

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Kommunale Umweltbilanz
am Beispiel der Güter Wasser und Papier
für die Stadt Heidelberg**

von

Mario Schmidt, Rita Büskens, Achim Schorb

ifeu-Institut für Energie- und
Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

und im Unterauftrag:
K. Zipfel und A. Bender
TGU Technologieberatung Grundwasser und
Umwelt GmbH Koblenz

Förderkennzeichen: PAÖ W-98002

Die Arbeiten des Projektes "Angewandte Ökologie" wurden mit Mitteln des Landes Baden-
Württemberg gefördert

August 2000

1. Art des Berichts Schlussbericht	2. Förder-Nr. 98002	3. Berichts-Nr. ifeu 285
4. Titel des Berichts Kommunale Umweltbilanz am Beispiel der Güter Wasser und Papier für die Stadt Heidelberg		
5. Autor(en), Vorname(n), Name(n) Prof. Mario Schmidt Dipl. Biol. Rita Büskens Dr. Achim Schorb		7. Abschlußdatum 30. April 2000 Bericht: 31. August 2000
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift, Leiter) Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg Geschäftsführer: Dr. Ulrich Höpfner Im Unterauftrag: TGU Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH Koblenz		9. Veröffentlichungen 2 (Statuskolloquium)
8. Fördernde Institution Land Baden-Württemberg Projektträger BWPLUS Forschungszentrum Karlsruhe		10. Seitenzahl 86
		11. Literaturangaben 45
		12. Tabellen 13
		13. Abbildungen 24
14. Zusätzliche Angaben -		
15. Kurzfassung Es wurde geprüft, inwieweit sich Ansätze aus der Ökobilanzierung von Produkten und der Stoffstromanalyse von Betrieben auf regionale räumliche Systeme, speziell auf die Stadt Heidelberg, übertragen lassen. Die Methode der sogen. Stoffstromnetze wurde als eine mögliche und sinnvolle Beschreibungsart komplexer Stoffstromsysteme identifiziert, die durch ihren offenen Modellcharakter, ihre Modularität und die Möglichkeit zur Verknüpfung von Subsystemen besticht. Mit existierender Standardsoftware lassen sich entsprechende Modelle entwickeln, die die wesentlichen Stoffströme einer Stadt nach den wichtigsten sächlichen Beiträgen (z.B. Branchen) darstellen. Ziel ist dabei weniger die deskriptive Darstellung der Stoffströme, als vielmehr das Modellverständnis für die Zusammenhänge der Stoffströme. Die Methode wurde auf zwei Fallbeispiele konkret für die Stadt Heidelberg angewendet. Zum einen wurde der Wasserhaushalt der Stadt modelliert. Für den geogenen Bereich wurde dazu auf bereits vorhandene Grundwassermodelle im Rhein-Neckar-Raum der TGU Koblenz zurückgegriffen und verschiedene Variantenberechnungen geeignet parametrisiert. Der anthropogene Bereich (Wasserbewirtschaftung, Verbrauch etc.) wurde mit Daten aus der Stadtverwaltung, den Stadtwerken und Branchendaten abgebildet. Teilweise musste auf generische Daten mit bundesweiten Durchschnittswerten zurückgegriffen werden. Die modellmäßige Verknüpfung von geogenen und anthropogenen Subsystemen erwies sich als große Stärke des gewählten Ansatzes. Andererseits wurde als Wirtschaftsgut „Papier“ ausgewählt und eine Art städtische Papierbilanz erstellt. Die Datenlage hierzu erwies sich als ausgesprochen schwierig. Konkrete Angaben lagen nur für den Entsorgungsbereich vor. Generische branchenbezogene Daten führten sogar zu Artefakten, da Heidelberg zwar ein umfangreiches Verlagswesen, aber kaum Papierverarbeitung (Buchproduktion) hat. Es zeigte sich, dass grundsätzlich Modellansätze zur Verfügung stehen, auch ein so komplexes System wie eine Stadt in seinen Stoffströmen abzubilden. Genaue und detaillierte Güterbilanzen scheitern jedoch an der schlechten Datenlage bzw. bedürften eines großen empirischen Aufwandes, der in keinem Verhältnis zu dem Erkenntnisgewinn und den Einflussmöglichkeiten auf kommunaler/ regionaler Ebene steht. Die Hoffnung, regionale Umweltbilanzen als umfassendes Planungstool für nachhaltige Entwicklung in der Region einzusetzen, erfüllte sich somit nicht.		
16. Schlagwörter Kommunale Umweltbilanz, städtischer Wasserhaushalt, städtischer Papierhaushalt, Stoffstromanalyse, Nachhaltigkeit		

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Nachhaltiges Bewirtschaften von Stoffströmen	5
1.2	Ausgangspunkt Ökobilanz	6
1.3	Kenntnisstand	9
1.4	Deskriptive und präskriptive Darstellung.....	12
1.5	Ziel des Vorhabens	13
1.6	Auswahl des Fallbeispiels.....	14
1.7	Auswahl der Bilanzgüter	15
1.7.1	Wasser und seine regionale Bedeutung.....	15
1.7.2	Papier.....	19
2	Methodische Grundlagen.....	20
2.1	Ansätze der Stoffstromanalyse.....	20
2.1.1	Buchhalterische Bilanzierung.....	20
2.1.2	Statische Modellierung	21
2.1.3	Dynamische Modellierung.....	22
2.2	Mathematische Beschreibung	22
2.2.1	Differentialgleichungen.....	23
2.2.2	Stoffstromnetze	24
2.3	Verwendete Software	28
3	Fallbeispiel.....	33
3.1	Beschreibung des Raums	33
3.2	Systembeschreibung	34
3.2.1	Systemeigenschaften.....	34
3.2.2	Räumliche Ebene	35
3.2.3	Zeitliche Ebene.....	36
3.2.4	Sachebene.....	36
3.2.5	Auswahl der Prozesse mit In- und Outputgütern.....	37
4	Modellierung.....	42
4.1	Wasserhaushalt.....	42
4.1.1	Datenquellen.....	42
4.1.2	Modellbeschreibung.....	43
4.2	Papierhaushalt	55

4.2.1	Modellbeschreibung.....	55
4.2.2	Bilanzergebnisse	57
5	Diskussion.....	60
5.1	Beispiele anderer regionalen Bilanzen.....	63
5.2	Vergleich mit der vorliegenden Studie	66
5.3	Bilanzgrenzenwahl und Datenverfügbarkeit.....	67
5.4	Physische IO-Tabellen.....	67
5.5	PIOT als Basis für generische Daten	70
6	Fazit.....	71
7	Literatur	74
	Anhang: Dokumentation der Netzmodelle.....	78

Wir danken dem

- Heidelberger Amt für Umweltschutz und Gesundheitsförderung,
- dem Heidelberger Amt für Stadtentwicklung und Statistik und
- den Stadtwerken Heidelberg

für die gute und kooperative Zusammenarbeit und die unkomplizierte Bereitstellung von Informationen und Daten.

1 Einleitung

1.1 Nachhaltiges Bewirtschaften von Stoffströmen

Der Umweltschutz hat sich in den vergangenen Jahrzehnten vom unmittelbaren Ansatz der Gefahrenabwehr über das Vorsorgeprinzip bis hin zur Forderung nach einer ökologischen Strukturpolitik gewandelt (v. Prittwitz, 1990). Besonders interessant ist dieser Wandel, vergleicht man ihn mit den Analyseinstrumenten und Indikatoren, die zur Beschreibung der Umweltsituation jeweils herangezogen wurden.

So spielten anfangs die *Konzentrationen* schädlicher Stoffe in Emissionen und Immissionen eine dominante Rolle. Sie beschrieben die Ansätze der räumlichen und umweltmedialen Problemverlagerung sowie der end-of-the-pipe-Technologie ausreichend. Mit der Vorsorgepolitik gewannen jedoch die Schadstoff-Frachten und damit die *Stoffströme* an Bedeutung. Dieser Übergang von den „Nanogramms zu den Megatonnen“ (Schmidt-Bleek, 1993) ist evident bei der Frage des globalen Klimaschutzes und der Ressourcenschonung, wie dies inzwischen im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung verlangt wird. Verschiedene Ansätze gehen sogar soweit, Stoffströme an sich, also summarisch und unabhängig von ihrer ökologischen oder toxischen Qualität, als wichtigen Indikator für nachhaltige Entwicklung heranzuziehen, so etwa bei dem MIPS-Konzept des Wuppertal-Institutes.

Diese neue Orientierung auf Stoffströme fußt auch auf einer formal-strengen Auslegung des Begriffs des nachhaltigen Wirtschaftens, wie es beispielsweise in der Forstwirtschaft schon lange bekannt ist. Bereits im Mittelalter wurde eine „sustainable yield forestry“ entwickelt, die aufgrund des erhöhten Holzbedarfs und der Endlichkeit der Ressourcen eine bewusste Waldbewirtschaftung anstrebte. In Deutschland wurde Ende des 18. Jahrhunderts festgeschrieben, dass nicht mehr Holz geschlagen werden darf, als nachwachsen kann. Dieses Vorgehen wurde mit dem Begriff der „Nachhaltigkeit“ beschrieben.

Nachhaltiges Wirtschaften ist also eng an die Endlichkeit der Ressourcen gekoppelt. Es umschreibt eine Form des Wirtschaftens, bei dem man von den Erträgen eines (Natur-)Kapitals lebt, nicht aber von dem Kapital selbst. Auf einen privaten Haushalt übertragen hieße nachhaltiges Wirtschaften beispielsweise, dass man von den Erträgen seiner Arbeit und den Zinsen seines Ersparnisses lebt, das Ersparnis selbst aber nicht aufbraucht, geschweige denn Kredit aufnimmt. Lebte man dagegen ständig „über seine Verhältnisse“, so wäre der wirtschaftliche Ruin vorbestimmt oder man müsste dann zukünftig die Schulden der Vergangenheit abtragen (Schmidt, 1997).

Dieser Handlungsansatz wurde von Herman E. Daly (1991) zum ersten Prinzip für den Energie- und Stoffwechsel einer nachhaltigen Volkswirtschaft erhoben. Dazu kommen weitere Prinzipien, die in dieser oder in leicht veränderter Form inzwischen als zentrale Bedingungen des nachhaltigen Wirtschaftens angesehen werden:

- Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf nur in dem Umfang ihrer natürlichen Regenerationsfähigkeit erfolgen.
- Die Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen darf nur in dem Umfang erfolgen, in dem die Reichweite der verbleibenden Ressourcen durch neue Technologien oder anderweitige Investitionen in Ersatzmöglichkeiten konstant bleibt.
- Die durch menschliche Einflüsse verursachten Umweltbelastungen durch Schad- und Abfallstoffe müssen auf ein Maß begrenzt werden, das die Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme nicht gefährdet.
- Die Artenvielfalt muss erhalten bleiben.

Mindestens die beiden ersten Punkte, teilweise auch der dritte Punkt, werden quantitativ durch Energie- und Stoffströme und die Veränderung von Beständen beschrieben. So wäre die erste Bedingung erfüllt, wenn der Bestand der erneuerbaren Ressource in dem betrachteten System langfristig konstant bleibt. Dies kann ein Wald, ein Fischbestand oder ein Wasserreservoir sein. Wichtiges Analysemittel ist dabei die *Bilanz* der Ressource, also ihres Bestandes zu verschiedenen Zeitpunkten und der zugehenden oder abgehenden Flüsse bzw. positiven und negativen Änderungen in bestimmten Zeiträumen.

An dieser Stelle drängt sich die methodische Nähe zu sogenannten Ökobilanzen von Produkten oder betrieblichen Umweltbilanzen von Unternehmen auf, bei denen auch i.d.R. extensive Größen (Quantitätsgrößen) als Beschreibung des Systems dienen. Es stellt sich die Frage, ob die „Ökobilanz“ als Analyse- und Bewertungsmittel für nachhaltiges Wirtschaften von Systemen dienen kann. Dies wäre insbesondere von Bedeutung, um die Nachhaltigkeit von räumlichen oder sächlichen Teilsystemen zu überprüfen. Hiermit drängt sich der Ansatz der sogenannten regionalen oder kommunalen Ökobilanz auf, der Gegenstand der weiteren Betrachtungen ist.

1.2 Ausgangspunkt Ökobilanz

Ökobilanzen werden eingesetzt, um die Umweltauswirkungen von *Produkten* und *Dienstleistungen* über ihren gesamten Lebensweg („cradle-to-grave“) hinweg zu quantifizieren. Sämtliche umweltrelevanten In- und Outputs, die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung des Produktes zusammenhängen, werden bilanziert. Dazu gehören zum Beispiel der Rohstoffverbrauch, der Energieaufwand, Emissionen oder das Abfallaufkommen. Die Bilanzen dienen dem Vergleich und der Bewertung von Produkten. Zusätzlich kann aus der Kenntnis der Wirkungszusammenhänge eine Optimierung des Produktes in Hinblick auf dessen Umweltverträglichkeit stattfinden. Durch die internationale Norm ISO 14.040 ist das Verfahren der Produktbilanzierung mittlerweile etabliert. Streng genommen beziehen sich seit der Normierung „Ökobilanzen“ (engl. etwas glücklicher als Life Cycle Assessment LCA bezeichnet) im deutschen Sprachgebrauch immer auf Produkte oder Dienstleistungen, nicht aber auf Betriebe, räumliche Gebiete etc. Bilanzen zu solchen Systemen werden stattdessen Umweltbilanzen bezeichnet.

Im Rahmen von Öko-Audits werden immer häufiger Umweltbilanzen für Unternehmen erstellt. Der Betriebszaun stellt die Bilanzgrenze dar und in einer buchhalterischen Aufstellung stehen den Materialinputs die Outputs in Form von Produkten, Emissionen und Abfällen gegenüber. Um die Materialflüsse auch innerhalb des Betriebssystems nachzuvollziehen, werden die einzelnen Prozesse und Lager mitbilanziert. Die daraus folgende Systemkenntnis erlaubt es, Optimierungspotenziale aufzudecken, die im günstigsten Fall nicht nur zu einer besseren Umweltverträglichkeit führen, sondern auch Kostenvorteile für das betreffende Unternehmen bringen.

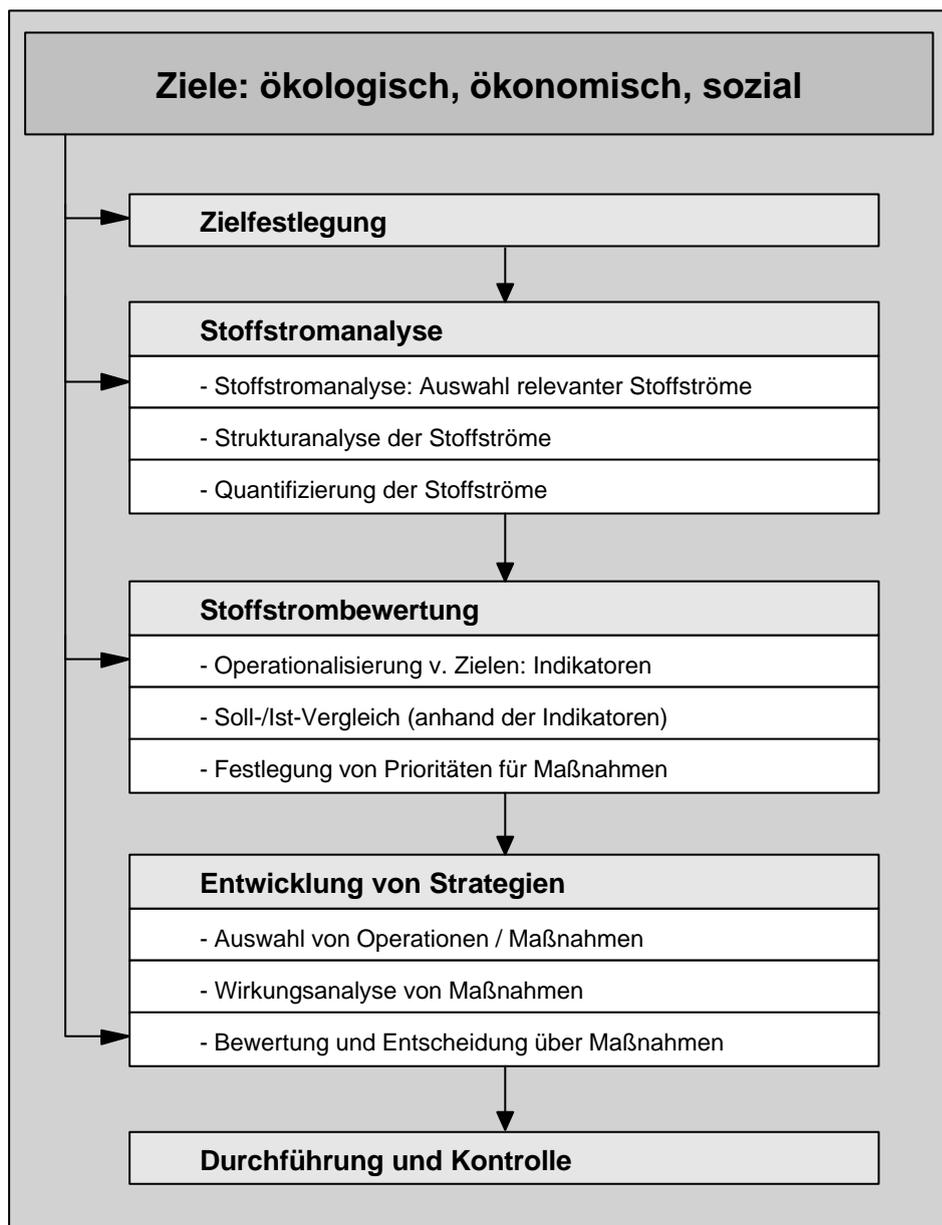
Die Tendenz, Umweltprobleme mit „End-of-the-Pipe“-Lösungen zu begegnen, ist mittlerweile der Einsicht gewichen, dass in der Früherkennung und vorausschauenden Planung eine erfolgsversprechendere Strategie liegt. Ökobilanzen wie sie für Produkte und Betriebe durchgeführt werden, betonen diesen Aspekt der ganzheitlichen Sicht von menschlichen Aktivitäten und damit verknüpften Umweltproblemen. Planung und Optimierung von vorhandenen Systemen lassen sich nur auf Grundlage eines Gesamtverständnisses durchführen.

Auch auf politischer Ebene manifestierte sich der systematische Ansatz im Umweltschutz zum Beispiel im Bericht der Enquete-Kommission „Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen“ (1994). Um das Leitbild der nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung („sustainable development“) umzusetzen, müssen Ressourcenverknappungen und umweltschädigende, menschliche Aktivitäten frühzeitig erkannt werden. Eine integrierte Stoffpolitik, die ein Management der Stoffflüsse bewirkt, könnte hierfür einen wirkungsvollen Ansatz darstellen.

Die Ansatzpunkte der Stoffstromanalysen der Enquête-Kommission waren deshalb meistens nationaler Art. So wurden z.B. die Flüsse und der Verbleib von Cadmium oder Chlor in der Bundesrepublik Deutschland untersucht. Die Analyse und Bilanzierung der Stoffströme ist wesentlicher Bestandteil des Stoffstrommanagements, das auf die zielorientierte, ganzheitliche und effiziente Beeinflussung von Stoffströmen in wirtschaftlichen Systemen ausgerichtet ist. Ökologisches Stoffstrommanagement ist – so de Man (1994) – die Beherrschung des Risikos unerwünschter Stoffströme in der Umwelt.

Die Ziele des Stoffstrommanagements können dabei sowohl auf betrieblicher Ebene, entlang der Kette der beteiligten Akteure oder auf staatlicher Ebene entwickelt und umgesetzt werden. Vor allem setzt das Stoffstrommanagement aber Akteure voraus, die ein Ziel, ein Modellverständnis von dem zu beeinflussenden System, Informationen über den aktuellen Zustand *und* Instrumente zur Steuerung des Systems haben. Im Bereich des Staates oder der öffentlichen Körperschaften stellen die Kommunen ein wichtiger Akteur dar, lokale oder regionale Stoffstromsysteme zu beeinflussen, durch Siedlungsplanung, Verkehrsplanung, Wirtschaftsförderung, Umweltplanung, usw.

Abb. 1: Bestandteile eines Stoffstrommanagements. Nach Enquête-Kommission (1994).



In der Diskussion um die nachhaltige Entwicklung werden Ökobilanzen für Kommunen oder Regionen analog zu betrieblichen Umweltbilanzen angeführt – es soll hier in Zukunft ebenfalls von regionalen/kommunalen *Umweltbilanzen* gesprochen werden, in Abgrenzung zu den inzwischen normierten Ökobilanzen bzw. LCA. In Form eines konsistenten Zahlengerüsts werden die relevanten anthropogenen und geogenen Prozesse, Güterflüsse und Reservoirs möglichst detailliert beschrieben, um so in den verschiedenen Handlungs- und Politikbereichen einer Kommune Entwicklungen dokumentieren sowie Schwachstellen und Handlungsoptionen identifizieren zu können.

Erstmals entwickelte Braunschweig (1988) ein Konzept zur „ökologischen Buchhaltung“ für Städte, das als Informations- und Steuerungsinstrument dienen sollte. Dieser Ansatz hat in der folgenden Zeit jedoch weniger auf der regionalen als vielmehr auf der Produktebene die Methode der Ökobilanzierung mitbeeinflusst. Neben der Funktion, die die kommunale Buchhaltung für die lokale Umweltpolitik und -planung hat, kann sie auch für die Zusammenarbeit von Unternehmen wichtig sein. Auf die Bedeutung für eine regionale, überbetriebliche Zusammenarbeit und damit zusammenhängend die Förderung der Kreislaufwirtschaft weisen Böning und Brückl (1995) hin.

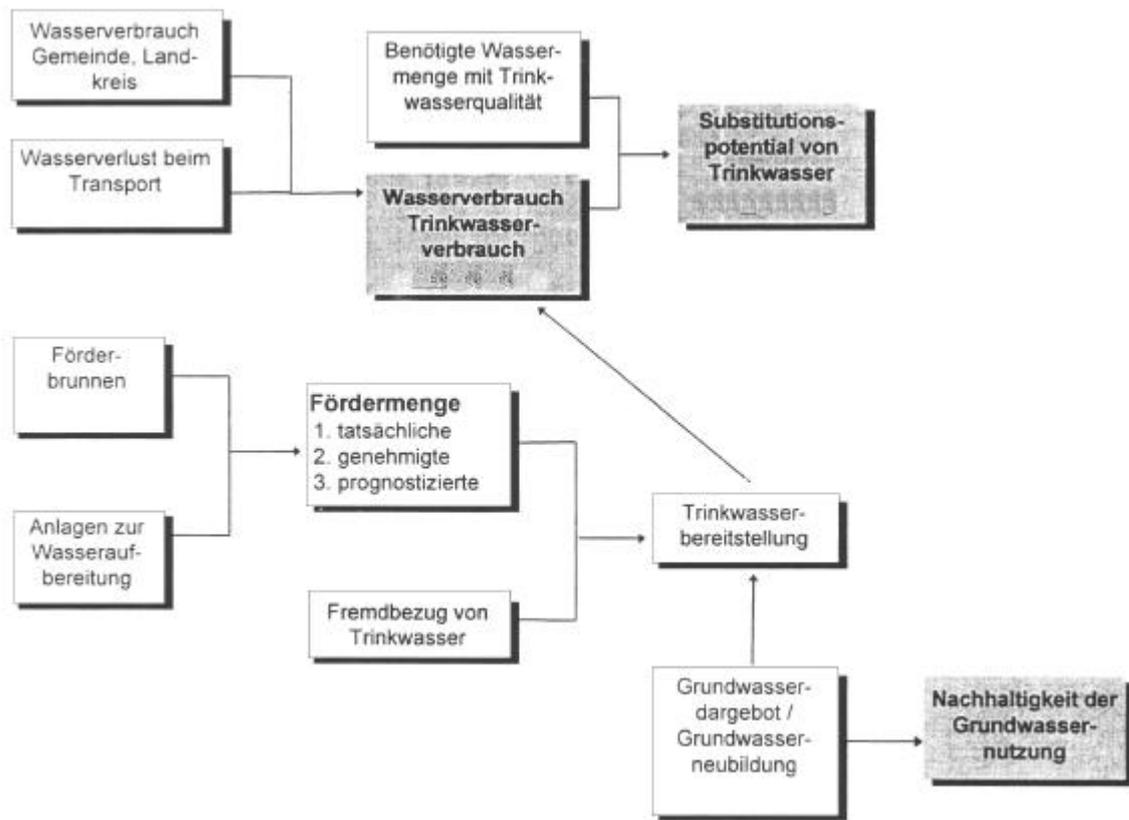
Die Bezeichnung „Region“ stellt dabei keinen exakt definierten Begriff dar. Da die Bilanzgrenzen abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung sind, kann der Rahmen nicht nur politische Verwaltungseinheiten wie Kommunen oder Länder umfassen, sondern auch naturräumlich (z.B. Flusseinzugsgebiet) oder wirtschaftlich einheitliche Regionen. Eine kommunale Umweltbilanz hat den Vorteil, dass das System in einer überschaubaren Größenordnung bleibt und auf dieser Ebene Einfluss von Seiten der kommunalen Umweltpolitik und -planung besteht. Gerade Städte stellen für den Umweltschutz ein wichtiges Untersuchungsfeld dar, da mit ihren hohen Besiedlungsdichten ein großer Energie- und Güterfluss verbunden ist (Baccini und Bader, 1996).

Dazu kommt, dass gerade im kommunalen Bereich in sogenannten Agenda21-Prozessen an der Umsetzung nachhaltiger Entwicklung gearbeitet wird. Es tauchen dabei auch Fragen nach den Stoff- und Energieströmen und den sie verursachenden Akteuren, nach dem Verhältnis von lokal genutzten und vorhandenen natürlichen Potenzialen auf. Die Umweltbilanz eröffnet die Perspektive, durch ihre quantitative Darstellung der relevanten Stoffströme die Diskussion um Nachhaltigkeit wesentlich zu unterstützen.

1.3 Kenntnisstand

Bisherige Ansätze zur kommunalen Nachhaltigkeit diskutieren überwiegend Indikatoren-systeme, die neben *extensiven* Größen auch *intensive* Größen zur Beschreibung enthalten und die außerdem versuchen, soziale und ökonomisch bewertete Größen einzubeziehen (Dieffenbacher, 1997). Sie ermöglichen z. B. kein Modellverständnis des stofflichen Metabolismus des Systems, sondern sind eine schlaglichtartige Beschreibung bzw. bereits eine Bewertung. Die Arbeitsgemeinschaft Regionale Ökobilanz (1998) führt ebenfalls keine Bilanz im buchhalterischen Sinne durch, obwohl sie den Begriff verwendet, sondern arbeitet mit einem Indikatoren-satz, der über ein geographisches Informationssystem einen regionalen Bezug erhält. Der Themenkomplex Wasser wird zum Beispiel anhand der Indikatoren Wasserverbrauch, Substitutionspotenzial von Trinkwasser und Nachhaltigkeit der Grundwassernutzung bilanziert (siehe z.B. Abb. 2).

Abb. 2: Ableitung des Indikators „Substitutionspotential Trinkwasser“ aus der regionalen Ökobilanz im Landkreis Pfaffenhofen. Aus: Arbeitsgemeinschaft Regionale Ökobilanz (1998).



Auf bundesweiter Ebene wurde dagegen bereits eine Material- und Energieflussanalyse durchgeführt, die sämtliche Flüsse bilanziert, die mit den wirtschaftlichen Aktivitäten verknüpft sind (Stahmer et al., 1997). Dieser Ansatz einer nationalen, ökologischen Buchhaltung entstand im Rahmen der Arbeiten an der Umweltökonomischen Gesamtrechnung für das Jahr 1990. Die Materialflüsse wurden in Input-Output-Tabellen dargestellt (aggregiert siehe Tab. 1), aus denen die Güterflüsse zwischen den einzelnen Wirtschaftsbereichen und zwischen der Wirtschaft und der Natur ersichtlich sind. Es wurde nach der Methode der monetären Input-Output-Analyse vorgegangen, die für die Umweltökonomische Gesamtrechnung verwendet wird. Als Datenbasis für die Analyse konnten sowohl zahlreiche Umweltstatistiken als auch die monetäre Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung verwendet werden. Das zu beschreibende System ist dabei die Bundesrepublik Deutschland, also ein geographisch eindeutig definierter Raum. Eine Unterteilung erfolgt nach Wirtschaftsbereichen, eine weitere räumliche Auflösung ermöglicht diese Bilanz jedoch nicht.

Ein anderes Beispiel für eine nationale Stoffflussanalyse wurde in den Niederlanden durchgeführt. Das Ziel bestand darin, den Beitrag der chlorierten Kohlenwasserstoffe an den nationalen Umweltproblemen zu bestimmen (Kleijn et al., 1994). Mit der Stoffflussanalyse sollten sämtliche Emissionsquellen von CKW's identifiziert werden. Auch Problemverlagerungen nach dem Entstehen von Emissionen, wie die Verlagerung von einem Umweltkompartiment in ein anderes, von einer Zeitperiode

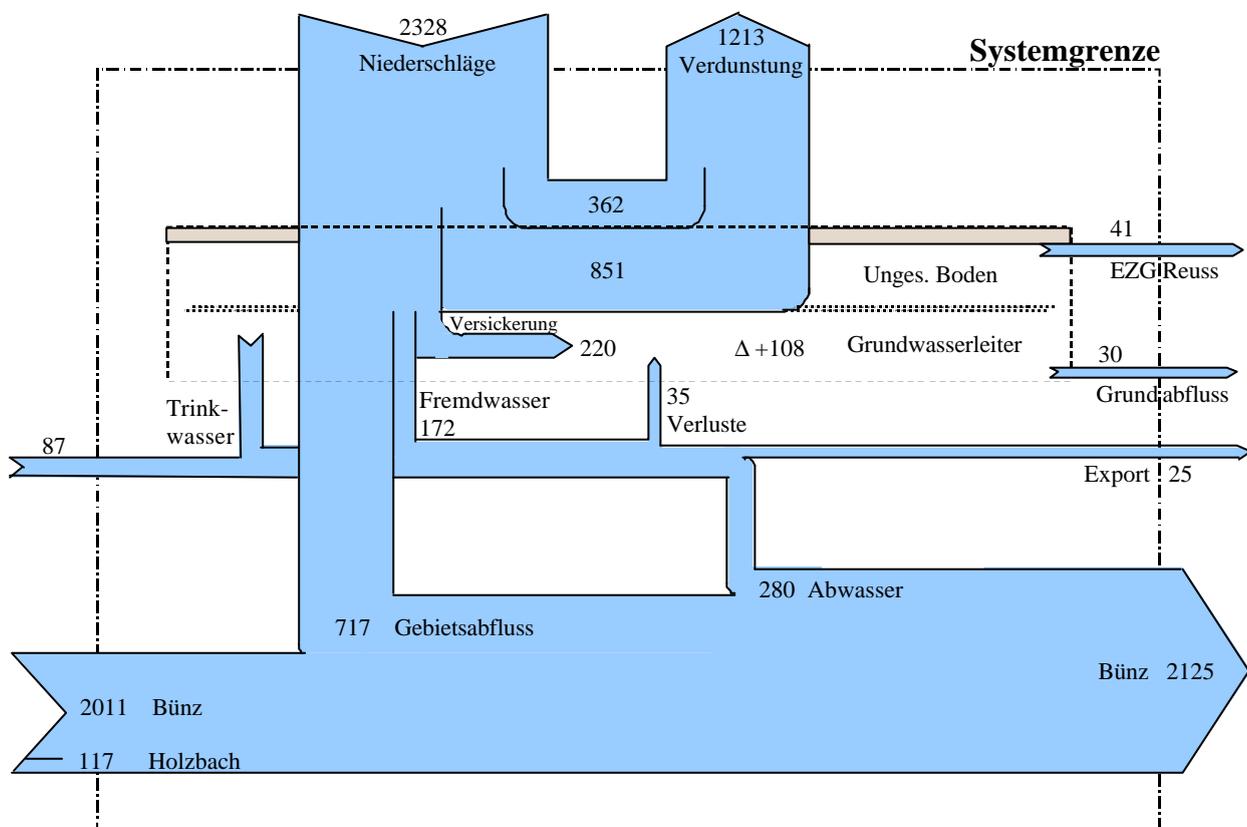
in eine andere oder die Umwandlung in einen anderen Stoff wurden berücksichtigt. Die Stoffbilanz wurde in dieser Studie als geeignetes Instrument für die Analyse von Umweltproblemen und als elementare Grundlage für Entscheidungen auf politischer Ebene bewertet.

