

1 Einleitung

1.1. Hintergrund

Ökonomische Prozesse in modernen Marktwirtschaften sind nach wie vor stark von ihrer materiellen Basis abhängig: Sowohl hinsichtlich des Ausmaßes als auch der Vielfalt der Stoffnutzung zeigt sich bisher kein klarer Trend zu einer Verringerung der Ressourceninanspruchnahme.^{1,2} Dies gilt auch für das Konsumgut Automobil. So wächst der Bestand an PKW im In- und Ausland gegenwärtig immer noch an, wodurch sich bereits jetzt Entsorgungserfordernisse abzeichnen (siehe Sakai et al. (2014)).

Der Trend zu einer verstärkten Ressourceninanspruchnahme ist dabei insbesondere aus zwei Gründen problematisch. Zunächst sind mit einer intensiven Stoffnutzung in der Regel negative Umwelteinflüsse verbunden, die vor allem aufgrund von stofflichen Extraktions-, Transformations- und Eintragungsprozessen aus bzw. in die Umwelt entstehen. Ihren Ausdruck finden sie in den unterschiedlichen Arten von Emissionen, die in die Umweltmedien eingetragen werden. Darüber hinaus kann eine zu starke Stoffnutzung zu Rohstoffknappheiten führen, die Rückwirkungen auf den ökonomischen Prozess haben. Da Rohstoffe als nutzenstiftende Elemente in den Produktionsprozess eingehen und dadurch direkt oder indirekt zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse beitragen, ist zu erwarten, dass eine geringere Verfügbarkeit zu Nutzeneinbußen führt.

Vor diesem Hintergrund kam es in den 1980er und 90er Jahren zu verstärkten Bemühungen, die Stoffnutzung in modernen Industriegesellschaften systematisch zu untersuchen. Im Zentrum des Interesses standen dabei Stoffströme, d.h. Stoffnutzungsmuster, die aus der Interaktion verschiedener ökonomischer Akteure resultieren. Politische Bedeutung erhielt das Thema in Deutschland in Zusammenhang mit dem Konzept des Stoffstrommanagements, das Anfang und Mitte der 1990er Jahre das Thema von

¹ Die vorliegende Arbeit entstand zum Teil während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts „Akteursbasierte Modellierung und Steuerung von Stoffstrominnovationen (AMOSS)“ (Laufzeit März 2007 bis Januar 2010). Dabei geleistete Vorarbeiten fließen insbesondere in die Sondierung des Stoffstromsystems PKW-Kunststoffe (Kapitel 5) und in die Modellbildung ein (Kapitel 5.3. und 6). Hierbei wird auf eigene Beiträge aus Berichten, Arbeitspapieren und Publikationen zurückgegriffen (vgl. insbesondere Beckenbach/Hofmann (2010) und Beckenbach/Hofmann (2011)).

² Nach Informationen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen stieg der inländische Materialeinsatz zwischen 2000 und 2011 um 1,3% an (Stand 2011: 3831 Tonnen) (siehe Statistisches Bundesamt (2013, S. 40f.)). Absolute Reduktionen lagen also nicht vor. Mit Blick auf die gleichzeitige Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts um 27,6% stieg die Effizienz der Stoffnutzung hingegen deutlich. So erhöhte sich der Quotient Bruttoinlandsprodukt zu Rohstoffentnahme und Importen im gleichen Zeitraum um 48,4%.

Enquetekommissionen des deutschen Bundestags war (siehe Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Bundestages (1994), Behrendt (1998)). Im Rahmen von Fallstudien wurden dabei sowohl die stofflichen Implikationen verschiedener Bedürfnisfelder (wie z.B. Mobilität, Kleidung oder IT-Technologie) als auch die Nutzung ökologisch besonders kritischer Stoffe (z.B. Cadmium) einer näheren Untersuchung unterzogen.

