

**Entwicklung eines Modellsystems zur Simulation der  
energiewirtschaftlichen und strukturellen  
Veränderungen einer verstärkten Kreislaufwirtschaft**

**Systemtechnische und ökonomische Modellierung  
am Beispiel des Stoffstroms „Papier“**

**Untersuchung im Auftrag des  
Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie**

**Förderkennzeichen 0329729**

**Carsten Nathani**

**Karlsruhe, im Februar 2000**



## **Vorwort**

Die Ergebnisse makroökonomischer Modelle für Industriestaaten werden nicht zuletzt von Mikro- und Ressourcenökonomern in Zweifel gezogen; denn die vielen Einflussfaktoren auf den industriellen Strukturwandel durch Prozessinnovationen, Energieträgerwechsel, Sättigungseffekte bei ausgewählten Produktgruppen, verstärktes Recycling ressourcenintensiver Stoffe und durch Außenhandelsveränderungen sind heute von großer Bedeutung. Diese Einflüsse eines langfristigen Wandels von einer heutigen Industriegesellschaft zu einer Kreislaufwirtschaft mit Merkmalen einer nachhaltigen Entwicklung müssen sich auch in den Strukturen makroökonomischer Modelle wiederfinden, um die Auswirkungen verschiedener ressourcenpolitischer Optionen auf die Wirtschaft angemessen prüfen zu können. Ein methodischer Weg zu dieser Aufgabe ist die Verknüpfung einzelner prozessorientierter Branchenmodelle mit Input-Output-Modellen und makroökonomischen Modellen. Der vorliegende Bericht will hierzu einen Baustein am Beispiel der Zellstoff- und Papierindustrie für die Bundesrepublik Deutschland für die Zeitperiode 1995 – 2020 beitragen. Diese Ergebnisse verbessern nicht nur die methodische Perspektive zwischen den Prozessmodellen und dem MIS-Modell der IKARUS-Modellfamilie, sondern können als Erfahrungs- und Datenquelle für andere Input-Output-Modelle und makroökonomische Modelle genutzt werden.

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit dem Bremer Energie Institut und mit Unterstützung des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung und dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung durchgeführt. Prof. Pfaffenberger (BEI) stellte für das Vorhaben eine überarbeitete Version des Input-Output-Modells MIS zur Verfügung und trug zur Diskussion methodischer Fragen und der Interpretation der Modellergebnisse ebenso bei wie Prof. Stäglich (DIW) und Stefan Vögele (ZEW). Den beteiligten Wissenschaftlern sei an dieser Stelle herzlich für die gute Zusammenarbeit gedankt. Gedankt sei auch Prof. Götsching (Institut für Papierfabrikation, TU Darmstadt), den Mitarbeitern des Verbandes deutscher Papierfabriken sowie von Papierunternehmen und Anlagenherstellern für die Unterstützung bei den Recherchen zur Papierkette.

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Jochem

Carsten Nathani

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329729 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>vi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>viii</b>
<b>1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Strukturwandel.....</b>	<b>4</b>
<b>3 Modellierung des technischen und strukturellen Wandels in einer Kreislaufwirtschaft durch die Kopplung eines Input-Output- Modells mit einem Stoffstrommodell .....</b>	<b>11</b>
3.1 Der technische und strukturelle Wandel in Input-Output- Modellen .....	11
3.1.1 Input-Output-Modelle .....	11
3.1.2 Bestimmungsgründe für die Veränderung der Inputkoeffizienten in einem Input-Output-Modell .....	13
3.1.3 Bestehende Ansätze zur Abbildung und Projektion des technischen und strukturellen Wandels in Input-Output- Modellen .....	15
3.1.4 Technischer und struktureller Wandel im Input-Output- Modell MIS .....	17
3.2 Stoffstrommodelle.....	19
3.3 Ansatz zur Kopplung eines Stoffstrommodells mit einem IO-Modell.....	20
3.3.1 Grundidee der Modellkopplung .....	21
3.3.2 Kopplungsschritte .....	22

<b>4</b>	<b>Aufbau eines Stoffstrommodells der Wertschöpfungskette „Papier“</b> .....	<b>26</b>
4.1	Systemgrenzen und Datengrundlagen.....	26
4.2	Die Stufen der Papierkette .....	28
4.2.1	Übersicht und Rahmenbedingungen .....	28
4.2.2	Der Rohstoff Holz.....	30
4.2.3	Herstellung von Primärfasern .....	30
4.2.4	Aufbereitung von Altpapier .....	32
4.2.5	Herstellung von Papier.....	32
4.2.6	Papier- und Pappeprodukte .....	34
4.2.7	Distribution und Nutzung der Papierprodukte .....	36
4.2.8	Altpapiererfassung .....	36
4.2.9	Energiebedarf und –versorgung der Papierindustrie.....	38
<b>5</b>	<b>Empirische Durchführung der Modellkopplung zur Abbildung des technischen und strukturellen Wandels in der Papierkette</b> .....	<b>40</b>
5.1	Methodische Vorarbeiten .....	40
5.1.1	Die Abbildung der Papierkette in den amtlichen IO-Tabellen zwischen 1978 und 1990.....	40
5.1.2	Ableich von Stoffstrommodell und IO-Modell.....	43
5.2	Generierung der Szenarien.....	45
5.2.1	Basisszenario des MIS-Modells.....	46
5.2.1.1	Annahmen zu wichtigen ökonomischen Entwicklungen .....	46
5.2.1.2	Endnachfrage nach Papier und Papierprodukten .....	47
5.2.1.3	Ergebnisse der Basisprojektion als Grundlage für weitere Szenarioannahmen .....	48
5.2.2	Szenarien zur Entwicklung der Papierkette .....	49
5.2.2.1	Nachfrage nach Papier und Papierprodukten.....	49
5.2.2.2	Entwicklung des Faserstoffeinsatzes zur Papierherstellung .....	55
5.2.2.3	Energiebedarf und Energiebereitstellung.....	58
5.3	Ergebnisse der Modellrechnungen: Auswirkungen auf Energieverbrauch und Wirtschaftsstruktur .....	60
5.3.1	Ergebnisse des Stoffstrommodells .....	61

5.3.2	Änderungen der Verflechtungsmatrix im IO-Modell .....	67
5.3.3	Ergebnisse der IO-Modellrechnungen – Sektorale Auswirkungen von Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien.....	70
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>79</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>85</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Strategien zur Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und energiebedingter CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	6
Tabelle 2:	Verbrauch von Holz für die Herstellung von Primärfaserstoffen für die Papierindustrie, Deutschland 1995 .....	31
Tabelle 3:	Produktion, Verbrauch und Außenhandel von Primärfaserstoffen in der deutschen Papierindustrie 1995 .....	31
Tabelle 4:	Verbrauch, Produktion und Außenhandel von Papier, Deutschland, 1995 nach Sortengruppen .....	33
Tabelle 5:	Altpapiereinsatzquoten bei der Herstellung der Papiersortengruppen 1995 .....	34
Tabelle 6:	Produktionsmengen der Papier- und Papperverarbeitung in Deutschland, 1995.....	35
Tabelle 7:	Aufkommen und Entsorgung von Altpapier 1995 in Deutschland.....	37
Tabelle 8:	Aufteilung des Strom- und Wärmebedarfs der deutschen Papierindustrie nach Prozessen 1995.....	38
Tabelle 9:	Güterströme innerhalb der amtlichen IO-Tabelle, die teilweise oder vollständig durch das Stoffstrommodell abgedeckt werden.....	44
Tabelle 10:	Jährliche Wachstumsraten der Endnachfrage nach Gütern der Papierherstellung, der Papierverarbeitung und der Druckereien bis 2020 im Referenzszenario .....	48
Tabelle 11:	Entwicklung der modellexogenen Papiernachfrage in Deutschland, 1995 - 2020 .....	49
Tabelle 12:	Entwicklung der Papiernachfrage zwischen 1980 und 1995, nach Sortengruppen aufgeschlüsselt.....	49
Tabelle 13:	Angenommene jährliche Wachstumsraten des Papierbedarfs nach Papiersorten bis 2020 im Referenzszenario, Deutschland.....	50
Tabelle 14:	Entwicklung der Sortenstruktur des Papierverbrauchs bis 2020 - Referenzszenario .....	51

Tabelle 15:	Faktoren zur Ableitung des Verbrauchs von Papierprodukten im Nachhaltigkeitsszenario .....	54
Tabelle 16:	Entwicklung der Altpapiereinsatzquoten bis 2020 .....	57
Tabelle 17:	Entwicklung der spezifischen Endenergieverbräuche .....	59
Tabelle 18:	Entwicklung der Papierproduktion bis 2020 (gerundet) .....	61
Tabelle 19:	Einsatz von Rohstoffen, Hilfsstoffen und Faserstoffen zur Papierherstellung, 1995 – 2020, in kt .....	63
Tabelle 20:	Vergleich der Vorleistungen der Papierindustrie im Jahr 2020 zwischen den Szenarien (Quelle: Eigene Berechnungen) .....	68
Tabelle A-21:	Sektorale Gliederung des Modells MIS in der angepaßten Version .....	85
Tabelle A-22:	Zuordnung der im Papierflussmodell enthaltenen Stoffe und Güter zu den Sektoren der amtlichen IO-Tabellen und des Modells MIS .....	87
Tabelle A-23:	Annahmen zum spezifischen Energiebedarf der Faserstoff- und Papierherstellungsprozesse .....	88
Tabelle A-24:	Annahmen zur Energiebereitstellung in der Papierindustrie .....	89

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung von Luftschadstoffemissionen und Bruttoinlandsprodukt in Deutschland (ABL).....	4
Abbildung 2:	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs, der CO <sub>2</sub> – Emissionen und des Bruttoinlandsprodukts (BIP) in Deutschland (ABL).....	5
Abbildung 3:	Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien im Produktlebenszyklus (Quelle: in Anlehnung an Hiesl et al., 1995) .....	7
Abbildung 4:	Schema einer Input-Output-Tabelle.....	12
Abbildung 5:	Struktur und exogener Datenbedarf von MIS .....	18
Abbildung 6:	Schema zur Kopplung des Input-Output-Modells MIS mit einem Stoffstrommodell .....	25
Abbildung 7:	Schema der Papierkette .....	29
Abbildung 8:	Trendvergleich Halbstoffeinsatz / interne Vorleistungen der Papierindustrie (Quelle: Immenschuh, 1998).....	42
Abbildung 9:	Trendvergleich Waldholzverbrauch / Vorleistungen der Forstwirtschaft (Quelle: Immenschuh, 1998) .....	42
Abbildung 10:	Entwicklung von Papierverbrauch, -außenhandel und – produktion bis 2020 in Deutschland – Referenzszenario .....	51
Abbildung 11:	Entwicklung des inländischen Papierverbrauchs bis 2020 im Referenz- und im Nachhaltigkeitsszenario, Deutschland.....	54
Abbildung 12:	Entwicklung der Papierproduktion in Deutschland bis 2020 im Referenz- und im Nachhaltigkeitsszenario.....	55
Abbildung 13:	Entwicklung der Altpapiereinsatzquote in Deutschland.....	56
Abbildung 14:	Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs der Papierindustrie .....	58
Abbildung 15:	Entwicklung der Energieträgerstruktur zur Wärmeerzeugung.....	59
Abbildung 16:	Entwicklung des Faser- und Füllstoffeinsatzes zur Papierproduktion.....	61

Abbildung 17: LkW-, Schiffs- und Bahntransporte in der Papierkette für 2020 .....	62
Abbildung 18: Entwicklung des Strom- und Wärmebedarfs in der Papierindustrie bis 2020.....	64
Abbildung 19: Abweichungen des Strombedarfs vom Referenzszenario.....	65
Abbildung 20: Abweichungen des Wärmebedarfs vom Referenzszenario.....	65
Abbildung 21: Entwicklung des Energieverbrauchs der Papierindustrie bis 2020 in Primärenergieäquivalenten .....	66
Abbildung 22: Vergleich der Vorleistungen der Papierindustrie im Jahr 2020 zwischen Basis-, Referenz- und Öko- Effizienzscenario .....	69
Abbildung 23: Abweichungen des Referenzszenarios vom Basisszenario – Bruttowertschöpfung 2020.....	72
Abbildung 24: Abweichung des Referenzszenarios vom Basisszenario: Energieverbrauch 2020 .....	73
Abbildung 25: Abweichungen vom Referenzszenario: Bruttowertschöpfung 2020.....	74
Abbildung 26: Abweichungen vom Referenzszenario: Energieverbrauch 2020 .....	75
Abbildung A-27: Übersicht über das Stoffstrommodell (erste Hierarchieebene).....	90
Abbildung A-28: Überblick über das Stoffstrommodell (Modul Papierverarbeitung).....	91

## Abkürzungsverzeichnis

ABL:	Alte Bundesländer
BIP:	Bruttoinlandsprodukt
BMBF:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPW:	Bruttoproduktionswert
D:	Bundesrepublik Deutschland
DSD:	Duales System Deutschland
IOT:	Input-Output-Tabelle
KWK:	Kraft-Wärme-Kopplung
LWC:	Light Weight Coated
MIS:	Makroökonomisches Informationssystem Ikarus
SC:	Super Calendered
VDP:	Verband Deutscher Papierhersteller

## 1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Gegenwärtig existieren zwei verschiedene Herangehensweisen der Modellierung und Prognose von technologischem und ökonomischem (Struktur-)Wandel. Zum einen versuchen systemtechnische Modelle (z.B. Ökobilanzen, Stoffflussmodelle) auf der Basis detaillierter technologiebezogener Informationen die Auswirkungen alternativer Produkt- bzw. Technikkombinationen (z.B. auf die Umwelt) abzubilden. Für die wichtigen material- und energieintensiven Produktions- und Konsumbereiche werden bestehende und absehbare technologische Entwicklungen nach Kosten- oder Umweltgesichtspunkten charakterisiert, um eine Simulation oder eine Optimierung zukünftiger Konstellationen zu erlauben. Eine Schwäche dieser Modelle ist die fehlende Einbettung in gesamtwirtschaftliche Zusammenhänge. Sie benötigen exogene Annahmen zur künftigen Höhe und Struktur der Güternachfrage oder zum künftigen Außenhandel. Aussagen zu den Auswirkungen ressourcenschonender Politikansätze auf volkswirtschaftliche Zielgrößen sind nicht möglich.

Zum anderen wurden – vor allem zu Fragen des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen – gesamtwirtschaftliche Modelle entwickelt, die die Beziehungen zwischen den gesamtwirtschaftlichen Aggregaten und – je nach Auslegung – die sektorale Verflechtungsstruktur abbilden. Diese Modelle sind jedoch aufgrund ihrer „Vogelperspektive“ bisher nur bedingt in der Lage, technischen oder (intra-sektoralen) strukturellen Wandel angemessen zu berücksichtigen (Jochem et al., 1999). In der Regel wird versucht, diesen Wandel über Vergangenheitstrends, autonome Effizienzfaktoren oder Preisabhängigkeiten abzubilden. Prozess- und produktbezogene (technologische) Einflussfaktoren lassen sich mit diesen top-down-Verfahren nur sehr begrenzt berücksichtigen. Richter (1991) kommt in einer umfassenden Studie zur Aktualisierung und Prognose von IO-Koeffizienten zu dem Ergebnis: "Eine noch so detaillierte und sorgfältige Modellierung z. B. der Endverwendung, eine noch so sorgfältige Gestaltung des Preismodells und andere Verbesserungen werden Versäumnisse im Bereich der Behandlung des technologischen Wandels nie kompensieren können. (...) Stärkere Bemühungen um eine bessere Erfassung der technologischen Veränderungen werden die Aussagekraft integrierter Input-Output-Modelle überproportional erhöhen".

