

Fluchs, Sarah; Schleicher, Carmen

Research Report

Der materielle Stoffwechsel Nordrhein-Westfalens: Materialflüsse und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft

IW-Report, No. 68/2022

Provided in Cooperation with:

German Economic Institute (IW), Cologne

Suggested Citation: Fluchs, Sarah; Schleicher, Carmen (2022) : Der materielle Stoffwechsel Nordrhein-Westfalens: Materialflüsse und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft, IW-Report, No. 68/2022, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/267683>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Der materielle Stoffwechsel Nordrhein-Westfalens

Materialflüsse und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft

Sarah Fluchs / Carmen Schleicher

Köln, 22.12.2022

IW-Report 68/2022

Wirtschaftliche Untersuchungen,
Berichte und Sachverhalte



Herausgeber

Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V.

Postfach 10 19 42

50459 Köln

Das Institut der deutschen Wirtschaft (IW) ist ein privates Wirtschaftsforschungsinstitut, das sich für eine freiheitliche Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung einsetzt. Unsere Aufgabe ist es, das Verständnis wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Zusammenhänge zu verbessern.

Das IW in den sozialen Medien

Twitter

[@iw_koeln](https://twitter.com/iw_koeln)

LinkedIn

[@Institut der deutschen Wirtschaft](https://www.linkedin.com/company/institut-der-deutschen-wirtschaft)

Facebook

[@IWKoeln](https://www.facebook.com/IWKoeln)

Instagram

[@IW_Koeln](https://www.instagram.com/IW_Koeln)

Autoren

Sarah Fluchs

Economist für Umwelt, Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit

fluchs@iwkoeln.de

0221 – 4981-838

Carmen Schleicher

Studentische Mitarbeiterin

schleicher@iwkoeln.de

**Alle Studien finden Sie unter
www.iwkoeln.de**

Stand:

November 2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Die materielle Wirtschaft als Stoffwechsel	7
2.1 Das Konzept des sozioökonomischen Stoffwechsels	7
2.2 Einführung in die Methode der Materialflussanalyse	9
2.3 Umfang und Indikatoren regionaler Materialflussanalysen.....	10
3 Materialflüsse in Nordrhein-Westfalen	12
3.1 Inputs.....	13
3.2 Outputs.....	21
3.3 Verbrauch und Bestandsänderungen.....	25
3.4 Produktivität und Zirkularität	27
4 Kreislaufwirtschaftspolitik und ihre zugrunde liegende Rohstoffwirklichkeit.....	29
4.1 Die Bedeutung von Materialflüssen für die Kreislaufwirtschaft	30
4.2 Ausgewählte Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft (in NRW)	32
4.3 Abgleich von Kreislaufwirtschaftspolitik und Materialflüssen	34
5 Fazit/Ausblick	37
6 Anhang.....	40
6.1 Ausgewählte Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse.....	40
7 Abstract.....	40
Tabellenverzeichnis.....	47
Abbildungsverzeichnis.....	48
Literaturverzeichnis	49

JEL-Klassifikation

E01 - Messung und Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) und Vermögensrechnung; Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR)

F63 - Umwelt

L16 - Industrieökonomik und Makroökonomie; Industriestruktur und Strukturwandel; Industriepreisindizes

Q02 - Rohstoffmärkte

Q30 - Erschöpfbare Ressourcen und ihre Erhaltung: Allgemeines

Q56 - Umwelt und Entwicklung; Umwelt und Handel; Nachhaltigkeit; Umweltcontrolling und Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR); Umweltgerechtigkeit; Bevölkerungswachstum

Zusammenfassung

Die derzeitige Nutzung natürlicher Ressourcen überschreitet die planetaren Grenzen und gefährdet so die Widerstandsfähigkeit des Ökosystems Erde. Der wachsende Rohstoffverbrauch und die daraus resultierenden ebenfalls wachsenden Abfallmengen und Emissionen bedrohen die Umwelt und somit die Lebensgrundlage der Menschen nachhaltig. Auch die deutsche Wirtschaft ist von der Erschöpfung natürlicher Rohstoffreserven betroffen und muss ihre Versorgung insbesondere mit kritischen Rohstoffen diversifizieren und nachhaltig auslegen. Auch vor diesem Hintergrund ist die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft ein wichtiger Schritt, um die Nutzungsdauer von Produkten zu maximieren und den Ressourceneinsatz sowie das Abfallaufkommen zu reduzieren. Zur Erreichung dieser Ziele ist eine stringente politische Flankierung notwendig, die insbesondere die physischen Materialflüsse einbezieht und analysiert, um Ziele für einen effizienteren Umgang mit Ressourcen abzuleiten und den Prozess auf dem Weg dorthin zu monitoren und begleiten. Die Materialflussanalyse (MFA) ist hier eine Schlüsselmethodik, um aus den ermittelten Materialflüssen schließlich Indikatoren für die Untersuchung der Kreislaufwirtschaft abzuleiten.

Diese Arbeit stellt den materiellen Stoffwechsel von Nordrhein-Westfalen (NRW) vor und arbeitet dessen Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft heraus. Zur Untersuchung, inwiefern eine Kreislaufwirtschaft Berücksichtigung findet, werden die in NRW geltenden politischen Rahmenbedingungen analysiert. Zudem wird die Wirksamkeit ausgewählter Rahmenbedingungen anhand der berechneten Indikatoren auf Basis der MFA eingeschätzt und für NRW überprüft.

Wesentliche Ergebnisse bezüglich der Materialflüsse in NRW sind:

- In NRW wird circa viermal mehr Material abgebaut als in Produktions- und Verbrauchsprozessen verwertet wird, was eine niedrige Effizienz im Rohstoffabbau verdeutlicht. Dieses Verhältnis ist im Wesentlichen von geologischen und technologischen Faktoren abhängig. Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz können zu einer Verringerung des Materialeinsatzes beitragen.
- NRW importiert knapp doppelt so viele Materialien aus der restlichen Welt wie aus anderen Bundesländern und es zeigt sich insgesamt ein steigender Import-Trend seit 1994. Bezogen auf den Fertigungsgrad verzeichnet NRW eine Erhöhung der importierten Menge von fossilen Energieträgern als Rohstoff aus dem Rest der Welt.
- NRW exportiert in den letzten Dekaden gleichbleibende Mengen Material in andere Bundesländer, während die Exporte in den Rest der Welt steigen. Insgesamt sind die Exporte seit 1994 um rund 30 Prozent gestiegen, darunter vor allem der Export fossiler Energieträger als Rohstoffe.
- Die verschiedenen Indikatoren, die die Ressourcenproduktivität von NRW abbilden, weisen einen steigenden Trend im Zeitverlauf auf. Obwohl die Ressourcenproduktivität und das Bruttoinlandsprodukt steigen, bleibt der direkte Materialeinsatz auf einem konstanten Niveau, was bedeutet, dass keine absolute Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Materialeinsatz stattfindet.

Die Analyse der Materialflüsse und politischen Maßnahmen für eine Kreislaufwirtschaft in NRW zeigen, dass Materialflüsse bislang nicht ausreichend im politischen Diskurs berücksichtigt werden. Insbesondere Datenlücken und methodische Hindernisse führen zu MFA-Ergebnissen auf Bundeslandebene, die nicht vollumfassend sind. Hier muss die Politik zukünftig stärker ansetzen und diese Datengrundlage zur Zielformulierung und zur Bewertung der Zielerreichung einsetzen, um der Notwendigkeit einer stringenten Ressourcenpolitik gerecht zu werden.

1 Einleitung

Die derzeitige Nutzung natürlicher Rohstoffe übersteigt die Regenerationsfähigkeit der Erde in vielen Bereichen bei weitem (Krausmann et al., 2017; Steffen et al., 2018). Einem endlichen Vorkommen an natürlichen Rohstoffen steht ein Verbrauch gegenüber, der sich in den letzten 40 Jahren verdreifacht hat (UNEP, 2021). Zum einen führt die zunehmende Materialentnahme und -verwendung in sozioökonomischen Systemen und die damit einhergehende Zunahme von Abfällen und Emissionen zu schwerwiegenden Folgen für das Wohlergehen vom Menschen und seiner natürlichen Umwelt (Krausmann et al., 2017; UNEP, 2021). Zum anderen wirkt sich die Erschöpfung natürlicher Rohstoffreserven auch auf die Versorgungssituation für die Wirtschaft aus. Dies stellt Gesellschaft, Wirtschaft und Politik vor eine Herausforderung (Krausmann et al., 2017; UBA, 2022a). Analog zur Energieversorgung, muss auch die Versorgung insbesondere mit kritischen Rohstoffen sichergestellt, diversifiziert und nachhaltig ausgelegt sein.

Der effiziente Einsatz von natürlichen Ressourcen wird zu einer notwendigen Bedingung für die Zukunft und die Erforschung von Potenzialen für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement ist dringend erforderlich (Krausmann et al., 2017). Die verbesserte Pflege, Erhaltung und Nutzung natürlicher Ressourcen, die Steigerung der Ressourceneffizienz in Produktion und Konsum sowie die Minimierung des Abfallaufkommens werden bereits als unumgängliche Schritte zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung gesehen. Insbesondere die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und menschlichem Wohlergehen vom Verbrauch natürlicher Ressourcen ist auch in den Nachhaltigen Entwicklungszielen der Vereinten Nationen enthalten (UN, 2015). Für eine nachhaltige Entwicklung ist die Schließung von Stoffkreisläufen unumgänglich, um eine zirkuläre und nachhaltigere Wirtschaft und Nutzung der natürlichen Ressourcen zu erreichen. Ein Hebel zur Erreichung dieses Ziels ist die Verringerung des Materialaustauschs, das heißt der Entnahme von Primärrohstoffen oder der Freisetzung von Abfällen und Emissionen zwischen Mensch und Umwelt (Bringezu/Moriguchi, 2015).

Eine Schlüsselstrategie für die Umsetzung dieser Ziele ist die Kreislaufwirtschaft¹. Das Umdenken von einer linearen hin zu einer zirkulären Wirtschaftsweise, bei der Produkte und Ressourcen in Kreisläufen gehalten, deren Nutzungsdauer maximiert und der Ressourceneinsatz sowie das Abfallaufkommen reduziert werden, bildet den Ansatzpunkt. Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus einer Ressource – von der Rohstoffgewinnung über das Produktdesign, die Produktion und die Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung beziehungsweise Verwertung – steht im Mittelpunkt.

Auf politischer Ebene gibt es verschiedene Strategien und Gesetze, die einen Einfluss auf die Rohstoffnutzung und dementsprechend auf die Materialflüsse haben. Relevant sind hier sowohl die europäische als auch die nationale und regionale Ebene. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft im Rahmen der europäischen Wachstumsstrategie, dem europäischen Green Deal, ist als ein wesentliches Handlungsfeld zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050 definiert (Europäische Kommission, 2019). In dem im Frühjahr 2020 von der Europäischen Kommission verabschiedeten Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft werden konkrete Ziele und Maßnahmen beschrieben (Europäische Kommission, 2020). Auf nationaler Ebene hat das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) das Ziel, die Nachhaltigkeit bei der Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen zu erhöhen und Verantwortung für künftige Generationen bezogen auf die Rohstoffversorgung zu

¹ Da im Deutschen der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ nach wie vor ein engeres Verständnis, insbesondere durch den starken Fokus auf die Recycling- und Abfallwirtschaft, legt, ist der in dieser Arbeit verwendete Begriff der „Kreislaufwirtschaft“ synonym mit der erweiterten Interpretation und umfänglichen Bedeutung aus dem englischen Konzept der „Circular Economy“ zu verstehen.

übernehmen (BMU, 2020a). Des Weiteren forciert die Deutsche Rohstoffstrategie Ziele und Maßnahmen, die vor allem Unternehmen bei der Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung unterstützen sollen und dabei neuen Herausforderungen, wie dem internationalen Wettbewerb und steigenden Anforderungen bei Gewinnung von und Handel mit Rohstoffen, gerecht werden (BMW, 2019).

Im Zusammenhang mit einer zielgerichteten Ausgestaltung der politischen Flankierung der Ressourcennutzung stellt sich ebenso die Frage nach dessen Wirksamkeit. Für die Entwicklung und das Monitoring von wirksamen Strategien, die auf eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen abzielen, müssen Austauschprozesse zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und ihrer natürlichen Umwelt, Produktions- und Verbrauchsmuster sowie der Zusammenhang zwischen materieller Nutzung, wirtschaftlicher Entwicklung und menschlichem Wohlbefinden untersucht und verstanden werden (Krausmann et al., 2017). Analysen der Stoffströme sind notwendig, um schädliche Stoffe und Materialien in einem systemweiten Ansatz zu identifizieren (Bringezu et al., 2009). Diese Bewertung geht jedoch mit der enormen Komplexität der Wechselbeziehungen zwischen sozioökonomischen Systemen und ihrer Umwelt sowie der Struktur der Materialflüsse in, durch und aus den Systemen einher. Ein wertvoller Forschungsansatz für diese Problematik ist die Untersuchung der biophysikalischen Grundlagen menschlicher Systeme durch die Ermittlung der bestehenden Stoffströme unter Anwendung des Konzepts des sozioökonomischen Stoffwechsels (Krausmann et al., 2017; UNEP, 2021). Zur Abbildung dieses Stoffwechsels gilt die Materialflussanalyse (MFA) als eine Schlüsselmethode (Bringezu/Bleischwitz, 2009). Der Ansatz kann auf Interessensobjekte unterschiedlicher Dimensionen angewandt werden, so dass zum Beispiel Unternehmen oder ganze Volkswirtschaften betrachtet werden können. Kenntnisse über die Austauschprozesse zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und Natur sind die Grundlage für die Entwicklung zukunftsorientierter Strategien (Krausmann et al., 2017). Aus den ermittelten Materialflüssen lassen sich schließlich Indikatoren für die Untersuchung der Kreislaufwirtschaft ableiten. Ziele der deutschen Bundesregierung, unter anderem in ProgRes, beziehen sich vor allem auf die Produktivität von Rohstoffen. Dies wird am Produktivitätsindikator gemessen, der eines der Ergebnisse einer MFA sein kann.

Ziel und Vorgehen

Diese Arbeit zielt darauf ab den materiellen Stoffwechsel von Nordrhein-Westfalen (NRW) vorzustellen und dessen Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft herauszuarbeiten. Dazu wird der materielle Austausch von NRW mit seiner Umwelt betrachtet, um Schlüsse darüber zu ziehen auf welchem biophysikalischen Gerüst die Kreislaufwirtschaft in NRW aufbaut. Um zu untersuchen welche Berücksichtigung diese findet, werden die in NRW geltenden politischen Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft betrachtet und deren Bedeutung herausgearbeitet. Zudem soll abschließend ein Abgleich der Kreislaufwirtschaftspolitik hinsichtlich ihrer konkreten Zielvorgaben anhand der Materialflüsse erfolgen und analysiert werden sowie die Auswirkung der implementierten Maßnahmen und Instrumente bewertet werden.

Das Vorgehen in dieser Studie ist mehrstufig angelegt: zunächst wird der konzeptionelle Ansatz zur Bestimmung von Materialflüssen durch ein (Wirtschafts-)System – der sozioökonomische Stoffwechsel – vorgestellt (Kapitel 2). Im Anschluss werden in Kapitel 3 sowohl die Materialflüsse NRWs als auch die verschiedenen Indikatoren einer Materialflussanalyse für NRW für die letzten Dekaden dargestellt und deren Entwicklung diskutiert. Kapitel 4 arbeitet die Bedeutung der Materialflüsse für die Kreislaufwirtschaft heraus und stellt ausgewählte politische Rahmenbedingungen vor, deren Wirksamkeit anhand der berechneten Indikatoren eingeschätzt und für NRW überprüft werden können. Kapitel 5 schließt mit einem Fazit ab.

2 Die materielle Wirtschaft als Stoffwechsel

2.1 Das Konzept des sozioökonomischen Stoffwechsels

Kernaussagen:

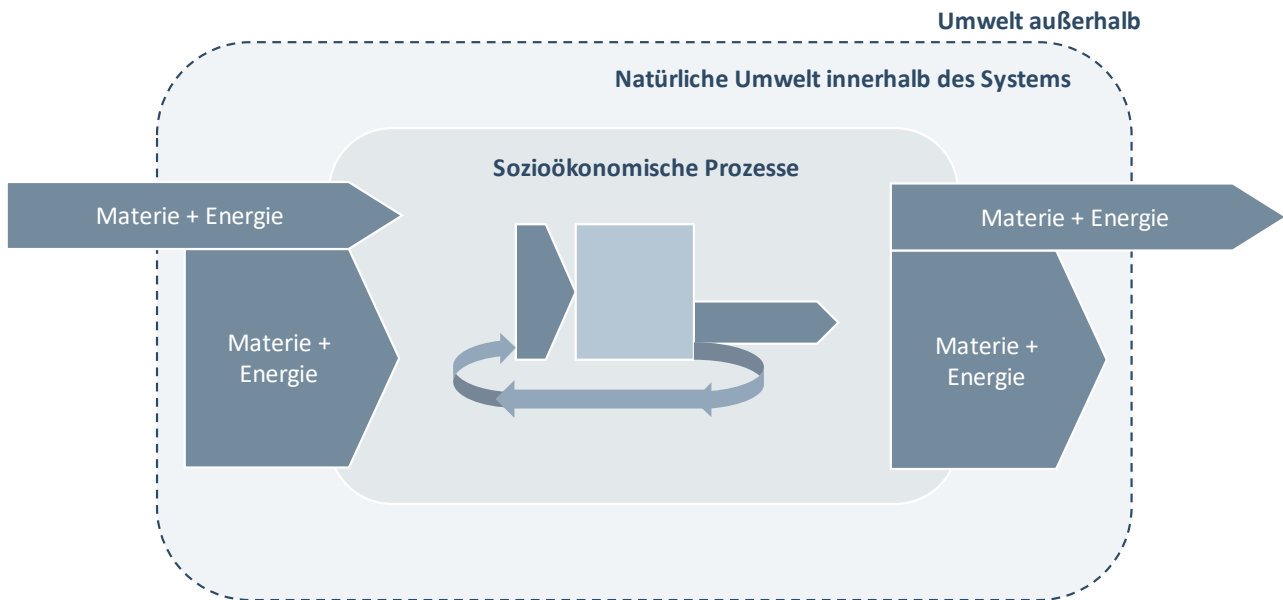
- Das Konzept des sozioökonomischen Stoffwechsels fokussiert auf die Schnittstelle zwischen Mensch und Natur, indem eine Systemperspektive eingenommen wird, um die Wechselbeziehungen zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und ökologischer Umwelt abzubilden.
- Flächenverbrauch, die irreversible Veränderung von Ökosystemen, der Ausstoß von Treibhausgasen und Bodenbelastungen durch Schadstoffe sind Beispiele von Auswirkungen auf die Umwelt, die im Zusammenhang mit Materialflüssen auftreten können.
- Aus dem Materialverbrauch können Wirkungsindikatoren abgeleitet werden. Der Materialverbrauch verursacht zudem andere Umweltbelastungen, wie zum Beispiel Abfallströme, Emissionen oder Landnutzung und Wasserverbrauch.

Natürliche Ressourcen bilden die biophysikalische Grundlage für gesellschaftliche und wirtschaftliche Aktivitäten auf der Erde. Sie stellen Energie- und Materialquellen dar, fungieren aber auch als Senken für Emissionen und Abfälle (Bringezu/Bleischwitz, 2009; BMU, 2020a). Ferner liefern sie die grundlegenden Inputs für Güter, Dienstleistungen und Infrastrukturen sozioökonomischer Systeme. Zu den natürlichen Ressourcen zählen unter anderem biotische (zum Beispiel Biomasse) und abiotische Rohstoffe (zum Beispiel fossile Energieträger, Erze und sonstige mineralische Rohstoffe) sowie Land, Wasser, Luft, Ökosysteme mit ihrer biologischen Vielfalt und Energie aus Sonne, Wind, Erdwärme oder Gezeitenströmungen (BMU, 2020a; UNEP, 2021).

Das Konzept des sozioökonomischen Stoffwechsels (auch: Metabolismus) befasst sich mit der Schnittstelle zwischen Mensch und Natur, indem es eine Systemperspektive einnimmt, die die Wechselbeziehungen zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und ökologischer Umwelt abbildet. Dabei wird das sozioökonomische System, welches sowohl die Gesellschaft als auch die Wirtschaft umfasst, als eingebettetes Teilsystem seiner Umwelt betrachtet, das als offenes System mit der natürlichen Umwelt oder anderen sozioökonomischen Systemen im Austausch steht (Bringezu et al., 2009) (Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Vereinfachte Darstellung der Wechselbeziehung zwischen sozioökonomischem System und seiner Umwelt

Sozioökonomische Systeme sind offene Systeme, die Materie und Energie mit ihrer natürlichen Umwelt und anderen sozioökonomischen Systemen (Umwelt außerhalb) austauschen.



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Krausmann et al., 2017; Eurostat, 2018a

Der Austausch von Materie und Energie erfolgt in Analogie zum biologischen Konzept des Stoffwechsels. Dieses sagt aus, dass jeder lebende Organismus für sein Wachstum und seine Fortpflanzung Materie und Energie benötigt, die er nach Verwendung in umgewandelter Form wieder an die Umwelt abgibt. Dem zugrunde liegt der Massenerhaltungssatz, der besagt, dass Materie und Energie weder geschaffen noch zerstört werden können. Für Materialflüsse bedeutet dies, dass alle Einsätze, die in das System einfließen, es auch irgendwann in Form von Ausgaben wieder verlassen müssen (Bringezu et al., 2009). Der Stoffwechsel kann auch auf ein sozioökonomisches System übertragen werden, da es für sein kontinuierliches Funktionieren, insbesondere der wirtschaftlichen Aktivitäten, auf Rohstoffe angewiesen ist und unbrauchbare Stoffe in Form von Abfällen und Emissionen wieder an die Umwelt abgibt (Bringezu et al., 2009; Krausmann et al., 2017).

Aufgrund der komplexen Strukturen bestehen vielschichtige Verbindungen und gegenseitige Rückkopplungsschleifen zwischen sozioökonomischen Systemen und ihrer Umwelt. Dadurch ist jede Entnahme von natürlichen Ressourcen mit Auswirkungen auf die Umwelt in direkter oder indirekter Form verbunden (Krausmann et al., 2017). Flächenverbrauch, die irreversible Veränderung von Ökosystemen, der Ausstoß von Treibhausgasen und Bodenbelastungen durch Schadstoffe sind nur einige Beispiele von Auswirkungen auf die Umwelt, die im Zusammenhang mit Materialflüssen auftreten können (UBA, 2022a). Das Ausmaß und die Intensität der Auswirkungen hängen von der Quantität und Qualität² der Materialströme, dem Ort, an dem sie stattfinden, und den Eigenschaften des Ökosystems des Ortes ab (Bringezu et al., 2009). Übertragen auf den Materialverbrauch lässt sich der Zusammenhang wie folgt beschreiben: Wenn der Verbrauch von Materialien mit einer Belastung der Umwelt einhergeht, ist die Belastung umso größer, je höher der Materialverbrauch ist.

