

**Ressourcenwirkung des urbanen Metabolismus
Ergebnisse von AP 1.1 im Rahmen des UFOPLAN Vorhabens FKZ:
3715 75 122 0**

von

Daniel Bleher
Öko-Institut e.V., Darmstadt (E-Mail: d.bleher@oeko.de)

Öko-Institut e.V., Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

24.05.2017

UFOPLAN Projekt FKZ: 3715 75 122 0
Gefördert von



Kurzbeschreibung

Menschliche Siedlungsaktivitäten rufen eine Reihe von Wechselbeziehungen mit dem jeweiligen räumlichen Umfeld hervor. Im Rahmen dieses Arbeitspapiers wird beleuchtet, mit welchen Methoden in der Wissenschaft städtische Austauschbeziehungen untersucht und welche Arten von Energie- und Stoffströmen dabei betrachtet werden. Im Fokus stehen dabei nicht nur Städte selbst, sondern auch die Wechselbeziehungen mit ihrem jeweiligen räumlich-geografischen Umland. Dabei wird der Frage nachgegangen, welche Austauschbeziehungen sich auf das räumliche Umfeld einer Stadt (regionales Hinterland) beziehen und welche Austauschbeziehungen in Verbindung mit dem "globalen Hinterland" erfolgen. Auch wird berücksichtigt, welchen Einfluss die Globalisierung und der zunehmende Welthandel auf die Stadt-Umland Beziehungen haben. Vorrangig wird dabei Literatur ausgewertet, in der physische Formen von Austauschbeziehungen untersucht werden.: Stoffe im naturwissenschaftlichen Sinne (chemische Elemente und Substanzen, Trinkwasser etc.), Materialien im ökonomischen Sinn (z.B. Baumaterialien) und Energie in stofflichen Formen wie z.B. fossile Energieträger oder Kraftstoffe. Das Thema Ernährung und die Versorgung mit Lebensmitteln wird vertieft in AP 1.3 des Vorhabens behandelt.

Abstract

Human settlement activities evoke a series of interrelationships with their spatial surroundings. This paper examines the methods that scientific research uses to understand urban-rural interrelationships in terms of energy and material flows. In addition to the processes within cities, research also seeks to understand the interactions of energy and material flows with the spatial environment around an urban area (hinterland) and the exchange relations in connection with the "global hinterland" in the rest of the world. In this work we also consider the impact of globalization and growing world trade on urban-rural interactions. Literature has been evaluated primarily by examining physical forms of interrelationships: substances in the natural scientific sense, such as chemical elements and substances like drinking water; materials in an economic sense like building materials; and energy in material forms like fuels. Other issues such as nutrition and the supply of food is further analysed in other parts of the Rural Urban Nexus project.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung und Ziele von AP 1.1	6
2 Das Konzept urbaner Metabolismus	7
3 Ziele und Nutzen von urbanen Stoffstromanalysen	9
4 Methodische Grundlagen urbaner Stoffstromanalysen	10
4.1 Stocks and Flows	10
4.2 Materiallager und Wechselwirkung mit Energieflüssen	11
4.3 Bilanzierungsansätze	14
4.4 Systemgrenzen	15
4.5 Regionaler Metabolismus	16
4.6 Umweltwirkungen urbaner Energie- und Stoffflüsse	17
5 Diskussion urbaner Energie-, Material- und Stoffflüsse	18
6 Zusammenfassung	32
7 Quellenverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überblick der Energie- und Stoffflüsse im urbanen Metabolismus	7
Abbildung 2:	Schematische Darstellung Materialinput ggü. Energieinput in verschiedenen Phasen der Urbanisation.....	12
Abbildung 3:	Input und Outputströme der Stadt Singapur zwischen 1962 und 2002.....	13
Abbildung 4:	Anforderungen und Ziele für ressourcenschonende Infrastrukturen in Städten.....	13
Abbildung 5:	Schematische Darstellung von Energie- und Stoffflüssen einer Stadt im Austausch mit der Umwelt	15
Abbildung 6:	Flussdiagramm zur Holz- und Außenhandelsbilanz der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2014 in Mio. m ³ (r) (Rohholzäquivalenten).....	20
Abbildung 7:	Phosphor-Fluss entlang der Prozessschritte Erzeugung, Verarbeitung und Konsum.	22
Abbildung 8:	Menge des Angebots regionaler Produkte in der Stadt Freiburg im Vergleich zum Gesamtkonsum und zur produzierten Menge im Regierungsbezirk Freiburg	23
Abbildung 9:	Hauptexportländer für Weizen.....	24
Abbildung 10:	Hauptimportländer für Weizen	25
Abbildung 11:	Ausgewählte Importländer für Weizen	26
Abbildung 12:	Hauptexportländer für Mais	27
Abbildung 13:	Wichtigste Importländer für Mais	28
Abbildung 14:	Hauptexportländer für Soja	29
Abbildung 15:	Wichtigste Importländer für Soja	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gesamtschau einzelner Energie- und Stoffflüsse des urbanen Metabolismus	10
Tabelle 2:	Stoffflüsse nach sozio-technischen Systemen einer Stadt	11
Tabelle 3:	Überblick relevanter Energie- und Stoffflüsse, deren mögliche Kopplung ans regionale Umfeld und die verbundenen Umweltauswirkungen.....	35

1 Einleitung und Ziele von AP 1.1

Städte sind für die gesellschaftliche Entwicklung von zentraler Bedeutung. Hier findet Wirtschaftswachstum statt, ein breites kulturelles Angebot und der gesellschaftliche Faktor soziale Nähe machen Städte attraktiv. Die Entwicklung und das Wachstum von Städten sind aber auch an den Verbrauch von Ressourcen gekoppelt. Einfach ausgedrückt stellt sich der Ressourcenverbrauch von Städten wie folgt dar: Materialien, wie Energieträger oder Baustoffe werden von Städten nachgefragt und dort entweder direkt verbraucht oder eingelagert. In Form von Emissionen oder Abfällen werden die Materialien wieder freigesetzt und verbleiben entweder innerhalb der Stadt (z.B. in Böden) oder verlassen die Stadt wieder. Eine Stadt ist damit nicht nur räumlich mit ihrer Umgebung, sondern über vielfältige Wechselwirkungen und Austauschbeziehungen auch funktional mit der regionalen oder globalen Umwelt verbunden.

Ziel von AP 1.1. ist eine prägnante Beschreibung des Stadt-Land Metabolismus im Kontext der Globalisierung einschließlich ihrer Ressourcenwirkungen durch die aufgezeigt werden soll, wie in der Umweltwissenschaft die Wechselwirkungen und Austauschbeziehungen einer Stadt beschrieben und welche Methoden zur Messung und Bewertung angewendet werden. Betrachtet werden soll aber nicht nur die Stadt selbst, sondern auch deren Stoffwechselbeziehungen mit dem räumlich/geografischen Umland. Es soll der Frage nachgegangen werden, welche Austauschbeziehungen sich auf das räumliche Umfeld einer Stadt (regionales Hinterland) beziehen und welche Austauschbeziehungen in Verbindung mit dem "globalen Hinterland" erfolgen. Im Fokus der Untersuchung stehen physische Formen von Austauschbeziehungen wie:

- ▶ Stoffe im naturwissenschaftlichen Sinn wie chemische Elemente und Substanzen, z.B. Trinkwasser
- ▶ Materialien im ökonomischen Sinn wie z.B. Baumaterialien
- ▶ Energie, in stofflichen und nicht-stofflichen Formen wie z.B. fossile Energieträger oder solare Strahlung.

Wechselwirkungen und Austauschbeziehungen werden demnach verstanden als Energie- und Stoffströme (flows), die sowohl als Input, Ab-/Einlagerung, als auch Output einer Stadt anzusehen sind.

Das zentrale Konzept zur Betrachtung städtischer Energie- und Stoffströme wird als urbaner Metabolismus (engl. urban metabolism) bezeichnet. Es wird der Stand der Wissenschaft wiedergegeben, wie er sich ausgehend vom Konzept Urbaner Metabolismus heute darstellt.

Mit Blick vor allem auf den europäischen Raum bzw. Industrienationen wird gezeigt, in welche Kategorien sich die Energie- und Stoffströme einteilen lassen, welche wesentlichen Umweltauswirkungen aus den Stoffwechselbeziehungen resultieren und auf welche räumlichen Bereiche sich diese beziehen. Soweit die untersuchten Studien dies ermöglichen, wird im Sinne des Projektverständnisses stets das (ländliche) Umland mitberücksichtigt (rural-urban nexus).

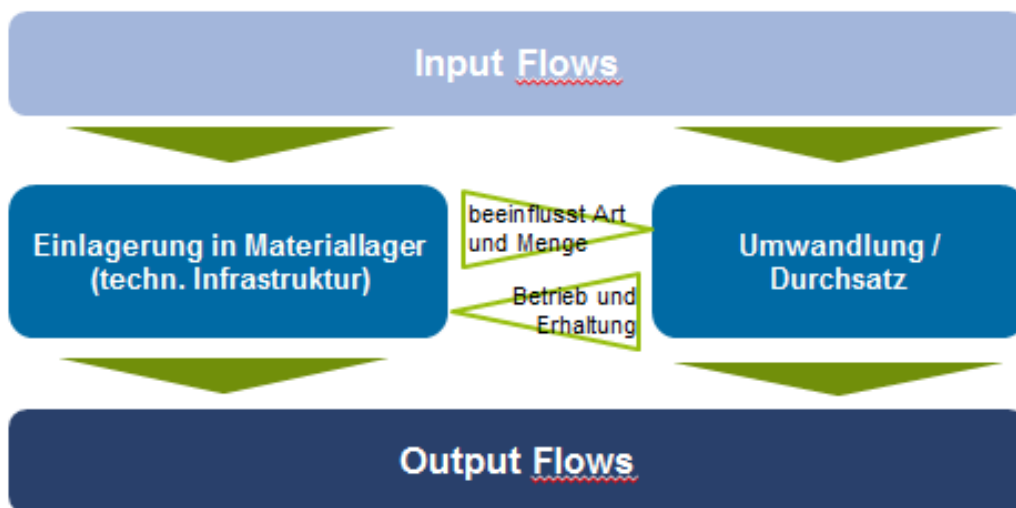
Mit der Untersuchung der stofflichen Interaktionen im Kontext von Stadt und Land sollen die Notwendigkeit einer integrierten Land-Stadt Entwicklung aufgezeigt und wesentliche Handlungsfelder identifiziert werden.

2 Das Konzept urbaner Metabolismus

Ausgangspunkt der Recherche ist das auf Wolman zurück gehende Konzept des urbanen Metabolismus. Wolman (1965) beschrieb als Erster eine Stadt als Ökosystem. Der Begriff Metabolismus stammt aus dem Altgriechischen und bezeichnet alle chemischen Stoffwechselprozesse in Lebewesen zum Aufbau und Erhalt von Körpersubstanz und zur Energiebereitstellung.

Durch das von Wolman entwickelte Konzept des urbanen Metabolismus werden die durch menschliche Siedlungsaktivitäten hervorgerufenen Energie- und Stoffflüsse (Metabolismus = physische Energie- und Stoffwechselprozesse) beschrieben und erstmals quantifiziert. Unterschieden wird dabei in Input- und Outputströme sowie in Lager. Inputströme werden entweder in Infrastrukturen/Gebäude eingelagert oder umgewandelt und verlassen in Form von Outputströmen den Betrachtungsraum. Wichtig ist dabei, dass die gewählte Form der Infrastrukturen/Gebäude die Art und Menge der zum Betrieb umgewandelten Energie- und Stoffflüsse beeinflusst (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Überblick der Energie- und Stoffflüsse im urbanen Metabolismus



Quelle: eigene Darstellung

Der grundsätzliche Ansatz wurde in den darauffolgenden Jahren inhaltlich weiterentwickelt und ausdifferenziert. Insbesondere aus der Forschungsszene der Industriellen Ökologie (engl. Industrial Ecology) wird das Konzept urbaner Metabolismus aufgegriffen. Die in diesem Kontext hauptsächlich angewendete Methode zur Ermittlung des urbanen Metabolismus ist die Stoffstromanalyse (engl. **Material Flow Analysis – MFA**). Erste praktische Anwendungen solcher urbanen Stoffstromanalysen wurden z.B. von Duvigneaud & Denayeyer-De Smet (1975) für die Stadt Brüssel oder von Newcomb et al. (1978) für die Stadt Hongkong durchgeführt. Bei diesen Arbeiten stand die Untersuchung der Gesamtheit aller Energie- und Stoffflüsse im Fokus. Es finden sich aber auch zahlreiche Studien, die vertieft einzelne Energie- und Stoffflüsse untersuchen. Aufgrund der Relevanz wird die Methode Stoffstromanalyse in Kapitel 4 vertieft vorgestellt.

Aufbauend auf einer Stoffstromanalyse ist es möglich, diese hin zu einer **Ökobilanz (Life-Cycle-Assessment = LCA)** einer Stadt zu erweitern. Hierfür werden auf Basis der ermittelten Stoffflüsse verschiedene Kategorien von Umweltwirkungen (impact categories) verknüpft.

Klassische Umweltkategorien einer LCA sind:

- ▶ Treibhausgaspotential / Global Warming Potential
- ▶ Abbau der Ozonschicht / Stratospheric ozone depletion
- ▶ Bildung photochemischer Oxidantien / Photochemical ozone formation
- ▶ Versauerung / Acidification
- ▶ Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) / Nutrient enrichment
- ▶ Humantoxizität / Human toxicity
- ▶ Ökotoxizität / Ecotoxicity

Gegenüber Stoffstromanalysen werden urbane Ökobilanzen eher selten durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine urbane Ökobilanz ausgewertet.

Eine weitere Methode zur Ermittlung des urbanen Metabolismus ist die Adaption des **ökologischen Fußabdrucks** (engl. ecological footprint) von Städten (Grimm et al. 2000 und Mehmood 2010). Fallstudien gibt es zu Calgary / Canada und San Francisco / USA. Grundgedanke des ökologischen Fußabdrucks ist, dass sich aus jeder Form der Ressourcennachfrage eine Fläche an Naturraum berechnen lässt, die es bedarf, um die Nachfrage zu bedienen. Die Fläche an Naturraum kann dabei sowohl terrestrisch als auch marin/aquatisch sein. Der gesamte Flächenbedarf des ökologischen Fußabdrucks ergibt sich durch:

- ▶ Flächen zur Bindung/Speicherung von CO₂-Emissionen (aus Verbrennungsprozessen, Herstellung, Transport etc.),
- ▶ landwirtschaftliche Flächen zur Lebensmittelproduktion,
- ▶ forstwirtschaftliche Flächen zur Herstellung von Baustoffen und Verbrauchsgütern (z.B. Papier),
- ▶ Fischereiflächen,
- ▶ Flächenverbrauch zur unmittelbaren Nutzung als Siedlungs- und Verkehrsfläche.

Vereinfacht ausgedrückt wird pro Flächeneinheit ein durchschnittliches Maß zur Bereitstellung für oben genannte, nachgefragte Ressourcen hinterlegt. Die Einheit, mit der ein ökologischer Fußabdruck ausgedrückt wird, ist der „globale Hektar“. Der ökologische Fußabdruck bringt also zum Ausdruck, welche Fläche an Naturraum benötigt wird, um die menschliche Nachfrage nach Ressourcen (für einen bestimmten Bilanzrahmen) bereit zu stellen. Grundlage für die Berechnung eines ökologischen Fußabdrucks sind Input-Output-Beziehungen bezogen auf einen bestimmten Betrachtungsraum. Somit kann der ökologische Fußabdruck als eine Weiterentwicklung und thematische Fokussierung einer Stoffstrombetrachtung angesehen werden.

Unter Gesichtspunkten des ökologischen Fußabdrucks fasst Odum (1978) die Stadt als Parasit auf. Parasitär daher, weil die Stadt, anstatt selbst Lebensmittel zu erzeugen, diese aus dem näheren und weiteren Umland bezieht, Abfälle und Emissionen an dieses zurückgibt und daher immer mehr Fläche in Anspruch nimmt als die eigentliche Stadtfläche umfasst. Castán Bronto et al. (2012) bemerkt, dass die Stadtplanung solche parasitären Beziehungen als Grundverständnis zwischen Stadt und Umland begreift.