Tab. 1: Physische Input- (Verwendung-) und Output- (Aufkommens-) Tabelle für die Bundesrepublik Deutschland 1990, Übrige Materialien in Mill. t - Produktionsbereiche, private Haushalte. (Quelle: Stahmer et al., 1997)

Materialien	Zusammengefasste Produktionsbereiche							Verbrauchsaktivitäten der privaten Haushalte
	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei usw.	Gew. V. Steinen u. Erden, H. v. Baustoffen usw.	Bau	Sonstige Bereiche des Produzierenden Gewerbes	Leistg. des Großhandels u.ä., Rückgewinnung	Externe Umweltschutzleistungen	Sonstige Produktionsbereiche	
	Inputs (Verwendung)							
Rohstoffe	333,4	592,6	168,9	46,5	0,0	0,0	0,7	16,4
Abraum	0,0	2,1	0,0	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Bodenmineralien	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bodenaushaub	0,0	1,1	168,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Andere feste Stoffe (Steine u.ä.)	0,2	589,4	0,0	24,9	0,0	0,0	0,7	0,0
Luftkomponenten	332,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,4
Güter	133,3	200,8	595,8	544,9	1,6	0,1	40,4	87,5
Sekundärrohstoffe	4,7	15,6	21,1	35,2	0,0	0,0	0,1	0,2
Bergbauerzeugnisse	2,6	1,3	0,0	64,9	0,0	0,0	0,8	1,3
Steine und Erden, Baustoffe usw.	1,0	182,5	549,1	26,9	0,0	0,0	10,4	0,0
Sonstige Güter	125,0	1,4	25,5	417,8	1,6	0,1	29,2	86,1
Rest- und Schadstoffe	0,0	0,0	0,0	0,0	104,4	21,5	0,0	0,0
Abfälle zur Verwertung	0,0	0,0	0,0	0,0	104,4	0,0	0,0	0,0
Abfälle zur Behandlung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,5	0,0	0,0
Inputs insgesamt	466,8	793,4	764,6	591,4	106,0	21,6	41,1	104,0
	Outputs (Aufkommen)							
Güter	129,9	756,4	540,3	419,9	90,9	0,4	25,2	0,0
Güter (inkl. Zuwachs an Biomasse)	129,9	756,4	540,3	419,9	90,9	0,4	0,0	0,0
Plastiktragetaschen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Mahlzeiten der Gaststätten u.ä.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0
Bücher, Zeitschriften usw.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
Militärische Güter	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6	0,0
Sachleistg der Sozialversicherung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Rest- und Schadstoffe	336,9	37,0	224,3	171,5	15,1	21,2	15,8	104,0
Abfälle zur Verwertung	0,0	1,3	22,9	44,2	0,3	4,9	1,9	4,4
Abfälle zur Behandlung	0,0	1,5	31,9	10,2	1,1	3,6	2,6	4,3
Abfälle zur Deponierung	0,1	3,3	55,1	14,3	0,8	0,7	5,5	10,7
Abraum	0,0	2,1	0,0	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Luftemission	259,2	0,0	0,7	8,8	0,0	1,4	1,9	48,9
Sonstige Rest- und Schadstoffe	77,6	28,8	113,7	72,4	12,9	10,6	3,9	35,6
Outputs insgesamt	466,8	793,4	764,6	591,4	106,0	21,6	41,1	104,0

Die erste Studie im Bereich regionaler Umweltbilanzen stammt aus der Schweiz und wurde Ende der 80iger Jahre für die Region „Unteres Bünztal“ durchgeführt (Brunner, 1992). Zunächst wurden Güterbilanzen für Luft, Wasser, Boden und Wirtschaftsgüter aufgestellt (Beispiel Wasser: Abb. 3). Darauf aufbauend erfolgte die Quantifizierung der Stoffflüsse von Stickstoff, Phosphor, Chlor und Blei. Grundsätzlich wurde die Methode der Stoffflussanalyse als geeignet bewertet und betont, dass es möglich sei, für die Untersuchung die Vielfalt der regionalen Stoffflüsse auf die wesentlichen Bestandteile zu reduzieren. Um die wenig umfangreiche Datenbasis zu verbessern, fanden Messungen vor allem im Bereich der natürlichen Güter- und Stoffflüsse statt. Methodisch ähnlich sind die Beispiele städtischer Umweltbilanzen für Wien (Daxbeck et al., 1996) und St. Gallen (Baccini et al., 1993).

Abb. 3: Wasserbilanz Unteres Bünztal (Nov. '86 - Okt. '87). Nach: Henseler et al. (1990)



1.4 Deskriptive und präskriptive Darstellung

Die bisherigen regionalen Studien stellen in der buchhalterischen Form Ströme und Bestände dar. Prozesse wurden, ggf. unter Berücksichtigung der Massenerhaltung, als „Black-Box“ betrachtet, so dass eine buchhalterische Übersicht entstand. Sie sind meistens eine deskriptive – also beschreibende – Momentaufnahme, etwa durch umfangreiche empirische Datenerfassungen oder Messungen. Damit lassen sich aber nur begrenzt interne Abhängigkeiten im Sinne von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen darstellen. Diese sind sinnvoll, um eine zeitliche Fortschreibung

der Bilanz mit einfachen Mitteln, z.B. begrenzten Strukturparametern, vorzunehmen oder um Handlungsoptionen szenarienhaft zu prüfen.

Hierzu reicht nicht mehr die einmalige Erstellung von Input-/Output-Tabellen, sondern es ist eine Modellierung des Stoffmetabolismus im bzw. des Systems erforderlich. Die Zusammenhänge zwischen Systemteilen sind aufgrund von Gesetzmäßigkeiten oder Modellvorstellungen vorgegeben, sie werden durch wenige Einflussgrößen geregelt. Man erhält damit eine weitgehend präskriptive Abbildung des Stoffstromsystems. Genau damit wird der Akteur – im Sinne eines Stoffstrommanagements (s.o.) – in die Lage versetzt, die Systemzusammenhänge von Ursachen und Wirkungen zu verstehen und in der gewünschten Weise ggf. zu beeinflussen.

Es gibt hierzu verschiedene Ansätze, z.B. der statischen oder dynamischen Modellierung von Stoffstromsystemen, wie in Kap. 2 noch aufgezeigt wird. Dies ist analog zu dem Vorgehen im betrieblichen Bereich: Dort ist einerseits die Erstellung einer deskriptive Umweltbilanz als Input-/Output-Liste möglich, meistens durch umfangreiche händische und statistische Auswertung von Bewegungsvorgängen im Betrieb – der Basis von Umweltberichten und Umwelterklärungen von Unternehmen. Andererseits kann in einer Stoffstromanalyse das Produktionsgeschehen im Betrieb modellhaft abgebildet und detailliert werden (z. B. Walther et al. 2000). Dadurch werden Fortschreibungen, Szenarien oder spezielle, etwa leistungsbezogene Auswertungen möglich.

Neben diesen verschiedenen Modellierungsansätzen gibt es verschiedene Möglichkeiten der methodischen Unterstützung: Baccini und Bader (1996) nutzen Differentialgleichungen zur Beschreibung und Lösung der Systeme; andere verwenden graphentheoretische Ansätze, z. B. Möller u. Rolf (1995) die Methode der Stoffstromnetze. Diese Methoden finden ihre Entsprechung in softwaremäßigen Werkzeugen zur Stoffstromanalyse, z. B. in SIMBOX oder in Umberto[®], die im Bereich der betrieblichen Stoffstromanalysen eingesetzt werden.

1.5 Ziel des Vorhabens

Das vorliegende Vorhaben knüpft genau an diese Aspekte an. Es prüft, inwieweit Ansätze und Methoden aus dem Bereich der Ökobilanz und der Stoffstromanalyse, die im Produktbereich und für Unternehmen bereits erfolgreich eingesetzt werden, für Kommunen oder Regionen einsetzbar sind. Dabei soll nach Möglichkeit ein Vorgehen aufgezeigt werden, bei dem der Input, der Output und die Bestände an ökologisch relevanten Stoffen, Ressourcen, Energie usw. des gewählten räumlichen Systems vollkonsistent beschrieben werden können und auch Unterteilungen nach Kompartimenten, z. B. nach bestimmten Akteuren, möglich sind.

Die Probleme, die hier auftreten, liegen in der Frage nach der Wahl der geeigneten Analysemethoden oder in der geeigneten Systemabgrenzung. Zwar sind die Bilanzgrenzen bei einer regionalen Umweltbilanz räumlich klar beschrieben. Bei betrieblichen Umweltbilanzen beschreibt der „Betriebszaun“ aber gleichzeitig noch die Erfassungspunkte zur Datenakquisition. Dies ist bei regionalen Umweltbilanzen nicht immer möglich, wenn man z. B. den Verbrauch von Unternehmen oder privaten Haushalten mitberücksichtigen will. Hier müssen geeignete Submodelle mit-

tels generischer Daten verwendet werden, wenn die Frage geklärt werden soll, welche Energie- und Produktmengen in das System fließen, welche Emissionen, Abfälle und neu geschaffene Produkte das System verlassen und welche Akteure daran beteiligt sind. Gleichzeitig stellt sich die Frage, welchen Erkenntnisgewinn bzw. welche Grenzen der Einsatz solcher generischer Daten hat.

An einem exemplarischen Fall soll geprüft werden, wie groß die Datenverfügbarkeit auf kommunaler Ebene ist. Kann eine konsistente Bilanz für einzelne Güter erarbeitet werden? Dabei liegt das Ziel nicht darin, eigene Messungen und Erhebungen durchzuführen, sondern anhand vorhandener Daten und durch Generierung und Modellierung die nötigen Informationen über Güterflüsse und -bestände die Bilanz zu erschließen.

1.6 Auswahl des Fallbeispiels

Im Mittelpunkt dieses Vorhabens steht die Anwendung graphenorientierter Stoffstromanalysen, konkret: Stoffstromnetzen, die mittels der Software Umberto® erstellt werden können. Dies schließt nicht die Möglichkeit anderer Ansätze oder Methoden aus. Es sollen vielmehr die Stärken und Schwächen einer solchen Stoffstrommodellierung für den regionalen oder kommunalen Rahmen aufgezeigt werden. Besonders interessant ist dabei die Auswahl geeigneter Subsysteme, nach denen die Stoffströme und Bestände unterschieden werden, sowie die Berücksichtigung sowohl von Stoffstromsystemen aus dem anthropogenen als auch aus dem geogenen/natürlichen Bereich. Die Stoffstromanalyse soll genau die Brücke zwischen diesen oft getrennt behandelten Bereichen schlagen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird ein solches Stoffstromsystem exemplarisch für die Stadt Heidelberg entworfen. In Heidelberg wurden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um ökologisch wichtige Handlungsbereiche zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu gehört u.a. auch das von der DBU geförderte Projekt der Naturhaushaltswirtschaft oder Anstrengungen zum Klimaschutz und Energiesparen. Außerdem wurde ein umfangreicher Agenda-21-Prozess initiiert. Heidelberg zeichnet sich gegenüber anderen Kommunen in Baden-Württemberg dadurch aus, dass die Datenlage für eine solche Fallanwendung verhältnismäßig gut ist und der Aufwand der Datenakquisition begrenzt gehalten werden kann. Ein nicht unwichtiger Aspekt ist, dass die Stadtverwaltung Heidelberg kompetente und engagierte Mitarbeiter zu diesen Themenbereichen vorhält. Das Umweltamt der Stadt sowie das Amt für Stadtentwicklung und Statistik hat seine Unterstützung für das Projekt zugesagt. Grundsätzlich sollen die Schlussfolgerungen aber auch auf andere Kommunen übertragbar sein.

Auch für die Aufgabe der weiteren Unterteilung des Systems in Subsysteme oder Kompartimente, sind Daten erforderlich. Als Subsysteme können Gruppen von Akteuren, z. B. Unternehmen, Branchen oder private Haushalte aufgefasst werden. Für die wichtigsten Verflechtungen dieser Subsysteme in einer Region muss ein Referenzsystem aufgestellt werden und mit konkreten Daten gefüllt werden. Da das Vorhaben seinen Schwerpunkt in der Modellbildung und nicht in der empirischen Datenerhebung hat, ist eine Zusammenarbeit mit anderen Akteuren, z. B. den Stadtwerken unerlässlich.

1.7 Auswahl der Bilanzgüter

Aus Aufwandsgründen sollte keine vollständige Umweltbilanz erstellt werden, bei der alle Stoffe und Güter, die das System Stadt tangieren, erfasst werden. Um die modelltechnischen Fragestellungen zu behandeln, reicht es vielmehr aus, sich auf bestimmte Bilanzgüter zu konzentrieren, die in ihrer Verschiedenartigkeit aber unterschiedliche Aspekte der Stoffstromanalyse erkennen lassen. Die Bilanzgüter sollen dabei so ausgewählt werden, dass einerseits eine ökologische Relevanz der Güter erkennbar ist, andererseits der Aufwand, insbesondere bei der Datenakquisition und Modellbildung, überschaubar bleibt.

Für das Forschungsvorhaben wurde *Wasser* als geogenes Gut und *Papier* als anthropogenes Gut ausgewählt. Am Beispiel dieser Güter können verschiedene Herangehensweisen und Probleme von regionalen Umweltbilanzen demonstriert werden.

1.7.1 Wasser und seine regionale Bedeutung

Wasser ist eine zentrale Ressource nicht nur für den Menschen, sondern für die gesamte Biosphäre. Der Schutz und die Bewirtschaftung dieses Gutes stellen einen wichtigen Bereich des kommunalen Umweltschutzes dar. Die geogene, erneuerbare Ressource Wasser unterliegt einem natürlichen Kreislauf durch Niederschläge, Evapotranspiration und dem oberirdischen Abfluss. Im globalen Wasserkreislauf verdunsten von den kontinental niedergehenden Niederschlägen etwa zwei Drittel. Der Rest fließt oberirdisch den Ozeanen zu.

Innerhalb einer Region kann eine Erneuerungsrate bestimmt werden, die vom Zufluss der Nachbarregionen und der Differenz zwischen Verdunstung und Niederschlägen errechnet wird. Der Vergleich zwischen Ländern in Europa zeigt, wie heterogen die Erneuerungsrate ausfällt: Die interne Erneuerungsrate in Ungarn beträgt nur 570 m³ pro Kopf und Jahr wohingegen in Island jährlich 654.000 m³ pro Kopf und Jahr zur Verfügung stehen. Die durchschnittliche Erneuerungsrate in Deutschland liegt bei 1.200 m³ pro Einwohner und Jahr, was ca. 25% des Wertes für Europa entspricht (World Resource Institute in: 1995 in Lehn et al., 1996: 20). Während Deutschland immer noch zu den wasserreichen Ländern gezählt wird, kommt es in einigen südlichen Teilen Europas (z.B. Spanien) jahreszeitabhängig häufig zu Wasserknappheit. Tab. 2 zeigt den Vergleich der erneuerbaren Ressourcen von Deutschland im Vergleich zu Europa und der Welt.

Tab. 2: Erneuerbare Wasserressourcen. Datenquellen: World Resource Institute und BMU (Bezugsjahr für Bevölkerung: 1992) in: LEHN et al. 1996.

	Interne Ressourcen		Zuflüsse von Oberliegern
	Gesamt [km ³ /a]	pro Kopf [m ³ /E a]	gesamt [km ³]
Welt	41.000	7.420	-
Europa	2.300	4.530	-
Deutschland	96	1.200	94
Baden-Württemberg	11 - 14	1.100-1.400	33

Betrachtet man den Umgang mit der Ressource Wasser unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, so reicht es nicht aus, auf die quantitativen Auswirkungen der anthropogenen Wassernutzung zu achten. Da die Wasserreinigung mit einem hohen Energie- und Kostenaufwand verbunden ist, muss der Eintrag von Chemikalien, wie z.B. Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft reduziert bzw. vermieden werden, um die Wasserqualität zu erhalten. Der Schutz der Grundwasservorräte, die in Deutschland das wichtigste Trinkwasserreservoir darstellen, ist daher von entscheidender Bedeutung. Vielfach wird hierzulande der qualitative Aspekt des Wasserschutzes gegenüber dem quantitativen als bedeutender eingeschätzt. Dennoch entbrennen regional immer wieder Diskussionen um die Menge des zu fördernden Grundwassers (SRU 1998:Zi 238). Vielfach sind genaue Kenntnisse über das regionale Erneuerungspotenzial nicht vorhanden. Wenn überbeanspruchte Grundwasserspiegel absinken, sind Ökosysteme und Bauwerke gefährdet. Durch die Möglichkeit Fernwasser zu beziehen (z.B. Bodenseewasserversorgung), wird in einigen Kommunen die Pflege der eigenen Brunnen, deren Wasser z.B. hohe Nitratwerte aufweist, vernachlässigt. Außerdem wird die Förderung von tiefem Grundwasser aus Sicht des Wasserschutzes als problematisch angesehen. Die Qualität des meist sehr alten Wassers, das noch keine anthropogenen Verschmutzung aufweist, wird durch Bohrungen gemindert. Die Wasserqualität bisher unangetasteter Reservoirs ist dann durch den steigenden Wasserbedarf gefährdet, weil oberflächennahes Grundwasser aufgrund seines Verschmutzungsgrades nur unter hohem Aufwand zu Trinkwasser aufbereitet werden kann. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) hat im aktuellen Gutachten zum Grundwasserschutz die Problematik aufgegriffen und empfohlen, die anthropogene Nutzung auf die unterschiedlichen Grundwassereinheiten abzustimmen.

In der vorliegenden Studie wird der Zusammenhang zwischen Umwelt und anthropogener Wassernutzung auf die kommunale Verwaltungseinheit bezogen betrachtet und nicht wie vom SRU vorgeschlagen auf einer einheitlichen Grundwasserlandschaft. Der Zweck der vorliegenden Studie war jedoch die anthropogene Einheit Kommune zu bilanzieren. Die Schwierigkeiten, die sich für die Bilanzierung eines geogenen Gutes aus der Wahl dieser Bilanzgrenzen ergeben, sind noch zu diskutieren.

Zur Zeit hat der Handel mit Wasser über weitere Strecken (Fernwasserversorgung), nur für wenige Regionen in der Bundesrepublik elementare Bedeutung. In Baden-Württemberg agieren häufig Gruppenwasserversorgungen (170), die kreisübergreifend mit Wasser handeln und eher regionale Bedeutung haben (Lehn et al. 1996). Insgesamt lässt sich feststellen, dass Fragen des Wassermanagements einen ausgeprägt regionalen Charakter besitzen (Golubev 1993) und sich als Gut für eine kommunale Umweltbilanz besonders eignen.

Die Thematik der Fernwasserversorgung wird in Zukunft in Deutschland mehr Gewicht erhalten, wenn es zur Privatisierung und Liberalisierung der Wasserwirtschaft kommen sollte. Dann wären nämlich auch Wassertransporte über weite Strecken wahrscheinlicher. Es erscheint daher zunehmend wichtiger, dass einheitliche Leitlinien für eine nachhaltige Nutzung aufgestellt werden.

Der aktuelle Maßnahmenplan des Umweltbundesamtes (UBA 1999) beinhaltet als wesentliche Ziele im Bereich Wassermengenwirtschaft, die Überbeanspruchung

der lokalen bzw. regionalen Wasserversorgungsgebiete zu vermeiden und eine effizientere Wassernutzung zu fördern. Der Wasserverbrauch muss im Sinne einer nachhaltigen Nutzung kleiner sein als die Grundwasserneubildungsrate. Dagegen werden keine konkreten Einsparziele benannt. Für Oberflächengewässer existieren Zielangaben, z.B. dass eine Reduktion des Nährstoffeintrags um 50 % angestrebt wird. Im Bereich Wassernutzung sind pauschale Einsparziele sicherlich nicht sinnvoll und regionsspezifische Besonderheiten müssten bei der Formulierung von Leitlinien berücksichtigt werden. Als extreme Beispiele seien hier Kreise ohne eigene Grundwasservorkommen wie Stuttgart genannt. Einen zusätzlich positiven Aspekt von Wassereinsparungen sieht das UBA darin, dass weniger Abwasser produziert würde und kleinere Kläranlagen benötigt würden, um eine effektive Reinigungsleistung zu erzielen. Insgesamt werden 5 Maßnahmen zur nachhaltigen Wassernutzung vom UBA vorgeschlagen, die in drei verschiedenen Ansätzen Wassereinsparungen bewirken können:

- ökonomische Anreize,
- ordnungsrechtliche Bestimmungen und

gezielte Aufklärung der Verbraucher über wassersparende Maßnahmen.

Wasser ist eine rein geogene, sich erneuernde Ressource, die für den Menschen essenziell ist. Von jeher war die Bedeutung im wirtschaftlichen, hygienischen und ökologischen Sinne groß. Die in einer Region verfügbare Wassermenge stellt einen Standortfaktor für bestimmte Industriezweige (z.B. Energieerzeugung) dar. Grundwasservorkommen dienen zur Trinkwassergewinnung. Oberflächengewässer werden wirtschaftlich genutzt, z.B. durch die Binnenschifffahrt und besitzen vielfach auch Naherholungswert. Naturbelassen können Fließgewässer Schutz vor Überschwemmungen bieten. Letztendlich hängen alle Ökosysteme von der Verfügbarkeit des Wassers ab.

Eine Stoffstromanalyse soll innerhalb eines geografisch begrenzten Raumes sämtliche Aspekte der Gewinnung, des Konsums und der Reinigung sowohl in geogener als auch anthropogener Hinsicht erfassen und in Form einer Wasserbilanz zusammenführen. Die Stoffstrombilanz kann dann eine Diskussionsgrundlage für wassermengenvirtschaftliche Fragestellungen sein. Im Wasser-Gesetz für Baden-Württemberg (§43) wird die Eigenständigkeit der Kommunen in punkto Wasserversorgung gefordert. Eine Erlaubnis zur Wassergewinnung wird von den Kommunen erteilt. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch, wenn die Menge des insgesamt zur Verfügung stehenden Wassers nicht genau bekannt ist. Für diese Studie wurde erstmals das Gesamtvolumen des zum Stadtgebiet zugehörigen Grundwassers bestimmt. Neben der Erneuerungsrate für das Grundwasser interessiert die Größe des gesamten Lagers, damit im Modell die anthropogene Entnahme aus dem natürlichen Speicher modelliert werden kann.

Die aktuellen Trends der Wasserwirtschaft in Deutschland und die Frage, wie nachhaltig in diesem Bereich agiert wird, beleuchtet eine Studie der Ecologic (Kahlenborn & Kramer, 1998). Bei der inhaltlichen Bestimmung wurden neun Prinzipien herausgearbeitet, an denen sich eine nachhaltige Wasserwirtschaft orientieren sollte:

- Regionalitätsprinzip
- Interationsprinzip
- Verursacherprinzip
- Kooperations- und Partizipationsprinzip
- Ressourcenminimierungsprinzip
- Vorsorgeprinzip (Besorgnisprinzip)
- Quellenreduktionsprinzip
- Intergenerationsprinzip

Das Regionalitätsprinzip fordert die Eigenständigkeit von Regionen und soweit möglich eine Vermeidung von Fernwasserversorgung. In Baden-Württemberg, das im Vergleich zu den anderen Bundesländern einen großen Wasserreichtum aufweist, gibt es zwei große Fernwasserversorgungen, auf die Regionen, wie zum Beispiel Stuttgart, angewiesen sind. Die Praxis der Fernwasserversorgung bedingt in einigen Fällen die Vernachlässigung der eigenen Grundwasservorkommen. Dies bedeutet, dass ökologische Folgen nicht unbedingt für die Lieferanten zu befürchten sind, sondern in den Empfängerregionen. Da zur Not auf Fernwasser zurückgegriffen werden kann, sind die Anstrengungen, die eigenen Gewässerprobleme in den Griff zu bekommen, gering (Lehn et al. 1996: 319). Es besteht Einigkeit darüber, dass das Prinzip der Regionalität nicht bedeuten kann, dass eine Region sich nur aus eigenen Quellen versorgen muss. Es wäre utopisch z.B. für Ballungsgebiete eine grundsätzliche Eigenständigkeit zu fordern. Eine Region stellt ein offenes System dar, das über die Stoff- und Energieströme in Kontakt mit seiner Umgebung steht. Bezieht eine Region zum Beispiel das Trinkwasser aus ihrer Umgebung, so sollte die Tragfähigkeit der umgebenden Ökosysteme beachtet werden. Es muss diskutiert werden, welche Versorgungseinheiten gebildet werden sollten, um eine nachhaltige Wasserversorgung zu gewährleisten.

Die Anpassung der lokalen Tragfähigkeit in Bezug auf Wasser (z.B. Fernwasser oder Erhöhung der Wasserförderung) hat einen wichtigen Anteil an der Ausrichtung der Wirtschaft in einer Region. Dies führt dazu, dass Maßnahmen die unter Berücksichtigung des Ressourcenminimierungspotentials die Anpassung der Nachfrage an das lokale Angebot fordern, nur schwierig umzusetzen sind. Im Gegensatz zu den Problemen der Gewässergüte ist die Beeinflussung von Ökosystemen in der Wassermengenvirtschaft erwünscht. Hier kann nur vorausschauende Planung unter der Maxime Anpassung der Nachfrage an das lokale Angebot zukünftig zu nachhaltigen Maßnahmen führen, die auch im wirtschaftlichen und sozialtechnischen Bereich angesiedelt sind.

Vom primär quantitativen Ansatz ausgehend kann eine Wasserbilanz den Grundstock für weitere Untersuchungen wie z.B. von Stoffströmen im Wasser bilden. Wasser wirkt auf Grund seiner physikalischen Eigenschaften als Lösungsmittel wie ein Transportband für eine Vielzahl von Stoffen wie z.B. Dünge- und Pflanzen-

schutzmittel aus der Landwirtschaft oder Schwermetalle, wie Blei oder Cadmium aus diffusen Quellen. Mittlerweile finden sich die unterschiedlichsten Stoffe in Oberflächenwässern und auch im Grundwasser, wobei die häuslichen Abwässer den industriellen immer ähnlicher werden. Die menschliche Nutzung des Wassers spiegelt sich in der Qualität der Gewässer wieder. Die Wasserbilanz einer Region kann eine wichtige Grundlage zur Erarbeitung von Stoffbilanzen anderer umweltrelevanter Stoffe sein. Die Wasserflüsse, die anhand der Wasserbilanz für eine Region als dominant erkannt wurden, können beprobt und ihre Stofffracht ermittelt werden. Mit den Angaben zu den Stoffkonzentrationen können anschließend Stoffflüsse berechnet werden. Dies ist nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchungen, kann darauf aber aufbauen.

1.7.2 Papier

Papier ist im Gegensatz zu Wasser kein öffentliches, sondern ein privates Wirtschaftsgut und es ist eindeutig anthropogenen Ursprungs. Sowohl im privaten wie geschäftlichen Alltag kommt Papier in vielfältiger Form zum Einsatz. Trotz elektronischem Datenaustausch und Kommunikation über Internet spielt der schriftliche Briefverkehr immer noch eine große Rolle. Der Zeitungs- und Zeitschriftenkonsum ist groß und als Verpackungsmaterial sind Papierprodukte häufig benutzt. Die Bedeutung von Papier und Pappe spiegelt sich auch in den großen Mengen Altpapier aus dem privaten Bereich wieder. Vom Gesamtaltpapieraufkommen der BRD (1982/1983) lag der Anteil der Privathaushalte bei 43 % (Göttsching, 1986).

Unterscheidet man nach den unterschiedlichen Papiersorten, so hat jede Anfallstelle eine unterschiedliche Altpapierzusammensetzung. 1993 war die Altpapiermenge von Verpackungspapieren im gewerblichen Bereich doppelt so hoch wie im privaten. Dagegen wurden 2,5 Mio. t Altpapier aus graphischen Papieren in den Haushalten und nur 1/5 dieser Menge im gewerblichen Bereich gesammelt. Graphische Papiere bilden den jährlich um ca. 8 % anwachsenden Bestand von Papiergütern in der Anthroposphäre. (sämtl. Zahlen in diesem Absatz aus: Hamm et al. 1993)

An der gesamten Wertstofffraktion hat Papier den höchsten Gewichtsanteil. In Heidelberg wurden 1997 pro Einwohner 89 kg Papier, 41 kg Glas und 13 kg Metalle gesammelt (Online-Datenbank des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg). Mit dem Wirtschaftsgut Papier sind demnach große Materialflüsse verbunden. Zusätzlich ist es aufgrund seiner guten Recyclingfähigkeit abfallwirtschaftlich von großer Bedeutung und wird als Wertstoff mengenmäßig erfasst. Die Betrachtung der Papier-Mengenströme in einer Kommune kann Rückschlüsse auf die wichtigen Akteure und die Wege zwischen Handel und den unterschiedlichen Konsumentengruppen geben.

Die *Papierherstellung* ist sehr wasserintensiv. Pro Tonne erzeugtes Papier werden ca. 35 m³ benötigt (Zahlen aus Österreich: Abb. 14, S. 11 in Pilz, 1996). Durch den Konsum von Papier wird neben dem Rohstoffverbrauch vor allem ein Wasserverbrauch in der Herstellungsregion induziert. Dieser Aspekt sollte bei einer Bewertung des Heidelberger Papierkonsums nicht vernachlässigt werden.

2 Methodische Grundlagen

2.1 Ansätze der Stoffstromanalyse

2.1.1 Buchhalterische Bilanzierung

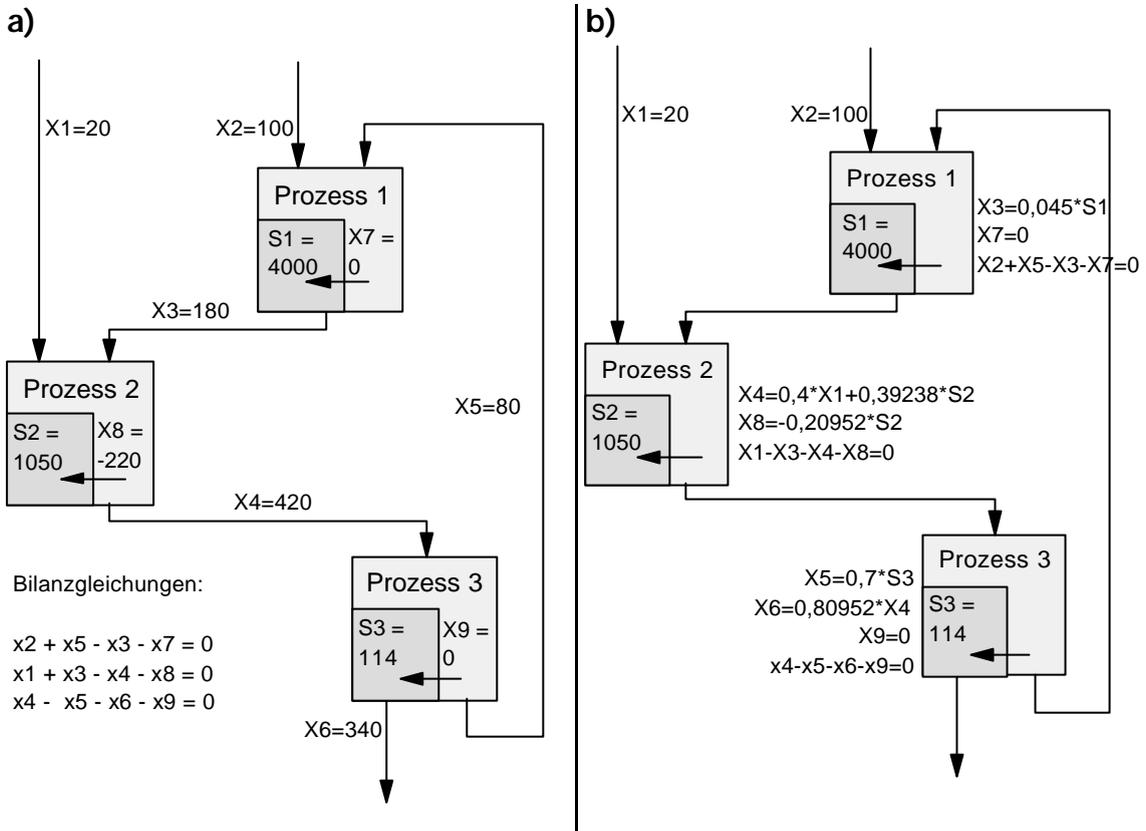
Welche grundsätzlichen Möglichkeiten gibt es nun, komplexe Stoffstromsysteme abzubilden und zu analysieren? Die einfachste Möglichkeit besteht in einer kompletten empirischen Erfassung aller Ströme und Bestände – im einfachsten Fall einer Black-Box-Betrachtung eben nur der Input- und Outputströme sowie der internen Bestände bzw. Bestandsveränderungen (siehe auch in: Schmidt 2000). Wenn ein System aus mehreren Subsystemen oder Prozessen besteht, so müssen weiterhin alle Ströme zwischen diesen Prozessen ermittelt werden. Man hätte damit ein rein deskriptives Modell.

Legt man eine massenmäßige (und ggf. energetische) Bilanzierung für jeden einzelnen Prozess und für das Gesamtsystem zugrunde, so können entweder die empirisch erhobenen Daten auf ihre Stimmigkeit überprüft werden oder es können fehlende Größen als Differenz aus der Massenbilanz berechnet werden. Damit eignet sich das Modell bereits – begrenzt – zur Abbildung interner Abhängigkeiten.

Dieses Vorgehen kann als eine buchhalterische Bilanzierung aufgefasst werden. Sie ist in Abb. 4a dargestellt. Drei Subsysteme oder Prozesse sind hier miteinander verknüpft. Die x -Variablen bedeuten Ströme eines Stoffes, die S -Variablen deuten Bestände (stocks) an. Entscheidend ist bei diesem System die Konstanz von Erhaltungsgrößen, z. B. der Massen- oder der Energieerhaltung. In diesem Fall lassen sich aus den Stromdaten x_1 bis x_6 die Bestandsveränderungen x_7 bis x_9 ermitteln. Das Verfahren eignet sich besonders gut, wenn die Massenerhaltung beispielsweise auf mehrere chemische Elemente ausgedehnt werden kann, für jedes Element also eine Bilanzgleichung erfüllt sein muss. So müssen etwa der Eintrag, Austrag und Verbleib von Cadmium in einem Stoffstromsystem bilanziell ausgeglichen sein. Buchhalterische Verfahren werden deshalb häufig im Bereich der Substanzflussanalyse (SFA) eingesetzt.

Im Bereich der Stoffstromanalyse von verschiedenen Materialien, Produkten etc., so wie sie auch im vorliegenden Fall sinnvoll erscheint, liefert die buchhalterische Bilanzierung nur begrenzt relevante Informationen. Die Massen- oder Energiebilanz lässt sich in dem zu untersuchenden System oft nicht ausgleichen, da wichtige Größen an den Bilanzgrenzen fehlen. Außerdem fehlen viele der Stromdaten im System. Der Erhebungsaufwand für eine detaillierte Erfassung aller Ströme im Vergleich zu den neu gewonnenen Aussagen wäre unangemessen hoch.

Abb. 4: Beispiel für ein Stoffstromsystem unter Zugrundelage von Bilanzgleichungen. s_1, s_2, s_3 bedeuten Bestände, x_1 bis x_9 Flüsse. a) Mit Kenntnis von x_1 bis x_6 können beispielsweise die Bestandsänderungen berechnet werden. b) Mit Kenntnis von x_1 und x_2 sowie den Prozessabhängigkeiten lassen sich die anderen Ströme incl. des Recyclingstroms x_5 berechnen. Beispiel nach Van der Voet (1996) aus Schmidt (2000).



2.1.2 Statische Modellierung

Für andere Bereich, z.B. für den betrieblichen oder produktbezogenen Bereich, bietet sich die statische Modellierung an. Die statische Modellierung setzt Kenntnisse über die Transformationsprozesse voraus, d.h. sie weiß zu jedem einzelnen Subsystem oder Prozess, in welchem Abhängigkeitsverhältnis die Input-, Output- und Bestandsgrößen zueinander stehen, die Modellabhängigkeiten sind präskriptiv. In Abb. 4b wird von linearen Beziehungen der Größen zueinander ausgegangen, wobei hier noch Abhängigkeiten der Stromgrößen von den Bestandsgrößen unterstellt sind.

