwand treffen zu können, ist es notwendig die Ressourcenfußabdrücke für (Anbau-) Land, Forst, Wasser und Treibhausgase (THG) zusätzlich zu ermitteln. Die Ressourcenfußabdrücke des inländischen Konsums beziehen sich auf den Umfang der mit dem inländischen Endverbrauch von Produkten verbundenen Ressourcennutzung im In- und Ausland. Zur Menge der jährlich inländisch genutzten Ressource wird die für die Importe im Ausland aufgewandte Menge dieser Ressource addiert, die dort für Herstellung, Aufbereitung u. Ä. genutzt wird und die für den Export dieser Produkte aufgewendeten Mengen der Ressource werden davon abgezogen.

Neben dem Ressourcenaufwand ist auch die Ressourceneffizienz bzw. Ressourcenproduktivität ein wichtiges Kriterium, das angewandt werden muss, um die Leistungsfähigkeit der Bioökonomie bewerten zu können. Indikatoren der Ressourcenproduktivität sind z. B. Rohstoffproduktivität (BIP/Rohstoffaufwand) [€/kg] und Flächenproduktivität (Ertrag/Bezugsfläche) [t/ha]. „Bezugsfläche“ kann sich auf ein Feld, die inländische Anbaufläche, Agrarfläche oder den Flächenrucksack beziehen.

Ein weiteres wichtiges Kriterium mit direktem Einfluss auf die Nachhaltigkeit von Produktion, Konsum und Infrastrukturen ist die Abfallwirtschaft. Indikatoren wie die „Abfallmenge“ oder der „Recyclinganteil des Siedlungsabfalls“ ermöglichen Rückschlüsse auf die im System anfallenden Ressourcenverluste und geben damit Hinweise auf mögliche Optimierungen. Das Kriterium „Nutzung von Produktionskaskaden“ steht im direkten Bezug dazu, da durch die Mehrfachnutzung eines Produktes der Einsatz von Primärressourcen reduziert werden kann. Nach der Definition des Umweltbundesamtes liegt eine Kaskadennutzung vor, wenn das Endprodukt eines Produktionsprozesses von biogenem Rohstoff zu biobasiertem Produkt mindestens ein weiteres Mal stofflich oder energetisch genutzt wird (Umweltbundesamt 2017). Dies wird durch den Indikator „Biomassennutzungsfaktor“ quantifiziert.

Zertifizierung ist ein Kriterium, welches einen großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Bioökonomie haben kann, wenn zwei Aspekte erfüllt sind. Zum einen muss das jeweilige Zertifikat wissenschaftlich fundiert eine Steigerung der Nachhaltigkeit der jeweiligen Produktions-Konsum-Kette belegen. Zum anderen muss der Konsument dem jeweiligen Zertifikat vertrauen und infolgedessen eine Änderung bzw. Anpassung seines Konsumverhaltens durchführen. Kernaspekt ist eine Erhöhung der Transparenz des Lebenswegs von Produkten für Endverbraucher. Gesamtwirtschaftlich betrachtet kann der

„Anteil der für nachhaltige Produktion zertifizierten Produkte am Endverbrauch“ ein möglicher Indikator sein.

Der Aspekt der „guten politischen Praxis“ (Good Governance), der im SDG Themenkatalog unter der Nummer 16 „Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen“ thematisiert wird, würde formal zur Kategorie der integrativen Leitziele zählen. Dieses Leitziel ist jedoch nicht spezifisch relevant für die deutsche Bioökonomie als solche und wird deshalb nicht gesondert in Tabelle 4 ausgewiesen. Trotzdem kann „gute politische Praxis“ von Bedeutung für die Bewertung der Herkunft deutscher Importe sein.

7 Fußabdrücke der Ressourcen- und Klimabelastung

7.1 Fußabdruckkonzepte in der aktuellen Literatur

In aktuellen Veröffentlichungen, die sich mit Lebenszyklusanalysen, ökonomieweiter Materialflussanalyse und Nachhaltigkeitsforschung beschäftigen, findet der Begriff „Fußabdruck“ immer wieder Erwähnung. Verschiedene Arbeitsgruppen haben sich bereits mit einem oder mehreren Konzepten für Fußabdrücke auseinandergesetzt (Galli et al. 2012, Giljum et al. 2013, Čuček et al. 2012, Tukker et al. 2016, Steinmann et al. 2016). Tabelle 5 liefert einen Überblick über die führenden Konzepte für Fußabdrücke im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs und ihre Hauptautoren.

7.2 Definition der Konzepte für Ressourcenfußabdrücke in den Projekten

In den folgenden Abschnitten werden die Ressourcenfußabdrücke konzeptionell beschrieben (in Anlehnung an Bringezu et al. 2016), die in BEPASO und SYMOBIO berücksichtigt werden sollen.

7.2.1 Agrarflächenfußabdruck

Die Hauptkategorien der Flächennutzung sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, landwirtschaftliche Flächen, Forstflächen, Flächen für Naturschutz und Sonstiges, inkl. Gewässer.

Die globale Landnutzungsänderung (*LUC*) ist hauptsächlich von der Expansion städtischer (Siedlungsfläche) und agrarischer Flächen auf Kosten von Waldflächen geprägt. In Deutschland fällt bei der *LUC* am stärksten die Expansion städtischer Siedlungsfläche auf produktive Anbauflächen ins Gewicht. Weltweit führt zudem die Expansion und Intensivierung der Nutzung bestehender Agrarflächen in vielen Fällen zu einer Bodendegradierung (UNEP 2014). Die beschriebenen Einflüsse in Verbindung mit der steigenden Weltbevölkerung und der daraus resultierenden steigenden Nachfrage nach Nahrung machen Agrarland zu einer wertvollen Ressource.

Der *Fußabdruck der Anbaufläche*⁵⁶ hat eine hohe Wichtigkeit für die Umsetzung des globalen Leitziels des „Stopps von Biodiversitätsverlusten durch die Expansion von Anbaufläche“. Dieser wird aus dem Anteil an Anbauflächen im Inland und dem Anteil an Anbauflächen im Ausland, der über den Import von Produkten für den innerdeutschen Konsum indirekt genutzt

⁵⁶ Ackerfläche und Fläche für permanenten Kulturen

wird, errechnet. Das ergibt den Anbauflächenfußabdruck der inländischen Produktion. Den Fußabdruck des inländischen Verbrauchs erhält man, wenn davon der Umfang der Anbauflächen für den Export von Produkten abgezogen wird.

Der Fußabdruck der Anbaufläche wird in Hektar pro Person bemessen, um international vergleichbar zu sein und mit Referenzwerten der nachhaltig verfügbaren Flächen in Beziehung gesetzt werden zu können. Daten zur globalen Nutzung von Agrar- und Waldflächen auf nationaler Ebene werden in jährlichen Berichten der FAO bereitgestellt. Die Analyse der Agrarfußabdrücke von Ländern oder Regionen ist Thema verschiedener Publikationen, wie z. B. von O'Brien et al. (2015).