² Die Qualität der Materialströme bezieht sich auf deren Beschaffenheit, die zum Beispiel durch Technologien für den Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen, die Zusammensetzung der Rohstoffe, deren Fließgeschwindigkeit sowie durch das (Nicht-)Einhalten von Nachhaltigkeitsaspekten beeinflusst wird.

Aus dem Materialverbrauch können daher Wirkungsindikatoren abgeleitet werden. Aufgrund der vorhandenen Systemkomplexität und der interdependenten Rückkopplungen verursacht der Materialverbrauch auch andere Umweltbelastungen, wie zum Beispiel Abfallströme, Emissionen oder Landnutzung und Wasserverbrauch. Steigt der Materialverbrauch, so steigen ceteris paribus auch die anderen Belastungen (IRP, 2017). Direkt oder indirekt ist der Verbrauch von natürlichen Rohstoffen daher für die meisten regionalen und globalen Nachhaltigkeitsprobleme verantwortlich (Steffen et al., 2018; Krausmann et al., 2017). Eine ganzheitliche Betrachtung des Systems ist also wichtig, um die eng verwobenen Materialflüsse und deren Auswirkungen zu erfassen.

2.2 Einführung in die Methode der Materialflussanalyse

Kernaussagen:

- Die Materialflussanalyse ist definiert als eine systematische Bewertung der Stoffströme und -bestände innerhalb eines räumlich und zeitlich definierten Systems.
- Ein Interesse der MFA ist, die Prozesse des Systemstoffwechsels durch das Verständnis von Volumen, Struktur und Qualität des Materialdurchsatzes zu definieren. Dadurch können nationale Statistiken über die Wirtschaftsleistung eines Landes, die in der Regel monetäre Werte als Maßstab verwenden, um die biophysikalische Zusammensetzung von Materialströmen ergänzt werden.
- Die MFA von Städten und Regionen kann Aufschluss darüber geben, wie sich das nationale Materialkonto in einer detaillierteren Art und Weise zusammensetzt, was letztlich dafür genutzt werden kann Treiber für Umweltauswirkungen zu lokalisieren.

Während der sozioökonomische Stoffwechsel einen konzeptionellen Rahmen für die Betrachtung der biophysikalischen Materialflusssdynamik von Systemen darstellt, erfordert ihre Quantifizierung stoffbilanzielle Ansätze und Werkzeuge (Krausmann et al., 2017). MFA, insbesondere auf der Makroebene, sind eine wichtige Methode dafür (Krausmann et al., 2017). MFA ist definiert als eine systematische Bewertung der Stoffströme und -bestände innerhalb eines räumlich und zeitlich definierten Systems (wörtlich: “systematic assessment of the flows and stocks of materials within a system defined in space and time”, Brunner/Rechberger, 2016, 3). Das zentrale Interesse der MFA besteht darin, die Prozesse des Systemstoffwechsels durch das Verständnis von Volumen, Struktur und Qualität des Materialdurchsatzes zu definieren. Dadurch können nationale Statistiken über die Wirtschaftsleistung eines Landes, die in der Regel monetäre Werte als Maßstab verwenden, um die biophysikalische Zusammensetzung von Materialströmen ergänzt werden (UNEP, 2021). Der MFA-Ansatz kann daher als fehlendes Bindeglied zwischen den vorherrschenden ökonomischen und ökologischen Überwachungsmechanismen dienen (Bringezu et al., 2009, 23) und ist daher von entscheidender Bedeutung für Themen von hohem politischem Interesse, wie zum Beispiel die Kreislaufwirtschaft, die Klimaschutzpolitik, die nachhaltige Entwicklung, die Ökobilanzierung oder die Doughnut-Ökonomie.

Die Forschung und die Datenerhebung für Materialflüsse in der Europäischen Union (EU) kamen in den 1990er Jahren auf (Fischer-Kowalski et al., 2011). Im Jahr 2000 entwickelte eine Arbeitsgruppe des Europäischen Statistikamtes (Eurostat) einen methodischen Rahmen für die harmonisierte Erfassung von Materialflüssen auf gesamtwirtschaftlicher (nationaler) Ebene, welcher zuletzt 2018 aktualisiert wurde (Eurostat, 2018a). Die MFA auf gesamtwirtschaftlicher Ebene (Englisch: economy-wide material flow analysis) (EW-MFA) ist weit verbreitet und für die europäischen Mitgliedsstaaten sogar verpflichtend geworden (EU, 2011). Sie erfasst die physischen Materialien, die in und aus dem System fließen. Eine tiefgehende Analyse der

Stoffströme innerhalb der betrachteten nationalen Systeme kann mithilfe dieses Ansatzes jedoch nicht erfolgen. Diese Restriktion der Methode wird auch als „Blackbox-Charakter“ beschrieben (Mayer et al., 2019).

Insbesondere da Umweltbelastungen meist mit einer hohen Wirtschaftstätigkeit oder einer hohen Dichte an Haushalten verbunden sind und eine ungleichmäßige Verteilung über nationale Gebiete gilt, bietet sich die Betrachtung von Teilen des Systems (Subsysteme) an. Vor allem städtische und regionale Subsysteme zählen aufgrund ihrer sozioökonomischen Charakteristika zu wichtigen Variablen bei der Analyse von Materialflüssen einer Nation (Sastre et al., 2015). Die MFA von Städten und Regionen kann Aufschluss darüber geben, wie sich das nationale Materialkonto in einer detaillierteren Art und Weise zusammensetzt, die einer Bottom-up-Strategie folgt, was letztlich dafür genutzt werden kann Treiber für Umweltauswirkungen zu lokalisieren (Voskamp et al., 2017). Dies trägt dazu bei, den Entscheidungsträgern eine verlässliche Grundlage für die Entwicklung geeigneter, wirksamer und vor allem zielgerichteter politischer Maßnahmen zu bieten, die dringend erforderlich sind, um die Ressourcenbewirtschaftung nachhaltig zu gestalten und damit letztlich dem Klimawandel entgegenzuwirken (Krausmann et al., 2017; Musango et al., 2017).

Für die Untersuchung des materiellen Stoffwechsels auf regionaler Ebene gibt es derzeit noch keinen harmonisierten methodischen Rahmen. Eine Vielzahl von Fallstudien regionaler MFA zeigt jedoch, dass die Eurostat Methode oder zumindest ausgehend davon der EW-MFA Ansatz in angepasster Form angewendet werden kann, sofern entsprechende Daten verfügbar sind (zum Beispiel Barles, 2009; Sastre et al., 2015; Voskamp et al., 2017).

2.3 Umfang und Indikatoren regionaler Materialflussanalysen

Kernaussagen:

- Die Quantifizierung der Materialflüsse erfolgt durch die Berechnung von Indikatoren auf der Grundlage der erhobenen Daten. Diese Indikatoren stellen Knotenpunkte im System dar und messen im Wesentlichen Materialflüsse, die in das System kommen beziehungsweise es wieder verlassen.
- Kritischste Punkte der MFA sind einerseits die Datenverfügbarkeit und die Anforderungen an den zugrunde liegenden Datensatz und andererseits Spielraum bei der Auslegung der Indikatoren. Eine umfassende Quantifizierung aller Stoffströme eines Systems ist nur in seltenen Fällen verfügbar.

Im Mittelpunkt der Methode steht die Berechnung und Bilanzierung der physischen Materialflüsse im Sinne einer Input-Output-Analyse bei gleichzeitiger Anwendung von Systemdenken auf das betreffende Objekt (Krausmann et al., 2017). Regionale sozioökonomische Systeme tauschen Materie und Energie mit ihrer natürlichen Umwelt, zum Beispiel bei der Entnahme von Rohstoffen sowie mit anderen sozioökonomischen Systemen, zum Beispiel bei Importen oder Exporten aus anderen Subsystemen oder dem Ausland, aus.

Es werden vier Hauptmaterialkategorien betrachtet: fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe und Biomasse. Ausgenommen von der Betrachtung sind Wasser und Luft³. Die Materialmengen

³ Um Lücken in der Materialbilanz auszugleichen, werden auf der Input- und Outputseite Ausgleichselemente (Englisch: balancing items) (BI und BO) hinzugefügt, die Wasser und Luft umfassen. Diese Lücken in der Materialbilanz können auftreten, da in der gesamten Wertschöpfungskette Prozesse, zum Beispiel Verbrennungsprozesse, zu Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts von Materialien führen können. Allerdings gestaltet sich die Bestimmung von Ausgleichselementen in der Praxis schwierig und beruht auf Schätzungen und Hochrechnungen, sodass dieser Faktor von Ungenauigkeiten geprägt ist (Eurostat, 2018a).

werden in metrischen Tonnen pro Jahr gemessen, was zum Teil, insbesondere bei flüssigen oder gasförmigen Stoffen, Umrechnungen erfordert (Eurostat, 2018a; UNEP, 2021). Gemäß dem konzeptionellen Rahmen erfolgt die Quantifizierung der Materialflüsse durch die Berechnung von Indikatoren auf der Grundlage der erhobenen Daten. Diese Indikatoren stellen verschiedene Knotenpunkte oder Schnittstellen im System beziehungsweise entlang der Systemgrenzen dar und messen im Wesentlichen Materialflüsse, die in das System kommen beziehungsweise es wieder verlassen. Dazu gehören unter anderem folgende Typen an Indikatoren:

- **Input-Indikatoren:** Input-Indikatoren ermitteln die Stoffströme, die aus der Umwelt in das System gelangen. Dabei wird unterschieden, ob die Inputs aus der natürlichen direkten Umwelt stammen, wie im Falle der inländischen Entnahme, oder ob sie aus anderen Systemen importiert werden.
- **Output-Indikatoren:** Output-Indikatoren beschreiben die Materialströme, die das System in Form von Exporten, Emissionen oder Abfallströmen verlassen (Bringezu et al., 2009). Ähnlich wie auf der Inputseite werden auch die Outputs danach unterschieden, ob der Materialaustausch mit der natürlichen Umwelt oder anderen Systemen stattfindet.
- **Indikatoren über den Verbrauch und Bestand:** Abläufe innerhalb des Systems werden in der MFA unter zwei Indikatoren zusammengefasst: der inländische Materialverbrauch (Englisch: domestic material consumption) (DMC) und der Nettobestandszuwachs (Englisch: net additions to stock) (NAS).
- **Produktivitäts-Indikatoren:** Produktivitäts-Indikatoren setzen Materialströme in Beziehung zu wirtschaftlichen Aggregaten (zum Beispiel dem Bruttoinlandsprodukt (BIP)). Es wird ermittelt wie viel BIP durch eine Einheit des betrachteten Materials erzeugt wird.

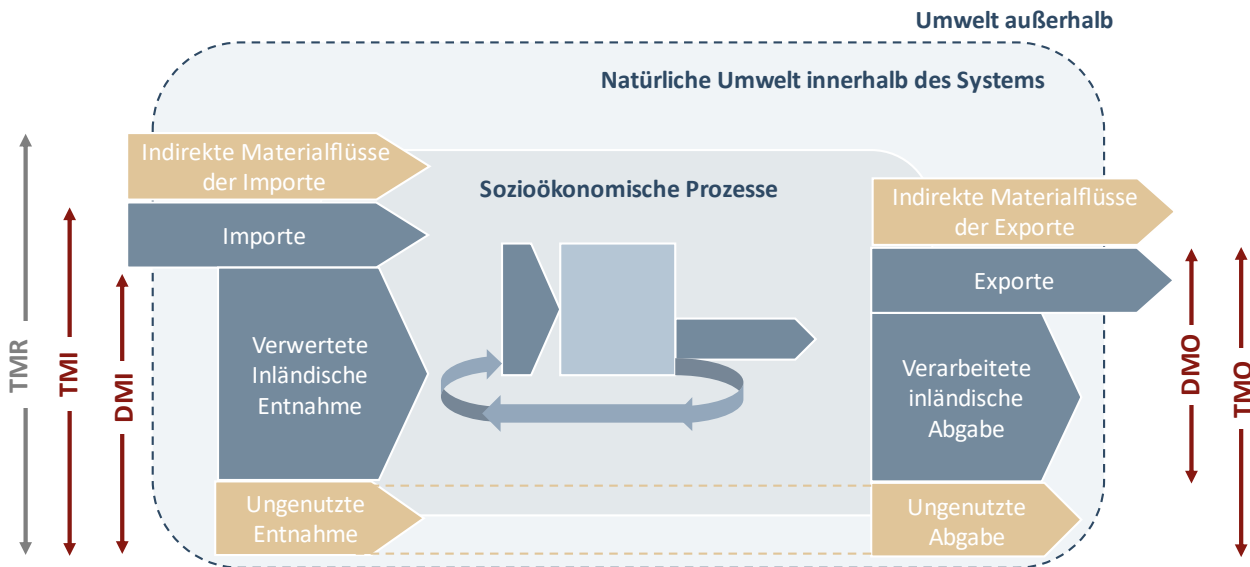
Sofern die Datengrundlage mindestens die inländische Entnahme (Englisch: domestic extraction) (DE), die physischen Importe (IMP) und Exporte (EXP) sowie die inländische verarbeitete Abgabe (Englisch: domestic processed outputs) (DPO) bereitstellt, lassen sich alle weiteren Indikatoren, wie der inländische Materialverbrauch (DMC), gemäß ihrer Formel daraus ableiten. Zudem können aus den initialen Indikatoren weitere abgeleitet werden, indem sie zueinander oder zu weiteren sozioökonomisch relevanten Kennzahlen (wie beispielsweise dem BIP) in Beziehung gesetzt werden. Zu diesen Indikatoren gehört unter anderem der Indikator für Ressourcenproduktivität (RP). Der Anhang dieser Arbeit enthält einen Überblick über ausgewählte Indikatoren für die regionale MFA, eine Beschreibung sowie ihre Formeln (Kapitel 6.1).

Eine weitere Besonderheit bei der Erfassung von Materialflüssen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene ist, dass einige Indikatoren, beziehungsweise die zugrundeliegenden Daten, Angaben über die tatsächliche Menge direkt entnommener physischer Rohstoffe enthalten, während andere das Gewicht von Produkten zum Zeitpunkt der Überschreitung der Systemgrenzen messen. Allerdings ist die für die Herstellung eines Produktes erforderliche Materialentnahme immer höher als das Gewicht des fertigen Produktes. Um dieser Asymmetrie entgegenzuwirken und auch die indirekten Materialflüsse abzudecken, können Produkte entsprechend der für ihre Herstellung notwendigen Menge physischer Rohstoffe in sogenannte Rohstoffäquivalente umgerechnet werden (Eurostat, 2018a).

Einen Überblick über die gesamten Materialflüsse des Systems und notwendige Indikatoren für ihre Bestimmung gibt Abbildung 2-2.

Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der regionalen Materialflüsse und Indikatoren

Der direkte und indirekte Materialaustausch mit der natürlichen Umwelt und anderen sozioökonomischen Systemen



TMR: Gesamtmaterialbedarf, TMI: Gesamter Materialeinsatz, DMI: Direkter Materialeinsatz, DMO: direkte Materialabgabe, TMO: gesamte inländische Materialabgabe (siehe Anhang 6.1)

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Eurostat, 2018a; UNEP, 2021

Engpass und kritischste Punkte der MFA sind einerseits die Datenverfügbarkeit und die Anforderungen an den zugrunde liegenden Datensatz und andererseits Spielraum bei der Auslegung der Indikatoren (Barles, 2009; Fischer-Kowalski et al., 2011; Fernandez/Schütz, 2015; Hoekman/von Blottnitz, 2017; Voskamp, 2017). Eine umfassende Quantifizierung aller Stoffströme eines Systems ist nur in seltenen Fällen verfügbar. Dies liegt unter anderem an dem hohen Aufwand der Datenerhebung und -aufbereitung für Stoffströme im Gesamtzusammenhang, denn oft sind die Daten zwar vorhanden, aber lückenhaft oder nicht als MFA-Datensatz gesammelt aufbereitet, wie dies bei Eurostat für die europäischen Mitgliedsstaaten der Fall ist. Das bedeutet auch, dass Schätzungen und Hochrechnungen, Konvertierungen und Anpassungen an den Rohdaten erforderlich sein können, um die Datensätze zur Berechnung der Indikatoren aufzubereiten. Speziell für die Umrechnung in Rohstoffäquivalente sind die Anforderungen an die benötigten Daten besonders hoch (Biebeler/Lang, 2014; Fernandez/Schütz, 2015). Das führt insbesondere bei der Bestimmung der Produktivitätsindikatoren dazu, dass unterschiedliche Materialströme als Berechnungsgrundlage dienen können und verschiedene Materialflüsse inkludiert sind (Biebeler/Lang, 2014; Fernandez/Schütz, 2015).

3 Materialflüsse in Nordrhein-Westfalen

Dieses Kapitel wendet die zuvor erarbeiteten theoretischen Erkenntnisse (Kapitel 2) auf das Anwendungsbeispiel NRW an. Für die Quantifizierung des materiellen Stoffwechsels von NRW werden die administrativen Grenzen des Bundeslandes als Systemgrenze übernommen. Amtlich erhobene Statistiken für Länderdaten bedienen sich ebenfalls dieser Abgrenzung. Für die MFA auf Bundeslandebene sind insbesondere die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder (VGRdL) und die Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder (UGRdL) relevant. Entsprechend dieser Systemgrenzen und Daten, umfasst das betrachtete System NRW

eine Fläche von 34.112,6 km² und zählt damit zu einem der größten der 16 deutschen Bundesländer. NRW liegt im Westen Deutschlands und grenzt nicht nur an die anderen deutschen Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz, sondern teilt sich auch die Landesgrenzen mit den Niederlanden und Belgien. Mit rund 18 Millionen Einwohnern (Stand: 2021) ist es das bevölkerungsreichste Bundesland der Republik und weist eine der höchsten Bevölkerungsdichten (525,5 Einwohner/km²) sowie das höchste Bruttoinlandsprodukt (701.108 Millionen Euro) des Landes auf (it.nrw, 2022; VGRdL, 2022). Ein Großteil der wirtschaftlichen Leistung des Bundeslandes ist auf die Industrie zurückzuführen, rund ein Drittel der regionalen Wertschöpfung entfiel im Jahr 2021 auf das Produzierende Gewerbe (UGRdL, 2022a). Insbesondere ist die Grundstoffindustrie in NRW stark ausgeprägt, die Rohstoffe für die Produktion überwiegend aus primären fossilen und mineralischen Rohstoffen bezieht (IN4climate.NRW., 2021).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der regionalen MFA des Systems nach Indikatoren-Typen (Input, Output, Verbrauch und Bestand, Produktivität und Zirkularität) dargestellt und erläutert.

3.1 Inputs

Kernaussagen:

- **Inländische Entnahme:** In NRW wird circa viermal mehr Material abgebaut, als in Produktions- und Verbrauchsprozessen verwertet wird. Dieses Verhältnis lässt sich nicht ohne weiteres verbessern, da es im Wesentlichen von geologischen und technologischen Faktoren abhängt. Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz bieten Potenziale den Materialeinsatz zu verringern.
- **Importe:** NRW importiert knapp doppelt so viele Materialien aus der restlichen Welt wie aus anderen Bundesländern und es zeigt sich insgesamt ein steigender Import-Trend seit 1994. Bezogen auf den Fertigungsgrad verzeichnet NRW eine Erhöhung der importierten Menge von fossilen Energieträgern als Rohstoff aus dem Rest der Welt.
- **Materialeinsatz:** Der Verlauf des direkten Materialeinsatzes in NRW seit 1994 zeigt eine Verlagerung. Um die Jahrtausendwende erfolgte die Ablösung der inländischen Entnahme durch Importe als Hauptquelle eingesetzter Materialien, was Einfluss auf den Ort der Umweltwirkungen hat.

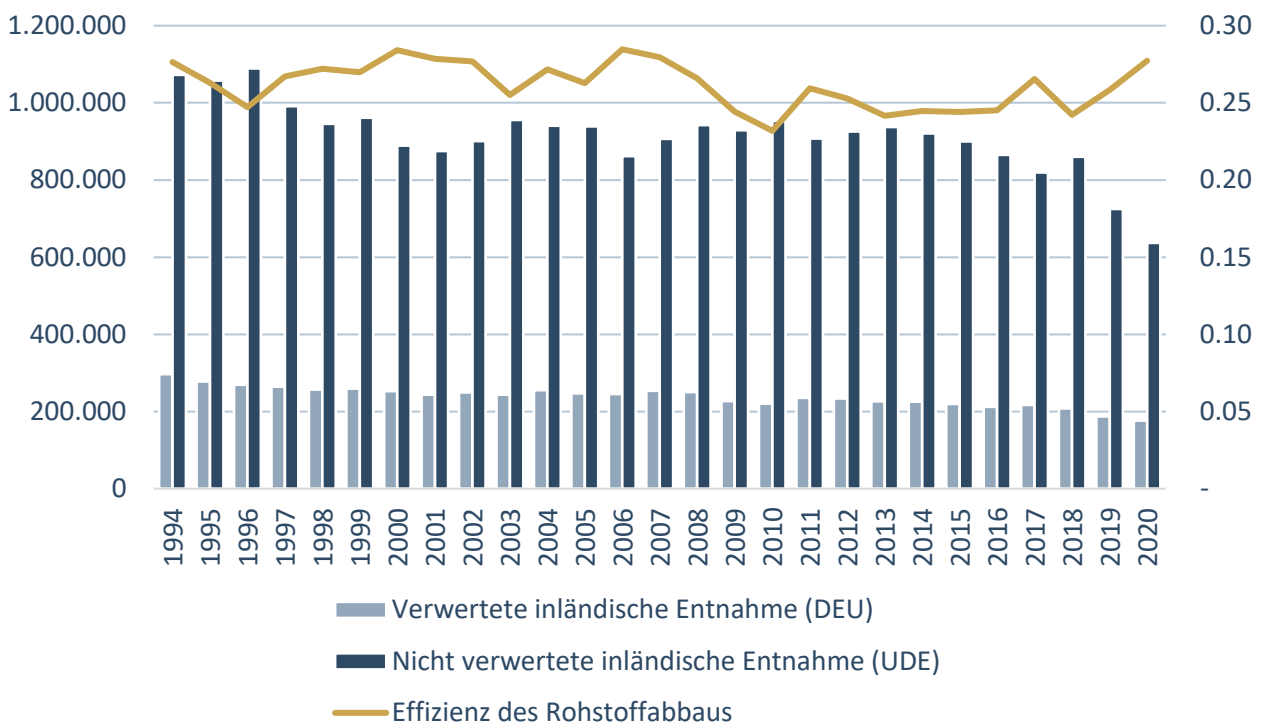
Inländische Entnahme

Im Materialkonto werden durch menschliche Wirtschaftsaktivität abgebaute natürliche Rohstoffe als inländische Entnahme unter dem Indikator DE erfasst. Diese Materialbewegungen können in die verwertete und nicht verwertete inländische Entnahme unterteilt werden. Dabei wird unterschieden, ob das Material in die Produktions- beziehungsweise die Verbrauchsprozesse des Systems einfließt oder nicht. Die verwertete inländische Entnahme (Englisch: domestic extraction used) wird unter dem Indikator DEU zusammengefasst und nach den vier Hauptmaterialkategorien (fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe und Biomasse) unterschieden. Für die Nutzung dieser Rohstoffe müssen jedoch doppelt bis dreifach so viele Ressourcen entnommen beziehungsweise bewegt werden. So fallen beispielsweise beim Tagebau große Mengen Abraum in Form von den oberen Gesteinsschichten über dem eigentlichen Rohstoffvorkommen an, die nicht für den Zweck des Verbrauchs abgetragen werden, aber dennoch in das System eintreten, bevor sie es als Output wieder verlassen (Kapitel 3.2) (Krausmann et al., 2017; Eurostat, 2018a). Dabei gilt, dass es keine genutzte Entnahme ohne ungenutzte Entnahme gibt (Aachener Stiftung, 2010). Solche Stromgrößen werden als nicht verwertete inländische Entnahme (Englisch: unused domestic extraction) (UDE) zusammengefasst und können in die MFA mit aufgenommen werden (Krausmann et al., 2017). In der Regel werden zunächst

leicht erreichbare Ressourcen abgetragen, sodass mit zunehmender Entnahme der Aufwand der Entnahme steigt, zum Beispiel wenn die Rohstoffreserven in tieferen Erdschichten liegen und damit häufig auch die Menge an UDE. Da unabhängig von der späteren Verwertung bereits aus der Entnahme von Materialien verschiedene Belastungen für die natürliche Umwelt resultieren, sind für das Abbild der gesamten Materialflüsse auch die nicht verwerteten zu berücksichtigen (Aachener Stiftung, 2010). Abbildung 3-1 stellt das Verhältnis von der verwerteten zu der nicht verwerteten inländischen Entnahme für NRW im Zeitverlauf vor.