3 Ziele und Nutzen von urbanen Stoffstromanalysen

Wie dargestellt, wird der urbane Metabolismus insbesondere durch Anwendung der Methode Stoffstromanalyse (MFA) untersucht. Als Ziele urbaner MFA-Studien für nachhaltige Stadtentwicklung werden folgende Aspekte genannt:

- ▶ Mit dem Verständnis von urbanen Stoffstrombeziehungen wird das Ziel verbunden, **ineffiziente Ressourcenverbräuche zu identifizieren**. In diesem Zusammenhang wird in UNEP (2013) auch die Chance gesehen, durch eine Überwindung ineffizienter Ressourcenverbräuche städtischer Systeme stärker in regionale Ökosystemdienstleistungen wieder einzubetten ("re-embedding").
- ▶ Ein weiteres Ziel kann sein, die Ressourceneffizienz von Städten zu ermitteln (Oswald & Baccini 1999). Durch die Bildung von **Indikatoren bzgl. Ressourceneinsatz** können Städte untereinander sowie Städte mit nationalen Bezugsgrößen verglichen werden. Auf den Ressourcenverbrauch bezogene Indikatoren spielen zurzeit in der politischen Diskussion eine wichtige Rolle, um eine Entkopplung von Ressourcenverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu messen und zu bewerten.
- ▶ Praktische Anwendung finden urbane MFA Untersuchungen vor allem mit Blick auf die Herausforderung Klimawandel. Urbane MFA dienen auch als Ausgangspunkt für Carbon Footprint Berechnung von Städten, also der **Bottom-up Bilanzierung kommunaler Treibhausgasemissionen**.
- ▶ Die Ergebnisse urbaner MFA können bei der **Planung und Ausgestaltung nachhaltiger Stadtteile** genutzt werden (Fritsche et al. 2001) Die Ergebnisdarstellung, aufgelöst nach Benutzergruppen kann für die **Bewusstseinsbildung für nachhaltigen Konsum** genutzt werden.

4 Methodische Grundlagen urbaner Stoffstromanalysen

Als Stoffstromanalyse bezeichnet wird die systematische Untersuchung von Stoffstromgrößen und Beständen eines definierten Systems für einen bestimmten räumlichen und zeitlichen Rahmen (Brunner & Rechenberger 2004). Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen zur Erstellung von Stoffstromanalysen vorgestellt. Besonders relevant ist die Festlegung des Untersuchungsraums und inwieweit dabei das räumliche Umfeld von Städten berücksichtigt wird.

4.1 Stocks and Flows

Ein **Lager (engl. stock)** kann als Bestandsgut zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden werden (Clift et al 2015). Die Entstehung und Entwicklung von Materiallagern ist Abbild wirtschaftlicher Aktivitäten und Kapitaleinsätze: Materialien in Bauwerken, Infrastruktur, Ausrüstung und langlebige Güter. Daneben können Lager auch in Form von Naturgütern wie Parkflächen, Oberflächen- und Grundwasser bestehen.

Unter **Flow** wird der Zu- und Abfluss von Energie- und Stoffströmen in und aus dem betrachteten System verstanden (**In- und Outflow**). Inputströme werden entweder in Infrastrukturen/Gebäude eingelagert oder umgewandelt und verlassen in Form von Outputströmen den Betrachtungsraum (vergl. auch Abbildung 1). Jeder Flow stellt eine Rechengröße dar, die mit Daten hinterlegt werden muss. Basierend auf Kennedy & Hoomweg (2012) wird in Tabelle 1 ein umfassender Katalog an flows und stocks für urbane MFA dargestellt. Zu beachten ist, dass auf der Inputseite auch natürliche Stoffflüsse wie solare Strahlung berücksichtigt werden können. Interessant sind diese Inflows mit Blick auf eine mögliche Nutzung als Ressource innerhalb des betrachteten Systems (regenerative Energiequelle, Regenwassersammlung).

Grundsätzlich werden Inputflows entweder in Stocks eingelagert oder in Outflows umgewandelt (siehe Abbildung 1). Die Verweildauer im Stock kann unterschiedlich lang sein. Von einer kurzen Verweildauer in Organismen und Biomasse über eine lange in Gebäuden (Baumaterialien) bis zur dauerhaften Ablagerung innerhalb des Systems (z.B. als Schadstoffakkumulation in Böden).

Outflows resultieren aus der direkten Umwandlung (z.B. Energieträger in Luft-Emissionen) oder werden aus Stocks abgegeben (z.B. Bauabfälle, die außerhalb des Systems deponiert werden). Stoffe, die aus Stocks abgegeben werden, können:

- ▶ einerseits zu Belastungen von Boden, Grundwasser und der menschlichen Gesundheit führen (z.B. Schwermetallaustrag aus Fassaden in Fließ- und Grundwasser (Reberning 2007),
- ▶ andererseits aber auch als Ressource zur Deckung des eigenen Bedarfs genutzt werden (z.B. Baustoffrecycling, Kompostierung, Klärschlammaufbereitung).

Tabelle 1: Gesamtschau einzelner Energie- und Stoffflüsse des urbanen Metabolismus

Inputseite	Prozesse innerhalb Systemgrenze	Output
Anthropogener Input	Lager	Abfälle
Lebensmittel	Baumaterialien	Deponieabfall
Wasser (Importe)	Stickstoff und Phosphor	Verbrannte Abfälle
Grundwasserentnahmen	Deponierte Abfälle	Wiederverwertbare Wertstoffe
Baustoffe	Bau- und Abbruchabfälle	Abwasser
Fossile Brennstoffe (nach Art)		
Strom		
Stickstoff und Phosphor		

Natürlicher, passiver Input Sonneneinstrahlung Wasser (Niederschläge)		Emissionen in Boden und Grundwasser Stickstoff und Phosphor
		Atmosphärische Emissionen Schwefeldioxid SO ₂ Stickoxide NO _x Kohlenstoff (CO und CO ₂) flüchtige organische Stoffe Feinstaub Methan Ozon Ruß
		Produzierte Güter ¹

Quelle: eigene Darstellung nach Kennedy & Hoomweg 2012

Neben dieser allgemeinen Auflistung von flows und stocks ordnet UNEP (2013) Stoffflüsse den unterschiedlichen sozio-technischen Systemen einer Stadt zu (siehe folgende Tabelle 2).

Tabelle 2: Stoffflüsse nach sozio-technischen Systemen einer Stadt

System	Stofffluss
Wasser (Ver- und Entsorgung)	Input aus Grundwasser, Oberflächenwasser und Entsalzungsanlagen. Abwasser in Behandlungsanlagen, Outflows in natürliche Systeme
Energie	Energie aus fossilen Energieträgern, Wasserkraft, Biomasse, Kerntechnik, PV
Mobilität	Güter in Verkehrsträgern und Leitungsnetzen
Abfall	Feste und gasförmige Abfälle, inkl. recyclingfähige Materialien
Informations- und Kommunikationsinfrastruktur	Daten

Quelle: eigene Darstellung nach UNEP 2013

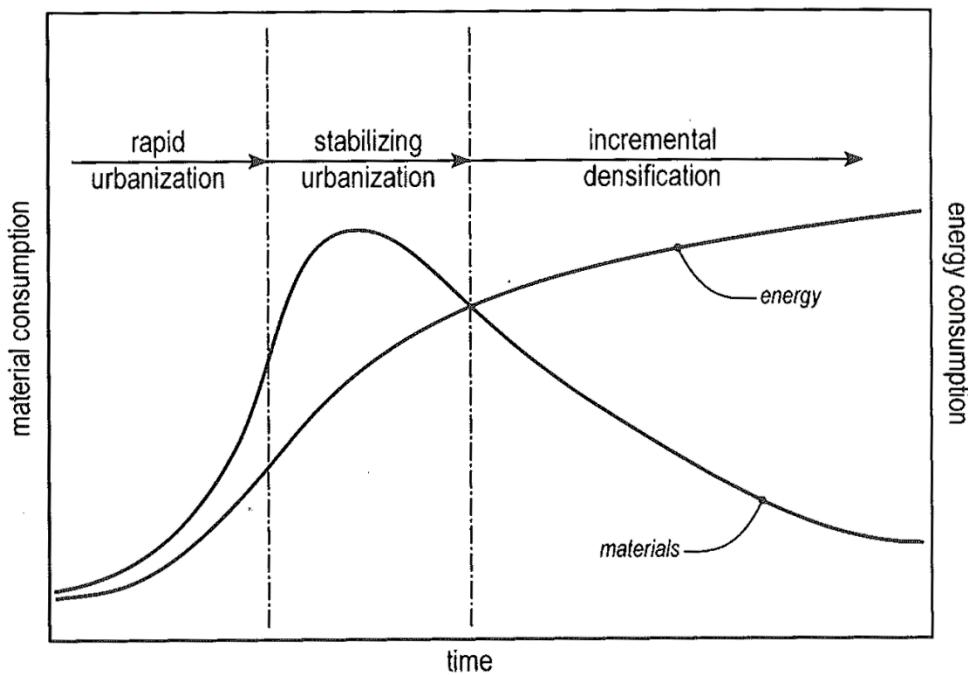
4.2 Materiallager und Wechselwirkung mit Energieflüssen

Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen einer Stadt bilden die mengenmäßig relevantesten Materiallager. Die Bildung von Stofflagern ist mit dem Wachstum von Städten verbunden. Fernandez (2007) stellt den Zusammenhang zwischen Materialinput ins Materiallager und Energieverbrauch (als Folge und zur Erhaltung der Lager) in unterschiedlichen Stadien der Stadtentwicklung schematisch dar (Abbildung 2). In der Phase des starken Wachstums nimmt der Materialbedarf einer Stadt demnach schneller zu, als der Energieverbrauch. In dieser Phase werden Infrastrukturen errichtet (Gebäude,

¹ Die Berücksichtigung von produzierten Gütern als Output hängt vom gewählten Bilanzierungsansatz ab, wird in der Regel aber nicht erfasst (Produktionsbasierter Bilanzierungsansatz)

Straßen, Kanalisation etc.). In der anschließenden Phase eines stabilisierten städtischen Wachstums erreicht der Materialverbrauch sein Maximum und nimmt anschließend kontinuierlich ab. Die Errichtung der wesentlichen Infrastrukturen ist nun abgeschlossen. Weiterer Materialinput dient der Erhaltung bzw. der Erweiterung von Infrastrukturen. Dagegen nimmt der Energieverbrauch einer Stadt weiter kontinuierlich zu. Dieser Zusammenhang lässt sich einerseits so erklären, dass errichtete Gebäude und Infrastrukturen sukzessive von den städtischen Bewohnern bezogen und genutzt werden. Weiterhin nimmt mit dem zunehmenden Alter (und unterstelltem zunehmenden Wohlstand) einer Stadt, der Energieverbrauch (durch die Anzahl und technischen Ausstattung) kontinuierlich zu.

Abbildung 2: Schematische Darstellung Materialinput ggü. Energieinput in verschiedenen Phasen der Urbanisation

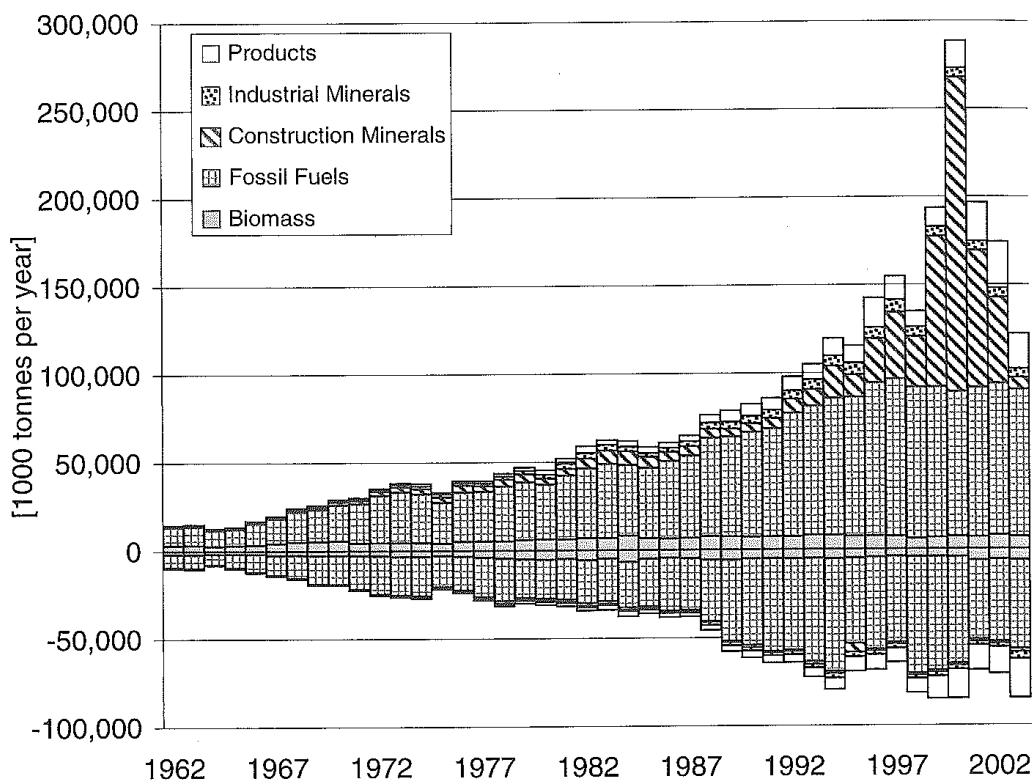


Quelle: Fernandez 2007

Der Aufbau des urbanen Materiallagers bestimmt demnach nicht nur die Art und Menge der zum Betrieb notwendigen energetischen Stoffflüsse, sondern gibt auch Aufschluss über die Art und Menge zukünftig anfallender Abfallstoffe in Form möglicher Ressourcen (Stichwort Urban Mining), aber auch gefährlicher Stoffausträge (Schwermetallfreisetzung z.B. über Kupferfassaden, siehe Beispiel zu Stofffluss Abfall in Kapitel 5).

Ein Beispiel für die quantitative Erfassung von Material- und Energieverbrauch am Beispiel der Stadt Singapur über einen Zeitraum von 1962 bis 2002 wurde von Schulz (2007) ermittelt (siehe Abbildung 3). Im Untersuchungszeitraum hat sich Singapur zu einem wichtigen Raffinerie-Standort in der Region entwickelt. Daher steigen sowohl der Input als auch der Output fossiler Kraftstoffe deutlich an. Auffällig ist aber der kontinuierlich steigende Input an Baustoffen, der das starke Stadtwachstum vor allem in den 90er Jahren widerspiegelt.

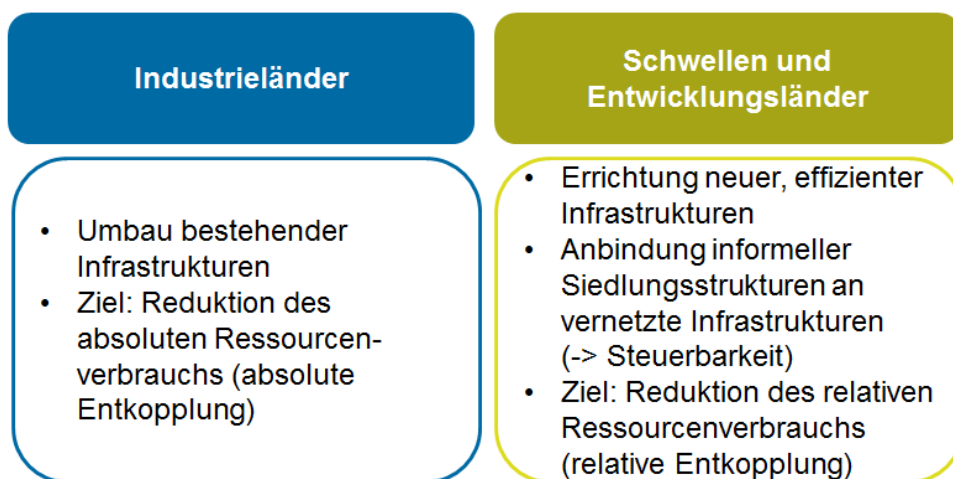
Abbildung 3: Input und Outputströme der Stadt Singapur zwischen 1962 und 2002



Quelle: Schulz (2007)

Die Autoren der UNEP Studie (2013) City Level Decoupling sehen Infrastrukturen als den zentralen Ansatzpunkt für die Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Wirtschaftswachstum von Städten. Dabei wird zwischen Herausforderungen zum Umbau städtischer Infrastrukturen in Industrienationen und in Schwellen- und Entwicklungsländern unterschieden (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Anforderungen und Ziele für ressourcenschonende Infrastrukturen in Städten



Quelle: eigene Darstellung nach UNEP 2013

4.3 Bilanzierungsansätze

Der Bilanzierungsansatz bezeichnet die Festlegung, nach welchem Grundsatz eine Stoffstromanalyse durchgeführt wird. Unterschieden werden kann in Bottom-up- und Top-down-Ansatz.

Bottom-up-Ansatz

Ausgangspunkt sind die einzelnen Aktivitäten des Endverbrauchers, die in ihrer Gesamtsumme den Metabolismus einer Stadt bilden. Die kleinste Betrachtungsebene ist demnach ein einzelner Endverbraucher oder ein einzelner Haushalt.