Dieses Defizit gewinnt vor dem Hintergrund sich ändernder Vorleistungsstrukturen in der Wirtschaft zunehmend an Bedeutung. Die Nachhaltigkeit als wichtige Zielgröße zukünftigen Wirtschaftens wird entscheidend vom minimalen Ressourceneinsatz an primären Rohstoffen, an Energieträgern und durch Umweltbelastungen bei Produktion, Nutzung und Entsorgung bestimmt. Dazu ist langfristig eine einschneidende Verringerung der Material-, Emissions- und Energieströme bei der Produktion durch Rationalisierung und durch verbessertes Produktdesign sowie eine erhebliche Kreislaufführung von Materialströmen notwendig. Zunehmendes Wirtschaften in Kreisläufen bedeutet eine Umorientierung und Veränderung von Stoffströmen in

der Wirtschaft. Damit verbunden ist auch ein zusätzlicher Impuls auf den zukünftigen Strukturwandel, nicht nur im Verarbeitenden Gewerbe, sondern auch im Dienstleistungssektor und, je nach inländischen Ressourcen, auch im Bergbau und der Land- und Forstwirtschaft. Die Determinanten dieses kreislaufwirtschaftsbedingten Strukturwandels und die sich ändernde Vorleistungsstruktur der Wirtschaftszweige ist bis heute quantitativ wenig untersucht.

Man tendiert heute mehr und mehr zur Ansicht, dass die angemessene Analyse und Projektion des Strukturwandels, der durch ein Wirtschaften in Kreisläufen bedingt wird, in Zukunft nur in iterativen Verfahren zwischen makroökonomischen Modellen und technologisch orientierten "Satelliten"-Modellen möglich sein wird (vgl. Ayres 1995, Suslow 1993). Riesige Modelle, die alle Aspekte der technischen Entwicklung und der volkswirtschaftlichen Kreisläufe beschreiben, werden als nicht machbar oder zumindest als intransparent und nicht nachvollziehbar angesehen. Als Bindeglied zwischen diesen beiden "Welten" dürfte die Input-Output-Analyse, die die Vernetzung und Vorleistungsstruktur der Wirtschaftszweige meist nur ex post abbildet, eine zentrale Rolle erhalten. Denn durch die Nutzung der Ergebnisse von technologischen "Satelliten"-Modellen zur ex ante-Änderung jeweils betroffener Matrix-Elemente von IO-Modellen wird es möglich sein, technologisch begründete Strukturveränderungen der Wirtschaft adäquat abzubilden und für die Makromodelle aufzubereiten.

Das IKARUS-Instrumentarium beinhaltet beide Modellansätze. Prozessketten (im Optimierungsmodell) und makroökonomisches Modell (dynamisches IO-Modell mit z. T. preisabhängigen Koeffizienten) sind im Allgemeinen über aggregierte ökonomische Größen (Endnachfrage) gekoppelt, ohne dass auf disaggregierter Ebene ein Abgleich und eine Konsistenz der Annahmen stattfindet. Bei zwei „Produktionsbereichen“ - dem Verkehr und der Stromerzeugung - ist jedoch eine erste, auf den Energieträgereinsatz begrenzte Kopplung hergestellt. In einem Satellitenmodell werden dabei den Energieträgereinsatz bestimmende technologische Faktoren (Mix, Verbrauch) herangezogen, um auch im makroökonomischen Modell spezielle Alternativszenarien zu erfassen (AGEP 1995b).

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben versucht, hier eine Brücke zwischen Bottom-Up- und Top-down-Modellen zu schlagen.

Das zentrale Anliegen des Forschungsvorhabens war die Abbildung des mit einer verstärkten Kreislaufwirtschaft verbundenen technischen und strukturellen Wandels durch die Kopplung eines technikbasierten Stoffstrommodells mit einem volkswirtschaftlichen Input-Output-Modell. Die Modellkopplung sollte am Beispiel des Papierstoffstroms erfolgen, aber auch Aussagen zu Übertragungsmöglichkeiten auf andere Branchen erlauben.

In einem technikbasierten Stoffflussmodell auf mittlerem Aggregationsniveau sollte der inländische Stoffstrom "Papier" von der Rohstoffgewinnung über Produktions-, Nutzungs-, Verwertungs- und Beseitigungsschritte abgebildet werden. Wichtig war dabei die Einbeziehung der Papierprodukte, um produktbezogene umweltentlastende Konzepte berücksichtigen zu können. Mit dem Stoffflussmodell sollte dann auf der Basis des vorhandenen Fachwissens und absehbarer Entwicklungen eine disaggregierte, technologisch fundierte Prognose des Stoffstroms "Zellstoff und Papier" für die Bezugsjahre 2005 und 2020 als Referenzszenario erstellt werden. Wichtige ökonomische Randgrößen, wie z.B. die Nachfrage nach End- und Zwischenprodukten für die Jahre 2005 und 2020 wurden einem dynamischen Input-Output-Modell entnommen und angepasst. Neben dem Referenzszenario war die Generierung alternativer Szenarien vorzusehen, in denen Strategien verstärkter Energieeffizienz, zunehmenden Recyclings und neuer Produktkonzepte gebündelt wurden. In einem zweiten Schritt sollten die Prognoseergebnisse des Stoffstrommodells in das dynamische Input-Output-Modell übersetzt und zur Anpassung der Verflechtungsbeziehungen verwendet werden. Mit diesen neuen Strukturdaten wurden mittels des IO-Modells die Auswirkungen der verschiedenen Entwicklungspfade auf die sektorale Struktur in der Volkswirtschaft ermittelt. Die Szenarienergebnisse wurden mit Modellrechnungen zur Strukturentwicklung, die ohne Einkopplung des Stoffstrommodells durchgeführt wurden, verglichen.

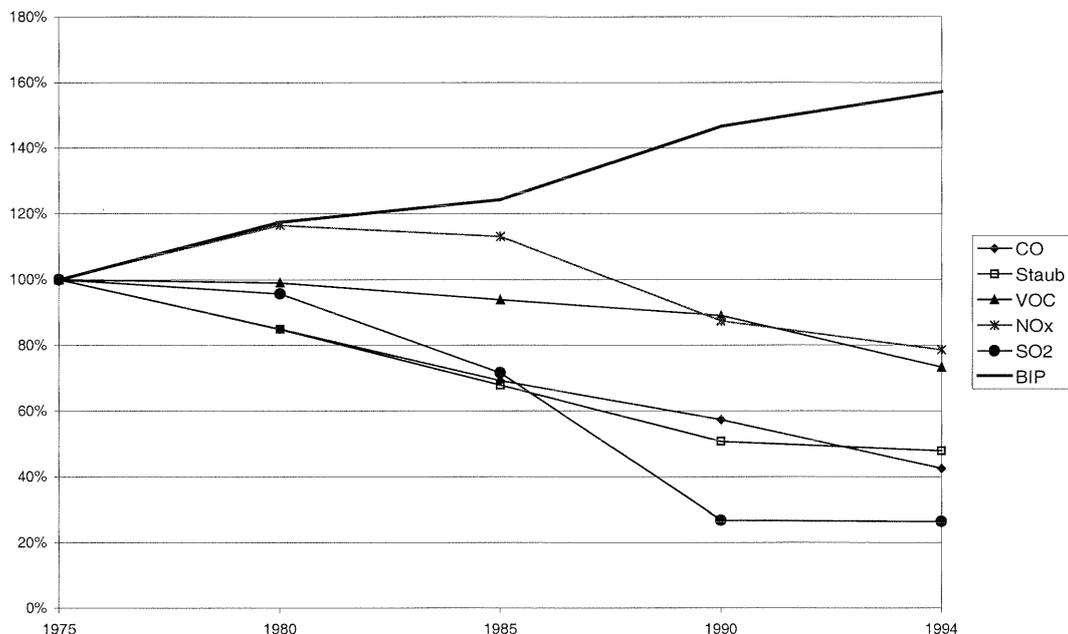
Diese Vergleiche sollten dann Aussagen zu den Potentialen, Grenzen und möglichen Anwendungsbereichen der Kopplung von technikbasierten Stoffstrommodellen und ökonomischen Input-Output-Modellen im Hinblick auf die Modellierung des technischen und strukturellen Wandels erlauben.

Kapitel 2 dieses Berichts gibt einen Überblick über Kreislaufwirtschaftsstrategien und Strategien zur Erhöhung der Materialeffizienz und ihren möglichen Beitrag zur Einsparung fossiler Energieträger. In Kapitel 3 wird der technische und strukturelle Wandel in Input-Output-Modellen thematisiert und ein Ansatz zur Kopplung von Input-Output-Modellen und Stoffstrommodellen vorgestellt. Eine Beschreibung der Wertschöpfungskette „Papier“ und des zugehörigen Stoffstrommodells enthält Kapitel 4. Die empirische Durchführung der Modellkopplung zur Abbildung des technischen und strukturellen Wandels in der Papierkette ist Gegenstand von Kapitel 5. Darin werden die durchgeführten Modellierungsarbeiten, die Generierung von Zukunftsszenarien für die Papierkette und die Ergebnisse der Modellrechnungen dargestellt. In Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Arbeiten gezogen, und es wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

## 2 Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Strukturwandel

In den letzten Jahrzehnten hat der ökologische Problemdruck in den Bereichen der luftgängigen Massenschadstoffe und der Abwasseremissionen durch den Bau von Filter- und Kläranlagen, insbesondere aber auch durch produktionsintegrierte Umweltschutzmaßnahmen stark abgenommen<sup>1</sup>. Bei einigen Luftschadstoffen hat ein Rückgang der Umweltbelastung bei steigender Wirtschaftsaktivität stattgefunden (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Entwicklung von Luftschadstoffemissionen und Bruttoinlandsprodukt in Deutschland (ABL)<sup>2</sup>



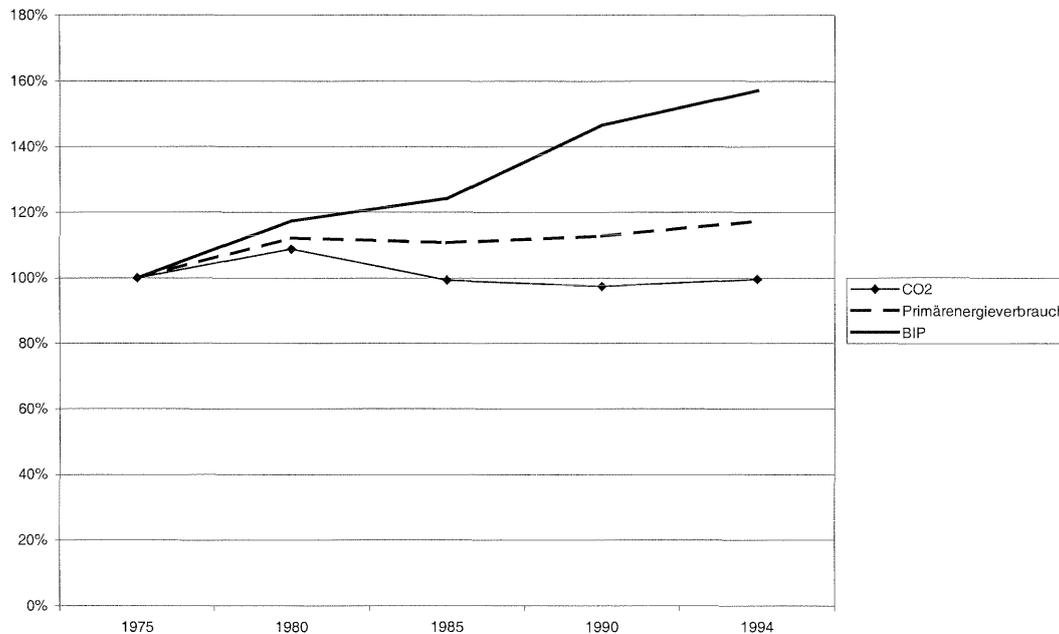
Eine wesentliche Ausnahme stellt das Treibhausgas Kohlendioxid dar, das stark mit dem Energieverbrauch korreliert und sich bisher nicht wirtschaftlich in Filteranlagen zurückhalten lässt. In der Bundesrepublik ist seit den siebziger Jahren der spezifische Energieverbrauch pro Einheit Bruttoinlandsprodukt deutlich zurückgegangen (vgl. Abbildung 2), absolut hat sich der Energieverbrauch weitgehend stabilisiert. Für das Erreichen des Treibhausgas –Minderungsziels von 21% CO<sub>2</sub> –Äquivalente

<sup>1</sup> Vgl. dazu und für eine Sammlung von Fallbeispielen Böhm (1995) und Walz et al. (1999)

<sup>2</sup> Um eine Überlagerung der Entwicklungstendenzen durch den Wiedervereinigungseffekt zu vermeiden, werden hier und in der nächsten Abbildung nur die Entwicklungen in den alten Bundesländern bis 1994 dargestellt.

bis 2010 im Rahmen des EU-Burden-Sharing gegenüber dem Jahr 1990 ist jedoch ein weiterer Rückgang der Nutzung fossiler Energieträger erforderlich.

Abbildung 2: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs, der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Bruttoinlandsprodukts (BIP) in Deutschland (ABL)



Beim Ressourcenverbrauch und dem damit verbundenen Abfallaufkommen hat sich der Problemdruck in den letzten Jahrzehnten ebenfalls erhöht. Laut Materialflussrechnung des Statistischen Bundesamtes ist der Materialinput in die deutsche Wirtschaft zwischen 1960 und 1990 von 1.493 Mio. t auf 2.513 Mio. t, d.h. um 68% gestiegen (Kuhn et al., 1994)<sup>3</sup>. Der jährliche Materialverbleib, der als Indikator für die Materialakkumulation in der Volkswirtschaft angesehen werden kann, stieg im gleichen Zeitraum von ca. 400 auf 650 Mio. t. Immerhin wuchs die Menge der wiederverwendeten Materialien von 16 auf 57 Mio. t und damit um 260%. Dennoch bleibt es eine wichtige Aufgabe für die Gesellschaft, den Sprung von einer Durchflusswirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft mit möglichst kleinen und naturverträglichen Stoffströmen zu schaffen.

Verbesserungen bei der Energie- und Ressourceneffizienz sowie den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden vor allem durch die Einführung effizienterer Produktions- und Energieumwandlungsverfahren, Energieträgersubstitution und zunehmendes Recycling auf der werkstofflichen Ebene erreicht (Jochem/Bradke, 1996). Zur Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz, gemessen am Verhältnis von

<sup>3</sup> Alte Bundesländer, ohne Sauerstoff- und Wassereinput

Energieverbrauch zum Bruttoinlandsprodukt, hat auch der relative Bedeutungsverlust energieintensiver Branchen wie der Grundstoffindustrie gegenüber weniger energieintensiven Investitions- oder Dienstleistungssektoren sowie intrasektorale Verschiebungen von energieintensiven zu weniger energieintensiven Produkten beigetragen (Diekmann et al., 1999). In gewissem Maße hat auch die Verlagerung energieintensiver Produktionsprozesse ins Ausland einen Anteil an der Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz.

Weitere substantielle Energieeinsparungen sind aber auch durch Strategien zur Schließung von Material- und Produktkreisläufen sowie zur Erhöhung der Materialeffizienz möglich (vgl. Tabelle 1), wie neue Arbeiten gezeigt haben (Patel, 1999; Gielen, 1999). Danach werden rund 80% des industriellen Energieverbrauchs zur Herstellung von Werkstoffen aufgewendet und nur 10% für deren Weiterverarbeitung zu Produkten (Gielen, 1999). Gielen hat bei einer Untersuchung von CO<sub>2</sub> – Minderungspotentialen durch Materialeffizienzmaßnahmen je nach zugelassener Höhe der Vermeidungskosten einen Beitrag von bis zu 35 % am Gesamtpotential identifiziert.