Abbildung 3-1: Das Verhältnis von verwerteter und nicht verwerteter inländischer Entnahme in NRW

Angaben in 1.000 Tonnen



Effizienz des Rohstoffaufbaus: DEU/UDE

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a

Für NRW zeigt sich, dass circa viermal mehr Material abgebaut wird, als in die Produktions- und Verbrauchsprozesse einfließt. Für das Jahr 2020 bedeutet dies, dass von insgesamt rund 813 Millionen Tonnen Rohstoffen circa 176 Millionen Tonnen in die Wertschöpfung des Systems eingingen. Auch wenn die inländische Entnahme insgesamt über die letzten Dekaden rückläufig ist, resultiert dieses Verhältnis in einem geringen Wert für die Effizienz des Rohstoffabbaus. Jedoch lässt sich das Verhältnis von der genutzten zur ungenutzten Entnahme nicht ohne weiteres ändern/verbessern, da es maßgeblich von geologischen und technologischen Faktoren abhängt. Vielmehr bieten Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen ihrer Verwertung Potenziale den Materialeinsatz zu verringern.

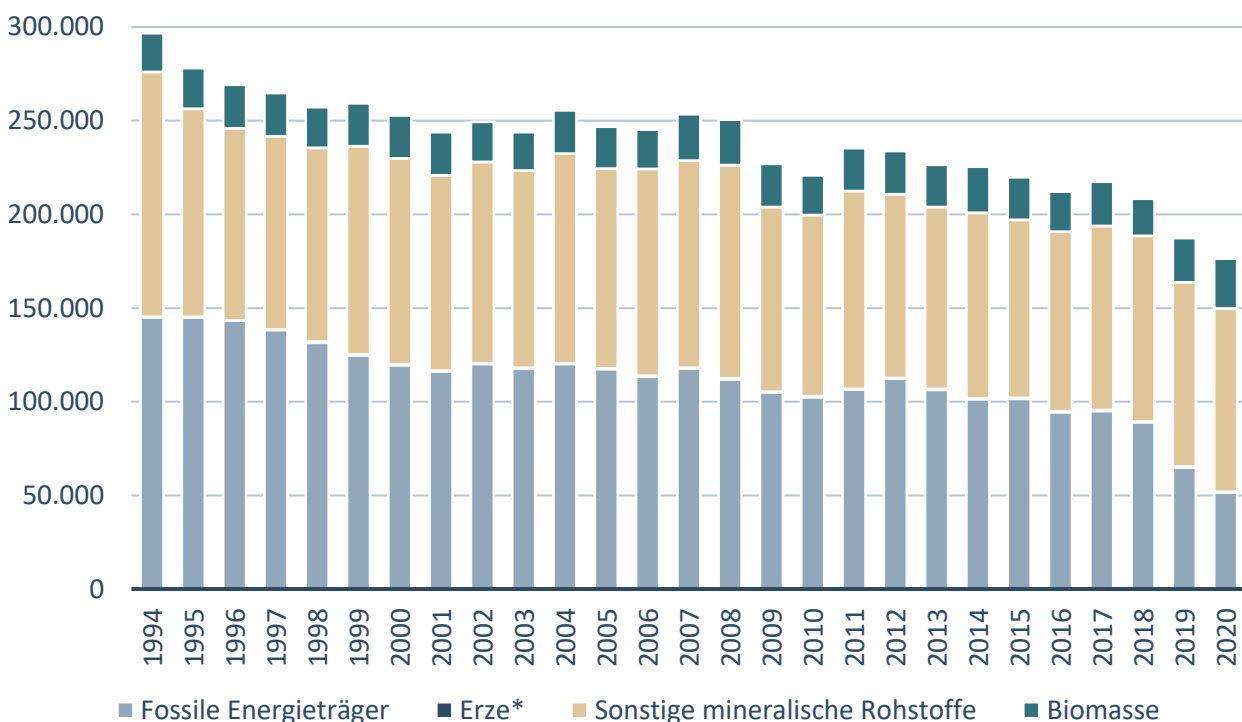
In NRW befinden sich eine Vielzahl natürlicher Rohstoffvorkommen, darunter sind vor allem abiotische mineralische Rohstoffe wie verschiedene Kiese, Sand, Steinsalz und Kalksteinarten, aber auch fossile Rohstoffe, wie Stein- und Braunkohle, deren Abbau mit großen Mengen Abraum einhergeht (Geologischer Dienst NRW, 2011). Im Gegensatz zu den meisten anderen Nutzungsansprüchen ist der Abbau von Rohstoffen standortgebunden und kann nur an spezifischen Orten stattfinden. Daher steht diese Form der Raumnutzung im

Wettbewerb zu anderen räumlichen Nutzungsformen. Es ist Aufgabe der Politik ein Gleichgewicht zu finden, das den verschiedenen Nutzungsansprüchen gerecht wird, gleichzeitig aber auch die rohstoffliche Versorgung sichert und ökonomisch wie ökologisch und sozial sinnvoll ist, indem sie die verschiedenen Optionen abwägt (Geologischer Dienst NRW, 2011).

Der Ursprung der Wertschöpfungsketten des industriellen Netzwerks geht auf die lokalen Rohstoffvorkommen zurück (Flecke et al., 2021). Die Entwicklung der in diese Wertschöpfungsketten einfließenden Materialien nach Materialkategorie zeigt Abbildung 3-2.

Abbildung 3-2: NRW's verwertete inländische Entnahme

Angaben in 1.000 Tonnen



*Erze werden in geringeren Mengen abgebaut: 1994: 146, 1995: 69, 1996: 104, 1997: 201, 1998: 605, 1999: 615, 2000: 462, 2001: 407, 2002: 419, 2003: 429, 2004: 412, 2005: 362, 2006: 412, 2007: 422, 2008: 455, 2009: 364, 2010: 390, 2011: 489, 2012: 444, 2013: 411, 2014: 451, 2015: 461, 2016: 464, 2017: 447, 2018: 442, 2019: 525, 2020: 525.

Quelle: UGRdL, 2022a

Insgesamt ist zu erkennen, dass die verwertete inländische Entnahme abnimmt. Wurden 1994 noch knapp 300 Millionen Tonnen Rohstoffe abgebaut, so waren es im Jahr 2020 lediglich rund 176 Millionen Tonnen. Es ist zudem erkennbar, dass ein Rückgang bei der Entnahme von fossilen Energieträgern stattfindet. Die Förderung von Erzen hingegen, die verglichen mit den anderen Materialien sehr gering ist, weist eine steigende Tendenz auf (1994: 146.000 Tonnen, 2020: 525.000 Tonnen). Sonstige mineralische Rohstoffe, die in NRW abgebaut werden, sind überwiegend Baumineralien, wie zum Beispiel Bausande und natürliche Steine. Die hier erfasste Biomasse bezieht sich auf drei Quellen: Biomasse aus der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft und der Fischerei und Jagd. Dabei macht die Biomasse aus der Landwirtschaft mit rund 90 Prozent den größten Anteil aus.

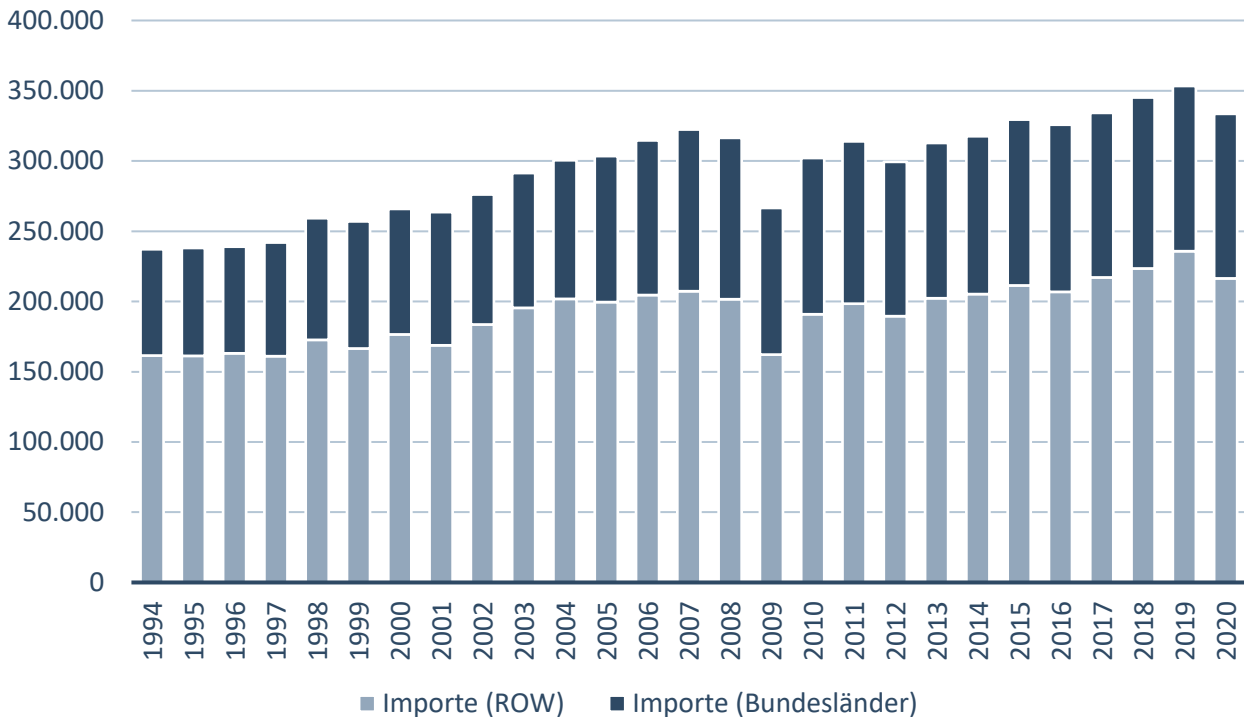
Importe

Da das lokale Vorkommen an natürlichen Rohstoffen den Bedarf des Systems in der Regel nicht gänzlich abdeckt, werden Materialien aus anderen Systemen importiert. Importe werden in der Materialbilanz in erster Instanz nach ihrer Herkunft, das heißt aus dem Rest der Welt (ROW) oder anderen Bundesländern, unterschieden. In zweiter Instanz unterscheiden sich die Importe nach ihrer Materialklassifizierung. Importe aus dem Rest der Welt werden zunächst nach dem Fertigungsgrad in Rohstoffe, Halbwaren und Fertigwaren sowie in sonstige Waren und Güter und Abfälle unterteilt. Diese wiederum werden, wo möglich, in den Hauptmaterialkategorien (Fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe, Biomasse) angegeben. Importe aus anderen Bundesländern werden aufgrund der Datenverfügbarkeit lediglich in abiotische und biotische Güter sowie Abfälle unterteilt. Die Mengen werden in physischen Tonnen ausgewiesen. Allerdings ist zu beachten, dass auf NRW-Ebene für die angegebenen Mengen von Halb- und Fertigwaren nicht die in anderen Systemen für deren Herstellung verbrauchten Materialien abgebildet sind. Importe enthalten daher einen indirekten Materialbedarf, der nur schwer zu ermitteln ist und zum Teil anhand von Rohstoffäquivalenten berücksichtigt werden kann (Fernandez/Schütz, 2015; Krausmann et al., 2017; Eurostat, 2018a). Für NRW lassen sich derzeit mit den öffentlich zugänglichen Daten die Rohstoffäquivalente für Handelsströme nicht ermitteln (Fernandez/Schütz, 2015). Aus der Darstellung der Importe (und Exporte) nach Fertigungsgrad kann dennoch ein grobes Bild über die tatsächlichen Rohstoffbedarfe abgeleitet werden. Es gilt: je geringer der Fertigungsgrad, desto näher kommt das Gewicht des Produkts an die für seine Fertigung aufgebrauchten Materialentnahmen. Für die Importe (ROW) von Rohstoffen, kann also davon ausgegangen werden, dass die angegebenen Mengen relativ nah am tatsächlichen Wert liegen, wohingegen mit zunehmender Verarbeitung auch die Diskrepanz zwischen Gewicht des Produktes und für seine Herstellung verwertete Materialien steigt (Eurostat, 2018a).

Abbildung 3-3 zeigt die Entwicklung der Importe nach NRW entsprechend ihrer Herkunft. Es zeigt sich, dass knapp doppelt so viele Importe aus der restlichen Welt stammen im Vergleich zu Importen aus anderen Bundesländern. Dies ist dadurch zu erklären, dass die inländischen Rohstoffvorkommen, die derzeitige Rohstoffnachfrage nicht abdecken. Nicht nur mengenmäßig, sondern vor allem auch in Bezug auf die Rohstoffart ist auch NRW auf Importe aus anderen Systemen angewiesen. Insgesamt weisen die Importe einen steigenden Trend seit 1994 auf.

Abbildung 3-3: Importe nach NRW nach Herkunft

Angaben in 1.000 Tonnen

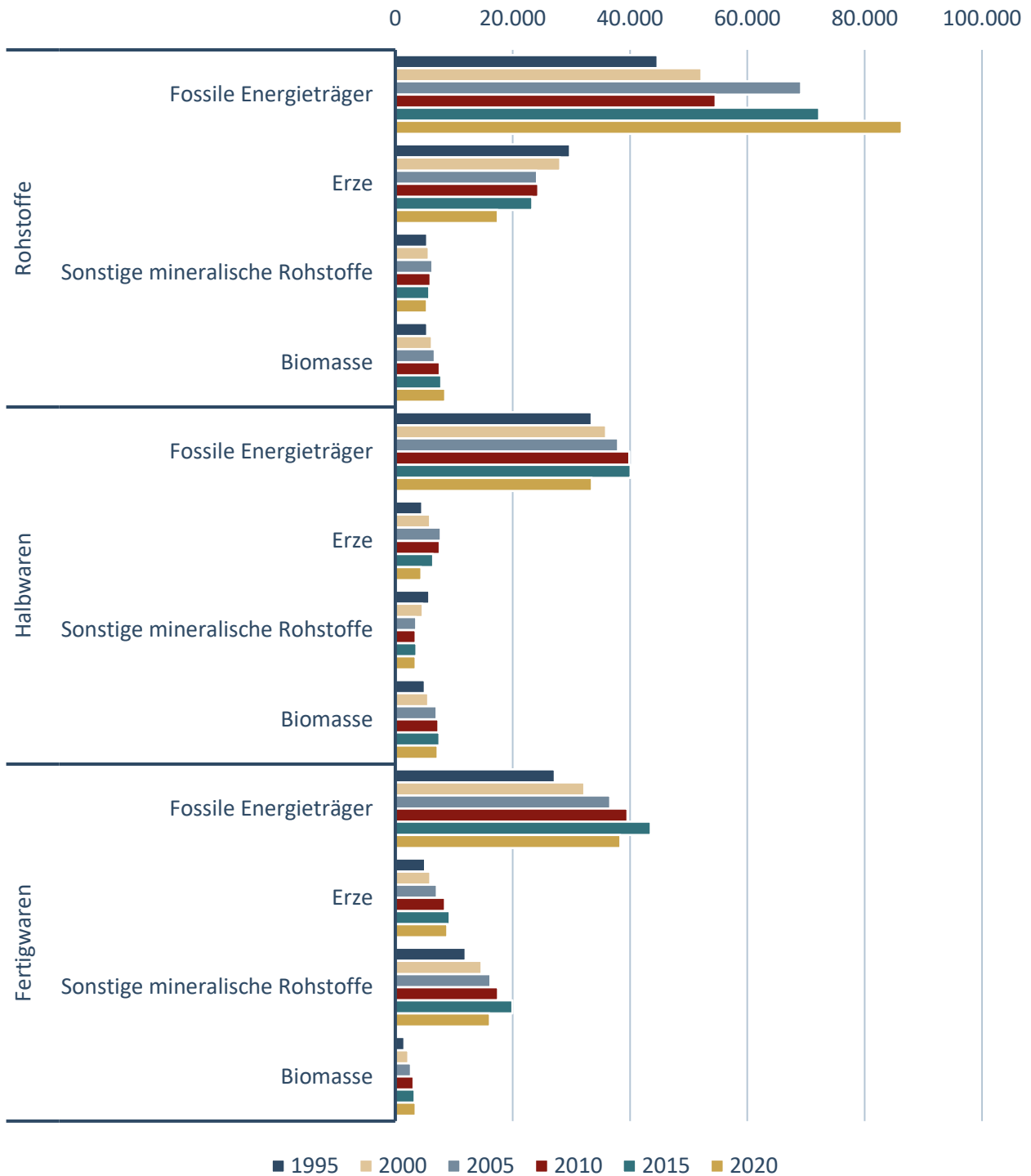


Quelle: UGRdL, 2022a

Betrachtet man die Importe aus dem Rest der Welt nach Fertigungsgrad, so zeigt sich vor allem eine Erhöhung der importierten Menge von fossilen Energieträgern als Rohstoff (Abbildung 3-4). Waren es 1994 noch rund 50 Millionen Tonnen, so stieg die Menge bis 2020 auf knapp 90 Millionen Tonnen. Im Zusammenhang mit der Abnahme der Menge der inländischen Entnahme von fossilen Energieträgern in NRW deutet dies auf Substitutionsvorgänge hin, was auch eine Verlagerung der direkten und indirekten Umweltauswirkungen, die durch den Rohstoffabbau und -transport verursacht werden, ins Ausland bedeutet (Fluchs et al., 2022b). Diese Entwicklung erklärt, weshalb unter anderem auf politischer Ebene die Notwendigkeit der Senkung der Rohstoffabhängigkeit Deutschlands und Europas von anderen Ländern diskutiert wird.

Abbildung 3-4: Entwicklung der Importe (ROW) nach NRW nach Fertigungsgrad

Angaben in 1.000 Tonnen



Quelle: UGRdL, 2022a

Ein weiterer Trend ist die Zunahme importierter Abfälle. Sowohl aus dem ROW als auch aus anderen Bundesländern werden zunehmend Abfälle für die finale Behandlung und Entsorgung importiert. Diese importierten Abfallmengen werden zum Großteil (2020: 79 Prozent) der Verwertung, wie zum Beispiel der energetischen Verwertung, zugeführt. Der restliche Teil (2020: 21 Prozent) wird Beseitigungsverfahren, wie zum

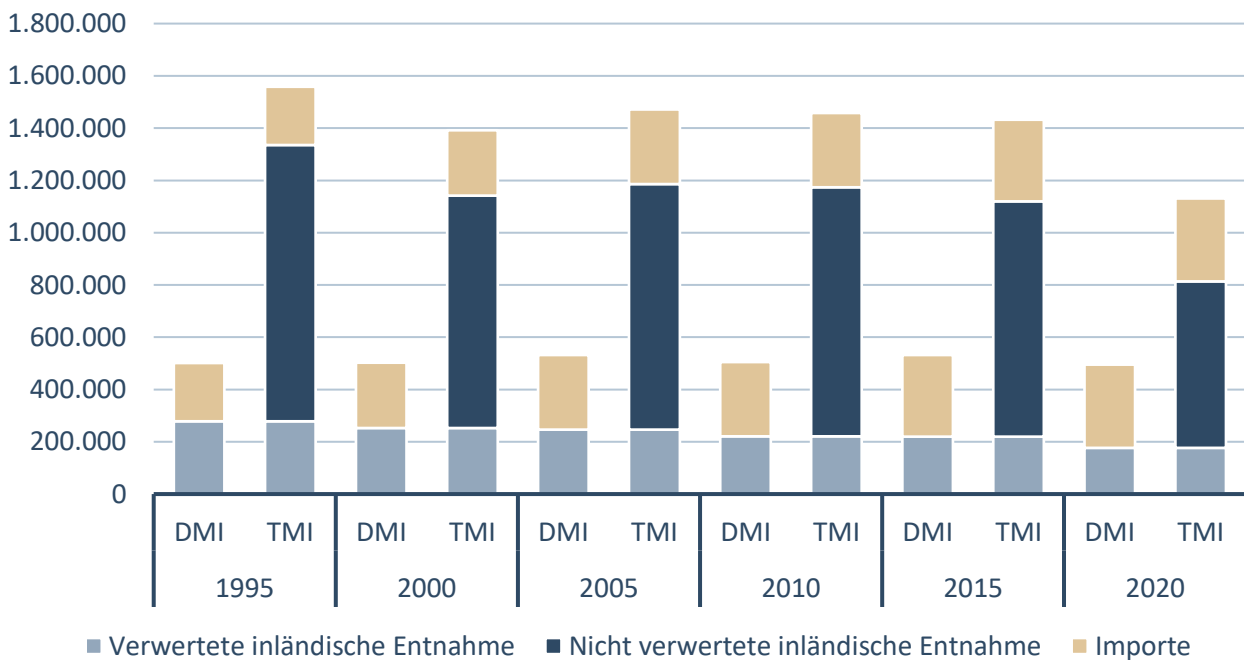
Beispiel der Deponierung, zugeführt (MULNV NRW., 2022). NRW verfügt für die Behandlung und Entsorgung von Abfällen über eine leistungsfähige und differenzierte Entsorgungsinfrastruktur (MKULNV NRW, 2015).