Baccini & Brunner (2012) führen 4 Kernaktivitäten menschlichen Handelns an, durch die der urbane Metabolismus bedingt wird:

- ▶ Ernähren + Erholen (nourish – nour)
- ▶ Wohnen + Arbeiten (reside & work – R&W)
- ▶ Reinigen (clean)
- ▶ Transportieren + Kommunizieren (transport & communicate – T&C)

Aufgrund der menschlichen Kernaktivitäten ergeben sich vielfältige Stoffflüsse. Diese sind beispielsweise:

- ▶ Eine Folge der Kernaktivität "Ernähren" ist der "Phosphor-Fluss": Mineralischer Phosphor wird industriell abgebaut, zu Düngemitteln verarbeitet und in der Landwirtschaft eingesetzt (zur Produktion von Lebens- oder Futtermitteln). Ein Teil des in der Landwirtschaft eingesetzten Phosphors verbleibt im Boden und/oder gelangt ins Grundwasser. Ein weiterer Teil wird über die Nahrung vom Menschen aufgenommen und wieder ausgeschieden und gelangt so in Abwassersysteme und letztlich in Abwasserbehandlungsanlagen und Klärschlämme.
- ▶ Eine Folge der Kernaktivität "Wohnen und Arbeiten" ist der "Chlor-Fluss": Bei der Errichtung von Gebäuden und Infrastrukturen kommen Materialien wie z.B. PVC zum Einsatz (in Rohren und Bodenbelägen), bei deren Herstellung Chlor eingesetzt wird und zu Umweltbelastungen führen kann. Durch Unfälle (z.B. Brand) oder unsachgemäße Entsorgung können Chlorverbindungen oder daraus resultierende Zerfallsprodukte zu Emissionen und Belastungen für Mensch und Umwelt führen (z.B. Entstehung von Dioxinen beim Verbrennen von PVC).
- ▶ Durch die Kernaktivität "Transportieren und Kommunizieren" werden bestimmte Metall-Flüsse wie z.B. von Kupfer (in Strom- und Versorgungsleitung oder Fassadenteilen) ausgelöst. Hierüber ergeben sich (negative Umwelt-)Folgen beim Abbau, der Verarbeitung oder der dissipativen Freisetzung während der Nutzphase.

In der praktischen Anwendung wird für die kleinste Betrachtungsebene (Einzelverbraucher oder Haushalt) ein bestimmtes Muster an Kernaktivitäten definiert und daraus resultierende Stoffströme abgeleitet. Davon ausgehend ergibt sich der urbane Metabolismus als Gesamtheit aller Stoffflüsse der Endverbraucher.

Top-Down-Ansatz

Der Ursprung von Stoffstromanalysen liegt in der Betrachtung ökonomischer Systeme, sowohl auf nationaler (Einzelstaaten) sowie auf globaler Ebene (Hodson et al. 2012). Konträr zum Bottom-up-Ansatz wird beim Top-Down-Ansatz der urbane Metabolismus über Gesamtverbrauchswerte innerhalb der gewählten Bilanzgrenze ermittelt. Hierfür werden statistische Daten wie z.B. Produktions- oder Handelsstatistiken sowie nationale Güterinventare genutzt und unter Umständen auf den betreffenden Betrachtungsraum "herunter skaliert". In Europa etabliert ist der von Eurostat im Jahr 2000 veröffentlichte Leitfaden "Economy-wide material flow accounts and derived indicators" (Eurostat

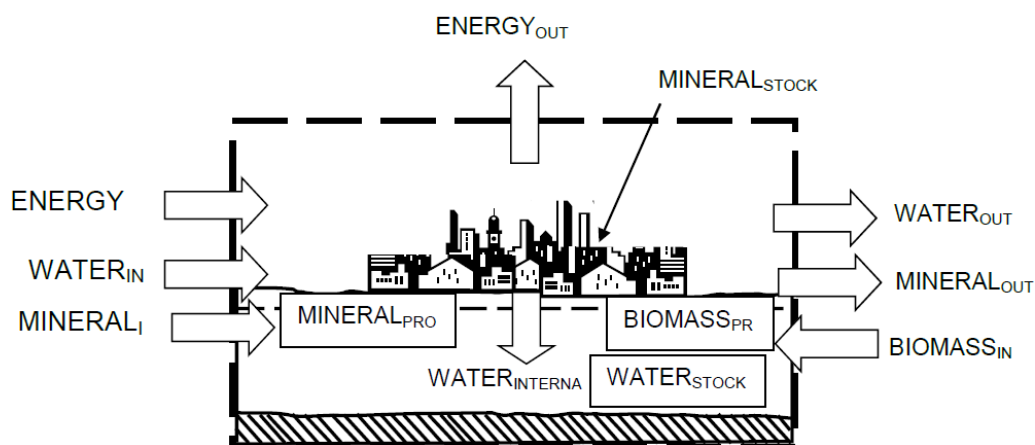
2000). Der Leitfaden wird zur Bilanzierung der Input-Output-Ströme von Nationalstaaten angewendet. Es handelt sich dabei um einen rein massebezogenen und damit hoch aggregierten Ansatz. Das heißt, dass alle betrachteten Güter (und ihre Vorketten) bezogen auf ihr Gewicht in die Bilanzierung mit einfließen. In der Folge haben alle aus diesem Ansatz abgeleiteten Indikatoren als Bezugsgröße die Einheit Tonne. Der Vorteil dieses Top-Down-Ansatzes besteht darin, dass darauf aufbauend eine Reihe von Indikatoren abgeleitet wurden (z.B. Ressourcenintensität pro Gut), die sowohl eine zeitliche Entwicklung als auch eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Ländern ermöglichen sollen.

Die Kritik an dieser Berechnungsmethode setzt an der reinen Massenbetrachtung an. Grundsätzlich wird zwischen direkten und indirekten Stoffflüssen unterschieden und über den Indikator TMR (total material requirement) werden auch die indirekten Flüsse, d.h. die Vorketten importierter Güter, abgebildet. TMR ist aber nur einer von mehreren Indikatoren und wird in der Praxis häufig nicht berechnet (weil sehr aufwändig). Gerade die Vorketten von technisch komplexen Gütern (wie z.B. elektronischen Geräten), die im Ausland hergestellt werden, sind bezogen auf die Umweltwirkungen sehr relevant. Fehlt die Betrachtungsebene der Vorketten, ist das Ergebnis wenig aussagekräftig und vergleichbar. Besonders deutlich wird dies durch den beispielhaften Vergleich der beiden importierten Güter: Mobiltelefon und Kies (als Baustoff). Während die Vorkette eines Kilogramms Kies im Abbau, Aufbereitung und Transport liegt, ist die Vorkette eines Kilogramms Mobiltelefons deutlich komplexer und schwerer zu ermitteln.

4.4 Systemgrenzen

Eine klare Definition von Systemgrenzen ist grundlegend, um methodisch sauber und nachvollziehbar die Energie- und Stoffströme eines Untersuchungsraums zu bilanzieren. Dies gilt gleichermaßen für die Bilanzierung eines urbanen Metabolismus. In den ausgewerteten Fallstudien orientiert sich die Festlegung der Systemgrenze in der Regel an räumlichen bzw. administrativen Grenzen. Damit verbunden ist ein praktischer Grund: Die Verfügbarkeit von Daten hängt häufig an administrativen Grenzen.

Abbildung 5: Schematische Darstellung von Energie- und Stoffflüssen einer Stadt im Austausch mit der Umwelt



Quelle: Clift et al. 2015

Die meisten Studien zum Urbanen Metabolismus fokussieren sich auf die Stadt als Bezugsgröße. Das hat zur Folge, dass ein „Außerhalb“ der gewählten Systemgrenze Stadt nicht weiter dahingehend differenziert wird, ob sich „außerhalb“ auf das (peri-)rurale Umfeld oder globale Bezüge bezieht. Der räumliche Ursprung und der Verbleib von In- und Outputströmen ist nicht auto-

matisch Teil einer urbanen MFA Untersuchung. Es finden sich lediglich einige qualitative Hinweise darauf, woher Inputströme stammen. Decker et al. (2000) weist (mit Blick auf Megacities²) darauf hin, dass die meisten Inputströme (wie Energie, Lebensmittel) zunehmend entkoppelt vom räumlich/ geographischen Umfeld bezogen werden, während die Versorgung mit Frischwasser (Input) sowie die Abgabe von Abfällen (Output) abhängig vom räumlich/ geographischen Umfeld ist. Oswald und Baccini (1999) nehmen auf den regionalen Kontext von Energie- und Stoffflüssen dahingehend Bezug, als dass für nachhaltige urbane Systeme „ausgeglichene Verbindungen zu benachbarten und globalen Netzwerken“ unterstellt werden. Demnach sind urbane Energie- und Materialflüsse immer Teil sowohl regionaler als auch globaler Austauschbeziehungen. Für eine nachhaltige Stadtentwicklung kommt es darauf an, ein Gleichgewicht zwischen regionalen und globalen Austauschbeziehungen zu finden. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der deutsche Begriff "Hinterland" Eingang in die englischsprachige Literatur gefunden hat. Allerdings wird "Hinterland" als Synonym sowohl für ein lokal/regionales als auch ein globales Hinterland verstanden (Castan Broto et al. 2012).

4.5 Regionaler Metabolismus

Folgendes Kapitel gibt einen Überblick über Studien, die als Systemgrenze einen über eine Stadt hinaus erweiterten Betrachtungsrahmen (regionale Stoffstromanalyse) wählen. Insgesamt findet sich der Ansatz einer regionalen Stoffstromanalyse in der Fachliteratur bislang noch selten. Gleiches gilt für eine differenzierte Untersuchung urbaner Teilräume, wie Stadtteile oder Quartiere:

- ▶ Hammer & Giljum (2006) untersuchen die Städte Hamburg, Wien und Leipzig sowie deren jeweiliges suburbanes Umland. Angewendet wird der oben beschriebene massebezogene Top-Down-Ansatz. Neben den jeweiligen Kernstädten gehören auch umliegende Kreise bzw. Bezirke mit zum Betrachtungsraum. Der Betrachtungsrahmen ist also regional, orientiert sich in der Definition aber an Verwaltungsgrenzen und nicht rein an funktionalen Verflechtungen (wie z.B. Pendlerströmen) oder topographischen Merkmalen. Für die Jahre 1992-2001 (sowie bezogen auf Wien für die Jahre 1995-2003) werden die ermittelten Materialströme in Bezug zur jeweiligen wirtschaftlichen Lage gesetzt. Die Untersuchung betrachtet nur den Materialverbrauch der Kategorien "Fossile Energieträger", "Mineralien und Baustoffe", "Chemische Produkte" und "Biomasse". Stoffflüsse wie "Wasser", "Lebensmittel" oder "Strom" werden nicht betrachtet. Die betrachteten Stoffflüsse berücksichtigen nur den direkten Materialverbrauch. Wie weiter oben - bezüglich der Kritik am Top-Down-Ansatz - erläutert, wäre die Berücksichtigung des indirekten Materialverbrauchs allerdings von zentraler Bedeutung, um ein vollständiges Bild der Ressourcenwirkung in seiner Gesamtheit zu erhalten.
- ▶ Barles (2009) wendet den Top-Down-Ansatz nach der Eurostat Methode für den Großraum Paris an. Dabei werden einzelne Indikatoren für die Anwendung auf regionaler Ebene nachjustiert und differenziert für verschiedene Betrachtungsebenen getrennt ausgewiesen (z.B. nur für die Kernstadt Paris inkl. Suburbaner Raum, Großraum Paris). Es wird nur der direkte Materialinput betrachtet. Vorketten und damit indirekte Ressourcenverbräuche werden nicht berücksichtigt. Ebenso bleibt der Stofffluss "Wasser" unberücksichtigt.
- ▶ Brunner & Rechenberger (2004) sowie Baccini & Brunner (2012) wählen einen Bottom-up-Ansatz und untersuchen einzelne Stoffflüsse in ausgewählten Stadt-Land-Regionen in Österreich und der Schweiz. Hauptfokus liegt dabei auf dem Stofffluss Phosphor, der durch die Lebensmittelnachfrage gesteuert wird.
- ▶ Eine räumliche Differenzierung urbaner Teilräume wird von VandeWeghe & Kennedy (2007) vorgenommen. Untersucht werden der direkte Energieverbrauch und damit die Treibhausgas-

² Für weiterführende Informationen zum Metabolismus von Megacities, siehe: (Grubler et al. 2012) und (Kennedy et al. 2015)

emissionen von Privathaushalten in verschiedene Stadtteilen / Quartieren der kanadischen Stadt Toronto.

4.6 Umweltwirkungen urbaner Energie- und Stoffflüsse

Stoffstromanalysen erfassen zunächst nur die quantitative Menge der berücksichtigten Energie- und Materialflüsse. Mit dieser Darstellung wird aber noch keine Aussage zu den damit verbundenen Umweltauswirkungen getroffen. Stoffstrombilanzen dienen aber auch als Grundlage zur Berechnung der durch Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Stoffe verbundenen Umweltwirkungen. Das Vorgehen ist vergleichbar mit einer Ökobilanz, bei der auf Grundlage einer Sachbilanz, eine Wirkungsabschätzung der Umweltwirkungen mithilfe von Charakterisierungsfaktoren erfolgt. Bei entsprechender Datengrundlage lassen sich grundsätzlich alle Wirkungskategorien einer Ökobilanz auch für urbane Stoffstromanalysen berechnen (z.B. Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung etc.). Wichtig zu unterscheiden ist zwischen direktem und indirektem Ressourcenverbrauch eines Energie- oder Materialflusses.

- ▶ Direkter Ressourcenverbrauch/ Emissionen finden in der Regel innerhalb der Systemgrenze statt (z.B. CO₂ Emissionen durch Kraftstoffverbrauch)
- ▶ Indirekter Ressourcenverbrauch/ Emissionen gehen über die Systemgrenze hinaus und finden im Hinterland statt, z.B. Vorketten durch Förderung, Verarbeitung und Transport von Treibstoff.
- ▶ Indirekte Emissionen sind auch für viele Materialflüsse relevant. Emissionen zur Herstellung von Baumaterialien oder Produktion von Lebensmitteln entstehen außerhalb der Systemgrenze. Daher sind indirekte Emissionen grundsätzlich zu berücksichtigen. Dies geschieht aber nicht in allen der untersuchten urbanen MFA Studien.

In der fachlichen Diskussion und Anwendung steht aber insbesondere die Ermittlung der **Treibhausgaswirkung** (Global Warming Potential) im Vordergrund. Folgende Standards definieren Rechenregeln zur Ermittlung von Treibhausgasemissionen einer Stadt:

- ▶ aus Großbritannien: PAS 2070 'Specification for the assessment of greenhouse gas emissions of a city'
- ▶ aus den USA: U.S. Community Protocol for Accounting and Reporting of Greenhouse Gas Emissions (ICLEI-USA 2012)

Weitere Umweltwirkungen, wie z.B. Landnutzungsänderungen oder Bodendegradation im ländlichen Umfeld zur Stadt werden in Studien zum urbanen Metabolismus bislang nicht analysiert. Studien aus dem Bereich Raumplanung thematisieren negative Umweltwirkungen im räumlichen Umfeld von Städten aufgrund urbaner Dynamiken, insbesondere im Kontext der Diskussion des Phänomens "urban sprawl"³ (EEA/FOEN 2016). Urban sprawl (deutsch: Zersiedelung) bezeichnet die durch Änderungen und Intensivierung der Flächennutzung im suburbanen Raum aufgrund einer Zunahme von Wohnbebauung, Gewerbeflächenentwicklung und Verkehrsinfrastrukturen hervorgerufenen negativen Effekte. Die ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen reichen von Bodenverfestigung, Bodenversiegelung, Verlust von Bodenfunktionen, Verschlechterung der Grundwasserneubildung, Bodenerosion, Änderung des Kleinklimas, Veränderung von Quantität und Qualität der Grundwasserschichten über Zunahme Transportkosten durch Pendelaktivität, wirtschaftliche Verluste im Tourismus durch zersiedelte Landschaften bis zur Zunahme sozialer Segregation bis hin zu Fettleibigkeit, Stress und Bewegungsmangel. Während die Folgen durch Urban Sprawl umfassend beschrieben sind, fehlt eine integrierte Betrachtung der sich ändernden Energie- und Stoffflüsse, sowohl in den von Urban Sprawl betroffenen Räumen, als auch in den urbanen Räumen, durch deren Entwicklungsdynamiken das Phänomen hervorgerufen wird.

³ die flächenhafte Ausbreitung (Zersiedelung) von städtischen Strukturen ins ländliche Umfeld einer Stadt

5 Diskussion urbaner Energie-, Material- und Stoffflüsse

Wie erläutert, lösen menschliche Siedlungsaktivitäten verschiedene Energie- und Stoffströme aus, die entweder im urbanen Materiallager eingelagert oder als Durchsatz direkt umgewandelt werden (z.B. durch Verbrennung von Kraftstoffen). Zum Teil handelt es sich bei den Strömen um global gehandelte Güter, die aus unterschiedlichen Erdteilen bezogen werden und keinen Bezug zum regionalen Hinterland der jeweiligen Stadt aufweisen.