Tabelle 5: Überblick über Fußabdruckkonzepte und Autoren

Fußabdruck	Autoren	Definition in den Projekten	Einheit
Ökologischer Fußabdruck (<i>nicht im Projekt berücksichtigt</i>)	Wackernagel & Rees (1998), Wackernagel et al. (1999), Wackernagel et al. (2005)	Der ökologische Fußabdruck beschreibt die anthropogene Belastung des Planeten in Form einer Kombination aus realer und virtueller Landnutzung. Das Konzept wird dominiert von der Zurechnung von theoretisch für die CO ₂ -Aufnahme in Biomasse benötigten Land- und Ozeanflächen.	Globaler Hektar [gHa]
Materialfußabdruck	Giljum et al. (2015), Wiedmann et al. (2015), Bringezu et al. (2003)	Der Materialfußabdruck des inländischen Konsums (<i>Raw Material Consumption [RMC]</i>) errechnet sich aus der gesamten inländischen Extraktion von Rohstoffen und der Menge an im Ausland für die Herstellung, Aufbereitung u. Ä. von Produkten aufgewandten Rohstoffen, die über den Import dieser Produkte indirekt von inländischen Konsumenten genutzt wird. Davon wird die für inländische Exportprodukte aufgewandte Menge an Rohmaterialien, die indirekt von Konsumenten im Ausland genutzt wird, abgezogen. Unterbleibt diese Subtraktion, so ergibt sich der Materialfußabdruck der inländischen Produktion.	[kg/Prozess], [kg/Produkt], [kg/Person]
Landfußabdruck (Anbauflächen-Fußabdruck)	Giljum et al. (2013), Bringezu, et al. (2012)	Der Anbauflächen-Fußabdruck wird aus dem Umfang an Anbauflächen im Inland und dem Umfang an Anbauflächen im Ausland, der über den Import von Produkten für den innerdeutschen Konsum indirekt genutzt wird, errechnet. Dies ergibt den Fußabdruck der inländischen Produktion. Wird davon der Umfang an Anbauflächen für Exportprodukte abgezogen, so ergibt sich der Anbauflächenfußabdruck des inländischen Konsums.	[ha/Prozess], [ha/Produkt], [ha/Person]
Forstfußabdruck	O'Brien (2016)	Der Forstfußabdruck des inländischen Konsums (<i>Forest Footprint [FFP]</i>) errechnet sich aus der gesamten inländischen Ernte von Primärholz und der Menge des an im Ausland für die Herstellung, Aufbereitung u. Ä. von Produkten aufgewandten Primärholzes, die über den Import dieser Produkte indirekt von inländischen Konsumenten genutzt wird. Davon wird die für inländische Exportprodukte aufgewandte Menge an Primärholz, die indirekt von Konsumenten im Ausland genutzt wird, abgezogen. Unterbleibt diese Subtraktion, so ergibt sich der Forstfußabdruck der inländischen Produktion.	[m ³ /Prozess], [m ³ /Produkt], [m ³ /Person]
Wasserfußabdruck	Hoekstra & Hung 2002, Hoekstra et al. 2011, DIN EN ISO 14046:2016-07	Der blaue Wasserfußabdruck bezieht sich auf die Menge des durch eine Person bzw. Personengruppe, ein Produkt oder einen Prozess konsumtiv genutzten Oberflächen- und/oder Grundwassers. Der grüne Wasserfußabdruck setzt sich aus den Mengen an Niederschlagswasser zusammen, die während der Anbauperiode (oder Lebensdauer) einer Feldfrucht durch Evapotranspiration der Pflanze sowie Evaporation des Bodens an die Atmosphäre abgegeben werden. Die Fußabdruck-Indikatoren von Produktion und Konsum werden analog der obigen Fußabdrücke berechnet.	[m ³ /Prozess], [m ³ /Produkt], [m ³ /Person]
Treibhausgasfußabdruck	Wiedmann & Minx 2008	Der Treibhausgasfußabdruck fasst über die Lebensdauer (in Jahresschritten) eines Produktes oder einer Dienstleistung die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen aller Prozesse, die mit dem Produkt oder der Dienstleistung in Zusammenhang stehen, zusammen. Die THG-Fußabdruck-Indikatoren von Produktion und Konsum werden analog der obigen Fußabdrücke berechnet. Sie ergänzen die Informationen zu den territorialen THG-Emissionen.	[kg CO ₂ -eq/Prozess], [kg CO ₂ -eq/Produkt], [kg CO ₂ -eq/Person]

7.2.2 Forstfußabdruck

Der Forstfußabdruck (*Forest Footprint [FFP]*) errechnet sich aus der Menge des jährlich in Deutschland geernteten Primärholzes plus der Menge an im Ausland für die Herstellung, Aufbereitung u. Ä. von Produkten aufgewandten Primärholzes, die über den Import dieser Produkte indirekt von Akteuren in Deutschland genutzt wird. Wird von diesem Fußabdruck der Produktion die für deutsche Exportprodukte aufgewandte Menge an Primärholz abgezogen, ergibt sich der FFP des inländischen Konsums.

Der FFP ist somit thematisch dem Materialfußabdruck zuzuordnen. Allerdings erfolgt seine Bewertung auf Basis einer anderen Bezugseinheit und eines spezifischen Bewertungsmaßstabes. Die Datengrundlage des FFP kann aus dem biotischen Anteil des Raw Material Input (RMI) entnommen werden.

Die Bewertung des FFP erfolgt durch den Vergleich mit der jährlichen Holzzuwachsrate pro Hektar (*Net Annual Increment [NAI]*) der Bezugsfläche im jeweiligen Bezugsraum (Land, EU, international) und dem Orientierungswert der nachhaltigen Nutzung forstlicher Ressourcen von O'Brien (2016). Näherungswerte des NAI auf Länderebene lassen sich beispielsweise der Dissertation von Meghan O'Brien entnehmen (O'Brien 2016). Die Einheit des NAI ist $[m^3 / (a \cdot ha)]$. Dies entspricht der Einheit Vorratsfestmeter (VFm). Die NAI wird als gängige Größe in Holzstatistiken, wie beispielsweise der Ergebnisdatenbank der Bundeswaldinventur, verwendet (BMEL 2014).

Die Bedeutung des bewerteten FFP zeigt sich unter anderem im Hinblick auf den stetigen Anstieg der Nutzung forstlicher Ressourcen. Die Menge an Holz, welche im Papier- und Kartonssektor verbraucht wird, ist in den letzten 50 Jahren stark angestiegen. Wenngleich der überwiegende Anteil dafür bereits über Altpapier-Recycling bereit gestellt wird, steigt weltweit der Einsatz von Primärholz (O'Brien 2016). Für den Zeitraum zwischen 2005 und 2030 wird ein Anstieg der globalen Holzproduktion von 44 % prognostiziert (FAO 2009). Buongiorno *et al.* (2012) weisen auf den starken Anstieg des Bedarfs an forstlicher Biomasse für die Endenergieerzeugung hin, wie sie beispielsweise in den IPCC-Szenarien zugrunde gelegt werden. Der bewertete FFP ermöglicht Antworten auf die Frage, ob der prognostizierte Holzbedarf unter Nachhaltigkeitsaspekten zu decken ist.

7.2.3 Wasserfußabdruck

Das Konzept des Wasserfußabdrucks (*Water Footprint [WFP]*) wurde von Hoekstra und Hung (2002) entwickelt und über die Jahre ergänzt. In dem 2011 herausgegebenen Gesamtwerk „The Water Footprint Assessment Manual“ werden drei Arten von Wasserfußabdrücken (Hoekstra *et al.* 2011) beschrieben:

Der blaue WFP bezieht sich auf die Menge des durch eine Person bzw. Personengruppe, ein Produkt oder einen Prozess genutzten Oberflächen- oder Grundwassers.

Der grüne WFP setzt sich aus den Mengen an Niederschlagswasser zusammen, die während der Anbauperiode (oder Lebensdauer) einer Feldfrucht durch Evapotranspiration der Pflanze sowie Evaporation des Bodens an die Atmosphäre abgegeben werden.

Der graue WFP wird in diesem ursprünglichen Konzept als das Verdünnungsvolumen beschrieben, welches nötig ist, um anthropogen bedingte stoffliche Einträge in Oberflächen- und Grundwasserkörper auf eine jeweils durch spezifische Grenzwerte definierte Konzentration zu verdünnen.

Inzwischen ist die Nutzung regionaler Wasserressourcen infolge von globalen Produktströmen räumlich nicht mehr an den jeweiligen Konsumenten gebunden und die Auswirkungen indirekter Wassernutzung müssen berücksichtigt werden. So ist eine Reihe von Konzepten zur Konkretisierung und Bewertung des Wasserfußabdrucks entstanden, die stetig weiterentwickelt werden.⁵⁷

Besonders hervorzuheben ist hier die DIN EN ISO 14046:2016-07 (Umweltmanagement – Wasser-Fußabdruck – Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien), die das Ziel verfolgt, bei der Ermittlung und Berichterstattung von Wasserfußabdrücken für internationale Konsistenz zu sorgen. Die Wasserfußabdrücke nach Hoekstra et al. (2011) werden in den neuen Konzepten jeweils als virtueller Wassergehalt eines Produktes bezeichnet und mit Hilfe verschiedener Indikatoren gewichtet. Der häufig verwendete „Wasser-Knappheits-Index“ (WSI) nach Pfister et al. (2009) ist hier beispielhaft zu nennen. Die direkte und insbesondere die indirekte Wassernutzung durch Produktexporte können damit vor dem Hintergrund des Wasserangebotes in einer Region bewertet und diskutiert werden.

70 % des weltweit entnommenen Süßwassers wird zur Bewässerung von Feldfrüchten genutzt (Ridoutt et al. 2010). Die fortschreitende Ausdehnung von Bewässerungsflächen trägt weltweit zur regionalen Verknappung von Wasserreserven bei (Hoekstra et al. 2012, Alcamo und Henrichs 2002).