Daneben ist das Forschungsgebiet der Industrial Ecology die wissenschaftliche Disziplin, die sich am umfassendsten mit der anthropogenen Stoffnutzung beschäftigt (siehe zu einer Einführung z.B. Isenmann/Hauff (2007), Erkman/Ramaswamy (2006)). Industrial Ecology weist in diesem Zusammenhang eine systemische Sichtweise auf die Interaktion zwischen ökologischen und ökonomischen Prozessen auf (siehe Erkman/Ramaswamy (2006, S. 29)). Industrial Ecology ist zudem ein interdisziplinäres Untersuchungsfeld, das bisher stark durch eine naturwissenschaftlich-technische Sichtweise auf Stoffnutzungsmuster geprägt ist (siehe z.B. Andrews (2001, S. 37) zu Letzterem). Als ein Schwerpunkt der meisten Arbeiten lassen sich deskriptiv orientierte Stoffstromanalysen nennen. Ziel dieser Arbeiten ist eine Bestandsaufnahme der typischen Verwendungsbereiche von Stoffen und der damit verbundenen Umweltwirkungen (siehe exemplarisch van den Bergh/Janssen (2004, S. 26/27 bzw. 39)). Ein anderer Schwerpunkt besteht in der Formulierung von Stoffstromstrategien unter expliziter Berücksichtigung von technischen Handlungsoptionen (siehe u.a. van den Bergh/Janssen (2004, S. 24f.)). Die dabei gewonnen Lösungsvorschläge sollen zu einer allgemeinen Reduktion der problematischen Umweltinanspruchnahme führen.

Die naturwissenschaftlich-technische Perspektive kann jedoch aus verschiedenen Gründen als ergänzungsbedürftig angesehen werden. Ein Teil der Kritik wurde von Vertretern der Industrial Ecology selbst formuliert (siehe insbesondere Andrews (2001), Randles/Berkhout (2006, S. 310f.), Fischhoff/Small (2000), Jackson/Clift (1998)). Die Stoßrichtung dieser Kritik zielt auf eine fehlende akteursbezogene Fundierung des Forschungsfelds. Die Autoren gehen davon aus, dass eine Formulierung von (politischen) Gestaltungsempfehlungen zunächst auf ein grundlegendes Verständnis des Akteurshandelns angewiesen ist. Wobei nicht sicher ist, dass die Interessen von Akteuren, die ihren eigenen Zielen und Präferenzen folgen, mit dem Anspruch einer umweltverträglichen Gestaltung von Stoffströmen kompatibel sind. Erst eine grundlegende Diagnose der Handlungsmotivation für und der Einflussfaktoren auf Stoffnutzungsentscheidungen kann die Möglichkeiten und Grenzen einer umweltverträglichen Stoffstromgestaltung aufzeigen.

Stoffe in der ökonomischen Theorie

Um dem fehlenden Akteursbezug der Stoffstromanalyse zu begegnen, liegt es nahe, Erkenntnisse der ökonomischen Theoriebildung auf ihre Anschlussfähigkeit an die Stoffstromdiskussion zu überprüfen. Immerhin beschäftigte sich die Ökonomik zu unterschiedlichen Zeiten mehr oder weniger intensiv mit der Rolle der stofflichen Basis für den ökonomischen Prozess (siehe für einen historischen Abriss auch Kula (1998) oder Faucheux/Noël (2001)). Hierbei sind zwei große Themenkomplexe von Interesse (siehe im Folgenden vor allem Hecht (1999, S. 75ff.)):

- Der erste Bereich bezieht sich auf die Rolle der Stoffe als nutzenstiftende Elemente im Produktionsprozess. Hierbei ist zum einen der Aspekt der Allokation von Produktionsfaktoren im Prozess der Güterherstellung angesprochen. Das genannte Themenfeld kann dabei grob mit dem Bereich der Produktionstheorie in Verbindung gebracht werden. Zum anderen wird in diesem Bereich die Problematik der prinzipiellen Begrenztheit vieler Ressourcen und die Art ihrer Bewirtschaftung thematisiert. Die entsprechenden Fragestellungen sind der Gegenstand der Ressourcenökonomik (siehe Hecht (1999, S. 82-94)).
- Der zweite Bereich bezieht sich auf die stofflich bedingten Schäden. Der einschlägige Bereich der Theoriebildung ist die Umweltökonomik. Das Themenfeld beschäftigt sich mit der Identifizierung und Bemessung negativer externer Effekte von Produktionsaktivitäten. Darüber hinaus geht es darum, welche Maßnahmen zu deren Korrektur bereitstehen und welche Wirkungen und Nebenwirkungen diese Maßnahmen aufweisen (siehe Hecht (1999, S. 95-109)).