Aus den beiden Strömen x_1 und x_2 und den Anfangsbeständen lassen sich schließlich alle anderen Stromgrößen berechnen. Dazu wird ähnlich der Leontiefschen Input-/Output-Analyse ein lineares Gleichungssystem gelöst (vgl. Leontief 1966). Damit können auch die Ströme in Zyklen (z. B. Recyclingstrom in x_5) berechnet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass aufgrund der Kenntnis über das grundsätzliche Verhalten der Transformationsprozesse nur noch ein begrenzter Satz an Stoffströmen empirisch erhoben werden muss, die restlichen Strom- und Bestandsdaten im System errechnet werden können. Dies reduziert einerseits den empirischen Erhebungsaufwand erheblich. Viele ökologisch relevanten Stoffströme

lassen sich auch nur aus solchen funktionalen Abhängigkeiten errechnen. So werden beispielsweise nie Kohlendioxid-Emissionen am Schornstein gemessen, sondern aus dem Verbrauch an Brennstoff rechnerisch ermittelt.

Andererseits liegt mit den funktionalen Abhängigkeiten der Größen zueinander ein komplexes Modell des Stoffstromsystems vor, das eine Analyse der Verhaltensweisen des Systems zulässt: Was wäre, wenn die Eingangsströme sich verändern, z. B. im nächsten Jahr? Was wäre, wenn die Transformationsprozesse eine veränderte Funktionalität aufweisen, sich z. B. das Wirtschaftssystem (Produktionsbranchen, Verbraucher,...) verändert? D. h. das Modell ist szenariofähig und erlaubt eine Unterstützung von Planungsarbeiten. Dazu kommen Analysen über die Robustheit der errechneten Lösung oder die Beiträge zu bestimmten Stoffströmen. Die Leontief'sche Input-Output-Analyse bietet hier aufgrund ihrer einfachen linearen Mathematik zahlreiche Möglichkeiten der Auswertung (siehe z. B. Heijungs 1994 und Heijungs 1996).

Andere Modellansätze verzichten auf die lineare Beschreibung der einzelnen Transformationsprozesse und führen auch nichtlineare Abhängigkeiten ein, wie sie in realen Produktionsvorgängen und erst recht in geogenen Transformationsprozessen oft auftreten. Das Gesamtsystem lässt sich dann nicht geschlossen über lineare Gleichungssysteme lösen. Es sind andere Verfahren entwickelt worden, z. B. Iterationen oder Rechenverfahren in Stoffstromnetzen, um unbekannte Größen im System zu ermitteln (vgl. Möller 1997). Spengler (1998) setzt z. B. Prozesssimulationssysteme in Kombination mit der Aktivitätsanalyse zur Modellierung von Eisen- und Stahlproduktionsprozessen ein. Weiterhin können Optimierungsmodelle eingesetzt werden, wie sie aus dem Operations Research bekannt sind (vgl. Schmidt 2001).

2.1.3 Dynamische Modellierung

Geht man von der statischen Modellierung in Abb. 4b aus, bei der neben Strömen auch Bestände berücksichtigt wurden, so ist es nur ein kleiner Schritt, die Rechnung zeitabhängig aufzubauen, sie also zu dynamisieren. Die einfachste Form ist hierbei, eine Periodenrechnung – im Sinne einer Differenzenrechnung – zu etablieren: Die Stromdaten werden indiziert und werden zu einer Reihe von aufeinander folgenden Zeitperioden ermittelt; die Bestandsdaten beziehen sich jeweils auf das Ende einer Periode, was zugleich den Anfang einer neuen Periode darstellt. Die Bestandsdaten als Zustandsgrößen verbinden die Perioden miteinander.

Damit können zeitabhängige Veränderungen verfolgt werden. Einerseits lässt sich ein periodisch fortschreibbares Berichtswesen aufbauen, in dem schließlich Prognosedaten mit IST-Daten verglichen werden können. Andererseits können zeitlich veränderliche Effekte in einem Stoffstromsystem analysiert werden. Ein Beispiel hierfür ist das Verhalten von Recyclingströmen (z.B. Papier) in Kreislaufwirtschaftssystemen.

2.2 Mathematische Beschreibung

Während die buchhalterische Bilanzierung im Grunde nur die arithmetischen Rechenoperationen voraussetzt, die statische Modellierung ggf. das Lösen von linearen

ren Gleichungssystemen verlangt, stellt die dynamische Modellierung von Stoffstromsystemen besondere Anforderungen an die zu verwendeten Mathematik.

2.2.1 Differentialgleichungen

Baccini und Bader (1996) orientieren sich an den Erhaltungssätzen und Bilanzgleichungen, wie sie in der Physik formuliert werden, und beschreiben die Stoffstromsysteme anhand von Differentialgleichungen. Sie betrachten dazu räumliche Einheiten (die Bilanzvolumina V_j) und bestimmen dazu die Materieflüsse (und Energieflüsse, die hier vernachlässigt werden) in einem bestimmten Zeitraum. Sie diskretisieren das Problem also in Raum und Zeit und ermöglichen damit eine orts- und zeitspezifische Erfassung. Wenn $M_i^{(j)}$ die Menge der Materieart i in dem j -ten Bilanzvolumen ist (also als Bestand), so folgt für die Bestandsänderung:

$$\frac{dM_i^{(j)}}{dt} = \sum_{r=1}^{N+N_{Ip}} \Phi_i^{(r \rightarrow j)} - \sum_{s=1}^{N+N_{Op}} \Phi_i^{(r \rightarrow s)}$$

$\Phi_i^{r \rightarrow s}$ ist dabei der (Brutto-)Materiefluss der Materieart i von dem Bilanzvolumen V_r nach V_s . N beschreibt die Anzahl der Bilanzvolumina und N_{Ip} bzw. N_{Op} die Anzahl der externen Input- bzw. Outputflüsse. Zusammenfassend: Die Änderung der Materiemenge im Bilanzvolumen j ist die Differenz aus den Inputflüssen (intern und extern) und den Outputflüssen (intern und extern).

Im einfachen Fall sind die Materieflüsse und -bestände zeitunabhängig, also $\Phi_i^{r \rightarrow s}(t) = \Phi_i^{r \rightarrow s}$ und $M_i^{(j)}(t) = M_i^{(j)}$. In diesem Fall spricht man vom stationären oder statischen Fall. Sind nur die Materieflüsse zeitunabhängig, die Bestände also zeitabhängig, so spricht man vom quasistationären Fall. Im dynamischen, also zeitabhängigen Fall werden die Systemvariablen $M_i^{(j)}(t)$ und $\Phi_i^{r \rightarrow s}(t)$ nicht durch Zahlen, sondern durch Funktionen in der Zeit beschrieben.

Ein spezielles Modell wird aber erst durch einen Satz an systemspezifischen Gleichungen beschrieben, die zu den o.g. Bilanzgleichungen hinzutreten. Erst durch sie wird ein spezielles Stoffstromsystem spezifiziert. Sie formulieren Abhängigkeiten zwischen den Flüssen und Beständen und ermöglichen im besten Fall eine Auflösung des Gleichungssystems nach den unbekannt Systemvariablen (den Flüssen und Beständen). Diese Systemgleichungen stehen für die Anfangs-, Rand- und Nebenbedingungen des Systems und enthalten oft noch spezielle Modellparameter. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 4b gegeben: Zu den 9 Flüssen (x) und 3 Beständen (s) sind insgesamt 12 Systemgleichungen gegeben, die die Abhängigkeiten zwischen den Systemvariablen beschreiben – dadurch ist das System festgelegt. Im allgemeinen sind diese Gleichungen nichtlinear, d.h. es muss ein System nichtlinearer Gleichungen gelöst werden.

An die Stelle eines Satzes von Systemgleichungen und Bilanzgleichungen im stationären Fall tritt im dynamischen Fall jeweils ein Satz von Gleichungen zu jedem Zeitpunkt t , wobei die Gleichungen i.d.R. noch Zeitkopplungen zu früheren Zeiten

enthalten. Damit wird die Kausalität beschrieben, d.h. Materieströme und –bestände hängen auch von den Größen zu früheren Zeitpunkten ab.

Obwohl die Formulierung des Stoffstromproblems damit durch Baccini und Bader (1996) allgemein und umfassend erfolgt ist, bleibt die Lösung meistens eine schwierige Aufgabe. Je nach Komplexität des Problems müssen *gekoppelte, nicht-lineare Integro-Differentialgleichungssysteme* in der Zeit gelöst werden. Dies geht in den seltensten Fällen analytisch; meisten müssen numerische Verfahren eingesetzt werden, d.h. mittels einer Diskretisierung werden Differenzgleichungen gebildet und die Gleichungssysteme werden dann mit Verfahren wie z.B. nach Newton-Raphson gelöst.

2.2.2 Stoffstromnetze

Eine andere Möglichkeit der Beschreibung von Stoffstromsystemen bedient sich graphen- oder netztheoretischer Ansätze, in diesem Fall der sogenannten Petrinetze. Auch Baccini und Bader (1996) erwähnen, dass andere Ansätze zur quantitativen Beschreibung von Stoffstromsystemen als der ihre möglich sind, darunter die Petri-Netze, die sie allerdings fälschlicherweise als deskriptive Datenmodelle interpretieren. So ist mit sogenannten Stoffstromnetzen ebenfalls die Erstellung von Modellen, basierend auf Gesetzmäßigkeiten, Erhaltungssätzen oder anderen phänomenologischen Modellen, möglich.

Die Stoffstromnetze basieren auf dem graphischen Formalismus der Petrinetze (Brockhaus, 1998). Dabei wird das Stoffstromsystem als ein Graph aus Kanten und Knoten dargestellt: Die Kanten bilden die Material- und Energieflüsse ab. Die Knoten stehen für Transformationsprozesse, Lagerungen und Verteilungen. Bei den Petrinetzen wird strikt zwischen den Knotenarten unterschieden: Transitionen sind *aktive* Knoten und beschreiben Aktivitäten, d.h. Umwandlungen von Material- und Energieflüssen¹. Stellen (engl. places) sind *passive* Knoten und beschreiben Zustände, z.B. Bestände zu bestimmten Zeitpunkten. Die strikte Unterscheidung nach Aktivitäten und Zuständen erklärt die Mächtigkeit des Petrinetzansatzes, da dadurch i.allg. eine Synchronisierung nicht parallel-verlaufender Vorgänge und darauf aufbauend eine Entscheidungs- oder Ursachen-Wirkungslogik möglich ist.

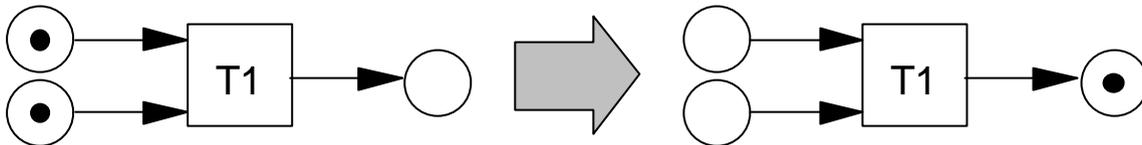
Ganz allgemein kann ein Petrinetz als ein Tripel $N=(S, T, F)$ aufgefasst werden. S ist dabei die Menge der Stellen, T die Menge der Transitionen und F eine Flussrelation (also die Menge der Kanten oder Flüsse), wobei gilt: $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$. Kanten können in Petrinetzen also nur zwischen Stellen und Transitionen oder zwischen Transitionen und Stellen hergestellt werden, nicht aber zwischen Transitionen und Transitionen oder Stellen und Stellen. Dies wird vor dem Hintergrund der Darstellung von Abläufen klar, bei der eine Aktivität stets einen neuen Zustand verursacht und sich Aktivitäten aus Zuständen ergeben. Ähnliche Beschreibungen werden erfolgreich auch im Operations Research, etwa bei der Netzplantechnik und dem Projektmanagement, eingesetzt.

¹ Hier wird von dem Umwandlungs- oder Transformationsbegriff aus der Produktionswirtschaft ausgegangen (vgl. Dyckhoff 1994).

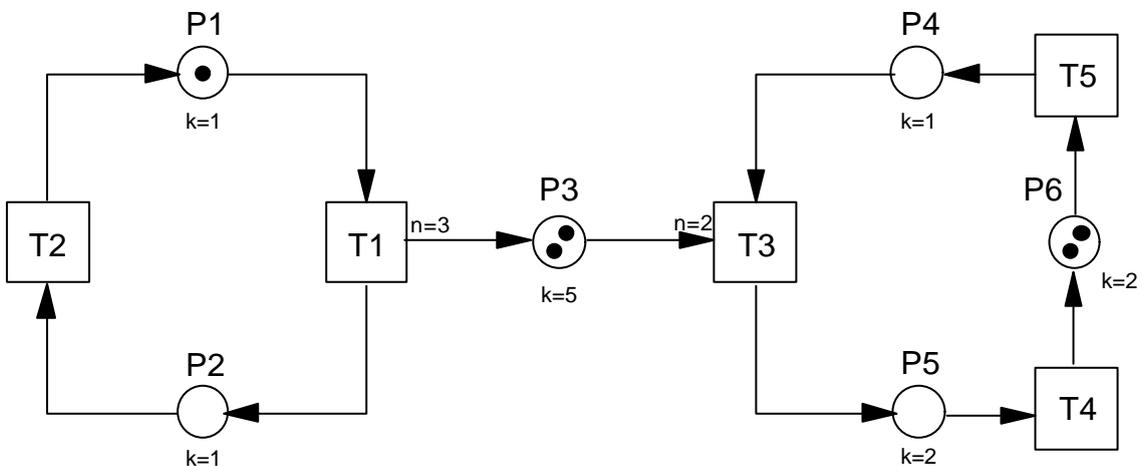
Ein einfaches Beispiel, das die Dynamik eines Petrinetzes beschreibt, ist in Abb. 5 dargestellt. Dabei wird mit Markierungen (Marken) gearbeitet, die – vereinfacht gesprochen – durch das Netz weitergereicht werden: Eine Transition schaltet dann weiter, wenn auf allen Stellen inputseitig eine Marke vorhanden ist (Abb. 5a). Es können aber auch Vorschriften angegeben werden, wie viele Marken zum Schalten der Transition auf jeder inputseitigen Stelle erforderlich sind, bzw. wie viele Marken dann outputseitig weitergereicht werden. Außerdem können Stellen Kapazitätsbeschränkungen enthalten, also nur eine bestimmte Menge an Marken aufnehmen. Die Transition T1 in Abb. 5b kann beispielsweise schalten und 3 Marken für P3 und 1 Marke für P2 erzeugen. In P3 existiert schon ein Bestand an Marken, 5 Marken ist die Kapazitätsgrenze. Die Transition T3 muss hingegen warten, bis auch an P4 eine Marke vorhanden ist. Letztendlich erfolgt bei diesem Beispielnetz eine Synchronisation der Produktion (links) und der Konsumtion (rechts), wenn beide mit unterschiedlichen Zeitkonstanten ablaufen.

Abb. 5: Funktionsweise des „Schaltens“ von Transitionen. Nach Möller (2000).

a) Schalten einer Transition



b) Produzenten-/Konsumenten-System als einfaches Petrinetz (Begrenzung der Puffer auf k Marken, Schalten der Transition mit n Marken, sonst mit 1 Marke)



Stoffstromnetze, wie sie beispielsweise von Möller (2000) beschrieben werden, bilden – im Gegensatz zu kontinuierlichen oder ereignisbezogenen Ansätzen – Stoffstromsysteme *periodenbezogen* ab. Es wird also nicht mit einzelnen Marken gearbeitet, sondern die Stellen verwalten Mengen, die als reelle Zahlen beschrieben werden, nämlich die Menge eines Materials oder einer Energie, die in einer Zeitperiode gelagert wird. Die Transitionen beschreiben den Transformationsprozess von Materialien und Energien und enthalten die Modellannahmen der einzelnen Umwandlung, z. B. eines Produktions- oder Konsumtionsprozesses. Ihr Wirken („Schalten“) hängt nur von dem Vorhandensein und Weiterreichen ausreichender

Material- und Energiemengen der inputseitigen Stellen ab, daraus ergeben sich dann die bekannten Material- und Energieströme an der Transition, aus denen mit Hilfe der Modellannahmen des einzelnen Prozesses die unbekannt Ströme berechnet werden können. Möller (2000) geht sogar noch weiter: Je nach Modellannahmen ist es auch möglich, die Berechnung der Transition von den Mengen auf den outputseitigen Stellen (oder gemischt) abhängig zu machen. Allgemein lässt sich sagen, dass die Berechnung einer Transition davon abhängt, ob ihr aufgrund der Modellannahmen ausreichend Informationen zur Verfügung stehen, um unbekannte Ströme (und damit wieder Zustände in den benachbarten Stellen) zu berechnen.

Möller (2000) weist auf die Besonderheit dieses Ansatzes hin: Denn mit der Unterscheidung zwischen Aktivitäten und Zuständen in der Form der Transitionen und Stellen gelingt es, die Transitionen als einen lokal begrenzten Vorgang aufzufassen, der von lokalen Zuständen abhängt, die Stellen jedoch die lokale Wirkungen in einen globalen Zusammenhang setzen. Eine Folge daraus ist, dass die Transition als ein Submodell für die Transformation aufgefasst werden kann, dass von anderen Submodellen (Transitionen) erst einmal unabhängig ist. Dies trifft im Prinzip auch in der Realität zu: So ist das Funktionieren des Systems „Grundwasser“ erst einmal unabhängig von der Art, wie das System „Badewanne“ in einem Haushalt funktioniert. Erst durch die Verknüpfung der Ströme werden beide Systeme miteinander gekoppelt, zu einem Gesamtsystem, das netzartig dargestellt werden kann.

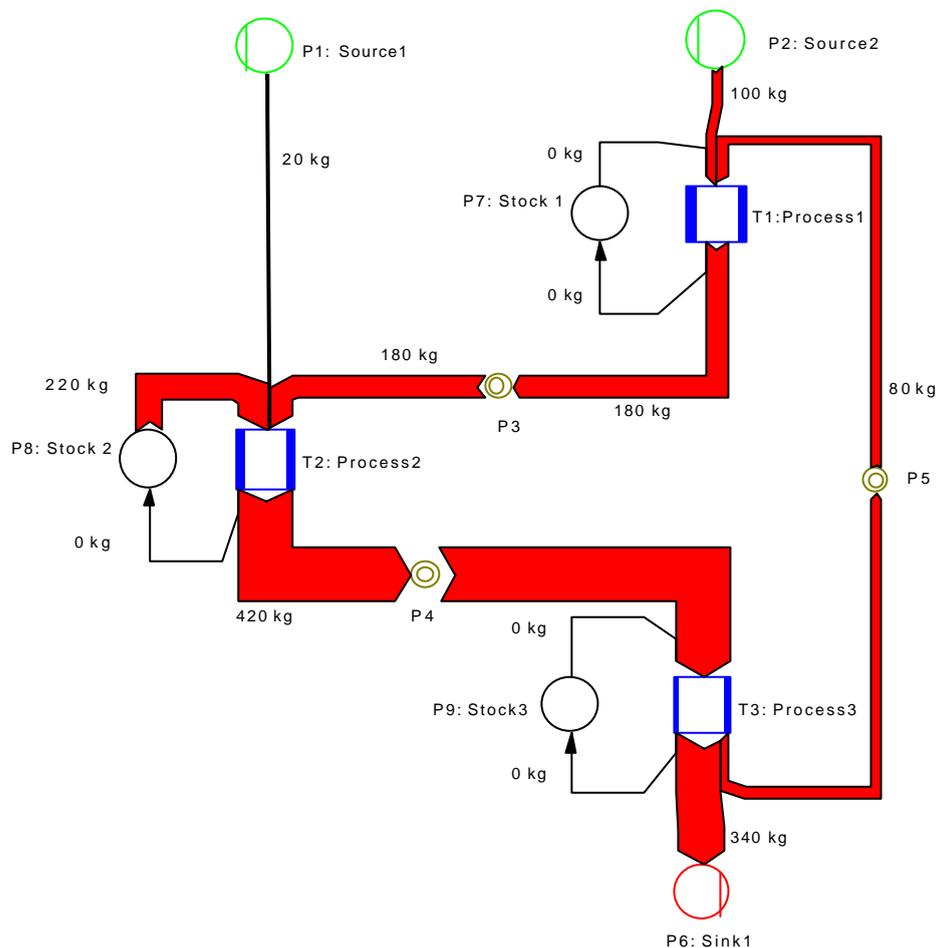
Genau darin liegt auch die Stärke des Ansatzes der Stoffstromnetze: Es können viele kleine Submodelle betrachtet werden, wie sie auch aus der Realität bekannt sind, und in einer Netzstruktur miteinander verbunden werden, und zwar vermittelt mit dem, was auch in der Realität i.d.R. das Bindeglied zwischen den Kompartimenten darstellt: mit den Energie- und Stoffströmen. Die Erstellung eines komplexen Gesamtmodells wird dadurch erleichtert, da sie unmittelbar in der Netzstruktur eine grafische Entsprechung hat. Dies ist der Vorteil für viele Laien, die Stoffstromanalysen betreiben wollen. Erst wenn in solchen Netzen „Fernwirkungen“ zwischen verschiedenen Prozessen oder Subsystemen auftreten, z. B. durch quasi unendliche Signal- oder Flußgeschwindigkeiten, versagt der Ansatz.

Grundsätzlich ist mit Stoffstromnetzen eine statische, aber auch eine dynamische, d.h. zeitabhängige Modellierung möglich. Da die Stellen nach Zeitperioden unterscheiden, liegt hier im Grunde wieder eine Diskretisierung nach der Zeit vor. Temme (1999) hat gezeigt, dass sich mit Petrinetzen auch hochdynamische Modelle, z.B. die Wachstums- und Bestandsdynamik von Pflanzen (Winterweizen) oder Populationsausbreitungen, abbilden lassen. Die Ergebnisse sind denen aus dem Lösen von Differentialgleichungen, die in solchen Fällen üblicherweise aufgestellt werden, gleichwertig. Probleme, die auftreten, resultieren aus der Diskretisierung, die aber i.d.R. bei beiden Lösungsansätzen erforderlich sind. Temme (1999) bezeichnet die Petrinetze in diesem Zusammenhang als leicht zu bedienendes Werkzeug, dass es ermöglicht, einen Modellansatz „intuitiv“ umzusetzen, zu verifizieren und fortlaufend zu erweitern und an empirische Informationen anzupassen.

Dies zeigt sich auch an dem Beispiel aus Abb. 4. Dieses Stoffstromsystem – statisch wie dynamisch – kann mit Stoffstromnetzen nachgebildet werden. In Abb. 6 ist

dieses Beispiel als Stoffstromnetz dargestellt. Die Prozesse werden als Transitionen (Rechtecke), die Bestände als Stellen (Kreise) und die Flüsse als Kanten abgebildet. Die Modellannahmen stecken in den einzelnen Prozessen und werden durch die Verknüpfungslogik des Netzes ergänzt. Das System hat einen Anfangszustand, nämlich den Beginn einer Bilanzperiode, der durch die bekannten Anfangsbestände bestimmt ist. Aus wenigen bekannten Flüssen während der Periode kann dann der Endzustand des Systems, das Ende der Bilanzperiode, berechnet werden, einschließlich aller Flüsse und Bestände in dem System. Die Ergebnisse stimmen mit jenen aus Abb. 4 überein.

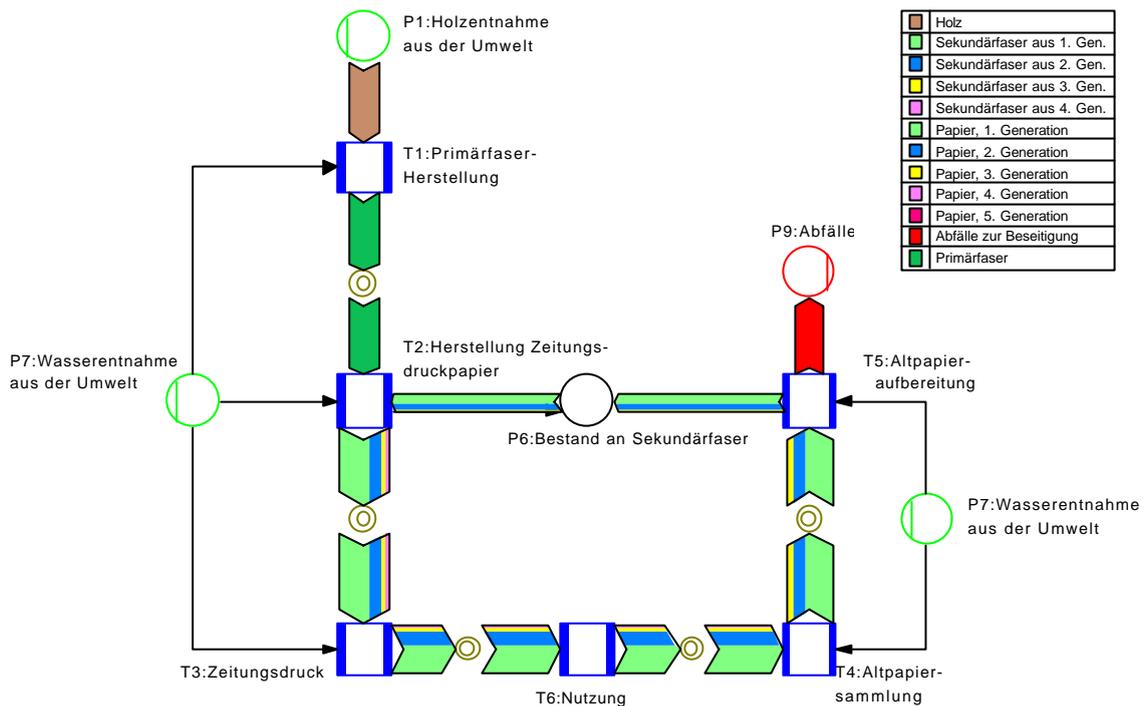
Abb. 6: Stoffstromnetz des Beispiels aus Abb. 4, erstellt mit der Software Umberto. Kreise symbolisieren Stellen und damit Bestände. Ineinander verschachtelte Kreise sind Pseudostellen, d.h. in ihnen wird nichts gelagert, sondern Inputströme werden sofort als Outputs weitergereicht. Die Bilanzgrenzen des Systems werden ebenfalls durch Stellen symbolisiert, die speziell markiert sind.



Auch reale dynamische Systeme können mit solchen Stoffstromnetzen sehr gut beschrieben werden. Dazu gehören z. B. Systeme, bei denen Zyklen in der Form von Recycling eines Materials auftreten. Solche Systeme sind in Detzel et al. (1997) beschrieben worden. Abb. 7 zeigt ein System, bei dem aus Primärfasern Papier hergestellt und dann konsumiert wird. Danach wird ein Anteil des Papiers als Sekundärfaser wieder recycled. Dieses Recycling wird mit einer zeitdynamischen Rechnung abgebildet, d.h. die Sekundärfasern fallen zu einer späteren Zeitperiode an

als ihre primäre Produktion – wie in der Realität. Mit diesem Stoffstromnetz kann man z. B. das Verhalten und den Anteil der Fasergenerationen im Recyclingpapier verfolgen. Dazu gehören die Annahmen, dass nur ein bestimmter Anteil des Altpapiers gesammelt und aufbereitet wird, sowie dass die ältesten Fasergenerationen sich für das Recycling nicht mehr eignen und aus dem System ausgeschleust werden.

Abb. 7: Stoffkreislauf von Papierfasern zwischen Primärfaserherstellung, Papierverwendung und Altpapieraufbereitung, modelliert mit einem Stoffstromnetz. Die Berechnung erfolgte dynamisch über mehrere Zeitperioden, wobei sich in diesem Fall ein quasistationärer Zustand einstellt. Das Ergebnis ist als Sankey-Diagramm dargestellt.

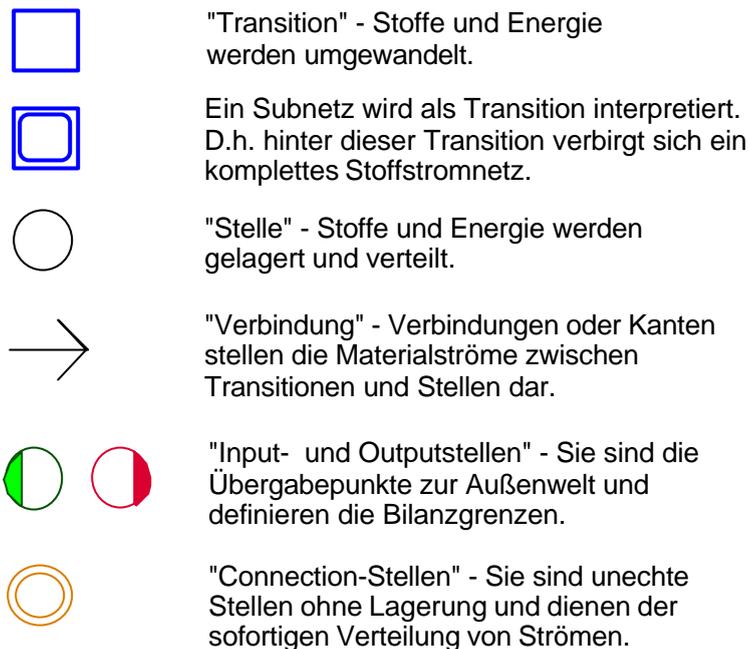


2.3 Verwendete Software

Die Stoffstromnetze auf der Basis des Petrinetzansatzes eignen sich damit grundsätzlich, solche Stoffstromsysteme nicht nur deskriptiv, sondern auch präskriptiv im Sinne einer (statischen oder dynamischen) Modellierung abzubilden. Die Software, die im vorliegenden Projekt eingesetzt wird, basiert genau auf dieser Methodik.

Die Software Umberto[®] ist eine Gemeinschaftsentwicklung des ifeu-Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und des ifu-Instituts für Umweltinformatik Hamburg. Es wurde für den Einsatz in Betrieben zur Ökobilanzierung von Produkten und Dienstleistungen sowie für die Stoffstromanalyse von betrieblichen Abläufen entwickelt (vgl. Schmidt, Häuslein 1997). Es ist seit 1995 am Markt verfügbar und wird ständig weiterentwickelt, in jüngster Zeit wurde es z.B. um eine Kostenrechnung erweitert (siehe Möller 2000). In Abb. 8 sind die verschiedenen Netzelemente und ihre Bedeutung aufgeführt, die in Umberto verwendet werden.

Abb. 8: Die Netzelemente eines Stoffstromnetzes unter Umberto.



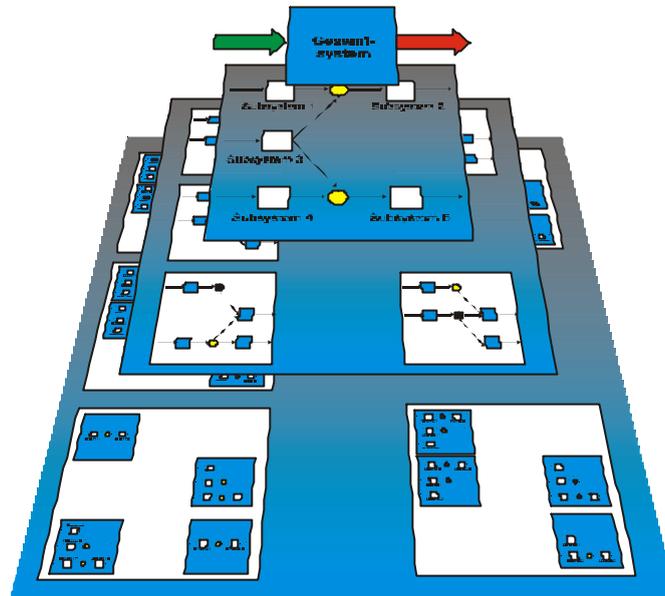
In Umberto[®] können die Transitionen sehr unterschiedliche Modelle der einzelnen Transformationsprozesse enthalten. Im einfachsten Fall handelt es sich um lineare und direkt proportionale Beziehungen zwischen den Input- und Outputströmen. Alle Input- und Outputströme eines Prozesses sind dann durch einen Satz an Koeffizienten beschrieben, die das zahlenmäßige Verhältnis der Ströme zueinander angeben. Dieses Modell reicht in den meisten Fällen bereits für die Erstellung von Ökobilanzen (Life Cycle Assessment) aus.

Im Produktionsbereich und auch bei vielen geogenen/natürlichen Prozessen wird es zudem erforderlich, nichtlineare Modelle zu bilden, d.h. die Systemgrößen sind miteinander in nichtlinearen, teilweise transzendenten Funktionen verknüpft (Schmidt, 1995). Umberto ermöglicht dies über einen eigenen Formeleditor, in dem die Input- und Outputströme eines Prozesses (Transition) zusammen mit Modellparameter in einfache explizite mathematische Beziehungen zueinander gesetzt werden können. Die Formelsprache, die hierzu eingesetzt wird, ist eine sogenannte Datenflusssprache. Jeder Prozess (Transition) eines Stoffstromnetzes kann auf diese Weise als ein eigenes Modell beschrieben werden. Hierbei ist es im Prinzip sogar möglich, in den Transitionen Zeitinformationen zu berücksichtigen und damit eine zeitabhängige Modellierung des Umwandlungsprozesses vorzunehmen.

Schließlich können ganze Stoffstromnetze als Transitionen interpretiert werden. D.h. ein Prozess wird auf einer höheren Ebene als Black Box angesehen, dahinter verbirgt sich aber ein Subnetz mit einer detaillierten und spezifizierten Netzstruktur (siehe Abb. 9). Dies ist eine Besonderheit des Petrinetzansatzes und wird durch seine Unterscheidung von Aktivitäten und Zuständen möglich. Man bezeichnet das als hierarchisch gegliederte Netze. Insbesondere für komplexe Netzstrukturen bieten sich solche hierarchische Gliederungen an. So kann z.B. das Stoffstromsystem der Bundesrepublik Deutschland als eine Black Box (Transition) aufgefasst werden,

dass sich aber im Detail als eine Verflechtung von räumlichen (z.B. Ländern) oder sächlichen (z.B. Wirtschaftsbereichen) Subsystemen zusammensetzt. Genau diese Hierarchisierung von Netzen soll für die Modellierung im vorliegenden Fall auch eingesetzt werden.

Abb. 9: Hierarchisierung eines Stoffstromnetzes mit verschiedenen Netzebenen. Die einzelnen Transitionen können auf einer tieferen Ebene wieder als ein detailliertes Netz interpretiert werden.