Materialeinsatz

Die Summe der Inputs in das System bildet den Indikator für den Materialeinsatz des Systems ab. Je nach Umfang der Betrachtung fallen darunter verschiedene Positionen der zuvor beschriebenen Input-Indikatoren. Der direkte Materialeinsatz (Englisch: direct material input) (DMI) ergibt sich aus der Summe der verwerteten inländischen Entnahme und den gesamten Importen. Dieser Indikator vernachlässigt jedoch die nicht verwertete inländische Entnahme, die insbesondere bei der Analyse von direkten Auswirkungen wirtschaftlichen Handelns (wie den Abbauprozessen) auf die Umwelt, zum Beispiel durch Wasserverschmutzung, Landnutzungsänderungen und der Freisetzung von Treibhausgasen, von Bedeutung ist (Krausmann et al., 2017). Daher lässt sich mit dem Indikator für den gesamten Materialeinsatz (Englisch: total material input) (TMI) ein Abbild über den tatsächlichen materiellen Einsatz in das System darstellen. Dieser Indikator lässt sich erweitern: Gesetzt den Fall, dass sich der indirekte Rohstoffbedarf der Importe ermitteln lässt, kann die tatsächliche Menge des benötigten Materials für den inländischen Stoffwechsel mit dem TMR (Englisch: total material requirement) Indikator berechnet werden. Dies ist für das Land NRW nicht der Fall. Abbildung 3-5 zeigt die beiden bestimmbaren Indikatoren im Vergleich. Während der TMI-Indikator über die Zeit entsprechend des Rückgangs, der nicht verwerteten inländischen Entnahme sinkt, bleibt der DMI-Indikator auf einem relativ konstanten Niveau um die 500 Millionen Tonnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die nicht verwertete inländische Entnahme wiederum entsprechend mit der sinkenden verwerteten inländischen Entnahme (Abbildung 3-1) abnimmt, während die Importe zunehmen.

Abbildung 3-5: Der direkte Materialeinsatz im Vergleich zum gesamten Materialeinsatz in NRW

Angaben in 1.000 Tonnen



DMI: Direkter Materialeinsatz, TMI: Gesamter Materialeinsatz

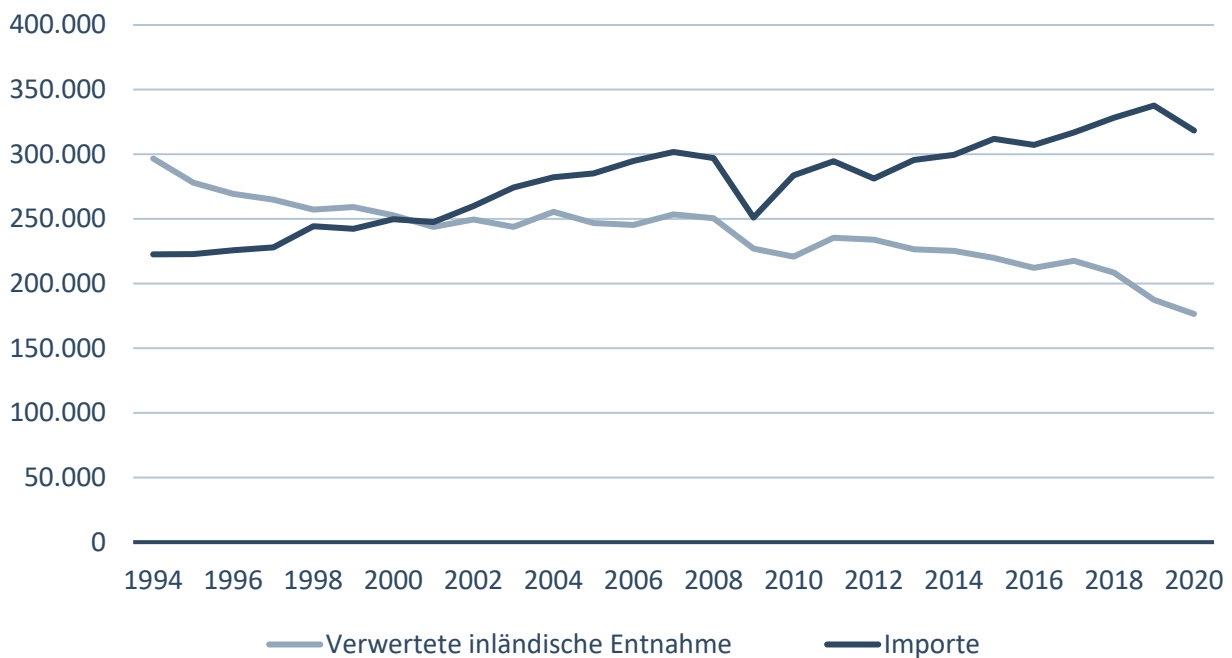
Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a

Für die weitere Analyse des Systems ist vor allem die Entwicklung des direkten Materialeinsatzes wichtig, da die nicht verwertete inländische Entnahme methodisch so behandelt wird, dass sie nicht in die Wertschöpfung des Systems einfließt. Abbildung 3-6 zeigt daher den Zusammenhang der inländischen Entnahme und den Importen im Zeitverlauf.

Der Zusammenhang zwischen verwerteter inländischer Entnahme und Importen kann Informationen darüber geben, inwiefern Verlagerungen der inländischen Umweltbelastungen in andere Systeme stattfinden. Wie in Kapitel 2.1 erklärt, ist der Ort der Entnahme ein Einflussfaktor für die Intensität und das Ausmaß der Auswirkungen auf die Umwelt. Direkte Auswirkungen treten am Ort der Entnahme auf, sodass sich mit einer Substitution der inländischen Entnahme durch importierte Materialien auch die direkten Umweltauswirkungen in andere Systeme verlagern. Die Darstellung der Komponenten des DMI in NRW seit 1994 zeigt diese Verlagerung. Um die Jahrtausendwende erfolgte die Ablösung der inländischen Entnahme durch Importe als Hauptquelle eingesetzter Materialien.

Abbildung 3-6: Entwicklung von NRW's verwerteter inländischer Entnahme und Importen nach NRW

Angaben in 1.000 Tonnen



Quelle: UGRdL, 2022a

3.2 Outputs

Kernaussagen:

- **Abgaben an die natürliche Umwelt:** Die Datengrundlage für die inländische verarbeitete Abgabe in NRW weist erhebliche Lücken auf. Auch werden Abfälle nur begrenzt ausgewiesen, was die Berechnung der entsprechenden Indikatoren auf Bundeslandebene erschwert.
- **Exporte:** NRW exportiert in den letzten Dekaden gleichbleibende Mengen Material in andere Bundesländer, während die Exporte in den Rest der Welt steigen. Insgesamt sind die Exporte seit 1994 um rund 30 Prozent gestiegen: Darunter vor allem der Export fossiler Energieträger als Rohstoffe.
- **Materialabgabe:** Während die inländische verarbeitete Abgabe und die Abgabe von nicht verwerteter inländischer Entnahme in NRW seit 1994 sinken, steigen die Exporte.

Abgaben an die natürliche Umwelt

Abgaben an die natürliche Umwelt können aus Produktions- beziehungsweise Verbrauchsprozessen innerhalb des betrachteten Systems oder aus dem nicht verwerteten Material stammen. Abgaben an die Natur aus der Verarbeitung von Material wird als inländische verarbeitete Abgabe (DPO) zusammengefasst. Es werden Emissionen in die Luft und in das Wasser, dissipative Flüsse sowie Abfälle betrachtet. Dissipative Flüsse sind Stofffreisetzungen in die Umwelt, die entweder im Zusammenhang mit Produktanwendungen stehen, wie es beispielsweise bei Streusalz oder Düngemitteln der Fall ist, oder nicht beabsichtigt sind, wie zum Beispiel der Abrieb von Fahrzeugreifen (Eurostat, 2018a). Auch die nicht verwertete inländische Entnahme verlässt das System wieder auf der Output-Seite. In der UGRdL wird diese Position als reiner Durchlaufposten behandelt, die Entnahme entspricht also der Abgabe. Dieser Materialfluss wird in diesem Papier als DUDE-Indikator (Englisch: disposal of unused domestic extraction) erfasst. Darunter fällt in NRW unter anderem der Abraum aus der Förderung von primären Rohstoffen, welcher zum Beispiel zur späteren Schließung der Abbaustellen verwendet werden kann (Geologischer Dienst, 2011; MKULNV NRW, 2015). Ihr Umfang ist wie der des UDE-Indikators hoch (UGRdL, 2021b).

Insbesondere für die inländische verarbeitete Abgabe weist die Datengrundlage Lücken auf. Vor allem für die Emissionen in die Luft und in das Abwasser sind die Daten derzeit nicht in der UGRdL erfasst. Auch Werte für die Abfälle an die Natur sind nicht vollständig ausgewiesen. Unter anderem ist dies mit einer Zeitverzögerung der Publikation der Daten zu begründen, es gibt allerdings auch Werte, die bisher auf Landesebene nicht erhoben werden (UGRdL, 2019b). So sind beispielsweise Luftschadstoffe, welche unter den Abgaben an die Luft eingeordnet werden, als „unbekannt oder geheim zu halten“ gekennzeichnet (UGRdL, 2022a). Um Aussagen über die Abgaben NRW's zu treffen, sind daher einige ergänzende Erklärungen notwendig.

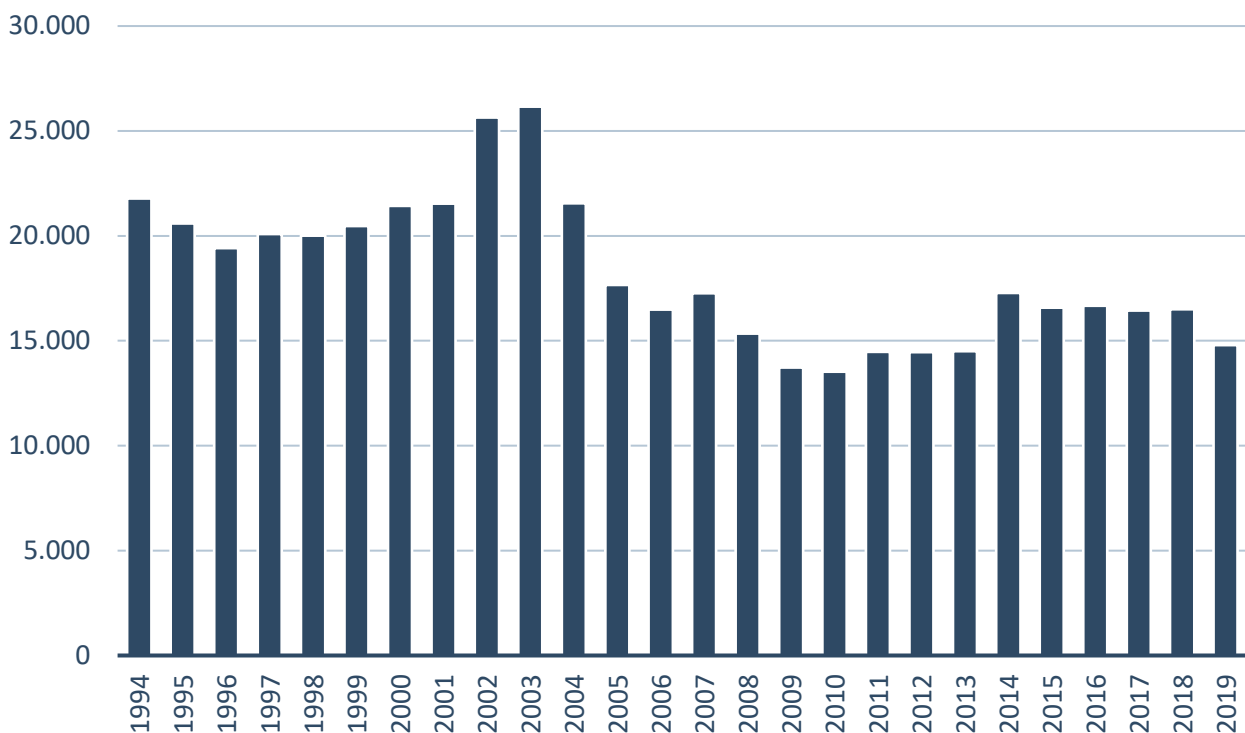
Zunächst müssen die in der UGRdL ausgewiesenen Abgaben an die Natur um die Ausgleichselemente der Output-Seite (BO) korrigiert werden. Sie dienen dem Ausgleich der Materialbilanz, wenn beispielsweise Energieträger auf der Input-Seite Wasser enthalten, das durch Verbrennungsprozesse im System als Wasserdampf freigesetzt wird. Da dieser Indikator eine nicht unerhebliche Menge der Abgaben der Systembilanz ausmacht (für das Jahr 2019 betrug der ermittelte Wert für die BO 157 Millionen Tonnen) (UGRdL, 2022a), hat die Korrektur des DPO um die BO einen Einfluss auf die Gewichtung der anderen Komponenten dieses Indikators (Eurostat, 2018a). So fällt in NRW im Jahr 2019 der Anteil der energiebedingten Treibhausgase an

den anhand der verfügbaren Daten ermittelbaren DPO inklusive BO mit 53 Prozent deutlich geringer aus als für die DPO exklusive BO (83 Prozent).

Des Weiteren werden Abfälle in NRW nur begrenzt ausgewiesen. Vor allem aber werden sie als eine Teilmenge des im System verbleibenden Materials betrachtet, sofern sie in inländischen Deponien entsorgt werden. Daher werden sie in der Bilanz nicht im DPO-Indikator mit aufgenommen, sondern als Zuwachs des inländischen physischen Materialbestandes betrachtet (UGRdL, 2019b; Destatis, 2019). Abbildung 3-7 zeigt die Menge an deponierten Abfällen in NRW von 1994 bis 2019. Die Beseitigung von Abfällen auf Deponien unterliegt auch in NRW den Anforderungen der Deponieverordnung (DepV), die besagt, dass sich die Ablagerung von Abfällen auf Deponien auf Abgaben aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen⁴ sowie direkt ablagerungsfähigen Abfällen beschränkt. Darunter zählen die aus Siedlungsabfällen verbleibende Deponiefraktion sowie im Wesentlichen Bau- und Abbruchabfälle (MKULNV NRW, 2015). Im Jahr 2019 betrug die auf Deponien beseitigte Menge an Abfällen knapp 15 Millionen Tonnen (UGRDL, 2022a).

Abbildung 3-7: Abfälle an Deponien in NRW

Angaben in 1.000 Tonnen



Daten für das Jahr 2020 liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit (November 2022) nicht vollständig vor.

Quelle: UGRdL, 2022a

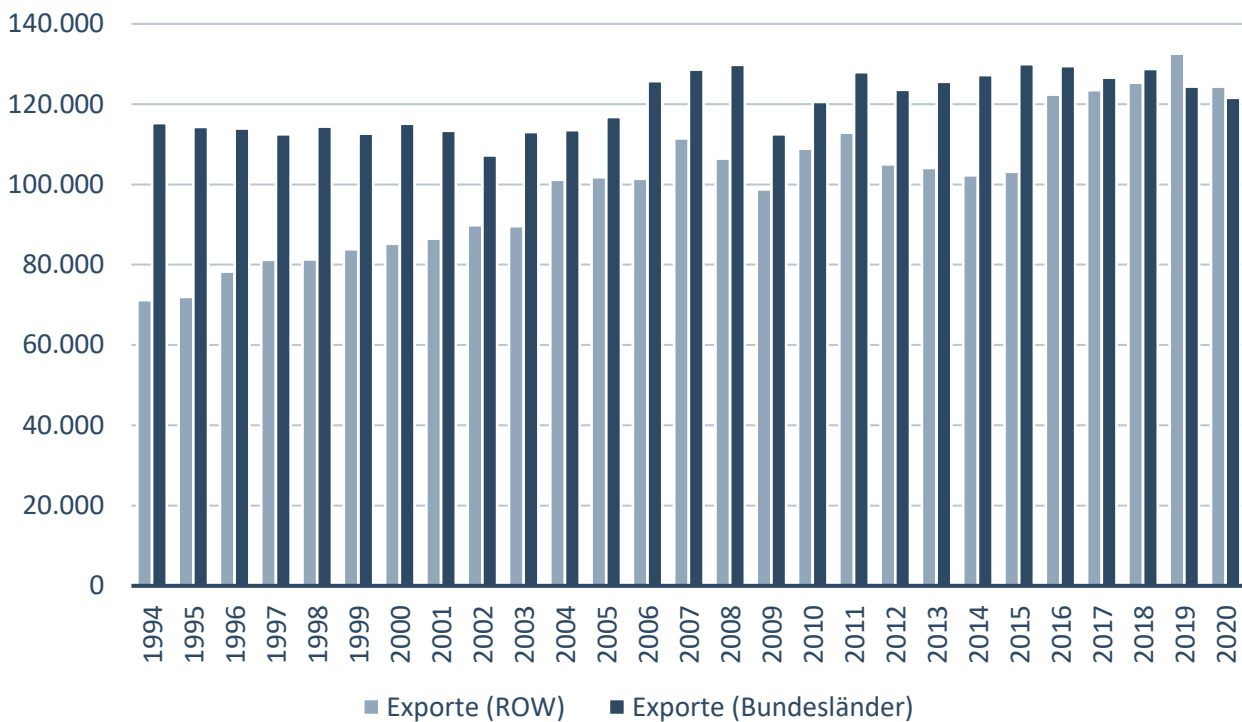
⁴ In mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) werden Siedlungs- und Gewerbeabfälle behandelt. Zunächst werden Metalle und heizwertreiche Bestandteile für die energetische Verwertung getrennt. In einem weiteren Schritt wird der verbleibende Rest, die sogenannte Deponiefraktion, erst biologisch behandelt, in der Regel durch Rotte und Vergärung, bevor sie den Deponien zugeführt werden (UBA, 2015).

Exporte

Exporte werden in der Materialbilanz wie die Importe erfasst. Lediglich Daten über Exporte von Abfällen werden derzeit nicht erhoben. Auch auf der Abgabeseite gilt die Annahme, dass indirekte Materialflüsse mit Exporten einhergehen. Diese lassen sich für NRW nicht bestimmen. Abbildung 3-8 zeigt die Entwicklung der Exporte nach Destinationen aus NRW. Es zeigt sich, dass die Exporte in andere Bundesländer nur leichte Schwankungen aufweisen, wohingegen die Exporte in den Rest der Welt im Zeitverlauf zunehmen. Insgesamt sind die Exporte seit 1994 um circa 30 Prozent gestiegen.

Abbildung 3-8: NRWs Exporte nach Destinationen

Angaben in 1.000 Tonnen

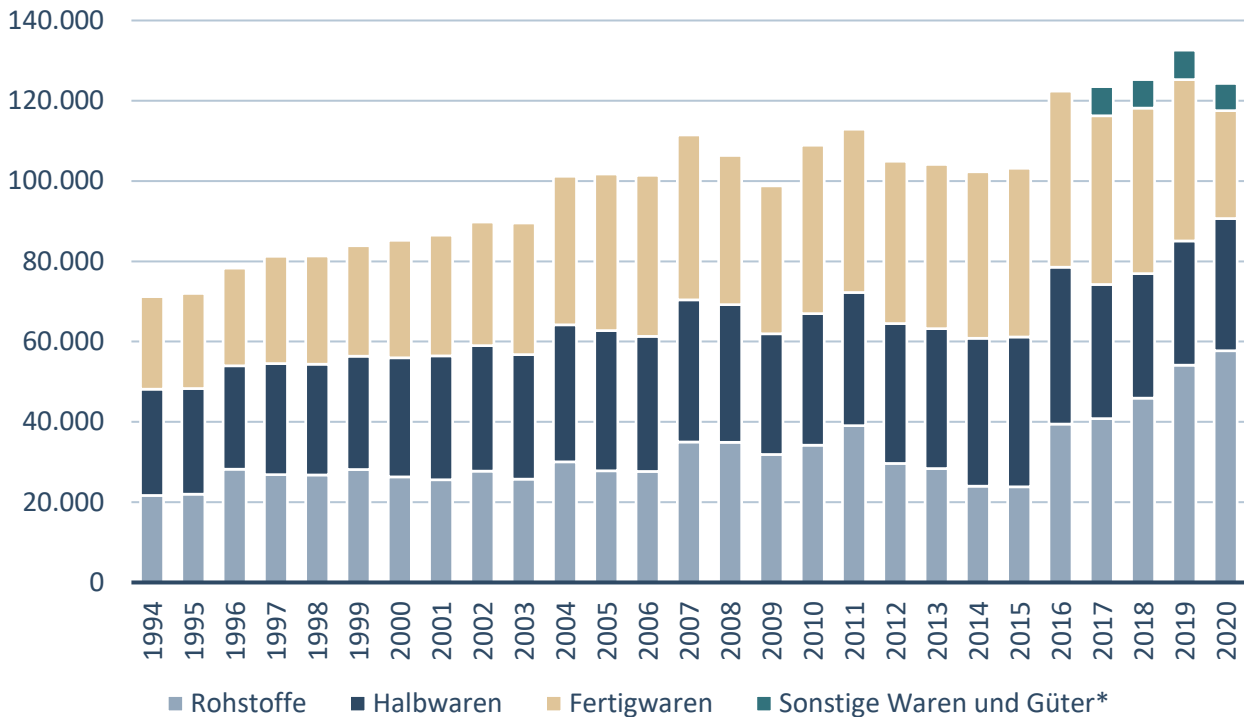


Quelle: UGRdL, 2022a

Abbildung 3-9 zeigt die Zusammensetzung der Exporte in den Rest der Welt nach Materialkategorie. Vor allem der Export von Rohstoffen – auch hier sind es vor allem fossile Energieträger – entwickelt sich zunehmend. Waren es 1994 noch rund 22 Millionen Tonnen, so sind für das Jahr 2020 circa 58 Millionen Tonnen erfasst.

Abbildung 3-9: NRW's Exporte (ROW) nach Materialkategorie

Angaben in 1.000 Tonnen



*Daten über Sonstige Waren und Güter werden erst seit 2017 erhoben.