Daher wird der Fokus der Wasserfußabdruck-Erhebung innerhalb der beiden Projekte jeweils auf die Wasserentnahme für die Bewässerung von Feldfrüchten gerichtet, repräsentiert durch den blauen WFP.

Der grüne WFP einer unbewässerten Fläche ergibt sich aus der Niederschlagsmenge abzüglich des Oberflächenabflusses und abzüglich der Drainage durch die Wurzelzone (Grundwasserabfluss). Er kann als Evapotranspiration einer Pflanze berechnet werden. Bei der Bewertung der Auswirkungen von Wassernutzungen auf regionale Wasserreserven hat der grüne WFP von unbewässerten Flächen keine Aussagekraft, da er keine anthropogene Wasserentnahme repräsentiert und die ausschließliche Nutzung von grünem Wasser im Pflanzenbau somit auch keinen Beitrag zur Wasserknappheit leistet.

Für eine bewässerte Fläche kann der Anteil des (blauen) Bewässerungswassers und des (grünen) Niederschlagswassers an der Evapotranspiration nur unter Zuhilfenahme spezieller Modelle aufgeschlüsselt werden, deren Berechnungen aber aufgrund notwendiger Vereinfachungen und Unsicherheiten fehleranfällig sind und daher in der Kritik stehen (Perry 2014). Eine Aufschlüsselung ist für die korrekte Erstellung des grünen WFPs unbedingt

⁵⁷ Im Projekt WANDEL (Wasserressourcen als bedeutende Faktoren der Energiewende auf lokaler und globaler Ebene), dass der Frage nachgeht, inwieweit die Wasserverfügbarkeit entlang von Energiebereitstellungsketten die Energiewende beschleunigen oder verlangsamen kann, werden am CESR Wasserfußabdrücke für Energiesysteme entwickelt.

notwendig, denn da das hier vorgeschlagene Konzept vorsieht, die gesamte Entnahme von blauem Wasser für Bewässerung über den blauen WFP abzubilden, ist jeder Verlust von blauem Wasser in der Folge der Entnahme (z. B. auch durch Verdunstung) bereits berücksichtigt.

Auch in der Frage nach der Änderung der Wasserqualität durch anthropogene Nutzung sind grüne WFPs unbedeutend, da grünes Wasser durch Destillation von seiner Stofffracht gereinigt ist. Grüne WFPs spielen eher bei der Bewertung von Landnutzungsänderungen und ihrem Effekt auf den Oberflächen- und Grundwasserabfluss eine Rolle: Da die meisten landwirtschaftlichen Systeme weniger Niederschlag durch Evapotranspiration an die Atmosphäre zurückgeben als die natürlichen Systeme, die sie ersetzen, ist der globale Abfluss in Flusssystemen um etwa 7 % gestiegen (Ridoutt und Pfister 2010).

Für den grauen WFP existiert bisher kein zufriedenstellendes Konzept, das den Anforderungen gerecht wird. Er wird daher im Rahmen dieses Projektes nicht oder nur am Rande für ausgewählte Substanzen (z. B. Nitrat) erhoben werden.

7.2.4 Materialfußabdruck

Der Materialfußabdruck (*Material Footprint [MFP]*) eines Produkts kann durch den kumulierten Rohstoffaufwand nach VDI 4800 Blatt 2 bestimmt werden. Er umfasst die lebenszyklusweit für die Produktion, den Gebrauch, das Recycling und die Entsorgung verbundene Aufwendungen von biotischen und abiotischen Rohstoffen. Der kumulierte Rohstoffaufwand ist methodisch identisch mit dem Raw Material Input (*RMI*), der auf nationaler und EU-Ebene eingeführt ist (European Communities 2001, OECD 2008, Umweltbundesamt 2016).

Der MFP der inländischen Produktion (*Raw Material Input [RMI]*) errechnet sich aus der gesamten inländischen Extraktion von Rohstoffen und der Menge an im Ausland für die Herstellung, Aufbereitung u. Ä. von Produkten aufgewandten Rohstoffen, die über den Import dieser Produkte indirekt von inländischen Produzenten genutzt wird. Wird von dem RMI die für Exportprodukte aufgewandte Menge an Rohstoffen abgezogen, erhält man den MFP des inländischen Konsums.

RMI und RMC enthalten jeweils abiotische und biotische Rohstoffe, die getrennt ausgewiesen werden können. Zu den abiotischen Rohstoffen zählen Erze, fossile Brennstoffe und Minerale, während die Kategorie biotische Rohstoffe agrarische, forstliche und aquatische Rohstoffe umfasst. In der Kategorie RMI_{biotisch} werden sowohl Nahrungsmittel als auch stofflich und energetisch verwendete Biomasse mit einbezogen.

Mit der Annahme, dass die durch Wirtschaft und Gesellschaft induzierten Materialflüsse und damit auch ihre Auswirkungen auf die Umwelt weltweit in den kommenden Jahrzehnten stark ansteigen werden, ist die Aussage des Materialfußabdrucks im Sinne einer globalen Nachhaltigkeitssteigerung von hohem Wert. Die Datenverfügbarkeit ist in ausreichendem Maß auch auf internationaler Ebene gegeben. Die Datenbasis zur Erhebung des Materialfußabdrucks sind internationale Input-Output Tabellen, wie unter anderem enthalten in der IRP-Datenbank, die auf www.uneplive.com veröffentlicht werden wird. Internationale

Vergleiche von Materialfußabdrücken werden unter anderem vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) bereitgestellt (UNEP 2015, UNEP 2016).

Allerdings bleibt bei der Errechnung dieser Rohstoffindikatoren der ungenutzte Anteil der Extraktion unberücksichtigt. Um diesen mit einzubeziehen, eignen sich die analogen Indikatoren „gesamter Primärmaterialaufwand“ (*Total Material Requirement [TMR]*) und „gesamter Primärmaterialverbrauch“ (*Total Material Consumption [TMC]*). Hier besteht aber das Problem, dass auf globaler Ebene die Datengrundlage noch lückenhaft ist bzw. einer Aktualisierung bedarf.

7.2.1 Treibhausgasfußabdruck

Der Treibhausgasfußabdruck (*Greenhouse Gas Footprint [GFP]*) kumuliert über die gesamte Lebensdauer (in Jahresschritten) eines Produktes oder einer Dienstleistung die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen aller Prozesse, die mit dem Produkt oder der Dienstleistung in Zusammenhang stehen. Die „indirekten Treibhausgasemissionen“ beziehen sich auf den Anteil an Emissionen, der über den Import/Export von Produkten aus der Region der Herstellung, Aufbereitung o. Ä. der Region des Konsums zugeordnet werden muss. Der THG-Fußabdruck von inländischer Produktion und inländischen Konsum wird analog der oben genannten Fußabdrücke berechnet.

Der Treibhausgasfußabdruck ist als Umweltwirkungsindikator im LCIA etabliert und Bestandteil vieler Studien (Hertwich & Peters 2009, Steen-Olsen *et al.* 2012, Giljum *et al.* 2011, Tukker *et al.* 2014, Wiedmann & Minx 2008).

Der GFP berücksichtigt die sechs Gase, die aufgrund ihrer klimaschädigenden Wirkung im Kyoto-Protokoll genannt werden: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, und SF₆ (Matthews *et al.* 2008). Im späteren Verlauf wurde NF₃ noch zur Liste hinzugefügt (United Nations FCCC 2014).

8 Ressourcenfußabdrücke als Indikatoren der integrativen Leitziele

8.1 Übersichtscharakter der Ressourcenfußabdrücke

In zwei Jahrzehnten Life Cycle Impact Assessment (LCIA) und der Forschung an Umweltwirkungskategorien wie zum Beispiel dem Treibhauseffekt wurde eine Reihe von methodischen Ansätzen entwickelt, um weitere spezifische Umweltwirkungen von Produkten systemweit abzubilden (Eutrophierungs-, Ozonabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungspotenzial, ökotoxisches Potenzial etc.).