Die Flexibilität der Software Umberto, Transitionen ganz unterschiedlich zu definieren, wird von der softwaretechnischen Seite noch weiter unterstützt. Umberto ist eine Software, die auf gängigen PCs unter Microsoft Windows™ arbeitet. Für Microsoft Windows wurde in den letzten Jahren ein Schnittstellen-Konzept geschaffen, das es ermöglicht, unterschiedliche Software-Anwendungen miteinander zu verbinden. Dem einfachen PC-Anwender ist dies z.B. durch den Aufruf von Excel-Tabellen direkt aus einem Word-Dokument heraus bekannt. Die verschiedenen Software-Anwendungen werden dabei als Objekte interpretiert, die gezielt aufgerufen oder aktiviert werden können. Die Technik, die dabei zum Einsatz kommt, heißt COM bzw. DCOM (Distributed Common Object Model). Mit DCOM ist es sogar möglich, in einem Netzwerk via Internet auf Software-Anwendungen oder Objekte zuzugreifen, die auf einem entfernten PC liegen.

Umberto unterstützt diese COM-Technologie. Insbesondere ist es möglich, eine Transition auch diesbezüglich als ein gekapseltes Modell aufzufassen. Dieses Modell kann z.B. von einer anderen Software extern gelöst werden. Das Stoffstromnetz verbindet dann mittels der periodenbezogenen Stoffströme verschiedene Modelle, die ihre eigenen Lösungsmethoden und Algorithmen, ggf. sogar ihre eigene Software, verwenden. Dies wird insbesondere dann interessant, wenn die Modellierung von Subsystemen so komplex wird, dass eine Lösung innerhalb Umbertos nicht mehr sinnvoll erscheint. So bietet sich eine solche „Auslagerung“ der Modellierung etwa für dynamische Transportvorgänge (z. B. Grundwassermodellierung) an, für die eigene hochkomplizierte Software bereits existiert.

Schließlich soll noch erwähnt werden, dass alle Transitionen in einer Art Modellbibliothek abgelegt werden können. Sie können dann in einem anderen Zusammenhang, z.B. bei einem anderen Projekt oder einer anderen Aufgabenstellung, wieder verwendet werden. Durch diese Modularität entsteht ein Baukastensystem, mit dem bei der Modellierung komplexer Stoffstromsysteme auf bekannte Submodelle zurückgegriffen und der Aufwand begrenzt werden kann.

In Abb. 10 ist die Benutzeroberfläche von Umberto exemplarisch dargestellt. Es können verschiedene Fenster geöffnet werden. In diesem Beispiel sind 4 Fenster geöffnet:

Materialfenster (oben links):

Hier werden die Stammdaten aller Materialien und Energien zentral verwaltet, die in dem jeweiligen Projekt auftreten. Den Materialien können diverse Maßeinheiten, physikalische oder ökologische Eigenschaften (z.B. Grenzwerte etc.) zugeordnet werden.

Netzeditor (unten links):

Dies ist das Hauptfenster unter Umberto. Hier definiert der Anwender die Netzstruktur graphisch mit Hilfe der Maus. Hinter jedem Netzelement verbergen sich die entsprechenden Definitionen, die durch Anwählen und Doppelklick eingesehen bzw. verändert werden können. Die Ergebnisse können durch Sankey-Diagramme angezeigt werden, d.h. durch mengenproportionale Pfeildicken. Außerdem können die Werte jedes Netzelements eingesehen werden.

Transitionsdefinition (oben rechts):

Die einzelnen Transitionen werden durch eine Input- und Outputliste diverser Materialien und durch die mathematische Beziehung dieser In- und Outputs zueinander dargestellt. Letzteres ist hier mit dem Formeleditor dargestellt.

Bilanzergebnisse (unten rechts):

Die Ergebnisse werden in sogenannten Balance Sheets zusammengefasst. Dabei wird eine Bilanz der In- und Outputflüsse und der Bestandsveränderungen erstellt, die sich entweder auf das Gesamtsystem (durch die Input- und Outputstellen festgelegt) oder auf Teilnetze, die manuell mit der Maus umrandet wurden, beziehen. In diesem Fall sind die Bestandsveränderungen dargestellt.

The screenshot displays the Umberto 3.5 software interface, which is used for process simulation and material flow analysis. The interface is divided into several main sections:

- Top Panel:** Contains the project name "Konstanter Papierstrom", the scenario "Papierrecycling", and the period "01.01.04 - 31.12.04". It also includes a menu bar with options like "File", "Edit", "View", "Draw", "Attributes", "Calculation", "Balance", "Valuation", "Tools", "Options", "Windows", and "Help".
- Materials Panel (Left):** Lists materials such as Holz, Primärfaser, and Wasser, along with their units (kg) and flow units (F.Unit).
- Network Diagram (Center):** A process flow diagram titled "Network Konstanter Papierstrom". It shows various processes (T1: Primärfaser-Herstellung, T2: Herstellung Zeitungsdrukpapier, T3: Zeitungsdruck, T4: Altpapere sammelnd, T5: A auf) and material flows. A red circle labeled "P9: Abfälle" is also visible.
- Balance Sheet Preview (Right):** A table showing "Stock Increase (Internal Input)" and "Stock Decrease (Internal Output)".

Item	Quantity	Unit
▲ Sekundärfaser aus 3. G	0.07	kg
▲ Sekundärfaser aus 1. Ge	1.20	kg
▲ Sekundärfaser aus 2. Ge	0.02	kg
▲ Sekundärfaser aus 4. Ge	0.03	kg
Sum	0.07	kg

Item	Begin	End	Unit
▲ Sekundärfaser aus 1. Gen.	252.49	253.69	kg
▲ Sekundärfaser aus 2. Gen.	100.98	101.00	kg
▲ Sekundärfaser aus 3. Gen.	30.37	30.29	kg
▲ Sekundärfaser aus 4. Gen.	10.10	10.12	kg
Sum	393.93	395.10	kg
- Bottom Panel:** Shows the "Transition Specification Functions T5 - Default" with mathematical formulas for Y01 through Y05, and a "Balance Sheet Preview" section with tabs for "Input/Output", "Stocks", "LCIs", "Selected Elements", "Parameters", and "Information".

Abb. 10: Die Benutzeroberfläche von Umberto. Erläuterungen siehe Text.

3.2 Systembeschreibung

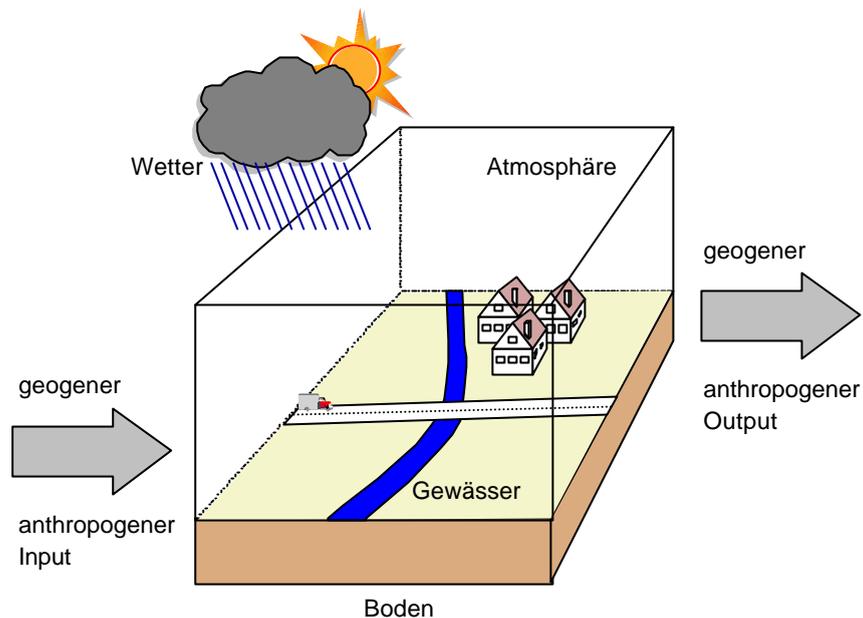
3.2.1 Systemeigenschaften

Ein geografisch definierter Raum kann mit einem natürlichen Organismus verglichen werden (Odum 1991). Beide verfügen über einen Stoffwechsel (Metabolismus), der die Gesamtheit aller aufbauenden, abbauenden und der Erhaltung der eigenen Substanz dienenden Prozesse umfasst. Das Funktionieren des Metabolismus setzt einen ständigen Energieinput voraus. Ayres (1993) entwickelte aufbauend auf dieser Analogie das Konzept vom industriellen Metabolismus. Er vergleicht darin die Aufnahme von Nährstoffen zum Aufbau und Erhalt belebter Biomasse mit der Entnahme und Verarbeitung von Rohstoffen durch die Industrie. Die Endprodukte der Industrie werden ähnlich wie die Stoffwechselprodukte bei einem natürlichen Organismus wieder an die Natur abgegeben. Der Kreislauf schließt sich sobald Abfälle durch natürliche Prozesse oder Recycling wieder in Rohstoffe umgewandelt worden sind.

Ein wesentlicher Unterschied beim industriellen Metabolismus gegenüber dem natürlichen System besteht darin, dass sich der Stoffaustausch mit der Natur nicht innerhalb geschlossener Kreisläufe bewegt. Der Entnahme großer Mengen von Rohstoffen steht ein ungenügendes Recycling gegenüber. Auf globaler Ebene stellt der Bio-Geo-Chemische Metabolismus ein geschlossenes System dar, dessen Bestände im Mittel gleich bleiben (z.B. CO₂-Konzentration in der Atmosphäre). Die anthropogene Nutzung der Ressourcen bringt das natürliche System aus dem Gleichgewicht. Eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen kann daher nur durch die Wiederherstellung dieses Gleichgewichtes bzw. ein Schließen dieser Kreisläufe erreicht werden (Ayres, 1993).

Hier wird das Thema der sogenannten Lokalen Agenda 21 berührt (Stadt Heidelberg, 1997): Ziel der Agenda 21 ist die nachhaltige Entwicklung auf regionaler Ebene. Betrachtet man die Gesamtheit aller globalen Wirtschaftsvorgänge als den industriellen Metabolismus, dann können Regionen ähnlich den Zellen eines Organismus als die kleinsten Einheiten gesehen werden. Jede dieser Einheiten „kommuniziert“ mit der anthropogenen und der natürlichen Umgebung über Energie- und Stoffaustausch. Die Zusammensetzung und Intensität dieser Vorgänge ist in jeder Region individuell verschieden. Zum Beispiel sind Regionen, deren wirtschaftlicher Schwerpunkt im industriellen Bereich liegt, gegenüber Dienstleistungsregionen tendenziell durch höhere Rohstoffflüsse geprägt. Eine Bilanzierung der In- und Outputs des Systems und der Bestände ermöglicht den Überblick darüber, welches die bedeutendsten Stoffflüsse durch eine Region sind, welche Bestände existieren und wo die Schließung von Stoffkreisläufen ermöglicht werden könnte. Im Fall der Stadt Wien (Daxbeck et al. 1996) konnten die Güterbilanzen zu Aussagen über das Maß der Abhängigkeit dieses urbanen Raumes von seiner Umgebung sowohl im Bereich der Versorgung als auch für die Entsorgung bestimmt werden. Aus den Ergebnissen solcher Untersuchungen können Strategien für die nachhaltige Nutzung von Materialien und Rohstoffen für die untersuchte Region entwickelt werden.

Abb. 12: Offenes System einer Stadt oder Region mit geogenem und anthropogenem Stoffwechsel. Nach Baccini u. Bader (1996).



Die Beschreibung eines offenen Systems erfordert vorab die Festlegung des Untersuchungsrahmens. Auf der räumlichen, zeitlichen und der sächlichen Ebene müssen die Grenzen der Betrachtung festgelegt werden. Dazu wählt man aus der Fülle der komplexen Stoffströme und Verflechtungen mit Hilfe der eingangs formulierten Zielsetzung die wichtigen Güter und die dazugehörigen Prozesse aus. Es muss also vorab eine Reduzierung auf die wesentlichen Betrachtungspunkte vorgenommen werden. Dabei könnten bekannte Umweltprobleme einer Region den Ansatz für die Bilanzierung von z.B. einem bestimmten Gut oder Stoff bilden, der für die Probleme relevant ist. Eine gesamthafte Betrachtung aller in einer Region verursachten Stoffflüsse wäre theoretisch denkbar und wurde ansatzweise für Wien (Daxbeck et al. 1996) und die Privaten Haushalte der Stadt St. Gallen (BACCINI et al., 1995) umgesetzt. Es muss jedoch betont werden, dass solche Untersuchungen sehr aufwendig sind. Sinnvoll erscheint eher die Beschränkung auf einzelne relevante Güter, über deren Umsatz Informationsbedarf besteht.

Bei der Stoffstromanalyse insgesamt handelt es sich um eine iterative Methode. Die erste Systemdefinition wird bei Bedarf später modifiziert. Zum Beispiel kann sich im Laufe der Untersuchung herausstellen, dass aufgrund fehlender Daten bestimmte Bereiche aus dem System ausgeklammert werden müssen oder auch, dass die Relevanz bestimmter Prozesse überschätzt wurde und diese daher für das Systemverständnis vernachlässigbar sind. Dies orientiert sich am iterativen Vorgehen der Ökobilanzierung, das auch von der ISO-Norm 14.040 vorgeschlagen wird.

3.2.2 Räumliche Ebene

Der Bilanzraum Heidelberg erstreckt sich über das gesamte Stadtgebiet, das durch die Gemarkungsgrenzen definiert ist. Diese Grenzen stellten gleichzeitig auch die Systemgrenzen für die Bilanz dar. Eine Kommune wurde deshalb ausgewählt, weil

hier einerseits Informationsbedarf besteht und andererseits entsprechende Daten (Trinkwassergewinnung, Abwasserproduktion und im Bereich Papier: Mengeströme in die Entsorgung) in diesem Bereich (Verwaltungseinheit) existieren. Was den geogenen Stofffluss betrifft, gestaltet sich die Datenakquisition schwieriger. Eine Kommune umfasst in der Regel kein geogen einheitlich geprägtes Gebiet. Z.B. bereitet die Zuordnung einer Grundwassermenge zu einem Stadtgebiet Probleme, weil Grundwasservorkommen nicht mit den politischen Grenzen übereinstimmen. Weitere Probleme werden dadurch erwartet, dass eine Kommune nicht wie ein Betrieb die Güterinputs und –outputs an ihrer Grenze erfasst. Für Wirtschaftsgüter wurde daher die Datengenerierung aufgrund von Modellannahmen und allgemeinen Erfahrungswerten (durchschnittl. branchenspezif. Verbrauchswerte o.ä.) in Betracht gezogen.

Es wurde mehrfach gefordert, den Problemen der regionalen Datenerfassung mit einer speziellen Stoffbuchhaltung zu begegnen (Baccini et al., 1993; Daxbeck et al., 1996). Inwieweit diese Idee realisierbar erscheint, ist Gegenstand der Diskussion.

3.2.3 Zeitliche Ebene

Die Modellierung bezieht sich auf ein Jahr als Bilanzierungszeitperiode. Da sich im Fall der Wasserbilanz die meisten verfügbaren Daten auf das Jahr 1995 beziehen, wurde dieses als Erhebungsjahr ausgewählt. Solche Daten, die nicht für 1995 zur Verfügung standen, wurden durch den nächstverfügbaren Datensatz ersetzt. Für die Generierung der Papierflüsse in Heidelberg wurde Bezug auf die bundesweite Material- und Energieflussrechnung genommen, die aus dem Jahr 1990 stammt. Die Daten zu den Beschäftigtenzahlen der einzelnen Wirtschaftsabteilungen im Kreis Heidelberg, die zur Berechnung der Papierflüsse notwendig sind, standen für den Kreis Heidelberg für 1995 zur Verfügung.

Daten vom Wasserverbrauch und Altpapieranfall werden im Jahresturnus erhoben. Daher ist es sinnvoll eine Jahresbilanz zu erstellen. In der Modellierung mit dem Tool Umberto® ist es zudem möglich (siehe Kap. 2.3), mittels Periodenrechnung ein dynamisches Modell zu schaffen.

3.2.4 Sachebene

Regionale Stoffhaushalte sind hochkomplexe Systeme, deren Beschreibung in einem Modell zunächst die Eingrenzung des Bilanzraumes erfordert. Bei Beginn der Untersuchung muss daher geklärt werden, welche Prozesse, Stoffflüsse und –lager von Bedeutung für das Systemverständnis sind und Antworten auf die Leitfragen geben können. Das Modell bildet letztendlich die vereinfachte Sicht des Gesamtsystems ab, in dem nicht alle Details enthalten sein können und müssen. Dies gilt zum Beispiel im geogenen Bereich für die kleineren Oberflächengewässer im Heidelberger Stadtgebiet. Der Neckar dominiert mit seiner Abflussmenge den Oberflächenabfluss. Die anderen Flüsse und Bäche weisen insgesamt einen um Faktor 4 kleineren Abfluss auf, so dass diese nicht im einzelnen berücksichtigt wurden.

Für den anthropogenen Bereich, in dem die Wasserflüsse sämtlich geringer sind als im geogenen sollten jedoch bedeutende Akteure bis hin zu einzelnen Betrieben identifiziert werden.

3.2.5 Auswahl der Prozesse mit In- und Outputgütern

3.2.5.1 Wasserhaushalt

In der Systemanalyse wurden sieben für den Wasserhaushalt relevante Kompartimente identifiziert (Abb. 13). Zwischen den natürlichen Komponenten, dem dreigeteilten Grundwasserleiter, den Oberflächengewässern und dem Boden bestehen Interaktionen. Über die Gewässersohle des Neckars wird Wasser mit dem oberen Grundwasserleiter ausgetauscht. Die Oberflächengewässer und der Boden stehen über verdunstendes Wasser mit der Atmosphäre in Kontakt. Die Quantifizierung des zum Stadtgebiet zugehörigen Wasserdampfes in der Atmosphäre in die dortigen Umsatzraten können, wenn überhaupt, nur geschätzt werden. Aus diesem Grund wurde die Atmosphäre aus dem betrachteten System ausgeklammert.

Anthropogene Eingriffe in alle geogenen Kompartimente des Wasserkreislaufs verdeutlichen, wie eng die beiden Bereiche verzahnt sind: Die Trinkwasserversorgung wird mit der Grundwasser- und Quellwasserentnahme gedeckt. Ein kleiner Teil gelangt in den Boden, zum Beispiel als Beregnungswasser aus der Landwirtschaft. Die geklärten Abwässer aus der Abwasserreinigung gelangen in das Oberflächengewässer Neckar.

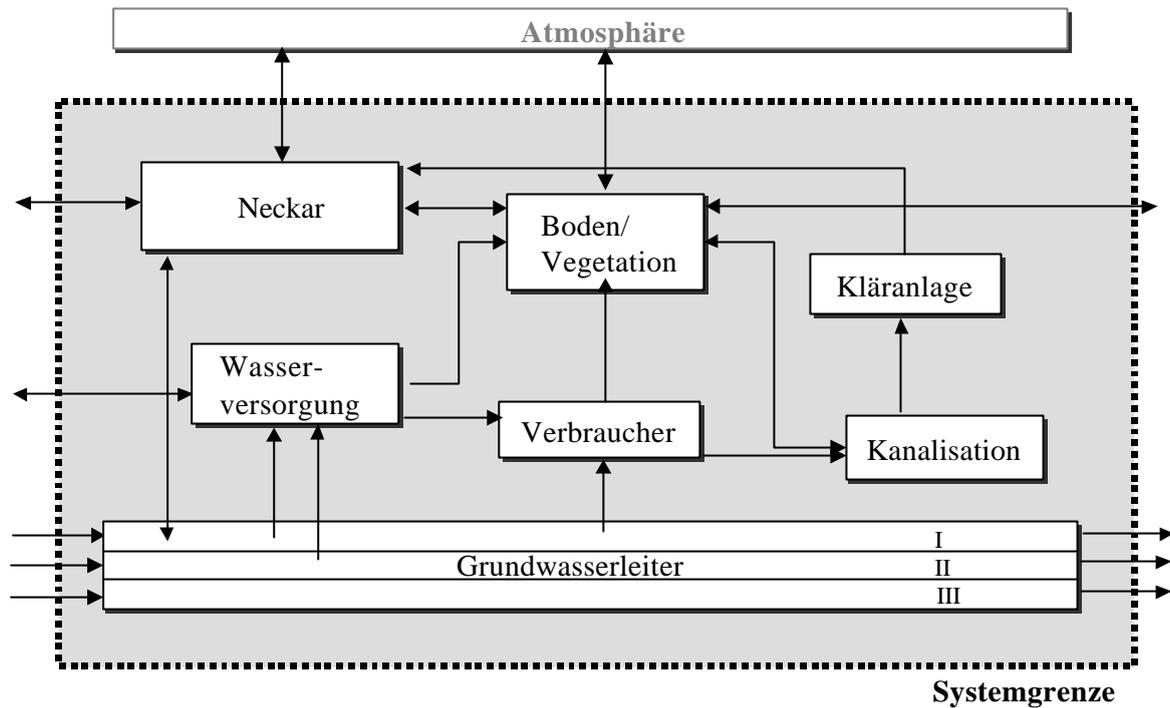
Der geogene Bereich des Wasserhaushaltes verfügt über mehrere Reservoirs. Der mengenmäßig dominante Grundwasserspeicher stellt auch im anthropogenen Bereich die wichtigste Komponente dar. Die Wasserversorgung wird überwiegend hieraus gedeckt. Die Bodenmatrix beinhaltet ebenfalls einen großen Wasservorrat, der jedoch nicht nutzbar ist. Der Bodenwasservorrat bleibt über ein hydrologisches Jahr hinweg gesehen unverändert, obwohl während des Jahresganges erhebliche Schwankungen auftreten.

Im anthropogenen Teil des Wasserhaushaltes findet ein gerichteter Strom des Wassers statt. Der Grundwasserförderung schließt sich der Konsum an. Danach erfolgt die Wasserreinigung und anschließende Einleitung in den Neckar:

Wasserversorgung → Verbraucher → Kanalisation → Kläranlagen

In der Anthroposphäre gibt es keine bedeutenden Wasserlager. Wasser weist hier hohe Umsatzraten auf und die Anthroposphäre wirkt wie ein Durchflussreaktor. Eine geringe Menge Trinkwasser wird üblicherweise zum Ausgleich von tagesbedingten Schwankungen und für die Aufrechterhaltung des Leitungsdrucks in Tanks gesammelt. Eine längerfristige Lagerung findet nicht statt.

Abb. 13: Systemanalyse „Wasserhaushalt Heidelberg“ mit relevanten Prozessen und Wasserflüssen.



Insgesamt wurden sieben Prozesse in das Modell des Heidelberger Wasserhaushaltes aufgenommen (Tab. 3).

Der Prozess *Oberflächengewässer* umfasst den Neckar und kleinere Fließgewässer. Das Bilanzgebiet wird vom Neckar durchflossen, so dass ein oberirdischer Zu- bzw. Abfluss existiert. Der Eintrag des anthropogenen Abwassers in den Neckar ist ebenfalls Bestandteil dieses Prozesses, macht jedoch nur einen Bruchteil vom Gesamtabfluss aus. Der Austausch zwischen oberem Grundwasserleiter und Neckar findet in beide Richtungen statt. Es existiert sowohl die Infiltration von Grundwasser als auch die Exfiltration von Neckarwasser aus dem Flussbett in den Grundwasserleiter. Der Neckarabfluss vergrößert sich in geringerem Maße durch den Zufluß von kleineren Oberflächengewässern.

Der *Boden* stellt eine bedeutende Komponente im Wasserhaushalt einer Region dar. Die Bestimmung dieses Reservoirs kann, wie in der hydrologischen Praxis üblich, mittels aufwendiger Bodenfeuchtemessungen bestimmt werden. Im Laufe eines Jahres kann der Bodenwasserhaushalt als ausgeglichen betrachtet werden, obwohl jahreszeitlich starke Schwankungen auftreten. Das Kompartiment Boden stellt im Wasserhaushaltsmodell eine Art Durchflussreaktor dar. Neugebildetes Grundwasser entsteht durch Bodensickerwasser aus Niederschlägen und hängt in starkem Maße von der jährlichen Niederschlagsmenge ab. Es wird angenommen, dass im Schnitt ca. 70 % der Niederschläge über ein Jahr verdunsten und die restlichen 30 % als neugebildetes Grundwasser den oberen Grundwasserleiter speisen. Für den jährlichen Niederschlagsdurchschnitt in mm, der für das Stadtgebiet

ermittelt wurde, verwendet. Die Transition umfasst neben dem Boden auch die Vegetation. An dieser Stelle wird durch die pflanzliche Transpiration ein großer Anteil Wasser aus dem Boden aufgenommen, verdunstet und verlässt als Output das System via Atmosphäre. Hinter dem gesamten Output „Verdunstung“ steht also sowohl die passive Verdunstung (Evaporation) als auch die Transpiration durch Pflanzen (Transpiration). Ein geringer Teil des Wassers wird mit dem Export landwirtschaftlich produzierter Biomasse aus dem Stadtgebiet exportiert. Diese Menge wurde jedoch nicht bestimmt. Aus dem anthropogenen Kreislauf gelangt Beregnungswasser aus der Landwirtschaft in den Prozess Boden.

Der *Grundwasserleiter* beinhaltet den größten Wasservorrat im Stadtgebiet. Dieses Reservoir hat auch anthropogen eine sehr große Bedeutung, denn die städtische Trinkwasserversorgung wird zu 90% aus Grundwasser gedeckt. Gespeist wird dieses Reservoir durch Sickerwasser aus den aufliegenden Bodenschichten und der Infiltration von Neckarwasser. Outputseitig findet ein unterirdischer Abfluss in westliche Richtung statt. Je nach Wasserführung des Neckars gelangt unterschiedlich viel Flusswasser in das obere Aquifer. Dies gilt aber nur für den Bereich der Rheinebene. Im Festgesteinbereich des Odenwaldes findet eine Infiltration von Grundwasser in den Neckar statt. Da die ökologische Belastbarkeit eines Wasserreservoirs von seiner Erneuerungsrate abhängt wurde dieser Faktor in der Bilanz mitbetrachtet. Ein weiteres wichtiges Output stellt die anthropogene Wasserentnahme dar, die die veränderliche Größe bei der Modellierung der Transition ‚Grundwasserleiter‘ ausmachte.

Die *Wassergewinnung* stellt neben der Abwassereinleitung eine weitere Schnittstelle zwischen natürlichem und anthropogenem Wasserkreislauf dar, in die Wasser als Grund- oder Quellwasser und importiertes Trinkwasser aus benachbarten Regionen als Input eingeht. Der Eigenverbrauch der Wasserwerke, das Reinigungswasser für Wasserspeicher- und Aufbereitungsanlagen, verlässt den Prozess als Output ebenso wie die Trink- und Brauchwasserabgabe an die Verbraucher, der Trinkwasserexport an benachbarte Gemeinden (Eppelheim, Dossenheim) und die Leitungsverluste. Letztere setzen sich aus durch Zählerungenauigkeiten bedingten, rechnerischen Netzverlusten und realen Verlusten aufgrund von undichten Leitungen zusammen, wobei man annimmt, dass beide Komponenten daran zu je 50 % beteiligt sind (Lehn et al., 1996: 53).

Innerhalb der Gruppe *Verbraucher* befinden sich die verschiedenen Branchen. Trink- und Brauchwasser werden genutzt und als Abwasser in die Kanalisation geleitet bzw. zu einem geringen Teil als Verdunstungswasser in die Atmosphäre abgegeben. Die Wassermenge, die in der Landwirtschaft zur Bewässerung von Ackerflächen genutzt wird, wird je nach Intensität, Bewuchs und Temperatur zu einem großen Teil verdunstet, von den Pflanzen aufgenommen oder als Sickerwasser, da nicht alles Wasser von den Pflanzen aufgenommen wird.

In der *Kanalisation* sammelt sich das Rohabwasser aus den verschiedenen Bereichen. Anthropogenes Abwasser und Fremdwasser, das sich aus eindringendem Bodenwasser und kleineren Fließgewässern, die in die Kanalisation eingeleitet werden, zusammensetzt, gelangt auf diesem Wege in die Kläranlage. Die Niederschläge, die über versiegelte Flächen in Siedlungsgebieten in die Kanalisation ge-

langen, stellen zusätzlich einen großen Input dar. Sämtliches Kanalisationswasser gelangt in die Kläranlage.

Tab. 3: Prozesse und Güter im System des städtischen Wasserhaushaltes

Inputgüter	Prozesse	Outputgüter
<ul style="list-style-type: none"> • Oberird. Zufluss (Neckar) • Exfiltration aus GW • Gereinigtes Abwasser 	Oberflächen- gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Oberirdischer Abfluss • Infiltration in GW
<ul style="list-style-type: none"> • Niederschläge • Landwirtschaft (Bewässerung) • Leitungsverluste 	Boden und Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> • Evapotranspiration • Boden-Sickerwasser (GW- Neubildung) • Wasser in Pflanzenbiomasse • Export von Wasser in Pflanzenbiomasse aus Region
<ul style="list-style-type: none"> • Unterirdischer Zufluss • Sickerwasser aus Boden • Infiltration aus OB-Wasser 	Grundwasserleiter	<ul style="list-style-type: none"> • Unterirdischer Abfluss • Grundwasserentnahme/Quell wasser • Exfiltration in OB-Wasser
<ul style="list-style-type: none"> • Trinkwasserimport • Quellwasserförderung • Grundwasserförderung 	Wasserversorgung (öffentl. und privat)	<ul style="list-style-type: none"> • Trinkwasserexport • Trinkwasser • Brauchwasser • Abwasser (aus Eigenverbrauch SWH) • Leitungsverluste
<ul style="list-style-type: none"> • Brauchwasser • Trinkwasser 	Verbraucher	<ul style="list-style-type: none"> • Verdunstung • Abwasser • Aufnahme durch Pflanzen • Sickerwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Fremdwasser • Abwasser • Import Abwasser (n.quant.) • Niederschläge • Oberflächenwasser • Abwasser (Eigenverbrauch Wasserwerke) 	Kanalisation	<ul style="list-style-type: none"> • Rohabwasser
<ul style="list-style-type: none"> • Rohabwasser 	Kläranlage	<ul style="list-style-type: none"> • Klärschlamm (Export) • Geklärtetes Abwasser

Die Kläranlage nimmt das Rohabwasser auf und führt das gereinigte Wasser an den Neckar ab. Ein geringer Prozentsatz verlässt das Klärwerk im Klärschlamm. (In der Wiener Studie zu den anthropogenen Stoffhaushalt betrug der Anteil Wasser, der den Prozess Abwasserreinigung über den Klärschlamm verließ etwa 0,5 ‰ vom ankommenden Rohabwasser.)

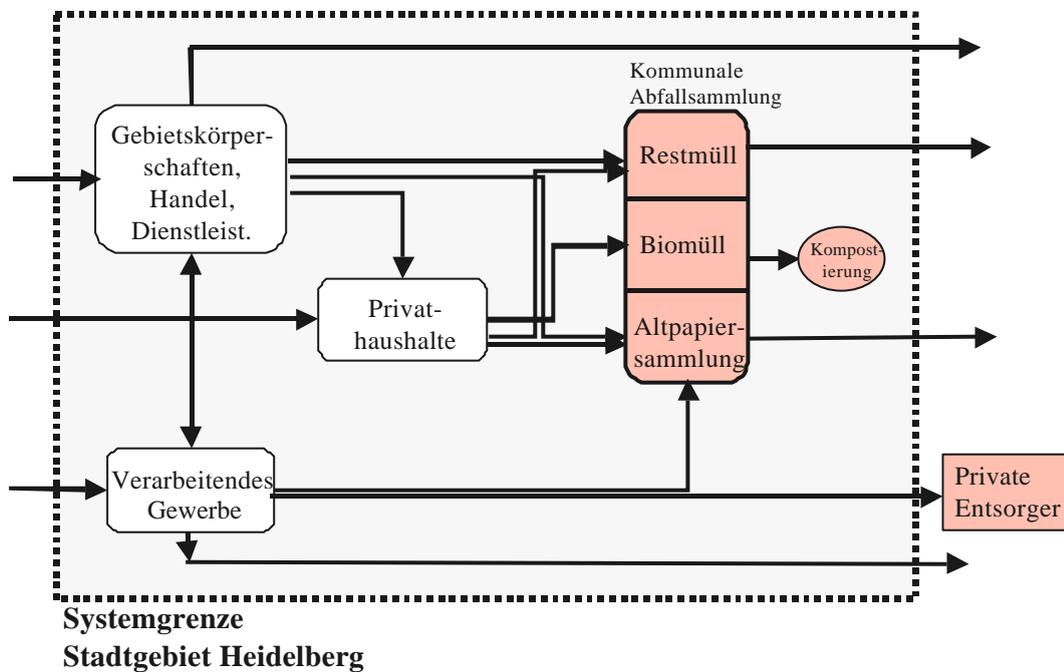
3.2.5.2 Papierhaushalt

Papier wird in Heidelberg nicht produziert. Wirtschaftlich vertreten sind aber die papierverarbeitende Industrie, Druckereien und Verlage. Dies wird sich auf die Statistiken und auf die „Papierbilanz“ auswirken. Ein Import von Papier und Pappe findet darüber hinaus in sämtliche anderen Wirtschaftsbereiche statt, entweder als Verpackungsmaterial für Produktionsmittel oder Waren oder als Rohstoff, der für

die Verpackung der selbst hergestellten Güter benutzt wird. Über den Einzelhandel gelangen große Mengen Papier als Zeitungen, Zeitschriften, Bücher und Schreibpapier in die Privathaushalte. Dort findet der Konsum, die Entsorgung des Papiers die Lagerung von Papiergütern statt.

Die Entsorgung von Altpapier läuft in Heidelberg über verschiedene Wege. Es gibt für die Privathaushalte und die kleinere Gewerbebetriebe abhängig vom Stadtteil öffentliche Papiercontainer oder das Altpapier wird gebündelt von der städtischen Müllabfuhr eingesammelt. Ein kleiner Anteil des Altpapiers gelangt in den Rest- oder Biomüll. Für die Gewerbebetriebe besteht darüber hinaus die Möglichkeit, ihr Altpapier selbst beim Recyclinghof abzuliefern, oder die Dienste eines privaten Entsorgers in Anspruch zu nehmen. Zusätzlich zu diesen Outputs gibt es noch die Menge der Güter aus Papier oder verpackt in Papier und Pappe, die die Kommune wieder verlassen (Abb. 14).

Abb. 14: Schema der Papierflüsse in Heidelberg



4 Modellierung

4.1 Wasserhaushalt

4.1.1 Datenquellen

Das Umweltamt der Stadt lieferte Daten zur Eigenwasserförderung für die Verbrauchergruppen Privathaushalte, Gewerbe/Industrie, öffentliche Einrichtungen und für den Bereich Landwirtschaft. Außerdem wurden Angaben zu den Wasserarten (Grundwasser/Quellwasser) des privat geförderten Wasser, zum Oberflächenwasserabfluss im Heidelberger Stadtgebiet und der Fremdwassermenge in der Kanalisation bereitgestellt.