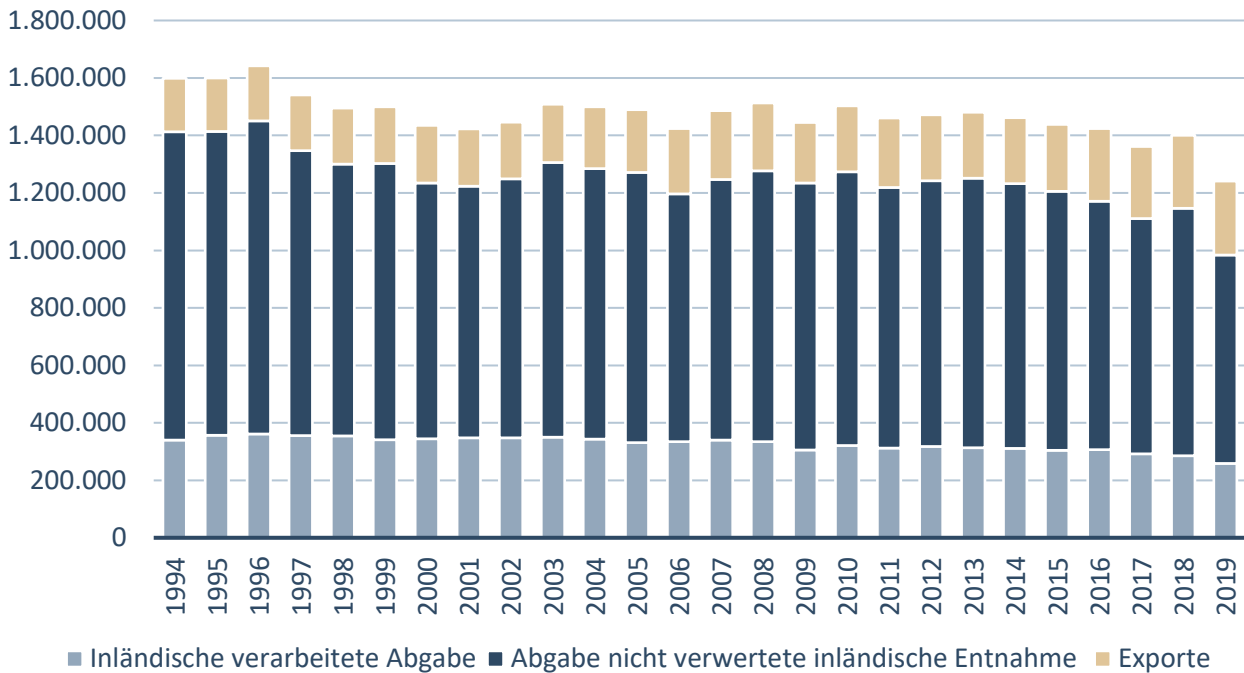
Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a

Materialabgabe

Die Summe der Outputs kann mit dem Indikator für die gesamte inländische Materialabgabe (Englisch: total material output) (TMO) abgebildet werden. Darin enthalten ist zum einen die direkte Materialabgabe (Englisch: direct material output) (DMO), also die Summe aus der inländischen verarbeiteten Abgabe und den Exporten sowie die Abgabe der nicht verwerteten inländischen Entnahme. Abbildung 3-10 zeigt die gesamte inländische Abgabe anhand der unterschiedlichen Indikatoren im Zeitverlauf. Während die inländische verarbeitete Abgabe und die Abgabe von nicht verwerteter inländischer Entnahme sinken, steigen die Exporte.

Abbildung 3-10: Zusammensetzung der gesamten inländischen Materialabgabe von NRW nach Indikatoren

Angaben in 1.000 Tonnen



Daten für das Jahr 2020 liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung (November 2022) nicht vollständig vor. Die inländische verarbeitete Abgabe enthält keine Angaben über Luftschadstoffe.

Quelle: UGRdL, 2022a

3.3 Verbrauch und Bestandsänderungen

Kernaussagen:

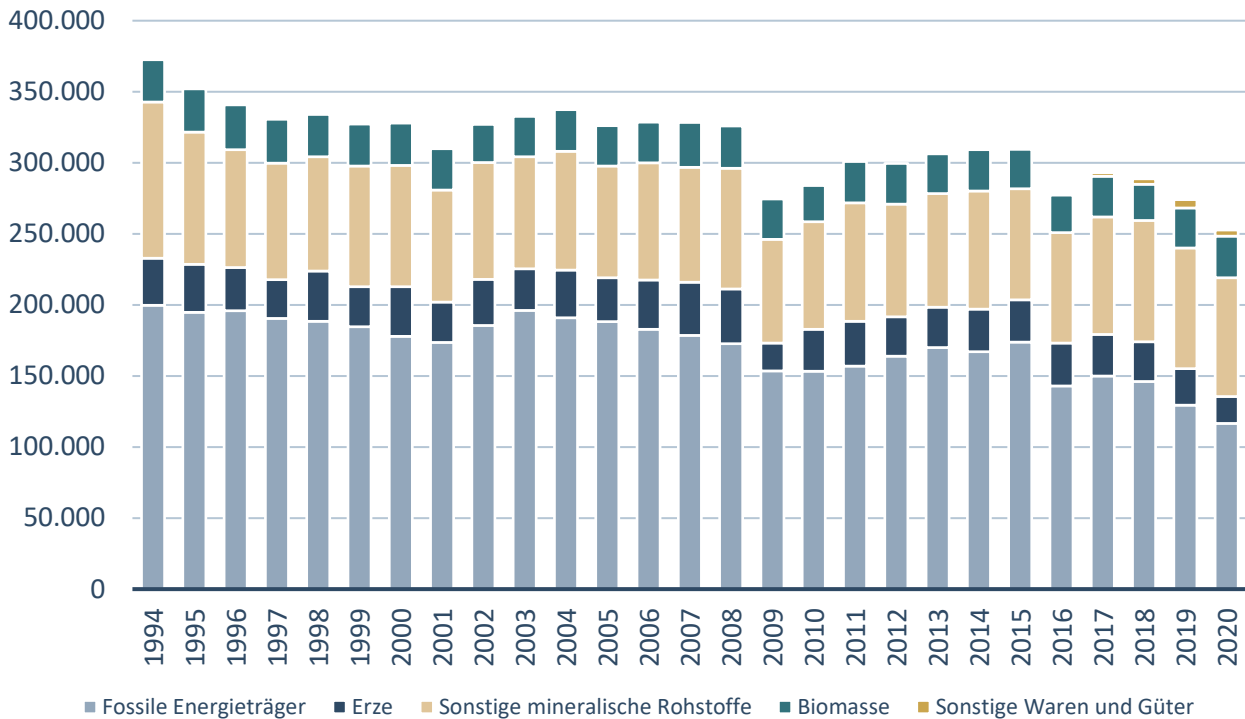
- Verbrauch:** Die Menge an inländisch verbrauchtem Material folgt in NRW seit 1994 einem abnehmenden Trend. Der inländische Materialverbrauch fossiler Energieträger und sonstigen mineralischen Rohstoffen beträgt mehr als die Hälfte des gesamten Verbrauchs.
- Bestandsänderungen:** Eingehende Materialien verbleiben oft in Form von Infrastruktur oder langlebigen Gütern eine gewisse Zeit im System, bevor sie es wieder verlassen. Die Datenverfügbarkeit auf NRW-Ebene erlaubt eine quantitative Analyse der entsprechenden Indikatoren zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nicht.

Verbrauch

Der Indikator für den inländischen Materialverbrauch, der DMC-Indikator, aggregiert die Gesamtmenge der direkt in der Wirtschaft verwendeten Materialien. Er ergibt sich aus dem direkten Materialeinsatz abzüglich der gesamten Exporte. Dieser Indikator ließe sich ebenfalls mit den für Im- und Exporte ermittelten Werten in Rohstoffäquivalenten bestimmen (RMC) (Englisch: Raw material consumption). Für NRW lässt sich derzeit nur der DMC bestimmen. Die Menge an inländisch verbrauchtem Material zeigt einen abnehmenden Trend (Abbildung 3-11). Im Jahr 2020 beträgt der inländische Materialverbrauch rund 249 Millionen Tonnen, rund ein Viertel weniger als noch 1994 (333 Millionen Tonnen). Dabei macht der Verbrauch an fossilen Energieträgern und sonstigen mineralischen Rohstoffen mehr als die Hälfte des gesamten Verbrauchs aus.

Abbildung 3-11: NRWs inländischer Materialverbrauch

Angaben ohne Handel zwischen Bundesländern und ohne Abfallströme, in 1.000 Tonnen



Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a

Bestandsänderungen

Neben dem direkten Verbrauch können die in sozioökonomische Systeme eingehenden Materialien zunächst im System verbleiben, bevor sie es wieder verlassen. Materialien werden unter anderem in Form von Gebäuden, Infrastruktur oder langlebigen Gütern (zum Beispiel Autos, Maschinen oder Haushaltsgeräte) für einen längeren Zeitraum gebunden. Alte Materialien werden aus dem Bestand entfernt, wenn zum Beispiel Gebäude abgerissen oder langlebige Güter entsorgt werden (UGRdL, 2019b).

Im Materialkonto wird der Nettozuwachs zum inländischen physischen Materialbestand mit dem NAS-Indikator erfasst (Eurostat, 2018a; UGRdL, 2019b). Theoretisch ergibt sich der Nettobestandszuwachs aus der Differenz des direkten Materialeinsatzes und der direkten Materialabgabe zuzüglich des Saldos der Ausgleichselemente der In- und Output-Seite ($DMI + BI - DMO - BO$) (Eurostat, 2018a). Statistisch ist dieser Ansatz allerdings schwer umzusetzen, wie am Beispiel der deponierten Abfälle aus Kapitel 3.2 deutlich wird. Die genauere Untersuchung dieses Indikators kann jedoch Aufschluss über den Umfang und die Zusammensetzung des anthropogenen Lagers des Systems geben und so Potenziale für sekundäre Rohstoffquellen identifizieren.

3.4 Produktivität und Zirkularität

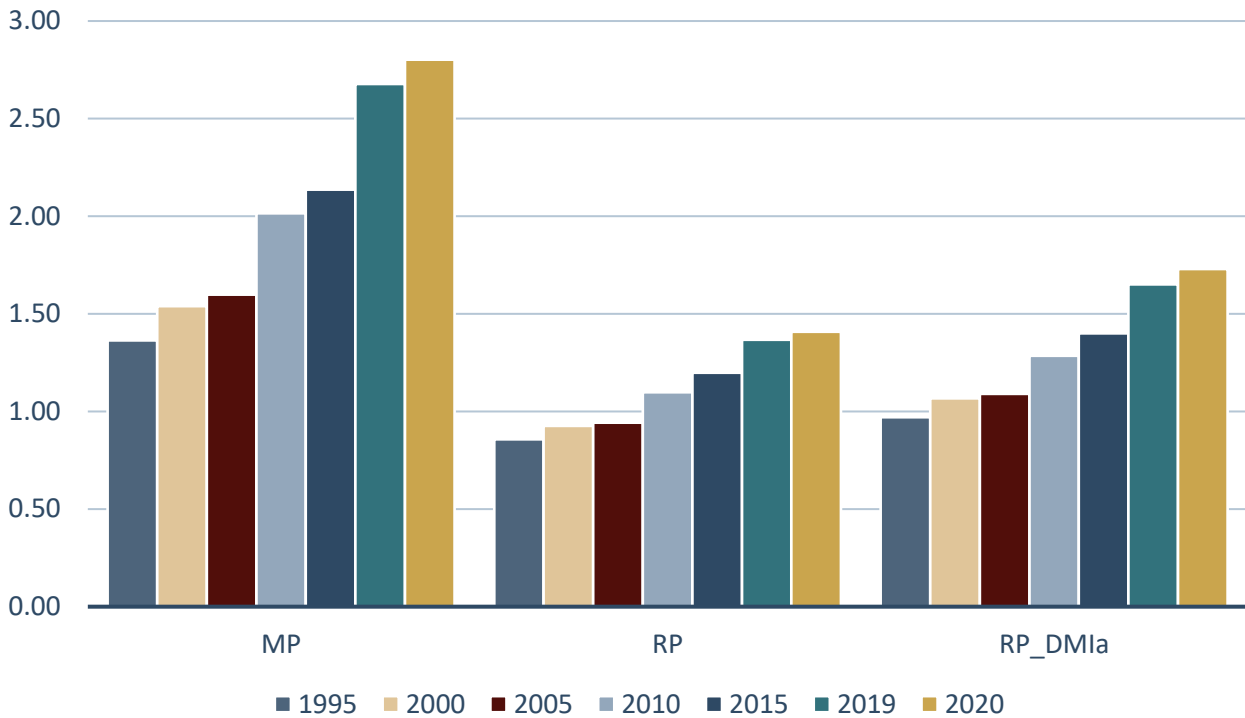
Kernaussagen:

- **Produktivität:** Die verschiedenen Indikatoren, die die Ressourcenproduktivität von NRW abbilden, weisen einen steigenden Trend im Zeitverlauf auf. Obwohl die Ressourcenproduktivität und das Bruttoinlandsprodukt steigen, bleibt der direkte Materialeinsatz auf einem konstanten Niveau, was bedeutet, dass keine absolute Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Materialeinsatz stattfindet.
- **Zirkularität:** Die Zirkularitätsrate der Materialnutzung gibt das Verhältnis aus wiedergewonnenen und in die Wirtschaft zurückfließenden Materialien zum gesamten Materialverbrauch an. Aufgrund der unvollständigen Datenlage hinsichtlich der Abfälle in NRW, kann der Indikator auf Bundeslandebene derzeit nicht bestimmt werden.

Produktivität

Bei der Bestimmung der Produktivität des Rohstoffverbrauchs eines Systems zeigen sich die Auswirkungen der mäßigen Datenverfügbarkeit und methodischen Besonderheiten in besonderem Ausmaß. Zu den Indikatoren, die zur Abbildung der Ziele der Kreislaufwirtschaft im Mittelpunkt stehen, gehört die Ressourcenproduktivität. Anhand der Produktivitäts-Indikatoren lässt sich ein Zusammenhang zwischen der wirtschaftlichen Aktivität eines Systems und seinem Materialverbrauch herstellen, indem bestimmt wird wie viel BIP durch eine Einheit des verbrauchten Materials erzeugt wird. Das BIP im Verhältnis zum inländischen Materialverbrauch (BIP/DMC) kann als Materialproduktivität (MP) zusammengefasst werden. Dieser Indikator deckt allerdings nicht alle zur Wertschöpfung beitragenden Positionen ab, denn die Exporte werden aus dem DMC-Indikator rausgerechnet. Die Ressourcenproduktivität kann auch durch das Verhältnis vom BIP zum direkten Materialeinsatz (BIP/DMI) bestimmt werden. Anders als beim MP-Indikator schließt dieser Ressourcenproduktivitätsindikator (RP) auch die Exporte mit ein. In der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie findet der RP-Indikator bereits Anwendung, allerdings werden lediglich die abiotischen Rohstoffe des direkten Materialeinsatzes (DMIa) betrachtet (Destatis, 2019; Bundesregierung, 2021). Biotische Rohstoffe werden als bereits nachhaltig eingestuft. Diese Abstufung des RP-Indikators wird als RP_DMIa bezeichnet.

Abbildung 3-12 bildet die verschiedenen Produktivitätsindikatoren im Vergleich ab. Da der MP-Indikator die Exporte ausschließt, wird den restlichen Materialflüssen eine höhere Bedeutung beigemessen, als sie tatsächlich erwirtschaften. Der Unterschied zwischen den beiden RP-Indikatoren (RP und RP_DMIa) entspricht der Summe an biotischen Materialflüssen des direkten Materialeinsatzes, die im Jahr 2020 einen Anteil von 16 Prozent ausmachten (UGRdL, 2022a). Insgesamt zeichnet sich bei allen Indikatoren ein steigender Trend der Produktivität ab. Es ist jedoch zu beachten, dass die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt ist. Dies ist unter anderem darauf zu führen, dass Produktivitäts-Indikatoren sämtliche Sektoren, die zur lokalen Wertschöpfung beitragen, gleichermaßen berücksichtigen und dabei ignorieren, dass Sektoren unterschiedlich ressourcenintensiv sind. Steigt zum Beispiel der Beitrag an der Wertschöpfung des Dienstleistungsbereichs kann dies zu einem höheren Ergebnis des Produktivitäts-Indikators führen, obwohl die Materialflüsse nicht verändert wurden. Vor allem im Vergleich zu anderen Systemen schneiden daher industrieintensive Systeme mit einem hohen Ressourceneinsatz bezogen auf die Ressourcenproduktivität schlechter ab (Biebeler/Lang, 2014).

Abbildung 3-12: Ressourcenproduktivität in NRW - Produktivitätsindikatoren im Vergleich


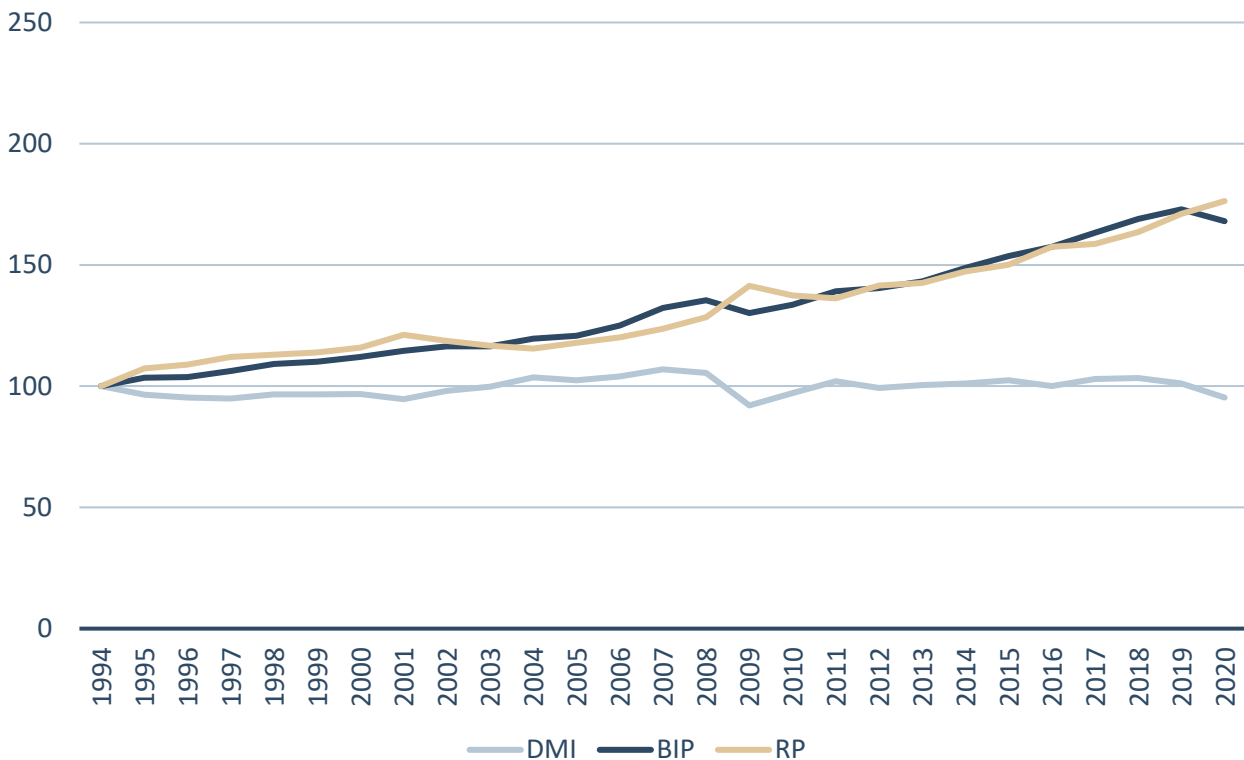
MP: Materialproduktivität des inländischen Materialverbrauchs (GDP/DMC); RP: Ressourcenproduktivität des direkten Materialeinsatzes (GDP/DMI); RP_DMla: Ressourcenproduktivität des abiotischen direkten Materialeinsatzes (GDP/DMIa)

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a und VGRdL, 2022

Um ein ganzheitliches Bild über die Materialflüsse NRW zu liefern, bezieht sich diese Arbeit auf den umfassenden RP-Indikator, der auf dem gesamten direkten Materialeinsatz (DMI) basiert. Dieser Indikator kann den Stand der Entkopplung des Wirtschaftswachstums eines Systems vom Verbrauch natürlicher Ressourcen veranschaulichen, denn je produktiver eine Einheit mit Material ist, desto weniger wird für die Erzeugung des BIP benötigt. Abbildung 3-13 zeigt die Entwicklung der Ressourcenproduktivität des direkten Materialeinsatzes. Es ist zu erkennen, dass die Ressourcenproduktivität und das Bruttoinlandsprodukt steigen, während der direkte Materialeinsatz auf einem konstanten Niveau bleibt (siehe auch Kapitel 3.1). Für die absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Materialeinsatz müsste der DMI sinken.

Abbildung 3-13: Entwicklung der Ressourcenproduktivität auf Basis des direkten Materialeinsatzes in NRW

Index 1994 = 100



DMI: Direkter Materialeinsatz, BIP: Bruttoinlandsprodukt, RP: Ressourcenproduktivität

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a und VGRdL, 2022

Zirkularität

Der methodische Rahmen der EW-MFA von Eurostat lässt sich in der Theorie um die Zirkularitätsrate der Materialnutzung (Englisch: circular material use rate) (CMU) erweitern (Eurostat, 2018b). Dieser Indikator bestimmt das Verhältnis aus wiedergewonnenen und in die Wirtschaft zurückfließenden Materialien zum gesamten Materialverbrauch. Für die Berechnung sind genaue Daten über die Menge und den Verbleib von sämtlichen anfallenden Abfällen erforderlich. Da die Datenlage hinsichtlich seiner Abfälle in NRW unvollständig ist, kann dieser Indikator für NRW derzeit nicht bestimmt werden. Die CMU kann näherungsweise den Anteil an Sekundärrohstoffen als Substitut für primäre Rohstoffe darstellen, was im Zusammenhang für das Erreichen einer Kreislaufwirtschaft wichtige Informationen liefert.

4 Kreislaufwirtschaftspolitik und ihre zugrunde liegende Rohstoffwirklichkeit

NRW hat die Transformation von einem energieintensiv geprägten Standort hin zur Klimaneutralität angestoßen. Auf dem Weg zählt der nachhaltige und effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen zu einem der wichtigsten Bestandteile. NRW setzt dabei auf eine Umsetzung der Kreislaufwirtschaft. Die Bedeutung der Ergebnisse der MFA hinsichtlich NRWs Entwicklung lässt sich durch ein Abgleichen der politischen Agenda mit der Rohstoffwirklichkeit greifen. Dieses Kapitel stellt diesen Zusammenhang vor.

4.1 Die Bedeutung von Materialflüssen für die Kreislaufwirtschaft

Kernaussagen:

- Angesichts der Vielfalt an unterschiedlichen interdependenten Strategien für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft, die auf unterschiedliche Stoffströme, Produkte und Standorte in der Wertschöpfung abzielen, ist es umso wichtiger Rahmenbedingungen zu schaffen, die gleichzeitig weit, aber auch präzise genug sind.
- Während die Kreislaufwirtschaft die Art und Weise des Wirtschaftens betrachtet und bestimmt, liefern Materialflüsse und deren Analysen Informationen über die biophysikalische Grundlage, auf der die Kreislaufwirtschaft aufbaut.

Die Kreislaufwirtschaft stellt einen Ansatz für zirkuläres Wirtschaften dar, mit dem Ziel eine gleichzeitige Reduzierung des Materialeinsatzes, des Abfallaufkommens sowie der Treibhausgasemissionen durch den effizienten Umgang mit Ressourcen zu erreichen. Dabei gilt es Ressourcen über den gesamten Lebenszyklus, also von der Rohstoffentnahme über das Produktdesign, die Produktion, die Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung, so lange wie möglich zu nutzen und ihren Wert zu erhalten (EMF, 2013; Geissdoerfer et al., 2017). Die Kreislaufwirtschaft kann durch unterschiedliche Strategien gefördert werden. So können beispielsweise durch Wiederverwendung und -verwertung sowie das Recycling von Produkten und Ressourcen Kreisläufe geschlossen werden und dadurch sowohl der Ressourceneinsatz als auch das Abfallaufkommen gesenkt werden (Haas et al., 2015; Neligan et al., 2021; Fluchs et al., 2022a).