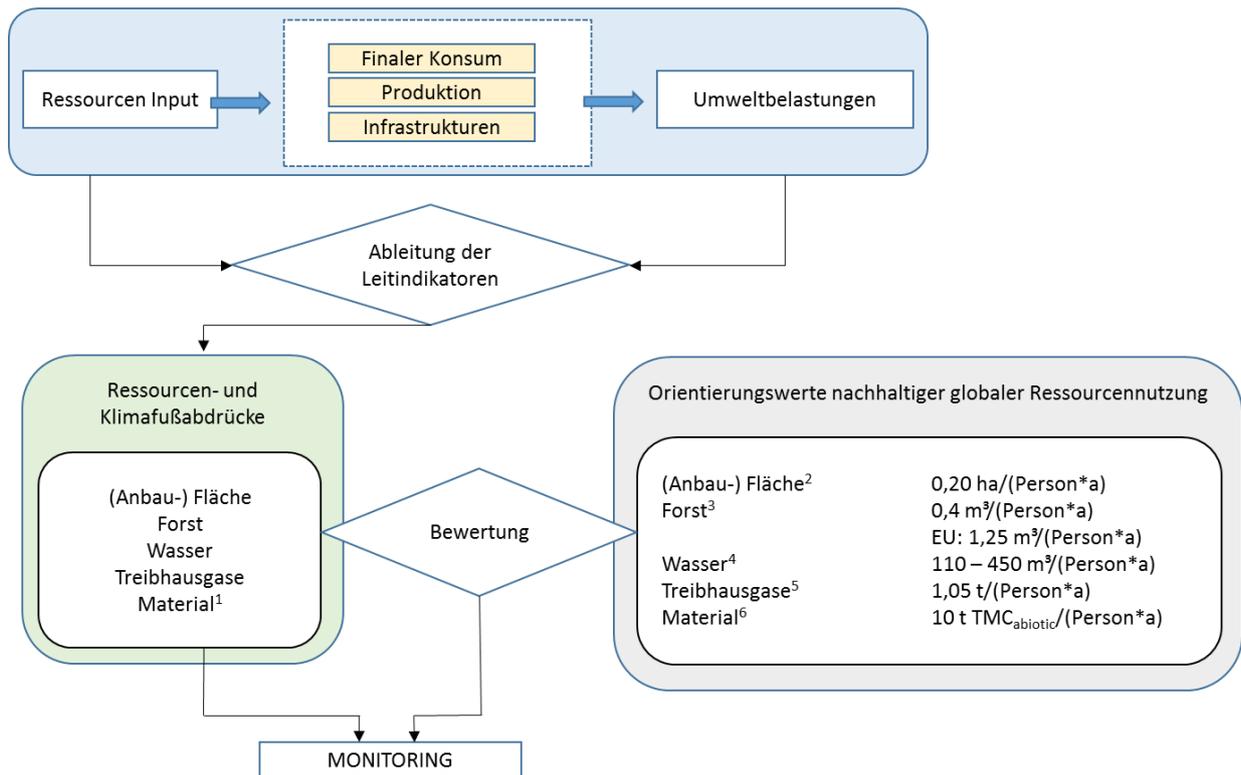
Steinmann et al. (2016) fanden heraus, dass die vier Ressourcenfußabdrücke Material, Wasser, fossile Energie und Land zusammengenommen über 80 % der Varianz aller untersuchten spezifischen Umweltwirkungen in Produktökobilanzen abbilden.

Daraus lässt sich die Hypothese ableiten, dass für viele Untersuchungen und zu Erzeugung eines Gesamtbildes „die Fülle an Umweltindikatoren auf ein kleines Schlüsselset reduziert werden kann, welches den Hauptanteil der Veränderung von Umwelteinflüssen zwischen Produktlebenszyklen repräsentiert“ (Steinmann et al. 2016).

Dieses Ergebnis wird hier aufgegriffen. In Abbildung 4 wird der direkte Bezug der Ressourcenfußabdrücke als Indikatoren der integrativen Leitziele der Bioökonomie verdeutlicht. Im Vergleich zu Steinmann et al. (2016) wird jedoch anstelle des Indikators fossiler Primärenergieaufwand der Indikator THG-Fußabdruck verwendet, um auch Treibhausgase wie Methan und Distickstoffoxid zu berücksichtigen, die u. a. in landwirtschaftlichen Prozessen eine wichtige Rolle spielen.

Diese vier Fußabdrücke werden in ihrer Größenordnung vom Umfang des stofflichen Durchsatzes des deutschen Produktions- und Konsumsystems bestimmt, und mit ihnen steigt oder fällt das Ausmaß der Wirkungsbündel, die mit der Ressourcenentnahme, Produktnutzung und -entsorgung verbunden sind (siehe Abschnitt 3).

Will man die Nachhaltigkeit der nationalen (Bio-)Ökonomie bewerten, so benötigt man hierfür hinreichend valide und richtungssichere Orientierungswerte.



*eigene Darstellung

Abbildung 4: Ressourcenfußabdrücke als Leitindikatoren der integrativen Leitziele der Bioökonomie

¹ Der Materialfußabdruck fokussiert auf abiotische Materialien. Dieser Materialfußabdruck (TMC_{abiotic}) ist für die Betrachtung der Bioökonomie nur relevant, wenn Problemverlagerungen in mineralisch basierte Rohstoffbereiche zu erwarten sind.

² Bringezu *et al.* (2012b)

³ O'Brien (2016)

⁴ O'Brien *et al.* (2017) basierend auf A. Y. Hoekstra & Wiedmann (2014)

⁵ Roelich *et al.* (2011)

⁶ Bringezu (2011)

8.2 Bewertung der Ressourcenfußabdrücke im Hinblick auf Nachhaltigkeitskriterien

Die Ressourcenfußabdrücke eignen sich als Übersichts- bzw. Leitindikatoren, da sie direkt bei den integrativen Leitziele ansetzen. Allerdings ermöglicht die Erhebung eines quantitativen Ressourcenfußabdrucks noch keine Aussagen über eine Veränderung der Nachhaltigkeit. Hierfür ist es notwendig, den jeweiligen Fußabdruck in Relation zu Orientierungswerten in einem sinnvollen Bezugssystem (global, regional, lokal) zu setzen. Tabelle 6 gibt hierfür Beispiele.

Diese Orientierungswerte berücksichtigen zum einen Schutzgüter wie die weltweite Biodiversität und zum anderen berücksichtigen sie das Kriterium der internationalen Fairness

(„equity“), in dem jeder Person grundsätzlich das gleiche Recht der Ressourcennutzung zugesprochen wird (was durch Pro-Person-Werte ausgedrückt wird).

Beispielsweise haben Bringezu et al. (2012) vorgeschlagen, als Orientierung für die unter Nachhaltigkeitskriterien verfügbare Anbaufläche im Jahr 2030 einen Wert von 0,20 Hektar pro Person heranzuziehen. Für diese Berechnung wurde angenommen, dass die Business-As-Usual-Entwicklung seiner Ausdehnung nach 2020 gestoppt würde. Der resultierende Wert von 1,66 Mrd. ha Anbaufläche wurde auf eine Weltbevölkerung im Jahr 2030 bezogen. In die Nachhaltigkeitsbewertung fließt insbesondere die Problematik ein, dass die weltweite Ausdehnung von Agrarflächen ein Haupttreiber für Biodiversitätsverluste ist (Millennium Ecosystem Assessment 2005, Chaudhary et al. 2016, Wilting et al. 2017). Die Biodiversitätskonvention (CBD) hat bereits den Status eines völkerrechtlichen Vertrags. Will man ihr Ziel, den Verlust globaler Biodiversität zu stoppen, umsetzen, so erfordert dies insbesondere einen Stopp der Nettoausdehnung von Agrarflächen, insbesondere der intensiv genutzten Acker- bzw. Anbaufläche.

Im Jahr 2007 hat jeder EU-Bürger im Durchschnitt 0,31 ha globaler Anbaufläche durch den Konsum von agrarischen Produkten in Anspruch genommen (Bringezu et al. 2012). Folglich müsste eine Reduktion bzw. Anpassung des Konsums agrarischer Güter erfolgen, die eine Verminderung der benötigten Anbaufläche von etwa 35 % zur Folge hätte, um diesen Orientierungswert erreichen zu können (z.B. durch verminderten Verbrauch tierischer Produkte, da Futtermittelproduktion erheblich zum Anbauflächenfußabdruck beitragen).