Traditionelle ökonomische Modelle zu stoffstrombezogenen Fragestellungen gehen in der Regel davon aus, dass die Stoffströme durch eine übergeordnete Instanz plan- und optimierbar sind.³ Zudem liegt den meisten Studien eine Beschränkung auf Interaktionen in einzelnen Märkten zugrunde. In beiden Fällen ist mit Blick auf Stoffstromanalysen mit Problemen zurechnen. Bezüglich des zuerst genannten Aspekts wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich die Handlungen einzelner Akteure nicht zwangsläufig zu einem global optimalen Nutzungsmuster zusammenfügen müssen. Es gilt deshalb zu ergründen, welche Faktoren dem entgegenstehen. Hierzu scheint vor allem eine genaue Analyse individuellen Akteursverhaltens einschließlich dessen Anreizen und Beschränkungen zentral.

Zudem greift eine Betrachtung einzelner Interaktionskontexte bei stoffstrombezogenen Fragestellungen zu kurz, da hier die Umweltwirkungen entlang von Stoffstromketten

³ Stoffstrombezogene Fragestellungen wurden in der Vergangenheit vor dem Hintergrund unterschiedlicher Denkschulen diskutiert. Hierzu zählen insbesondere die neoklassische Theorie und ordnungsökonomische Ansätze. Ein Überblick findet sich in Beckenbach/Hofmann (2011).

von Interesse sind. Um zu einem Verständnis ihrer Funktionsweise und ihrer möglichen Beeinflussung zu kommen, ist eher eine Betrachtung von akteursbezogenen Koordinationsprozessen auf mehreren Lebenszyklusstufen erforderlich. Nur dadurch lassen sich Umweltwirkungen umfassend in den Blick nehmen und es kann der Gefahr von möglichen medialen Verlagerungen von Umweltwirkungen entgegengewirkt werden.

Stoffstrominnovationen

Ein wichtiges Anliegen der Forschung im Bereich der Industrial Ecology besteht in der Analyse von Stoffströmen und in der Herbeiführung von umweltentlastenden Stoffnutzungsmustern (siehe z.B. van den Bergh/Janssen (2006, S. 37ff.)). Den Hintergrund hierfür bildet nicht zuletzt die Ambivalenz von Innovationen. Einerseits werden diese nämlich (wie mit Blick auf die Industrial Ecology deutlich wurde) als ein Beitrag zur Überwindung von Umweltproblemen gesehen. Andererseits gehen von ihnen umfassende Umweltwirkungen aus, welche es zu berücksichtigen gilt. Eine Sondierung der Arbeiten zeigt jedoch, dass gerade in der Literatur zur Industrial Ecology neuere innovationsökonomische Konzepte noch selten genutzt werden (siehe Green/Randles (2006, S. 10)). Gleichzeitig fand in der ökonomischen Theorie eine Thematisierung stofflicher Innovationsprozesse statt. Diese Beiträge sind jedoch noch nicht umfassend aufeinander bezogen und auch nicht an modernere Entwicklungen der Innovationsforschung angebunden. So finden sich beispielsweise im Oslo Manual (siehe OECD (2005)), einer Referenz-Publikation zur empirischen Innovationsökonomik, zwar Hinweise zu Stoffen als Gegenstand von Innovationen, diese werden jedoch nicht systematisch gewürdigt. Insgesamt lässt sich ein Forschungsdefizit hinsichtlich der Besonderheiten von stoffbezogenen Innovationsprozessen feststellen.

In diesem Zusammenhang kann ergänzend betont werden, dass Innovationen im Stoffstrombereich (Stoffstrominnovationen) Merkmale aufweisen, die in der gegenwärtigen Theorie nicht ausreichend betont werden. Stoffstrominnovationen sind nämlich deshalb besonders, weil sie nach den herkömmlichen Klassifikationen von Innovationen unterschiedlichen Innovationsarten entsprechen können. So gehen Stoffstromwirkungen einerseits von Produktinnovationen und Prozessinnovationen aus. Andererseits sind auch organisatorische Innovationen mit stofflichen Rückwirkungen verbunden. Ihre Bedeutung wird in bestimmten Bereichen der Literatur sogar besonders betont (siehe Zundel (1998), Krcal (1999)). Stoffstrominnovationen sind darüber hinaus systemisch, d.h. die Realisierungschancen hängen von einem Zusammenwirken der Akteure ab. In diesem Sinn ist eine bisher in der Innovationsforschung vorhandene Berücksichtigung individueller Innovationen mit einer Thematisierung des Zusammenwirkens von Akteuren zu verknüpfen.