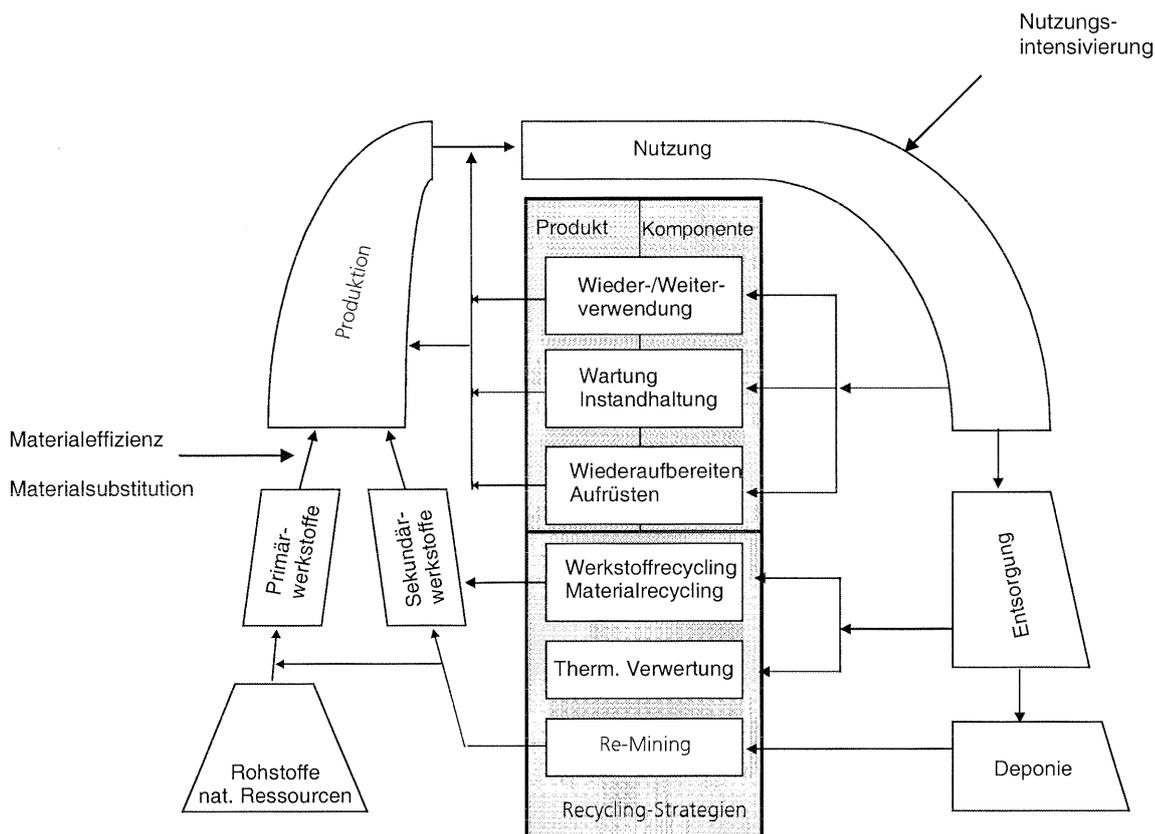
Tabelle 1: Strategien zur Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und energiebedingter CO<sub>2</sub> -Emissionen

Energieorientierte Strategien	Einsatz regenerativer Energieträger
	Erhöhung der Energieeffizienz bei Energieumwandlungs- und Produktionsprozessen, bei der Produktnutzung sowie bei Entsorgungsprozessen
	Energieträgersubstitution (Erdgas statt Kohle)
	Energetische Verwertung von Produktions- und Produktabfällen
Materialorientierte Strategien	Verringerung des für die Produktherstellung benötigten Material- bzw. Werkstoffbedarfs (Materialeffizienz im engeren Sinn)
	Materialsubstitution mit dem Ziel einer insgesamt geringeren Energieintensität
	Werkstoffliches und rohstoffliches Recycling gebrauchter Produkte
Produktorientierte Strategien	Herstellung langlebiger Produkte
	Nutzungsdauerverlängerung von Produkten und Produktkomponenten
	Nutzungsintensivierung von Produkten
	Dematerialisierung, d.h. Bereitstellung des Produktnutzens durch insgesamt geringeren Materialeinsatz

Zur Systematisierung von Materialeffizienzstrategien ist ein Blick auf den Produktlebenszyklus hilfreich (vgl. Abbildung 3). Dieser bildet die mit der Bereitstellung eines Produkts verbundenen Stufen der Herstellung, Nutzung und Entsorgung

ab. Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen die material- und produktorientierten Strategien, die im Weiteren näher erläutert werden (Gielen, 1999; Hiessl et al., 1995, Fleig, 2000; Walz et al., 1999).

Abbildung 3: Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien im Produktlebenszyklus (Quelle: in Anlehnung an Hiessl et al., 1995)



Die **Erhöhung der Materialeffizienz** im engeren Sinn zielt darauf ab, vorgegebene Produktfunktionalitäten mit einer geringeren Materialmenge zu erzielen, um somit den zur Materialherstellung erforderlichen Energiebedarf zu senken. Dies kann durch

- Verbesserung von Materialeigenschaften,
- veränderte Produktkonstruktion, die einen geringeren Materialeinsatz erlaubt,
- Verwendung von Verbundwerkstoffen und
- Veränderung des Produktionsverfahrens mit dem Ziel eines geringeren Materialausschusses erfolgen (Gielen, 1999).

Eine **Materialsubstitution** kann mit dem Ziel erfolgen, energieintensivere durch weniger energieintensive Materialien zu ersetzen. Für den Vergleich der Energiein-

tensität ist der gesamte Lebenszyklus des hergestellten Produktes einzubeziehen, da ein höherer Energieverbrauch zur Herstellung des Produkts durch Energieeinsparungen in der Produktnutzungs- oder -verwertungsphase ausgeglichen oder überkompensiert werden können. Ein Beispiel für eine vordergründig energieintensive Materialsubstitution ist die zunehmende Verwendung von Aluminium anstelle von Stahl bei der Fahrzeugherstellung. Hier verspricht man sich von dem mit dem Aluminiumeinsatz verbundenen geringeren Fahrzeuggewicht Kraftstoffersparnisse bei der Fahrzeugnutzung, die den höheren Energiebedarf bei der Aluminiumproduktion überkompensieren.

Beim **werkstofflichen oder rohstofflichen Recycling** werden gebrauchte Produkte zu Sekundärroh- oder -werkstoffen verarbeitet. Häufig sind die dabei zum Einsatz kommenden Prozesse im Vergleich zu den Primärprozessen mit einem geringeren Energieverbrauch verbunden (z.B. Sekundäraluminium- und -stahlproduktion oder Altpapieraufbereitung). Sie sind daher bei einigen Werkstoffen bereits gängige Praxis, bei anderen sind noch Steigerungspotentiale vorhanden. Auch hier muss eine Verrechnung der eingesparten Energie mit dem zur Erfassung und Aufbereitung gebrauchter Produkte benötigten Energiebedarf stattfinden.

Die **Herstellung langlebiger Produkte** stellt einen Gegentrend zur gegenwärtigen Tendenz immer kurzlebigerer Produkte dar. Sie verringert die zur Deckung des Ersatzbedarfs an Produkten benötigte Neuproduktion. Damit trägt sie zur Verlangsamung der Material- und Energieströme durch die Wirtschaft bei und senkt damit deren Niveau.

Die **Verlängerung der Produktnutzungsdauer** kann zum einen durch Maßnahmen zur regelmäßigen Wartung und Instandhaltung erfolgen, die einem vorzeitigen Ende der Produktnutzung vorbeugen. Zum anderen wird angestrebt, beim Ausfall von Produktkomponenten nicht das ganze Produkt wegzuwerfen, sondern die betroffenen Teile auszutauschen, zurückzuführen und möglichst wieder aufzuarbeiten. Hierdurch werden im Gegensatz zum werkstofflichen Recycling Kreisläufe auf höheren Wertschöpfungsstufen geschaffen. Je höher die Wertschöpfungsstufe der zurückgeführten Bauteile ist, desto mehr Veredelungsschritte und damit Ressourcen-, Energieverbrauch und Umweltbelastungen können im Vergleich zur Neuproduktion eingespart werden. Ein bekanntes Beispiel für die bereits erfolgte Realisierung dieser Strategie bieten Kopierhersteller. Bei gewerblichen Kunden ist die Wartung und Instandhaltung von Kopierern durch die Hersteller gängige Praxis. Defekte Bauteile werden ausgetauscht, häufig wieder aufgearbeitet und wieder verwendet. Gleichermaßen findet bei ausgemusterten Geräten häufig eine Aufarbeitung weiter nutzbarer Komponenten statt.

Die **Intensivierung der Produktnutzung** setzt bei Produkten an, deren durchschnittliche Nutzungsdauer unter der technisch möglichen Lebensdauer liegt (Behrendt et al., 1999). Dies ist bei Gebrauchsgütern der Fall, die fallweise zum Einsatz

kommen, für den Nutzern aber ständig bereit gehalten werden. Eine Nutzungsintensivierung kann z.B. durch die Organisation der gemeinschaftlichen Nutzung erreicht werden. Beispiele dafür sind das Car-Sharing, die gemeinsame Nutzung von Waschmaschinen oder von Büchern in Bibliotheken oder Lesekreisen. Ein im gewerblichen Bereich angesiedeltes adäquates Beispiel stellt das Flottenmanagement von Nutzfahrzeugen dar. Hier verzichten Unternehmen auf eigene Fahrzeuge und mieten oder leasen stattdessen bei Bedarf Fahrzeuge von dem Betreiber der Fahrzeugflotte. Durch die gemeinschaftliche Nutzung kann die nicht nutzungsabhängige (d.h. zeitabhängige) Abnutzung von Gütern minimiert werden, so dass auch hier die Ersatzbeschaffung von Produkten verringert werden kann. Ein weiterer indirekter Vorteil dieser Strategie kommt zum Tragen, wenn bei den betroffenen Produkten ein rascher technischer Wandel stattfindet, der in der Nutzungsphase mit geringeren Umweltbelastungen verbunden ist. In diesem Fall ergibt sich insgesamt eine schnellere Diffusion der umweltschonenden Produkte. Damit steht die Strategie der Nutzungsintensivierung in gewissem Widerspruch zur Strategie der Lebensdauerverlängerung, bei der ein möglichst langes Verweilen der Produkte bei den Nutzern angestrebt wird. Es wird deutlich, dass die Wahl der Strategie stark von den spezifischen Produkteigenschaften abhängt. Am Beispiel der Kraftfahrzeuge, bei denen die Hauptumweltbelastungen in der Nutzungsphase anfallen, lässt sich dieses Spannungsverhältnis verdeutlichen. Hier hat die Entwicklung von kraftstoffsparenden Fahrzeugen mit Katalysatoren, die mit bleifreiem Benzin fahren, zu deutlichen Umweltentlastungen geführt. Diese sind mit den Umweltentlastungen abzuwägen, die mit einer reduzierten Produktion von Fahrzeugen verbunden sind.

Die Strategie der **Dematerialisierung** hat zum Ziel, eine bestimmte Leistung mit einem - über den gesamten Lebensweg betrachtet - möglichst niedrigen Materialeinsatz bzw. Abfallaufkommen bereitzustellen. Beispiele dafür sind die Distribution von Musik- oder Buchinhalten über das Internet, die Verringerung des Verpackungseinsatzes oder die Verringerung des spezifischen Produktgewichts. Die Entwicklungen bei der Miniaturisierung elektronischer Bauteile haben ebenfalls maßgeblich zur Dematerialisierung elektronischer Produkte beigetragen. Dadurch wird es möglich, Funktionen in einem Gerät zu vereinen, für die bisher verschiedene Geräte erforderlich waren (z.B. Faxgerät, Scanner, Kopierer und Drucker in einem).

Selbstverständlich ist der Einsatz dieser Strategien unter ökologischen Gesichtspunkten nur dann wünschenswert, wenn Einsparungen beim Material- oder Energieeinsatz nicht durch Verschlechterungen in anderen Bereichen, wie z.B. bei der Emission toxischer Stoffe überkompensiert werden. Auch ist bei der Organisation von Produkt- oder Komponentenkreisläufen oder auch der gemeinsamen Nutzung von Produkten zu beachten, dass die damit verbundenen Aufarbeitungsvorgänge oder das dadurch verursachte Verkehrsaufkommen die ökologischen Vorteile nicht aufheben.

Die an der Produktkonzeption und der Produktnutzung ansetzenden Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien zeichnen sich gegenüber technischen Effizienzmaßnahmen dadurch aus, dass alle Bereiche eines Produktlebenswegs in die Optimierungsüberlegungen einbezogen werden und durch Veränderungen betroffen sein können. Bei einer massiven Realisierung derartiger Strategien ist daher in hohem Maße mit Veränderungen der Güterströme und somit der sektoralen Verflechtungsstrukturen zu rechnen. Beispiele sind:

- Verschiebungen von Primär- zu Sekundärrohstoffen,
- Verschiebung von Neuproduktion zu Aufarbeitung gebrauchter Produkte mit entsprechend unterschiedlichen Vorleistungsinputs,
- Zunahme der Bedeutung der Erfassung gebrauchter Produkte, Redistributionslogistik.
- Zunahme produktbegleitender oder gar produktsubstituierender Dienstleistungen oder
- Veränderungen im Bereich der Abfallwirtschaft, da die Produkte nicht mehr komplett entsorgt werden, sondern nur noch die unbrauchbaren Komponenten.

Diese Maßnahmen führen zum einen direkt zu geringerem Energie- und Ressourcenverbrauch, bewirken aber darüber hinaus aufgrund veränderter Inputs und anderer Entsorgungs- bzw. Verwertungspfade indirekte Impulse auf vor- und nachgelagerte Sektoren und damit Verschiebungen in der Struktur der Wirtschaftssektoren. Diese induzierten Struktureffekte durch ein geeignetes Modell transparent zu machen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Für derartige Strukturuntersuchungen auf meso- bis makroökonomischer Ebene werden häufig Input-Output-Modelle eingesetzt, die den Vorteil einer relativ disaggregierten Abbildung der sektoralen Verflechtungsstruktur bieten. Ohne Anpassungen schreiben sie allerdings eine konstante Produktionsstruktur in die Zukunft fort. Der Berücksichtigung des technischen Wandels kommt daher für die Ausschöpfung ihres Nutzungspotentials eine hohe Bedeutung zu.

### **3 Modellierung des technischen und strukturellen Wandels in einer Kreislaufwirtschaft durch die Kopplung eines Input-Output-Modells mit einem Stoffstrommodell**

#### **3.1 Der technische und strukturelle Wandel in Input-Output-Modellen**

##### **3.1.1 Input-Output-Modelle**

Die empirische Datengrundlage für Input-Output-Modelle bilden Input-Output-Tabellen, die die Güterströme innerhalb einer Volkswirtschaft sowie zwischen ihr und dem Ausland quantitativ erfassen. Das Schema einer solchen Input-Output-Tabelle (IO-Tabelle) zeigt Abbildung 4. Sie ermöglicht eine systematische und vollständige Beschreibung der Lieferbeziehungen zwischen den Sektoren des produzierenden Bereichs sowie zwischen ihnen und dem Endnachfragebereich einer Volkswirtschaft. Jeder Wirtschaftssektor des produzierenden Bereichs wird darin mit seinen Input- und Output-Beziehungen dargestellt, und zwar in monetären Einheiten (z.B. Mio. DM). Die Zeilen enthalten die Lieferungen der in den einzelnen Sektoren hergestellten Güter, wobei bei den Abnehmern die Sektoren der Zwischennachfrage und die Endnachfragebereiche unterschieden werden. Betrachtet man die Tabelle spaltenweise, so erkennt man den Inputbedarf der einzelnen Sektoren für die eigene Produktionstätigkeit. Dieser lässt sich in den Bedarf an Vorleistungen aus den übrigen Sektoren und den Bedarf an primären Inputs unterteilen. Letzterer umfasst die Bruttowertschöpfung der Sektoren und je nach Tabellentyp auch die Importvorleistungen. Grundsätzlich müssen die Zeilen- und Spaltensummen der Sektoren jeweils übereinstimmen. Den Kern der Input-Output-Tabelle bildet die Verflechtungsmatrix, die die Güterverflechtung zwischen den Produktionssektoren abbildet.

Auf der Basis von IO-Tabellen wurden Input-Output-Modelle in verschiedenen Varianten formuliert (Leontief, 1986; Holub/Schnabl, 1994). Zur Untersuchung sektoraler Struktureffekte sind vor allem Mengenmodelle von Bedeutung. Diese stellen in ihrer einfachsten Form einen Zusammenhang zwischen der Endnachfrage und dem zu deren Deckung benötigten Güteraufkommen über die sogenannte Leontief-Inverse her. Zur Berechnung der Leontief-Inverse wird die Inputkoeffizientenmatrix benötigt, die aus der Verflechtungsmatrix der IO-Tabelle abgeleitet wird,

indem die einzelnen Vorleistungen (Inputs) auf die jeweiligen Spaltensummen normiert werden. In konventionellen Input-Output-Modellen werden für die Sektoren linear-limitationale Produktionsfunktionen unterstellt, die also Substitutionen zwischen den Inputs ausschließen.