Inwieweit globale Durchschnittswerte für die Nutzung von Wasser sinnvoll sind, ist diskutabel, da die Verfügbarkeit und damit die Knappheit von Wasser regional sehr unterschiedlich verteilt ist. Die aktuelle durchschnittliche Nutzung von blauem Wasser liegt weltweit unter dem in der Tabelle genannten Wert, woraus man folgern könnte, dass auf globaler Ebene noch kein ernstes Problem bestünde. Auf der Ebene der Einzugsgebiete gibt es allerdings sehr wohl Regionen, in denen blaues Wasser so stark übernutzt wird, dass die Belastungsgrenzen des regionalen Systems erreicht sind und daraus Risiken für Mensch und Umwelt erwachsen (vgl. WSI nach Pfister et al. 2009). Um regionale Wasserknappheit ebenfalls erfassen zu können, haben Steffen et al. (2015) ihr Konzept erweitert und auf Ebene der Einzugsgebiete eine zweite Kontrollvariable als prozentualen Anteil der Entnahme von blauem Wasser an der mittleren monatlich in Flüssen geführten Wassermenge definiert. Ihr Grenzwert liegt je nach Größe des Flusses zwischen 25 % und 85 %.

Diese Überlegungen und beispielhaften Darstellungen sollen helfen, die Referenzbasis für die Analyse, Modellierung und Bewertung der Bioökonomie hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu verbessern. Es ist absehbar, dass weder die Ziele, noch die Indikatorensysteme und ihre Bewertungskriterien und -maßstäbe jemals einen abgeschlossenen Status erreicht haben werden, da sich diese mit der Entwicklung der Problem- und Perspektivlage ändern. Hierzu trägt auch der wachsende Erkenntnisstand bei.

Tabelle 6: Orientierungswerte der nachhaltigen jährlichen Ressourcennutzung (abgeändert und ergänzt aus O'Brien et al. 2014)

	Materialien	Land	Kohlenstoff	Wasser	Primärholz
Zielorientierung	10 t TMC _{abiotic} /Person ^{58a}	0,20 ha Ackerland/Person ^b	1,05 t/Person ^c	110-450 m ³ Wasserverbrauch/Person	0,4 m ³ [EU: 1,25 m ³] Primärholznutzung/Person
Auswirkungen auf die EU-Bürger bis 2050	Ca. 70 % Verminderung verglichen mit 2008	Ca. 45 % Verminderung verglichen mit 2007 ^d	Ca. 90 % Verminderung verglichen mit 2010	Ca. 30-50 % Verminderung verglichen mit 2004 ^e	Ca. 26% Verminderung verglichen mit 2010
Quelle	Bringezu (2011)	UNEP (2014), Bringezu et al. (2012)	Roelich et al. (2011), Lenzen et al. (2012)	Roelich et al. (2011), Hoekstra und Wiedmann (2014), O'Brien et al. (2017)	O'Brien (2016)
Hintergrund	Rückkehr zum Stand der globalen Mineralextraktion von 2000 (ohne Erosion einzubeziehen)	Biodiversitätsverluste verhindern, Landnutzungs-änderung im Rahmen des „Safe Operating Space“ halten	Die globale Erwärmung darf maximal 2°C erreichen (67 % Wahrscheinlichkeit)	Szenarien basierend auf Effizienz-steigerungen und Extraktions-standort Reduzierung innerhalb der vier „Our Planet“ Szenarien	Primärholznutzung im Rahmen des „Safe Operating Space“ halten
Berechnung	Globale Gesamtmineral-extraktion aus dem Jahr 2000 geteilt durch die prognostizierte Weltbevölkerung aus 2050	Maximale Ackerfläche von 1.6 Mio. ha geteilt durch die prognostizierte Weltbevölkerung in 2030	Global kumulierte Obergrenze von 750 Gt CO ₂ (WBGU 2009); Budget von 9,6 Gt CO ₂ in 2050 geteilt durch die prognostizierte Weltbevölkerung in 2050	Grenzwert der globalen Nutzung blauen Wassers aus Hoekstra und Wiedmann (2014) geteilt durch die prognostizierte Weltbevölkerung in 2050	Grenzwert der globalen Nutzung von Primärholz in 2050 geteilt durch die prognostizierte Weltbevölkerung in 2050
Forschungsbedarf	Kopplung der globalen Ressourcenextraktion mit der sozialen Akzeptanz der Folgen (z.B. im Hinblick auf	Zielsetzungen für Wälder und Weiden entwickeln, Potenziale der Rückgewinnung von	Zielsetzung über den CO ₂ Anteil des Kohlenstoff-Fußabdrucks ausdehnen	Quantifizierung einer globalen Zielsetzung oder die Möglichkeiten regionaler Zielsetzungen in Verbindung	Datenlage verbessern (insbesondere zur nachhaltigen Entnahme von forstlichen Reststoffen),

⁵⁸ 5 t RMC_{abiotic}/Person (Bringezu und Schütz 2014)

	Kritikalität und Umweltverschmutzung)	degradierten Flächen besser verstehen		mit dem „Safe Operating Space“ untersuchen	robustere Szenarien entwickeln
--	---------------------------------------	---------------------------------------	--	--	--------------------------------

^a Die originale Fußnote hat für die Bioökonomie in dieser Form keine Relevanz und wir deshalb nicht abgebildet.

^b Zielsetzung bezieht sich auf das Basisjahr 2030, eine weiterer Anstieg der Weltbevölkerung und die Ausdehnung von Bauland würden die Zielsetzung weiter reduzieren, wobei Flächenrestaurierung (von z. B. aufgegebenen Flächen) einige dieser Effekte abschwächen könnte. Der Zeitrahmen bis 2050 ist zu weit um solche Trends abschätzen zu können, deswegen sind die 0,20 ha pro Person ein klares, einfach zu kommunizierendes und richtungssicheres Ziel.

^c Die Studie stellt einen CO₂-Fußabdruck Richtwert dar und keine endgültige Zielsetzung.

^d Der Bereich stellt potenzielle Fußabdruckersparnisse der Gesellschaft für verschiedene Umstellungswege in der EU dar, aber spiegelt keinen Nachhaltigkeitsrichtwert, basierend auf dem was als nachhaltiges Level der Ressourcennutzung (in anderen Worten, einem Grenzwert „definiert“ durch natürliche Bedingungen) angesehen werden könnte, wider.

^e Zu beachten ist, dass hier die Größenordnung der Reduktion bis 2050 dargestellt wird, um konsistent mit dem Zeitrahmen der anderen Zielsetzungen zu sein. Daher wird ein fortschreitendes Bevölkerungswachstum bis 2050 und eine reduzierte Flächenverfügbarkeit von Anbaufläche pro Kopf (z.B. ca. 0,17 ha) angenommen und was einzig indikativen Zwecken dient (siehe Fußnote d).

^f Die von den Autoren für die Berechnung genutzten Daten stammen aus der EORA MRIO Datenbank⁵⁹.

⁵⁹ <http://www.worldmrio.com/>

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Das hier dargestellte Indikatorensystem zur Bewertung der Nachhaltigkeit der deutschen Bioökonomie umreißt die für eine ganzheitliche Betrachtung notwendigen Leitziele und ordnet ihnen Kriterien und Indikatoren zu. Obwohl alle drei Säulen - Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft - gleichermaßen für die Nachhaltigkeitsbeurteilung relevant sind, wird in diesem Arbeitspapier der Fokus auf die integrativen Indikatoren gesetzt, bei denen noch Entwicklungsbedarf besteht. Die hohe Relevanz dieser Aspekte wurde auch in der Stakeholderanalyse hervorgehoben. Die Größenordnung des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen und der THG Emissionen bestimmt das Bündel an Umweltwirkungen durch menschliche Aktivitäten im In- und Ausland. Die Fußabdruck-Indikatoren (Anbaufläche, Forst, Wasser, Material, THG Emissionen) sollen die Ressourcen- und Klimabelastung des deutschen Produktions- und Konsumsystems quantifizieren und den Anteil der Bioökonomie daran ausweisen.

Agrarische Biomasse wird in steigendem Maße stofflich und energetisch genutzt. Die damit verbundene Flächenkonkurrenz zur Erzeugung von Lebensmitteln hat eine wissenschaftliche und gesellschaftliche Diskussion über Ernährungssicherung, Preisentwicklung und ökologische Effekte wie Landnutzungsänderungen ausgelöst. Im Projekt BEPASO wird durch das MAGNET Modell (Banse et al. 2016) in Kombination mit dem BENSIM Modell (Millinger *et al.* 2017) sowohl die energetische als auch stoffliche Nutzung agrarischer Biomasse dargestellt werden.