Es ist in diesem Zusammenhang zu erwarten, dass vor allem eine eingehende Beschäftigung mit Ansätzen der evolutorischen Ökonomik einen Erklärungsrahmen für die Entstehung und die Wirkung von Stoffstrominnovationen bieten kann. Die evolutorische Ökonomik ist dabei diejenige ökonomische Schule, die sich mit der Rolle des Wissens und seines Wandels am intensivsten beschäftigt. Gerade dieser Aspekt wird aber für die Entstehung von Innovationen als zentral angesehen. Der Ansatzpunkt der Erklärung von Innovationen ist dabei in der Regel das Akteurshandeln (siehe Hermann-Pillath (2002), Nelson/Winter (1982, S. 130/131 und S. 134-136), Witt (1987), Dosi/Grazzi (2010)).

Stoffstrommodellierung

Eine Umorientierung auf eine eher akteursbezogene Perspektive der Stoffstromforschung wirft die Frage nach einer grundlegenden Eignung der bisherigen Modellierungsverfahren auf. So zählen zu den am häufigsten genutzten Modellen im Bereich der Stoffstromanalyse Input-Output-Modelle und System-Dynamics-Modelle (siehe zu Details Kapitel 5). Es zeigt sich jedoch, dass diese Ansätze einigen Einflussfaktoren der Entstehung von Stoffstrominnovationen kaum Rechnung tragen. Hierzu zählen die individuellen Handlungsmotive und Handlungsmöglichkeiten der Akteure sowie die Rolle von ökonomischen Koordinationsprozessen.

Eine Alternative zu den bestehenden Methoden der Stoffstromforschung kann die akteursbasierte Simulation mit Hilfe von Multi-Agenten-Systemen sein. Hierbei handelt es sich um Computersimulationen, in denen virtuelle Software-Akteure (Agenten) und deren Interaktionen abgebildet werden können. Die Methode wurde insbesondere auch aus dem Bereich der Industrial Ecology heraus selbst vorgeschlagen (siehe Kraines/Wallace (2005), Axtell/Andrews (2002)) und scheint gerade vor dem Hintergrund des bereits konstatierten fehlenden Akteursbezugs attraktiv. In den frühen, eher konzeptionell orientierten Beiträgen zu diesem Thema wurde vor allem die Möglichkeit zur Abbildung von heterogenen Akteuren mit unterschiedlichen Entscheidungslogiken betont, die an der Konstituierung von Stoffnutzungsmustern beteiligt sind.

1.2. Fragestellung und Methode

Die vorliegende Arbeit versucht, einen Beitrag zur Erklärung von Dynamiken in Stoffstromsystemen zu liefern. Im Zentrum steht dabei die Frage, wie es zu Wandel in Stoffstromsystemen kommt und welche Wirkungen dieser Wandel aufweist. Die Arbeit nimmt ihren Ausgangspunkt bei einer positiven Beschreibung und Erklärung der Stoffnutzungsmuster. Sie versucht, die genannten Probleme aus einer explizit akteursbezogenen

nen, evolutionsökonomischen Perspektive zu betrachten. In der Arbeit wird davon ausgegangen, dass eine Neuorientierung der inhaltlichen Fragestellung in Richtung auf eine aktorsbasierte Analyse von Stoffstromsystemen auch eine methodische Umorientierung erfordert. Diese soll mit Hilfe von agentenbasierten Simulationen geleistet werden.

Die grundlegenden Leitfragen der Arbeit ergeben sich insbesondere aus den Darstellungen des vorherigen Abschnitts:

- In welcher Form werden stoffbezogene Aspekte in der ökonomischen Theoriebildung thematisiert?
- Welche Faktoren beeinflussen die stofflichen Dispositionen der Akteure?
- Welche Faktoren beeinflussen das Auftreten von Stoffstrominnovationen?
- Welche Wirkungen haben diese Stoffstrominnovationen?
- Welche Maßnahmen sind zur Steuerung von Stoffströmen vor diesem Hintergrund realistisch und möglich?
- Welche Modellierungsverfahren eignen sich zur aktorsbasierten Analyse von Stoffstromdynamiken?