Abbildung 4: Schema einer Input-Output-Tabelle

		Produzierender Bereich	Endnachfrage				BPW	
		Sektoren 1 - 58	Privater Verbrauch	Staatsverbrauch	Investitionen	Ausfuhr		
Produzierte Bereich	Sektoren 1 - 58	Verflechtungsmatrix: Lieferungen von Gütern und Dienstleistungen zwischen den Sektoren (Zwischennachfrage) (Mio. DM)						
		Importvorleistungen						
		Bruttowertschöpfung	Abschreibungen					
			Kapital-/ Unt.-eink.					
	Arbeitseink.							
Bruttoproduktionswert (BPW)								

Verwendet man ein IO-Modell mit dem Ziel der Projektion der Wirtschaftsentwicklung, so sind zunächst sowohl die Endnachfrage als auch die Verflechtungsmatrix im Projektionsjahr unbekannt. Eine Möglichkeit zur Projektion der Endnachfrage ist die Hochrechnung mit exogen festgelegten sektoralen Wachstumsraten. Eine weitere Möglichkeit ist die Verknüpfung mit einem aggregierten gesamtwirtschaftlichen Modell, welches Vorgaben für die Entwicklung der Endnachfrage macht. Für die Inputkoeffizientenmatrix kann man zunächst, wie häufig in der Literatur diskutiert, zeitliche Konstanz annehmen. Insbesondere für einen längeren Prognosezeitraum ist die damit verbundene Ausschaltung des technischen und strukturellen Wandels jedoch äußerst fragwürdig. Die Frage der zeitlichen Konstanz von Inputkoeffizienten ist in der Literatur häufig untersucht worden (vgl. z.B. die zusammenfassenden Darstellungen in Holub/Schnabl, 1994 oder Richter, 1991). An die Stelle der Frage, ob die Inputkoeffizienten zeitlich variieren, ist dabei im Laufe der Zeit die Fragestellung getreten, welche Gründe für die Variabilität der Koeffizienten verantwortlich sind und wie die Erkenntnisse für eine Verbesserung der Prognosequalität von IO-Modellen genutzt werden können. Auf beide Aspekte wird im Folgenden eingegangen.

### 3.1.2 Bestimmungsgründe für die Veränderung der Inputkoeffizienten in einem Input-Output-Modell

Da jeder Produktionsbereich in einer Input-Output-Tabelle durch seine Input- und Output-Struktur charakterisiert ist, äußert sich technischer und struktureller Wandel durch die Veränderung dieser Strukturen. Die Nachfrageorientierung des Modells macht jede Veränderung der Outputverhältnisse eines Sektors zu Veränderungen der entsprechenden Inputverhältnisse der beziehenden Sektoren. Daher kann die Abbildung des technischen und strukturellen Wandels auf die Veränderung von Inputkoeffizienten reduziert werden.

Auch wenn in der IO-Analyse idealtypisch von einer zeitlichen Konstanz der Inputkoeffizienten ausgegangen wird, haben empirische Analysen gezeigt, dass dies nicht der Fall ist (Richter, 1991). Dafür werden in der Literatur mehrere Gründe angeführt. Grönberg (1980) unterscheidet zwischen unmittelbaren und mittelbaren Ursachen der Koeffizientenveränderung. Als wesentliche **unmittelbare Ursachen** lassen sich der Produkt-Mix und der Prozess-Mix identifizieren. Bei dem gegebenen Aggregationsniveau der verwendeten Input-Output-Tabellen kann immer davon ausgegangen werden, dass in einem Sektor mehr als ein Produkt hergestellt wird, dass sich ein Produktionsbereich also zu einem bestimmten Zeitpunkt durch einen charakteristischen **Produkt-Mix** auszeichnet. Kommt es hier im Zeitverlauf zu einer Veränderung der Gewichte der einzelnen Güter und werden diese Güter mit unterschiedlichen Vorleistungskombinationen hergestellt, so führt dies auf der Ebene des Sektoraggregats zu einer Veränderung der Inputkoeffizienten, obwohl keine Veränderungen der Produktionstechniken erfolgt sind. Insofern ist der Produkt-Mix-Effekt ein reines Aggregationsphänomen, der mit der Heterogenität der IO-Sektoren zusammenhängt. Bei reinen Ein-Produkt-Sektoren würde dieser Effekt nicht auftreten.

Der Begriff des **Prozess-Mix** ist darauf zurückzuführen, dass in den meisten Fällen für die Herstellung eines Produkts verschiedene Verfahren zur Verfügung stehen und zum Einsatz kommen. So können z.B. die meisten Werkstoffe (Metalle, Glas, Papier) sowohl auf der Basis von Primär- als auch von Sekundärrohstoffen hergestellt werden, mit z.T. völlig unterschiedlichen Vorleistungsinputs. Die Inputkoeffizienten eines Produktionsbereichs geben daher keinen einzelnen Prozess, sondern eine Prozesskombination wieder (Grönberg, 1980). Veränderungen der Anteile der einzelnen Prozesse führen also auch hier zu veränderten Inputkoeffizienten eines IO-Sektors, obwohl auch hier die einzelnen Produktionstechniken unverändert bleiben. Hinzu kommt, dass sich auch die jeweiligen Prozesse durch **technischen Fortschritt** im Zeitverlauf verändern und damit deren Inputstrukturen. In heterogenen Sektoren können sich Produkt-Mix- und Prozess-Mix-Effekte soweit überlagern, dass die Identifizierung der Ursachen für die Veränderung der Inputkoeffizienten deutlich erschwert wird.

Als **mittelbare Ursachen** bezeichnet Grönberg vorwiegend ökonomische Einflussfaktoren, die auf die o.g. Ursachen einwirken. Hierzu können

- relative Preise,
- der technische Fortschritt, auch in Form von organisatorischen Maßnahmen oder reinen Lerneffekten,
- Kapazitätsauslastung,
- Skalenerträge sowie
- allgemein Veränderungen der politischen oder weltwirtschaftlichen Rahmenbedingungen oder auch Angebotsrestriktionen bei Inputfaktoren

gezählt werden (Grönberg, 1980; Richter, 1991).

Dass Verschiebungen bei den **relativen Preisen** zwischen einzelnen Vorleistungsgütern oder auch zwischen Vorleistungspreisen und dem Produktpreis des beziehenden Sektors zur Suche nach anderen Vorleistungskombinationen führt, ist nahe liegend. Empirische Untersuchungen zeigen aber, dass dies häufig nur bei besonders wichtigen Vorleistungen der Fall ist, so z.B. in energieintensiven Sektoren aufgrund stark gestiegener Energiepreise in den siebziger Jahren (Richter, 1991). "Preise spielen eine doppelte Rolle bei der Veränderung von Input-Output-Koeffizienten. Einerseits induzieren sie Substitutionen auf der Basis der kurzfristigen Produktionsfunktionen. Andererseits beeinflussen sie die Auswahl der neuen Technologie in der ex-ante Produktionsfunktion, d.h. wenn die Investitionsentscheidung getätigt wird" (Johansen, 1972 in Richter, 1991).

Der **technische Fortschritt** wird von Forssell (1972) auf drei Faktoren zurückgeführt:

- Änderungen in der Qualität von Inputs, auch als faktorgebundener technischer Fortschritt bezeichnet,
- Lernprozesse, die zur Verbesserung der Effizienz bestehender Techniken und Abläufe führen, und
- die Erneuerung von Produktionsanlagen, auch als kapitalgebundener technischer Fortschritt bezeichnet.

Mit der zunehmenden Durchdringung neuer Techniken ist automatisch die Veränderung des Prozess-Mix und damit der Inputkoeffizienten verbunden.

**Skalenerträge** und Schwankungen in der **Kapazitätsauslastung** können ebenfalls Veränderungen in der Inputstruktur auslösen, da hierbei Vorleistungen oder auch Arbeitskosten mit Gemeinkostencharakter unterproportional mit der Produktion wachsen.

Veränderungen im Produkt-Mix und im Prozess-Mix können auch durch **Veränderungen der Rahmenbedingungen**, innerhalb derer produziert wird, ausgelöst werden. Beispiele dafür sind Umweltauflagen, Subventionen oder auch Beschränkungen auf der Angebotsseite, die zu Anpassungsreaktionen bei den Betrieben führen.

Es gibt also eine Reihe von Einflussfaktoren unterhalb der Sektorebene, die zu Veränderungen der Inputstrukturen führen. Diese wirken in der Regel gleichzeitig und sind mittels Ex-Post-Analyse häufig nicht identifizierbar, was ihre Endogenisierung in Input-Output-Modelle erschwert. Die wesentlichen Parameter, nämlich Prozess-Mix und Produkt-Mix, sind als sehr sektorspezifisch zu betrachten und nur schwierig zu verallgemeinern.

### 3.1.3 **Bestehende Ansätze zur Abbildung und Projektion des technischen und strukturellen Wandels in Input-Output-Modellen**

Richter (1991) hat sich intensiv mit Methoden zur Prognose der Inputkoeffizienten befasst und unterteilt diese in formale und pragmatische Ansätze. Die **formalen Ansätze** versuchen, die Veränderungen der Inputkoeffizienten im IO-Modell zu endogenisieren, d.h. variable Koeffizienten zu schaffen. Einige formale Ansätze verwenden Vergangenheitstrends in verschiedenen Ausprägungen zur Schätzung zukünftiger Veränderungen (Sevaldson, 1970; Middlehoek, 1970; Almon, 1986). Inhaltlich greifbarer sind Ansätze, die den Preisen einen hohen Erklärungswert beimessen und infolgedessen mit preiselastischen Inputkoeffizienten arbeiten. Deren Preisabhängigkeiten werden dabei in der Regel ökonometrisch hergeleitet (vgl. z.B. Almon, 1991; Meyer et al., 1999). Zum Teil kommen auch Kombinationen von Trendfunktionen und Preisabhängigkeiten zum Einsatz. Beide Methoden stellen eine gewisse Endogenisierung des technischen und strukturellen Wandels im IO-Modell dar. Ein Hauptkritikpunkt bei der Verwendung von Vergangenheitstrends und Preisabhängigkeiten zur Bestimmung zukünftiger Inputstrukturen ist, dass bei dieser Vorgehensweise insbesondere bei langen Projektionszeiträumen nicht gewährleistet ist, dass technisch plausible oder gar machbare Lösungen generiert werden oder physikalische Gesetzmäßigkeiten wie der erste und zweite thermodynamische Hauptsatz eingehalten werden (Ayres, 1995). Dies liegt darin begründet, dass die Inputkoeffizienten isoliert voneinander fortgeschrieben werden.

Bei den **pragmatischen Ansätzen** wird das IO-Modell eher als Rahmen für die Durchführung szenarienhafter Modellrechnungen betrachtet, in den von außen auf der Basis von Annahmen und Erwartungen zur künftigen Entwicklung bestimmter Parameter eingegriffen wird. Hierbei wird man in der Regel auf technisches bzw. mikroanalytisches Expertenwissen zurückgreifen müssen. Für die Nutzung dieses Wissens gibt es keine festen Regeln. Sie kann relativ frei erfolgen, solange die Konsistenz des verwendeten IO-Modells gewahrt bleibt.

Entsprechend vielfältig sind die vorliegenden Ansätze zur Modellierung des technischen und strukturellen Wandels. Edler (1990), Meade (1995) und Idenburg (1998) greifen an einigen für den Untersuchungsgegenstand relevanten Stellen (d.h. bei ausgewählten Sektoren) in das Modell ein und verändern ausgewählte Modellparameter, wobei die Eingriffspunkte nicht formal miteinander verknüpft sind. Leontief et al. (1982) verwenden eine um Rohstoffsektoren erweiterte IO-Tabelle. Die Abbildung des technischen und strukturellen Wandels konzentriert sich dabei auf die Lieferungen der zusätzlichen Sektoren an die übrigen Sektoren. Bei Ayres (1995), James, Musgrove und Stocks (1986) und beim Modell FMS3 (Mäenpää, 1996) werden Submodelle verwendet, die auf der Methode der Prozesskettenanalyse (vgl. Abschnitt 3.2) basieren und das untersuchte System detaillierter beschreiben. Diese sind an ausgewählten Punkten mit dem IO-Modell verknüpft. Die Abbildung des technischen und strukturellen Wandels erfolgt vorwiegend im Submodell und an den Anknüpfungspunkten zum IO-Modell. Die Ansätze unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Richtung der einbezogenen Wechselwirkungen zwischen Submodell und IO-Modell.

Die Verwendung von Submodellen ist dann von Vorteil, wenn Güterströme unterhalb der Sektorebene für die Fragestellung von Bedeutung sind und intrasektorale Veränderungen wie die Veränderung des Produkt-Mix oder des Prozess-Mix explizit in die Modellierung einbezogen werden sollen. Außerdem lassen sich Aggregationsfehler vermeiden, die bei stark unterschiedlichen Input- und Output-Strukturen der Subsektoren auftreten würden. Darüber hinaus können Güterströme zwischen Subaggregaten unterschiedlicher IO-Sektoren in die Untersuchung einbezogen werden.

Aufgrund dieser Vorteile wurde auch für das hier beschriebene Projekt der Ansatz der Kopplung mit einem Submodell gewählt. Das vertieft untersuchte System ist die Wertschöpfungskette „Papier“ von der Gewinnung der Rohstoffe über die verschiedenen Produktions- und Distributionsstufen sowie der Nutzung bis zur Entsorgung. Die Abbildung dieses Teilsystems in seiner Vernetzung als Stoffstrommodell ermöglicht es:

- die relevanten Güter-, Stoffströme und Prozesse bzw. Aktivitäten in der erforderlichen Genauigkeit einzubeziehen, um z.B. Veränderungen des Prozess-Mix oder des Produkt-Mix abzubilden, und
- die Auswirkungen von Strategien zur Erhöhung der Materialeffizienz und von Kreislaufwirtschaftsstrategien auf die gesamte Wertschöpfungskette und damit ganzheitlich zu erfassen.

Die Kopplung zwischen Submodell und IO-Modell soll die Untersuchung von wechselseitigen Abhängigkeiten ermöglichen. Auf der einen Seite beeinflussen die im IO-Modell abgebildeten sektoralen Verflechtungen die Nachfrage nach Papierprodukten, auf der anderen Seite sollen die mit den untersuchten Strategien einher-

gehenden technischen und intrasektoralen Veränderungen innerhalb der Papierkette in das IO-Modell zurückgespielt werden, um dort die Strukturwirkungen der Strategien zu ermitteln.

### **3.1.4 Technischer und struktureller Wandel im Input-Output-Modell MIS**

In diesem Vorhaben wird das Input-Output-Modell MIS (Makroökonomisches Informationssystem Ikarus) eingesetzt. Das Modell MIS ist ein dynamisches makroökonomisches Modell mit einem Input-Output-Modell als Kern. Es ist im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens IKARUS von der Arbeitsgemeinschaft Energie- und Systemplanung (AGEP) an der Universität Oldenburg entwickelt worden. Im vorliegenden Vorhaben wurde eine von Prof. Pfaffenberger angepasste Version verwendet. Die nachfolgende Beschreibung des Modells folgt Pfaffenberger/Ströbele (1995) und Pfaffenberger/Kempf (1997).