Ein wichtiges Kriterium, das es zur Verbesserung der Nachhaltigkeit innerhalb der Bioökonomie zu erfassen gilt, ist die Landnutzungsänderung, die mit dem steigenden Biomassebedarf einhergeht. In diesem Projekt wird die räumliche Analyse globaler Landnutzungsänderungen und deren Umweltwirkungen durch das Modell LandSHIFT dargestellt.

Die prognostizierte, stark ansteigende Nutzung forstlicher Biomasse für stoffliche und energetische Verwertung bis Mitte des Jahrhunderts infolge steigender Nachfrage (Buongiorno *et al.* 2012) steht im Konflikt mit der Erhaltung von Ökosystemleistungen von Wäldern und dies nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Der Anstieg von Rohholzimporten nach Deutschland in den letzten Jahren wird zum Beispiel von Weimar (2016) belegt. Dass die gesteigerte Inlandsnachfrage an forstlicher Biomasse auf den wachsenden Bedarf des Energiesektors zurückgeht, wie innerhalb der Szenarien von Buongiorno et al. (2012) beschrieben, ist aktuell nicht ersichtlich und muss deshalb im Rahmen des Projektes überprüft werden. Darunter auch die Folgen von energie- und klimapolitischen Zielvorstellungen. Fragestellungen hinsichtlich der Nutzung forstlicher Ressourcen werden im Projekt BEPASO durch das Global Forest Product Modell (GFPM) beantwortet.

Die Modellkopplung von MAGNET, GFPM, LandSHIFT und BENSIM innerhalb des Projektes BEPASO liefert die notwendige Datenbasis, um den konsuminduzierten Agrar- und Forstfußabdruck Deutschlands errechnen zu können. Die Modellierung auf Basis der in den Szenarien festgelegten Parameter ermöglicht es, diese im Projektverlauf sowohl für den Status Quo (2015), als auch die Jahre 2030 und 2050, zu errechnen.

Im Partnerprojekt SYMOBIO wird die Bioökonomie in Deutschland anhand von Indikatoren hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit auf nationaler und internationaler Ebene erfasst, modelliert und bewertet. Die Ressourcenfußabdrücke (Anbaufläche, Forst, Wasser und THG) und die sozioökonomischen Indikatoren werden ermittelt, indem verschiedene Datensätze und Modelle eingesetzt und gekoppelt werden. Den Kern des Modellsystems bildet ein Materialflussmodell, das die biobasierte Produktion in Deutschland, den Import und Export und die damit verbundenen Materialflüsse in vor- und nachgelagerten Bereichen abbildet. In Verbindung mit den ökonomischen Modellen GINFORS und Panta Rhei sowie um Umweltdaten erweiterte Input-Output-Tabellen werden die sozioökonomischen Indikatoren ermittelt. Globale Landnutzungsänderungen und damit verbundene Treibhausgasemissionen sowie Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität werden durch Kopplung mit den Modellen LandSHIFT und WaterGAP analysiert.

In beiden Forschungsprojekten nehmen die Ressourcenfußabdrücke als Leitindikatoren eine zentrale Stellung im zu entwickelnden Indikatorensystem zur Bewertung der Nachhaltigkeit der deutschen Bioökonomie ein.

10 Literaturverzeichnis:

Adler, P., Budzinski, M., Erdmann, G., Majer, S., Meisel, K., Schock, S. & Thrän, D. (2015). *Sachstandsbericht über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie: Nachhaltigkeit und Ressourcenbasis der Bioökonomie*. Leipzig, Verfügbar unter:

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/P3310038_Sachstandsbericht_Nachhaltigkeit_und_Ressourcenbasis.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

ALCAMO, J. & HENRICH, T. (2002). Critical regions: A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquatic Sciences*, 64, 4, 352–362pp., doi:

<https://doi.org/10.1007/PL00012591>.

Allwood, J. M., Bosetti, V., Dubash, N. K., Gómez-Echeverri, L. & von Stechow, C. (2014). *Glossary. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Verfügbar unter: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-i.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

AXELSSON, R., ANGELSTAM, P., DEGERMAN, E., TEITELBAUM, S., ANDERSSON, K., ELBAKIDZE, M. & DROTZ, M.K. (2013). Social and cultural sustainability: Criteria, indicators, verifier variables for measurement and maps for visualization to support planning. *Ambio*, 42, 2, 215–228pp., doi: 10.1007/s13280-012-0376-0.

DE BAAN, L., ALKEMADE, R. & KOELLNER, T. (2013). Land use impacts on biodiversity in LCA: A global approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 6, 1216–1230pp., doi: 10.1007/s11367-012-0412-0.

Banse, M., Janzen, N., Junker, F., Kreins, P., Offermann, F., Salamon, P. & Weimar, H. (2016). *Modelling the Bioeconomy: Linkages between Agricultural, Wood and Energy Markets*. Braunschweig; Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Verfügbar unter: http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn056932.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

Bioökonomierat (2013). *Eckpunktepapier des Bioökonomierates: Auf dem Weg zur biobasierten Wirtschaft, (Politische und wissenschaftliche Schwerpunkte 2013-2016)*.

Verfügbar unter:

http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/BOER_Eckpunktepapier_2013.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

BIRD, D.N., ZANCHI, G. & PENA, N. (2013). A method for estimating the indirect land use change from bioenergy activities based on the supply and demand of agricultural-based energy. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Ltd, 59, 3–15pp., doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.006.

BRINGEZU, S. (2011). Key Elements for Economy-wide Sustainable Resource Management. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 1, 61, 78–87pp., doi: 10.3917/re.061.0078.

BRINGEZU, S., O'BRIEN, M. & SCHÜTZ, H. (2012a). Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. A conceptual and empirical contribution to sustainable management of global resources. *Land Use Policy*, 29, 1, 224–232pp., doi: 10.1016/j.landusepol.2011.06.010.

- BRINGEZU, S., O'BRIEN, M. & SCHÜTZ, H. (2012b). Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. A conceptual and empirical contribution to sustainable management of global resources. *Land Use Policy*, Elsevier Ltd, 29, 1, 224–232pp., doi: 10.1016/j.landusepol.2011.06.010.
- BRINGEZU, S., POTOČNIK, J., SCHANDL, H., LU, Y., RAMASWAMI, A., SWILLING, M. & SUH, S. (2016). Multi-scale governance of sustainable natural resource use-Challenges and opportunities for monitoring and institutional development at the national and global level. *Sustainability (Switzerland)*, 8, 8, 778pp., doi: 10.3390/su8080778.
- Bringezu, S., & Schütz, H. (2014). *Indikatoren und Ziele zur Steigerung der Ressourcenproduktivität*. Wuppertal, Verfügbar unter: http://edocs.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCSS_derivate_000000003399/PoIRessxAP1_IndikatorenxundxZielezurSteigerungxderxRessourcenproduktivitxt_WI.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- BRINGEZU, S., SCHÜTZ, H. & MOLL, S. (2003). Rationale for and Interpretation of Economy-Wide Materials Flow Analysis and Derived Indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 7, 2, 43–64pp., doi: 10.1162/108819803322564343.
- Bruckner, M., Giljum, S., Fischer, G., Tramberend, S., van Velthuisen, H., Wunder, S., Kaphengst, T. & McFarland, K. (2017). *Extending land footprints towards characterizing sustainability of land use*. Dessau-Roßlau, Germany, Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/extending-land-footprints-towards-characterizing> [Zugriff Jan./10/2018].
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2010). *Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 - Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft*. Berlin, Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/pub/Nationale_Forschungsstrategie_Biooekonomie_2030.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), & Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2014). *Bioökonomie in Deutschland. Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft*. Berlin, Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/pub/Biooekonomie_in_Deutschland.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2014). *Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*. Berlin, Verfügbar unter: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff Jan./10/2018].
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2016). *Fortschrittsbericht zur Nationalen Politikstrategie Bioökonomie*. Berlin, Verfügbar unter: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/fortschrittsbericht-biooekonomie.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff Jan./10/2018].
- Buongiorno, J., Zhu, S., Raunika, R. & Prestemon, J. (2012). *Outlook to 2060 for World Forests and Forest Industries: A Technical Document Supporting the Forest Service 2010 RPA Assessment*. Asheville, NC, Verfügbar unter: https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/gtr/gtr_srs151.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

CHAUDHARY, A., PFISTER, S. & HELLWEG, S. (2016). Spatially Explicit Analysis of Biodiversity Loss Due to Global Agriculture, Pasture and Forest Land Use from a Producer and Consumer Perspective. *Environmental Science & Technology*, 50, 7, 3928–3936pp., doi: 10.1021/acs.est.5b06153.