Von den Stadtwerken AG Heidelberg stammen die Angaben zur Trinkwassergewinnung aus öffentlichen Brunnen und Quellen und dem Wasserbezug der Kommune von außerhalb. Leider konnten – entgegen ursprünglichen Zusagen – innerhalb der Gruppe Verbraucher keine Datenaggregate von einzelnen Branchen oder Gewerbebereichen geliefert werden. Die Umstellung des EDV-Systems der Stadtwerke AG auf die Software SRP R/3 hatte zur Folge, dass der Branchenbezug in der Kundendatei verloren ging.

Über die Verschneidung einer Gewerbedatei mit dem Heidelberger Wasserkataster sollten die gewerblichen Wasserverbräuche branchengenau ermittelt werden. Leider scheiterte dieser Ansatz. Es konnte nur bei 15 % der Gewerbeeinträge der genaue Wasserverbrauch zugeordnet werden, da für die meisten Adressen im Wasserkataster mehrere Gewerbeeinträge angegeben waren. Eine statistische Erfassung des Wasserverbrauchs im gewerblichen Bereich gibt es erst für Betriebe ab einem jährlichen Wasseraufkommen von 10.000 m³. Zusätzlich gilt für die Veröffentlichung von betrieblichen Daten, die sich auf weniger als 3 Betriebe beziehen, laut § 14 des Landesstatistikgesetzes Baden-Württemberg eine Geheimhaltungspflicht für das Statistische Landesamt. Es konnte im Fall von Heidelberg die vorliegenden Wasserverbrauchsangaben nicht branchengenau, sondern nur aggregiert bereitstellen. Die vorhandenen Verbrauchsdaten liegen daher nur für folgende Gruppen vor:

- Haushalte (einschließlich Kleingewerbe)
- Gewerbe/Industrie
- Handel
- Banken/Versicherungen
- Verkehr
- Sonstige (Sonder- u. Großabnehmer)
- US-Stationierungskräfte
- Öffentl. Einrichtungen
- Stadt Heidelberg
- Betriebsverbrauch der Stadtwerke AG

- Trinkwasser für Eppelheim und Dossenheim

Auf eine Generierung von branchengenauen Verbrauch analog zum Vorgehen im Modell des Papierhaushaltes (s. Kap. 4.2) wurde verzichtet. Da nur für 5 aggregierte Wirtschaftsbereiche in Heidelberg die Beschäftigtenzahlen vorlagen, hätte eine Datengenerierung zusätzlich zu den oben genannten Angaben keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn gebracht.

4.1.2 Modellbeschreibung

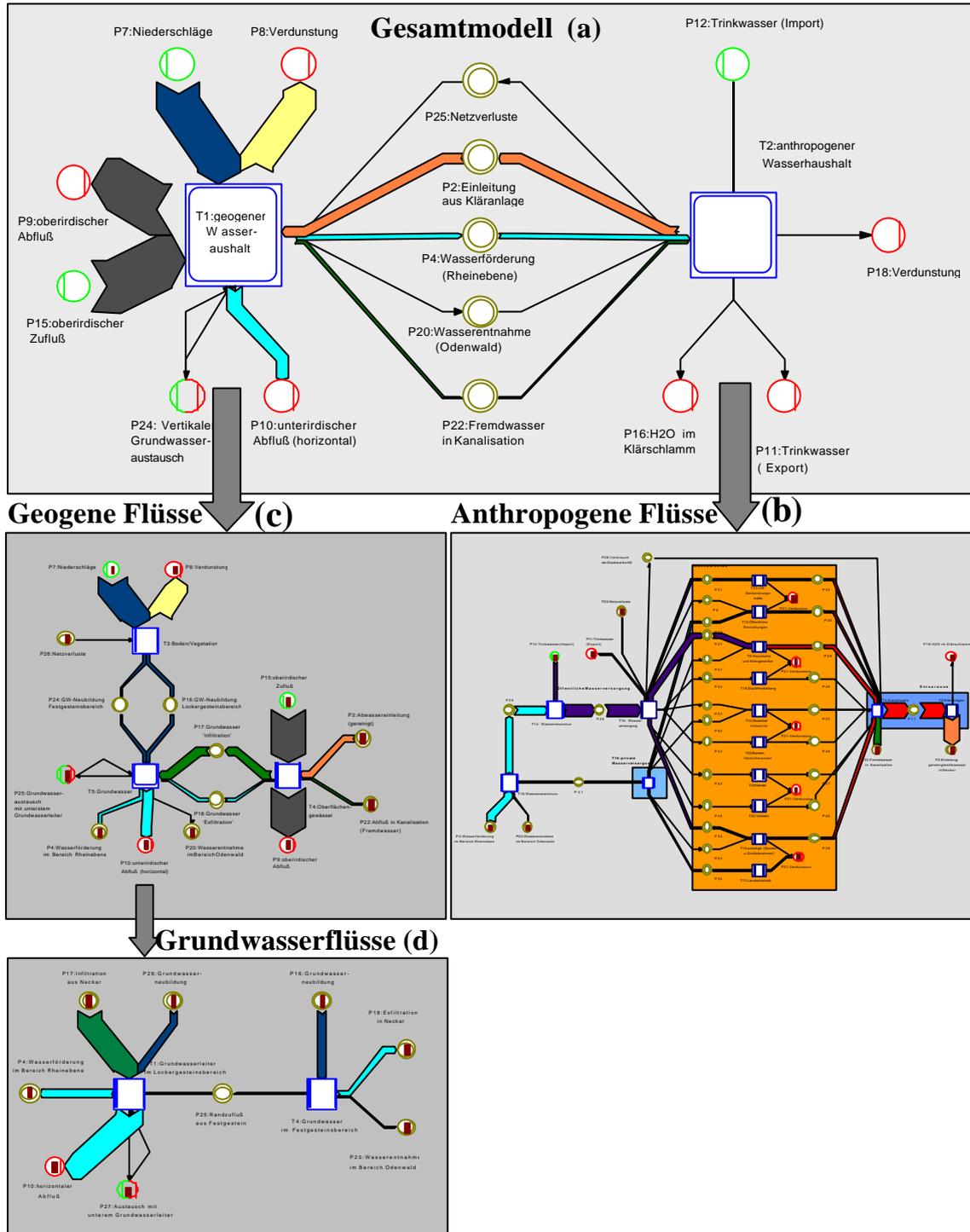
Das Modell umfasst drei Gliederungsebenen. Auf der oberen Ebene liegen der geogene und der anthropogene Bereich des Wasserhaushaltes (Abb. 15, A). Der Eintrag von Niederschlägen oder Oberflächenzufluss im natürlichen Bereich und von Trinkwasser im anthropogenen Bereich stellen die Inputs dar. Der oberirdische Abfluss oder die Verdunstung sind Outputs aus dem Stadtgebiet Heidelberg. Ein Austausch von Wasser zwischen dem geogenen und anthropogenen Prozessen findet in Form der Grundwasserförderung oder als Einleitung des gereinigten Abwassers in den Vorfluter statt.

Eine detaillierte Darstellung der Wasserverteilungs- und Nutzungsvorgänge im anthropogenen Wasserkreislauf liefert die zweite Gliederungsebene (Abb. 15, B). Dem geogenen Kreislauf entnommenes Wasser wird im Prozess Wassergewinnung auf die Bereiche öffentliche und private Wasserversorgung verteilt. Bei der öffentlichen Wasserversorgung (Stadtwerke) kommt importiertes Trinkwasser hinzu. Die Verteilung an die Konsumentengruppen zum endgültigen Gebrauch des Wassers folgt im nächsten Abschnitt. Ein geringer Teil des Wassers gelangt bei Gebrauch durch Verdunstung in die Atmosphäre, die größere Menge gelangt in das Kanalnetz. In die Kanalisation gelangt ebenfalls Oberflächenwasser aus kleineren Fließgewässern, was hier als Fremdwasser ausgewiesen ist. Aus dem Prozess Kläranlage wird das gereinigte Abwasser schließlich in den Vorfluter Neckar geleitet und verlässt den anthropogenen Kreislauf wieder.

Der geogene Wasserhaushalt gliedert sich in zwei weitere Ebenen. Auf der einen sind die drei Prozesse Boden/Vegetation, Oberflächenwasser und Grundwasser dargestellt (Abb. 15, c). Die Grundwasserneubildung findet über das Kompartiment Boden statt, der Bereich Oberflächengewässer steht ebenfalls mit dem Grundwasser in Kontakt. Der Bereich Grundwasser wurde in der nächsttieferliegenden Ebene noch einmal detaillierter modelliert (Abb. 15, d): Das Stadtgebiet Heidelberg umfasst zwei hydrogeologisch unterschiedliche Bereiche. Daher wurde die Modellierung des Grundwassers in zwei Prozesse untergliedert: die Rheinebene und den Bereich Odenwald. Verbunden sind diese über den horizontalen Grundwasserfluss vom Fest- zum Lockergesteinsbereich. Unterschiede zwischen den Prozessen ergeben sich einmal durch den Austausch mit dem Neckar, der im Bereich Rheinebene wesentlich zur Grundwasserneubildung beiträgt und im Festgesteinsbereich durch Grundwasser angereichert wird. Der Lockergesteinsbereich weist eine vertikale Gliederung in Stockwerke auf. Im Grundwassermodell der TGU wurden die Grundwasserleiter betrachtet, aus denen Grundwasser aus Brunnen gefördert wird. Der tiefste Grundwasserleiter ist von anthropogenen Eingriffen bislang ausgeschlossen und liegt daher außerhalb des hier betrachteten Systems. Je nach

Entnahmesituation findet ein vertikaler Wasserin- bzw. -output aus dem Prozess „Grundwasserleiter im Lockergesteinsbereich“ statt.

Abb. 15: Gesamtmodell Wasserhaushalt der Stadt Heidelberg als hierarchisches Stoffstromnetz



4.1.2.1 Grundwassermodell

Obwohl das Grundwasser von Heidelberg aus drei Grundwasserleitern besteht und daher eine Modellierung als Subnetz möglich wäre, wird dieser Abschnitt des Netzes nicht weiter unterteilt. Für die drei Szenarien, die durch das Ingenieurbüro TGU bestimmt worden sind, und bei denen die Entnahmen entweder nur aus einem Grundwasserleiter oder aus allen Schichten verändert wurden, ergeben sich keine linearen Austauschraten zwischen den drei Schichten. In der einfachen Parametrisierung konnten die komplexen Zusammenhänge, die den Wasseraustausch zwischen übereinanderliegenden Aquiferen beeinflussen, nicht abgebildet werden. Daher wurde diese Transition in Form von drei Szenarien als „Wenn-Dann-Abfrage“ modelliert, so dass für jedes Entnahmeszenario entschieden wird, welche Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen bestehen.

Eigenes Grundwasser deckt den Trinkwasserbedarf in Heidelberg zu 60 %. Im Wassergesetz von Baden-Württemberg ist verankert, dass sich die Nutzung des Grundwassers an seiner Neubildungsrate orientieren muss (Bad.-Württbg. WG § 3a (3)). Bislang lagen der Stadt keine Daten über den Speicherumfang der grundwasserführenden Schichten vor. Im Rahmen dieses Projektes wurde diese Größe erstmals bestimmt. Schon 1987 wurde für den gesamten Rhein-Neckar-Raum eine hydrogeologische Grundwasserkartierung erarbeitet, die im Augenblick fortgeschrieben wird. Bearbeitet wird dieses Projektes von der TGU-Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH in Koblenz, die daher über Kenntnisse der Hydrogeologie im Bereich Rheinebene verfügt. Im Rahmen eines Unterauftrages wurde durch die TGU eine Grundwasserbilanz für das Heidelberger Stadtgebiet erstellt.

In den folgenden Abschnitten ad werden die Bilanzgrößen und –genauigkeiten des TGU-Modells beschrieben (Ausschnitt aus: TGU, 2000: 7-16).

(a) Bilanzgrößen

Fläche

Die angegebene Fläche bezieht sich auf das Gebiet der Stadt Heidelberg, das durch die Stadtgrenze festgelegt ist. Die Gesamtfläche beträgt ca. 109 km², wobei etwa 52 km² auf die Rheinebene entfallen, der etwa gleich große Anteil von ca. 57 km² auf den Bereich des Festgesteines. Die entsprechenden Flächen wurden der Ermittlung der Grundwasserneubildung zugrundegelegt.

Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung repräsentiert den Anteil des jährlichen Niederschlages, der nicht verdunstet, von der Vegetation aufgenommen wird oder oberflächlich abfließt, somit in den Untergrund versickert und zu einer Grundwasseranreicherung beiträgt. Bei der Höhe der Grundwasserneubildung wurde zwischen der Rheinebene und dem Festgesteinsbereich unterschieden. In der Rheinebene ist für das Stadtgebiet Heidelberg in Höhe von 146 mm/a (ca. 4,6 l/s*km²) zugrundegelegt. Hierbei handelt es sich um einen langjährigen Mittelwert unter mittleren hydrologischen Bedingungen, der von den Geologischen Landesämtern der hydrogeologischen Kartierung Rhein-Neckar (Ministerium für Umwelt Bad.-Württbg., 1987) ermittelt wurde und auch im Grundwassermodell der TGU übernommen wird.

Für den Festgesteinsbereich wird die in (Girmond, 1997) berechnete Grundwasserneubildung übernommen, da wegen fehlender Datengrundlagen keine Neuberechnung der Grundwasserneubildung für einen längeren repräsentativen Zeitraum erfolgen konnte. Der zugrundegelegte Mittelwert beträgt 180 mm/a (ca. 5,7 l/s*km²).

Entnahme

Die Grundwasserentnahmen aus Brunnen gehen als Vorgaben in die Bilanzierung ein. Eingerechnet sind alle bekannten Grundwasserentnahmen im Stadtgebiet Heidelberg aus dem Jahr 1996 (Grundvariante). Hierbei wurde eine Zuordnung der bekannten Entnahmen zum Lockergesteinsbereich oder dem Festgesteinsbereich (z.B. Wasserwerk Schlierbach) vorgenommen. Im Lockergestein wurden die Entnahmen in Abhängigkeit der bekannten Filterstrecken der Brunnen den unterschiedlichen Grundwasserstockwerken zugeordnet.

Entsprechend der Vorgaben wurden die Entnahmemengen für die berechneten Varianten variiert (d).

Infiltration / Exfiltration Neckar

Zwischen dem Neckar (bzw. Neckarkanal) und dem Oberen Grundwasserleiter erfolgt ein Austausch mit dem Grundwasser. Die Richtung des Wasseraustausches (Infiltration vom Gewässer in das Grundwasser oder umgekehrt) ist in erster Linie abhängig von der Durchlässigkeit der Gewässersohle und den Wasserspiegeln des Gewässers und des Grundwassers.

Die Infiltrationsmengen im Lockergesteinsbereich wurden den Modellberechnungen entnommen und ergeben sich im Bereich des Neckars innerhalb des Stadtgebietes von Heidelberg.

Die Exfiltrationsmengen im Festgesteinsbereich innerhalb der Stadtgrenzen ergeben sich als Differenzmenge zwischen der gesamten Grundwasserneubildung im Festgestein abzüglich der bekannten Entnahmen sowie dem Grundwasserabfluss in die Rheinebene (Randzu- / -abfluss Festgestein). Zugrundegelegt ist die Annahme, dass ein Grundwasserabstrom nur in die Rheinebene stattfindet.

Zu- / Abfluss oberes Stockwerk

Diese Bilanzposition bezieht sich ausschließlich auf den Bereich des Lockergesteines, der in einzelne Grundwasserstockwerke untergliedert ist. Die Austauschmenge zwischen einzelnen Grundwasserstockwerken wird gesteuert durch die Wasserspiegeldifferenz in den einzelnen Grundwasserstockwerken, der durchströmten Fläche (=Stadtgebiet im Lockergestein) und der Durchlässigkeit der Zwischenschicht. Ein Austausch ist sowohl nach oben als auch nach unten möglich, die Grundwasserströmung erfolgt in Richtung des hydraulischen Gradienten von dem Stockwerk mit höherem Wasserstand (Potential) zum Stockwerk mit tieferem Wasserstand.

Die Bilanzposition bezieht sich nur auf den Wasseraustausch mit dem überlagernden Grundwasserstockwerk.

Zu- / Abfluss unteres Stockwerk

Für diese Position gilt das oben Gesagte, der Wasseraustausch erfolgt jedoch in diesem Fall mit dem unterlagernden Grundwasserstockwerk.

Randzu- / Randabfluss Festgestein

Der Randzu- / -abfluss erfasst die Grundwassermenge, die zwischen dem Festgestein und der Rheinebene ausgetauscht wird. Da die Grundwasserpotentiale im Festgesteinsbereich höher sind, erfolgt die Strömung in Richtung Rheinebene. Die Menge ergibt sich aus den Anpassungen des Grundwassermodells zwischen gemessenen und gerechneten Grundwasserpotentialen.

Horizontaler Zu- / Abfluss

Diese Position bezieht sich ausschließlich auf das Lockergestein, da auf der vorliegenden Datengrundlage eine Ermittlung der Mengen nur im Bereich des Grundwassermodells möglich ist. Mit dieser Position wird die Summe aller horizontalen Austauschmengen innerhalb eines Grundwasserstockwerkes zwischen dem Stadtgebiet Heidelberg und der Umgebung bilanziert.

Gesamtsumme Zu- / Abfluss

Die Gesamtsumme des Zu- / -abflusses repräsentiert eine Kontrollgröße für die Bilanz der einzelnen Grundwasserstockwerke bzw. des Festgesteines. Alle Berechnungen erfolgten stationär, so dass die Summe aller Zuflüsse und Abflüsse innerhalb des betrachteten Bereiches zu Null werden müssen.

Speichermenge

Die Speichermenge stellt die Gesamtmenge des Grundwassers innerhalb des betrachteten Grundwasserbereiches dar. Die Menge ergibt sich aus der Fläche, der mittleren Mächtigkeit des Grundwasserstockwerkes und der speicherwirksamen Porosität.

Für die Rheinebene ist die Fläche durch das Stadtgebiet Heidelberg (ca. 52 km²) in diesem Bereich vorgegeben, die Mächtigkeit der Grundwasserstockwerke ist im Grundwassermodell erfasst (siehe Abb. 11). Als repräsentative speicherwirksame Porosität für Sande und Kiese wurde für alle Grundwasserstockwerke ein Mittelwert von 20 % angenommen.

Im Bereich des Festgesteins ergibt sich die Fläche ebenfalls durch das Stadtgebiet (ca. 57 km²), die Mächtigkeit des Grundwasserleiters kann nur grob abgeschätzt werden. Angenommen wird eine Mächtigkeit von ca. 330 m (mittlerer Grundwasserspiegel etwa 200 m +NN bis zur Tiefenlage des Unteren Zwischenhorizontes ca. -130 m +NN). Als repräsentative speicherwirksame Porosität für den Buntsandstein wird ein Mittelwert von 3 % angenommen, die sich in erster Linie durch das Kluftvolumen ergibt.

(b) Genauigkeit der Bilanzgrößen

Bei den einzelnen Bilanzgrößen ist von unterschiedlichen Genauigkeiten auszugehen. Grundsätzlich besitzen Messgrößen wie die Grundwasserentnahmen eine hohe Genauigkeit, entscheidend hierbei ist im Wesentlichen die Vollständigkeit der vorliegenden Informationen.

Ebenfalls eine gute Genauigkeit ist für die Bilanzgrößen anzunehmen, die als Eingangsrößen für das Grundwassermodell dienen oder sich aus den Berechnungen des Grundwassermodells ergeben. Die Genauigkeit ergibt sich aus der Anpassung gerechneter an gemessene Werte (z.B. Grundwasserpotentiale an verschiedenen Grundwassermessstellen). Die Genauigkeit ist aufgrund der Modellberechnungen und Modellanpassungen sowie langjähriger Klimadaten mit guter Genauigkeit von +/- 10 bis 20 % anzunehmen.

Mit geringerer Genauigkeit ist die Grundwasserneubildung im Festgesteinsbereich anzunehmen, da sich die Auswertung in (Girmond, 1997) nur auf vergleichsweise kurze Messreihen der Klimadaten stützt, und eine langjährige Repräsentativität nicht gesichert ist. Abweichungen von +/- 20 bis 30 % sind möglich.

Die höchsten Unsicherheiten bestehen bei der gespeicherten Grundwassermenge im Bilanzgebiet, da in diesem Fall nur mit plausiblen Abschätzungen gerechnet werden kann. Für den Bereich des Grundwassermodells ist die Annahme der speicherwirksamen Porosität ausschlaggebend da das Volumen gut abgeschätzt werden kann. Angenommen wurden 20 %, die realistische Größenordnung liegt etwa zwischen 15 % und 30 %. Entsprechend sind Abweichungen von bis zu 50 % des gespeicherten Grundwasservolumens möglich. Für den Bereich des Festgesteins ist die Unsicherheit noch höher anzusetzen, da das bestimmende Kluftvolumen in Abhängigkeit der Sedimentationsbedingungen und der tektonischen Beanspruchung des Gesteinsverbandes in weiten Bereichen variieren kann. Repräsentative Mittelwerte liegen etwa in der Größenordnung von 1 bis max. 10 % für den Buntsandstein. Für das im Liegenden befindliche kristalline Grundgebirge sind Werte von 1 bis max. 3 % anzunehmen (Matthes, 1983). Als repräsentativer Mittelwert wurden 3% Kluftvolumen angesetzt. Abweichungen von bis zu 100 % dieses Wertes sind jedoch nicht völlig auszuschließen.

(c) Parametrisierung

Im Hinblick auf eine Parametrisierung der Daten wurde die Grundwasserentnahme aus dem Bilanzgebiet als grundlegende Variable festgelegt. Neben der Grundvariante mit den Entnahmen des Jahres 1996 wurden drei weitere Varianten mit veränderten Entnahmemengen berechnet:

50%-ige Entnahmesteigerung im Oberen Grundwasserleiter

50%-ige Entnahmesteigerung im Mittleren Grundwasserleiter

50%-ige Entnahmesteigerung im Oberen und Mittleren Grundwasserleiter

Die Entnahmemengen aus dem Festgestein, die „Grundwasserneubildung“ sowie der „Randzu- / Abfluss Festgestein“ wurden unverändert eingerechnet.

Bestimmt wurde damit die Veränderung der Bilanzgrößen „Horizontaler Zu-/abfluss“, „Zu- / Abfluss oberes Stockwerk“, „Zu- / Abfluss unteres Stockwerk“ sowie „Infiltration / Exfiltration Neckar“ unter den veränderten Grundwasserentnahmen aus dem Lockergestein.

Tab. 4: Grundwasserbilanz für die Grundvariante. Quelle: TGU 2000

TGU GmbH

Grundwasserbilanz Heidelberg

Grundvariante (Mittlere hydrologische Bedingungen mit Entnahmemengen des Jahres 1996)

	Dimension	LOCKERGESTEIN			LOCKERGESTEIN Summe	FESTGESTEIN	HEIDELBERG Summe
		Oberer GWL	Mittlerer GWL (oben / mitte)	Mittlerer GWL (unten)			
Fläche	[km ²]	52			52	57	109
Grundwasserneubildung	[Mio m ³ /a]	7,6	0,0	0,0	7,6	10,2	17,8
Entnahmen	[Mio m ³ /a]	-7,1	-0,7	-1,3	-9,1	-1,1	-10,2
Infiltration / Exfiltration Neckar	[Mio m ³ /a]	25,9	0,0	0,0	25,9	-6,7	19,2
Zu- / Abfluß oberes Stockwerk	[Mio m ³ /a]	0,0	4,5	3,0	7,5	/	/
Zu- / Abfluß unteres Stockwerk	[Mio m ³ /a]	-4,5	-3,0	-0,1	-7,6	/	/
Randzu- / abfluß Festgestein	[Mio m ³ /a]	2,4	0,0	0,0	2,4	-2,4	/
Horizontaler Zu- / Abfluß	[Mio m ³ /a]	-24,3	-0,8	-1,6	-26,7	/	/
Gesamtsumme Zu / -abfluß	[Mio m ³ /a]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/
Speichermenge	[Mio m ³]	500	600	1.000	2.100	600	2.700

Tab. 5: Grundwasserbilanz mit 50 %iger Entnahmesteigerung im oberen Leiter. Quelle: TGU 2000.

TGU GmbH

Grundwasserbilanz Heidelberg

Entnahmesteigerung von 50 % im oberen Grundwasserleiter gegenüber der Grundvariante

	Dimension	LOCKERGESTEIN			LOCKERGESTEIN Summe	FESTGESTEIN	HEIDELBERG Summe
		Oberer GWL	Mittlerer GWL (oben / mitte)	Mittlerer GWL (unten)			
Fläche	[km ²]	52			52	57	109
Grundwasserneubildung	[Mio m ³ /a]	7,6	0,0	0,0	7,6	10,2	17,8
Entnahmen	[Mio m ³ /a]	-10,5	-0,7	-1,3	-12,5	-1,1	-13,6
Infiltration / Exfiltration Neckar	[Mio m ³ /a]	27,5	0,0	0,0	27,5	-6,7	20,8
Zu- / Abfluß oberes Stockwerk	[Mio m ³ /a]	0,0	4,4	2,9	7,3	/	/
Zu- / Abfluß unteres Stockwerk	[Mio m ³ /a]	-4,4	-2,9	-0,1	-7,4	/	/
Randzu- / abfluß Festgestein	[Mio m ³ /a]	2,4	0,0	0,0	2,4	-2,4	/
Horizontaler Zu- / Abfluß	[Mio m ³ /a]	-22,6	-0,8	-1,5	-24,9	/	/
Gesamtsumme Zu / -abfluß	[Mio m ³ /a]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/
Speichermenge	[Mio m ³]	500	600	1.000	2.100	600	2.700

Tab. 6: Grundwasserbilanz 50 %iger Entnahmesteigerung im mittleren Leiter. Quelle: TGU 2000.

TGU GmbH

Grundwasserbilanz Heidelberg

Entnahmesteigerung von 50 % im mittleren Grundwasserleiter gegenüber der Grundvariante

	Dimension	LOCKERGESTEIN			LOCKERGESTEIN Summe	FESTGESTEIN	HEIDELBERG Summe
		Oberer GWL	Mittlerer GWL (oben / mitte)	Mittlerer GWL (unten)			
Fläche	[km ²]	52			52	57	109
Grundwasserneubildung	[Mio m ³ /a]	7,6	0,0	0,0	7,6	10,2	17,8
Entnahmen	[Mio m ³ /a]	-7,2	-1,0	-2,0	-10,2	-1,1	-11,3
Infiltration / Exfiltration Neckar	[Mio m ³ /a]	25,3	0,0	0,0	25,3	-6,7	18,6
Zu- / Abfluß oberes Stockwerk	[Mio m ³ /a]	0,0	4,8	3,3	8,1	/	/
Zu- / Abfluß unteres Stockwerk	[Mio m ³ /a]	-4,8	-3,3	-0,1	-8,2	/	/
Randzu- / abfluß Festgestein	[Mio m ³ /a]	2,4	0,0	0,0	2,4	-2,4	/
Horizontaler Zu- / Abfluß	[Mio m ³ /a]	-24,3	-0,5	-1,2	-26,0	/	/
Gesamtsumme Zu / -abfluß	[Mio m ³ /a]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/
Speichermenge	[Mio m ³]	500	600	1.000	2.100	600	2.700

Tab. 7: Grundwasserbilanz 50 % mehr Entnahme im oberen u. mittleren Leiter. Quelle: TGU 2000

TGU GmbH

Grundwasserbilanz Heidelberg

Entnahmesteigerung von 50 % im oberen und mittleren Grundwasserleiter gegenüber der Grundvariante

	Dimension	LOCKERGESTEIN			LOCKERGESTEIN Summe	FESTGESTEIN	HEIDELBERG Summe
		Oberer GWL	Mittlerer GWL (oben / mitte)	Mittlerer GWL (unten)			
Fläche	[km ²]	52			52	57	109
Grundwasserneubildung	[Mio m ³ /a]	7,6	0,0	0,0	7,6	10,2	17,8
Entnahmen	[Mio m ³ /a]	-10,5	-1,0	-2,0	-13,5	-1,1	-14,6
Infiltration / Exfiltration Neckar	[Mio m ³ /a]	27,1	0,0	0,0	27,1	-6,7	20,4
Zu- / Abfluß oberes Stockwerk	[Mio m ³ /a]	0,0	5,0	3,2	8,2	/	/
Zu- / Abfluß unteres Stockwerk	[Mio m ³ /a]	-5,0	-3,2	0,1	-8,1	/	/
Randzu- / abfluß Festgestein	[Mio m ³ /a]	2,4	0,0	0,0	2,4	-2,4	/
Horizontaler Zu- / Abfluß	[Mio m ³ /a]	-21,5	-0,8	-1,3	-23,7	/	/
Gesamtsumme Zu / -abfluß	[Mio m ³ /a]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	/
Speichermenge	[Mio m ³]	500	600	1.000	2.100	600	2.700

(d) Ergebnisse

Die Bilanzen sind in den Tab. 4 - Tab. 7 dargestellt. Positive Zahlen repräsentieren dabei jeweils einen Zustrom zum betrachteten Bereich (z.B. Grundwasserstockwerk), negative Zahlen entsprechend einen Abstrom.

Zu beachten ist, dass verschiedene Bilanzpositionen, die lediglich einen „internen“ Wasseraustausch zwischen unterschiedlichen Bereichen innerhalb des Bilanzgebietes (Stadtgebiet Heidelberg) repräsentieren, doppelt aufgeführt sind.

Dies trifft auf folgende Positionen zu:

Zu- / -abfluss oberes Grundwasserstockwerk

Zu- / -abfluss unteres Grundwasserstockwerk

Randzu- / -abfluss Festgestein

Ein vertikaler Grundwasserabstrom in ein unterlagerndes Grundwasserstockwerk muss damit gleichzeitig als Zustrom im unterlagernden Grundwasserstockwerk bilanziert werden. Entsprechend ist auch der Randzustrom vom Festgestein in die Rheinebene einmal als Abstrom (Festgestein) und einmal als Zustrom (Lockergestein) aufgeführt.

Grundfall

- Festgestein

Aus Tab. 4 ist zu entnehmen, dass im Festgestein die Grundwasserneubildung in Höhe von ca. 10,2 Mio m³/a bei weitem die Summe der Grundwasserentnahmen in Höhe von ca. 1,1 Mio m³/a überwiegt. Die Hauptmenge des Grundwassers, etwa 6,7 Mio m³/a, exfiltriert in den Neckar und strömt in die Rheinebene ab. Weiterhin erfolgt mit etwa 2,4 Mio m³/a auch ein deutlicher Grundwasserabstrom aus dem Bereich des Festgesteines in die Rheinebene. Diese Bilanzposition geht als Randzustrom aus dem Festgestein in die Bilanz des Oberen Grundwasserleiters ein.

- Lockergestein

Im Lockergestein liegt die Summe der Entnahmen aus allen Grundwasserstockwerken mit ca. 9,1 Mio m³/a etwa in gleicher Höhe wie die Summe aus Grundwasserneubildung und Randzufluss aus dem Festgestein mit etwa 10 Mio m³/a (Tab. 4). Im Gegensatz zum Festgestein infiltriert der Neckar bei mittleren hydrologischen Bedingungen in das Grundwasser und bewirkt eine erhebliche Grundwasseranreicherung. Die Infiltration beträgt bei den vorgegebenen Entnahmen etwa 25,9 Mio m³/a und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Summe des Grundwasserabstromes aus dem Bilanzgebiet (horizontaler Zu- / -abfluss) mit etwa 26,7 Mio m³/a. Die Infiltration aus dem Neckar trägt damit entscheidend zur Anreicherung des Grundwassersystems bei, so dass insgesamt ein deutlicher Grundwasserabstrom aus dem Bilanzgebiet erfolgt.

(e) Entnahmevariation

i. Entnahmesteigerung von 50 % im oberen Grundwasserleiter

- Festgestein

Da in diesem Bereich keine Parameter verändert wurden, stimmt Tab. 5 für das Festgestein mit der Grundvariante überein.

- Lockergestein

Im Lockergestein liegt die Summe der Entnahmen aus allen Grundwasserstockwerken mit ca. 12,5 Mio m³/a etwa um 2,5 Mio m³/a höher als die Summe aus Grundwasserneubildung und Randzufluss aus dem Festgestein (Tab. 5) und etwa 3,4 Mio m³/a höher als die Entnahme der Grundvariante. Die höhere Entnahme schlägt sich aufgrund eines erhöhten Potentialunterschiedes zwischen dem Wasserspiegel des Neckars und dem oberen Grundwasserleiter in einer verstärkten Infiltration in das Grundwasser nieder. Die Infiltration beträgt in diesem Fall etwa 27,5 Mio m³/a und liegt damit etwa 1,6 Mio m³/a höher als bei der Grundvariante. Die Summe des Grundwasserabstromes aus dem Bilanzgebiet (horizontaler Zu- / -abfluss) liegt demgegenüber mit etwa 24,9 Mio m³/a um etwa 1,8 Mio m³/a niedriger als bei der Grundvariante. Die erhöhten Entnahmen werden durch eine verstärkte Infiltration aus dem Neckar sowie einen verminderten Grundwasserabstrom aus dem Bilanzgebiet ausgeglichen.

ii. Entnahmesteigerung von 50 % im mittleren Grundwasserleiter

- Festgestein

Da in diesem Bereich keine Parameter verändert wurden, stimmt Tab. 6 für das Festgestein mit der Grundvariante überein.

- Lockergestein

Im Lockergestein liegt die Summe der Entnahmen aus allen Grundwasserstockwerken mit ca. 10,5 Mio m³/a etwa mit der Summe aus Grundwasserneubildung und Randzufluss aus dem Festgestein (Tab. 6) überein, liegt jedoch etwa 1,1 Mio m³/a höher als die Entnahme der Grundvariante. Die höhere Entnahme schlägt sich in einer verstärkten Infiltration in den oberen Grundwasserleiter nieder. Die Infiltration beträgt in diesem Fall etwa 26,3 Mio m³/a und liegt damit etwa 0,4 Mio m³/a höher als bei der Grundvariante. Die Summe des Grundwasserabstromes aus dem Bilanzgebiet (horizontaler Zu- / -abfluss) liegt demgegenüber mit etwa 26,6 Mio m³/a um etwa 0,7 Mio m³/a niedriger als bei der Grundvariante. Die erhöhten Entnahmen werden wiederum durch eine verstärkte Infiltration aus dem Neckar sowie einen verminderten Grundwasserabstrom aus dem Bilanzgebiet ausgeglichen.

iii. Entnahmesteigerung von 50 % im oberen und mittleren Grundwasserleiter

- Festgestein

Da in diesem Bereich keine Parameter verändert wurden, stimmt Tab. 7 für das Festgestein mit der Grundvariante überein.