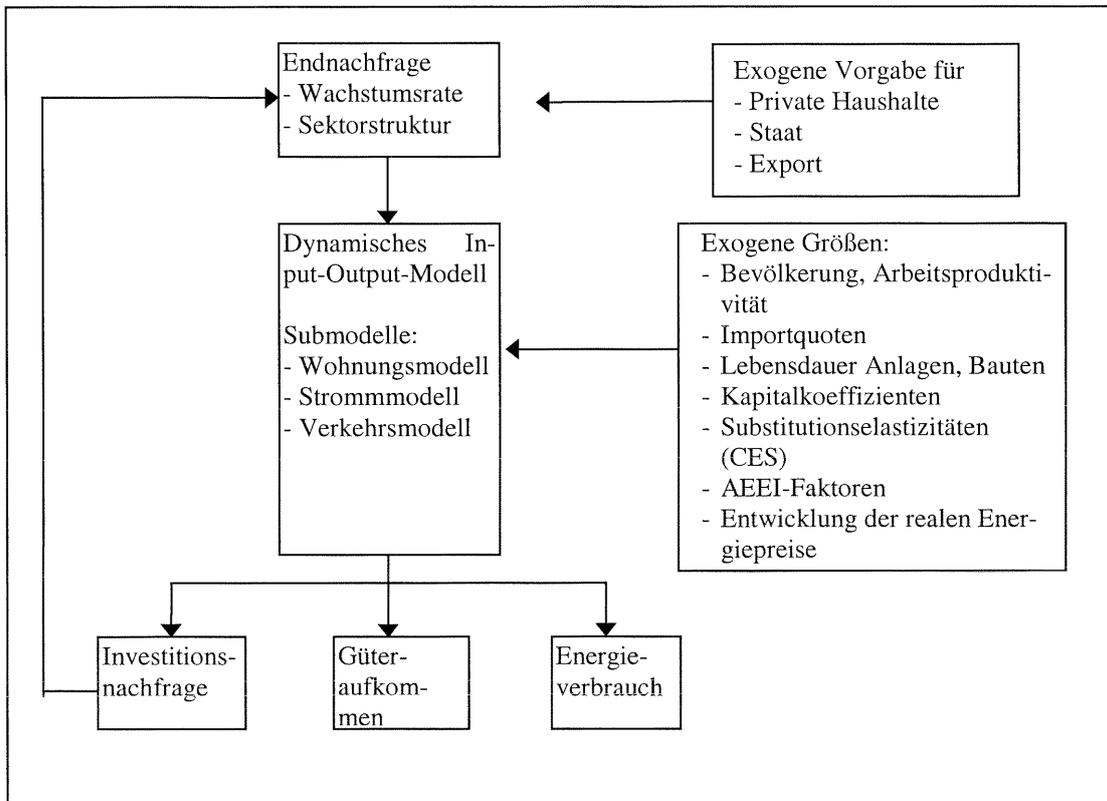
Das Modell projiziert die Input-Output-Tabelle des Jahres 1995 auf die Jahre 2005 und 2020 fort. Dazu sind exogene Vorgaben zum Wachstum und zur künftigen Güterstruktur der Endnachfragebereiche Private Haushalte, Staat und Exporte erforderlich sowie zur Entwicklung der sektoralen Importanteile. Die Investitionsnachfrage ist modellendogen über einen sektoralen Kapitalstock und sektorale Kapitalkoeffizienten an das Güteraufkommen gekoppelt. Für den Zeitraum zwischen den Stichjahren wird ein gleichmäßiges Wachstum angenommen.

Die sektorale Gliederung basiert auf den funktionalen Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes, unterscheidet sich jedoch durch eine disaggregiertere Darstellung im Energieumwandlungs- und Verkehrsbereich und eine Aggregation bei den übrigen Sektoren. Insgesamt wird nach 30 Sektoren untergliedert:

- 8 Energieumwandlungssektoren,
- 8 Verkehrssektoren und
- 14 sonstige Sektoren,

wobei die energieintensiven Sektoren detaillierter abgebildet wurden. Für das vorliegende Vorhaben wurde MIS am Bremer Energie Institut vom Basisjahr 1989 auf der Basis der vorläufigen Tabellen des Statistischen Bundesamtes auf das Jahr 1995 aktualisiert. Dabei musste die Zahl der Verkehrssektoren auf drei reduziert werden. Die für die Fragestellung der vorliegenden Studie besonders wichtigen Sektoren „Papierverarbeitung“ und „Druckereien“ wurden aus ihren jeweiligen Sektoraggregaten herausgelöst. Eine Übersicht über die Sektorgliederung in der angepassten MIS-Version ist in Tabelle A-21 im Anhang enthalten.

Abbildung 5: Struktur und exogener Datenbedarf von MIS



MIS ist in der Lage, Veränderungen der IO-Koeffizienten für die Projektionsjahre durch einen sogenannten Strukturgenerator aufzunehmen. Mittels Submodellen für die Wohnungs- und Raumwärmenachfrage, die Stromerzeugung und die Verkehrssektoren ist es möglich, exogen Veränderungen der technischen Koeffizienten oder der Nachfrage bei den betroffenen Sektoren einzubeziehen. Die Inputkoeffizienten der Nicht-Energiesektoren werden über geschachtelte CES<sup>4</sup>-Produktionsfunktionen gesteuert, die Substitutionen zwischen Energie- und Kapitaleinsatz sowie zwischen den Energieträgern abhängig von den Energiepreisen zulassen. Die nicht energiebezogenen Inputkoeffizienten bleiben konstant. Veränderungen der Energiepreise können exogen vorgegeben werden und sind auch über Energie- oder CO<sub>2</sub>-Steuern induzierbar. Auswirkungen externer Preisanstöße auf die Sektorpreise werden mit dem Leontief-Preismodell berechnet und können wiederum Substitutionen auslösen. Darüber hinaus wird autonomer technischer Fortschritt, der zu Energieeinsparungen führt, mittels AEEI<sup>5</sup>-Faktoren, die die Inputkoeffizienten verändern, berücksichtigt. Diese Faktoren werden auf der Grundlage von Vergangenheitstrends sektorspezifisch festgelegt und können ebenfalls exogen verändert werden. Mit den beschrie-

<sup>4</sup> CES: Constant Elasticity of Substitution

<sup>5</sup> AEEI: Autonomous Energy Efficiency Improvement

benen Mechanismen werden für die Projektionsjahre neue Inputkoeffizientenmatrizen generiert und zusammen mit der exogen vorgegebenen Endnachfrage zur Berechnung des sektoralen Güteraufkommens verwendet. Da die Investitionsgüternachfrage einerseits als Bestandteil der Endnachfrage das Güteraufkommen beeinflusst, andererseits von ihm abhängt, sind iterative Lösungsschritte erforderlich.

Im Modell MIS ist also im Energie- und Verkehrsbereich die Berücksichtigung des technischen Fortschritts, auch durch die Anbindung an das Bottom-Up-Modell IKARUS, mit verschiedenen Mitteln realisiert. Um Energieeinsparungen, Ressourcen- und Umweltentlastungen durch Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz, insbesondere durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen, abzubilden, wird das Modell MIS mit einem Stoffstrommodell gekoppelt.

### 3.2 Stoffstrommodelle

In der Vergangenheit hat sich die umweltpolitische Diskussion zunehmend von einer einzeltechnikbezogenen und medienorientierten Betrachtungsweise gelöst. An deren Stelle ist eine stärker systemorientierte Betrachtung getreten, die versucht, medien- und prozessübergreifend ökoeffiziente Lösungen zu suchen. Dafür wurden Instrumente entwickelt, die unter den Stichworten Ökobilanzen, Prozesskettenmodelle, Material- und Energieflussmodelle oder Stoffstrommodelle bekannt sind. Ihnen gemeinsam ist ein Modellansatz, der versucht, die vorhandenen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Prozessen quantitativ abzubilden. Ziel ist es, einen Modellrahmen aufzubauen, der es ermöglicht, Veränderungen und ihre Auswirkungen auf das gesamte System konsistent zu erfassen. Für diese Ansätze hat sich der methodische Begriff der Prozesskettenanalyse etabliert, der bereits seit den siebziger Jahren zur Bearbeitung von energie- und ressourcenbezogenen Fragestellungen verwendet wird (Chapman, 1974; Ayres, 1978; Böhm et al, 1979).

Eine Stoffstromanalyse kann als systematische Betrachtung der Transformation von Rohstoffen über verschiedene Zwischenstufen zu Produkten, ihrer Nutzung und anschließenden Entsorgung bzw. Rückführung in die Produktion angesehen werden. In einem Stoffstrommodell wird innerhalb der – entsprechend dem Untersuchungsziel gewählten - Systemgrenzen ein System miteinander vernetzter Prozesse und die in, zwischen und aus diesen Prozessen fließenden Stoffströme in physischen Einheiten abgebildet. Jeder Prozess wird also durch seine Inputs und Outputs beschrieben, die ihn gleichzeitig mit anderen Prozessen oder den Systemgrenzen verknüpfen. Ziel eines Stoffstrommodells ist es, Auswirkungen von Maßnahmen oder allgemeiner Veränderungen an bestimmten Stellen des Stoffstroms auf die übrigen Bereiche bzw. das gesamte Stoffaufkommen im System zu analysieren. Methodisch ähnelt die Stoffstromanalyse darin der Input-Output-Analyse.

Hinsichtlich des zeitlichen Rahmens lassen sich statische und dynamische Analysen unterscheiden. Die statische Analyse betrachtet Material- und Energieflüsse ohne ihren zeitlichen Bezug (Gielen, 1999). In der dynamischen Analyse werden Angaben darüber gemacht, wie lange bestimmte Prozesse oder Veränderungen des Systems benötigen. Zur Lösung von Stoffstrommodellen oder allgemeiner Prozesskettenmodellen haben sich das Matrixverfahren (vgl. Heijungs, 1994; Baccini / Bader, 1996) oder die Darstellung als Petri-Netz und dessen iterative Lösung herausgebildet (Möller/Rolf, 1995).

Im Idealfall sollte ein Stoffstrommodell möglichst alle betroffenen Stoffströme umfassen, in der Realität führen Datenengpässe und begrenzte Kapazitäten zu einer Beschränkung der einbezogenen Stoffströme, die der Fragestellung noch gerecht werden muss und durch Abschneidekriterien dokumentiert werden sollte.

### **3.3      Ansatz zur Kopplung eines Stoffstrommodells mit einem IO-Modell**

Bei der Kopplung der beiden Modelltypen sind je nach Analyseschwerpunkt, verfügbaren Daten und gewünschter Komplexität verschiedene Ansätze denkbar. Hinsichtlich der Integrationstiefe ist eine weitgehende Integration des Stoffstrommodells in das IO-Modell denkbar oder die Auslegung als Satellitenmodell, das in die Rechenabläufe des IO-Modells eingebunden ist. Der Ansatz der weitgehenden Integration wurde im vorliegenden Projekt nicht verfolgt, da er Freiheitsgrade bei der Auslegung des Stoffstrommodells einschränken und einen relativ hohen Aufwand bei der Anpassung des IO-Modells und der Gewinnung aller erforderlichen Daten mit sich bringen würde. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher auf die Auslegung des Stoffflussmodells als Satellitenmodell.

Bei der vorliegenden Arbeit steht die Abbildung von Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien innerhalb einer Wertschöpfungskette und deren sektorale Strukturwirkungen im Mittelpunkt. Da diese Strategien an verschiedenen Stellen einer Wertschöpfungskette eingreifen und ihre Wirkung entfalten können, reicht es nicht aus, bestehende und alternative Techniken isoliert zu betrachten. Vielmehr müssen die mit ihrer Realisierung verbundenen Veränderungen bei Güterströmen, aber auch verändertem Technikeinsatz konsistent in Szenarien zusammengeführt werden. Der Zweck des Stoffstrommodells besteht darin, einen Rahmen für die konsistente Generierung derartiger Szenarien bereitzustellen, in dem wechselseitige Beeinflussungen einzelner Maßnahmen deutlich werden. Die Generierung der Szenarien erfolgt unter Verwendung technologischer und anderer mikroanalytischer Informationen.

### 3.3.1 Grundidee der Modellkopplung

Ein **Stoffstrommodell** deckt ein Teilsystem des in einem Input-Output-Modell abgebildeten volkswirtschaftlichen Güterkreislaufs ab und stellt die darin befindliche Struktur und Verflechtung der Produktionsaktivitäten sowie deren Auswirkungen auf die Umwelt mit einem höheren Detaillierungsgrad dar. Es geht über den Bilanzraum des IO-Modells insofern hinaus, als auch die Bereiche der Produktnutzung, der Abfallentsorgung bzw. der Rückführung in die Produktion betrachtet werden. Jeder Prozess lässt sich dabei in der Regel einem funktional gegliederten IO-Sektor eindeutig zuordnen und deckt einen Teil seiner Produktionsaktivitäten ab. Bei der Zukunftsprojektion mit dem gekoppelten Modell werden die durch das Stoffstrommodell erklärten Güterströme und die nicht erklärten Güterströme unterschiedlich gehandhabt. Während letztere im Vergleich zur ungekoppelten Projektion unverändert bleiben, erfolgt die Projektion der erklärten Güterströme auf der Basis der Ergebnisse des Stoffstrommodells. Diese dienen also dazu, die Projektion ausgewählter Güterströme im Nachhinein zu verändern.

Als **Brücke zwischen Stoffstrommodell und Input-Output-Modell** sind geeignete Produkte auszuwählen, die im abzubildenden Stoffstrom eine zentrale Stellung einnehmen. Diese sollten einen gewissen Verarbeitungsgrad aufweisen sowie auf einer Verarbeitungsstufe stehen und damit unabhängig voneinander sein. Ihre Nachfrage wird aus dem Input-Output-Modell gesteuert und damit in die volkswirtschaftlichen Verflechtungen eingebettet. Aus Sicht des Stoffstrommodells ist die Entwicklung dieser Nachfrage als modellexogen anzusehen, ebenso wie die der Endnachfrage im Input-Output-Modell als exogen betrachtet wird.

Die **Dynamik des gekoppelten Modells** geht vom Input-Output-Modell aus, das den gesamtwirtschaftlichen Rahmen für die Entwicklung der Wertschöpfungskette vorgibt und für die Projektionsjahre die modellexogene Nachfrage (s.o.) generiert. Diese ist in das Stoffstrommodell zu übersetzen. Insbesondere sind dabei die monetären Werte des IO-Modells in physische Mengeneinheiten zu überführen. Ausgehend von der modellexogenen Nachfrage und den jeweiligen Szenarioannahmen zu künftigen Veränderungen von Technologien, Prozess- und Produkt-Mix oder Prozessverknüpfungen innerhalb der Wertschöpfungskette wird mit dem Stoffstrommodell berechnet, wie diese vorgegebene Nachfrage gedeckt wird und mit welchen Veränderungen der Güterströme und verschiedener ökologischer Indikatoren wie Energieverbrauch, Emissionen bzw. Reststoffen dies einher geht. Die Veränderungen der physischen Güterströme werden nun nach der Umsetzung in monetäre Einheiten und einer Überführung in die Sektorstruktur des IO-Modells in das ökonomische Input-Output-Modell zurückgespielt. Sie führen dort zu Veränderungen der Inputstrukturen betroffener Sektoren, wobei nur die durch das Stoffstrommodell erklärten Güterströme verändert werden. Ebenso ist es möglich, im Stoffstrommodell die mit dem Einsatz neuer Techniken verbundenen Veränderungen des Kapitalstocks zu modellieren und in den Kapitalstock der entsprechenden IO-

Sektoren zu überführen. Mit der veränderten Input- und Kapitalverflechtungsmatrix wird ein neuerlicher Modelllauf des IO-Modells in Gang gesetzt. Die sektoralen Struktureffekte der Veränderungen innerhalb der Wertschöpfungskette ergeben sich durch den Vergleich mit dem Modelllauf ohne Einkopplung des Stoffflussmodells.

### 3.3.2 Kopplungsschritte

Die durchzuführenden Kopplungsschritte werden am Beispiel der Kopplung mit dem Modell MIS erläutert (vgl. auch Abbildung 6).