COWIE, A.L., ORR, B.J., CASTILLO SANCHEZ, V.M., CHASEK, P., CROSSMAN, N.D., ERLEWEIN, A., LOUWAGIE, G., MARON, M., METTERNICHT, G.I., MINELLI, S., TENGBERG, A.E., WALTER, S. & WELTON, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*, 79, August 2017, 25–35pp., doi: 10.1016/j.envsci.2017.10.011.

ČUČEK, L., KLEMÉS, J. & KRAVANJA, Z. (2012). A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 34, 9–20pp., doi: 10.1016/j.jclepro.2012.02.036.

Delzeit, R., Klepper, G. & Söder, M. (2015). *Sachstandsbericht über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie: Wirtschaftliche Kennzahlen*. Kiel, Verfügbar unter: <https://www.ifw-kiel.de/forschung/umwelt/landnutzung/aktuelle-projekte/2015-12-04.6824252015/download> [Zugriff Jan./10/2018].

DIN EN ISO 14046:2016-07, Umweltmanagement - Wasser-Fußabdruck - Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14046:2014) (no date). Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14046/249457985>.

Doran, D. G. (1981). *There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives*. *Management Review*, Verfügbar unter: <http://community.mis.temple.edu/mis0855002fall2015/files/2015/10/S.M.A.R.T-Way-Management-Review.pdf> [Zugriff Jan./10/2018].

EEA (2013). *EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective*. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, Verfügbar unter: http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_12 [Zugriff Jan./10/2018].

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (1998). *Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung.* Bonn.

ERB, K.H., KRAUSMANN, F., LUCHT, W. & HABERL, H. (2009). Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption. *Ecological Economics*, 69, 2, 328–334pp., doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.06.025.

European Commission (2017). *EU SDG Indicator Set*. Verfügbar unter: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/276524/7736915/EU-SDG-indicator-set-with-cover-note-170531.pdf> [Zugriff Jan./10/2018].

European Communities (2001). *Economy-wide material flow accounts and derived indicators*. Luxembourg, Belgium: European Communities, Verfügbar unter: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6191533/3-Economy-wide-material-flow-accounts...-A-methodological-guide-2001-edition.pdf> [Zugriff Jan./10/2018].

- FAO (2009). *State of the world's forests 2009*. SciencesNew York, Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Verfügbar unter: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0350e/i0350e.pdf> [Zugriff Jan./10/2018].
- Fischer, G., Tramberend, S., Bruckner, M. & Lieber, M. (2017). *Quantifying the land footprint of Germany and the EU using a hybrid accounting model*. Dessau-Roßlau, Germany, Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/quantifying-the-land-footprint-of-germany-the-eu> [Zugriff Jan./10/2018].
- Forest Europe, UNECE & FAO (2011). *State of Europe's Forests 2011, Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. For. Oslo: FOREST EUROPE Liaison Unit Oslo, Verfügbar unter: http://www.foresteurope.org/documentos/State_of_Europes_Forests_2011_Report_Revised_November_2011.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- GALLI, A., WIEDMANN, T., ERCIN, E., KNOBLAUCH, D., EWING, B. & GILJUM, S. (2012). Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a "footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, Elsevier Ltd, 16, 100–112pp., doi: 10.1016/j.ecolind.2011.06.017.
- GILJUM, S., BRUCKNER, M. & MARTINEZ, A. (2015). Material footprint assessment in a global input-output framework. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 5, 792–804pp., doi: 10.1111/jiec.12214.
- GILJUM, S., BURGER, E., HINTERBERGER, F., LUTTER, S. & BRUCKNER, M. (2011). A comprehensive set of resource use indicators from the micro to the macro level. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier B.V., 55, 3, 300–308pp., doi: 10.1016/j.resconrec.2010.09.009.
- 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*. Vienna, Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/FootRev_Report.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- HABERL, H., ERB, K.-H., KRAUSMANN, F., BEREZ, S., LUDWICZEK, N., MARTÍNEZ-ALIER, J., MUSEL, A. & SCHAFFARTZIK, A. (2009). Using embodied HANPP to analyze teleconnections in the global land system: Conceptual considerations. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 109, 2, 119–130pp., doi: 10.1080/00167223.2009.10649602.
- HERTWICH, E.G. & PETERS, G.P. (2009). Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis. *Environmental Science & Technology*, 43, 16, 6414–6420pp., doi: 10.1021/es803496a.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. Febrero 2011.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of water research report series*, 11, 120.
- Hoekstra, A. Y., & Wiedmann, T. O. (2014). Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*, 344, 6188, 1114–1117.

HOEKSTRA, A.Y., MEKONNEN, M.M., CHAPAGAIN, A.K., MATHEWS, R.E. & RICHTER, B.D. (2012). Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE*, 7, 2, e32688pp., doi: 10.1371/journal.pone.0032688.

HOEKSTRA, A.Y. & WIEDMANN, T.O. (2014). Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science*, 344, 6188, 1114–1117pp., doi: 10.1126/science.1248365.

LAPOLA, D.M., SCHALDACH, R., ALCAMO, J., BONDEAU, A., KOCH, J., KOELKING, C. & PRIESS, J.A. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 8, 3388–3393pp., doi: 10.1073/pnas.0907318107.

LENZEN, M., KANEMOTO, K., MORAN, D. & GESCHKE, A. (2012). Mapping the structure of the world economy. *Environmental Science & Technology*, 46, 15, 8374–8381pp., doi: 10.1021/es300171x.

Littig, B., & Griessler, E. (2005). *Social sustainability : a catchword between political pragmatism and social theory Social Sustainability . A Catchword between Political Pragmatism and Social Theory. International Journal for Sustainable Development*, Verfügbar unter: http://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/549/ssoar-ijsd-2005-12-griessler_et_al-social_sustainability_a_catchword_between.pdf?sequence=1 [Zugriff Jan./10/2018].

MATTHEWS, H.S., HENDRICKSON, C.T. & WEBER, C.L. (2008). The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environmental Science & Technology*, 42, 16, 5839–5842pp., doi: 10.1021/es703112w.

MEYFROIDT, P., LAMBIN, E.F., ERB, K.H. & HERTEL, T.W. (2013). Globalization of land use: Distant drivers of land change and geographic displacement of land use. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Elsevier B.V., 5, 5, 438–444pp., doi: 10.1016/j.cosust.2013.04.003.

Millenium Ecosystem Assessment (2005). *Millenium Ecosystem Assessment - Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.

MILLINGER, M., PONITKA, J., ARENDT, O. & THRÄN, D. (2017). Competitiveness of advanced and conventional biofuels: Results from least-cost modelling of biofuel competition in Germany. *Energy Policy*, Elsevier Ltd, 107, May, 394–402pp., doi: 10.1016/j.enpol.2017.05.013.

O'Brien, M. (2016). *Timber consumption and sustainable forest use*. Kassel: kassel university press.

O'Brien, M., Dietmar, W., Stefan, B. & Arnold, K. (2015). *Sachstandsbericht über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie: Systemische Betrachtung und Modellierung der Bioökonomie*. Wuppertal, Verfügbar unter: http://www.biosc.de/lw_resource/datapool/_items/item_644/5851_biooekonomie.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

O'BRIEN, M., HARTWIG, F., SCHANES, K., KAMMERLANDER, M., OMANN, I., WILTS, H., BLEISCHWITZ, R. & JÄGER, J. (2014). Living within the safe operating space: a vision for a resource efficient Europe. *European Journal of Futures Research*, 2, 48, doi: 10.1007/s40309-014-0048-3.

O'BRIEN, M., SCHÜTZ, H. & BRINGEZU, S. (2015). The land footprint of the EU bioeconomy: Monitoring tools, gaps and needs. *Land Use Policy*, Elsevier Ltd, 47, 235–246pp., doi: 10.1016/j.landusepol.2015.04.012.

O'BRIEN, M., WECHSLER, D., BRINGEZU, S. & SCHALDACH, R. (2017). Toward a systemic monitoring of the European bioeconomy: Gaps, needs and the integration of sustainability indicators and targets for global land use. *Land Use Policy*, 66, 162–171pp., doi: 10.1016/j.landusepol.2017.04.047.