- Lockergestein

Im Lockergestein liegt die Summe der Entnahmen aus allen Grundwasserstockwerken mit ca. 13,5 Mio m³/a um 3,5 Mio m³/a höher, als die Summe aus Grundwasserneubildung und Randzufluss aus dem Festgestein (Tab. 7). Gleichzeitig übertrifft sie die Entnahme der Grundvariante um ca. 4,4 Mio m³/a. Die höhere Entnahme schlägt sich in einer verstärkten Infiltration in den oberen Grundwasserleiter nieder. Die Infiltration beträgt in diesem Fall etwa 27,1 Mio m³/a und liegt damit etwa 1,2 Mio m³/a höher als bei der Grundvariante. Die Summe des Grundwasserabstromes aus dem Bilanzgebiet (horizontaler Zu- / -abfluss) liegt mit etwa 23,7 Mio m³/a um etwa 3,0 Mio m³/a niedriger als bei der Grundvariante. Bei gleichzeitiger Steigerung der Entnahmen im oberen und mittleren Grundwasserleiter werden die erhöhten Entnahmen nicht vollständig durch eine verstärkte Infiltration aus dem Neckar und einen verminderten Grundwasserabstrom aus dem Bilanzgebiet ausgeglichen. Während bei den vorherigen Varianten jeweils ein geringer Grundwasserabstrom (0,1 Mio m³/a) in den unteren Grundwasserleiter erfolgt, kann die Bilanz im vorliegenden Fall nur durch einen geringen Zustrom (0,1 Mio m³/a) aus dem unteren Grundwasserleiter ausgeglichen werden.

Die Erklärung liegt in einer bereichsweisen Umkehr des hydraulischen Gradienten zwischen dem mittleren und dem unteren Grundwasserleiter, der durch die verstärkten Grundwasserabsenkungen hervorgerufen wird.

4.1.2.2 Boden/Vegetation

Je nach Wetterlage und Pflanzenbewuchs sind die Anteile verdunstetes bzw. von den Pflanzen aufgenommenes Wasser unterschiedlich. Die Bewässerungsmaßnahmen finden hauptsächlich in den Sommermonaten statt, so dass vermutlich mit einer überwiegenden Verdunstung bzw. Aufnahme des Wassers durch die Pflanzen zu rechnen ist. Der Input in die Verbrauchergruppe Landwirtschaft, der als Beregnungswasser in die Transition Boden fließt, gelangt letztendlich in den Output ‚Verdunstung‘.

Der Bodenwasserhaushalt ist über das Jahr gesehen ausgeglichen. Das gleiche wird auch für die Menge Wasser angenommen, die in der Vegetation enthalten ist. Beide Kompartimente sind Bestandteile des Wasserhaushaltes einer Region und zugleich sehr schwer zu quantifizieren. Für den Bodenwasserhaushalt müssten aufwendige Feuchtigkeitsmessungen durchgeführt werden. Um die Menge pflanzlich gebundenes Wasser zu berechnen, müsste die jährlich wechselnde Flächennutzung in Bezug auf Kulturarten und ihren spezifischen Wassergehalt berücksich-

tigt werden. In einer Schweizer Studie (Henseler et al., 1990) wurden pauschal 5 l Wasser pro m² bewachsene Fläche (sowohl landwirtschaftliche wie Waldfläche) angenommen. Der mit 0,8 % sehr geringe Anteil am gesamten regional gespeicherten Wasser zeigt, dass die Vegetation eine marginale Bedeutung am gesamten Wasserspeicher der Region hatte.

4.1.2.3 Oberflächengewässer

Für das Stadtgebiet Heidelberg ist der Durchfluss des Neckars der dominante Oberflächenwasserabfluss. Für die Messstelle Karlstor, also beim Eintritt des Neckars in das Stadtgebiet, beträgt das Mittelwasser (MQ) jährlich 157 m³/sec (Mittelwert 1979-1996) und das mittlere Hochwasser (MHQ) sogar 1430 m³/sec (Quelle: LfU). Um die Berechnung zu vereinfachen wurde die Mittelwassermenge auf ein Jahr bezogen. Obwohl dieser Wert vom tatsächlichen abweicht, zeigen sich darin die Dimensionen von oberirdischen Abfluss und anthropogen eingeleiteter Wassermenge. Innerhalb des Heidelberger Stadtgebietes nimmt der Neckarabfluss noch um das gereinigte Kläranlagenwasser und den Abfluss einzelner kleinerer Oberflächengewässer zu. Letztere machten jedoch nur 15 % des mittleren Abflusses aus. Das gereinigte Abwasser setzt sich nicht nur aus dem anthropogenen Schmutzwasser zusammen, sondern beinhaltet zusätzlich Niederschlagswasser, das über die Kanalisation der besiedelten Stadtfläche abfließt und den Abfluss von kleineren Oberflächengewässern, die kanalisiert wurden.

Zum oberirdisch abfließenden Wasser einer Region gehören auch die Quellabflüsse. Für das Stadtgebiet liegen jedoch nach Auskunft des Wasserwirtschaftsamtes keine Messungen der Quellfassungen vor. Die Wassermenge, die zur Trinkwassergewinnung aus Quellen entnommen wird, geht in das Grundwassermodell als Entnahme aus dem Festgesteinsbereich ein.

Der obere Grundwasserleiter ist mit dem Neckar verbunden. Durch das Flussbett werden im Bereich der Rheinebene beträchtliche Mengen Wasser in den oberirdischen Grundwasserleiter infiltriert. Die Modellierung des Grundwassers zeigte, dass die Menge exfiltriertes Wasser aus dem Neckar von den anthropogenen Grundwasserentnahmen beeinflusst wird. Für den Neckarabschnitt im Festgesteinsbereich des Odenwaldes ist die Situation umgekehrt. Das Verhältnis zwischen dem Grundwasser- und Neckarwasserspiegel bewirkt eine Infiltration von Grundwasser in das Flussbett. Der Umfang dieser Wasserbewegung beträgt etwa ein Viertel dessen, was im Lockergesteinsbereich vom Neckar in das Grundwasser gelangt.

4.2 Papierhaushalt

4.2.1 Modellbeschreibung

Der Konsum von Papier spiegelt sich im Altpapieraufkommen der Stadt wieder. Eine Analyse der Altpapiermenge und –zusammensetzung lässt daher wesentliche Rückschlüsse auf den Verbrauch von Papier-Gütern zu. Die Datenverfügbarkeit für die Papierbilanz unterscheidet sich daher wesentlich von der im Bereich Wasser. Über den Input von Papier in das Stadtgebiet und seine Verteilung an verschiedene Konsumenten wird nicht wie im Fall des Trinkwassers Buch geführt.

Privathaushalte: Die städtische Altpapierentsorgung läuft in Heidelberg über eine Containersammlung, die im Wesentlichen Altpapier aus den Privathaushalten erfasst. In der Summe betrug der separatgesamelte Papiermüll 1997 ca. 87 kg/E. Papier verläßt die Privathaushalte ausserdem im Abwasser (Hygienepapier), in der Biomülltonne und der Restmüllsammlung. 1996 fand eine Restmüll- und Bioabfalluntersuchung im Stadtkreis statt. Aus dieser Untersuchung stammen die für das Modell verwendeten Daten über die Menge Altpapier im Rest- bzw. Biomüll. Die Annahmen über den Anteil des nicht erfassten Papiers am gesamten konsumierten Papier beziehen sich auf die bundesweite Papierbilanz (Bilitewaki, 1993). Danach werden 6,3 % des konsumierten Papiers nicht erfasst, weil sie die Haushalte im Abwasser verlassen oder verbrennen. Weitere 8,5 % vergrößern den Bestand an langlebigen Produkte (z.B. Bücher) in den Haushalten.

Der Input in den Bereich Privathaushalte setzt sich aus den Gruppen, Papier, Papierwaren und Druckereierzeugnisse zusammen. Der Anteil der jeweiligen Gütergruppe am Gesamtinput wurde anhand der bundesdeutschen Papierinputs in die Privathaushalte (Stahmer et al., 1997) errechnet.

Gewerbe: Um die für den Papierhaushalt bedeutenden Akteure zu identifizieren, sollten Daten zur Altpapierproduktion einzelner Wirtschaftsbereiche in die Modellierung miteinfließen. Im Zuge der Datenaquise stellte sich jedoch heraus, dass solche Daten nicht für Heidelberg verfügbar sind. Die Altpapiermengen im gewerblichen Bereich werden bei den Kommunen nicht registriert. Die Betriebe können zwar die öffentliche Papierentsorgung durch Container über die Stadt Heidelberg nutzen. Darüberhinaus besteht aber auch die Möglichkeit größere Mengen Altpapier direkt an einen privaten Entsorger zu verkaufen ohne dass die Kommune Einblick in diese Altpapiermengen hat.

Die Altpapiermenge, die in Heidelberg durch Container und in Bündelsammlungen erfasst wird, stammt überwiegend aber nicht ausschließlich aus den Privathaushalten. Der Anteil, den Einzelhandel und Dienstleistungen hieran haben, ist jedoch nicht quantifizierbar.

Im Rahmen der Arbeiten zur Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) wurden für bestimmte Rohstoffe und Güter auf Bundesebene physische Input-Output-Tabellen (PIOT) erstellt (Stahmer et al. 1991). Die Basis dafür bildeten die monetäre Material- und Wareneingangstatistik, die die In- und Outputs aller Produktionsbereiche auf Bundesebene enthält, und Umweltstatistiken von den Rohstoffentnahmen und dem Abfallaufkommen in einzelnen Wirtschaftsbereichen. Bestandteil

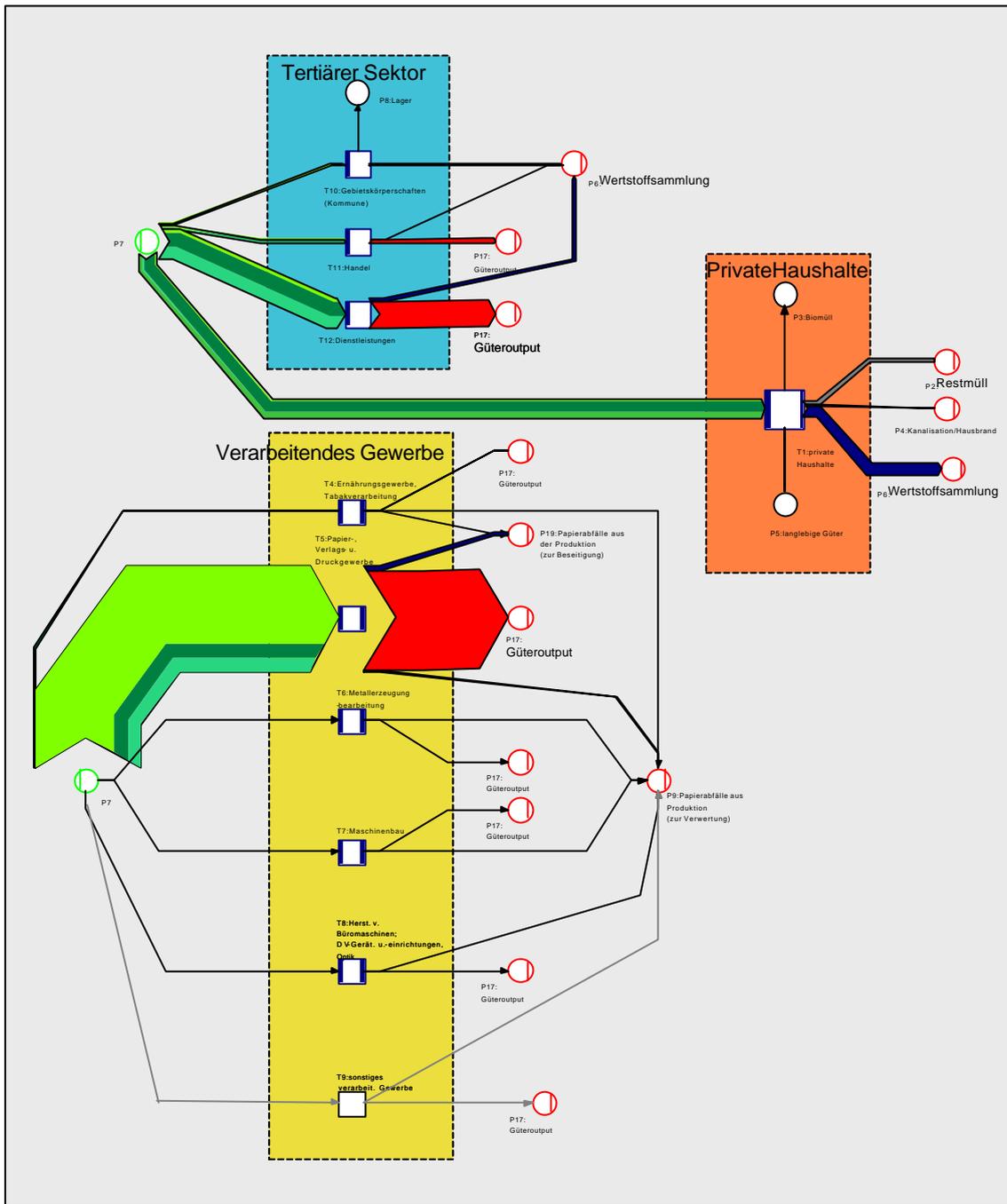
der PIOT sind zusätzlich Verflechtungsmatrizen, die den Verbleib des Gesamtgüteroutputs der einzelnen Produktionsbereiche aufzeigen.

Da Heidelberg-spezifische Angaben zum Papierin- und -output im Gewerbebereich nicht vorliegen, wurden diese auf Basis der bundesdeutschen Daten generiert. Als Bezugspunkt dienten die Beschäftigungszahlen der einzelnen Produktionsbereiche. Für 5 von insgesamt 12 in Heidelberg vertretenen Wirtschaftszweigen im Bereich verarbeitendes Gewerbe waren die Beschäftigtenzahlen verfügbar (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 1995). Die restlichen Angaben durften nicht vom Statistischen Landesamt veröffentlicht werden, weil diese sich pro Wirtschaftszweig auf weniger als drei Betriebe bezogen. Hier greift, wie beim Wasserhaushalt (Abschn. 4.1.1) schon beschrieben das Landesdatenschutzgesetz Baden-Württemberg §14, in dem der Schutz betriebsbezogener Daten verankert ist. Auch die Kommunen selber verfügen nicht im Detail über die Beschäftigtenzahlen in den einzelnen Wirtschaftsbereichen.

Die Beschäftigtenzahlen für die Bereiche Dienstleistungen, öffentl. Einrichtungen und Handel stammen aus der online-Regionaldatenbank des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg und beziehen sich auf das Jahr 1990. Die Berechnung der Papier Inputs wurde wie für das Verarbeitende Gewerbe durchgeführt. Die Menge an Papieroutput ist nicht bekannt, da es hierüber weder national noch regional eine Abfallstatistik gibt. Für alle drei Bereiche wurde ein pauschaler Lagerzuwachs von jährlich 10 % angenommen. Sowohl bei den Dienstleistungen als auch im Handel sind die Papierflüsse, die mit den Leistungen zu tun haben vermutlich gering. Die Physischen Input-Output-Tabellen geben keinerlei Güteroutputs für diese "Produktionsbereiche" an. Die Güterflüsse zu quantifizieren, die mit dem Dienstleistungsbereich zusammenhängen, können nur schwer bestimmt werden. Im Wesentlichen wurden in den PIOT dafür die Güterflüsse im Bereich des Gastgewerbes in Höhe der verzehrten Speisen und Getränke betrachtet. Hieraus konnten demnach keine relevanten Informationen über zugehörige Papierflüsse entnommen werden. Vermutlich landet ein Großteil der Papierinputs im Bereich Entsorgung. Daher wurde als Outputstelle die Wertstoffsammlung gewählt.

Das Papiermüllaufkommen im verarbeitenden Gewerbe wurde auf Basis der bundesweiten Abfallstatistik (StBA, 1997) generiert. Diese Tabellen enthalten die Mengen sämtlicher Abfallarten der Betriebe des Produzierenden Gewerbes ab einer Größe von 20 Beschäftigten. Die Generierung der Daten für Heidelberg erfolgte wie bei den Papier-Inputs über die Beschäftigtenzahlen. Die Differenz zwischen Abfalloutput und Papierinput wurde jeweils dem Güteroutput zugeschrieben.

Abb. 16: Bedeutende Ströme im „Papierhaushalt“ der Stadt Heidelberg



4.2.2 Bilanzergebnisse

Das Modell zeigt einen Ausschnitt aus dem gesamten Papierhaushalt der Stadt Heidelberg für ein Bilanzjahr. Für neun Akteursgruppen wurde der Input verschiedener Papiergüter und der Output an Altpapier oder Papiergütern aus der Papier-

weiterverarbeitung bilanziert (Abb. 16). Die zugehörige Bilanz enthält zum einen die gesamten In- und Outputs für Heidelberg nach Materialien geordnet (Tab. 8).

Tab. 8: Papierbilanz der Gesamten In- und Outputs

Input [t]		Output [t]	
Güter aus Papier		Güter aus Papier	
Bücher/Zeitschriften	7973,2	Güter d. Genußmittelherstellung	1084,3
Druckereierzeugnisse	18962,2	Güter d. Herst. von Büromasch. usw.	1,1
Papier/Pappe	96803,9	Güter d. Maschinenbaus	717,7
Papier-/Pappewaren	34560,1	Güter d. Metallerzeugung u. -bearbeitung	48,6
		Güter d. Papier-, Verlags- u. Druckgew.	111654,0
		Papierabfälle	
		nicht verwertbare Abfälle	
		Altpapier im Restmüll	5964,4
		Hausbrand, Altpapier in Kanalisation	1351,6
		Papierfilter, Zellstofftücher	35,3
		verwertbare Abfälle	
		gemischtes Altpapier	27283,0
		Schnitt-u.Stanzabfälle/Makulatur	4708,7
		Verpackungen&Kartonagen	1604,3

Der größte Papierfluss wurde durch das Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe induziert. In diesen Bereich flossen im Bilanzjahr 117.654 t Papier bzw. 64,5 % des gesamten Heidelberger Papierinputs. An zweiter Stelle standen die Privathaushalte mit einem Papierkonsum von 21.454 t. Der Dienstleistungsbereich, der den wirtschaftlichen Schwerpunkt der Kommune darstellt, verursachte nur ca. 6 % des gesamten Papierinputs.

Für das Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe war Papier und Pappe das wichtigste Inputgut. Die Privathaushalte verbrauchten überwiegend Papier- und Pappewaren sowie Bücher und Zeitschriften und in die Dienstleistungen gingen hauptsächlich Papier und Pappe und Druckereierzeugnisse.

Die Bilanz ist aufgrund mangelnder Datenbasis unvollständig. Es fehlen Papierströme für einige Wirtschaftsbereiche und für die gesamte Gruppe der Betriebe, die kleiner als 20 Beschäftigte sind. Zusätzlich kommen nicht quantifizierbare Ungenauigkeiten hinzu, die sich durch die Generierung allein über die Beschäftigtenzahlen ergeben. Die Bilanzergebnisse identifizieren den Bereich Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe als den Verursacher des größten Papierflusses, der den im

privaten Bereich um mehr als das fünffache überstieg. Heidelberg besitzt jedoch nur wenige kleinere Druckereien. Das Verlagswesen ist wesentlich ausgeprägter. Die großen Papierströme könnten also durch die Verlage bedingt sein. Hier zeigt sich jedoch ein weiteres Problem regionaler Bilanzen. Die Verlagshäuser, deren Standort Heidelberg ist, induzieren Papierströme, die nicht unbedingt vor Ort stattfinden. Dies gilt für viele Branchen und führt bei einer Generierung von regionalen Stoffflüssen auf Basis nationaler Daten zu Fehlern.

Papier wird in Heidelberg weiterverarbeitet und verlässt das Stadtgebiet anschließend wieder, oder es wird konsumiert und kommt in den Bereich Entsorgung. Hierbei muss unterschieden werden zwischen der Menge Altpapier, die in die Wertstoffsammlung gelangte und dem Anteil Papier, der in anderen Abfallfraktionen enthalten war (Restmüll, Biomüll) bzw. wie das Hygienepapier im Abwasser nicht erfassbar war. Der Konsum von Papier findet hauptsächlich in den privaten Haushalten statt. Diese Akteursgruppe ist der Hauptproduzent von Altpapier (66 %). Mit etwa einem Drittel dieser Altpapiermenge (3.423 t) lag der Bereich Dienstleistungen an zweiter Stelle der Altpapierproduzenten. Insgesamt ergaben diese 1.159 t, wobei der Bereich Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe zu 60 % daran beteiligt war. Der gewerbliche Altpapieranteil beträgt nur 18 % des gesamten Heidelberger Altpapieraufkommens. Dies würde bedeuten, dass über die öffentliche Altpapiersammlung der überwiegende Teil des Altpapierstroms erfasst wird.

Insgesamt haben die verwertbaren an den gesamten Papierabfällen einen Anteil von 60 %. Die restlichen Papiermengen eignen sich entweder nicht zum Recycling (z.B. Hygienepapier im Abwasser) oder werden von den Verbrauchern der Rest- und Biomüllfraktion zugeführt.

5 Diskussion

Für die Stadt Heidelberg wurden auf kommunaler Ebene zwei Güterbilanzen aufgestellt. Der Wasserhaushalt konnte als konsistente Bilanz, die sowohl die geogenen als auch anthropogenen Prozesse enthält, beschrieben werden. Zusätzlich wurde der Einfluss der anthropogenen Grundwasserentnahmen auf den städtischen Grundwasserhaushalt modelliert, so dass die Auswirkungen von Entnahmesteigerungen in den verschiedenen Grundwasserstockwerken betrachtet werden können. Für die Modellierung wurde die Parametrisierung nur in Abhängigkeit von den anthropogenen Entnahmen vorgenommen. Sämtliche andere Einflussgrößen, die hydrogeologische Grundwassermodelle in der Regel beinhalten (variierende Niederschläge, Bodennutzung usw.), waren in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung. Es besteht allerdings die Möglichkeit, durch eine Schnittstelle in der Software Umberto, das hier verwendete Stoffstromnetz um ein komplexes hydrologisches Modell zu erweitern (siehe Hinweise zur COM-Technik in Kap. 2.3).

Im Bereich des gewerblichen Wasserkonsums konnten für diese Studie keine branchenspezifischen Daten verwendet werden, weil dem öffentlichen Wasserversorger aufgrund der Umstellung der Betriebssoftware die Branchenangaben seiner Kunden nicht mehr erfasst werden. Im Prinzip kann man jedoch davon ausgehen, dass diese Daten auf kommunaler Ebene existieren und daher branchengenaue Wasserverbräuche für Wasserbilanzen gemacht werden können. Die Abgabe von Wasser wird genau gemessen und dokumentiert. Für die Abwassermengen existieren dagegen keine Zähler bei den Verbrauchern. Die Gesamtmenge Abwasser einer Kommune wird erst am Klärwerk registriert. Für die Heidelberger Wasserbilanz wurde pauschal eine Verdunstungsmenge von 0,6% des Wasserverbrauchs angenommen, wie sie von Baccini et al. (1993) für Privathaushalte bestimmt wurde. Mittels dieser Annahme und den empirisch ermittelten Daten zur Trinkwasserverteilung konnte der anthropogene Wasserhaushalt konsistent bilanziert werden.

Im Gegensatz dazu ist die Bilanzierung der geogenen Flüsse weitaus problematischer. Daten über die Grundwassermengen, den Oberflächenabfluss, die Gebietsniederschlags oder die Verdunstungsmengen werden in der Regel für Flusseinzugsgebiete oder andere naturräumliche Einheiten erhoben. Je kleiner das Bilanzgebiet ist, desto größer werden Mess- und Rechenfehler für die natürlichen Wasserflüsse. Am Beispiel Oberflächenabfluss für das Stadtgebiet Heidelberg wird dies sehr deutlich: Der Neckarabfluss in Heidelberg kann aufgrund der Größe des Gewässers nur mit einer Fehlergenauigkeit von ca. 20% erfolgen. Die Zunahme des Abflusses muss als so gering eingeschätzt werden, dass sie innerhalb dieses Fehlerbereichs liegt. Aufgrund der Dimension von natürlichen Wasserflüssen und von Kommunen eignet sich ein solches System praktisch nicht. Für die Heidelberger Wasserbilanz wurden Durchschnittswerte für Niederschläge und den Neckarabfluss auf das Gebiet hochgerechnet. Für die Grundwasserbilanz lagen nur für den Bereich der Rheinebene, die die Hälfte des gesamten Stadtgebietes umfasst, gesicherte Grundlagendaten vor. Auch für dieses Modell mussten also Annahmen getroffen werden. Obwohl durch sämtliche Annahmen der Fehlerbereich vermutlich

groß ist, vermittelt die Bilanz einen Eindruck davon, wie das Verhältnis von anthropogenen und geogenen Flüssen ist. Obwohl vermutlich in den meisten Kommunen die geogenen Wasserflüsse so wie in Heidelberg weit über den anthropogenen liegen, zeigen die Ergebnisse der Grundwasserbilanz, dass schon im Vergleich zum Speichervolumen sehr geringe Entnahmen die natürlichen Bedingungen gravierend verändern können: Durch die 50%ige Entnahmesteigerung in den betrachteten Grundwasserleitern wurde eine Umkehr des hydraulischen Gradienten im untersten Grundwasserstockwerk bewirkt.

Für eine Talregion in der Schweiz wurde ebenfalls eine Wasserbilanz erarbeitet (Henseler et al., 1990). Im Gegensatz zur Heidelberger Studie wurden dabei jedoch Messungen und Berechnungen der Größen Verdunstung, Gebietsniederschläge und der Oberflächenwasserabfluss durchgeführt. Auf Basis von vorhandenen Daten wie z.B. Punktmessungen der Niederschläge wurden Berechnungen und zum Teil auch extra Messungen durchgeführt. Die Wasserflüsse im Untergrund konnten nur aufgrund von plausiblen Annahmen und wenigen Angaben über die Beschaffenheit der zugehörigen Grundwasserstockwerke geschätzt werden. Damit erforderte diese Untersuchung einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand und Fachwissen im Bereich Hydrologie. Die Ergebnisse beinhalteten Fehlerbereiche zwischen 10 und 50% (Tab. 9), wobei der unterirdische Abfluss die Größe war, die mit dem größten Fehlerbereich behaftet war. Hier kann eine Parallele zum Heidelberger Grundwassermodell gezogen werden. Auch hier beruhten die Berechnungen auf vielen Annahmen, so dass für den berechneten Umfang des Grundwasservolumens in der Rheinebene ein Fehlerbereich von 50%, für die im Odenwald sogar bis zu 100% angenommen wurde (s. Abschn. 4.1.2.1 (b)).

Tab. 9: Fehlerbetrachtung für die regionale Wasserbilanz für die Region „Unteres Bünztal“, Schweiz (nach HENSELER et al., 1990)

	10 ⁶ m ³ /a	Fehler m	
		%	abs.
Niederschlag	73,4	10	7,3
Zufluss, oberirdisch	35,6	10	7,1
Trinkwasserimport	2,8	10	0,3
ä Input	111,8		
Verdunstung	38,3	15	5,7
Abfluss, oberirdisch	67,0	10	6,7
Abfluss, unterirdisch	2,3	50	1,2
Trinkwasserexport	0,1	10	0,01
Abwasserexport	0,7	10	0,1
ä Output	108,4		

Je nach Anspruch und Datenlage ist die Erarbeitung einer geogenen Wasserbilanz unterschiedlich aufwendig. Die spezifischen geogenen Bedingungen der jeweiligen Kommune erfordern eine Anpassung der Herangehensweise.

Der Blickwinkel für eine „Papierbilanz“ richtet sich eher auf den Bereich Entsorgung, da über die Verteilung bzw. den Input in die verschiedenen Bereiche anders als beim Gut Wasser keine Informationen vorliegen. Einen geogenen Bereich gibt es hier nicht, die Daten umfassen allein den wirtschaftlichen Bereich. Papier gehört zu den Wertstoffen, die recyclingfähig sind und in öffentlichen Separatsammelungen erfasst werden. Im Gegensatz zum öffentlichen Gut Wasser existiert hierüber aber keine Statistik auf kommunaler Ebene, die die Herkunft der Papiermengen dokumentiert. Die Entsorgung von Altpapier übernimmt die Kommune nicht insgesamt, sondern überwiegend im Bereich der Privaten. Für Gewerbebetriebe gibt es verschiedene Möglichkeiten der Altpapierentsorgung. Ein Betrieb kann von der Stadt Container bestellen, das anfallende Altpapier selbst zum Recyclinghof bringen oder das Material an einen Sekundärrohstoffherzeuger verkaufen. Die Menge des jährlich anfallenden Altpapiers ist nur in der Buchführung der Betriebe aufgeführt. Zusätzlich gibt es für Betriebe mit mehr als 20 Mitarbeitern die Pflicht jährlich eine Liste aller Abfallmengen an das Statistische Bundesamt weiterzuleiten. Diese Daten dienen zur bundesweiten Übersicht. Theoretisch wäre eine Auswertung zum Beispiel für Heidelberg möglich. In einer Stoffhaushaltsstudie der Stadt Wien zum Beispiel wurden die Österreich-weiten Daten der industriellen Produktionsstatistik auf die Stadt bezogen ausgewertet (Daxbeck et al., 1996). Um vollständige Informationen über die Altpapiermenge und die jeweilige Herkunft desselben in den Kommunen verfügbar zu machen, müsste ein Informationsfluss vom Statistischen Bundesamt dorthin führen, für den es bisher jedoch keine gesetzliche Grundlage existiert. Am Beispiel Papier wird deutlich, dass für die Kommune nicht alle Güterflüsse im Bereich der gewerblichen Entsorgung nachvollziehbar sind.

Auf der Basis der bundesweiten Input-Output-Tabellen wurde der Papierinput für 5 Bereiche des produzierenden Gewerbes und für die Bereiche Handel und Dienstleistungen generiert. Es wurde deutlich, dass der Bereich Papierverarbeitung, Druckereien und Verlage den größten Papierinput in die Stadt Heidelberg induzieren. Die wichtigen Altpapierproduzenten sind jedoch die privaten Haushalte, für die als einzige Akteursgruppe im Modell empirisch erhobene Angaben vorlagen.

Als Bezugspunkte für die Generierung der Papierströme wurden die Input-Output-Tabellen für die Bundesrepublik Deutschland (Stahmer et al., 1997) verwendet. Die Beschäftigtenzahlen in den Gewerbebereichen fungierten als Bezugsgrößen. Durch eine Übertragung von der nationalen auf die kommunale Ebene werden die Besonderheiten einer Region vernachlässigt. Man geht davon aus, dass nationale Durchschnittswerte auch für die betrachtete Region gelten, obwohl die regionalen Verhältnisse vom nationalen Durchschnitt erheblich abweichen können. Die Umrechnungen bringen außerdem einen Informationsverlust mit sich. Die Bezugsgrößen für die Umrechnung können Umsatzzahlen, Beschäftigtenzahlen, Produktionsmengen oder Kombinationen aus diesen Angaben darstellen. Es müsste jedoch branchenspezifisch geprüft werden, welche Bezugsgrößen jeweils geeignet sind. Bislang wurde dieser Bereich nicht detailliert untersucht. Vorhandene Studien beschäftigen sich mit dem Bereich Sonderabfälle, in dem für einige Stoffe branchenspezifische Kennzahlen erarbeitet wurden (z.B. Toussaint, 2000).

Das Beispiel der mit dem Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe zusammenhängenden Papierflüsse belegt, dass nationale Daten sich nicht für die Generierung von

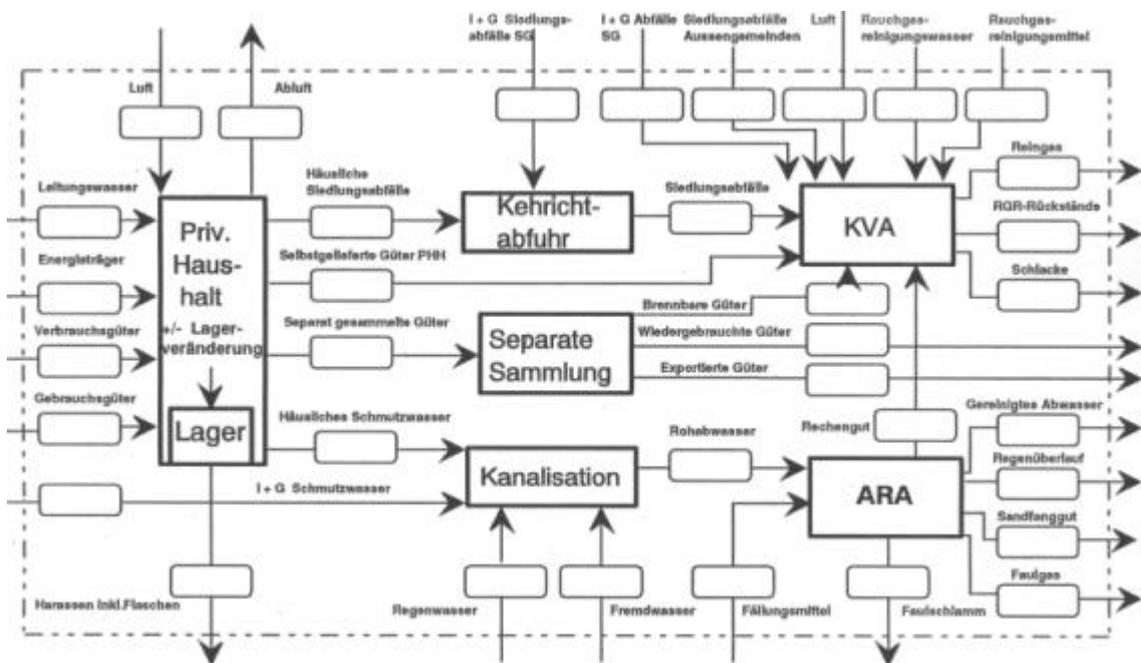
kommunalen Daten eignen. Die Höhe des durch diesen Gewerbebereich induzierten Papierflusses scheint für die Heidelberger Verhältnisse (wenige, kleine Druckereien) unrealistisch. Für den Bereich Privathaushalte lagen für Heidelberg empirisch ermittelte Daten vor.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Datenbasis für die Bilanzierung von Wirtschaftsgütern in einer Kommune grundsätzlich nicht ausreichend ist. Eine Generierung der fehlenden Daten ist ebenfalls nicht möglich bzw. vom Aussagegehalt her unbefriedigend. Dazu kommt das methodische Problem, dass Firmen, die in einer Kommune angesiedelt sind, auch Güterbewegungen in anderen Regionen induzieren und sich diese nicht immer eindeutig trennen lassen. Daher reicht es für eine kommunale Güterbilanz nicht aus, die Informationen bezogen auf die Branchen zu generieren, da Akteure und die zugehörigen Güterbilanzen räumlich auseinanderfallen.