- (1) Zu Beginn der Modellkopplung findet zunächst ein Abgleich zwischen IO-Modell und Stoffstrommodell für das Basisjahr statt. Die Inputs und Outputs der IO-Sektoren stellen Güteraggregate dar, die nur zum Teil durch das Stoffstrommodell abgedeckt werden. Es ist daher festzulegen, zu welchen Anteilen die Inputs und Outputs der beteiligten IO-Sektoren durch Stoffströme des Stoffstrommodells erklärt werden. Dafür kommen nur diejenigen Stoffströme in Frage, die einen ökonomischen Wert haben.
- (2) Im nächsten Schritt sind die Produkte auszuwählen, denen die Brückenfunktion zum IO-Modell zukommen soll. Sie werden im Weiteren als charakteristische Produkte bezeichnet. Aus Konsistenzgründen ist es erforderlich, dass diese Produkte innerhalb des Stoffstrommodells voneinander unabhängig sind, damit sich Veränderungen innerhalb des Stoffstrommodells nicht auf die Werte dieser Ausgangsvariablen auswirken. Beispielsweise sollten keine Vorleistungsbeziehungen zwischen den ausgewählten Produkten bestehen. Die Abbildung funktionaler Abhängigkeiten sollte im Prozesskettenmodell erfolgen. Im weiteren wird vereinfachend angenommen, dass alle charakteristischen Produkte zum Output eines einzigen IO-Sektors gehören.
- (3) Zunächst erfolgt ein Modelllauf ohne Einkopplung des Stoffstrommodells zur Ermittlung der für das Stoffstrommodell anzusetzenden modellexogenen Nachfrage nach den charakteristischen Produkten in den Projektionsjahren. Dazu sind die in Abschnitt 3.1.4 genannten und insbesondere die folgenden exogenen Inputs in das Modell MIS zu spezifizieren:
  - Wachstumsrate der Endnachfrage durch Private Haushalte, Staat und Ausfuhren sowie die Sektorstruktur der einzelnen Endnachfragevektoren,
  - Importquoten der einzelnen Sektoren in den Projektionsjahren,
  - gegebenenfalls die Zusammensetzung der sektoralen Kapitalstöcke nach Liefersektoren.

Zur Festlegung der Entwicklung derjenigen Bestandteile der Endnachfrage (Konsumnachfrage, Exporte), die auch im Stoffstrommodell erklärt werden, können bereits mikroanalytisch abgeleitete Annahmen getroffen werden. Aus den Ergebnissen des ersten IO-Modelllaufs wird die modellexogene Nachfrage für das Stoffstrommodell abgeleitet. Dabei werden im IO-Modell über den

Projektionszeitraum implizit konstante Nutzungsverhältnisse (durch konstante Inputkoeffizienten) hinsichtlich der charakteristischen Produkte unterstellt. Für eine Veränderung dieser Nutzungsverhältnisse, die sich aufgrund von Nachfrageprognosen aus Mikroanalysen ergeben können, ist die Anpassung der Inputkoeffizienten der beziehenden Sektoren notwendig.

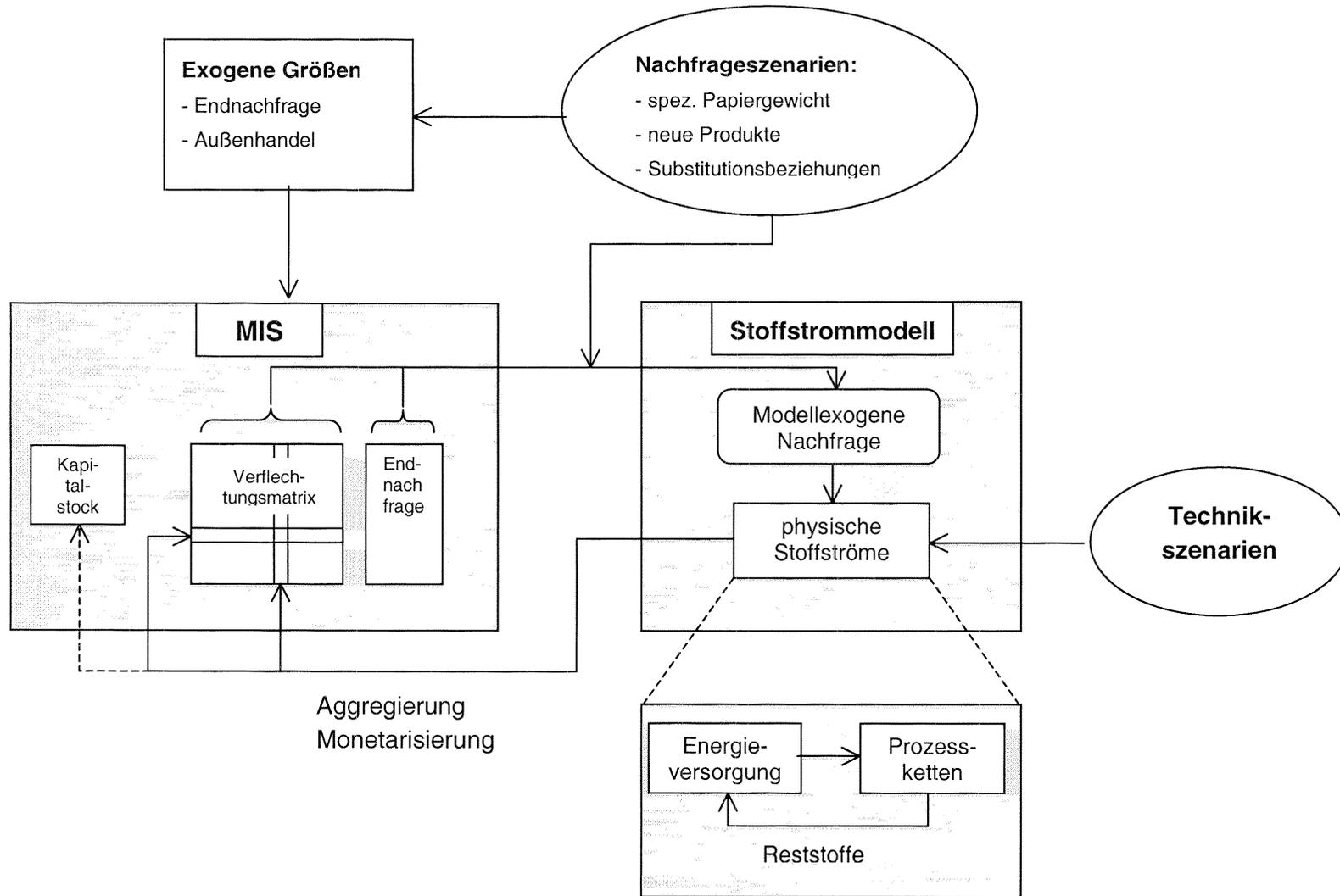
- (4) Die Nachfrage nach den charakteristischen Produkten (modellexogene Nachfrage) bildet den Ausgangspunkt für die Läufe des Stoffstrommodells. Sie wird aus Sicht des Stoffstrommodells exogen durch die Entwicklung des zugehörigen Sektors im IO-Modell gesteuert. Der innerhalb des IO-Modells ermittelte Sektoroutput für die Projektionsjahre ist dann auf die charakteristischen Produkte aufzuteilen. Im einfachsten Fall kann man annehmen, dass die Nachfrage nach allen Produkten jeweils mit der durchschnittlichen Rate des zugehörigen IO-Sektors wächst. Realistischer ist die Annahme unterschiedlicher produktspezifischer Wachstumsraten, die eine Veränderung des Produkt-Mix im Zeitablauf widerspiegeln. Entsprechende Annahmen können aus mikroanalytischen Überlegungen abgeleitet werden. Bei der Umrechnung in physische Mengeneinheiten, die in das Stoffstrommodell eingehen, werden die Preise auf Produktebene als konstant angenommen, um Preiseffekte auszublenken.
- (5) Mit dem Stoffstrommodell können nun die Auswirkungen von Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien auf die Wertschöpfungskette durchgespielt werden. Diese wirken sich auf die Entwicklung der Technologien, von Produkt- und Prozess-Mix und die Verknüpfung der Prozesse aus und beeinflussen auch die übrigen Stoffströme. Die Input-Output-Relationen der Prozesse spiegeln dabei den jeweils neuen durchschnittlichen Stand der Technik wider. Ebenso fließen Annahmen zur Verknüpfung der Prozesse ein, die z.B. Substitutionen zwischen der Produktion von Primär- und Sekundärwerkstoffen widerspiegeln können.
- (6) Als Ergebnis des Modelllaufs stehen die neuen Stoffströme innerhalb der Prozesskette fest. Diese gilt es in das IO-Modell zu übertragen. Dabei ist wiederum ein Schritt von den im Stoffstrommodell verwendeten physischen Einheiten zu den monetären Einheiten des IO-Modells erforderlich, wobei für den Projektionszeitpunkt mit den Preisen des Basisjahres gerechnet wird. Durch die Verschiebung der einzelnen Mengenkompontenten kann sich der durchschnittliche Outputpreis eines Sektors verändern. Dies ist im Rahmen des IO-Modells als Qualitätsveränderung zu interpretieren und daher im Mengenmodell mit auszuweisen.
- (7) Die Projektionswerte der Güterströme ergeben sich wie folgt aus den Werten der vor der Einkopplung des Stoffstrommodells erfolgten Modellläufe. Die nicht durch das Stoffstrommodell erklärten Güterströme bleiben unverändert. Die zumindest zum Teil durch das Stoffstrommodell erklärten Güterströme setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Der nicht erklärte Anteil bleibt

unverändert. Der erklärte Anteil setzt sich aus den zugehörigen, in konstanten Preisen bewerteten Stoffströmen des Stoffstrommodells zusammen.

- (8) Die Ergebnisse des Stoffstrommodells führen zu Anpassungen der Güterströme im Input-Output-Modell durch Monetarisierung und Aggregation der Stoffströme. Mit diesen angepassten Güterströmen wird eine neue Inputkoeffizientenmatrix und Leontief-Inverse berechnet. Mit der angepassten Verflechtungsmatrix wird ein neuerlicher IO-Modelllauf gestartet. Durch den Vergleich der sektoralen Güteraufkommen mit den im ersten Modelllauf ohne Einkopplung des Stoffstrommodells ermittelten Werten lassen sich die sektoralen Struktureffekte der untersuchten Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien identifizieren.

Durch die Verschiebungen innerhalb des Stoffstrommodells kann es wegen der intersektoralen Verflechtungen auch dazu kommen, dass die Ausgangswerte für die charakteristischen Produkte des Stoffstrommodells verändert werden. Im Falle der Papierkette würde dies bedeuten, dass durch eine Veränderung der Vorleistungen für die Papierherstellung die Nachfrage nach Papier verändert wird, was wiederum zu anderen Papiervorleistungen führt usw. In diesem Fall ist die iterative Durchführung der oben genannten Schritte erforderlich, bis ein Gleichgewicht erreicht ist.

Abbildung 6: Schema zur Kopplung des Input-Output-Modells MIS mit einem Stoffstrommodell



## 4 Aufbau eines Stoffstrommodells der Wertschöpfungskette „Papier“

Innerhalb des gekoppelten Modellsystems kommt dem Stoffstrommodell die Aufgabe zu, einen Ausschnitt aus dem volkswirtschaftlichen Kreislauf, nämlich die Wertschöpfungskette „Papier“ detailliert abzubilden. Darin werden die wichtigsten beteiligten Prozesse bzw. Aktivitäten für ausgewählte Stichjahre quantitativ, d.h. mit ihren ein- und austretenden Material- und Energieflüssen, und mit ihren wechselseitigen Vernetzungen dargestellt. Das Modell dient weiterhin als Basis für eine technologisch fundierte Projektion dieser Stoffströme für die Jahre 2005 und 2020. In verschiedenen Szenarien werden Maßnahmen zur Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz abgebildet. Dabei sollen sowohl technische als auch nachfragebedingte Maßnahmen berücksichtigt werden können. Die Zielgrößen, anhand derer die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen untersucht werden, sind das Aufkommen der beteiligten Stoffe (vor allem derjenigen mit einem Marktwert, d.h. ökonomischer Güter) und der Energieverbrauch. Diese stellen auch die Schnittstelle zum Input-Output-Modell dar.

Das Stoffstrommodell wurde mit der Software Umberto aufgebaut, die Stoffströme in Form von Petri-Netzen darstellt. Beispielhaft sind grafische Übersichten über Teile des Stoffstrommodells im Anhang abgebildet.

### 4.1 Systemgrenzen und Datengrundlagen

#### Abgrenzungen der Analyse

In Analogie zum verwendeten IO-Modell umfasst das zu untersuchende **System** die Wertschöpfungskette „Papier“ innerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland. Vor- und nachgelagerte Prozesse außerhalb dieses Bilanzraums werden nicht betrachtet, wohl aber Einfuhrströme in den und Ausfuhrströme aus dem Bilanzraum. Darin unterscheidet sich die Vorgehensweise von der häufig in Ökobilanzen gewählten, bei der versucht wird, globale Umweltauswirkungen einzubeziehen. Demgegenüber stehen die Inlandsaktivitäten im Mittelpunkt dieser Untersuchung. Im Modell werden die wichtigsten Material- und Energieströme einbezogen, deren Veränderung mit Auswirkungen auf die übrigen Wirtschaftssektoren verbunden sind. Dies sind vorwiegend Stoffe (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Vorprodukte, Produkte) und Energieträger mit einem ökonomischen Wert (Güter) oder solche, die Stoffe und Energieträger mit einem ökonomischen Wert ersetzen können. Neben den wesentlichen Stoffströmen werden Energieträger sowie auf der Abfallseite Papierreststoffe und die potentiell als Energieträger in Frage kommenden Reststoffe einbezogen. Der Wasserverbrauch wurde trotz seiner großen mengenmäßigen Bedeutung in der Papierindust-

rie nicht berücksichtigt, da ein nicht unwesentlicher Anteil durch eigene Brunnen bezogen wird und damit als Vorleistung in der IO-Tabelle nicht auftaucht.

Neben den Anforderungen, die aus dem Kopplungsansatz herrühren, determinieren die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand ableitbaren Daten die Struktur des Stoffstrommodells. Ebenfalls nicht einbezogen wurden daher kleinere Mengenverbräuche sowie immaterielle Vorleistungen, d.h. Dienstleistungen, deren Beeinflussung durch die modellierten Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien nicht anzunehmen ist. Lediglich die Dienstleistungen, die Bestandteil der Papierkette sind (z.B. Transport- und Handelsdienstleistungen) wurden einbezogen.

### **Verwendete Datenquellen**

Für den Aufbau des Stoffstroms wurden im Wesentlichen zwei Typen von **Datenquellen** verwendet, die sich vor allem durch ihr Aggregationsniveau unterscheiden:

- statistische Quellen und
- prozessbezogene, technische Fachliteratur (mikroanalytische Datenquellen).

Eine wichtige Quelle für Produktionszahlen ist die sehr ausführliche Verbandsstatistik des Verbandes Deutscher Papierfabriken (VDP). Verwendet wurden Daten für den Holzverbrauch, die Herstellung von Primär- und Sekundärfaserstoffen, Papier nach sechs verschiedenen Papiersorten sowie die Einsatzquoten von Altpapier zur Herstellung dieser Papiersorten. Für die Herstellung von Papierprodukten existieren ähnliche Zahlen in den Statistiken der entsprechenden Verbände. Für Informationen zum Außenhandel mit Rohstoffen, Vorprodukten und Produkten wurden ebenfalls Verbandsstatistiken und die Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes herangezogen.

Zur Generierung spezifischer Prozessinputs und –outputs, die gleichzeitig der Vernetzung der Prozesse dienen, wurden folgende Datenquellen verwendet (die im einzelnen in Kapitel 4.2 aufgeführt sind):

- Stoffstromanalysen,
- Ökobilanzen,
- Untersuchungen zu Altpapieraufkommen und –einsatz in der Papierherstellung sowie
- Verfahrensbeschreibungen in der papiertechnischen Fachliteratur.

Eine wichtige Quelle für energiebezogene Daten war die Technologiedatenbank IKARUS, in der für die energieintensiven Produktionsprozesse u.a. der Papierindustrie Daten zum derzeitigen und künftigen spezifischen Energiebedarf auf Einzeltechnikenebene abgelegt sind (FIZ o.J.).