In Kapitel 5 wird näher auf die Energie- und Stoffflüsse auf der Inputseite des urbanen Metabolismus (vgl. linke Spalte von Tabelle 1) eingegangen und Hinweise für eine räumliche Kopplung zwischen Stadt und regionalem Hinterland beleuchtet.

Fossile Energieträger und Kraftstoffe. Fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle sind global gehandelte Güter. Aufgrund ihres geologischen Vorkommens konzentriert sich die Förderung auf bestimmte Hauptförderländer. Eine räumliche Kopplung zwischen Stadt, Umland und Land ist hierbei, außer in den Förderländern, nicht gegeben. Eine Ausnahme bildet die Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen. Diese sind in Teilen stärker dezentral organisiert und kommen daher für eine räumliche Kopplung zwischen Stadt (Verbrauch) und Land (Erzeugung) grundsätzlich in Betracht.

Massenbaustoffe, wie Steine oder Kies werden aufgrund hoher Transportkosten in der Regel aus dem regionalen Umfeld einer Stadt bezogen⁴. Für Kies, Sand und Natursteine besteht daher grundsätzlich eine räumliche Verbindung zwischen Abbauort und Verbrauch. Dies gilt nur bedingt für Zement, der als Bindemittel in der Betonherstellung beigemischt wird und keine entscheidenden Gewichtsanteile am fertigen Produkt hat. Die Stahlproduktion ist auf einzelne Produktionsstandorte beschränkt und ist daher kein regionales Gut. Gleiches gilt für Sekundärstahl aus dem Schrottreycling. Bezogen auf das für den Hochbau relevanteste Baumaterial Stahlbeton bedeutet dies, dass die Gesteinskörnung (ca. 80 Massenprozent) aus dem regionalen Umfeld stammen, das Bindemittel Zement sowie der Bewehrungsstahl über weitere Strecken transportiert werden.

Güter für die technische Ausstattung von Gebäuden werden ebenso wie Innenausstattungsgegenstände und Konsumgüter über den nationalen bzw. globalen Markt bezogen.

Holz ist ein vielseitig einsetzbarer Rohstoff, der in unterschiedlicher Weise für den urbanen Metabolismus relevant ist. Zum einen ist Holz ein Baustoff, aus dem z.T. sehr langlebige Gebäudeteile (Balken, Träger, Platten etc.) und Konsumgüter wie Möbel konstruiert werden. Zudem wird aus holzbasierten Zellstoffen eine Vielzahl von meist kurzlebigen Konsumgütern wie z.B. Papier oder Pappe hergestellt. Weiterhin dient Holz als Energieträger zur Wärme- und Stromerzeugung.

Um einen Überblick über die Nutzung von Holz- und Holzprodukten zu geben, wird im Folgenden auf die nationale Holzbilanz der Bundesrepublik Deutschland eingegangen. Räumlich differenzierte Daten zur regionalen Holznutzung im Stadt-Land Kontext liegen nicht vor. Es kann daher keine Aussage über den Versorgungsgrad urbaner Räume mit Holz- und Holzprodukten aus dem regionalen Umfeld gemacht werden.

Das Hamburger Thünen Institut erstellt regelmäßig eine Holzbilanz der Bundesrepublik Deutschland. Darin werden der heimische Einschlag sowie Im- und Exporte der Warengruppen Holz und Papier dargestellt. Die aktuellsten Zahlen beziehen sich auf das Jahr 2014 (Weimar 2016, siehe Abbildung 6)⁵.

⁴ Städte mit Zugang zur Fluss- oder Seeschifffahrt können Massenbaustoffe auch günstig aus weiter entfernten Regionen beziehen

⁵ Alle Angaben werden in Kubikmeter Rohholzäquivalente gemacht. Dafür werden standardisierte Umrechnungsfaktoren genutzt um über Rohholzäquivalente eine Vergleichbarkeit der Werte zu erzielen

Abbildung 6 zeigt, dass dem Im- und Export von Holz und Papier eine große Bedeutung zukommt und dass über den Außenhandel deutlich mehr Mengen abgewickelt werden, als über den heimische Einschlag in den nationalen Holzmarkt eingebracht werden. Die Importabhängigkeit wird vor allem für Papier deutlich. Nahezu der gesamte Bedarf an primären Zellstoff oder Papier erfolgt über den Import. Lediglich ein geringer Teil primären Zellstoffs stammt aus heimischer Produktion (9,9 Mio. m³ Rohholzäquivalente aus Roh- und Restholz). Die Verarbeitung und der Weiterverkauf (Export) von Papier nimmt eine wichtige Stellung in der Holzbilanz ein. Die exportierte Papiermenge übersteigt den heimischen Verbrauch deutlich (82,8 Mio. m³ Export ggü. 51,5 Mio. m³ heimischer Papierverbrauch). Eine wichtige Größe für die deutsche Papierwirtschaft ist die Nutzung von heimischem Altpapier. Knapp 28% des gesamten Papierkreislaufes besteht aus Altpapier.

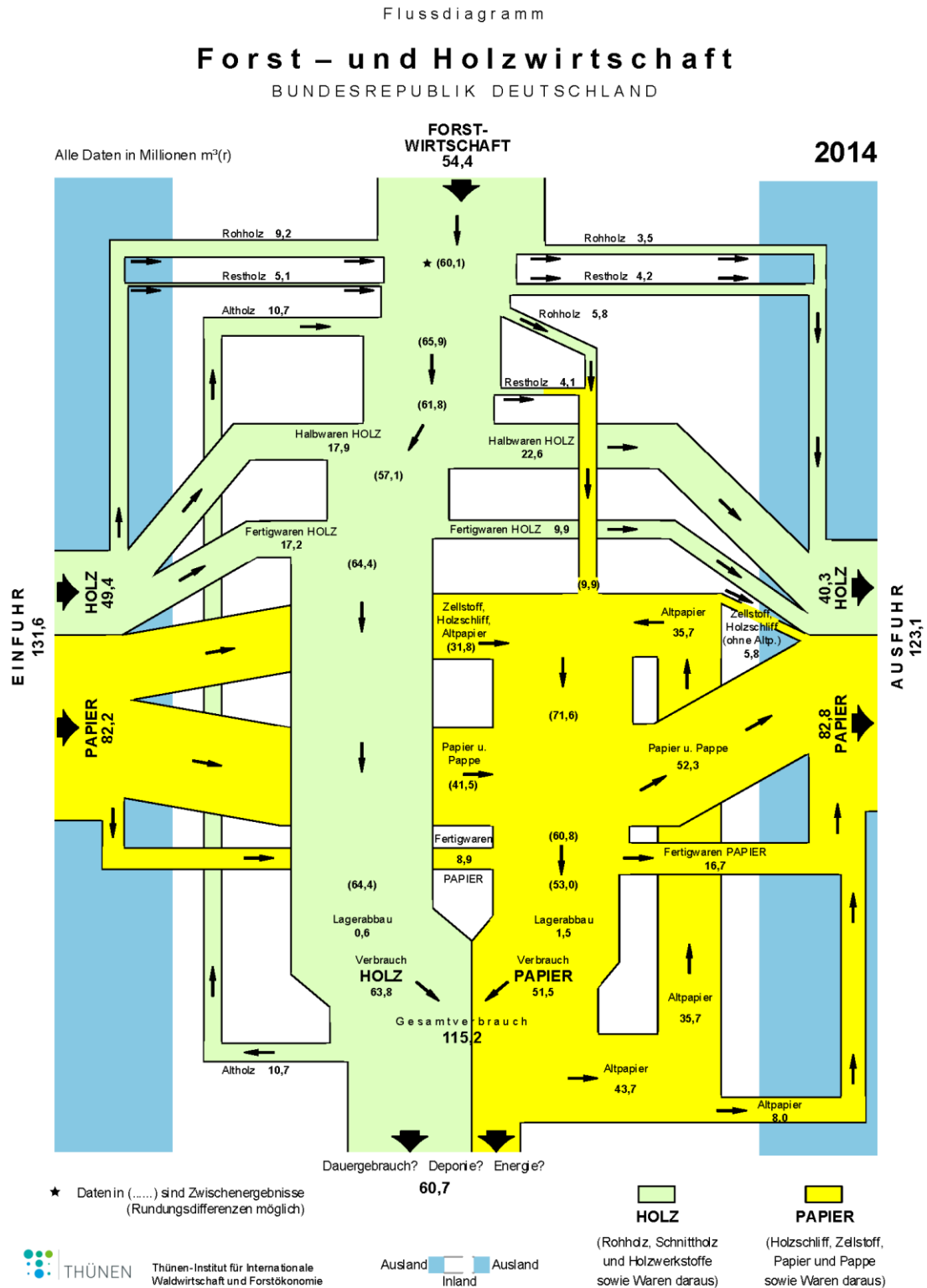
Das heimisch geschlagene Holz wird also nur in geringem Umfang zu Zellstoff für Papierprodukte verarbeitet, sondern dient vorrangig der Herstellung von Halb- und Fertigwaren aus Holz. Holzhalbwaren sind z.B. Konstruktionshölzer wie Balken, Latten und Bretter aber auch Faserplatten für den Innenausbau. Holzfertigwaren sind zum Beispiel Möbel. Der Holzimport liegt mit 49,4 Mio. m³ mengenmäßig leicht unter dem heimischen Holzeinschlag (54,4 Mio. m³) und bezieht sich vor allem auf Halb- und Fertigwaren und weniger auf unverarbeitetes Rohholz. Der Export von Holz setzt sich vor allem aus Halb- und Fertigwaren zusammen, ist aber im Umfang her geringer als der heimische Einschlag oder die Importmengen.

Während beim Papier eine starke Abhängigkeit von Import erkennbar ist, wird der Bedarf an Holz und Holzprodukten stärker durch den heimischen Einschlag gedeckt und damit ist eine Kopplung aus heimischer Produktion und heimischem Verbrauch grundsätzlich gegeben.

Da sich der heimische Einschlag nicht beliebig steigern lässt, steht für eine höhere Bedarfsdeckung durch einheimisches Holz der sparsame und effiziente Umgang mit dem Rohstoff Holz im Vordergrund (UBA 2016).

Da sich die verfügbaren Daten allerdings auf Gesamtdeutschland beziehen und nicht näher räumlich aufgelöst vorliegen, kann keine verlässliche Aussage darüber getroffen werden, ob die Nachfrage und Nutzung von Holz vorrangig auf den ländlichen oder städtischen Bereich zurück zu führen ist.

Abbildung 6: Flussdiagramm zur Holz- und Außenhandelsbilanz der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2014 in Mio. m³ (r) (Rohholzäquivalenten)



Quelle: Weimar 2016

Die Versorgung städtischer Bewohner mit **Trinkwasser** ist eine der zentralen Aufgaben der Daseinsvorsorge. Für diesen Materialfluss besteht eine hohe Abhängigkeit einer Stadt von ihrem (unmittelba-

ren und weiteren) regionalen Umfeld. Wasser ist ein öffentliches Gut. Der Handel und Transport von Trinkwasser über den Weltmarkt findet bislang kaum statt⁶. Im Vergleich zu anderen Materialflüssen einer Stadt sind die absoluten Pro-Kopf-Mengen an Frisch- und Abwasser am höchsten. In Kennedy et al. (2007) findet sich eine Zusammenfassung unterschiedlich Metabolismus-Studien, die den Wasserverbrauch von Metropolen ermitteln. Zwar ist die Abweichung der ermittelten Werte sehr hoch, es kann aber ein Pro-Kopf-Frischwasserverbrauch in einer Größenordnung von 90-150 Tonnen pro Bewohner und Jahr angesetzt werden.

Betrachtet man die mit der Wasserförderung und -bereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen (als wichtigster Umweltindikator), so fallen diese vergleichsweise gering aus. Wenn auch in den untersuchten Studien nicht dezidiert darauf eingegangen wird, ergeben sich aufgrund der starken regionalen Bindung zwischen Stadt (Wasserverbrauch) und ländlichem Umfeld (Wasserförderung) erhebliche Auswirkungen auf die Landnutzung im ländlichen Raum. Dies lässt sich beispielhaft an der aktuellen Diskussion um die Trinkwasserversorgung der Rhein-Main Region ablesen. Traditionell bezieht die Metropolregion große Teile des Trinkwassers aus umliegenden Regionen wie dem Hessischen Ried oder dem Vogelsberg. Aufgrund steigender Bevölkerungszahlen in Verbindung mit sinkenden Fördermengen lokaler Grundwasserreservoirs, nimmt der Bedarf an "importiertem" Wasser derzeit weiter zu. Im Hessischen Ried wird gefördert Wasser nicht nur zur Versorgung der Metropolregion, sondern auch intensiv für die Beregnung der Landwirtschaft genutzt. Der in der Folge sinkende Grundwasserspiegel führt zu einem vermehrten Waldsterben⁷.

Über den Outputstrom **Abfall** besteht ein direkter Bezug zwischen Stadt und Umland, da insbesondere Feststoffabfälle entweder in der Stadt selbst oder im Umland behandelt und abgelagert werden. Flüssige Abfälle wie Abwässer können sich dagegen über Flüsse oder das Meer über große Distanzen verteilen und in der Umwelt ablagern. Reberning (2007) weist nach, dass neben Abfallströmen wie Siedlungsabfällen, Abbruchmaterialien und Abwässern auch diffuse Schadstoffausträge aus langlebigen Konsumgütern zu relevanten Frachten führen können. Untersucht wurde für die österreichische Stadt Villach der Schadstoffeintrag der Schwermetalle Kupfer, Blei, Zink und Cadmium aufgrund von Oberflächenabtrag von Dächern und Straßen. Die in Materialien enthaltenen Schadstoffe werden durch Verwitterung, Korrosion, Abrieb etc. wieder frei (Reifenabrieb, Kupferdächer, Biozide in Fassaden). Die Berechnung ergab, dass jährlich rund 1,5 Tonnen Kupfer in Boden, Gewässer, Klärschlamm oder Luft gelangen. Das entspricht einer Menge von 25 Gramm pro Einwohner. Für Zink wurde eine Gesamtmenge von 4,7 Tonnen ermittelt. Das entspricht einer Menge von 82 Gramm pro Einwohner. Die Studie zeigt, dass diffuse Stoffeinträge durch Konsumprodukte gegenüber Emissionen der Herstellung immer relevanter werden. Argumentiert wird, dass Punkt-Emissionen industrieller Herstellungsprozesse aufgrund technischer Verbesserungen und schärferer Gesetzgebung deutlich reduziert wurden. Zudem findet im Zuge fortschreitender Urbanisierung eine Verlagerung von Produktionsstätten aus oder an den Rand von Städten statt. Dadurch werden diffuse Schadstoffeinträge - absolut gesehen - immer bedeutender. Da die Schadstoffe produktbezogen nur geringe Mengen ausmachen, ist ein Management der Schadstoffströme umso schwieriger.

Die Versorgung städtischer Bewohner mit **Lebensmitteln** erfolgt traditionell über das regionale Hinterland einer Stadt. Klassische regionalökonomische Modelle wie das Modell der Thünenschen Ringe gründeten auf dem Zusammenhang zwischen der Lebensmittelproduktion im ländlichen Raum und der Lebensmittelnachfrage in der Stadt. Gleichzeitig hat der Welthandel mit Agrargütern und Lebensmitteln in den letzten Jahrzehnten massiv zugenommen, und die Versorgung einer Stadt mit Lebens-

⁶ die Förderung von Trinkwasser ist mehrheitlich in kommunaler Hand, es gibt aber Entwicklungen, die eine Privatisierung der Trinkwasserförderung vorsehen. In diesem Kontext steht die Diskussion über „Recht auf Wasser und sanitärer Grundversorgung“

⁷ <http://www.fnp.de/rhein-main/Leitbild-Wasser-gesucht:art801,1980088>

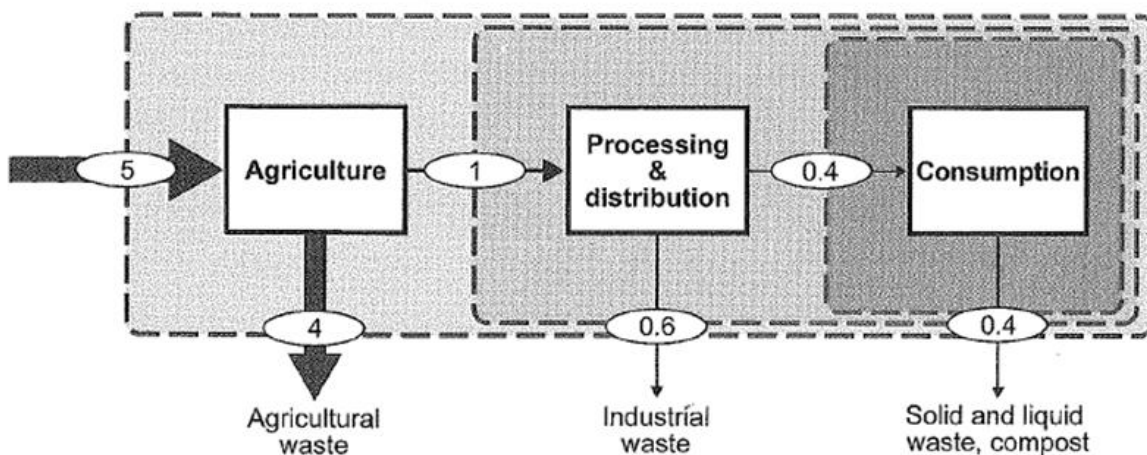
mitteln ist auch rein über den Weltmarkt möglich. Die Produktion von Lebensmitteln und deren Transport (über teils weite Entfernungen) sind mit hohen Umweltbelastungen verbunden und reichen vom übermäßigen Nährstoffeintrag in Böden und Gewässer über den Verlust von Artenvielfalt durch Monokulturen und Pestizideinsatz bis zu Methanemissionen durch Viehzucht sowie Treibhausgasemissionen durch die industrielle Verarbeitung von Lebensmitteln.