Die Arbeit bezieht sich in ihren anwendungsbezogenen Passagen vor allem auf Beispiele aus dem Bereich der PKW-Industrie, insbesondere auf die Verwertung von Kunststoffen. Dies ist zunächst dadurch motiviert, dass die PKW-Industrie ein ökonomisch bedeutender Teilbereich der deutschen Wirtschaft ist, was sich aus ihren Beiträgen zu Beschäftigung und Wertschöpfung ableiten lässt (siehe Legler et al. (2009)). Darüber hinaus gehen mit dem Einsatz von Kunststoffen negative Umweltwirkungen einher. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang vor allem das Problem der Entsorgung von Altkunststoffen, das in den letzten beiden Jahrzehnten im Fokus staatlicher und privatwirtschaftlicher Initiativen stand (siehe z.B. den Hond (1996), Leone et al. (2000), Niedersächsisches Umweltministerium (2007)).

1.3. Vorgehen

Zur Beantwortung der vorher formulierten Fragen gliedert sich die Arbeit in zwei Teile:

- Im ersten Teil (Abschnitt 2 bis 4) sollen die Grundlagen für die aktorsbasierte Erklärung von Stoffstromentwicklungen gelegt werden. Zudem wird dort das Untersuchungsfeld genauer eingeführt.
- Im zweiten Teil (Abschnitt 5 bis 7) werden einschlägige Modellierungsverfahren und Vorarbeiten aus dem Modellierungsbereich sondiert. Dies dient als Grundlage für die Spezifizierung eines Modells und dessen Anwendung auf das Untersuchungsfeld.

Im *zweiten Kapitel* werden die grundlegenden Beziehungen zwischen dem Akteurshandeln und stofflichen Dynamiken genauer ergründet. Dies geschieht auf Basis der Akteursentscheidungen, wobei deren Verknüpfung mit der Stoffnutzung deutlich gemacht werden soll. In diesem Zusammenhang wird auf die Interaktion der Akteure auf Märkten und den institutionellen Rahmen von akteursbezogenen Stoffstromentscheidungen eingegangen, da diese Bereiche aus ökonomischer Sicht wichtige Randbedingungen individueller Akteursentscheidungen sind. Hierzu wird in fünf Schritten vorgegangen. Abschnitt 2.1.1. beschäftigt sich mit dem Gegenstand von Stoffstromanalysen: Stoffströme und die dadurch ausgelösten Umweltwirkungen. Dann wird auf Arten und Merkmale von Innovationen eingegangen und deren Rolle bei stofflichen Veränderungsprozessen untersucht (Abschnitt 2.1.2.). In Abschnitt 2.1.2. stehen die entscheidungstheoretischen Grundlagen des Akteursverhaltens im Mittelpunkt. Es geht darum, welche Entscheidungen Stoffdynamiken beeinflussen können und welche konzeptionellen Konstrukte aus der ökonomischen Theoriebildung sich für deren Erklärung heranziehen lassen. Abschnitt 2.1.3. beschäftigt sich mit dem Zusammenwirken der Akteure. Der Schwerpunkt liegt dabei auf marktlichen Interaktionsprozessen. Es wird auch erläutert, wie es zur Ausbildung von spezifischen ökonomischen und stoffbezogenen Handlungsmustern kommen kann. Schließlich wird in Abschnitt 2.1.4. die Rolle von Institutionen bei Stoffstromentscheidungen thematisiert. Es geht um die Frage, in welcher Form Institutionen Akteursentscheidungen beeinflussen können und welche Folgen dies für die Stoffströme hat. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer Darstellung der stoffbezogenen Regulation.

In Abschnitt 2.2. werden die bisher vorgestellten Elemente und die zwischen ihnen herrschenden Beziehungen zu einem vorläufigen Modell zusammengefügt. Ziel der Darstellung ist es, die Wirkungsbeziehungen zwischen den Elementen eines Stoffstromsystems zu erfassen. Der Abschnitt schließt mit einem Hinweis darauf, wie das Wirkungsmodell bei Stoffstromuntersuchungen Einsatz finden kann.