Die Wichtigkeit effizienter Materialflüsse für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zeigt sich insbesondere durch die vergleichsweise junge Erkenntnis auf Bundesebene, dass eine Kreislaufwirtschaft nicht auf eine Abfallwirtschaft und das Recycling von Materialien reduziert werden kann. Sie birgt deutlich mehr Potenzial und integriert weitere wichtige Bausteine entlang des Produktlebenszyklus. Das Schließen von Kreisläufen ist nur eines von mehreren wichtigen Elementen einer Kreislaufwirtschaft. Die Rückführung von Materialien und Produkten, beispielsweise durch Wiederverwendung und -verwertung sowie Recycling, wird beispielsweise durch die strukturellen Herausforderungen fehlender Sekundärmaterialien erschwert. Zum einen ist dies durch die wachsende Nachfrage nach vielen Produkten begründet, die nicht ausschließlich durch Sekundärmaterial gedeckt werden kann. Zum anderen spielt das wachsende Materiallager eine Rolle (Haas et al., 2015). Daraus folgt, dass die Nutzung der Urbanen Minen ein weiterer Baustein in der Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft ist und, dass die Kenntnis und Analyse der Materialflüsse und -bestände im System ein wesentlicher Faktor im Rahmen der Umsetzung und tatsächlichen Realisierung einer Kreislaufwirtschaft sind (Fluchs et al. 2022b).

Eine wichtige Rolle im Rahmen der Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft spielt zudem die Energieerzeugung. Fossile Energieträger sind nicht kreislauffähig, weshalb ihr Einsatz auf ein Minimum reduziert beziehungsweise sie mittelfristig vollständig ersetzt werden müssen, um ein zirkuläres Wirtschaften umfassend umsetzen zu können (Haas et al., 2015). Aus diesem Grund sind die Substitution durch erneuerbare Energien sowie die Dekarbonisierung der Industrie wichtige Bausteine in der Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft. Aufgrund der hohen Energieintensität der Industrie in NRW, sind sowohl die Herausforderungen als auch die entstehenden Potenziale in diesem Bundesland besonders hoch. Eine Dekarbonisierung der Energiewirtschaft und der Industrie hat direkte Konsequenzen für die Materialflüsse im System. So können in der Grundstoffindustrie, beispielsweise in der Stahlproduktion, Prozesse so umgestellt und angepasst werden,

dass sie mithilfe der Nutzung von grünem Wasserstoff klimaneutral werden. Diese Umstellung hat wiederum direkte Konsequenzen für die Zementbranche, die bisher Sekundärstoffe in Form von Hüttensand aus den bisherigen Hochofenprozessen der Stahlproduktion für die Zementherstellung nutzen (IN4climate.NRW, 2021). Diese Verflechtungen innerhalb der Industrie zeigen, dass Umstellungen und Dekarbonisierungen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft oft Kettenreaktionen auslösen und die Änderungen der Materialströme entsprechend mitgedacht und adressiert werden müssen, damit ein ganzheitliches zirkuläres Wirtschaften funktionieren kann.

Für die Umsetzung der Strategien müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die zielgerecht und passgenau auf die Nutzung von und den Umgang mit Ressourcen wirken und gleichzeitig die Ziele der Kreislaufwirtschaft begünstigen. Angesichts der Vielfalt an unterschiedlichen interdependenten Strategien für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft, die auf unterschiedliche Stoffströme, Produkte und Standorte in der Wertschöpfung abzielen, ist es umso wichtiger Rahmenbedingungen zu schaffen, die gleichzeitig weit, aber auch präzise genug sind. Nicht nur Unternehmensspezifische Maßnahmen und Verbesserungen, sondern auch der Gesamtbeitrag zur Schließung von Stoffkreisläufen des Systems sollte berücksichtigt werden (Haas et al., 2015, 766).

Da Emissionen und Abfälle bei nahezu allen wirtschaftlichen Aktivitäten auftreten, findet die Kreislaufwirtschaft vielfältige Anwendung und kann zum Beispiel auf Produktebene, Unternehmensebene, Wirtschaftsbranchen oder ganze Volkswirtschaften bezogen werden. Eine Gemeinsamkeit aller Anwendungsbereiche ist, dass es im Kern um die Betrachtung von Systemen und ihrer Materialität geht (UBA, 2020). Ein umfassendes Bild über die Materialflüsse eines Systems zu erlangen, ist insbesondere für die Politik entscheidend. Dies kann mitunter Informationen über (Einspar-)Potenziale von primären Rohstoffen beziehungsweise sekundären Quellen sowie Transparenz hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung bestimmter Knotenpunkte im System liefern (Europäische Kommission, 2017). Im Prinzip kann die Kreislaufwirtschaft mit Hilfe von MFA hinsichtlich ihrer biophysikalischen Dimension untersucht werden (Mayer et al., 2019). Daraus lassen sich die Wege von Materialien und Abfallströmen durch das System kartieren und Informationen über die Materialeffizienz beziehungsweise -produktivität und Verbesserungspotenziale oder zumindest Ansatzpunkte ableiten (Haupt et al., 2017). Außerdem können dadurch Daten und Informationen, die die gängigen wirtschaftlichen Statistiken (zum Beispiel die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung) ergänzen und das Bild vervollständigen, identifiziert werden (UNEP, 2021).

Bislang beziehen nur wenige Untersuchungen der Kreislaufwirtschaft die materielle Dimension von Systemen aus Materialflussperspektive mit ein (unter anderem Mayer et al., 2019; Europäische Kommission, 2017; Haas et al. 2015; Haupt et al. 2017; Kovanda 2014; Voskamp et al., 2017). In der Literatur wird auf den Mangel an präzisen Definitionen und Kriterien für die Bewertung von Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft hingewiesen (Haas et al., 2015; Fernandez/Schütz, 2015). Gerade für das Monitoring von Fortschritten der Kreislaufwirtschaft ist eine Anpassung an die Rohstoffwirklichkeit des Systems jedoch wichtig. Entsprechende Rahmenbedingungen, die an die Realität der Materialflüsse angepasst sind, können eine nachhaltige und umweltfreundliche Bewirtschaftung von natürlichen Rohstoffen hervorrufen und die Wege und Mengen von Materialbewegungen verändern.

Die Bedeutung von Materialflüssen für die Kreislaufwirtschaft lässt sich zusammenfassend wie folgt beschreiben: Während die Kreislaufwirtschaft die Art und Weise des Wirtschaftens betrachtet und bestimmt, liefern

Materialflüsse und deren Analysen Informationen über die biophysikalische Grundlage, auf der die Kreislaufwirtschaft aufbaut.

4.2 Ausgewählte Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft (in NRW)

Kernaussagen:

- Bereits seit dem Jahr 2011 ist eine Materialflussanalyse Teil der obligatorischen Berichterstattung für alle EU-Mitgliedstaaten.
- Auf Bundesebene soll eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie künftig die bestehenden und neuen rohstoffpolitischen Strategien bündeln.
- Auf Landesebene beinhaltet die NRW-Nachhaltigkeitsstrategie, die 2021 weiterentwickelt wurde, die landespolitische Umsetzung der globalen Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030.

Um die in Kapitel 4.1 erwähnten Rahmenbedingungen näher zu beleuchten, werden im Folgenden ausgewählte Strategien und Gesetze vorgestellt, die einen Einfluss auf Materialflüsse haben. Insbesondere Monitoring Mechanismen, Zielgrößen oder -quoten und konkrete Rohstoffbezüge sollen ermittelt und im anschließenden Kapitel (Kapitel 4.3) diskutiert werden. Für NRW gelten sowohl regionale, bundesweite als auch europäische Strategien und Gesetze.

Europäische Ebene

Auf europäischer Ebene wurde der Bedarf an Daten und Indikatoren über die Nutzung natürlicher Ressourcen bereits früh erkannt. Schon im Jahr 2005 verabschiedete die EU eine thematische Strategie für die nachhaltige Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen (Europäische Kommission, 2005), deren Ziel die Reduktion der Ressourcennutzung in Kombination mit einer wachsenden Wirtschaft zu erreichen. Im Jahr 2011 wurde diese Strategie durch die Umsetzung der Leitinitiative Ressourcenschonendes Europa und den entsprechenden Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (Europäische Kommission, 2011) erweitert, die eine Steigerung der Ressourceneffizienz sowie eine Entkopplung der Ressourcennutzung vom Wirtschaftswachstum vorantreiben. Es wurde konkret ein MFA-Rahmen in das Umweltberichtssystem aufgenommen, bevor eine MFA im Jahr 2011 Teil der obligatorischen Berichterstattung für alle EU-Mitgliedstaaten wurde (siehe Kapitel 2.2).

Mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 wurde die europäische grüne Wachstumsstrategie, der EU Green Deal, entwickelt. Der EU Green Deal benennt die Kreislaufwirtschaft als wesentlichen Baustein, um die Treibhausgasemissionen in der EU zu reduzieren und betont, dass dazu die Mobilisierung der gesamten Industrie notwendig ist (Europäische Kommission, 2019). Entsprechend sind spezifische Rahmenbedingungen und Strategien, die im Zusammenhang mit Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft stehen, in dieser Strategie verankert. Der Aktions- und Legislativplan für die Kreislaufwirtschaft, der im Frühjahr 2020 verabschiedet wurde, hat den Zweck einen starken und kohärenten Rahmen für die Produktpolitik zu schaffen und Abfallvermeidung zu fördern. Ziele sind die Ausweitung der Kreislaufwirtschaft, die Erreichung der Klimaneutralität bis 2050, die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcennutzung sowie die Sicherung der langfristigen Wettbewerbsfähigkeit der EU. Die Schließung von Materialkreisläufen und die Reduzierung von Abfallströmen wird explizit hervorgehoben. Ein weiterer Schwerpunkt ist das Design und die Herstellung von Produkten im Sinne einer Kreislaufwirtschaft. Laut dem Aktionsplan müssen Ressourcen durch eine Kreislaufführung möglichst lange in der Europäischen Wirtschaft gehalten werden, um die Abhängigkeit von

importierten Rohstoffen zu reduzieren (Europäische Kommission, 2020). Gleichzeitig wird auch im Rahmen der EU-Taxonomie das Ziel verfolgt, Investitionen in die Kreislaufwirtschaft zu forcieren mit dem Ziel, die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erhöhen.

Bundesebene

Auch auf nationaler Ebene ist das wesentliche politische Ziel, den Ressourceneinsatz vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln. Im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz ist entsprechend diesem übergeordneten Ziel eine Abfallhierarchie definiert, die fünf Maßnahmen enthält, die Ressourcennutzung sowie Abfälle zu reduzieren beziehungsweise den Umgang mit Ressourcen zu optimieren (KrWG, 2012). Eine konkrete Strategie für einen schonenderen Umgang mit Ressourcen bietet das Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) (BMU, 2020a). Das Ressourceneffizienzprogramm in seiner dritten Fortschreibung ist die nationale Strategie für die Entnahme und Nutzung von natürlichen Rohstoffen, deren Ziel die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourceneinsatz sowie die Reduktion der damit verbundenen Umweltbelastung und die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft ist. Hier wurde 2016 mit der „Gesamtrohstoffproduktivität“ auf nationaler Ebene ein neuer Indikator zur Messung des Rohstoffverbrauchs eingeführt. Entsprechend wurde das System der Rohstoffäquivalente in der Strategie verankert, um eine Berechnungsgrundlage für Im- und Exporte von Rohstoffen und Gütern abhängig von ihrem ökologischen Fußabdruck zu erschaffen. Zudem wurden quantitative Zielwerte bezogen auf die Rohstoffproduktivität festgelegt. Bis 2020 sollte bundesweit – verglichen mit dem Basisjahr 1994 – eine Verdopplung der Rohstoffproduktivität erfolgen (UBA, 2022b). Eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie soll künftig die bestehenden und neuen rohstoffpolitischen Strategien bündeln.

Das zentrale Gesetz des Abfallrechts auf Bundesebene ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), dessen Zweck die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und zum Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen ist (KrWG, 2012). Ergänzend bezweckt das Abfallvermeidungsprogramm (BMU, 2020b) die Förderung von Abfallvermeidung und damit die Entkopplung der durch die Abfallerzeugung generierten Umweltauswirkungen von der wirtschaftlichen Entwicklung. Dazu werden Wiederverwendung, die verbesserte Vermeidung von Lebensmittelabfällen, die verstärkte Berücksichtigung abfallvermeidender Aspekte in Unternehmen und die Steigerung der Nutzungsintensität von Produkten gefördert.

NRW-Ebene

Auch auf Landesebene beinhaltet die NRW-Nachhaltigkeitsstrategie, die seit 2016 in Kraft ist und 2021 weiterentwickelt wurde, die landespolitische Umsetzung der globalen Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030. Die Strategie soll zur Orientierung für die ökonomische, ökologische und soziale Entwicklung im Einklang mit dem Leitprinzip der Nachhaltigkeit des Landes NRW beitragen. Das Ziel 8.1 „Ressourcen sparsam und effizient nutzen“ zieht zum Monitoring den Rohstoffproduktivitätsindikator heran. Die Strategie definiert jedoch nicht eindeutig, ob es sich bei der Berechnung um den Verbrauch oder den Materialeinsatz handelt (NRW-Nachhaltigkeitsstrategie, 2020). Das konkrete Ziel der Landesregierung bezüglich der Rohstoffproduktivität ist wie folgt angegeben: „Übernahme des Bundestrends der Jahre 2000 bis 2010 für NRW bis 2030“ (Nachhaltigkeitsindikatoren.nrw, 2020).

4.3 Abgleich von Kreislaufwirtschaftspolitik und Materialflüssen

Kernaussagen:

- Die Daten der UGRdL weisen Lücken auf und können den materiellen Stoffwechsel NRWs daher nicht vollumfänglich abbilden. Für Kreislaufwirtschaftsstrategien, wie das Schließen von Kreisläufen, sind Daten über den Status quo allerdings unverzichtbar.
- Ein Abgleich der Zielsetzung mit den Ergebnissen der MFA von NRW zeigt, dass zum einen die methodische Herangehensweise Einfluss auf die Einschätzung des Fortschritts hat und zum anderen, dass das auf Bundesebene definierte Ziel (eine Verdopplung der Ressourcenproduktivität von 1994 bis 2020 zu erreichen) in NRW verfehlt wird.
- Die Darstellung des Ressourcenverbrauchs ist häufig nur indirekt und an ökonomische Kennziffern geknüpft, die wenig über die tatsächliche physische Menge an Rohstoffen aussagen, sondern sie relativ zu anderen Indikatoren darstellen.

Die Kreislaufwirtschaft und ihre Ziele lassen sich nicht nur konzeptionell, sondern auch materiell ausdrücken. Daher spielt auch in NRW für die Entwicklung, Umsetzung und schließlich für das Monitoring von wirksamen Rahmenbedingungen für eine Kreislaufwirtschaft die materielle Zusammensetzung des Systems eine wichtige Rolle. Die Quantifizierung des materiellen Stoffwechsels bildet den Ausgangspunkt.

Die Erfassung der Materialflüsse in NRW zielt unter anderem auf die Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen wirtschaftlicher Tätigkeit und Umweltbelastungen ab (UGRdL, 2019b). Allerdings weisen die Daten der UGRdL Lücken auf, wie zum Beispiel bei den Abgaben an die Natur in Form von Luftschadstoffen oder Abfällen (siehe Kapitel 3.2) und können den materiellen Stoffwechsel NRWs daher nicht vollumfänglich abbilden (Fernandez/Schütz, 2015; IN4climate.NRW, 2021). Dabei gehen wichtige Informationen, die unter anderem Auskunft über das anthropogene Lager des Systems und das Ende des Produktlebenszyklus beziehungsweise das Verlassen des Systems von Materialien beleuchten können, verloren. Für Kreislaufwirtschaftsstrategien, wie das Schließen von Kreisläufen, sind Daten über den Status quo allerdings unverzichtbar. Zwar werden Daten für die fehlenden Bereiche teilweise erhoben, beispielsweise für die Siedlungsabfälle in NRW (LANUV, 2022), jedoch sind aufwendige Verfahren zur Prüfung ihrer Eignung sowie Konvertierungen oder methodische Anpassungen notwendig, um diese Angaben in die MFA zu integrieren. Ferner kann dies Auswirkungen auf den Beitrag der regionalen MFA NRWs zur Beleuchtung der bundesweiten „Black Box“ des sozioökonomischen Stoffwechsels haben. Der nationale Stoffwechsel und dessen Zusammensetzung lassen sich erklären, sofern alle Subsysteme gleichermaßen behandelt werden. Individuelle Anpassungen an den Daten oder gar der Methodik führen im Ergebnis zu Hindernissen für eine Vergleichbarkeit und Einordnung der Ergebnisse.

Die vorhandenen Ergebnisse der Untersuchung von NRWs materiellem Stoffwechsel lassen sich dennoch hinsichtlich ihrer Bedeutung für die gültigen Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft in NRW untersuchen.

Die nachhaltige Entwicklung legt auch die Basis für eine erhöhte Ressourceneffizienz in NRWs Wirtschaftssystem. Der Grundgedanke der „Effizienz“ ist die Herstellung einer fixen Output-Menge, zum Beispiel gemessen in Nutzen oder Menge an Produkten beziehungsweise Dienstleistungen, mit minimalem Input, das heißt Ressourceneinsatz, oder – andersrum – die Herstellung der maximalen Output-Menge mit einer fixen Input-Menge (Neligan et al., 2021). Ziel der Ressourceneffizienz ist letztlich eine Reduzierung der Inanspruchnahme

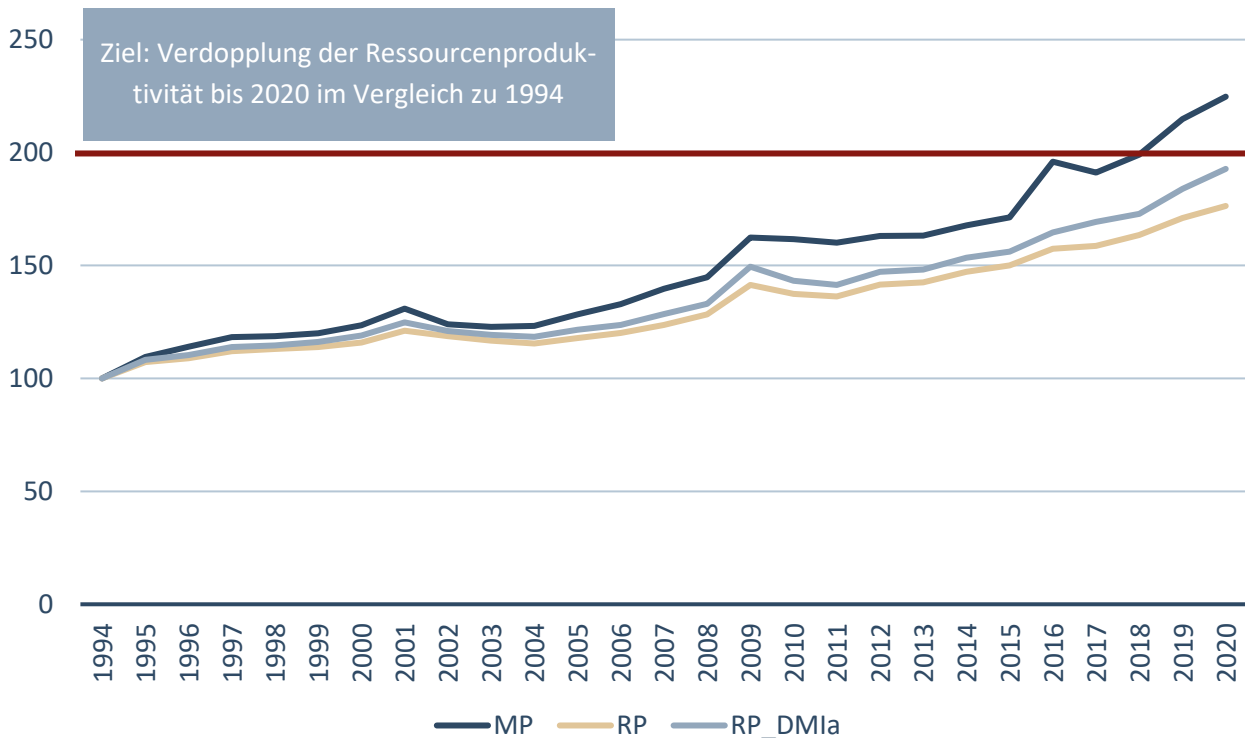
natürlicher Ressourcen bei gleichbleibender beziehungsweise steigender Wirtschaftsleistung. Nicht nur können neue Produktionstechniken zur Einsparung von primären Materialien führen, sondern auch zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft beitragen.

Mit dem in NRWs Nachhaltigkeitsstrategie genannten Ziel 8.1 („Ressourcen sparsam und effizient nutzen“) wird dieser Gedanke aufgegriffen (NRW-Nachhaltigkeitsstrategie, 2020). Dabei wird explizit der Rohstoffproduktivitätsindikator für das Monitoring genannt. NRW bezieht sich dabei auf den RP-Indikator, der sich aus dem Verhältnis vom BIP zum direkten Materialeinsatz ergibt (siehe Kapitel 3.4). Anders als auf Bundesebene, werden die biotischen Rohstoffe nicht per se als nachhaltig beziehungsweise zirkulär angesehen und daher in der Bestimmung der Ressourcenproduktivität berücksichtigt. Damit biotische Materialflüsse tatsächlich zirkulär sind, müssten sie auf erneuerbare Weise erzeugt beziehungsweise entnommen werden und ihre gesamten Abfallströme und Emissionen in den Kreislauf der natürlichen Umwelt zurückgeführt werden. In der Praxis entstehen bei der Produktion von Biomasse jedoch häufig direkte und indirekte Umweltauswirkungen, die sich zum Beispiel in Form von Netto-Kohlenstoffemissionen oder dem Verlust von Bodennährstoffen zeigen (Haas et al., 2015).