Im Folgenden werden zwei Studien näher vorgestellt, die auf das Verhältnis von Stadt und Land bezüglich des urbanen Lebensmittelkonsums eingehen. Während Brunner & Rechenberger (2004) den Stofffluss von Phosphor entlang der einzelnen Prozessschritte untersuchen, wird in Moschitz et al. (2015) der Anteil regional erzeugter Lebensmittel am Gesamtverbrauch einer Stadt betrachtet.

Die Studie von Brunner & Rechenberger (2004), zitiert in Baccini & Brunner (2012), untersucht den Stofffluss Phosphor entlang der Prozessschritte Landwirtschaft, Verarbeitung und Verteilung sowie Konsum. Das chemische Element Phosphor (P) kommt in verschiedenen Verbindungen in der Erdkruste vor und bildet die Grundlage von mineralischen Düngemitteln. Damit ist Phosphor (zusammen mit Stickstoff) eine wichtige Grundlage für die moderne Landwirtschaft. Durch das übermäßige Ausbringen von mineralischem P-Dünger können von Pflanzen ungenutzte Phosphor-Verbindungen in Boden und Gewässer gelangen und zur Eutrophierung von Gewässern beitragen. Phosphor findet sich auch in Pflanzen und landwirtschaftlichen Erzeugnissen wieder und wird über die Nahrung vom Menschen aufgenommen und wieder ausgeschieden. Nach der Abwasserbehandlung findet sich Phosphor in Klärschlämmen⁸. Zurzeit ist die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen ein wichtiges Forschungsfeld im Kontext des Ressourcenschutzes.

Die Studie von Brunner & Rechenberger (2004) zeigt für eine Region aus Stadt und ländlichem Raum, dass - bezogen auf den gesamten Phosphor-Fluss - die Verluste in der Landwirtschaft am größten sind. Der letztendlich von den Konsumenten wieder ausgeschiedene Phosphor macht nur einen Anteil von rund 8 % der ursprünglich zur Lebensmittelproduktion eingebrachten Phosphormenge aus. Rund 80 % des Phosphors verbleibt in Biomasseabfällen, in Böden und Gewässern und damit auf den Landwirtschaftsflächen des ländlichen Raums. Mit den Ergebnissen weisen die Autoren darauf hin, dass ein systematisches Phosphor-Management nicht nur die Stadt und Endkonsumenten berücksichtigen darf. Vielmehr müssen Maßnahmen zur Reduktion von Verlusten auf den Landwirtschaftsflächen des ländlichen Umfelds entwickelt werden.

Abbildung 7: Phosphor-Fluss entlang der Prozessschritte Erzeugung, Verarbeitung und Konsum.

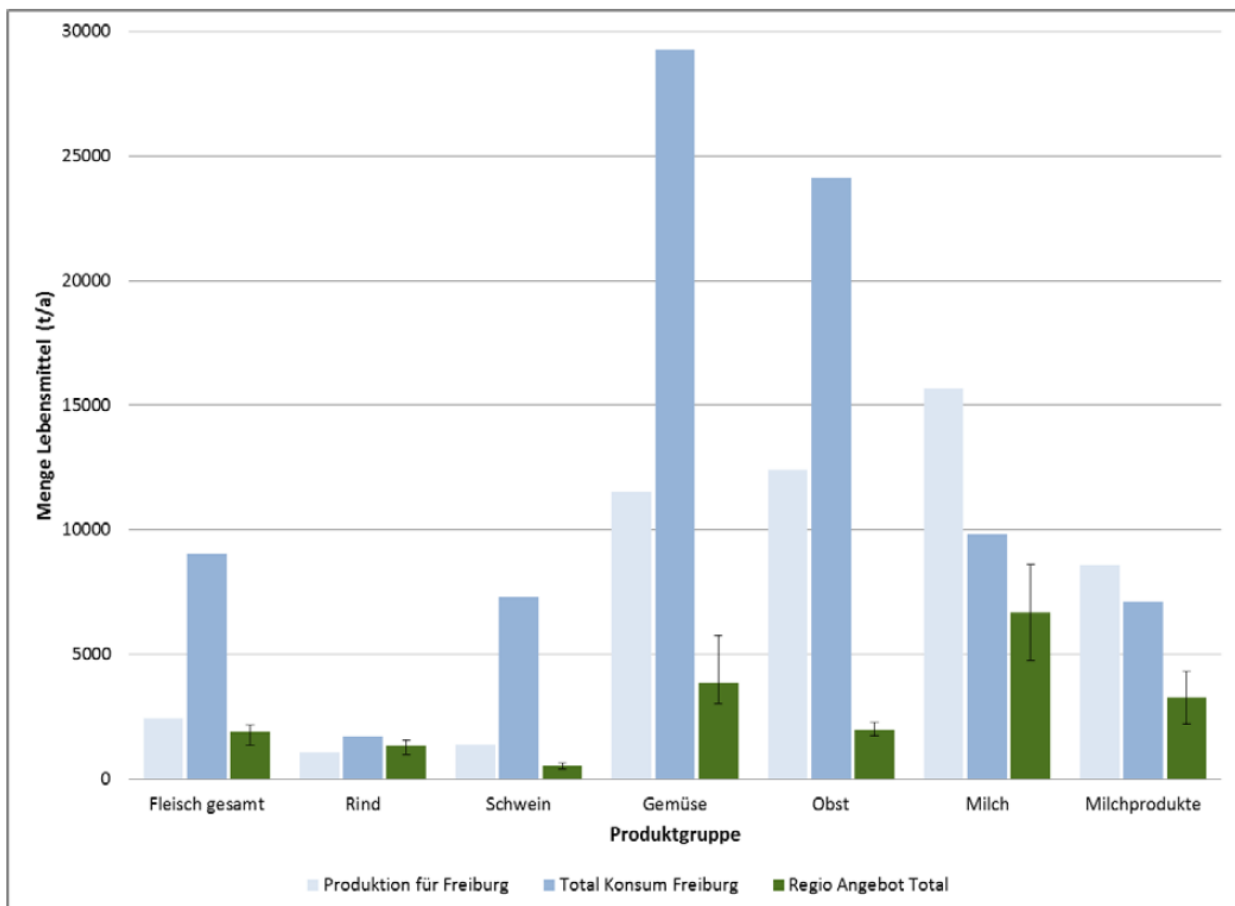


Quelle: Baccini & Brunner (2012)

⁸ Eine weitere Studie zum Phosphor-Fluss mit reiner Stadt-Perspektive findet sich in (Kalmykova et al. 2012)

Moschitz et al. (2015) untersuchen den Anteil regionaler Lebensmittel, die in der Stadt Freiburg konsumiert werden. Abbildung 8 zeigt die zentralen Ergebnisse der Studie. Dargestellt ist einerseits die Gesamtmenge der in der Region Freiburg⁹ produzierten Lebensmittel nach Produktgruppen, der Verbrauch der Bürgerinnen und Bürger Freiburgs der jeweiligen Produktgruppe sowie die als regionale Lebensmittel in Freiburg angebotenen Produkte. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, "dass die Konsumenten und Konsumentinnen in Freiburg ihren Kalorienbedarf zu etwa 20 % mit Produkten decken können, die im Regierungsbezirk Freiburg produziert werden. Eine komplette Versorgung aus der Region (Regierungsbezirk Freiburg) wäre auch bei einer besseren Ausschöpfung des Potentials regionaler Produkte nur bei einzelnen Produkten (Milch und Milchprodukte) möglich". Auch wenn die Studie nicht auf die Umweltwirkungen durch die Lebensmittelproduktion näher eingeht zeigt sich, dass aufgrund des Imports von rund 80% des Kalorienbedarfs die entsprechenden Umweltauswirkungen im "globalen Hinterland" der Stadt zu verorten sind.

Abbildung 8: Menge des Angebots regionaler Produkte in der Stadt Freiburg im Vergleich zum Gesamtkonsum und zur produzierten Menge im Regierungsbezirk Freiburg



Quelle: Moschitz et al. (2015)

Exkurs: Räumliche Entkopplung von Lebensmittelproduktion und -konsum

Das Beispiel von Moschitz et al. (2015) zeigt, dass in einer Großstadt mit 230.000 Einwohnern der Kalorienbedarf der Einwohner zu 20% über regionale Lebensmittel gedeckt wird. Im Umkehrschluss

⁹ Unter Region wird der Regierungsbezirk Freiburg verstanden

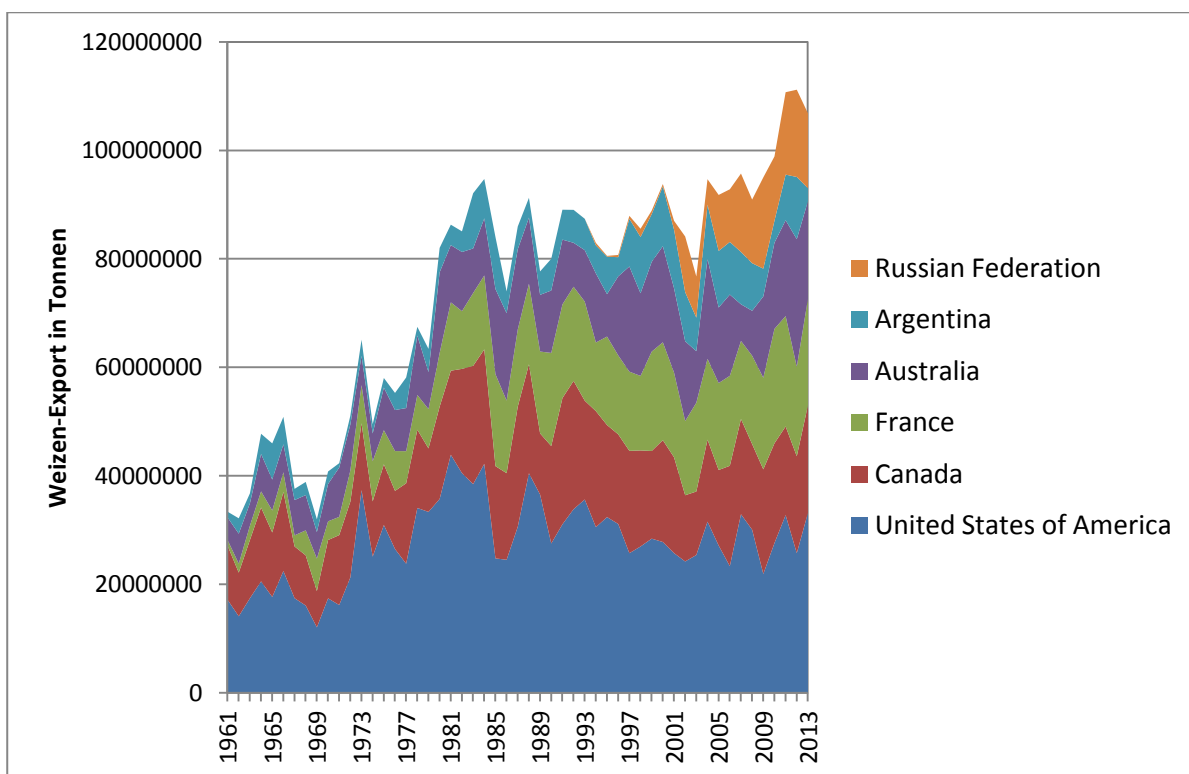
werden 80% des Kalorienbedarfs durch überregional hergestellte Lebensmittel gedeckt. Mit Blick auf das verfügbare Warenangebot des Lebensmitteleinzelhandels liegt die Vermutung nahe, dass viele Lebensmittel nicht nur über nationale Märkte, sondern auch über den Weltmarkt bezogen werden. In Form eines Exkurses werden die globalen Handelsströme von Agrargütern anhand statistischer Daten beleuchtet. Ziel des Exkurses ist es, zum einen die Zunahme des Welthandels für die mengenmäßig relevantesten Agrargüter Weizen, Mais und Soja aufzuzeigen, aber auch Hinweise für Änderungen im Nachfragemuster der importierenden Länder zu finden.

Grundlage der kurzen Auswertung ist die öffentliche Datenbank der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO Stat¹⁰), die länderbezogene Daten zur Produktion, Export und Import von einzelnen Agrargütern umfasst.

Fallbeispiel Weizen

Die folgende Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der exportierten Weizenmengen der sechs wichtigsten Exportländer über die Jahre 1961 bis 2013. Es zeigt sich, dass die exportierte Weizenmenge der (heute) sechs größten Exportnationen von insg. rund 40 Millionen Tonnen Anfang 1960 auf heute rund 100.000 Tonnen auf mehr als das Doppelte zugenommen hat. Die sechs größten Exportnationen haben heute einen Weltmarktanteil von 64%. Insbesondere hat der Weizenexport aus den Ländern der Russischen Föderation in den letzten Jahren stark zugenommen. Die USA exportieren absolut gesehen am meisten Weizen, die Menge ist aber während der letzten 10 Jahre relativ konstant geblieben.

Abbildung 9: Hauptexportländer für Weizen

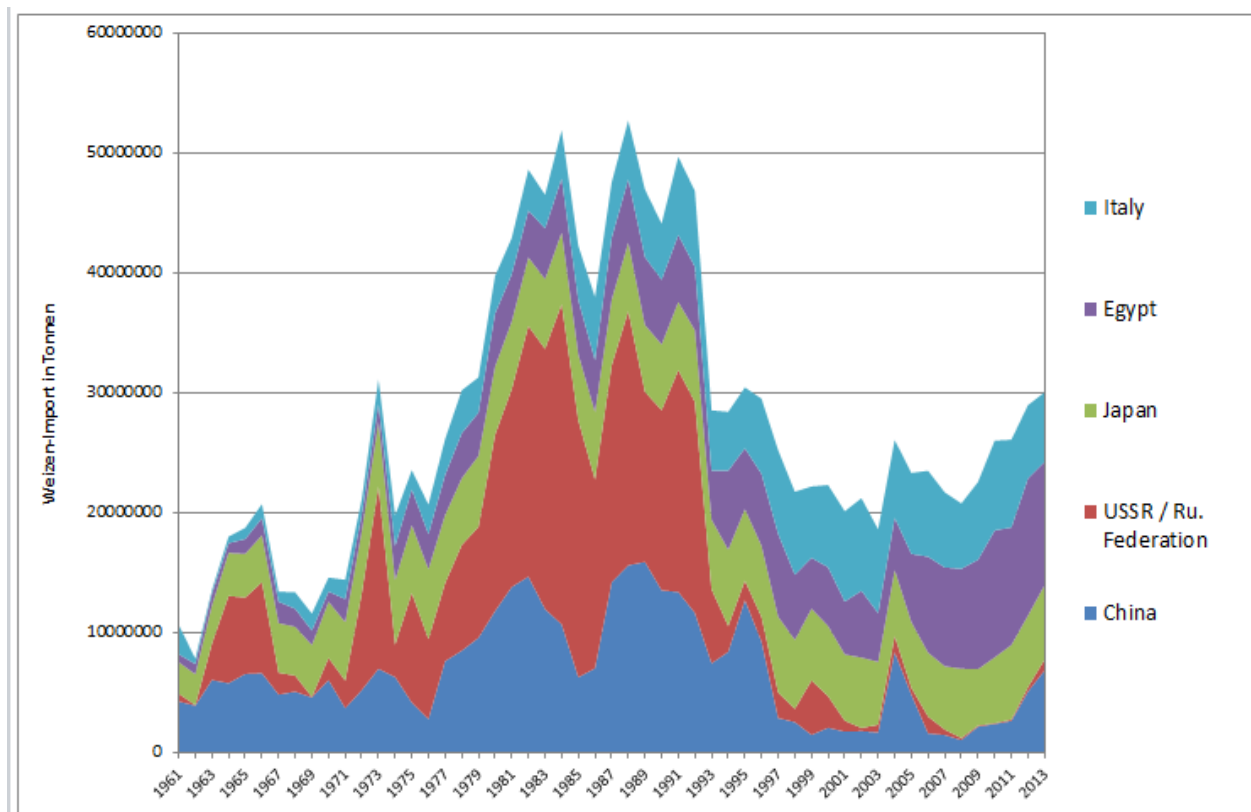


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

¹⁰ <http://faostat3.fao.org/home/E>

Die Auswertung der Hauptimportländer für Weizen zeigt (Abbildung 10), dass die Länder der ehemaligen UdSSR und China zwischen Mitte der 1970er Jahre und 1990 zu den weltweit wichtigsten Importländern zählten. Nach dem Zusammenbruch der UdSSR ging auch der Weizenimport stark zurück. Nach Mitte der 1990er Jahre führte auch China deutlich weniger Weizen ein. Als weitere Importländer sind Italien, Japan und Ägypten dargestellt. Während die Importmengen von Japan zwischen 1961 und 2013 um das Zweieinhalbfache zugenommen hat, nahm die Importmenge in Italien um das 13fache und in Ägypten um den fast 16fachen Wert gegenüber 1961 zu. Bei der Interpretation des starken Importanstiegs Ägyptens muss berücksichtigt werden, dass sich die Bevölkerung des Landes im selben Zeitraum um den Faktor 3 erhöht hat (1961: 27,8 Mio. Einwohner; 2013: 87,6 Mio. Einwohner). Die Zunahme des Weizenimports kann damit zu einem Teil auf die Bevölkerungszunahme zurückgeführt werden. Allerdings müssen auch andere Gründe für den rasant gestiegenen Weizenimport angenommen werden. Diese können sein: Insgesamt steigender Pro-Kopf Verbrauch von Lebensmitteln (und damit auch Weizen), veränderte Konsummuster und Nachfragesteigerungen nach ausländischen Erzeugnissen auf Weizenbasis oder Änderungen in der Lebensmittelproduktion mit dem Ziel, ägyptische Lebensmittel verstärkt zu exportieren und die nationale Versorgung über verstärkte Importe zu erreichen.