5.1 Beispiele anderer regionalen Bilanzen

In einer Schweizer Studie (Baccini et al., 1993) sollten sämtliche Güterflüsse der Privathaushalte einer Stadt bilanziert und damit gezeigt werden, wie wichtig diese Akteursgruppe für die gesamten Stoffflüsse einer Kommune sind. Das betrachtete System umfasste neben dem Prozess Privathaushalte auch die für die Entsorgung wichtigen Vorgänge wie Kehrriichtabfuhr, Separate Müllsammlungen, Kanalisation, Kehrriichtverbrennungsanlage (KVA) und die Abwasserreinigungsanlage (ARA).

Abb. 17: Das Stoffstromsystem von "Metapolis". Aus Baccini et al. (1993).



Die Datenbasis bestand inputseitig aus der Marktforschungsstatistik über den Konsumgüterekauf der Schweizer Haushalte und outputseitig aus der Bilanz der stadteigenen Entsorgungsanlagen. Da die Entsorgerbilanzen auch den Anteil der gewerblichen Abfälle mit einschlossen, mussten separate Müllsammlungen und -

analysen in Gewerbegebieten und Mischgebieten durchgeführt werden, um den Anteil der privaten Haushalte quantifizieren zu können.

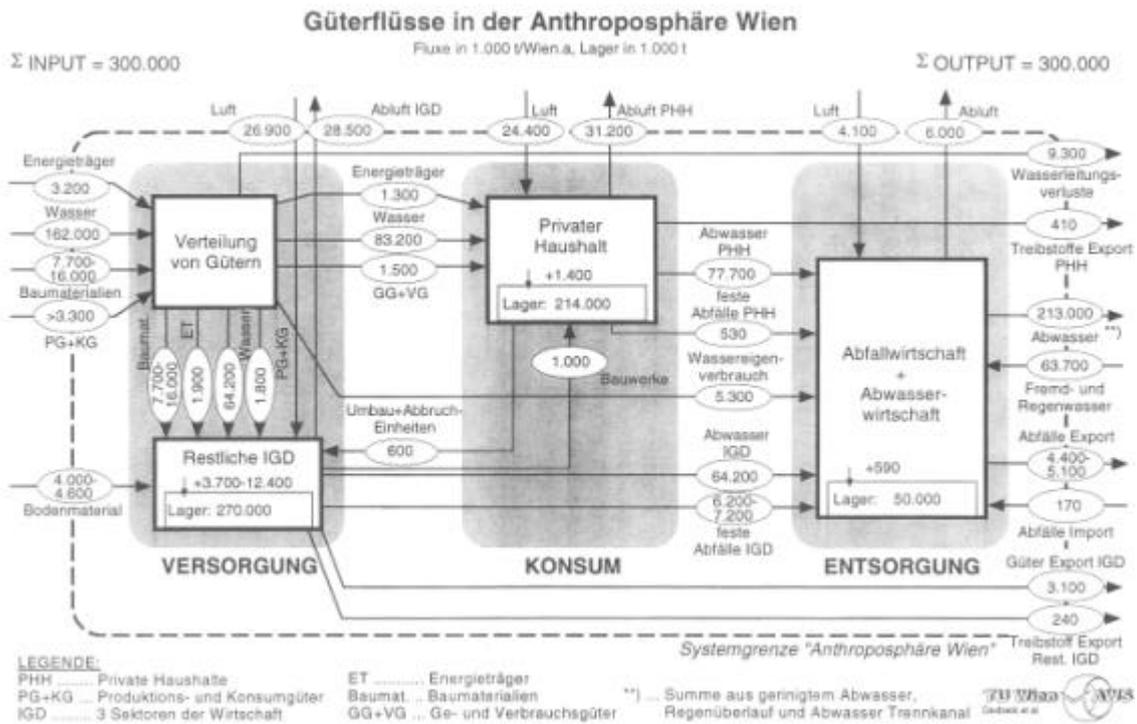
Viele der für diese Studie verwendeten Daten waren Durchschnittswerte von Schweizer Privathaushalten: Die Daten über den Güterkonsum stammten von einem Konsumenten-Panel und für den Energieträgerverbrauch wurde eine nationale Statistik verwendet, aus der ein durchschnittlicher Verbrauch errechnet wurde. Da die gewählte Kommune St. Gallen bis auf kleinere Abweichungen sowohl in ihrer Größe als auch in ihren Haushaltskennzahlen (durchschnittl. Einwohner pro Haushalt, Anteile der unterschiedlichen Haushaltsgrößen) dem Schweizer Durchschnitt entspricht, scheint die Anwendung der Durchschnittsdaten in diesem Fall sinnvoll. Zudem hat St. Gallen städteigene Anlagen zur Müllentsorgung, so dass die vollständigen Angaben über die Entsorgung aus diesem Bereich kommen konnten. Die Autoren betonten, dass die Bilanzierung aufgrund der aufwendigen Datengewinnung (z.B. auch Müllanalyse) mit hohem zeitlichen und finanziellem Aufwand verbunden war. Um diesen Aufwand zu reduzieren, müsse eine jährliche Fortschreibung der Bilanz durch die Implementierung einer Stoffbuchhaltung erleichtert werden. Diese Buchhaltung solle zunächst für die Betriebe auf freiwilliger Basis eingeführt werden. Die Autoren schlagen hier die Brücke zu den betrieblichen Umweltbilanzen und den Produktökobilanzen, deren Datensätze sich auf kommunaler Ebene verknüpfen ließen. Es wird außerdem hervorgehoben, dass im Bereich Wasser- und Stromversorgung eine Stoffbuchhaltung schon etabliert sei. Baccini et al. (1993) schlagen für den Bereich der Privathaushalte die Einbeziehung der Marktforschung vor. Erhebungen in diesem Bereich könnten zielgerichtet für die Datengewinnung für eine regionale Bilanz ausgerichtet werden. Diese Art der Datenerhebung erscheint realistischer als die Forderung nach einer Stoff- und Energiebuchhaltung für die Haushalte.

Die Untersuchung zeigte, dass die Privathaushalte mit zwei Drittel die Güterflüsse in die städtische Entsorgung dominieren. Es wurde gezeigt, dass die Stadt selber keine signifikante Kreislaufwirtschaft aufweist, sondern als reiner „Durchflussreaktor“ wirkt, der auf ein weit gefasstes Umland für die Ver- und Entsorgung angewiesen ist.

Die Ergebnisse aus der Studie zeichnen das Bild einer für die Schweiz typischen Stadt. Es können nur Systeme bilanziert werden, die typische Strukturen aufweisen und für die man daher Durchschnittswerte heranziehen kann. Eine Städte- oder Regionsspezifische Datengrundlage fehlt bisher.

Am Beispiel der Stadt Wien entstand eine Stoffhaushaltsstudie, die umfassend sowohl die gewerblichen als auch privaten Akteure betrachtete (Daxbeck et al., 1996). Zunächst wurde eine Bilanz der Güter Wasser, Energieträger, Produktions- und Konsumgüter und der Baumaterialien aufgestellt. Aufbauend darauf entstanden Stoffbilanzen für Kohlenstoff, Stickstoff und Blei.

Abb. 18: Güterflüsse in der Stadt Wien. Aus Daxbeck et al. (1996).



Die Güterflüsse durch die Privathaushalte basierten auf österreichspezifischen Daten und, wo diese lückenhaft waren, auf den Daten aus der oben beschriebenen Schweizer Studie der Stadt St. Gallen. Outputseitig konnte die Müllmenge, die von der stadt-eigenen Müllverbrennungsanlage registriert wurden, verwendet werden. Für die Privathaushalte lagen Wien-spezifische Daten über die getrennt gesammelten Abfälle vor. Die eingesetzte Restmüllmenge pro Einwohner basiert auf folgender Abschätzung: Für Wien wurde ein pro Kopf Restmüllmenge von 357 kg pro Jahr errechnet. Um die darin enthaltene Menge gewerblichen Restmüll auszuklammern, wurden der Österreichischen Statistik Restmüllmengen aus einer ländlich geprägten Region entnommen und daraus mittels plausibler Annahmen die Restmüllmenge für Wien bestimmt. Für die Gewerbeabfälle, die von privaten Entsorgern nicht in Wien-eigenen Entsorgungseinrichtungen abgegeben wurden, und somit statistisch nicht erfasst wurden, wurde die Entsorgung oder Wiederverwertung außerhalb der Stadt Wien angenommen, d.h. diese Abfallmengen wurden aus dem System exportiert.

Eine Besonderheit der Wiener Güterbilanz bestand in der Verfügbarkeit der regionalen Industrie- und Gewerbestatistik, die aus der österreichweiten Statistik entnommen wurden. Sämtliche Güter, die statistisch erfasst wurden und als Mengenangaben vorlagen, konnten in der Studie berücksichtigt werden. Monetäre Angaben wurden nicht umgerechnet. Die Ergebnisse wurden schließlich aus Datenschutzgründen nur aggregiert veröffentlicht.

Besonders problematisch war die Datenerfassung im Bereich Verkehr. Sowohl für den Güter- als auch für den Individualverkehr sollte der Energieverbrauch verbrauchsbezogen bestimmt werden. Dieser Ansatz soll den durch Wien induzier-

ten Treibstoffverbrauch innerhalb und außerhalb der Stadt berücksichtigen. Da die nötigen Fahrstatistiken nicht vorhanden waren, konnte die Güter- und Stoffflüsse nicht konsistent betrachtet werden. Dieser Bereich scheint somit für eine kommunale Energie-Bilanz nicht geeignet zu sein.

Auch in dieser Studie wurde nicht nach konsumierten Gütern unterschieden, die innerhalb des Systems produziert wurden bzw. die von außerhalb importiert worden sind. Im Modell wurden sämtliche Gütereinputs zunächst in einen Prozess „Verteilung von Gütern“ importiert und anschließend auf die Bereich Industrie, Gewerbe und Dienstleistungen (IGD) oder Privathaushalte verteilt. Dieser fiktive Prozess diente der übersichtlichen Darstellung und Verteilung der Güter im Modell.

5.2 Vergleich mit der vorliegenden Studie

Der Ansatz bei der vorliegenden Studie berücksichtigt sowohl die natürlichen als auch die anthropogenen Komponenten des Wasserhaushaltes. Trotz der Betonung anthropogener Aspekte soll das Zusammenspiel und die wechselseitige Beeinflussung aller Systemkomponenten betrachtet werden.

Gezielte Messungen und Erhebungen waren für die oben beschriebenen Studien wesentliche Bestandteile, die zusätzlich einen hohen Untersuchungsaufwand bedeuteten. In der Heidelberger Studie wurde bewusst auf diese Untersuchungen verzichtet, denn es sollte geprüft werden, wieweit vorhandene Daten für die Güterbilanzen ausreichen.

In den beiden oben beschriebenen Untersuchungen wurden die gesamten Güterflüsse durch die Stadt bzw. die Privathaushalte einer Stadt betrachtet. Durch die Wahl von zwei unterschiedlichen Gütern bei der Heidelberger Bilanz wurde deutlich, wie unterschiedlich die Schwierigkeiten in der Datenakquisition und –verfügbarkeit bei einem öffentlichen Gut wie Wasser und bei privaten Wirtschaftsgütern wie Papier ist.

Die Datenlage war für alle Studien recht ähnlich. Die Wiener Forschungsgruppe konnte zusätzlich Originaldaten aus der österreichischen Industrie- und Produktionsstatistik kommunal (auf Wien bezogen) auswerten. Heidelberg verfügt als Kommune nicht über den vollständigen Datensatz über Beschäftigungs- oder Umsatzzahlen, die Produktionsmengen und das Abfallaufkommen der Betriebe (<20 Beschäft.) im Stadtgebiet. Diese Daten bekommt das Statistische Landesamt direkt von den Betrieben und unterliegen der Geheimhaltung, die für betriebliche Daten im Landesstatistikgesetzes §16 und im Bundesstatikgesetzes §14 verankert ist. Sobald die Datenquelle weniger als drei Betriebe enthält, unterliegt sie dem Datenschutz. Auch die Kommunen haben keinen Zugriff auf die Originaldaten, sondern verfügen nur über den Datensatz, der ihnen von den Statistischen Landesämtern zu Verfügung gestellt wird. In Heidelberg besteht von Seiten der Wirtschaftsförderung z.B. nach deren Auskunft auch kein Interesse an den genauen Datensätzen aus dem Bereich des Verarbeitenden Gewerbes, da Heidelberg eine Dienstleistungsregion ist. Das Beispiel der Stadt Wien zeigt aber deutlich, dass auch in einer Dienstleistungsregion die Stoffströme die vom Produzierenden Gewerbe ausgehen von großer Bedeutung sein können (Daxbeck et al. ,1996).

Die Stoffströme, die mit den Dienstleistungen einer Region verbunden sind, können bislang nur lückenhaft quantifiziert werden. Es wurde versucht, die Inputs in diesen Gewerbebereich auf Basis der bundesweiten Statistik für Heidelberg zu generieren. Für diese Grundlage gilt jedoch schon, dass selbst auf Bundesebene diese Flüsse nur schwer bestimmbar sind.

5.3 Bilanzgrenzenwahl und Datenverfügbarkeit

Für das Gut Wasser lagen im anthropogenen Bereich genügend Daten vor. Die Kommune verwaltet ihre Wasserressourcen selbst und verfügt deswegen über eine gute Datengrundlage. Eine Ausnahme stellten die Daten zum branchengenauen Angaben über den Wasserverbrauch dar. Hierbei sind in der Regel die Wasserversorgungsunternehmen die geeigneten Ansprechpartner.

Die geogenen Wasserflüsse sind wesentlich aufwendiger zu bestimmen. Für Heidelberg gibt es zum Beispiel nur wenig Informationen über den Neckarabfluss. Pegelmessungen und die Abflussmessung am Karlstor werden regelmäßig durchgeführt. Für die Bilanz wäre eine relevante Größe die Menge des gesamten Oberflächenwasserabflusses, also in der Differenz zwischen dem in die Region hineinfließenden und dem das System verlassenden Neckarwasser. Für ein Stadtgebiet wie Heidelberg und einen Fluss von der Größe des Neckars ist die Abflusszunahme im Bilanzgebiet gegenüber dem Gesamtabfluss sehr gering. Da Abflussmessungen einen relativ großen Fehlerbereich (10-20%) aufweisen, liegt der oberirdische Gesamtabfluss von Heidelberg möglicherweise innerhalb dieses Fehlerbereichs.

Daraus ergibt sich wiederum das Problem, das ohne die Kenntnis des oberirdischen Abflusses nicht die Verdunstung bestimmt werden kann. Für deren Berechnung gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen kann durch die Verwendung detaillierter Niederschlags- und Temperaturdaten und Angaben zur Flächennutzung (Zusammensetzung der Vegetation) die Verdunstung errechnet werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit mittels der Wasserhaushaltsgleichung ($N-E=A$) die Verdunstung für ein Gebiet ermittelt werden. Letzteres stellt die einfachste Möglichkeit dar, für die aber Niederschläge und Abfluss bekannt sein müssen.

Eine Kommune stellt für hydrologische Bilanzen ein sehr kleines Gebiet dar. Je kleiner, desto weniger genau werden die Mess- und Rechenergebnisse für eine natürliche Wasserbilanz sein, bei der die Flüsse in der Regel große Dimensionen umfassen.

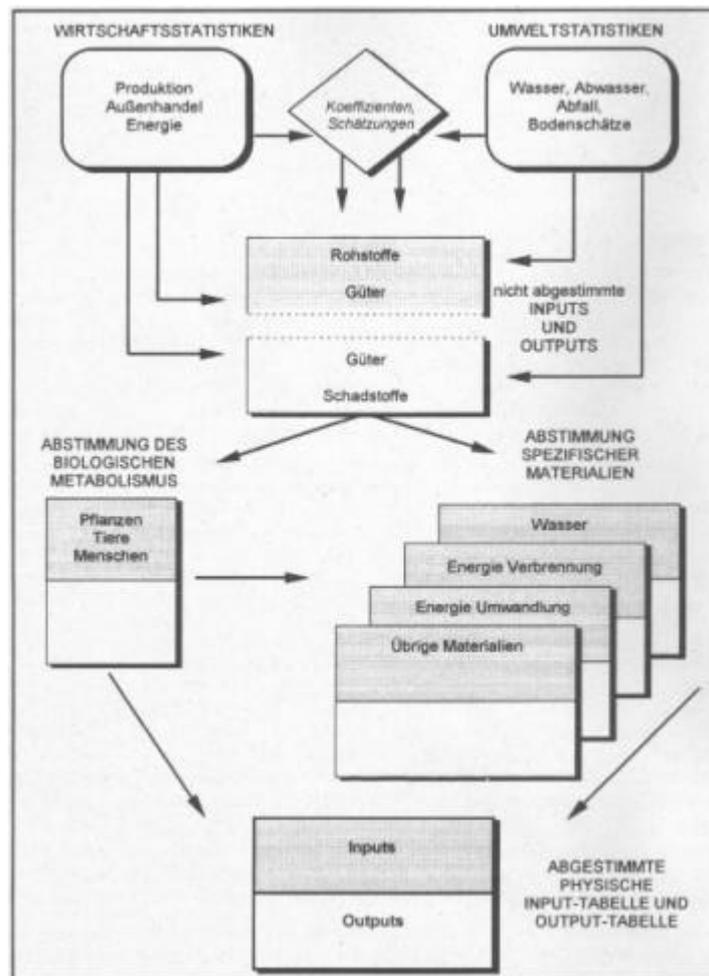
Es stellte sich heraus, dass die Bereitschaft der Kommune zur Unterstützung einer solchen Bilanz zwar notwendig ist, aber die Datenakquisition trotzdem problematisch bleibt, da die vorhandene Statistik zum großen Teil nicht ausreicht.

5.4 Physische IO-Tabellen

Eine andere Herangehensweise als die Stoffstromanalyse stellen die Materialflussrechnungen des Statistischen Bundesamtes dar, die analog zur volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung die Aktivitäten der inländischen Wirtschaft und der privaten Haushalte widerspiegeln:

Die Physischen Input-Output-Tabellen (Stahmer et al., 1997) stellen einen Baustein der Umweltökonomischen Gesamtrechnung dar. In Anlehnung an die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung wurden hier die durch die deutsche Wirtschaft und die Privathaushalte induzierten Materialströme sichtbar gemacht. Dabei wurde eine Erweiterung des Schemas für die monetären IO-Tabellen durch Hinzunahme des Naturvermögens vorgenommen: Eine Besonderheit der physischen Materialflussrechnung besteht darin, dass die Entnahme von Rohstoffen aus dem Naturvermögen und die Abgabe von Rest- und Schadstoffen an die Natur dargestellt wurde. Dies bedeutet, dass die Schnittstellen zwischen natürlichem und anthropogenem Stoffhaushalt enthalten sind.

Abb. 19: Schema der Erstellung von physischen Input-/Output-Tabellen. Aus: Stahmer et al. (1997).



Generell wurden für die physischen Input-Output-Tabellen 49 Gütergruppen und 59 Produktionsbereiche betrachtet. Ein Teil der Tabellen stellen den Güterinput in die Produktionsbereiche dar, ein zweiter die Güteroutputs. Daneben gibt es noch die Materialverflechtungstabellen, die die Herkunft und den Verbleib der gesamten Güteroutputs der einzelnen Produktionsbereiche aufzeigen. Diese drei Tabellenarten wurden zusätzlich getrennt nach Wasser, Energie und den übrigen Gütern erarbeitet.

Der gesamte Datensatz der Tabellen stellt das Ergebnis einer umfangreichen Datenauswertung und der Umrechnung von monetären Daten in Mengenangaben dar (Abb. 19). Im Wesentlichen stützten sich die Berechnungen auf folgende Grundlagen:

- Die Außenhandelsstatistik der Bundesrepublik, die zum großen Teil Mengenangaben über die im- und exportierten Güter enthielt. Hieraus stammen auch viele Bezugsgrößen, die zur Umrechnung einzelner Gütergruppen von monetären in physische Daten dienten.
- Die bundesweite Abfallstatistik, die detaillierte Mengenangaben der Unternehmen mit mehr als 20 Beschäftigten enthält. Für kleine Unternehmen wurden Zuschätzungen vorgenommen.
- Die Aufteilung der Güteroutputs der Produktionsbereiche auf die anderen Produktionsbereiche erfolgte mit Hilfe der monetären IO-Tabellen, wobei für den Preisunterschied einzelner Güter zwischen unterschiedlichen Abnehmern korrigiert wurde.
- Die bundesweite Förderstatistik für Rohstoffe und mitgeförderten Erdaushub diente zur Berechnung der Entnahmen aus dem Naturvermögen.
- Wasser- und Abwasserstatistiken waren die Quelle für die Erstellung der Untertabelle Wasserflüsse in der BRD.

Für den Bilanzabgleich wurden bei den PIOT Ab- bzw. Zuschätzungen und Verschiebungen zwischen Produktionsbereichen vorgenommen. Unsicherheiten bestehen zum Beispiel über die Materialflüsse, die mit Dienstleistungen verbunden sind. Im Wesentlichen wurde auf eine nationale Verzehrstatistik zurückgegriffen, die den Güterumsatz in der Gastgewerbebranche beschreibt. Insgesamt bleiben die Angaben in diesem Bereich aber eher unvollständig.

Die wirtschaftlichen Aktivitäten werden in umfangreichen Statistiken dokumentiert. Zur Analyse von Stoffflüssen eignen sie sich jedoch nur bedingt. Es müssen wie im Fall der Input-Output-Tabellen aufwendige Umrechnungen und Abschätzungen durchgeführt werden um Materialströme zu generieren. Um die Quantifizierung von Materialflüssen zu erleichtern ist es sinnvoll die Datenerhebung diesen Anforderungen anzupassen. Zusätzlich zu den Umweltstatistiken um Bereich Abfälle, Rohstoffentnahmen und Emissionen müssten die Materialflüsse bezogen auf die Wirtschaftsbereiche als Mengenangaben dokumentiert werden.

Eine Übertragung dieser Methode auf eine Kommune erscheint nicht angemessen. Das regionale System unterscheidet sich vom nationalen erheblich, nicht nur in der Größe sondern auch darin, dass keine Erhebungen über die Güterin- und -outputs an seinen Grenzen erfolgen, d.h. das Äquivalent zur Außenhandelsstatistik für die nationale Ebene ist im Kommunalen Bereich nicht vorhanden. Eine lokale Auswertung von Bundesstatistiken über die Produktion und Abfallproduktion im gewerblichen Bereich, die prinzipiell durchführbar ist, scheitert an den gesetzlichen Schutz von betrieblichen Daten.

5.5 PIOT als Basis für generische Daten

Für die Papierbilanz Heidelberg wurden die nationalen Materialflüsse als Grundlage generischer Datensätze benutzt. Die Bezugsgröße für die Generierung stellten die Beschäftigtenzahlen einzelner Produktionsbereiche dar.

Probleme ergaben sich daraus in mehrfacher Hinsicht. Zum einen sind die Materialverflechtungen nicht detailliert nach Materialarten in den physischen Input-Output-Tabellen dokumentiert, sondern zeigen nur, in welche Produktionsbereiche der gesamte Output eines Produktionsbereiches fließt. Für die Papierbilanz Heidelberg bedeutete dies, dass die Verflechtung der Produktionsbereiche untereinander nicht betrachtet werden konnte. Ein weiteres Problem zeigt das Beispiel des Papierinputs in den Bereich Papier-, Verlags- und Druckereigewerbe in Heidelberg auf. Es wurde deutlich, dass die berechneten Flüsse zwar von lokalen Akteuren ausgelöst werden, aber nicht unbedingt räumlich an diese gebunden sind. Das heißt, die generierten Daten beziehen sich nicht zwangsläufig auf den Raum Heidelberg.

Ein weiterer Punkt, der bei der Vorgehensweise beachtet werden muss ist, dass alle Werte bundesdeutsche Durchschnitte angeben. Die Unterschiede von Kommunen und die Abweichungen vom Durchschnitt werden nicht genügend berücksichtigt, so dass eine Charakterisierung des kommunalen Güterflüsse, die das Ziel einer regionalen Bilanz darstellt, nicht gelingen kann.

Daher scheint die Methode der Generierung von kommunalen Güterflüssen auf Basis der bundesdeutschen Werte wenig geeignet, um kommunale Bilanzen aufzustellen.

6 Fazit

Die wirtschaftspolitische Entwicklung der letzten Jahre ist von Privatisierung und Deregulierung geprägt. Dies hat auch für die Umweltpolitik eine Bedeutung. Ökologisch relevante Stoffströme unterliegen immer weniger der direkten staatlichen Planung oder Einflussnahme. Beispiele dafür sind das Kreislaufwirtschaftsgesetz, das die Entsorgung den Betrieben selbst überlässt und privatwirtschaftlich eine Kreislaufwirtschaft aufzubauen versucht. Weiterhin führen die Marktöffnung in Europa und die Globalisierung zu grenzüberschreitenden Güterströmen. Bedauerlich ist in diesem Zusammenhang, dass damit nicht nur die Materialströme dereguliert werden, sondern der Staat sich in diesem Zuge teilweise auch aus der Berichterstattung und statistischen Erfassung zurückzieht, z.B. im Transportgewerbe oder in der Abfallwirtschaft. Er verliert damit das Wahrnehmungsorgan zu überprüfen, ob die privatwirtschaftliche Variante z. B. einer Kreislaufwirtschaft den erwünschten Erfolg im Umweltschutz hat oder nicht (Schmidt et al., 2000).

Auf diese Weise wird teilweise auch die Bestrebung konterkariert, bis auf die lokale Ebene hinunter nachhaltig zu wirtschaften und dies auch zu belegen. Nachhaltiges Wirtschaften muss sich zwangsläufig mit dem Ressourcenverzehr auseinandersetzen, mit der Leistungsbilanz, aber auch mit der Im- und Exportbilanz eines Wirtschaftsraumes. Während dies auf nationaler Ebene, z.B. mit PIOT, noch möglich ist, fehlen dazu auf lokaler oder regionaler Ebene fast alle Voraussetzungen.

Dabei wäre es methodisch sogar möglich, ein räumlich abgegrenztes aber offenes System in seinen Stoffströmen abzubilden. Verschiedene Autoren haben dies bereits versucht (z.B. Daxberg et al. 1996, Baccini et al. 1996). In der vorliegenden Untersuchung wurde hierzu die Methode der Stoffstromnetze verwendet, die sich als tauglich erwiesen hat, komplexe Stoffstromsysteme zu modellieren und dort unterschiedliche Informationen einfließen zu lassen.

Der Vorteil der Stoffstromnetze liegt dabei in seinem pragmatischen Vorgehen, Teilsysteme als gekapselte Submodelle abzubilden und – wie in der Realität – mittels der Stoff- und Energieströme miteinander zu verbinden. Die Submodelle können dabei unterschiedlich komplex sein. Sie können einfache Beziehungen aufgrund statistischer Erhebungen (z.B. Verbrauchsziffern einer Konsumentengruppe) enthalten, sie können aber auch komplizierte Modelle, etwa eine Grundwassermodellierung, enthalten. Letzteres wurde in der vorliegenden Studie einbezogen, allerdings in einer parametrisierten Form. Neue softwaretechnische Entwicklungen, z. B. der COM-Ansatz in der Microsoft-Welt, ermöglichen künftig die direkte Einbindung solcher Submodelle in eine Art Metamodell, das durch ein Stoffstromnetz abgebildet wird.

Mit Stoffstromnetzen kann so auch eine Brücke zwischen der Modellierung geogener und anthropogener Systeme geschlagen werden. Am Beispiel des Wasserhaushalts der Stadt Heidelberg wurde gezeigt, dass es im Prinzip möglich ist, ein hochkomplexes Modell – den Grundwasserhaushalt – mit den zivilisatorischen Wasserströmen der Stadt zu verbinden und Zusammenhänge, z.B. die Auswirkung von Verbrauchssteigerungen auf die Entnahme in verschiedenen Grundwasserlei-

tern aufzuzeigen. Die Stoffstrommodellierung kann damit im Prinzip dazu beitragen, den stofflichen „Metabolismus“ eines Wirtschaftssystems zu verstehen, Handlungsbedarf und ggf. Eingriffsmöglichkeiten zu identifizieren.

Die Nachteile, die sich mit dieser Stoffstrommodellierung verbinden, liegen fast alle im Bereich der Datenverfügbarkeit bzw. der mangelnden Genauigkeit der darstellbaren Zahlen. So werden geogene Modelle selten für politisch-administrativ gezogene räumliche Grenzen aufgestellt, sondern orientieren sich z.B. an geologischen oder ökologischen Kriterien. Die Übertragung solcher Modelle auf Stadt- oder Landkreisgrenzen durchbricht den Modellcharakter im Sinne einer präskriptiven Modellierung, d.h. die Modellierung z. B. der Grundwasserströme muss in einem größeren Subsystem, etwa dem Rheingraben, erfolgen, die Auswirkungen können dann in einem kleineren System, etwa Heidelberg, dargestellt und in eine Heidelberger Wasserbilanz eingespielt werden.

Während diese geogenen Systeme sich im vorliegenden Fall im Prinzip abbilden ließen, steht bei den anthropogenen Systemen der Datenmangel im Mittelpunkt. So konnte z.B. im Bereich des Wasserhaushalts der Verbrauch nicht detailliert nach Nutzergruppen unterschieden werden. Entgegen ursprünglichen Erwartungen existierten in Heidelberg keine branchenspezifischen Daten. Sie hätten erst erhoben oder durch Auswertungen aufwendig erzeugt werden müssen. Auch statistische Erhebungen nützten hier nur begrenzt, da sie i.d.R. nicht der Stadt selbst zur Verfügung stehen und nur in aggregierter Form von den Statistikämtern des Landes bzw. des Bundes zugänglich gemacht werden.

Es gibt hier die Möglichkeit, ein anthropogenes Modell so aufzubauen, dass bestimmte Kennziffern eines zu bilanzierenden Raumes – etwa Beschäftigtenzahlen oder Umsatz nach Branchen – verwendet werden und zusammen mit national und branchenspezifisch erhobenen Durchschnittswerten für den Verbrauch bestimmter Güter die gewünschten Verbrauchswerte im Bilanzraum geschätzt werden. Dieses Verfahren generischer Verbrauchsdaten befriedigt allerdings nur, um eine räumlich begrenzte Stoffstrombilanz „plausibel“ zu machen. Sie vernachlässigt den entscheidenden Sinn einer solchen räumlichen Bilanz, nämlich lokale Diskrepanzen in den Stoffströmen aufzuzeigen und damit Planung betreiben zu wollen. So soll eine städtische Güterbilanz nicht einfach ein herunterskaliertes Modell der nationalen Güterströme sein, sondern die Besonderheiten der Stadt aufgrund ihrer Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Infrastruktur einschließlich den Besonderheiten der individuellen Akteure (z.B. Stand der Technik in den Betrieben) berücksichtigen. Genau dies ist mit der Verwendung generischer Daten jedoch nicht möglich und würde umfangreiche lokale Erhebungen notwendig machen, die sich aber aus Aufwandsgründen ausschließen.

Am Beispiel der Papierbilanz wurde ein anderer Artefakt deutlich: Die Unterteilung der Wirtschaft in Branchen und der Bezug von physischen Stoffströmen auf wirtschaftliche Bezugsgrößen (Beschäftigte, Umsatz etc.) kann zu eklatanten Fehlinterpretationen führen. So müsste beispielsweise Heidelberg aufgrund seiner hohen Verlagsdichte einen erheblichen Verbrauch an Papier haben. De facto werden die Papierströme in Heidelberg jedoch gering sein, da die Verlagsprodukte nicht in Heidelberg produziert werden und nur rechnerisch in Heidelberg „entstehen“. Diese Fehlzusammenhänge von Güterströmen zu Verbrauchern (oder Produzenten) er-

gibt sich immer dann, wenn nicht von physischen, sondern von ökonomisch motivierten Daten ausgegangen wird. Im betrieblichen Bereich tritt so etwas z.B. bei Fremdfertigungen auf.

An dieser Stelle erscheint es plausibel, eine stärkere lokale Erhebung der Daten zu verlangen. In anderen Studien wurde immer wieder darauf hingewiesen, dass die Datenverfügbarkeit durch eine lokale/regionale Stoffbuchhaltung verbessert werden muss. Konkrete Vorschläge gibt es hierzu jedoch weniger. Dabei stellt sich die Frage, an welchen Prozessen bzw. Akteuren diese Stoffbuchhaltung ansetzen kann und wie realisierbar und sinnvoll die Durchführung ist.

Der Aufwand solcher Erhebungen wäre immens und ließe sich nur rechtfertigen, wenn damit ein erheblicher Erkenntnisgewinn und eine Unterstützung in wichtigen (staatlichen) Planungsentscheidungen verbunden wären. Vor allem dürften nicht nur deskriptive Beschreibungen der Stoffströme erfolgen (etwa im Rahmen einer Umweltberichterstattung), sondern es müsste ein Systemverständnis erlangt werden, d.h. Modellbeschreibungen mit kausalen Zusammenhängen, mit denen z.B. Planungen in Form von Szenarien o.ä. antizipiert werden könnten. Dazu kommt die Frage, welche Informationen die Kommunalverwaltung tatsächlich braucht und welche Bereiche sie dann auch selbst beeinflussen kann.

So kann es durchaus von Bedeutung sein, eine kommunale Wasserbilanz zu entwickeln oder fortzuführen, wenn wichtige wasserwirtschaftliche Fragen in den Zuständigkeitsbereich der Kommune fallen. Oder wenn eine Kommune in einem speziellen Bereich gezielt lokal „wirtschaften“ will. Schon im Abfallbereich zeigte sich in den letzten Jahren jedoch eine Entregionalisierung der Entsorgung durch die Deregulierung im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und der Wertstoffe. Die Erfassung anderer Güterströme (z.B. Papier) macht auf lokaler Ebene – gemessen an dem Aufwand – noch weniger Sinn. Die Einflussmöglichkeiten auf diese wirtschaftlichen Tätigkeiten liegen i.allg. auf einer anderen räumlichen und staatlichen Ebene.