## Harmonisierung und Abgleich technischer und I/O-Daten

Ein wesentlicher und zeitaufwendiger Arbeitsschritt bestand in der Harmonisierung der Daten aus der Vielzahl eher technikorientierter Datenquellen mit den statistischen Daten. Diese unterscheiden sich häufig hinsichtlich des Bezugszeitraums, der Repräsentativität und der benötigten Vollständigkeit der Daten. Dies gilt vor allem für prozessbezogene Daten aus Literaturquellen oder Ökobilanzen. Hinzu kommt, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt unterschiedliche Verfahren zur Herstellung eines Stoffs bestehen können und selbst bei identischen Verfahren an verschiedenen Standorten ein **unterschiedlicher Stand der Technik** gegeben ist. Bei abweichenden Daten ist somit einerseits die Generierung von für die Bezugszeit und den Bezugsraum repräsentativen Daten erforderlich. Andererseits ist es notwendig, mit der Summe der prozessbezogenen Angaben die statistischen Vorgaben zu treffen, damit ein konsistentes Bild von den vorhandenen Stoffströmen erreicht wird. Die Verwendung statistischer Daten, die auf Erhebungen bei den wirtschaftlichen Akteuren beruhen, hat den Vorteil, dass in der Regel eine **hohe Repräsentativität** vorliegt. Andererseits kann die Interpretation der Daten dadurch erschwert werden, dass sie häufig in **institutioneller Gliederung**, d. h. nach dem Schwerpunktprinzip, vorliegen. Dies führt dazu, dass auch branchenfremde Tätigkeiten, die außerhalb des eigentlichen Erkenntnisinteresses liegen, mit einbezogen werden. Dennoch gehören die an der Papierkette beteiligten Branchen im Vergleich zu anderen Produktionsbereichen zu den gut dokumentierten Branchen.

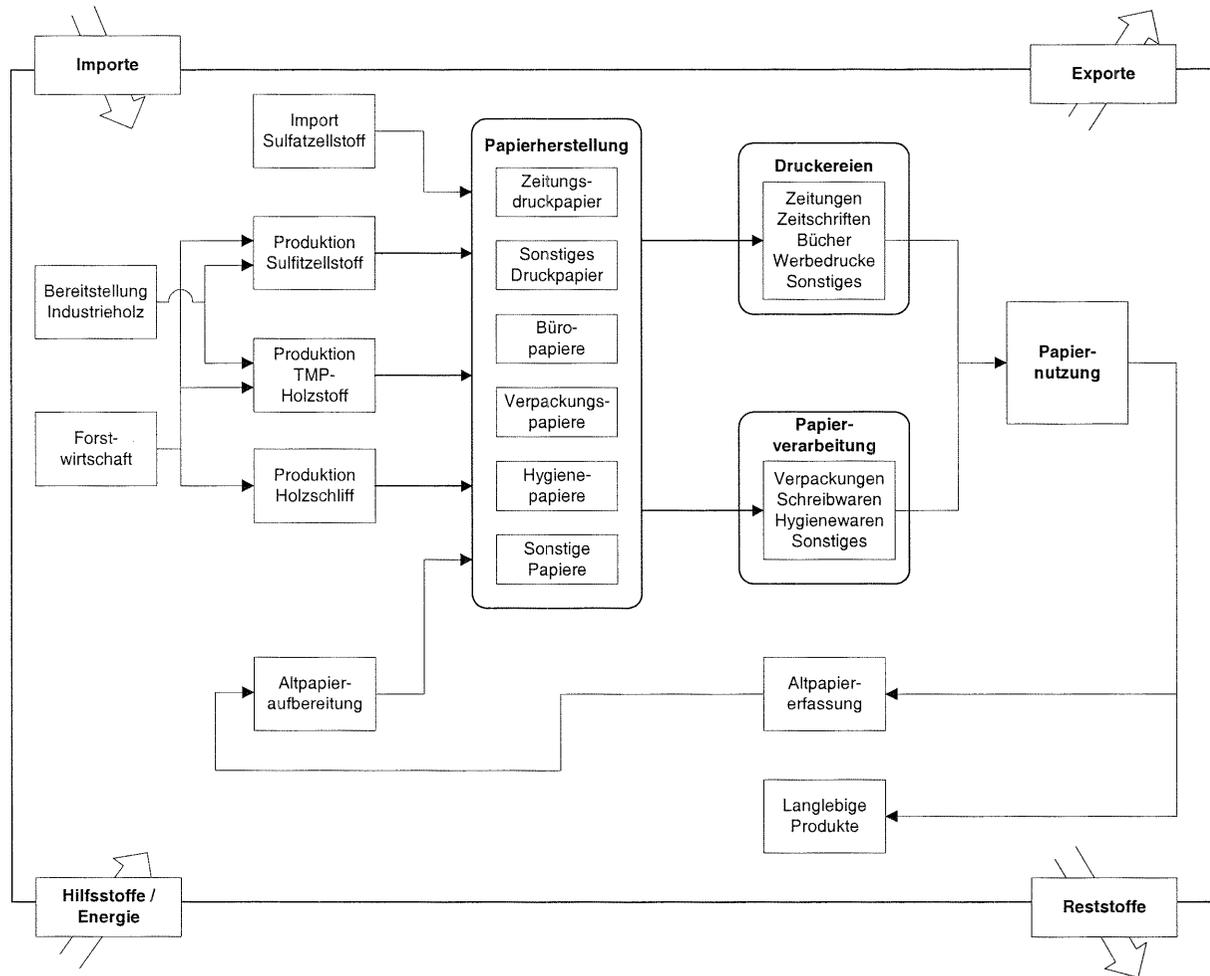
## 4.2 Die Stufen der Papierkette

### 4.2.1 Übersicht und Rahmenbedingungen

Papier stellt einen bedeutenden Werkstoff in unserer Industrie- und Wissensgesellschaft dar, der in der Vergangenheit hohe Wachstumsraten aufwies. Zwischen 1978 und 1998 ist der Papierverbrauch in Deutschland von rund 8.750 kt auf 16.860 kt gewachsen, d.h. überdurchschnittlich im Vergleich zum Wirtschaftswachstum. Die Herstellung von Papier basiert überwiegend auf erneuerbaren Rohstoffen. Wesentliche Rohstoffquellen für die als Zwischenprodukte erzeugten Faserstoffe sind zum einen Holz zur Herstellung von Holzstoff und Zellstoff und zum anderen Altpapier, das vorwiegend in Form gebrauchter Papierprodukte erfasst wird. Daneben finden in zunehmendem Maße mineralische Füllstoffe und Streichpigmente sowie eine Vielzahl chemischer Hilfsstoffe Verwendung.

Abbildung 7 enthält eine schematische Übersicht über die an der Papierkette beteiligten Prozesse, die im Weiteren näher erläutert werden.

Abbildung 7: Schema der Papierkette



Die wesentlichen mit der Papierherstellung verbundenen **Umweltauswirkungen** sind zurückzuführen auf:

- die Emissionen bei der Energieerzeugung zur Faserstoff- und Papierherstellung;
- Abwasseremissionen, vor allem aus der Zellstoffbleiche, wobei diese überwiegend im Ausland stattfindet und Elementarchlor als Bleichmittel in Europa kaum noch zum Einsatz kommt, sowie aus der Papierherstellung höherwertiger Papiere;
- den hohen Wasserverbrauch und die damit verbundenen Risiken der Übernutzung neuer Wasserressourcen;
- den Verbrauch von Prozesschemikalien, die als Emissionen umweltbedeutend wirken, sowie
- die Nutzung von Holz aus nicht nachhaltig bewirtschafteter Forstwirtschaft, vor allem für importierten Zellstoff.

#### **4.2.2 Der Rohstoff Holz**

Die Hauptrohstoffe für die Herstellung von Papier sind Faserstoffe, die als Primärfasern aus Holz und als Sekundärfasern aus Altpapier gewonnen werden. Das verwendete Holz stammt dabei zu ungefähr gleichen Teilen aus zwei Quellen. Zum einen wird das bei der Waldpflege anfallende Durchforstungsholz verwendet. Zum anderen wird Industrierestholz eingesetzt, das in verschiedenen Formen als Restholz in der holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie anfällt und von der Papierindustrie in Form von Hackschnitzeln abgenommen wird (Roffael et al., 1995). Tabelle 2 enthält eine Übersicht über den Holzverbrauch für die Herstellung von Primärfasern.

Das verwendete Holz stammt ganz überwiegend aus der heimischen Forstwirtschaft.

#### **4.2.3 Herstellung von Primärfasern**

Für den Einsatz in der Papierherstellung ist der Aufschluss des Holzes erforderlich. Hierfür kommen mechanische und chemische Aufschlussverfahren zum Einsatz, die Faserstoffe mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften hervorbringen. Durch mechanische Zerfaserung werden Holzschliff und TMP<sup>6</sup>-Holzstoff gewonnen, wobei für die Herstellung von Holzschliff langfaseriges Nadelholz aus Durchforstungsholz eingesetzt wird, während die Herstellung von TMP auch aus Industrierestholz möglich ist. Sowohl die Holzschliff- als auch die TMP-Herstellung ist mit einem hohen Stromverbrauch verbunden.

---

<sup>6</sup> Thermomechanical Pulp

Tabelle 2: Verbrauch von Holz für die Herstellung von Primärfaserstoffen für die Papierindustrie, Deutschland 1995

	Holzstoff- erzeugung	Zellstoff- erzeugung	Insgesamt
	(1000 NRm o.R.) <sup>7</sup>		
Nadelfaserholz	4358	4114	8472
- Waldholz	3179	690	3869
- Industrierestholz	1179	3424	4603
Laubfaserholz	4	1053	1057
- Waldholz	4	1053	1057
- Industrierestholz	0	0	0
Insgesamt	4362	5167	9529
- Waldholz	3183	1743	4926
- Industrierestholz	1179	3424	4603

(Quelle: VdP, 1997)

In Deutschland kommt nur ein chemisches Aufschlussverfahren zum Einsatz, mit dem Sulfitzellstoff hergestellt wird. Beim mengenmäßig wesentlich bedeutenderen Sulfatzellstoff ist die deutsche Papierindustrie bisher auf Einfuhren angewiesen (vgl. Tabelle 3). Derzeit wird in den neuen Bundesländern ein Sulfitzellstoffwerk auf die Sulfatzellstoffherstellung umgerüstet und soll im Jahr 2000 mit einer Jahreskapazität von 280 kt in Betrieb gehen. Je nach Einsatzbereich beinhaltet die Holz- und Zellstoffherstellung eine Bleichstufe, die in Deutschland wegen des Verzichts auf eine eigene Sulfatzellstoffproduktion ohne Elementarchlor als Bleichmittel auskommt.

Tabelle 3: Produktion, Verbrauch und Außenhandel von Primärfaserstoffen in der deutschen Papierindustrie 1995

	Produktion	Ausfuhr	Einfuhr	Verbrauch
	kt	kt	kt	kt
Holzschliff	934	18	73	989
TMP	332	1		331
Sulfitzellstoff	684	182	271	773
Sulfatzellstoff	0	88	3342	3254

(Quelle: VdP, 1997; StBA, 1997; eigene Berechnungen)

<sup>7</sup> NRm o.R.: Normraummeter ohne Rinde

#### 4.2.4 Aufbereitung von Altpapier

Der mengenmäßig wichtigste Rohstoff für die Papierherstellung in Deutschland ist inzwischen Altpapier, dessen Einsatzquote im Verhältnis zur Papier- und Pappenproduktion von 43% im Jahr 1978 auf rund 58% im Jahr 1995 (entspricht ca. 8,6 Mio. t) gestiegen ist. Es fällt zum einen bei der Herstellung und Distribution von Papier und Papierprodukten an, zum anderen wird es bei den Verbrauchern im Anschluss an die Nutzungsphase gesammelt. Die Haupteinsatzbereiche für Altpapier liegen in der Herstellung von Verpackungspapieren und –kartons, Hygienepapieren und Zeitungsdruckpapier. Altpapier wird in der Regel in den Papierfabriken, d.h. integriert, für den Einsatz in der Papiermaschine aufbereitet. Die Aufbereitung zu Altpapierstoff wird je nach Einsatzbereich unterschiedlich ausgelegt. Allen Verfahren gemeinsam ist die Zerfaserung des Altpapiers, die Reinigung und Abtrennung von Störstoffen wie Folien, Klammern oder Klebern sowie die anschließende Eindickung. Bei höheren Anforderungen an die optischen Eigenschaften des altpapierhaltigen Papiers kann die Entfernung von Druckfarben und/oder Füllstoffen durch eine Deinking-Stufe sowie eine Bleiche des Altpapierstoffs erfolgen. Je nach Auslegung ist die Altpapieraufbereitung mit unterschiedlich hohen Stoffverlusten verbunden, die von ca. 4 % bei der einfachen Aufbereitung für Verpackungspapiere und –kartons bis zu 25% bei der Aufbereitung für Hygienepapiere reicht.

#### 4.2.5 Herstellung von Papier

Der Papierverbrauch der vorliegenden Untersuchung lag im Basisjahr 1995 bei etwa 15,9 Mio t. (vgl. Tabelle 4).

Die ersten drei Sortengruppen werden zu den graphischen Papieren zusammengefasst. Sie machen knapp die Hälfte des gesamten Papierverbrauchs aus und werden vorwiegend für Information und Kommunikation verwendet. Knapp 40% des Papierverbrauchs dient der Herstellung von Verpackungen. Die restlichen 12% verteilen sich ungefähr zur Hälfte auf Hygienepapiere (Taschentücher, Küchentücher und Toilettenpapier) sowie technische und Spezialpapiere. Letztere umfassen so heterogene Papiersorten wie Kondensatorpapier für die Elektroindustrie, Karosseriepappe für die Automobilproduktion oder auch hochwertige Banknoten- und Dokumentenpapiere (Göttsching, 1990). Die Papierproduktion lag 1995 ca. 1 Mio. Tonnen unter dem Papierverbrauch bei ungefähr 14,8 Mio. t. Es besteht also ein Einfuhrüberschuss in der gleichen Größenordnung. Insgesamt ist bei Papier ein starker Außenhandel zu verzeichnen.

Tabelle 4: Verbrauch, Produktion und Außenhandel von Papier, Deutschland, 1995 nach Sortengruppen

Papiersorten	Produktion (kt)	Einfuhr (kt)	Ausfuhr (kt)	Verbrauch (kt)
Grafische Papiere				
- Zeitungsdruckpapier	1726	1197	562	2362
- Sonstige Druck- /Pressepapiere	4747	2912	3242	4418
- Büro-/Administrationspapiere	981	388	442	928
Verpackungspapiere und -pappen	5480	2721	1901	6300
Hygienepapiere	877	111	107	881
Spezialpapiere	1016	128	135	1009
Summe	14827	7459	6389	15897

(Quelle: VdP, 1997; StBA, 1997; eigene Berechnungen)

Die eigentliche Papierherstellung beinhaltet drei Schritte:

- die Stoffaufbereitung,
- die Herstellung der Papierbahn in der Papiermaschine und
- die Papierveredelung.

Je nach hergestellter Papiersorte kommt eine jeweils andere Mischung von Holzstoff, Zellstoff und Altpapierstoff zum Einsatz. In der Stoffaufbereitung werden die Faserstoffe aufgelöst, gereinigt, eventuell gemahlen und gemischt (Göttsching, 1990). Hier werden auch die jeweils benötigten Füllstoffe und Hilfsstoffe zugesetzt. An Füllstoffen werden vorwiegend mineralische Produkte wie Kaolin und gemahlene Calciumcarbonat verwendet. Zur gezielten Beeinflussung der Papierqualität und zur Optimierung des Herstellungsprozesses wird darüber hinaus eine Vielfalt chemischer Hilfsstoffe zugemischt (Baumann/Herberg-Liedtke, 1994; Auhorn/Linhart, 1990). Nach einer weiteren Verdünnung gelangt die Faserstoff-Füllstoff-Suspension zur Papiermaschine, wo bis zur Bildung der fertigen Papierbahn die Verfahrensstufen Stoffauflauf, Siebpartie, Pressenpartie und Trockenpartie durchlaufen werden. Anschließend kann noch eine Oberflächenbehandlung des Papiers z.B. durch Glätten, Leimung, Streichen oder Satinieren erfolgen (von Raven/Höke, 1990).

Die verschiedenen Papiersorten unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Zusammensetzung. Selbst bei einer bestimmten Papiersorte kann die Zusammensetzung zwischen verschiedenen Herstellern stark schwanken, da diese hier einen relativ hohen Spielraum haben. Für die durchschnittliche Zusammensetzung der Hauptsortengruppen gibt es keine statistischen Angaben. Statistisch sind nur die Altpapierersatzquoten erfasst (vgl. Tabelle 5). Die Verwendung von Altpapier konzentriert sich auf die Herstellung von Verpackungspapieren und Zeitungsdruckpapier, wo dieser Rohstoff mengenmäßig eindeutig dominiert. Wichtige relevante Einsatzbereiche sind Hygiene-

papiere und technische und Spezialpapiere. Abgesehen von Zeitungsdruckpapier liegt der Altpapiereinsatz bei den sonstigen grafischen Papieren auf einem niedrigen Niveau, auch wenn er seit einigen Jahren im Steigen begriffen ist.