Abbildung 10: Hauptimportländer für Weizen

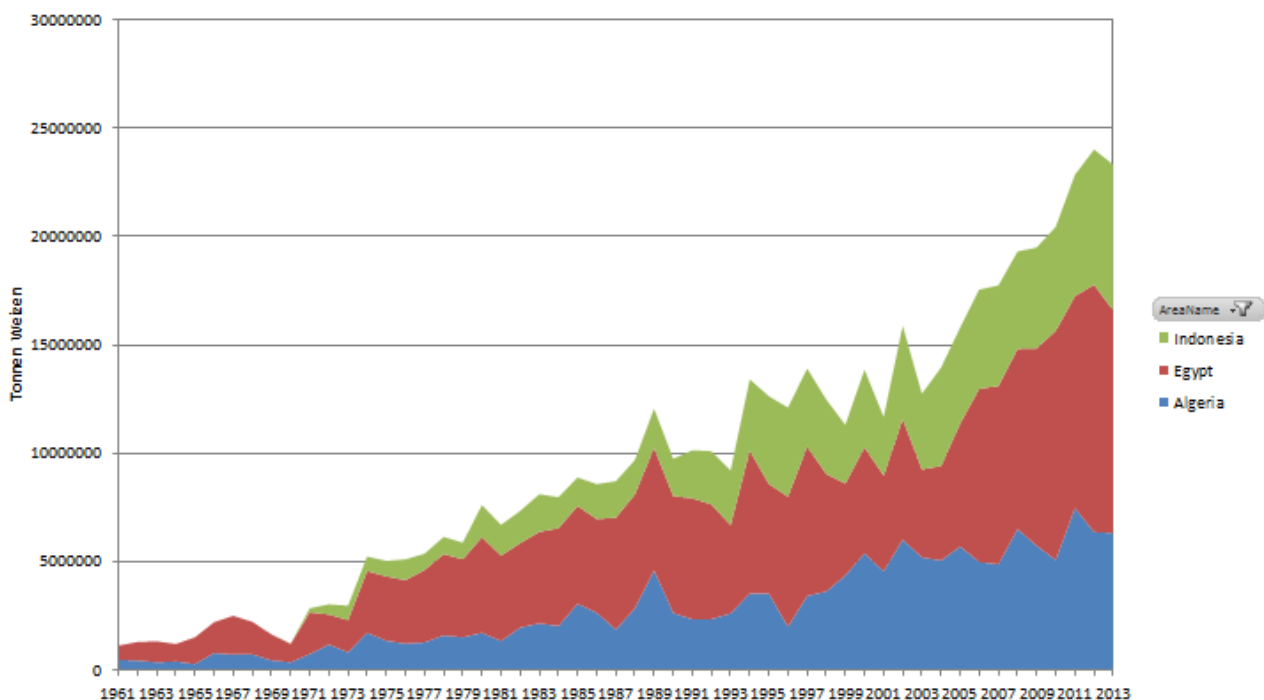


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

Daraufhin wurde eine zusätzliche Auswertung über die Veränderung des Weizenimports in weiteren ausgewählten Ländern durchgeführt (Abbildung 11). Neben Ägypten werden hierbei auch Algerien und Indonesien dargestellt. Vergleichbar mit Ägypten, haben auch in Algerien und Indonesien die Weizenimporte während der zurückliegenden 50 Jahre stark zugenommen (Algerien: Zunahme der Importmenge um das 14fache zwischen 1961 und 2013). Besonders auffallend sind die starken Importzuwächse in Indonesien, wo noch bis 1971 kein Weizen importiert wurde, im Jahr 2013 dagegen eine Gesamtmenge von 6,7 Mio. Tonnen eingeführt wurde. Für beide Länder übersteigt der Importzuwachs

den Bevölkerungszuwachs im selben Zeitraum deutlich (Algerien: Bevölkerungszuwachs um den Faktor 3,3; Indonesien: Bevölkerungswachstum um den Faktor 2,8). Wie auch für das Beispiel Ägypten, lässt sich der Importzuwachs nicht nur auf eine gestiegene Bevölkerungszunahme zurückführen, sondern es müssen auch andere Faktoren für die stark angestiegene Importmenge für Weizen gelten. Angenommen werden kann eine Veränderung der Ernährungsgewohnheiten und damit eine Umstellung auf landwirtschaftliche Erzeugnisse, die nicht in den jeweiligen Ländern selbst produziert werden. Gleichzeitig kann auch angenommen werden, dass sich nicht nur die Zusammensetzung des Speiseplans verändert hat, sondern auch die absolute Menge der verzehrten Lebensmittel pro Kopf zugenommen hat. Auch darüber würde sich ein angestiegener Lebensmittelimport (zum Teil) erklären lassen.

Abbildung 11: Ausgewählte Importländer für Weizen



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

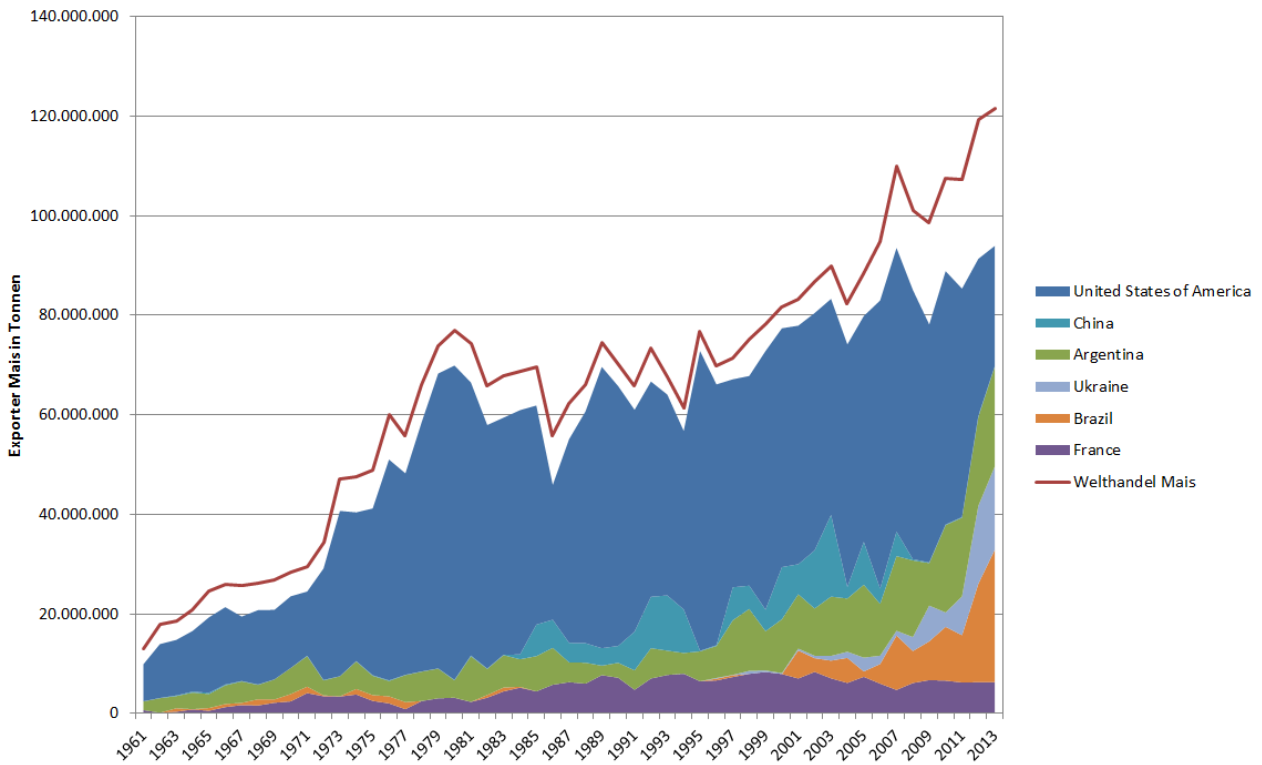
Fallbeispiel Mais

Identisch zum Fallbeispiel Weizen, sind in Abbildung 12 die sechs wichtigsten Exportländer für Mais dargestellt. Dies sind: Frankreich, Brasilien, Ukraine, Argentinien, China und die USA. Zusätzlich wurde die Gesamtmenge an weltweit exportiertem Mais als rote Linie dargestellt. Es zeigt sich, dass die Gesamtexportmenge kontinuierlich bis heute auf rund 120 Millionen Tonnen angestiegen ist. Auf Länderbasis zeigt sich, dass die USA traditionell viel Mais exportieren, die Mengen aber in den Jahren ab 2009 stark rückläufig sind. Die Ursachen dafür können vielseitig sein (z.B. stärkere Binnennachfrage, sinkende Ernteerträge, Rückgang der Anbauflächen oder verstärkte Nutzung von Mais als Biomasse und damit sinkende Exporte). Während China als Exportnation von Mais an Bedeutung verliert, fallen Brasilien und die Ukraine mit steigenden Exportmengen in den letzten 10 Jahren auf.

Importseitig zeigen sich deutliche Unterscheide bei den wichtigsten Importländern von Mais (Abbildung 13). Auffallend ist zunächst, dass die Länder der ehemaligen UdSSR bis zum Fall des Eisernen Vorhangs große Mengen an Mais über den Weltmarkt importierten. Nach dem Zerfall der UdSSR sank auch die importierte Maismenge und ist seitdem nicht mehr in nennenswertem Umfang gestiegen. Dagegen gehört Japan traditionell zu den mengenmäßig bedeutendsten Weizenimporteuren. Zwar

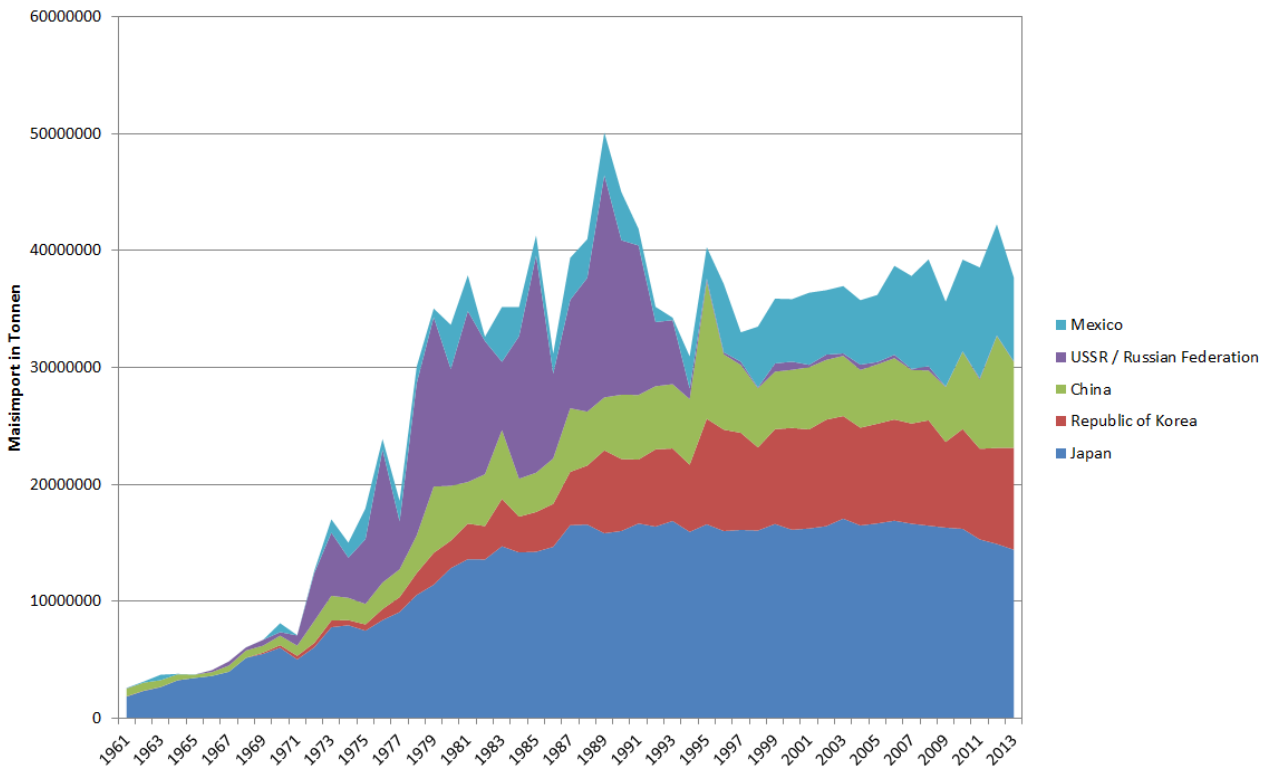
ist die Importmenge in den letzten rund 50 Jahren um das Achtfache gestiegen, allerdings sind die absoluten Mengen seit ca. 1985 etwa konstant bis leicht rückläufig. Auffällig in der Betrachtung sind die Länder Mexiko und Südkorea, die ausgehend von sehr geringen Importmengen deutliche Zuwächse an importiertem Mais aufweisen. In Südkorea fand die Zunahme des Maisimports vor allem zwischen 1975 und 1995 statt und ist in den letzten Jahren relativ konstant geblieben. In Mexiko wurde der Maisimport dagegen insbesondere in den zurückliegenden 20 Jahren deutlich gesteigert.