OECD (2008). *Measuring Material Flows and Resource Productivity - Volume 1 The OECD Guide*. Paris, France, Verfügbar unter: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/MFA-Guide.pdf> [Zugriff Jan./10/2018].

Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. & Welton, S. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. Bonn, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).

PERRY, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail ? *Agricultural Water Management*, 134, 119–125pp., doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.004>.

PFISTER, S., KOEHLER, A. & HELLWEG, S. (2009). Assessing the Environmental Impact of Freshwater Consumption in Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 43, 11, 4098–4104pp., doi: 10.1021/es802423e.

RIDOUTT, B.G., JULIANO, P., SANGUANSRI, P. & SELLAHEWA, J. (2010). The water footprint of food waste: Case study of fresh mango in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 18, 16–17, 1714–1721pp., doi: 10.1016/j.jclepro.2010.07.011.

RIDOUTT, B.G. & PFISTER, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20, 1, 113–120pp., doi: 10.1016/j.gloenvcha.2009.08.003.

Roelich, K., Owen, A., West, C. & David, M. (2011). *OPEN: EU Scenario Quantification Report: Scenarios for a One Planet Economy*. Godalming, UK, Verfügbar unter: http://www.oneplanetecconomynetwork.org/resources/programme-documents/WP6_Scenarios_Storyline_Report_Cover.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

Schaller, S., Vogell, K., Georgi, R., Kuhndt, M. & Raab, C. (2012). *Nachhaltigkeit in der deutschen Konsumgüterwirtschaft - Themen, Trends und Initiativen*. Köln, Germany, Verfügbar unter: https://www.gs1-germany.de/fileadmin/gs1/basis_informationen/Nachhaltigkeit_in_der_Konsumgueterwirtschaft.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

Schostock, D. (2015). *Nachhaltigkeitsindikatoren auf EU , Bundes- und Länderebene – eine Übersicht*. Wuppertal, Verfügbar unter: https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/NHS_NRW_AP5-1_Nachhaltigkeitsindikatoren.pdf.

De Schutter, L., & Giljum, S. (2014). *A calculation of the EU Bioenergy land footprint Discussion paper on land use related to EU bioenergy*. Vienna, Austria, Verfügbar unter: https://www.foeeurope.org/sites/default/files/agrofuels/2015/foee_bioenergy_land_footprint_may2014.pdf [Zugriff Jan./10/2018].

Smeets, E., & Weterings, R. (1999). *Environmental indicators : Typology and overview*. European Environment Agency, Copenhagen, Verfügbar unter: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiyiZPB5fXWAhVRYIAKHQwEBfkQFggrMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.eea.europa.eu%2Fpublications%2FTEC25%2Fdownload&usq=AOvVaw0Kkhtuvtf9iC_qerXTkVBF [Zugriff Jan./10/2018].

Statistisches Bundesamt (1999). *Glossar zu Umwelt- und Nachhaltigkeitsindikatoren - Entwurf*. Verfügbar unter: <http://www.ikzm-oder.de/download.php?fileid=262> [Zugriff Jan./10/2018].

Statistisches Bundesamt (2017). *Statistisches Bundesamt Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele*. Wiesbaden, Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Nachhaltigkeitsindikatoren/International/Indikatorenbericht_SDG_2016.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff Jan./10/2018].

STEEN-OLSEN, K., WEINZETTEL, J., CRANSTON, G., ERCIN, A.E. & HERTWICH, E.G. (2012). Carbon, land, and water footprint accounts for the european union: Consumption, production, and displacements through international trade. *Environmental Science & Technology*, 46, 20, 10883–10891pp., doi: 10.1021/es301949t.

STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTRÖM, J., CORNELL, E., FETZER, I., BENNETT, E.M., BIGGS, R., STEPHEN, R., VRIES, W. DE, WIT, C.A. DE, FOLKE, C., GERTEN, D., HEINKE, J., MACE, G.M. & LINN, M. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347, 6223, 1259855pp., doi: 10.1126/science.1259855.

STEINMANN, Z.J.N., SCHIPPER, A.M., HAUCK, M. & HUIJBREGTS, M.A.J. (2016). How Many Environmental Impact Indicators Are Needed in the Evaluation of Product Life Cycles? *Environmental Science & Technology*, 50, 7, 3913–3919pp., doi: 10.1021/acs.est.5b05179.

Thrän, D., Moesenfechtel, U., Jähkel, A. & Zeug, W. (2018). *Arbeitspapier Entwurf: SYMOBIO-Systemisches Monitoring und Modellierung der Bioökonomie - Ergebnisse des WP 1.1 und des WP 1.3*.

Tukker, A., Bulavskaya, T., Giljum, S., Koning, A. De, Lutter, S., Simas, M., Stadler, K. & Wood, R. (2014). *The Global Resource Footprint of Nations. Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1*. Leiden/Delft/Vienna/Trondheim: The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research.

TUKKER, A., BULAVSKAYA, T., GILJUM, S., KONING, A. DE, LUTTER, S., SIMAS, M., STADLER, K. & WOOD, R. (2016). Environmental and resource footprints in a global context : Europe ' s structural deficit in resource endowments. *Global Environmental Change*, 40, 171–181pp., doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.07.002.

- Umweltbundesamt (2016). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen Bericht für Deutschland 2016*. Dessau-Roßlau, Germany, Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/die_nutzung_natuerlicher_ressourcen.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- Umweltbundesamt (2017). *Biomassekaskaden, Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse- von der Theorie zur Praxis*. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3713_44_100_biomassekaskaden_bf.pdf [Zugriff Feb./19/2018].
- UN (2015). *Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*. Verfügbar unter: <http://www.un.org/depts/german/gv-70/a70-l1.pdf>.
- UN (2017). *The Sustainable Development Goals Report*. United Nations, New York, USA.
- UNEP (2014). *Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply*. Edited by International Resource Panel Working - Working Group on Land and Soils Lead, United Nations Environment Programme.
- UNEP (2015). *Indicators for a Resource Efficient and Green Asia and the Pacific - Measuring progress of sustainable consumption and production, green economy and resource efficiency policies in the Asia-Pacific region*. Verfügbar unter: http://www.switch-asia.eu/fileadmin/user_upload/RPSC/Publications/Indicator-for-a-RE_Low-resolution_.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- UNEP (2016). *Global Material Flows and Resource Productivity - Summary for Policymakers*. Paris: United Nations Environment Programme.
- United Nations (FCCC) (2014). *Report of the Conference of the Parties 11-23 November 2013, Warsaw Poland. UNFCCC Conference of the Parties*, Bonn, Germany, Verfügbar unter: <http://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf#page=52%3C/a%3E%3C/i%3E%3Cbr%3E%3Cbr%3E%3Ca href=> [Zugriff Jan./10/2018].
- Wackernagel, M., Monfreda, C., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D. & Murray, M. (2005). *National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method*. Global Footprint Network, Oakland, Verfügbar unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.495.5633&rep=rep1&type=pdf>.
- WACKERNAGEL, M., ONISTO, L., BELLO, P., LINARES, A.C., FALFÁN, I.S.L., GARCÍA, J.M., GUERRERO, A.I.S. & GUERRERO, M.G.S. (1999). National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 29, 3, 375–390pp., doi: 10.1016/S0921-8009(98)90063-5.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. Kanada: New Society Publishers.
- WBGU (2009). *Solving the climate dilemma: The budget approach. Special Report*, Berlin, Verfügbar unter: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2009_en.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- Weimar, H. (2016). *Holzbilanzen 2013 bis 2015 für die Bundesrepublik Deutschland. Thünen Working Paper*, 57. Hamburg, Verfügbar unter: http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn056719.pdf [Zugriff Jan./10/2018].
- Wiedmann, T., & Minx, J. C. (2008). A definition of “carbon footprint.” *C.C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends*, Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 1–11.

WIEDMANN, T.O., SCHANDL, H., LENZEN, M., MORAN, D., SUH, S., WEST, J. & KANEMOTO, K. (2015). The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 20, 6271–6276pp., doi: 10.1073/pnas.1220362110.

WILTING, H.C., SCHIPPER, A.M., BAKKENES, M., MEIJER, J.R. & HUIJBREGTS, M.A.J. (2017). Quantifying Biodiversity Losses Due to Human Consumption: A Global-Scale Footprint Analysis. *Environmental Science & Technology*, 51, 6, 3298–3306pp., doi: 10.1021/acs.est.6b05296.