Im *dritten Kapitel* wird der Verbindung zwischen Stoffströmen und Akteursentscheidungen näher nachgegangen, indem Erkenntnisse aus der ökonomischen Produktionstheorie und Innovationstheorie für die Stoffstromanalyse nutzbar gemacht werden. Dieser Arbeitsschritt ist erforderlich, um die Bestimmungsgründe von stofflichen Veränderungsprozessen näher zu beleuchten. Ausgangspunkt bildet dabei die Produktion, die die direkteste Beziehung zwischen Akteurshandeln und Stoffstrom darstellt. Bei der Betrachtung werden relevante Erklärungsansätze aus unterschiedlichen ökonomischen Schulen genauer untersucht (Abschnitt 3.1.). Hierzu zählen die Neoklassik (Abschnitt 3.1.1.), die bioökonomischen Ansätze (Abschnitt 3.1.2.), die evolutorische Ökonomik (Abschnitt 3.1.3.) und verschiedene institutionenökonomische Ansätze (Abschnitt 3.1.4.). Bei der Darstellung stehen die Erklärungsfaktoren und die formale Abbildung von Produktionsprozessen im Vordergrund. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die Sondierung evolutorischer Ansätze gelegt, da diese für die Analyse von Veränderungsprozessen

in Stoffstromsystemen zentral scheinen. Der Abschnitt endet mit Schlussfolgerungen aus den sondierten Arbeiten und verweist auf offene Fragen für die weitere Arbeit (Abschnitt 3.5.).

Um die Einflussfaktoren auf den Wandel der Produktionsprozesse benennen zu können, werden sodann Beiträge aus der Innovationsökonomik sondiert und auf ihre mögliche Erklärungskraft für den Wandel von Produktionsprozessen untersucht (Abschnitt 3.2.). Hierzu wird nach einem allgemeinen Blick auf die Phasen des Innovationsprozesses (Abschnitt 3.2.1.) auf die Erklärungsfaktoren für die Entstehung und die Diffusion von Innovationen eingegangen (Abschnitt 3.2.2.-3.2.5.). Die Erkenntnisse aus den Ausführungen dieses und des vorherigen Kapitels werden dann auf die Erklärung des Wandels von Produktionsprozessen angewendet (Abschnitt 3.2.6.). Hierbei steht im Mittelpunkt, welche Merkmale den Wandel auf der Prozessebene auszeichnen (Abschnitt 3.2.6.1.), welche unternehmensexternen und -internen Faktoren den Wandel bewirken (Abschnitt 3.2.6.2. und Abschnitt 3.2.6.3.) und welche Auswirkungen der Wandel auf einzelwirtschaftlicher Ebene und darüber hinaus haben kann (Abschnitt 3.2.6.4. und Abschnitt 3.2.6.5.).

Die Erkenntnisse aus den produktions- und innovationsökonomischen Sondierungen werden in einem Erklärungsschema für stoffliche Veränderungsprozesse zusammengefasst, das bei der Analyse von Innovationsprozessen in Stoffstromsystemen Anwendung finden kann (Abschnitt 3.3.).

Im *vierten Kapitel* schließt sich an die bisherigen Untersuchungen eine Analyse des spezifischen Stoffstromsystems PKW-Kunststoffe an, wobei insbesondere auf die in Kapitel 3 entwickelte allgemeine Beschreibung eines Stoffstromsystems und die Erklärungsfaktoren für Stoffstromveränderungen aus Kapitel 4 zurückgegriffen werden kann. Hierzu werden zunächst die wesentlichen Elemente des Systems, ihre Verknüpfung sowie die wichtigsten Wirkungszusammenhänge beschrieben. Das Vorgehen ist dabei wie folgt. Im Abschnitt 4.1. wird das Stoffstromsystem PKW-Kunststoffe vorgestellt. Den Ausgangspunkt bildet eine Beschreibung der Akteure und deren Entscheidungen mit Blick auf den Stoffstrom (Abschnitt 4.2.1.). Daran schließt sich die Darstellung wichtiger marktlicher Interaktionszusammenhänge an, die für die Allokation der Güter und die Ausformung der Stoffströme relevant sind (Abschnitt 4.2.2.). Dann werden stoffliche und ökologische Implikationen des Akteurshandelns betrachtet (siehe Abschnitt 4.2.3.). Im Anschluss folgt eine Sondierung des aktuellen institutionellen Gefüges, das die Akteursentscheidungen beeinflusst (Abschnitt 4.2.4.) und eine Thematisierung von relevanten Innovationen, die in der Lage sind, die Struktur des Stoffstromsystems zu verändern (Abschnitt 4.2.5.). Mittels eines Wirkungsgraphen lassen sich schließlich Hypothesen über mögliche Einflüsse auf die Systementwicklung prüfen (Abschnitt 4.3.). Dabei stehen die Einflüsse auf die ökonomische Entwicklung, die ökologischen Folgen, die Innovationen und die Marktstruktur im Vordergrund. Das Kapitel dient dazu, Hypothesen über die Relevanz der verschiedenen Einflussfaktoren für die