Abbildung 12: Hauptexportländer für Mais



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

Abbildung 13: Wichtigste Importländer für Mais

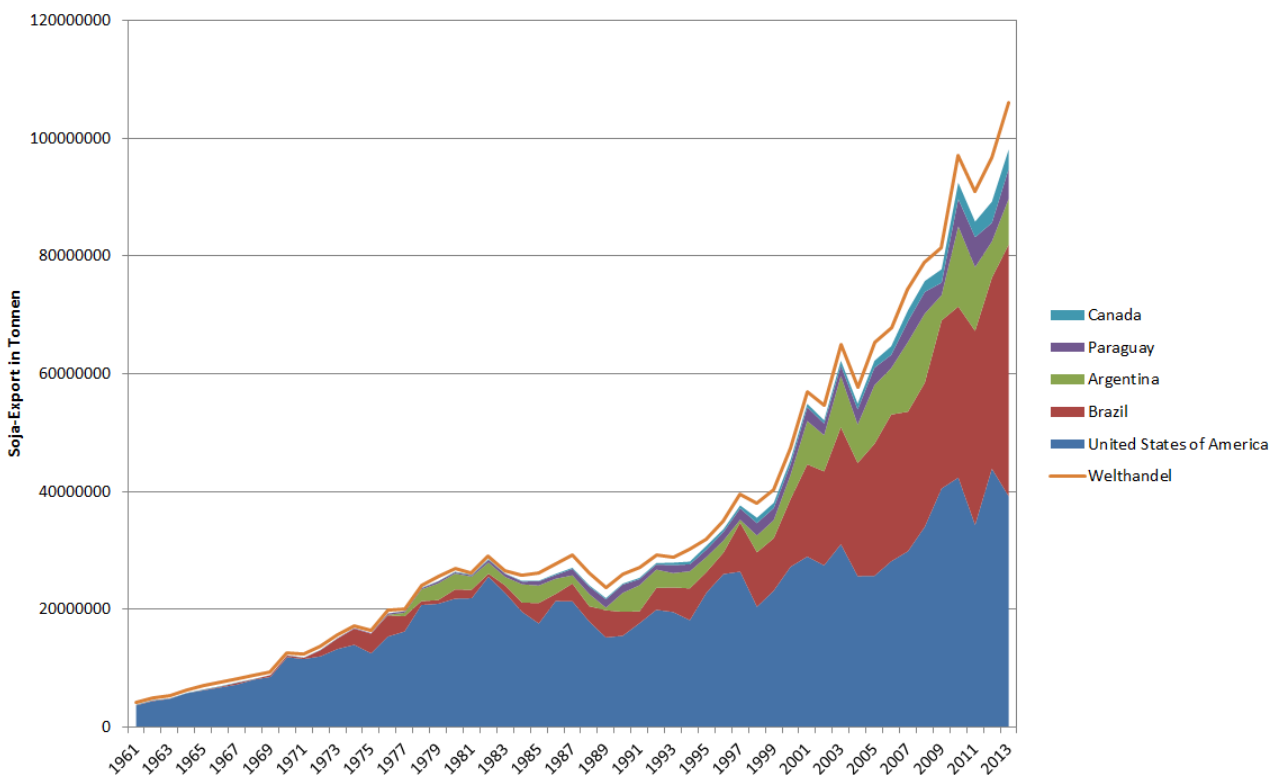


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

Fallbeispiel Soja

Entsprechend der Auswertung zu Weizen und Mais, erfolgt abschließend eine Auswertung zum Import und Export von Soja. Abbildung 14 zeigt die Hauptexportländer von Soja, deren exportierten Sojamen- gen zwischen 1961 und 2013 sowie (als orangene Linie) die Gesamtmenge weltweit exportierten Sojas im selben Zeitraum. Es zeigt sich, dass die dargestellten fünf größten Sojaexporteure nahezu vollständig den gesamten Welthandel mit Soja ausmachen. Dieser hat im Betrachtungszeitraum von 4,1 Millionen Tonnen (1961) auf 106 Millionen Tonnen (2013) massiv zugenommen, wobei die höchsten Steigerungs- raten in den letzten 20 Jahren zu verzeichnen sind. Die USA sind traditionell eine der wichtigs- ten Exportnationen und konnten ihre Exportmenge in den letzten Jahren weiter steigern. Die von Bra- silien aus exportieren Sojamen- gen haben in den zurückliegenden 20 Jahren massiv zugenommen und im Jahr 2013 bereits die Exportmenge der USA überschritten (USA 2013: 39 Mio. Tonnen, Brasilien 2013: 42,8 Mio. Tonnen).

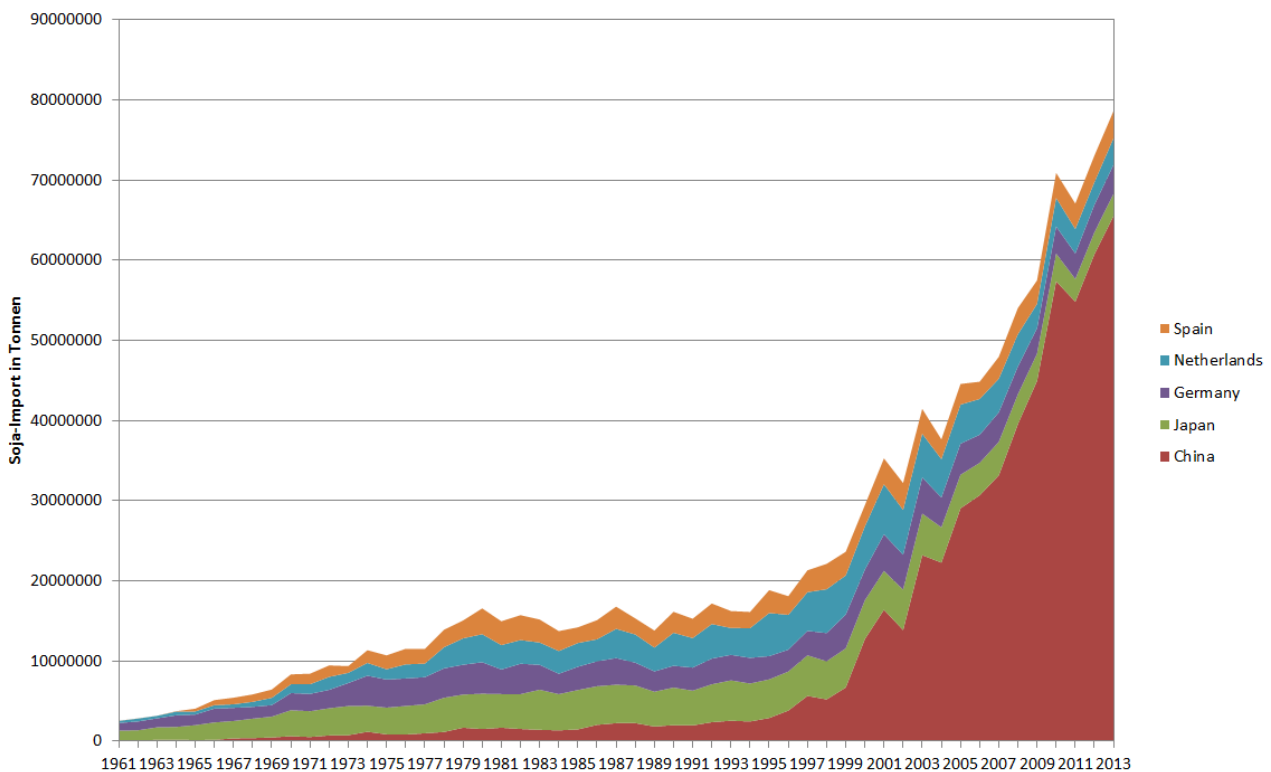
Abbildung 14: Hauptexportländer für Soja



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

Bezüglich des Imports von Soja (Abbildung 15) fällt insbesondere China auf, das die jährlich importierten Sojamen- gen insbesondere in den letzten 20 Jahren kontinuierlich gesteigert hat und im Jahr 2013 das mit Abstand wichtigste Importland für Soja darstellt. Dagegen sind die Importmengen der Länder Deutschland, Spanien, Japan und Niederlande im Berichtszeitraum zwar insgesamt leicht gestiegen, die Steigerungsraten sind aber bei weitem nicht so deutlich wie in China. Soja dient nicht nur direkt als Lebensmittel (Mehl, Öl, Tofu), sondern wird vor allem in der industriellen Nutztier- haltung als Futtermittel verwendet. Es ist also anzunehmen, dass die hohen Importmengen in China vor allem in der Nutztierhaltung eingesetzt werden.

Abbildung 15: Wichtigste Importländer für Soja



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von FAO STAT

Zusammenfassung globaler Im- und Exportmengen und Einschätzung bezüglich Landnutzung/ (Umwelt-)wirkung

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse des Exkurses zur Im- und Exportentwicklung von Weizen, Mais und Soja stichpunktartig zusammengefasst:

- ▶ **Handel mit Agrarprodukten nimmt weltweit stark zu**
- ▶ für die betrachteten Agrargüter Weizen, Mais und Soja kann eine zunehmende Konzentration der Produktion auf bestimmte Länder festgestellt werden. Große Anteile der Gesamtproduktion dienen hier dem Export.
- ▶ Global gehandelte Agrargüter verändern Nachfragemuster in den Import-Ländern. Länder wie z.B. Algerien und Indonesien importieren zunehmend Produkte wie Weizen, die zuvor keine Relevanz im Ernährungsspektrum des Landes hatten. Die Zunahme der importierten Mengen übersteigt die Raten des Bevölkerungswachstums deutlich.

Mit der Konzentration auf bestimmte Anbauregionen findet eine **Entkopplung von Produktions- und Nachfrageregionen** statt, die zu unterschiedlichen sozialen und ökologischen Folgen führt:

- ▶ Landnutzungsänderungen (Verlust von Biodiversität, Verlust der Bodenfunktionen, Boden-degradation, Änderung Kleinklima, Änderung Kohlenstoffkreislauf) durch:
 - Umwandlung von Wald zu Ackerflächen (insb. für Soja und Palmöl)
 - Umwandlung Weideflächen zu Ackerflächen (z.B. Futtermittelproduktion)
 - Umwandlung von Moorböden zu Ackerflächen (zur Steigerung der Anbaufläche)
- ▶ Veränderung der Stickstoffkreisläufe (Zunahme Stickstoffkonzentration in Anbauregionen → Belastungen von Böden- und Gewässern, Verlust an Biodiversität, Treibhausgasemissionen durch unvollständige Aufnahme von Stickstoff; Eutrophierung von Gewässern (Algenblüten,

- unbelebte Küstenregionen), Gesundheitsbelastung Nitrat im Trinkwasser (siehe auch UBA o.D.)
- ▶ Zunahme von Transportaufwendungen (Zunahme des Energieverbrauchs und damit Treibhausgasemissionen, lokale Schadstoffimmissionen, Lärm)
 - ▶ globale Konzerne (mit Sitz in Ländern der nördlichen Hemisphäre) steigern ihre Marktanteile entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Lebensmitteln. Von der Dominanz weniger Konzerne sind Plantagenbetreiber und Kleinbauern in Anbauregionen betroffen, deren Anteil an der Wertschöpfung sinkt (EVB 2014). Durch die Konzentration der Lebensmittelproduktion (auf Anbauregionen und Konzerne) ergeben sich schwankende Weltmarktpreise (z.B. in Folge von Missernten in den Anbauregionen). Während Weltmarktpreise für Massengüter (z.B. Weizen) gesunken sind, steigen Preise für Nischen-Lebensmittel wie Linsen, Bohnen etc. (Qaim 2015)

Insgesamt kann durch die Auswertung im Rahmen des Exkurses die eingangs formulierte These gestärkt werden, dass die zur Versorgung einer Stadt notwendigen Lebensmittel zunehmend am Weltmarkt beschafft werden und damit eine Entkopplung von der regionalen Lebensmittelproduktion stattfindet. Mit dieser Entkopplung sind verschiedene negative Umweltauswirkungen (global und in den Anbauregionen) verbunden.

6 Zusammenfassung

Durch den konzeptionellen Ansatz von Wolman aus dem Jahr 1965 lassen sich Städte als Organismus verstehen und interpretieren. Folge der menschlichen Siedlungsaktivitäten sind zahlreiche Stoffwechselbeziehungen (Austausch von Energie- und Stoffflüssen) zwischen Städten und ihrem urbanen oder ländlichen Umland. Unter dem Sammelbegriff „Urbaner Metabolismus“ entstanden zahlreiche Arbeiten, die Art und Umfang solcher urbaner Austauschbeziehungen zum Inhalt haben.

Untersuchungsgegenstand sind dabei Städte und insbesondere Groß- und Mega-Städte. Die zur Abgrenzung notwendige Festlegung von Systemgrenzen beziehen sich meist auf Städte entsprechend ihrer administrativer Grenzen (Grund: Datenverfügbarkeit). In der Folge werden Bereiche außerhalb der gewählten Systemgrenze Stadt in der Regel nicht weiter unterteilt, z. B. in ein regionales oder globales Hinterland. Der auch in der englischen Literatur verwendete Begriff „Hinterland“ kann sich daher sowohl auf das unmittelbar regionale wie auch ein erweitertes, globales Hinterland beziehen. Es finden sich insgesamt nur wenige Studien, die den regionalen Metabolismus (Systemgrenze beinhaltet neben der Stadt auch das regionale Umland) zum Untersuchungsgegenstand haben.

Die relevantesten Energie- und Stoffströme des urbanen Metabolismus sind Energieträger und Kraftstoffe, Baumaterialien, Wasser, Lebensmittel und Abfälle. Neben den physischen Energie- und Stoffflüssen, sind auch funktionale Austauschbeziehungen einer Stadt (und ihrem Umfeld) Inhalt wissenschaftlicher Untersuchungen (Repp et al. 2012). Dies können z.B. Pendlerverflechtungen, Wissenstransfer oder sozio-ökonomische Beziehungen (Kapitalflüsse) sein. Das Aufzeigen des Spektrums solcher funktionalen Verflechtungen zwischen Stadt und Umland stand nicht im Fokus dieser Arbeit (hierzu s. AP 1.2 und AP 3). Zu berücksichtigen ist aber, dass funktionale Verflechtungen in der Regel auf materielle Infrastrukturen aufsetzen (Pendlerbewegungen auf Straßen, Wissenstransfer auf Telekommunikationstechnik, Kapitelflüsse auf Finanzinfrastrukturen wie Bankfilialen etc.). Die resultierenden Umweltauswirkungen funktionaler Verflechtungen gehen damit immer auf physischen Energie- und Stoffflüssen zurück (z.B. Kraftstoffverbrauch als Folge von Pendlerverflechtungen).

Urbane Energie- und Stoffflüsse lassen sich in eine In- und Output Seite sowie die in der Stadt vorhandenen Bestandsmenge (urbanes Materiallager) unterteilen. Inputströme werden entweder in das urbane Materiallager (Infrastrukturen, Gebäude, langlebige Konsumgüter) eingelagert oder als Durchsatz umgewandelt (Verbrennung von Kraftstoffen) und verlassen in Form von Outputströmen (Abfälle) den Betrachtungsraum.

Die am häufigsten angewendete Methode zur Beschreibung des urbanen Metabolismus ist die Stoffstromanalyse (Material Flow Analysis - MFA). Die MFA-Berechnung kann entweder Top-down erfolgen, also ein „Herunterbrechen“ nationaler Kennzahlen z. B. wie Produktionszahlen sowie Im- und Exportrelationen auf städtische Maßstäbe, oder aber Bottom-up erfolgen. Für letzteres werden Konsummuster auf Basis von Haushalten festgelegt und anhand der jeweiligen Siedlungsstruktur auf die Gesamtstadt hochgerechnet. Aus Komplexitätsgründen beschränken sich die Untersuchungen in der Regel auf eine Auswahl von Energie- und Stoffflüssen. Das Ergebnis einer MFA ist die Quantifizierung der untersuchten Energie- und Stoffflüsse für ein bestimmtes Referenzjahr. Für eine mögliche Vergleichbarkeit wird die absolute Menge in Relation zu z.B. der Einwohnerzahl gesetzt. Bezogen auf dieses Pro-Kopf-Verhältnis ist der Verbrauch von Trinkwasser der mengenmäßig relevanteste Stoffstrom im Urbanen Metabolismus. An zweiter Stelle folgt der Pro-Kopf-Verbrauch von Baumaterialien.

Für einige der betrachteten Energie- und Stoffflüsse konnte eine grundsätzliche Verbindung zwischen Produktion/Bereitstellung im regionalen Umland und Verbrauch in der Stadt abgeleitet werden. Eine solche Stadt-Umland Verbindung ist für Massenbaustoffe wie Kies, Sand und Naturstein. Grund für die räumliche Kopplung sind hohe Transportkosten, die sich für Massenbaustoffe ergeben und die den Transport über weite Strecken unrentabel machen. Ebenso basieren städtische Trinkwasserversorgungen häufig auf einer technischen Anbindung an Quellen im städtischen Umfeld. Die räumliche

Kopplung für diesen Stoffstrom ergibt ebenfalls aufgrund von hohen Infrastrukturkosten (Errichtung und Unterhalt von Wasserleitungen). Nahrungsmittel wurden traditionell aus dem unmittelbaren städtischen Umfeld bezogen. Durch den globalisierten Welthandel mit Agrargütern ist hier allerdings eine zunehmende Entkopplung zwischen den Anbauregionen und den Orten des Konsums festzustellen. Dagegen sind fossile Energieträger wie Gas, Kohle und Treibstoff globale Handelsgüter, deren Förderung unabhängig ist von der Existenz einer städtischen Nachfrage in räumlicher Nähe.

Die Berechnung der Umweltauswirkungen durch die Energie- und Stoffflüsse des urbanen Metabolismus ist nicht zwingend Teil einer Stoffstromanalyse. Erfolgt eine solche Betrachtung, referenziert diese i.d.R. auf Treibhausgasemissionen ($\text{CO}_{2\text{äq.}}$). Hierbei ist die Berücksichtigung von sowohl direkten als auch indirekten Treibhausgasemissionen (der Vorkette) wichtig. Dies erfolgt nicht konsequent, häufig werden nur direkte Treibhausgasemissionen berechnet. Zudem greift die Fokussierung auf Treibhausgasemissionen als Umweltwirkung des urbanen Metabolismus zu kurz. Insbesondere für die nachhaltige Gestaltung von Stadt-Umland Beziehungen sind z.B. Landnutzungsänderungen oder Stoffeinträge in Böden- und Gewässer wichtige Umweltaspekte.