Bei einem Abgleich der Zielsetzung mit den Ergebnissen der MFA von NRW zeigt sich, dass zum einen die methodische Herangehensweise maßgeblichen Einfluss auf die Einschätzung des Fortschritts haben kann und zum anderen, dass das auf Bundesebene definierte Ziel (eine Verdopplung der Ressourcenproduktivität von 1994 bis 2020 zu erreichen) in NRW verfehlt wird. Auf Grundlage der verfügbaren Daten lässt sich eine Steigerung der Ressourcenproduktivität um 76 Prozent ermitteln (Abbildung 4-1). In anderen Worten bedeutet dies, dass während im Jahr 1994 eine Einheit des eingesetzten Materials 0,8 Einheiten des BIP erwirtschaftet hat sind es im Jahr 2020 bereits 1,41 Einheiten.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen sich bei einem Abgleich der Ergebnisse der MFA von NRW mit dem von der Landesregierung definierten Ziel („Übernahme des Bundestrends der Jahre 2000 bis 2010 für NRW bis 2030“, Nachhaltigkeitsindikatoren.nrw, 2020). Die Zielformulierung ist zum einen unscharf, da „Bundestrend“ letztlich nur steigend oder sinkend sein kann, was nicht die explizite Geschwindigkeit der Entwicklung abbilden kann. Zieht man den ebenfalls genannten Referenzwert von durchschnittlichem Wachstum von 1,6 Prozent jährlich heran, wird deutlich, dass die Ambitionen an dieser Stelle nicht sehr hoch sind, wenn man bedenkt, dass der Betrachtungszeitraum seit dem Jahr 2000 beispielsweise die Weltwirtschaftskrise einschließt, die sowohl Auswirkungen auf den physischen Materialverbrauch als auch auf das BIP und damit auf die Ressourcenproduktivität hat. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Potenziale zur Steigerung der Produktivität in NRW selbst bei Erreichung dieses Ziels noch nicht vollständig genutzt werden.

Abbildung 4-1: Ressourcenproduktivität in NRW - Entwicklung der Produktivitätsindikatoren im Vergleich
(Index 1994 = 100)



MP: Materialproduktivität des inländischen Materialverbrauchs (GDP/DMC); RP: Ressourcenproduktivität des direkten Materialeinsatzes (GDP/DMI); BRD: Bundesrepublik Deutschland, RP_DMIIa: Ressourcenproduktivität des abiotischen direkten Materialeinsatzes (GDP/DMIa)

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf UGRdL, 2022a und VGRdL, 2022

Die Ressourceneffizienz kann unter anderem eine Senkung des direkten Materialeinsatz bewirken, gleichzeitig aber auch eine Stärkung der Wirtschaftsleistung hervorrufen. Im Ergebnis zählt dieser Ansatz auch auf das auf bundespolitischer Ebene priorisierte Ziel der Erreichung einer Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch ein. Diese Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch kann sowohl absolut als auch relativ betrachtet werden. Eine relative Entkopplung bedeutet, dass die Wirtschaft stärker wachsen muss als der Ressourcenverbrauch. Dabei kann der Ressourcenverbrauch aber dennoch zunehmen, solange die Wachstumsrate entsprechend niedrig ist. Selbst ein sinkender relativer Ressourcenverbrauch kann immer noch eine enorme Menge an Rohstoffen darstellen. Dies wird in den relativen Betrachtungen nicht immer eindeutig sichtbar. Eine absolute Entkopplung liegt hingegen nur dann vor, wenn die Menge des Ressourcenverbrauchs bei steigendem Wirtschaftswachstum auch tatsächlich zurückgeht. Die Darstellung des Ressourcenverbrauchs ist häufig nur indirekt und an ökonomische Kennziffern, wie zum Beispiel das Bruttoinlandsprodukt oder den Rohstoffpreis, geknüpft, die wenig über die tatsächliche physische Menge an Rohstoffen aussagen, sondern sie relativ zu anderen Indikatoren darstellen (Biebeler/Lang, 2014; IRP, 2017).

Die Ergebnisse für NRW zeigen, dass sich der direkte Materialeinsatz auf einem relativ konstanten Niveau hält, was sich vor allem mit steigenden Importen bei sinkender inländischer Entnahme begründen lässt (siehe Kapitel 3.1). Diese Verlagerung der Rohstoffentnahme in andere Systeme findet in den politischen

Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft nur wenig Berücksichtigung. Da sich die tatsächliche Menge des Rohstoffbedarfs für NRW (Rohstoffäquivalente) aktuell nicht bestimmen lässt, können auch die Umweltauswirkungen, die in den anderen Systemen und durch den Transport anfallen, kaum erfasst werden.

Zusätzlich ist das Verständnis der Kreislaufwirtschaft auf NRW-Ebene nach wie vor eng mit der Abfallwirtschaft verknüpft, wenngleich die Abfallwirtschaft in der Erfassung der Materialflüsse kaum Berücksichtigung findet (siehe Kapitel 3.2). Jedoch ist vor allem die Schließung der Lücke zwischen den Materialabgaben und dem Materialeinsatz ein zentrales Unterscheidungsmerkmal zwischen einer linearen und einer zirkulären Wirtschaftsweise, welches schließlich dazu führt, dass aus Wertschöpfungsketten Wertschöpfungskreisläufe werden können.

NRWs Abfallwirtschaft ist als Wirtschaftsbereich klassifiziert, weshalb Abfallströme nicht als Abgaben betrachtet werden. Abfälle, die entsprechend der Abfallhierarchie nach den vier oberen Optionen behandelt werden, tauchen in der Materialbilanz lediglich in Form von Emissionen auf. Abfallströme an Deponien, was als letzte Option der Abfallhierarchie gilt, zählen als Zuwachs des inländischen physischen Materialbestands und nicht zu den Abgaben an die Umwelt (Destatis, 2019). Hinsichtlich der Bedeutung von Materialflüssen für die Kreislaufwirtschaft bedeutet dies, dass dem Verständnis der Kreislaufwirtschaft nach dieser Materialbestand als inländisches Lager verstanden wird, das Möglichkeiten für die Schließung von Stoffkreisläufen bietet. Dies trifft im Falle von deponierten Abfällen aus zwei Gründen nicht zu. Zum einen ist die Beseitigung von Abfällen auf Deponien gemäß der fünfstufigen Abfallhierarchie, die das Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgibt, die letzte abfallwirtschaftliche Option und erfolgt nur dann, wenn die Abfälle keiner Verwertung mehr unterzogen werden können (Fluchs/Schleicher, 2021). Zum anderen können Abfälle, die in Deponien gelagert sind, gemäß Deponieverordnung (DepV) diese nur zum Zweck der Zuführung zu anderen Deponien entnommen werden (DepV, 2009, § 16). Sie betreten daher nicht mehr die Produktions- und Verbrauchsprozesse des Systems, sondern verbleiben in den Endlagern. Da die Erfassung der Materialflüsse in NRW insbesondere auf die Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen wirtschaftlicher Tätigkeit und Umweltbelastungen abzielt (UGRdL, 2019b, 1), sollten Abfallströme unbedingt als Abgaben an die Natur verstanden werden.

5 Fazit/Ausblick

Die Darstellung der Materialflüsse für Nordrhein-Westfalen und der anschließende Abgleich politischer Maßnahmen für eine Kreislaufwirtschaft zeigen, dass Materialflüsse bislang keine umfassende Berücksichtigung in der politischen Zielformulierung finden. Die Rohstoffwirklichkeit NRW wird in den bestehenden Rahmenbedingungen und Strategien nicht als Informationsquelle für die Ableitung von zielführenden Maßnahmen für eine bessere Ressourceneffizienz oder eine effiziente Kreislaufwirtschaft herangezogen. Hier muss die Politik zukünftig stärker ansetzen. Vor dem Hintergrund der Potenziale, die eine Materialflussanalyse und die Nutzung der entsprechenden Indikatoren bieten kann, wenn sie auf einer soliden und aktuellen Datenbasis aufbaut, ist die Integration der Erkenntnisse der physischen Materialflüsse, eine wichtige Voraussetzung für zielgerichtete politische Maßnahmen und Zielwerte.

Aus der stofflichen Zusammensetzung des Systems lassen sich kritische Punkte identifizieren, die auf Basis der analysierten Daten eingedämmt werden könnten. Ein Beispiel ist der Verbrauch fossiler Energieträger. Er lässt sich nicht allein dadurch reduzieren, dass die inländische Entnahme reguliert wird, da dann auf Importe ausgewichen wird, was an den steigenden Importmengen der Rohstoffe fossiler Energieträger in den letzten

Jahren erkennbar wird. Um den tatsächlichen Verbrauch zu reduzieren, müssen technologische Anpassungen stattfinden, um entsprechende Effekte auf die Ressourceneffizienz auszuüben. Zur Sichtbarmachung dieser Zusammenhänge und zur Quantifizierung der Effekte kann die MFA auf NRW-Ebene Aufschlüsse geben. Sie sollte der Politik als Informationsquelle dienen, um konkrete Zielsetzungen zu definieren.

Aktuell werden politische Ziele auf Bundeslandebene direkt an Bundesziele und -indikatoren geknüpft. Aufgrund der Tatsache, dass Indikatoren jedoch unterschiedlich berechnet werden und eine Addition der Werte auf Bundeslandebene als einfache Aggregation aufgrund von Doppelzählungen nicht funktioniert, ist diese Strategie wenig zielführend. Entsprechend müssen die NRW-spezifischen Ziele an die eigene Strategie und Methodik angepasst werden oder die Methodiken müssen mittelfristig so aneinander angeglichen und angepasst werden, dass eine Zielableitung zwischen den Systemen ermöglicht wird. Bezüglich der Zielangleichung ist außerdem festzuhalten, dass die Ziele auf Bundeslandebene auf die Realität des sozioökonomischen Stoffwechsels NRWs angepasst sein müssen. Konkret bedeutet das, dass NRW als größtes Bundesland mit einer hohen Bevölkerungs- und Industriedichte, einem hohen Vorkommen an natürlichen Rohstoffen und hohen Materialeinsätzen und -verbräuchen andere Voraussetzungen und andere Gegebenheiten aufweist als andere Bundesländer. Auf diese Charakteristika und die Unterschiede zu anderen Bundesländern muss auch im Rahmen der politischen Flankierung eingegangen werden, damit eine zielgerichtete Kreislaufwirtschaftspolitik stattfinden kann. Wenn die Möglichkeit der Untersuchung von Materialflüssen innerhalb der Subsysteme der Bundesländer stärker bei der politischen Ausgestaltung der Rahmenbedingungen und Zielsetzungen auf Bundeslandebene berücksichtigt wird, können die Vorteile dieser differenzierten Betrachtung und Analyse des Gesamtsystems genutzt und eine effiziente Kreislaufwirtschaft umgesetzt werden.

Zudem stellt sich die Frage der Durchsetzbarkeit von Zielen und welche politischen Schlüsse aus deren Erreichung beziehungsweise Nicht-Erreichung zu ziehen sind. Laut der zur Verfügung stehenden Daten auf NRW-Ebene findet derzeit keine absolute Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch statt, was bedeutet, dass die Steigerung der Ressourceneffizienz nicht in gewünschtem Maße voranschreitet. Eine Materialflussanalyse kann Informationen darüber liefern, wo die Stellschrauben sein können, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Sie kann zudem beim Monitoring der Zielerreichung unterstützen, wenn ihre Potenziale vollständig genutzt werden. Dazu muss sie jedoch sowohl in politische Strategien als auch in Monitoring Konzepte einfließen. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist es unbedingt notwendig, den Fokus auf die Abfallwirtschaft weiter zu reduzieren und ihre gesamtwirtschaftliche Bedeutung zu untermauern. Zudem erfordert die Umsetzung der Nutzung der MFA-basierten Indikatoren die Verbesserung der Datenqualität, die Standardisierung der Abfallstatistiken und ihre Konsolidierung mit den Daten der MFA auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Solche Verbesserungen ermöglichen ein besseres Verständnis nicht nur des Umfangs der Kreislaufwirtschaft, sondern auch der Qualität der Kreislaufwirtschaft, was wiederum ein besseres Verständnis des tatsächlichen Beitrags zu den Nachhaltigkeitszielen ermöglichen würde (Mayer et al., 2019).

Die Einführung einer Ressourcenpolitik ist ein sinnvoller nächster Schritt, um die beschriebenen Stränge zu bündeln und die adressierten politischen Handlungsaufforderungen umzusetzen. Das Konzept einer eigenständigen Ressourcenpolitik mit dem Ziel der Überbrückung der Kluft zwischen dem Angebot an und dem Zugang zu Rohstoffen einerseits und der Tragfähigkeit von Ökosystemen andererseits kann ebenso Teil eines besseren Ressourcenmanagements aus politischer und ökonomischer Perspektive sein (Bringezu et al., 2019). Eine Ressourcenpolitik hat den Zweck, die inhärenten Zusammenhänge zwischen Ressourcen, Umweltbelastung, wirtschaftlicher Entwicklung und Lebensqualität aufzuzeigen und sich mit allen natürlichen

Ressourcen in einer Lebenszyklusperspektive zu befassen. Dieses Verständnis von Ressourcenpolitik bietet Synergien und Kompromisse mit der Klima- und Energiepolitik (Bringezu et al., 2019).

Insbesondere heutzutage sind Materialflüsse durch das System von besonderer Relevanz – speziell bei der Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft. Aufgrund der engen bestehenden Verbindungen zwischen Branchen und Unternehmen über Materialflüsse wirken sich Eingriffe und Veränderungen an einer Stelle im System auf mehrere Bereiche aus (IN4climate.nrw, 2021). Es ist Aufgabe der Politik ein Gleichgewicht zu finden, das den verschiedenen Nutzungsansprüchen gerecht wird, gleichzeitig aber auch die rohstoffliche Versorgung sichert und ökonomisch wie ökologisch und sozial sinnvoll ist (Geologischer Dienst NRW, 2011). Eine Ressourcenpolitik mit dem expliziten Fokus auf physische Materialströme ist eine wichtige Ergänzung zur Klima- und Energiepolitik, um eine Gleichwertigkeit der jeweiligen Ziele zu erreichen. Um die aus Rohstoffperspektive relevanten Ziele nicht unterzuordnen, muss die Nutzung von Daten im Bereich der Materialflüsse zukünftig eine stärkere politische Verankerung finden. Eine Gleichstellung im politischen Kontext ermöglicht es, Zielkonflikte sinnvoll zu analysieren und aufzulösen und Ressourcen dabei den angemessenen Stellenwert zu geben. Grundvoraussetzung dafür ist erstens die Erkenntnis auf politischer Ebene, dass die Datenquellen für eine solide Zielableitung auf Subsystemebene stattfinden sollte, um insbesondere geografische Unterschiede berücksichtigen zu können. Zweitens ist ein Handeln bezogen auf die Unvollständigkeit und die fehlende Harmonisierung der Daten mit denen auf Bundesebene notwendig, um qualitativ basierte Entscheidungen treffen und Ziele formulieren zu können. Diese Tatsachen erfordern die Umsetzung einer Ressourcenpolitik, die die Klima- und Energiepolitik auf gleicher Ebene ergänzt und um eine weitere wichtige Zieldimension hinsichtlich des effizienten Umgangs mit Ressourcen erweitert.

6 Anhang

6.1 Ausgewählte Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse

Tabelle 6-1: Input-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Verwertete inländische Entnahme (Engl.: Domestic extraction used)	DEU	-	Die verwertete inländische Entnahme ist ein Eintrag auf der Input-Seite des Materialkontos. Hier werden alle biotischen (Biomasse) und abiotischen (Fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe) Rohstoffe, die in der inländischen Umwelt abgebaut werden und in den Produktions- und Konsumprozess des sozioökonomischen Systems einfließen, erfasst. Angaben werden in Tonnen gemacht.
Nicht verwertete inländische Entnahme (Engl.: unused domestic extraction)	UDE	-	Die ungenutzte inländische Entnahme ist ein Eintrag auf der Input-Seite des Materialkontos. Hier werden alle biotischen und abiotischen natürlichen Materialien, die in der inländischen Umwelt abgebaut werden, aber nicht für die weitere Verwendung im sozioökonomischen System bestimmt sind (zum Beispiel Bergbauabfälle), erfasst. Angaben werden in Tonnen gemacht.
Importe	IMP	$IMP = IMP (ROW) + IMP (Bundesländer)$	Importe und Exporte bilden ein- beziehungsweise ausgeführte Warenmengen ab. Diese Materialflüsse sind für die Materialbilanz wichtig, da die für die Erstellung der Waren benötigten Rohstoffe nicht in der inländischen Umwelt, sondern in der Umwelt anderer Systeme abgebaut werden. Umweltbelastungen, die mit der Extraktion von Rohstoffen einhergehen, werden durch diese Art von Substitutionsvorgängen in andere Systeme ausgelagert. Daher sind Importe und Exporte für die Berechnung weiterer Indikatoren von Bedeutung. Die Angaben werden nach Herstellungsgrad (Rohstoffe, Halbwaren, Fertigwaren) und Rohstoffarten (Fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe, Biomasse) unterteilt. Diese Angaben basieren auf den 8-stelligen Warennummer des Warenverzeichnisses der Außenhandelsstatistik (WA).
Importe aus dem Rest der Welt (international)	IMP (ROW)	-	Diese Position bildet die Materialflüsse von Gütern ab, die aus der übrigen Welt (ROW) in Form von internationalen Handelsströmen stammen.
Importe aus anderen Bundesländern (intranational)	IMP (Bundesländer)	-	Diese Position bildet die Materialflüsse von Gütern ab, die zwischen Bundesländern ausgetauscht werden. Die Angaben werden in Tonnen gemacht und sind in abiotische und biotische Güter unterteilt. Es werden nur die Gütermengen berücksichtigt, die mit dem Straßen- oder Schienenverkehr oder der Binnenschifffahrt transportiert werden.

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Direkter Materialeinsatz (Engl.: direct material input)	DMI	$DMI = DEU + IMP$	Der DMI misst den direkten Materialinput aus der natürlichen Umwelt, dem Rest der Welt oder anderen Teilsystemen. Dazu gehören alle Materialien, die einen wirtschaftlichen Wert haben und dem Produktionssystem des sozioökonomischen Systems zur Verfügung stehen. Es ist zu beachten, dass ein Teil des Outputs des Produktionssystems exportiert wird. Der DMI eines bestimmten sozioökonomischen Systems wird als Summe der inländischen Entnahme und der Importe berechnet. Für einzelne Teilsysteme werden alle Einfuhren in die Berechnung des DMI einbezogen, während bei der DMI-Berechnung für das übergeordnete System alle Intrahandelsströme ausgeschlossen werden müssen, um Doppelzählungen zu vermeiden.
Gesamtmaterial-einsatz (Engl.: total material input)	TMI	$TMI = DMI + UDE$	Der TMI-Indikator misst die Gesamtströme in das System. Er umfasst den DMI, berücksichtigt aber zusätzlich die ungenutzte Entnahme als Input. Nicht berücksichtigt werden entnommene Gase beziehungsweise Ausgleichselemente auf der Input-Seite. Die Angaben erfolgen in Tonnen.
Gesamtmaterialbedarf (Englisch: total material requirement)	TMR	$TMR = TMI + \text{indirekte Materialflüsse der Importe}$	Alle Materialien, die weltweit für die Produktion und den Verbrauch im System benötigt werden. Dies schließt sowohl die genutzten als auch die ungenutzten Materialflüsse mit ein.
Ausgleichselemente Input-Seite (Engl.: balancing items input side)	BI	-	Ausgleichselemente werden ausschließlich zu Bilanzierungszwecken eingeführt, denn sie sind nötig, um die gesamtwirtschaftliche Materialbilanz zu erstellen. Es gibt zwei Kategorien von Ausgleichselementen: zum einen Posten, die zu den Materialinputs addiert werden, wie Sauerstoff für Verbrennungsprozesse und Verbrennungsprozessen und der Atmung sowie Stickstoff und zum anderen Positionen, die zu den Materialoutputs hinzukommen, wie zum Beispiel Wasserdampf aus Verbrennung und Gase aus der Atmung. Auf der Input-Seite stellen die Ausgleichsposten natürliche Inputs dar, auf der Output-Seite stellen die Ausgleichsstoffe Reststoffe dar.

Quelle: Barles, 2009; Krausmann et al., 2017; Eurostat, 2018a; UGRdL, 2019a, 2019c, 2021a, 2022b

Tabelle 6-2: Output-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Inländische verarbeitete Abgabe (Engl.: domestic processed outputs)	DPO	-	Der Indikator für die verarbeitete inländische Abgabe (DPO) bildet die Materialflüsse aus dem sozioökonomischen System und seinen Prozessen in die Natur ab. Er erfasst alle Materialien, die sich aus der verwerteten Entnahme oder Einfuhr oder ihrer anschließenden

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
			Weiterverarbeitung beziehungsweise Nutzung ergeben und beabsichtigt oder unbeabsichtigt an die Umwelt abgegeben werden. In der Regel handelt es sich dabei nicht um physische Rohstoffe. Es werden daher folgende materielle Outputs des Systems erfasst: Emissionen in die Luft, Abfallentsorgung in die Umwelt, Emissionen im Abwasser, dissipative Verwendung von Produkten und dissipative Verluste. Massenströme von Wasser sind ausgeschlossen, da Wasser generell von der MFA ausgenommen ist und nur die für Bilanzierungszwecke notwendigen Wassermengen unter den Bilanzierungsindikatoren BI und BO erfasst werden.
Exporte	EXP	$EXP = EXP (ROW) + EXP (Bundesländer)$	Importe und Exporte bilden ein- beziehungsweise ausgeführte Warenmengen ab. Diese Materialflüsse sind für die Materialbilanz wichtig, da die für die Erstellung der Waren benötigten Rohstoffe nicht in der inländischen Umwelt, sondern in der Umwelt anderer Systeme abgebaut werden. Umweltbelastungen, die mit der Extraktion von Rohstoffen einhergehen, werden durch diese Art von Substitutionsvorgängen in andere Systeme ausgelagert. Daher sind Importe und Exporte für die Berechnung weiterer Indikatoren von Bedeutung. Die Angaben werden nach Herstellungsgrad (Rohstoffe, Halbwaren, Fertigwaren) und Rohstoffarten (Fossile Energieträger, Erze, sonstige mineralische Rohstoffe, Biomasse) unterteilt. Diese Angaben basieren auf den 8-stelligen Warennummer des Warenverzeichnisses der Außenhandelsstatistik (WA).
Exporte aus dem Rest der Welt (international)	EXP (ROW)	-	Diese Position bildet die Materialflüsse von Gütern ab, die aus der übrigen Welt (ROW) in Form von internationalen Handelsströmen stammen.
Exporte aus anderen Bundesländern (intranational)	EXP (Bundesländer)	-	Diese Position bildet die Materialflüsse von Gütern ab, die zwischen Bundesländern ausgetauscht werden. Die Angaben werden in Tonnen gemacht und sind in abiotische und biotische Güter unterteilt. Es werden nur die Gütermengen berücksichtigt, die mit dem Straßen- oder Schienenverkehr oder der Binnenschifffahrt transportiert werden.
Abgabe nicht verwerteter inländische Entnahme (Engl.: disposal of unused domestic extraction)	DUDE	-	Der Indikator für die nicht verwertete inländische Abgabe (DUDE) umfasst alle Materialflüsse, die zwar aus der Natur in das sozioökonomische System eingehen, allerdings nicht in Produktions- oder Konsumprozesse gelangen. Mengenmäßig ist diese Position mit der nicht verwerteten inländischen Entnahme (UDE) gleichzusetzen. Die Angaben werden in Tonnen gemacht.
Direkte Materialabgabe (Engl.: direct material output)	DMO	$DMO = DPO + EXP$	Gesamter inländischer Output eines sozioökonomischen Systems, der sich aus der lokalen Gewinnung und Behandlung ergibt. Dieser Indikator ergibt sich aus der Summe von DPO und EXP.