Damit wird allerdings wieder die Frage aufgeworfen, wie in unserem Wirtschaftssystem ein lokales nachhaltiges Wirtschaften – im Sinne des Ressourcenverzehr – überprüft und ggf. unterstützt werden kann. Die mangelnde Datenverfügbarkeit auf lokaler Ebene ist hier auch ein Indiz für die geringen Einflussmöglichkeiten kommunaler Verwaltungen auf wesentliche wirtschaftliche Stoffstromsysteme.

7 Literatur

Arbeitsgemeinschaft Regionale Ökobilanz (1997): Regionale Ökobilanzen für eine umweltgerechte und nachhaltige Raumnutzungsplanung auf mittlerer Maßstabsebene – Regional Ökobilanz im Landkreis Paffenhofen – Zwischenbericht II. August 1998.

Ayres, R.U., Simonis, U.E. (1993): Industrieller Metabolismus. FS II 93-407, WZB Berlin

Baccini, P. & H.-P. Brunner (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg ·Berlin ·Oxford.

Baccini, P.; Daxbeck, H.; Glenck, E. & G. Henseler (1995): METAPOLIS – Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt. Nationales Forschungsprogramm Stadt und Verkehr 34A. Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Abteilung nationale Forschungsprogramme.

Bilitewski, B. (1993): Mengenströme in der Papierindustrie 1992. Das Papier, 1993, Heft 10A, S. V88-V92.

Böning, J. & S. Brückl (1995): Regionalorientierte Ökobilanzierung. Uwf, 3. Jg. Heft 2, Juni 1995.

Brockhaus (1998): Die Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden. Bd. 21. 20. Aufl. Leipzig/ Mannheim

Brunner, P.H. (1992): Der regionale Stoffhaushalt – Methodik, Resultate und Folgerungen. Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 3/4. Ss. 57-66; Springer Verlag, Wien, New York.

Daxbeck, H.; Lampert, C.; Morf, L.; Obernosterer, R.; Rechberger, H.; Reiner, I. & Brunner, P.H. (1996): Der anthropogene Stoffhaushalt der Stadt Wien. Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Abfallwirtschaft, TU-Wien.

Detzel, A., Schmidt, M., Giegrich, J. (1997): Recycling von Papier – Ansätze zur Modellierung des Gesamtsystems und zur Allokation der Umweltwirkung. In: Schmidt, M., Häuslein, A. (Hrsg.): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung. Berlin/ Heidelberg. S. 211- 224

Diefenbacher, H.; Karcher, H.; Stahmer, C. & V. Teichert (1997): nachhaltige Wirtschaftsentwicklung im regionalen Bereich. Ein System von ökologischen, ökonomischen und sozialen Indikatoren. FEST – Forschungsstätte der evangelischen Studiengemeinschaft Heidelberg. Texte und Materialien: Reihe A, Nr. 42. September 1997.

Dyckhoff, H. (1994): Betriebliche Produktion. Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft. Berlin / Heidelberg

Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Schutz des Menschen und der Umwelt" (1994): Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bundestagsdrucksache 12/8260. Bonn

Girmond, Ch. (1997): Flussinfiltration in einen permotriassischen Festgesteinsaquifer. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie. Darmstadt, 1997.

Götttsching, L.; Hamm, U. & H.-J. Putz (1986): Altpapier – Studie über Marktanalyse und Schadstoff-Pfade. Institut für Papierfabrikation, Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt, April 1986.

Hamm, U.; Putz, H.-J. & L. Götttsching (1993) Studie über die Thermische Verwertung von Reststoffen aus der Altpapierverwertung und von Altpapierüberschüssen. Institut für Papierfabrikation, Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt, August 1993.

Heijungs, R. (1994): A generic method for the identification of options for cleaner products, *Ecological Economics* Vol. 10, S. 69-81

Heijungs, R. (1996): Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life cycle assessment, in: *J. Cleaner Prod.* Vol. 4, No. 3-4, S. 159-166

Henseler, G.; Scheidegger, R. & P.H. Brunner (1990): Die Bestimmung der Güter- und Stoffflüsse im regionalen Wasserhaushalt. Regionale Stoffhaushaltsstudie Unteres Büntztal – RESUB. Teilprojekt Wasser. EYWAG Dübendorf, Schweiz, Juni 1990.

Jäger, E. (1998): Einsatzmöglichkeiten von Stoffstromnetzen im Rahmen von Umweltbilanzen im kommunalen Maßstab. Diplomarbeit an der Universität Hamburg, FB Informatik

Kleijn, R.; Van der Voet, E. & U. De Haes (1994): controlling substance flows: the case of chlorine. *Leiden University. Environmental Management*, Vol 8 Nr. 4, pp. 523-542.

Köpcke, N.; Schnackenbeck, T. (1998): Eignung des Stoffstromnetzkonzeptes zur Modellierung regionaler Stoffhaushalte anhand der Software Umberto. Studienarbeit an der Universität Hamburg, FB Informatik

Leontief, W. (1966): *Input-Output-Economics*, New York, Oxford.

Matthes, G. & K. Ubell (1983): *Allgemeine Hydrogeologie und Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1.* Gebr. Bornträger. Berlin, Stuttgart 1983.

Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg, Der Hessische Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit & Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz (1987): „Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Rhein-

Neckar-Raum, Situation heute, Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen“, Stuttgart, Wiesbaden, Mainz 1987.

Möller, A. (1997): Berechnungsverfahren unter Umberto. In: Schmidt, M. u. Häuslein, A. (Hrsg.): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung. Berlin/ Heidelberg/ New York, S. 115 ff.

Möller, A. (2000): Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Bochum

Odum, E.P. (1991): Prinzipien der Ökologie. Heidelberg. Spektrum der Wissenschaft.

Pilz, H. (1996): Die Bedeutung von Papierflüssen und -kreisläufen für die CO₂- und CH₄-Emissionen in Österreich. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft. Wien, 1996.

v. Prittwitz, V. (1990): Das Katastrophenparadox. Elemente einer Theorie der Umweltpolitik. Opladen

Schmidt, M. (2000): Betriebliches Stoffstrommanagement. In: Dyckhoff (Hrsg.): Umweltmanagement. Berlin/ Heidelberg/ New York, S. 121 ff.

Schmidt, M. et al. (2000): Verkehrliche Auswirkungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. F+E-Vorhaben im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums. Heidelberg

Schmidt, M. (2001): Der Einsatz der COM-Schnittstelle für die Verknüpfung von Umberto mit Optimierungsmodellen aus dem Operations Research. Veröffentl. in Vorbereitung.

Schmidt-Bleek, F. (1993): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Berlin/Basel/Boston

Spengler, T. (1998): Industrielles Stoffstrommanagement. Berlin

Stadt Heidelberg (1997): Nachhaltiges Heidelberg. Für eine lebenswerte UmWelt. Darstellung und Bewertung bisheriger Aktivitäten der Stadtverwaltung und Vorschläge für eine lokale Agenda 21.

Stahmer, C, Kuhn, M. u. Braun, N. (1997): Physische Input-Output-Tabellen 1990. Band 1 der Schriftenreihe „Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen herausgegeben vom Statistischen Bundesamt“ .

Statistisches Bundesamt (1997): Abfallbeseitigung im produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993. Umwelt. Fachserie 19. Reihe 1-2. Verlag Metzler-Poeschel.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (1995): Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden-Württemberg 1995. Schriftl. Mitteilung, 1999.

Technologieberatung Grundwasser und Umwelt GmbH (TGU) (2000): Grundwasserbilanz Heidelberg. 98519. Koblenz, Februar 2000.

Temme, M. (1999): Hybride low level Petri-Netze in der Ökosystemmodellierung. Prototypische Entwicklung und Anwendungen. Diplomarbeit an der TU Braunschweig

Toussaint, D. (2000): mündl. Mitteilung bezügl. Projekt 11 309 3 „Materialfluss spezifischer Abfallarten und Abfallkennziffern bedeutender Bereiche“ am Fraunhofer Institut für Systemtechnik & Innovationsforschung.

Van der Voet, E. (1996): substances from cradle to grave – Development of a methodology for the analysis of substance flows through the economy and the environment of a region. Doctoral thesis, Leiden.

Vitousek, P.M. et al. (1986): Human appropriation of the products of photosynthesis. BioScience Vol. 36, 368-73

Anhang: Dokumentation der Netzmodelle

Die Netzmodelle sind als Import-/Export-Dateien zxp verfügbar und z.B. mit dem Programm Umberto lesbar. Dort sind dann auch alle Einzelprozesse und Transitionen dokumentiert und einsehbar. Im folgenden werden als Zusammenfassung die Netze und die Input-/ Outputbilanzen dokumentiert.

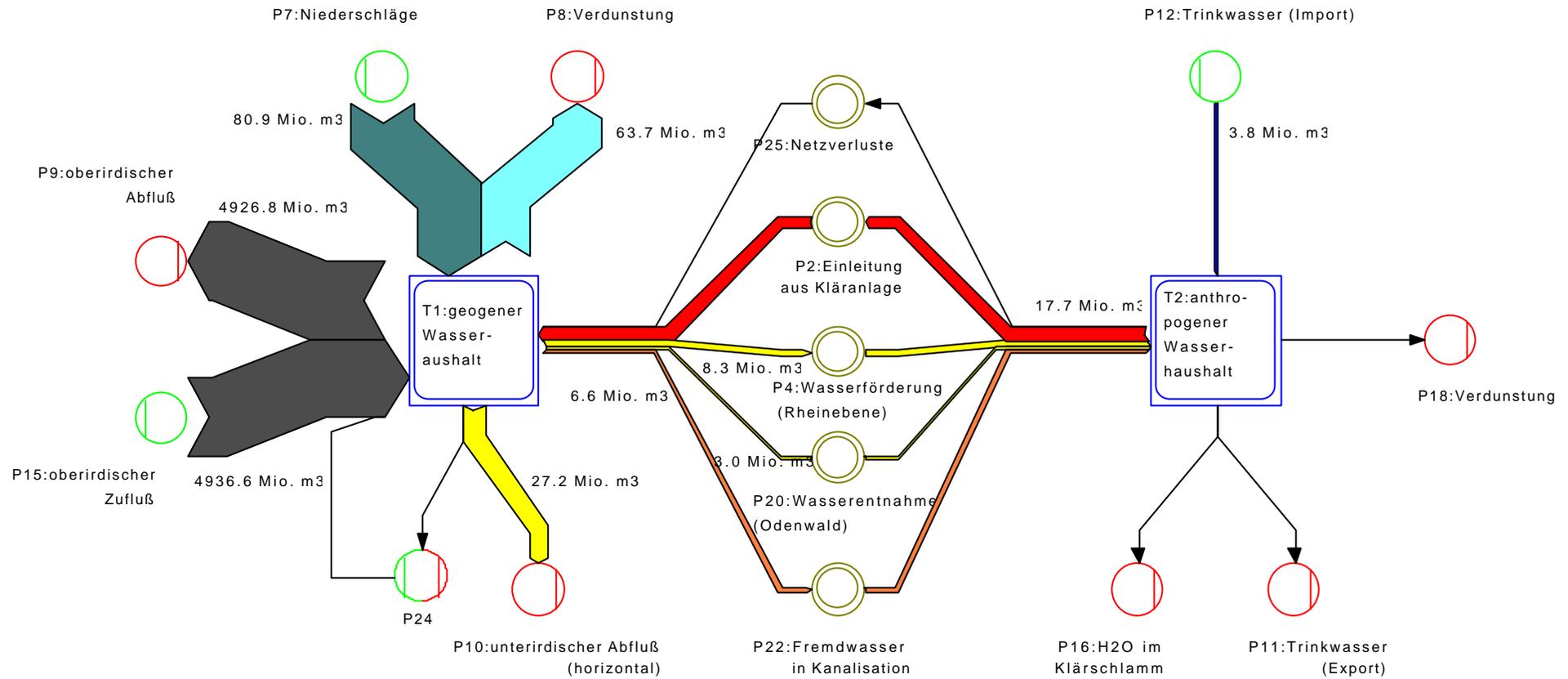
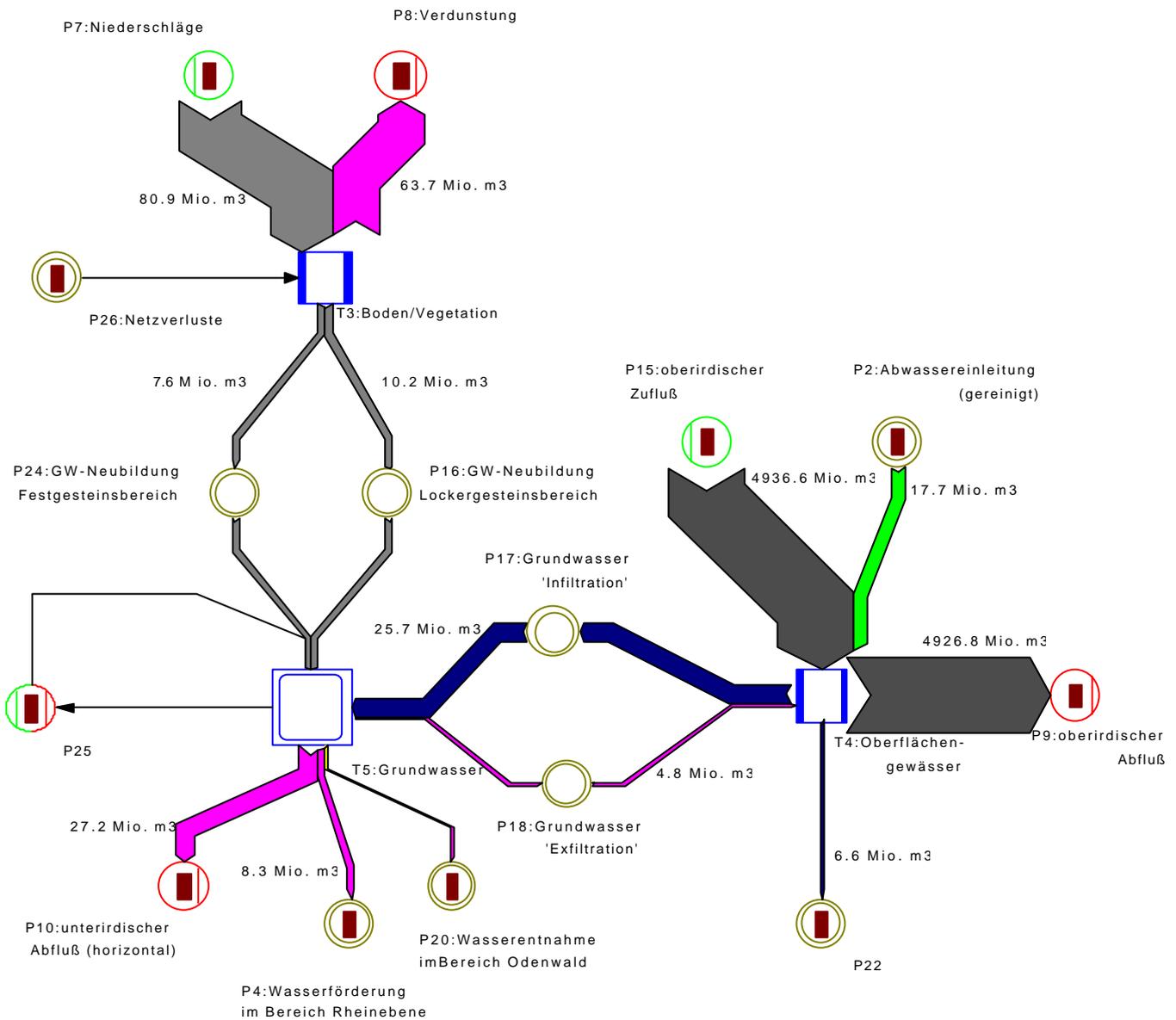


Abb. 20: Wasserbilanzmodell in der Grundvariante, oberste Ebene mit den aggregierten System geogenen und anthropogenen Ursprungs. Die straffierte Fläche zeigt an, dass die Flussmenge nicht maßstabsgetreu abgebildet wird (Overflow).

Input	Menge	Einheit	Output	Menge	Einheit
Niederschläge			Brauchwasser		
T1 geogener H ₂ O-Haushalt	80,9	Mio. m ³	T2 anthropogener H ₂ O-Haushalt	0,6	Mio. m ³
Oberflächenwasser			Grundwasser		
T1 geogener H ₂ O-Haushalt	4936,6	Mio. m ³	T1 geogener H ₂ O-Haushalt	27,3	Mio. m ³
Trinkwasser			Oberflächenwasser		
T2 anthropogener Haushalt	3,8	Mio. m ³	T1 geogener H ₂ O-Haushalt	4926,8	Mio. m ³
			Rohabwasser		
			T2 anthropogener H ₂ O-Haushalt	< 0,1	Mio. m ³
			Trinkwasser		
			T2 anthropogener H ₂ O-Haushalt	1,0	Mio. m ³
			Wasserdampf		
			T1 geogener H ₂ O-Haushalt	63,7	Mio. m ³
			T2 anthropogener H ₂ O-Haushalt	1,8	Mio. m ³
Summe	5021,3	Mio. m ³	Summe	5021,3	Mio. m ³

Tab. 10: Input-/Output-Wasserbilanz in der Grundvariante, oberste Ebene, unterschieden nach den beiden Bereichen (Transitionen T1 und T2) geogen und anthropogen.

Abb. 21: Wasserbilanzmodell in der Grundvariante, Ebene des geogenen Systems. Die straffierte Fläche zeigt an, dass die Flussmenge nicht maßstabsgetreu abgebildet wird (Overflow).



Tab. 11: Input-/Output-Wasserbilanz in der Grundvariante, Ebene des geogenen Systems.

Input	Menge	Einheit	Output	Menge	Einheit
Abwasser (gereinigt)	17,7	Mio. m³	Grundwasser	37,4	Mio. m³
T4 Oberflächengewässer	80,9	Mio. m³	T5 Grundwasser	4933,4	Mio. m³
Niederschläge	4936,6	Mio. m³	Oberflächenwasser	1,2	Mio. m³
T3 Oberflächengewässer	0,6	Mio. m³	T5 Grundwasser	63,7	Mio. m³
Oberflächenwasser			Wasserdampf		
T4 Oberflächengewässer			T3 Oberflächengewässer		
Trinkwasser			Summe	5035,8	Mio. m³
T3 Oberflächengewässer					
Summe	5035,8	Mio. m³			

Abb. 22: Wasserbilanzmodell in der Grundvariante, Ebene des Grundwassermodells.

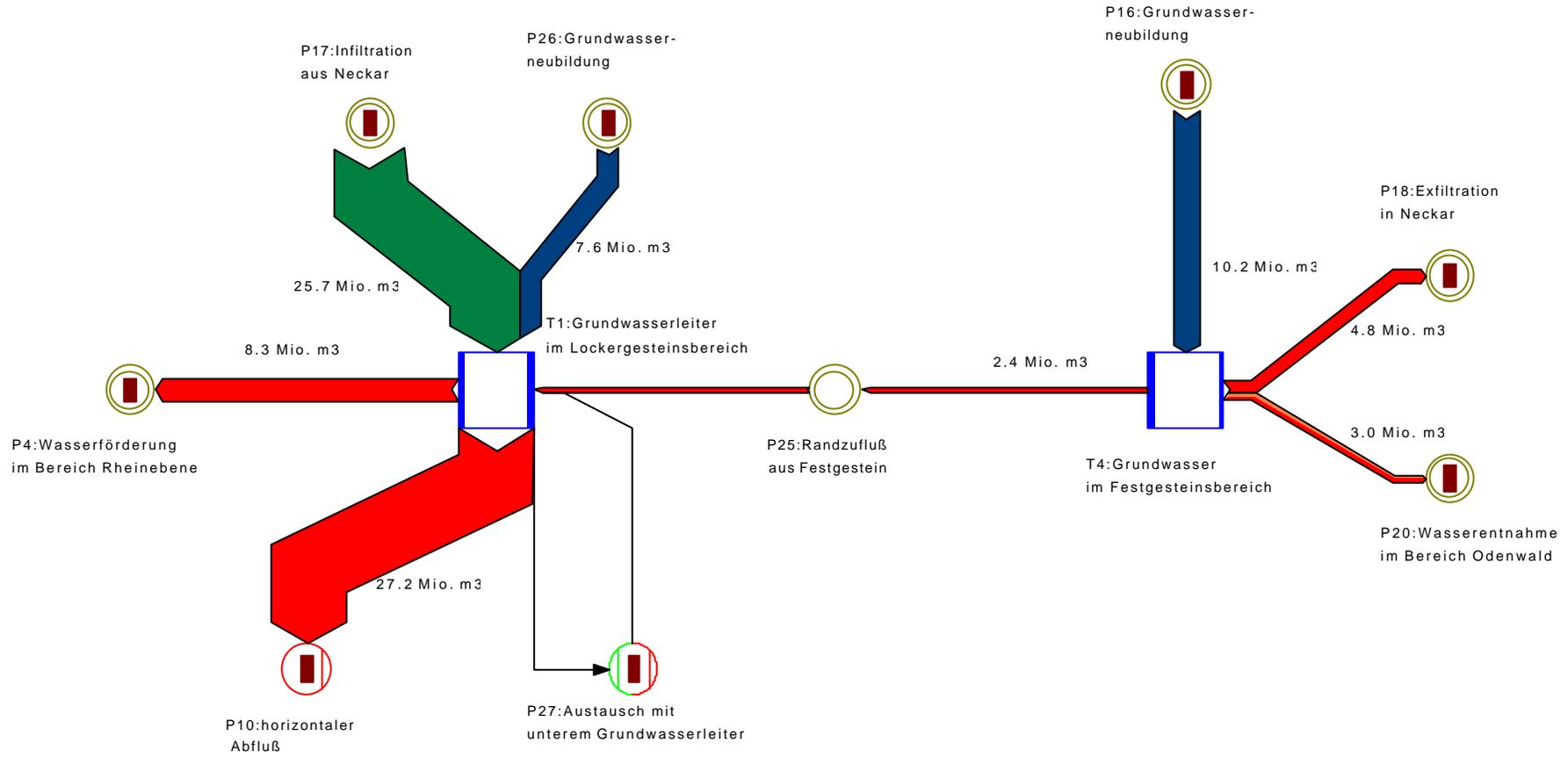
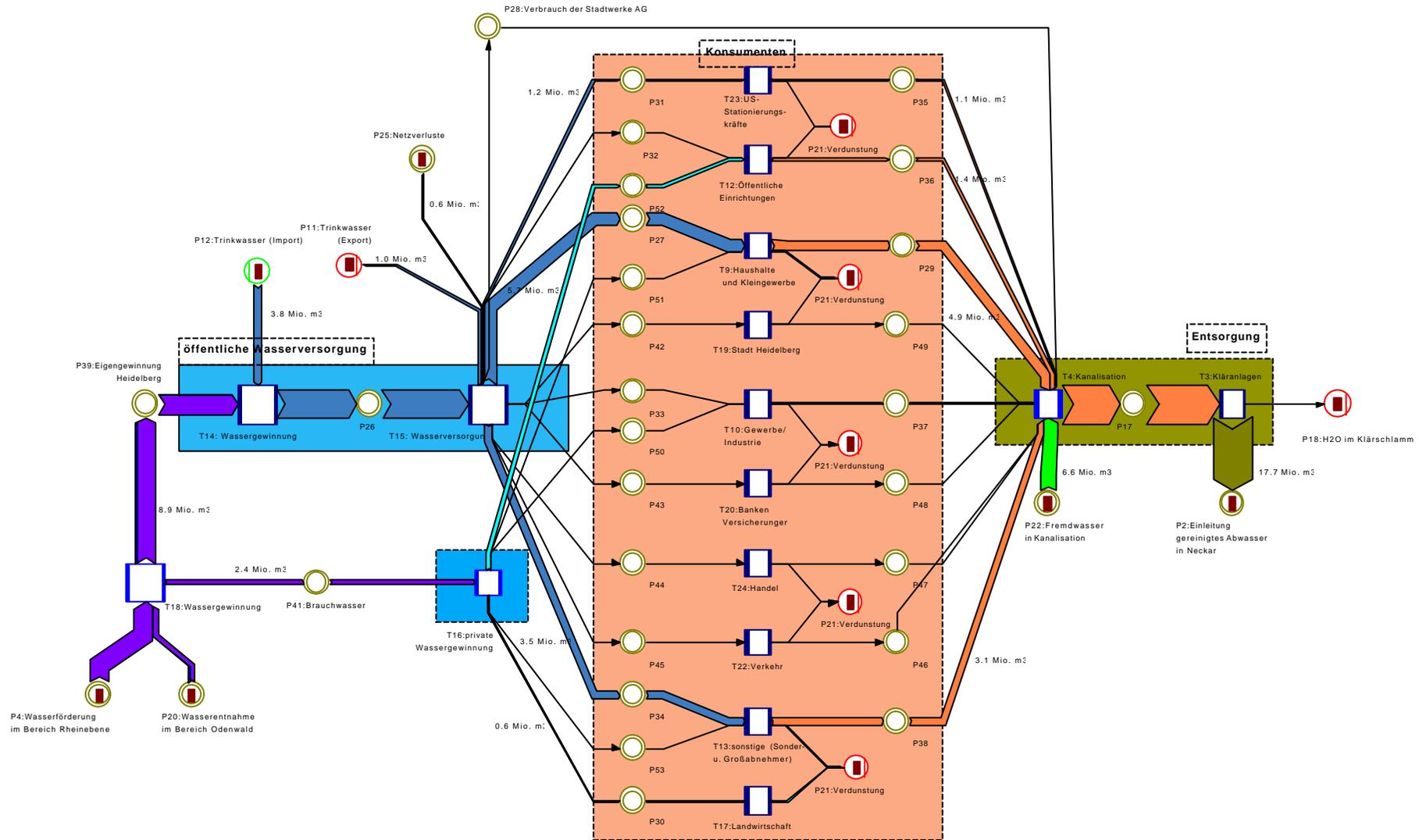


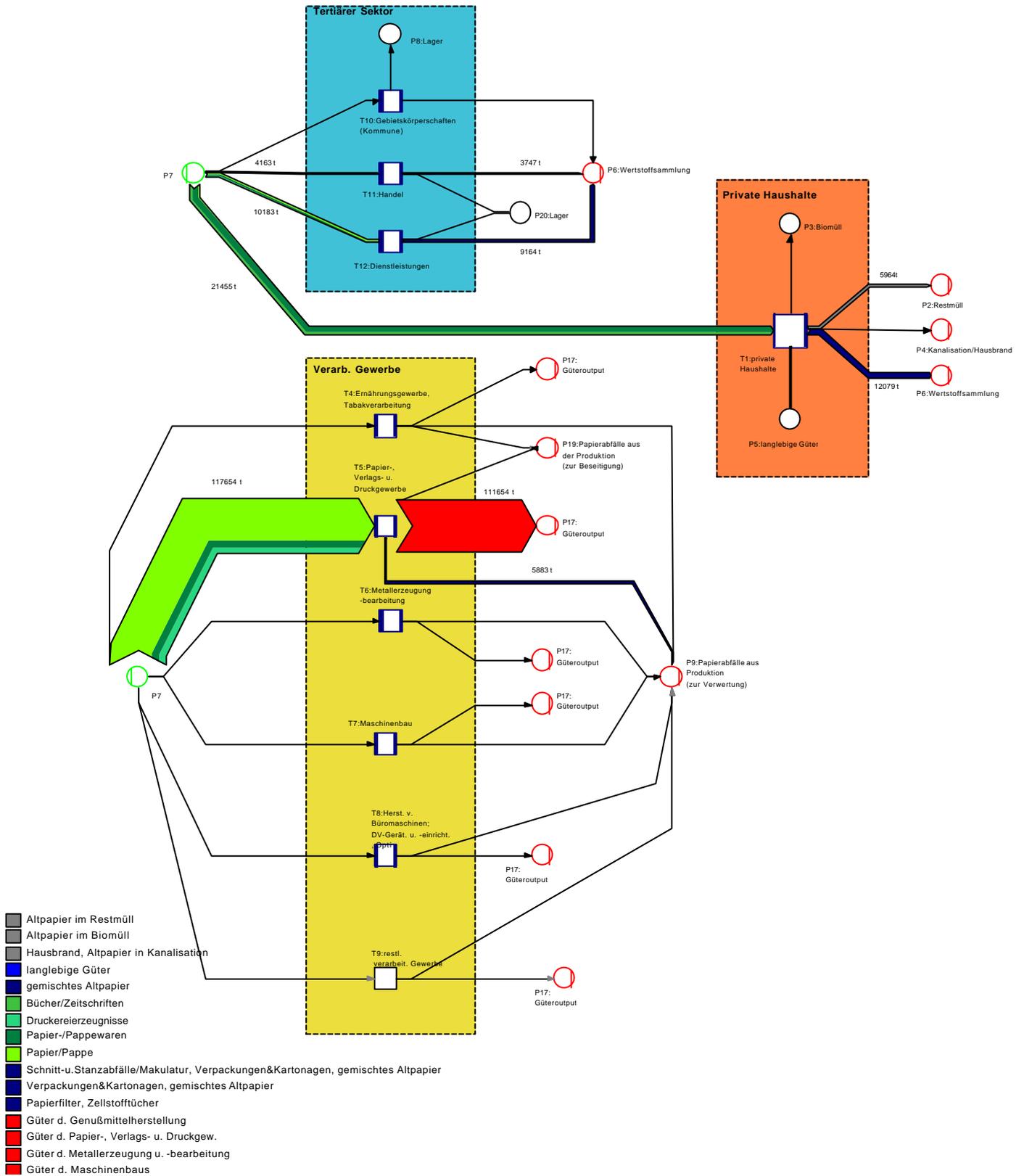
Abb. 23: Wasserbilanzmodell in der Grundvariante, Ebene des anthropogenen Systems.



Tab. 12: Input-/Output-Wasserbilanz in der Grundvariante, Ebene des anthropogenen Systems.

Input	Menge	Einheit	Output	Menge	Einheit
Grundwasser T18 anthropogen gefördert	10,1	Mio. m ³	Abwasser (gereinigt) T3 Kläranlagen	17,7	Mio. m ³
Oberflächenwasser T4 Kanalisation	6,6	Mio. m ³	Brauchwasser T17 Landwirtschaft	0,6	Mio. m ³
Quellwasser (Fö) T18 anthropogen gefördert	1,2	Mio. m ³	Rohabwasser T3 Kläranlagen	< 0,1	Mio. m ³
Trinkwasser T14 Trinkwassergewinnung	3,8	Mio. m ³	Trinkwasser T15 öffentl. Wasser	1,6	Mio. m ³
			Wasserdampf T9 Haushalte und Kleingew. T10 Gewerbe T12 Öffentliche Einr. T13 sonstige T19 Stadt Heidelberg T20 Banken & Versich. T22 Verkehr T23 US- Stationierte T24 Handel	0,8 0,1 0,2 0,5 < 0,1 < 0,1 < 0,1 0,2 < 0,1	Mio. m ³ Mio. m ³
Summe	21,7	Mio. m ³	Summe	21,7	Mio. m ³

Abb. 24: Papierhaushaltsmodell.



Tab. 13: Papierbilanz für das System Heidelberg

Input	Menge	Einheit	Output	Menge	Einheit
Bücher/Zeitschriften			Güter aus Papier		
T1 private Haushal	6771,1	t	Güter d. Genußmittelherstellung		
T4 Ernährungsgewer	573,9	t	T4 Ernährungsgewer	1084,3	t
T7 Maschinenbau	2,2	t	Güter d. Herst. von Büromasch. usw.		
T8 Herst. v. Bürom	0,1	t	T8 Herst. v. Bürom	1,1	t
T10 Gebietskörpersc	6,2	t	Güter d. Maschinenbaus		
T11 Handel	115,7	t	T7 Maschinenbau	717,7	t
T12 Dienstleistunge	504,0	t	Güter d. Metallherzeugung u. -bearbeitung		
Druckereierzeugnisse			T6 Metallherzeugung	48,6	t
T1 private Haushal	439,8	t	Güter d. Papier-, Verlags- u. Druckgew.		
T4 Ernährungsgewer	137,1	t	T5 Papier-, Verlag	111654,0	t
T5 Papier-, Verlag	13506,7	t	Papierabfälle		
T6 Metallherzeugung	21,1	t	nicht verwertbare Abfälle		
T7 Maschinenbau	155,8	t	Altpapier im Restmüll		
T8 Herst. v. Bürom	0,3	t	T1 private Haushal	5964,4	t
T10 Gebietskörpersc	1056,6	t	Hausbrand, Altpapier in Kanalisation		
T11 Handel	1116,5	t	T1 private Haushal	1351,6	t
T12 Dienstleistunge	2528,2	t	Papierfilter, Zellstofftücher		
Papier/Pappe			T5 Papier-, Verlag	35,3	t
T1 private Haushal	1767,9	t	verwertbare Abfälle		
T4 Ernährungsgewer	181,2	t	gemischtes Altpapier		
T5 Papier-, Verlag	87852,5	t	T1 private Haushal	12078,9	t
T6 Metallherzeugung	57,0	t	T4 Ernährungsgewer	37,6	t
T7 Maschinenbau	507,0	t	T5 Papier-, Verlag	470,6	t
T8 Herst. v. Bürom	0,5	t	T6 Metallherzeugung	3,1	t
T10 Gebietskörpersc	714,5	t	T7 Maschinenbau	49,5	t
T11 Handel	1523,2	t	T8 Herst. v. Bürom	0,1	t
T12 Dienstleistunge	4200,1	t	T10 Gebietskörpersc	1732,7	t
Papier-/Pappwaren			T11 Handel	3746,6	t
T1 private Haushal	12475,8	t	T12 Dienstleistunge	9163,9	t
T4 Ernährungsgewer	946,8	t	Schnitt-u.Stanzabfälle/Makulatur		
T5 Papier-, Verlag	16295,1	t	T4 Ernährungsgewer	2,5	t
T6 Metallherzeugung	10,5	t	T5 Papier-, Verlag	4706,2	t
T7 Maschinenbau	324,9	t	Verpackungen&Kartonagen		
T8 Herst. v. Bürom	0,7	t	T4 Ernährungsgewer	198,2	t
T10 Gebietskörpersc	148,1	t	T5 Papier-, Verlag	705,9	t
T11 Handel	1407,5	t	T6 Metallherzeugung	36,7	t
T12 Dienstleistunge	2950,8	t	T7 Maschinenbau	217,8	t
			T8 Herst. v. Bürom	445,7	t
Summe	158299,3	t	Summe	154452,9	t