Für eine Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Wirtschaftswachstum von Städten ist die Gestaltung bzw. der Umbau der urbanen Infrastrukturen von zentraler Bedeutung. Während der Wachstumsphase einer Stadt baut sich das urbane Materiallager durch den Bau städtischer Infrastrukturen nach und nach auf. Mit der Art der urbanen Infrastrukturen wird die Form und Intensität der zum Betrieb und Erhalt der Infrastrukturen notwendigen Energie- und Stoffströme festgelegt. So führt der Betrieb von z.B. stark auf den Individualverkehr ausgerichteten städtischen Infrastrukturen zu einem ressourcenintensiveren Stoffwechsellager, als mehr auf den Schienentransport ausgelegte Infrastrukturen. Da städtische Infrastrukturen über Jahrzehnte in Betrieb sind (Pfadabhängigkeit), muss der Ressourcenverbrauch während der Lebensphase bereits in der Planung berücksichtigt werden. Daher liegen die Herausforderungen zur nachhaltigen Stadtgestaltung in Industrieländern (mit gealterten Städten) im Umbau bestehender Infrastrukturen, während in Schwellen- und Entwicklungsländern die Herausforderung besteht, die neu zu errichtenden Infrastrukturen von Beginn an ressourcenschonend auszugestalten.

Insgesamt wird aus der Analyse zum urbanen Metabolismus deutlich, dass die Methode Stoffstromanalyse (MFA) grundsätzlich geeignet ist, um die physischen Wechselwirkungen zwischen Stadt und Land zu ermitteln. Die Definition einer Bilanzgrenze anhand funktionaler Verflechtungen zwischen ländlichen und urbane Räumen ist schwierig (verschiedene Energie- und Stoffströme reichen unterschiedlich weit ins regionale oder globale Hinterland einer Stadt) und es ergeben sich hohe Aufwände zur Ermittlung der notwendigen Datengrundlage. Neben dem Bedarf einer methodischer Weiterentwicklungen mit dem Ziel, dass das regionale Umfeld einer Stadt konsequent in die Betrachtung mit aufzunehmen, wird in den bestehenden Stoffstrombilanzen noch ungenügend darauf eingegangen, welche unterschiedlichen Stadtstrukturen, Lebensweisen und Infrastruktursystem den Metabolismus einer Stadt wie beeinflussen.

Trotz des beschriebenen Defizits im Wissen um stoffstromrelevante Auswirkungen unterschiedlicher Siedlungsstrukturen, wird im Folgenden grob beschrieben, welche Unterschiede sich - in der Tendenz- zwischen urbanen und ländlichen Siedlungsräumen erkennen lassen und wie sich diese - in der Tendenz- auf unterschiedliche Stoffströme auswirken. Die Unterscheidung bezieht sich insbesondere auf verdichtete Kernstädte im Vergleich zu sub-urbanen oder peri-urbanen Räumen. Wo möglich, werden auch Hinweise zu peripheren ländlichen Räumen gegeben. Die Darstellung bezieht sich auf den europäischen Raum bzw. auf Industrienationen.

Verdichtete Kernstädte haben eine höhere Bevölkerungsdichte als suburbane oder ländliche Räume. Damit verbunden sind geringere durchschnittliche Wohnungsgrößen. Weniger Wohnfläche pro Person führt zu einem geringeren Wärmeenergiebedarf, da weniger Quadratmeter Wohnfläche beheizt werden müssen und so im Vergleich zu großen Wohnungen absolut weniger Heizenergie verbraucht wird.

Eine dichtere Bebauung (z.B. Geschosswohnungsbau) führt außerdem zu einem geringeren pro-Kopf Verbrauch von Baustoffen.

Verdichtete Kernstädte führen in der Tendenz zu kürzeren Wegstrecken als im suburbanen oder ländlichen Raum. Kürzere Wege bedeuten geringere Kraftstoffverbräuche und damit geringere Umweltbelastungen. Gleichzeitig kann in verdichteten Kernstädten eine höhere Vielfalt der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel angenommen werden. Die durchschnittliche Verkehrsmittelwahl (Modal Split) in Kernstädten weist damit eine höhere Nutzung an öffentlichen Verkehrsmitteln (Bus, Straßenbahn, S- und U- Bahnen) auf. Aufgrund der geringeren spezifischen Emissionen öffentlicher Verkehrsmittel resultieren geringere Pro-Kopf Treibhausgasemissionen.

Im Vergleich zu Bewohnern ländlicher Räume, verfügen Bewohner urbaner Räume über ein durchschnittlich höheres Pro-Kopf Einkommen (Tacoli et al. 2015). Es kann nachgewiesen werden, dass mit steigendem Einkommen auch der Ausstattungsgrad an technischen Haushaltsgeräten wie PC & Laptop, Fernseher und Waschmaschine zunimmt (Stieß et al. 2012). Ein höherer Ausstattungsgrad hat einerseits Einfluss auf den Ressourcenverbrauch der zur Herstellung benötigten Rohstoffe (Metalle, Kunststoffe etc.). Zum anderen führt das Vorhandensein technischer Geräte zu deren Nutzung und damit zu einem steigenden (pro Kopf) Stromverbrauch. Diese einkommensbasierte Unterscheidung kann zunächst nur zwischen Stadt und Land angeführt werden und gibt keinen Rückschluss auf einkommensbasierte Unterschiede zwischen Kernstadt und sub-urbanem Umland. Es ist naheliegend, dass sich Einkommensunterschiede -neben dem Ausstattungsgrad technischer Geräte- auch auf andere Konsumgüter und Nahrungsmittel auswirken und damit die Höhe des verfügbaren Einkommens ein Treiber für den Ressourcenverbrauch insgesamt darstellt.

Tabelle 3: Überblick relevanter Energie- und Stoffflüsse, deren potenzielle Kopplung ans regionale Umfeld und die verbundenen Umweltauswirkungen

Energie- / Stofffluss	Relevanz des urbanen/regionalen Metabolismus und mögliche Umweltwirkungen
Fossile Treibstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgut, nicht relevant zum Aufbau des urbanen Materiallagers • Umweltbelastung durch Treibhausgasemissionen & Luftschadstoffe • Bereitstellung ist nicht an das regionale Umfeld gekoppelt (aufgrund geologischer Verteilung von Lagerstätten) • der Output in Form von Emissionen und Verbrennungsrückständen (z.B. Feinstaub) ist zum Teil an das regionale Umfeld gekoppelt (Eintrag in Boden und Gewässer), zum Teil aber auch global relevant (Treibhausgasemissionen) • durch die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. Biokraftstoffe) wird eine Steuerung auf das regionale Umfeld grundsätzlich möglich, wirkt sich dann auf die regionale Landnutzung aus
Strom	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgut, nicht relevant für den Aufbau des urbanen Materiallagers • Umweltbelastung durch Vorkette (indirekte Emissionen) • Stromproduktion vielfach zentral organisiert (Großkraftwerke), daher ist der Bezug von Strom wenig mit dem regionalen Umfeld verknüpft • durch die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. Windkraft, Photovoltaik) wird eine Steuerung auf das regionale Umfeld grundsätzlich möglich, wirkt sich dann auf die regionale Landnutzung aus
Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> • relevant für die Bildung des urbanen Materiallagers • für bestimmte Baustoffe mit hohen Transportkosten stark mit der Region verknüpft (z.B. Kies, Naturstein etc.) • für bestimmte Baustoffe auch von der Region unabhängig (z.B. Zement, Metalle) • Hohe Umweltbelastungen durch Produktion und Transport
Lebensmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgut, nicht relevant zum Aufbau des urbanen Materiallagers • Traditionell stark regional verknüpft, durch Globalisierung und Welthandel zunehmend regional entkoppelt • Hohe Umwelrelevanz durch Produktion und Verarbeitung (Klima, Boden, Grundwasser) • Prägender Sektor für Nährstoffflüsse (Phosphor und Stickstoff). Die enthaltenen Phosphorverbindungen stellen Quelle der Sekundärrohstoffgewinnung dar
(Trink-) Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchsgut, nicht relevant zum Aufbau des urbanen Materiallagers • Im Vergleich zu den weiteren Energie- und Stoffflüssen hoher pro Kopf Verbrauch • vergleichsweise geringe Umweltbelastung je Einheit • In- & Output sind vorrangig mit der Region verknüpft • Nutzungskonkurrenzen und Einfluss auf regionale Landnutzung
Abfälle	<ul style="list-style-type: none"> • Outflow aus der Stadt in Form fester und flüssiger Abfälle • Kopplung an das regionale Umfeld (Behandlung, Beseitigung oder diffuse Ablagerung von Abfällen in Umweltmedien) grundsätzlich gegeben • Bedeutung von Punkt-Emissionen wie Industriestandorten nimmt ab, dagegen wird Schadstoffeintrag durch diffuse Quellen aus langlebigen Konsumgütern immer relevanter

Quelle: eigene Darstellung

7 Quellenverzeichnis

- Baccini, P.; Brunner, P.H. (2012): *Metabolism of the Anthroposphere*. MIT 2012
- Barles, S. (2009): Urban metabolism of Paris and its regions. *Journal of Industrial Ecology* 13(6): 898-913
- BMEL (2014): Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) *Der Wald in Deutschland Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*. Berlin
http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile abgerufen am: 03.01.2017
- Brunner, P.H., Rechenberger, H. (2004): *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. CRC Press LLC 2004
- Castan Broto, V.; Allen, A.; Rapoport, E. (2012): Interdisciplinary perspectives on urban metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x
- Clift, R.; Druckman, I.; Kennedy, C.; Keirstead, J. (2015): *Urban metabolism: a review in the UK context*. Future of cities: working paper
- Decker, E. H.; Elliott, S.; Smith, F. A.; Blake, D. R.; Rowland, S. (2000): Energy and Material Flow through the urban ecosystem
- Duvigneaud, P.; Denayer-De Smet, S. (1975): L'Ecosystème Urbs, in L'Ecosystème Urbain Bruxellois, in *Productivité Biologique en Belgique*, Duvigneaud, P. and Kestemont, P., Eds., Travaux de la Section Belge du Programme Biologique International, Bruxelles, 1975, pp. 581–597.
- EEA & FOEN (2016): *Urban sprawl in Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016
- Erklärung von Bern / EvB (2014): *Agropoly – Wenige Konzerne beherrschen die weltweite Lebensmittelproduktion*. Veröffentlichung gemeinsam mit Forum Umwelt und Entwicklung und Misereor e. V.. Zürich
- Eurostat (2001): *Economy-wide Material Flow Accounts and derived indicators. A methodological guide*. Luxembourg. European Communities
- Fernandez, J.E. (2007): Resource Consumption of new urban construction in China. *Journal of Industrial Ecology* , 11 (2):99–115.
- Fritsche, U., Brohmann, B., Hartard, S., Rausch, S., Roos, L., Schmied, M.; Stahl, H.; Timpe, C. (2001): *Nachhaltige Stadtteile auf innerstädtischen Konversionsflächen – Stoffstromanalyse als Bewertungsinstrument*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin
- Grimm, N., Grove, M., Picket, S., Redmann, C. (2000). Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *Bio-Science* 50(7): 571-584
- Grubler, A.; Bai, X.; Buettner, T.; Dhakal, S.; Fisk, D. J.; Ichinose, T.; Keirstead, J. E.; Sammer, G.; Satterthwaite, D.; Schulz, N. B.; Shah, N.; Steinberger J.; Weisz H. (2012). Chapter 18 - Urban Energy Systems. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: 1307-1400.
- Hammer, M.; Giljum, S. (2006): *Materialflussanalysen der Regionen Hamburg, Wien und Leipzig*. Working paper no. 6, BMBF-Forschungsprojekt NEDS
- Hodson, M., S. Marvin, B. Robinson, and M. Swilling. (2012): Reshaping urban infrastructure: Material flow analysis and transitions analysis in an urban context. *Journal of Industrial Ecology*, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00559.x
- ICLEI-USA (2012): *U.S. community protocol for accounting and reporting of greenhouse gas emissions: Public comment draft*. July 2012. ICLEI-USA, Oakland, CA, USA
- Kalmykova, Y.; R. Harder, H.; Borgstedt, I.; Svenning. (2012): Pathways and management of phosphorus in urban areas. *Journal of Industrial Ecology*, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00541.x
- Kennedy, C. A.; Cuddihy, J.; Engel-Yan, J. (2007): The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology* 11(2):43–59.
- Kennedy, C. A.; Hoornweg, D. (2012): Mainstreaming Urban Metabolismus. *Journal of Industrial Ecology* 16(6): 780-782
- Kennedy, C. A.; Stewart, I.; Facchini, A.; Cersosimo, I.; Mele, R.; Chen, B.; Uda, M.; Kansal, A.; Chiu, A.; Kim, K.; Dubeux, C.; Lebre La Rovere, E.; Cunha, B.; Pincetl, S.; Keirstead, J.; Barles, S.; Pusaka, S.; Gunawan, J.; Adegbile, M.; Nazariha, M.; Hoque, S.; Marcotullio,

- P. J.; Otharan, F.G.; Genena, T.; Ibrahim, N.; Farooqui, R.; Cervantes, G.; Sahin, A.D. (2015): Energy and material flows of megacities, PNAS 2015 112: 5985-5990.
- Mantau, U. (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015, Hamburg, 2012, 65 S.
- Mehmood, A. (2010): On the history and potentials of evolutionary metaphors in urban planning. Planning Theory 9(1):63-87
- Moschitz, H.; Oehen, B.; Rossier, R.; Nefzger, N.; Wirz, A.; Stolze, M. (2015): Anteil von Lebensmitteln regionalen Ursprungs am Gesamtverbrauch der Stadt Freiburg. FiBL - Forschungsinstitut für biologischen Landbau
- Newcombe, K.; Kalma, I.D.; Aston, A.R. (1978): The metabolism of a city: the case of Hong Kong, Ambio, 7, 3, 1978.
- Odum, E. P. (1975): Ecology. Orlando, Florida, USA: Holt, Rinehart and Winston
- Öko-Institut 2014: Klasse statt Masse – Strategien und Potenziale für eine nachhaltige Biomassenutzung. Darmstadt/ Berlin/ Freiburg
- Oswald, F.; Baccini, P. (1999): Stadtgestaltung: Architektur und Metabolismus - Entwerfen und Bewerten in der Netzstad. DISP 35; 2 (139)
- Qaim, M. (2015): Globalisation of agrifood systems and sustainable nutrition. 12th European Nutrition Conference, FENS, held at the Estrel Convention Centre, Berlin on 20–23 October 2015
- Reberning, G. (2007): Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt. Technische Universität Wien Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
- Repp, A.; Zscheischler, J.; Weith, Th.; Strauß, C.; Gaasch, N. & Müller, K. (2012): Urban-rurale Verflechtungen - Analytische Zugänge und Governance-Diskurs. BMBF Forschungsprogramm Nachhaltiges Landmanagement. Diskussionspapier Nr. 4. Dezember 2012
- Schulz, N. B. (2007): The direct material inputs into Singapore's development. Journal of Industrial Ecology 11(2): 117-131
- Senitsch, B. (2011): Holzbilanzen 2009 und 2010 für die Bundesrepublik Deutschland. Institut für Oonomie der Forst- und Holzwirtschaft Zentrum Holzwirtschaft Universität Hamburg Nr. 04/2011
- Stieß, I.; Götz, K.; Schultz I.; Hammer, C.; Schietinger, E.; van der Land, V.; Rubik, F.; Kreß, M. (2012): Analyse bestehender Maßnahmen und Entwurf innovativer Strategien zur verbesserten Nutzung von Synergien zwischen Umwelt- und Sozialpolitik. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 3710 17 104.
- Tacoli C.; McGranahan, G.; Satterthwaite, D. (2015): Urbanisation, rural–urban migration and urban poverty. IIED Working Paper. IIED, London. <http://pubs.iied.org/10725IIED> ISBN 978-1-78431-137-7
- Umweltbundesamt / UBA (2016): Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland. Hintergrundpapier April 2016
- Umweltbundesamt / UBA (o.D.): Stickstoff - Zuviel des Guten? Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren. Dessau
- UNEP (2013): City-Level Decoupling. Urban resource flows and the governance of infrastructure transitions. A Report of the Working Group on Cities of the International Resource Panel. Swilling M., Robinson B., Marvin S. and Hodson M.
- VandeWeghe, J. R.; Kennedy, C. A. (2007) : A Spatial Analysis of Residential Greenhouse Gas Emissions in the Toronto Census Metropolitan Area. Journal of Industrial Ecology, 11 (2):133–144.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Zusammenfassung. Berlin: WBGU.
- Weimar H, Jochem D (eds) (2013) Holzverwendung im Bauwesen - Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 356 p, Thünen Rep 9
- Weimar, H. (2016): Holzbilanzen 2013 bis 2015 für die Bundesrepublik Deutschland . Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 25 p, Thünen Working Paper 57, DOI:10.3220/WP1463058733000
- Wolman, A. (1965): The Metabolism of Cities. Scientific American 213: 179-190
- WWF (2008): Illegaler Holzeinschlag und Deutschland - Eine Analyse der Außenhandelsdaten. Frankfurt am Main