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Gesamte inländische Materialabgabe (Engl.: Total domestic Material Output)	TMO	$TMO = DMO + DUDE$	Gesamtmenge des in die Umwelt des Systems freigesetzten Materials. Dies umfasst die natürliche Umwelt des Systems sowohl im Inland als auch im Ausland. Dieser Indikator umfasst DPO, Exporte und die DUDE.
Ausgleichselemente Output-Seite (Engl.: balancing items output side)	BO	-	Ausgleichselemente werden ausschließlich zu Bilanzierungszwecken eingeführt, denn sie sind nötig, um die gesamtwirtschaftliche Materialbilanz zu erstellen. Es gibt zwei Kategorien von Ausgleichselementen: zum einen Posten, die zu den Materialinputs addiert werden, wie Sauerstoff für Verbrennungsprozesse und Verbrennungsprozessen und der Atmung sowie Stickstoff und zum anderen Positionen, die zu den Materialoutputs hinzukommen, wie zum Beispiel Wasserdampf aus Verbrennung und Gase aus der Atmung. Auf der Input-Seite stellen die Ausgleichsposten natürliche Inputs dar, auf der Output-Seite stellen die Ausgleichsstoffe Reststoffe dar.

Quelle: Barles, 2009; DepV, 2009; Eurostat, 2018a; Destatis, 2019; UGRdL, 2019a, 2019c, 2021a, 2021b, 2022b

Tabelle 6-3: Verbrauchs- und Bestands-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Inländischer Materialverbrauch (Engl.: Domestic Material Consumption)	DMC	$DMC = DMI - EXP$	Der DMC-Indikator zeigt die Menge des Materialverbrauchs innerhalb des betrachteten Systems an. Diese Menge wird zum Teil im Materialbestand des Systems gebunden und zum Teil in Form des DPO wieder an die Umwelt abgegeben. Der DMC des betrachteten Systems ergibt sich aus dem direkten Materialinput (DMI) abzüglich der physischen Exporte.
Korrigierter Inländischer Materialverbrauch (Engl.: corrected Domestic Material Consumption)	DMC_corr	$DMC_corr = DMI - Imported\ wastes - Total\ exports + Wastes\ exported$	DMC_corr ist der korrigierte Indikator für den Inlandsverbrauch, der für die regionale MFH abgeleitet wurde. Er umfasst DMI abzüglich der Exporte, schließt aber die Handelsströme, sowohl Importe als auch Exporte, von Abfällen aus, da es sich hierbei nicht wirklich um ein Gut handelt, das für den Verbrauch im System bestimmt ist, sondern eher für die (entfernte) Endbehandlung in das System gelangt oder es verlässt.
Nettobestandszuwachs (Engl.: Net additions to stock)	NAS	$NAS = TMI + BI - TMO - BO$ oder ohne nicht verwertete Entnahme von Materialien und deren Entsorgung:	Der Nettobestandszuwachs ist ein Indikator, um das physische Wachstum des sozioökonomischen Systems abzubilden. Es wird das in Gebäuden, Infrastruktur oder langlebigen Gütern (wie zum Beispiel Autos oder Industriemaschinen) gebundene Material abgebildet. Generell besteht das Materialkonto aus einer Entnahme- und einer Abgabeseite. Die Differenz, also der Saldo aus beiden Seiten, stellt den

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
		$NAS = DMI + BI - DMO - BO$	Materialverbleib innerhalb des wirtschaftlichen Systems dar. Theoretisch ergibt sich also der Nettobestandszuwachs aus dem jährlich hinzugefügten Materialbestand (Bruttozugänge) abzüglich der entfernten Bestände, wenn beispielsweise ein Gebäude abgerissen wird oder langlebige Güter entsorgt werden. Da die Datengrundlage des Materialbestandes innerhalb von Systemen statistisch schwer messbar ist, lässt sich dieser Indikator (NAS) nur näherungsweise bestimmen. Die Angaben erfolgen in Tonnen.

Quelle: Barles, 2009; Eurostat, 2018a; UGRdL, 2019b

Tabelle 6-4: Produktivitäts- und Zirkularitäts-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Materialproduktivität	MP	$MP = BIP / DMC$	Der Indikator setzt Materialströme in Beziehung zu wirtschaftlichen Aggregaten (zum Beispiel dem BIP) und ermittelt die Produktivität des direkt verbrauchten Materials in Bezug auf das BIP. Das heißt, wie viel BIP durch eine Einheit des verbrauchten Materials erzeugt wird. Die Erfassung erfolgt dann in EUR/Tonne. Da der DMC-Indikator die Ausfuhren ausschließt, gilt dies auch für den MP-Indikator. Es ist jedoch zu beachten, dass auch exportierte Materialien zum BIP beitragen können.
Ressourcenproduktivität	RP	$RP = BIP / DMI$	Der Indikator setzt die Materialströme in Beziehung zu wirtschaftlichen Aggregaten (zum Beispiel dem BIP) und gibt die Produktivität des direkten Materialeinsatzes in Bezug auf das BIP an. Das heißt, wie viel BIP wird durch eine Einheit Material erzeugt. Die Erfassung erfolgt dann in EUR/Tonne.
Ressourcenproduktivität des abiotischen Materialeinsatzes	RP_DMIa	$RP = BIP / DMIa$	Der Indikator setzt Materialströme in Beziehung zu wirtschaftlichen Aggregaten (zum Beispiel dem BIP) und ermittelt die Produktivität des direkt verbrauchten Materials in Bezug auf das BIP. Das heißt, wie viel BIP durch eine Einheit des verbrauchten Materials erzeugt wird. Die Erfassung erfolgt dann in EUR/Tonne. In der UGR wird der Begriff "Rohstoffverbrauch" als DMI abiotisch (DMIa) ausgewiesen. Dieser Indikator berücksichtigt die inländische Entnahme abiotischer Rohstoffe, die Importe abiotischer Güter aus dem internationalen Ausland sowie die Importe abiotischer Güter zwischen Bundesländern. Die Rohstoffproduktivität, in dem Fall auch Nachhaltigkeitsindikator genannt, wird dem entsprechend aus dem BIP geteilt durch die direkt eingesetzten abiotischen Materialien bestimmt. Dadurch werden nachwachsende Rohstoffe (biotische Rohstoffe beziehungsweise Biomasse) ausgeklammert.

Indikator	Abkürzung	Formel	Beschreibung
Zirkularitätsrate der Materialnutzung (Englisch: circular material use rate)	CMU	$CMU = U/M$ Mit U: zirkuläre Verwendung von Materialien, M: Gesamtmaterialverbrauch	Dieser Indikator bestimmt das Verhältnis aus wiedergewonnenen und in die Wirtschaft zurückfließenden Materialien zum gesamten Materialverbrauch. Für die Berechnung sind genaue Daten über die Menge und den Verbleib von sämtlichen anfallenden Abfällen erforderlich. Die CMU kann näherungsweise den Anteil an Sekundärrohstoffen als Substitut für primäre Rohstoffe darstellen, was im Zusammenhang für das Erreichen einer Kreislaufwirtschaft wichtige Informationen liefert.

Quelle: Krausmann et al., 2017; UGRdL, 2019c; Eurostat, 2018b

7 Abstract

The current use of natural resources exceeds planetary limits and thus endangers the resilience of the Earth's ecosystem. The growing consumption of raw materials and the resulting increase in waste and emissions constitute a long-term threat to the environment and thus to the basis of human life. The German economy is also affected by the depletion of natural raw material reserves and must diversify and sustainably manage its supply of critical raw materials in particular. Against this background, too, the implementation of a circular economy is an important step towards maximizing the lifetime of products and reducing the use of resources and the volume of waste. In order to achieve these goals, consistent political support is necessary, which includes and analyzes the physical material flows in particular, in order to derive goals for a more efficient use of resources and to monitor and accompany the transition process. Material flow analysis (MFA) is a key method for deriving indicators for the study of the circular economy from the material flows identified.

This paper presents the material metabolism of North Rhine-Westphalia (NRW) and identifies its importance for the circular economy. To investigate to what extent a circular economy is taken into account, the political framework conditions applicable in NRW are analyzed. In addition, the effectiveness of selected framework conditions is assessed based on the calculated indicators within the framework of the MFA and verified for NRW.

Essential results concerning the material flows in NRW are:

- In NRW, approximately four times more material is mined than is utilized in production and consumption processes, which illustrates a low efficiency in raw material extraction. To a large extent, this ratio depends on geological and technological factors. Approaches to increase resource efficiency can contribute to a reduction in material use.
- NRW imports almost twice as much material from the rest of the world than from other federal states, and there has been an overall rising import trend since 1994. In terms of the level of production, NRW has recorded an increase in the amount of fossil fuels imported as raw materials from the rest of the world.
- In recent decades, NRW has exported a constant amount of material to other German federal states, while exports to the rest of the world have increased. Overall, exports have increased by around 30 percent since 1994: Among them, mainly the export of fossil energy sources as raw materials.
- The various indicators depicting NRW's resource productivity show an increasing trend over time. Although resource productivity and gross domestic product are rising, direct material input remains at a constant level, which means that there is no absolute decoupling of economic growth from material input.

The analysis of material flows and policy measures for a circular economy in NRW show that material flows have not been sufficiently considered in the political discourse so far. In particular, data gaps and methodological obstacles lead to MFA results at the federal state level that are not fully comprehensive. This is where policymakers must take stronger action in the future and use this data basis to formulate targets and evaluate target achievement in order to meet the need for a stringent resource policy.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1: Input-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse.....	40
Tabelle 6-2: Output-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse.....	41
Tabelle 6-3: Verbrauchs- und Bestands-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse.....	43
Tabelle 6-4: Produktivitäts- und Zirkularitäts-Indikatoren für die regionale Materialflussanalyse.....	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Vereinfachte Darstellung der Wechselbeziehung zwischen sozioökonomischem System und seiner Umwelt.....	8
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der regionalen Materialflüsse und Indikatoren	12
Abbildung 3-1: Das Verhältnis von verwerteter und nicht verwerteter inländischer Entnahme in NRW	14
Abbildung 3-2: NRW's verwertete inländische Entnahme	15
Abbildung 3-3: Importe nach NRW nach Herkunft	17
Abbildung 3-4: Entwicklung der Importe (ROW) nach NRW nach Fertigungsgrad	18
Abbildung 3-5: Der direkte Materialeinsatz im Vergleich zum gesamten Materialeinsatz in NRW	19
Abbildung 3-6: Entwicklung von NRW's verwerteter inländischer Entnahme und Importen nach NRW.....	20
Abbildung 3-7: Abfälle an Deponien in NRW	22
Abbildung 3-8: NRW's Exporte nach Destinationen.....	23
Abbildung 3-9: NRW's Exporte (ROW) nach Materialkategorie.....	24
Abbildung 3-10: Zusammensetzung der gesamten inländischen Materialabgabe von NRW nach Indikatoren	25
Abbildung 3-11: NRW's inländischer Materialverbrauch.....	26
Abbildung 3-12: Ressourcenproduktivität in NRW - Produktivitätsindikatoren im Vergleich	28
Abbildung 3-13: Entwicklung der Ressourcenproduktivität auf Basis des direkten Materialeinsatzes in NRW.....	29
Abbildung 4-1: Ressourcenproduktivität in NRW - Entwicklung der Produktivitätsindikatoren im Vergleich.....	36

Literaturverzeichnis

Aachener Stiftung Kathy Beys – Aachener Stiftung, 2010, Sustainable resource management needs to consider both used and unused extraction, Factsheet Measuring Resource Extraction, https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Factsheet_Measuring_Resource_Extraction.pdf, [30.11.2022]

Barles, Sabine, 2009, Urban Metabolism of Paris and its region, in: Journal of Industrial Ecology, 2009, Nr. 13 (6), S. 898-913

Biebeler, Hendrik / Lang, Thorsten, 2014, Ressourceneffizienzindikatoren – Darstellung und Bewertung, Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, <http://www.iwkoeln.de/studien/gutachten/beitrag/hendrik-biebeler-und-thorsten-lang-ressourceneffizienzindikatoren-206466> [30.11.2022]

Bringezu, S. / Bleischwitz, R., 2009, 1 Introduction, in: Sustainable Resource Management (2017 Editi, pp. 1–9), Routledge

Bringezu, S. / van de Sand, I. / Schütz, H. / Bleischwitz, R. / Moll, S., 2009, 2 Analysing global resource use of national and regional economies across various levels, in: Sustainable Resource Management, Sheffield (UK), S. 10–51

Bringezu, S. / Moriguchi, Y., 2015, Material flow analysis. A Handbook of Industrial Ecology, 149–166. <https://doi.org/10.4337/9781843765479.00017> [30.11.2022]

Brunner, Paul H. / Rechberger, Helmut, 2016, Handbook of Material Flow Analysis. For Environmental, Resource and Waste Engineers, Second Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL (USA)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - BMWi, 2019, Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [30.11.2022]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit – BMU, 2020a, Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin

BMU, 2020b, Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder Fortschreibung Wertschätzen statt Wegwerfen, Fortschreibung, https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/fortschreibung_abfallvermeidungsprogramm_bund_laender_bf.pdf [30.11.2022]

Bundesregierung, 2021, Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/992814/1875184/f2fbcd22ecdb457339bd90f9b06e4b0d/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-kurzfassung-bf-download-bpa-data.pdf> [30.11.2022]

Statistisches Bundesamt – Destatis, 2019, Umweltökonomische Gesamtrechnung. Methode des gesamtwirtschaftlichen Materialkontos, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/gesamtwirtschaftliches-materialkonto-fb_5851314189004.pdf?__blob=publicationFile [18.11.2022]

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV), 2009, "Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598) geändert worden ist"

Ellen MacArthur Foundation – EMF, 2013, Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition, <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an> [20.10.2022]

Europäische Kommission, 2005, Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen, Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM(2005) 670 endgültig, Brüssel

Europäische Kommission, 2011, Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa, Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM(2011) 571 endgültig, Brüssel

Europäische Kommission, 2017, Joint Research Centre, Nita, V. / Haas, W. / Blengini, G. et al., Development of a Sankey diagram of material flows in the EU economy based on Eurostat data : monitoring of non-energy & non-food material flows in the EU-28 for the EC Raw Materials Information System (RMIS), Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/362116> [30.11.2022]

Europäische Kommission, 2019, Der europäische Grüne Deal, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, COM(2019) 640 final, Brüssel

Europäische Kommission, 2020, Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, COM (2020) 98 final, Brüssel

European Statistical Office – Eurostat, 2018a, Economy-wide material flow accounts. Handbook, 2018 edition, Luxembourg

Eurostat, 2018b, Circular material use rate. Calculation method, 2018 edition, Luxembourg

Europäische Union – EU, 2011, Verordnung (EU) Nr. 691/2011 Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2011 über europäische umweltökonomische Gesamtrechnungen, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:192:0001:0016:DE:PDF> [24.10.2022]

Fernandez, J. A. / Schütz, H., 2015, Einschätzung der Berichterstattungslage und konzeptionelle Überlegungen zur Ermittlung von ressourcenbezogenen Indikatoren für NRW aus wissenschaftlicher Sicht (Konzeptpapier), Wuppertal

Fischer-Kowalski, M. / Krausmann, F. / Giljum, S. / Lutter, S. / Mayer, A. / Bringezu, S. / Moriguchi, Y. / Schütz, H. / Schandl, H. / Weisz, H., 2011, Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting: State of the art and reliability across sources. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 15 (6), S. 855–876, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00366.x> [30.11.2022]

Fluchs, Sarah / Schleicher, Carmen, 2021, Abfallhierarchie – Die Stufen der Kreislaufwirtschaft, Teil 2 der Fact Sheet-Reihe Kreislaufwirtschaft für das Forschungsprojekt SCI4climate.NRW, Köln

Fluchs, Sarah / Neligan, Adriana / Schleicher, Carmen / Schmitz, Edgar, 2022a, Zirkuläre Geschäftsmodelle. Wie zirkulär sind Unternehmen?, IW-Report, Nr. 27, Köln

Fluchs, Sarah / Neligan, Adriana, 2022b, Urban Mining als zirkuläre Strategie, IW-Report, erscheint demnächst, Köln

Geissdoerfer, Martin / Savaget, Paulo / Bocken, Nancy M. P. / Hultink, Erik Jan, 2017, The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143. Jg., S. 757-768 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048> [10.11.2022]

Geologischer Dienst NRW, 2011, Rohstoffe in Nordrhein-Westfalen. erkunden, sichern, gewinnen, Krefeld, https://www.gd.nrw.de/zip/broschuer_rohstoffe.pdf [1.11.2022]

Haas, W. / Krausmann, F. / Wiedenhofer, D. / Heinz, M., 2015, How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 19 (5), S. 765–777

Haupt, Melanie / Vadenbo, Carl / Hellweg, Stefanie, 2017, Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21 (3), S. 615-627, <https://doi.org/10.1111/jiec.12506> [30.11.2022]

Hoekman, P. / von Blottnitz, H., 2017, Cape Town’s Metabolism: Insights from a Material Flow Analysis, *Journal of Industrial Ecology*, 21(5), 1237–1249, <https://doi.org/10.1111/jiec.12508> [9.12.202]

IN4climate.NRW (Hrsg.), 2021, Circular Economy in der Grundstoffindustrie: Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy, Gelsenkirchen

International Resource Panel - IRP, 2017, Bringezu, S. / Ramaswami, A. / Schandl, H. / O'Brien, M. / Pelton, R. / Acquatella, J. / Ayuk, E. T. / Shun Fung Chiu, A. / Flanegin, R. / Fry, J. / Giljum, S. / Hashimoto, S. / Hellweg, S. / Hosking, K. / Hu, Y. / Lenzen, M. / Lieber, M. / Lutter, S. / ... Razian, H., Assessing Global Resource Use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction

Information und Technik Nordrhein-Westfalen - it.nrw, 2022, Statistik, Gebiet und Bevölkerung, <https://www.it.nrw/statistik/gesellschaft-und-staat/gebiet-und-bevoelkerung> [15.11.2022]

Kraussmann, Fridolin / Schandl, Heinz / Eisenmenger, Nina / Giljum, Stefan / Jackson, Tim, 2017, Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development, Annual Reviews, Nr. 42, S. 647-675

Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWg, 2012, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html> [30.11.2022]

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen - LANUV, 2022, Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2019, LANUV-Fachbericht 125, Recklinghausen

Mayer, A. / Haas, W. / Wiedenhofer, D. / Krausmann, F. / Nuss, P. / Blengini, G. A., 2019, Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. Journal of Industrial Ecology, Vol. 23 (1), S. 62–76. <https://doi.org/10.1111/jiec.12809> [30.11.2022]

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen – MKULNV NRW, 2015, Abfallwirtschaftsplan Nordrhein-Westfalen. Teilplan Siedlungsabfälle, umwelt.nrw, https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/abfallwirtschaftsplan_nrw_broschuere.pdf [10.11.2022]

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen - MULNV NRW, 2022, Daten zur grenzüberschreitenden Verbringung von Abfällen nach und aus Nordrhein-Westfalen 2020, umwelt.nrw, https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/Bericht_II_Grenzueberschreitende_Verbringung_bf.pdf [9.11.2022]

Musango, J. K. / Currie, P. / Robinson, B., 2017, Urban metabolism for resource efficient cities: from theory to implementation, Paris

Nachhaltigkeitsindikatoren.nrw, 2020, 8.1 Rohstoffproduktivität, <https://www.nachhaltigkeitsindikatoren.nrw.de/rohstoffproduktivitaet> [30.11.2022]

Neligan, Adriana / Engels, Barbara / Schaefer, Thilo / Schleicher, Carmen / Fritsch, Manuel / Schmitz, Edgar / Wiegand, Ralf, 2021, Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen, Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin

Sastre, S. / Carpintero, Ó. / Lomas, P. L., 2015, Regional material flow accounting and environmental pressures: The Spanish case. Environmental Science and Technology, Vol. 49 (4), S. 2262–2269, https://doi.org/10.1021/ES504438P/SUPPL_FILE/ES504438P_SI_001.PDF [30.11.2022]

Steffen, W. / Rockström, J. / Richardson, K. / Lenton, T. M. / Folke, C. / Liverman, D. / Summerhayes, C. P. / Barnosky, A. D. / Cornell, S. E. / Crucifix, M. / Donges, J. F. / Fetzer, I. / Lade, S. J. / Scheffer, M. / Winkelmann, R. / Schellnhuber, H. J., 2018, Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the

National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 115, No. 33, S. 8252–8259.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115> [30.11.2022]

Umweltbundesamt – UBA, 2015, Website: Mechanisch-Biologische Behandlung, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/mechanisch-biologische-behandlung> [15.11.2022]

UBA, 2020, Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf [4.11.2022]

UBA, 2022a, Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft, <http://www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022> [30.11.2022]

UBA, 2022b, Rohstoffproduktivität, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/rohstoffproduktivitaet#entwicklung-der-rohstoffproduktivitaet> [30.11.2022]

Umweltökonomische Gesamtrechnung der Länder – UGRdL, 2019a, Glossar und Methoden: Empfang und Versand biotischer und abiotischer Güter – Handel zwischen den Bundesländern, Januar 2019, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2019-07/m_rohstoffentnahme_7.pdf [30.11.2022]

UGRdL, 2019b, Glossar und Methoden: Materialkonto, Juli 2019, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2019-10/m_materialkonto.pdf [30.11.2022]

UGRdL, 2019c, Glossar und Methoden: Indikatoren zu Materialeinsatz und Rohstoffverbrauch, August 2019, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2019-10/m_rohstoffentnahme_8.pdf [30.11.2022]

UGRdL, 2021a, Glossar und Methoden: Verwertete inländische Entnahme abiotischer Rohstoffe, August, 2021, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2022-11/m_rohstoffentnahme_1_0.pdf [30.11.2022]

UGRdL, 2021b, Glossar und Methoden: Nicht verwertete inländische Abgabe, August 2021, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2022-11/m_rohstoffentnahme_5_0.pdf [30.11.2022]

UGRdL, 2022a, Indikatoren und Kennzahlen, Tabellenband 2022, Erscheinungsdatum: November 2022, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2022-11/ugrdl_tab_2022.xlsx [30.11.2022]

UGRdL, 2022b Glossar und Methoden: Import und Export biotischer und abiotischer Güter, <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/glossar-und-methoden#methoden> [30.11.2022]

United Nations General Assembly - UN, 2015, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1, <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> [30.11.2022]

United Nations Environment Program - UNEP, 2021, The use of natural resources in the economy. A Global Manual on Economy Wide Material Flow Accounting, Nairobi, Kenya

Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder – VGRdL, 2022, Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2021, https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2022-03/vgrdl_r1b1_bs2021_0.xlsx [30.11.2022]

Voskamp, I. M. / Stremke, S. / Spiller, M. / Perrotti, D. / van der Hoek, J. P. / Rijnaarts, H. H. M., 2017, Enhanced Performance of the Eurostat Method for Comprehensive Assessment of Urban Metabolism: A Material Flow Analysis of Amsterdam. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21 (4), S. 887–902, <https://doi.org/10.1111/jiec.12461> [30.11.2022]