ökonomische und ökologische Entwicklung zu formulieren. Die Plausibilität dieser Hypothesen soll später anhand von Simulationsstudien mit einem aktorsbasierten Modell überprüft werden.

Im *fünften Kapitel* werden mögliche Modellierungsansätze für eine aktorsbezogene Erklärung von Stoffstromsystemen geprüft und die bisherigen Erkenntnisse zu diesem Thema zusammengefasst. Dazu werden Kriterien festgelegt, denen eine aktorsbasierte Stoffstrommodellierung genügen muss (Abschnitt 5.1.). Im Anschluss erfolgt eine Modellsondierung, in der die Eignung traditioneller Methoden der Stoffstromforschung für die aktorsbasierte Stoffstromanalyse untersucht wird (Abschnitt 5.2.). Hierzu werden die häufigsten in der Literatur verwendeten Modelle sondiert: System-Dynamics-Modelle, Input-Output-Analysen, Materialflussanalysen, Ökobilanzen und die Methode der aktorsbasierten Modellierung mit Multi-Agenten-Systemen. Die entsprechenden Verfahren werden dabei anhand ihrer wichtigsten Merkmale charakterisiert, einschlägige Anwendungen der jeweiligen Methode werden vorgestellt und auf Basis des entwickelten Kriterienkatalogs wird eine Bewertung durchgeführt. Bei den dargestellten Anwendungen wird hauptsächlich auf Beispiele aus dem hier betrachteten Untersuchungsfeld PKW im weitesten Sinne zurückgegriffen. Im Anschluss werden einschlägige innovationsökonomische Vorarbeiten mit Blick auf ihre Erklärungskraft für die Fragestellungen dieser Arbeit interpretiert (Abschnitt 5.3.). Die bisherigen Erkenntnisse aus den theoretischen Überlegungen und den Modellen können dann in ein Konzept für ein aktorsbasiertes Stoffstrommodell fließen (Abschnitt 5.4.).

Im *sechsten Kapitel* wird ein aktorsbasiertes Modell des Entsorgungsbereichs spezifiziert. Es soll dabei vor allem innovationsökonomische Einflussfaktoren für die ökonomische und ökologische Entwicklung des betrachteten Stoffstroms aufnehmen können.

Im *siebten Kapitel* wird zunächst die Simulationsdynamik des Modells anhand eines Referenzlaufs dargestellt (Abschnitt 7.1.). Dann werden anhand einschlägiger Simulationsstudien drei Aspekte diskutiert: die Wirkung innovationsökonomischer Einflussfaktoren (Abschnitt 7.2.), exemplarische Formen der regulativen Steuerung (Abschnitt 7.3.) und mögliche zukünftige Entwicklungen des Entsorgungssystems (Abschnitt 7.4.).

Die Arbeit schließt im *achten Kapitel* mit Schlussfolgerungen und einem Ausblick. Das Kapitel enthält eine Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen der regulativen Steuerung sowie ein Resümee zur Eignung aktorsbasierter Simulationen für die Stoffstromanalyse (Abschnitt 8.1.). Zudem wird auf Perspektiven der Stoffstromforschung eingegangen, wobei insbesondere mögliche Modellausweitungen und empirischer Forschungsbedarf thematisiert werden (Abschnitt 8.2.).