Bei den sonstigen grafischen Papieren werden holzhaltige und holzfreie Sorten unterschieden. Die holzfreien Sorten bestehen vorwiegend aus Zellstofffasern und enthalten definitionsgemäß einen maximalen Holzstoffanteil von 5%. Bei diesen Sorten ist daher per Definition kein Altpapiereinsatz möglich, da Altpapier fast immer holzhaltig ist. Als holzhaltige Sorten werden Papiersorten mit einem Holzstoffanteil von mehr als 5% am Faserstoffeinsatz bezeichnet. In diesem Bereich ist seit einigen Jahren ein steigender Altpapieranteil zu verzeichnen. Zu den Büro- und Administrationspapieren gehören auch die sogenannten Recyclingpapiere, die ausschließlich auf Altpapierbasis hergestellt werden und vor allem zu Kopier- und Schreibzwecken verwendet werden (Göttsching, 1990).

Tabelle 5: Altpapiereinsatzquoten bei der Herstellung der Papiersortengruppen 1995<sup>8</sup>

	Zeitungsdruckpapier	Sonstige Druck- und Pressepapiere	Büro- und Administrationspapiere	Verpackungspapiere	Hygienepapiere	Technische und Spezialpapiere
Altpapiereinsatzquote	115%	8%	15%	95%	70%	46%

Quelle: VdP

Eine andere Unterscheidung von graphischen Papiersorten ist die in gestrichene und ungestrichene Papiere. Gestrichene Papiere erhalten einen ein- oder beidseitigen Pigmentstrich, der ihre Bedruckbarkeit verbessert. 1995 betrug der Verbrauch von Füllstoffen, Streichpigmenten und Hilfsstoffen 2939 kt, was einem Anteil von ca. 17% des Rohstoffeinsatzes in der Papierproduktion entspricht (VDP, 1997).

#### 4.2.6 Papier- und Pappeprodukte

Papier, Karton und Pappe stellen zum großen Teil Zwischenprodukte dar, die in anderen Branchen weiterverarbeitet werden. Nur ein geringer Teil der Produktion wird ohne weitere Verarbeitung an Endverbraucher geliefert. Im Wesentlichen dürften das Format- oder Endlospapiere sein, die zum Kopieren oder Drucken verwendet werden.

<sup>8</sup> Eine Quote von über 100% ist möglich, da bei der Altpapieraufbereitung Verluste anfallen, die hier mitgezählt werden.

Die wichtigsten industriellen Branchen zur Verarbeitung von Papier sind die Papier- und Pappeverarbeitung und die Druckereien. In der Papier- und Pappeverarbeitung lassen sich die folgenden Produktgruppen in der Reihenfolge ihrer Bedeutung unterscheiden (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Produktionsmengen der Papier- und Pappeverarbeitung in Deutschland, 1995

Produktgruppe	Produktion 1995 in kt
Packmittel und Verpackungen	5730
Hygienepapierwaren	1284
Schreibwaren und Bürobedarf	541
Sonstige Papierwaren, darunter Tapeten	522

(Quelle: HPV, 1998; eigene Berechnungen)

Verpackungen werden nicht nur in der Papier und Pappe verarbeitenden Industrie, sondern zum Teil auch direkt bei den Konsumgüter herstellenden Betrieben (z.B. in der Nahrungsmittelproduktion, Chemischen Industrie oder Elektrotechnischen Industrie) produziert und direkt befüllt (Grefermann, 1986).

Die Erzeugnisse der Druckereien lassen sich unterteilen in:

- Zeitungen und Anzeigenblätter,
- Zeitschriften,
- Bücher,
- Kataloge und Werbedrucksachen und
- Geschäftsdrucksachen.

Auch hier gibt es in vielen Unternehmen und Organisationen außerhalb des Druckereigewerbes sogenannte Hausdruckereien, in denen z.B. Mitarbeiter- und Kundenzeitschriften in eigener Regie gedruckt werden (Grefermann, 1990).

Ein Teil der unter dem Begriff „Technische und Spezialpapiere“ zusammengefassten Papiersorten wird ebenfalls in anderen Branchen weiter verarbeitet. Beispiele dafür sind die Verwendung von Dachpappe im Baubereich, Kondensatorpapieren in der Elektrotechnischen Industrie, Zigarettenpapier in der Tabakverarbeitung oder Dekor-papiere in der Möbelfurnierherstellung.

#### 4.2.7 Distribution und Nutzung der Papierprodukte

Über jeweils eigene Distributionswege, die Transportunternehmen, Groß- und Einzelhandel einschließen können, gelangen die Papierprodukte zu den Nutzern in Wirtschaft und Privaten Haushalten. Verpackungen stellen insofern eine Besonderheit dar, als sie nur dazu dienen, die Bereitstellung anderer Güter ohne Schaden und in einer bestimmten Qualität zu gewährleisten und in der Regel selbst nicht Zweck eines Kaufs sind. Unverkäufliche Zeitungen, Zeitschriften und Bücher werden von den Verlagen als Remittenden zurückgenommen und als Altpapier verwertet.

Der überwiegende Teil der Papierprodukte hat eine sehr kurze Nutzungsdauer und wird danach zu Abfall. Beispiele sind Zeitungen, Zeitschriften, Verpackungen oder Hygienepapierwaren. Ausnahmen sind Bücher und andere archivierte Papierprodukte, Tapeten oder auch einige technische Papiersorten. Der Anteil der langlebigen Produkte wird auf 7 % geschätzt.

#### 4.2.8 Altpapiererfassung

Das Altpapierpotential lässt sich in drei Fraktionen zusammenfassen:

- Produktionsausschuss in der Papierindustrie und den Papier verarbeitenden Industriezweigen,
- Papierprodukte, die hergestellt werden, aber nicht in die Nutzungsphase gelangen (vor allem unverkaufte Zeitungen, Zeitschriften und Bücher, Remittenden),
- Gebrauchte Papierprodukte, die im Anschluss an ihre Nutzung zur Entsorgung anstehen.

Nicht zum Altpapier gehören Papierwaren, die nicht erfassbar sind, z.B. weil sie über das Abwasser entsorgt (Toilettenpapier) oder verbrannt werden und solche, die aufgrund ihres Verschmutzungsgrades nicht zur Verwertung geeignet sind (gebrauchte Hygienepapierwaren oder Tapeten).

In der Papierindustrie anfallender Produktionsausschuss wird direkt in den Papierfabriken wieder zur Papierherstellung verwendet. Die in den Papier verarbeitenden Industrien anfallenden Produktionsausschüsse gehen in der Regel an den Altpapierhandel. Ebenso werden Remittenden vom Handel über die Verlage an den Altpapierhandel abgegeben.

Zur Erfassung und Rückführung gebrauchter Papierprodukte ist eine deutlich aufwendigere Logistik erforderlich, da diese flächendeckend anfallen. Wichtige Anfallstellen sind:

- ein- und auspackende Gewerbe- und Handelsbetriebe,
- sonstige Unternehmen, insbesondere Dienstleistungsunternehmen,

- die öffentliche Verwaltung und
- private Haushalte.

Zur Erfassung des Altpapiers sind verschiedene Hol- und Bringsysteme im Einsatz. Die wichtigsten sind:

- Depotcontainer, die flächendeckend in einem Entsorgungsgebiet aufgestellt werden und zu denen die Verbraucher ihr Altpapier bringen können,
- haushaltsnahe Altpapier- oder gemischte Wertstofftonnen, die von öffentlichen oder privaten Entsorgungsunternehmen regelmäßig geleert werden und
- Bündelsammlungen, bei denen vorwiegend karitative bzw. gemeinnützige Organisationen das Altpapier straßenweise bei den Haushalten abholen.

Seit Inkrafttreten der Verpackungsverordnung ist die Erfassungsquote von Altpapier, d.h. der Anteil des erfassten Altpapiers im Vergleich zur verbrauchten Papiermenge, deutlich gestiegen. Zugenommen haben jedoch vorwiegend die unteren Qualitäten, die z.B. über das DSD in den Haushalten erfasst werden. Da die Nachfrage nach diesen Altpapiersorten im Inland nicht in gleichem Maße gestiegen ist, kam es in den vergangenen Jahren zu einer deutlichen Zunahme der Altpapierexporte. Zur Deckung ihres Bedarfs an höheren Altpapierqualitäten ist die Papierindustrie auf Importe angewiesen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Aufkommen und Entsorgung von Altpapier 1995 in Deutschland

	Menge in kt	Anteil am Inlandsverbrauch Papierprodukte
Papierabfälle aus der Papierverarbeitung	1.105	7,8%
Inlandsaufkommen Papierprodukte	14.483	102,3%
- davon Remittenden etc.	330	2,3%
Inlandsverbrauch Papierprodukte	14.153	100,0%
Langlebige Produkte	1.094	7,7%
Nicht erfassbare Papierabfälle	1.847	13,1%
Inländisches Altpapierpotential	11.211	79,2%
Altpapierimporte	1.141	8,1%
Pre-consumer-Papierabfälle	1.435	10,1%
Altpapieraufkommen	13.787	97,4%
- davon in der Papierindustrie genutzt	8.753	61,8%
- Altpapierexporte	3.212	22,7%
- außerhalb Papierindustrie entsorgt	1.822	12,9%

(Quelle: Großmann et al., 1994; eigene Berechnungen)

#### 4.2.9 Energiebedarf und –versorgung der Papierindustrie

Die Herstellung von Papier ist mit einem vergleichsweise hohen spezifischen Energiebedarf verbunden. Innerhalb der Papierkette fällt der Hauptanteil des Energiebedarfs eindeutig auf die Bereiche der Faserstoff- und der Papierherstellung. Die Betrachtung des Energiebedarfs und der Energieversorgung konzentriert sich daher auf diese Produktionsbereiche. In der Bundesrepublik erfolgen die Herstellung von Holzstoff, Sulfitzellstoff und die Altpapieraufbereitung in der Regel in den Papierfabriken (integrierte Faserstoffproduktion).

Um die Prozessdaten (vgl. Tabelle 8) mit den amtlichen statistischen Daten zum Energieverbrauch der Papierindustrie zu harmonisieren, wurde eine leichte Unterschätzung der Prozessdaten in Kauf genommen. Dies hängt mit der institutionellen Gliederung der Energieverbrauchsstatistik (StBA, 1996c) zusammen, die die Papierproduktion in Betrieben außerhalb der Papierindustrie nicht berücksichtigt.

Tabelle 8: Aufteilung des Strom- und Wärmebedarfs der deutschen Papierindustrie nach Prozessen 1995

	absoluter Energieverbrauch		Produktion / Verbrauch 1995 t	spezifischer Nutzenergiebedarf	
	Wärme (TJ)	Strom (TJ)		Wärme (MJ/t)	Strom (MJ/t)
<b>Holzstoff</b>	<b>-417</b>	<b>9.248</b>	1.265.713		
Holzschliff	0	6331	932.355		6790
Refinerverfahren (TMP)	-417	2917	333.358	-1250	8750
<b>Zellstoff</b>	<b>0</b>	<b>1.898</b>	683.938		
Sulfit disk. Kochen	0	0	683.938	0	0
Sulfat-ZS-Aufbereitung	0	1898	3.164.000		600
<b>Altpapierstoff</b>	<b>3.196</b>	<b>6.881</b>	7.772.869		
Aufbereitung mit Deinking / Waschen	1728	3456	2.879.905	600	1200
Altpapieraufbereitung (ohne Deinking)	1468	3425	4.892.964	300	700
<b>Papierherstellung</b>	<b>77.548</b>	<b>29.655</b>	14.827.603	5230	2000
<b>Nebenanlagen</b>	<b>5.127</b>	<b>482</b>			
Beleuchtung		482			
Raumwärme	5127				
<b>Summe</b>	<b>85455</b>	<b>48164</b>			

(Quellen: IKARUS (FIZ, o.J.; Schmidt, 1994; Plätzer, 1998; Bölle, 1994; eigene Schätzungen)

Aufgrund des kontinuierlichen Strom- und Wärmebedarfs erfolgt die Energiebereitstellung in der Papierindustrie zu einem großen Anteil über Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. 1995 wurden 41% des Strombedarfs in eigenen KWK- und Wasserkraftanlagen erzeugt. Der Brennstoffbedarf wurde überwiegend durch Erdgas (55%) und Kohle (27%) gedeckt. Reststoffe aus den Herstellungsprozessen (Rinden, Spuckstoffe, ohne Sulfitablauge) trugen mit ca. 5% zum Brennstoffbedarf bei.

## **5 Empirische Durchführung der Modellkopplung zur Abbildung des technischen und strukturellen Wandels in der Papierkette**

### **5.1 Methodische Vorarbeiten**

#### **5.1.1 Die Abbildung der Papierkette in den amtlichen IO-Tabellen zwischen 1978 und 1990**

Bei der Zusammenstellung von Input-Output-Tabellen wird auf eine Vielzahl von statistischen Primärquellen zurückgegriffen, die zum Teil nicht originär zu diesem Zweck erhoben werden. Bis zur endgültigen Zusammenstellung der IO-Tabellen werden außerdem verschiedene Schritte zur Transformation und Anpassung der Daten durchgeführt. Hierbei kommen auch Modellannahmen und Plausibilitätsüberlegungen zum Einsatz, die dazu dienen, ein gesamtwirtschaftlich konsistentes Rechenwerk zu generieren. Annahmen und Methoden, die - auf gesamtwirtschaftlicher Ebene betrachtet - unproblematisch sein mögen, können jedoch im Prinzip zu einer Verzerrung der Abbildung einzelner Sektoren führen. Bei einem Vorhaben wie dem hier beschriebenen, bei dem die detaillierte Betrachtung intrasektoraler Zusammenhänge und Entwicklungen eine wichtige Rolle spielt und der Versuch der Verknüpfung von IOT-Daten mit Daten der Prozessebene unternommen wird, ist es daher von Interesse festzustellen, wie gut die Input-Output-Tabellen die realen Produktionsverhältnisse in dem oder den betrachteten Sektor(en) wiedergeben. Da die einzelnen Schritte bei der Erstellung der Input-Output-Tabellen und die dahinter liegenden Annahmen nicht im Einzelnen nachvollziehbar sind, kann die Güte der Abbildung eines einzelnen Sektors nicht ohne weiteres beurteilt werden. Für das vorliegende Vorhaben wurde daher mit einem empirischen Test versucht, einen Eindruck von der Abbildungsgüte in Bezug auf die Papierkette zu gewinnen. Eine ausführliche Beschreibung der dabei durchgeführten Analysen ist in Immenschuh (1998) enthalten. Die weiteren Ausführungen basieren auf dieser Arbeit.

Dazu wurde für die Jahre 1978 bis 1990, für die im Zweijahresabstand vergleichbare IO-Tabellen vorliegen, untersucht, in wie weit die Entwicklung der Vorleistungen der Papierindustrie in den IO-Tabellen die realen technischen und strukturellen Entwicklungen in der Papierindustrie widerspiegeln. Zum Vergleich wurden statistische Daten vorwiegend aus den jährlichen Leistungsberichten des Verbandes deutscher Papierfabriken herangezogen, die die Vorleistungsverbräuche der Papierherstellung in physischen Einheiten dokumentieren.

Die Inputkoeffizienten eines Sektors stellen gleichsam seine aggregierte Produktionsfunktion dar. Um diese im Zeitablauf vergleichbar zu machen und reine Preiswirkungen auszuschalten, wurde vor der Bildung der Koeffizienten eine Preisbereinigung der absoluten Vorleistungswerte und des Produktionswerts der Papierindustrie durchgeführt. Dazu wurden inländische und importierte Vorleistungen getrennt auf die Preisbasis von 1990 gebracht und anschließend addiert. Zur Preisbereinigung wurden Preisindizes verwendet, die vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellt wurden. In den Vergleich wurden die wichtigsten materiellen Vorleistungen der Papierindustrie einbezogen. Diese umfassen den Einsatz von

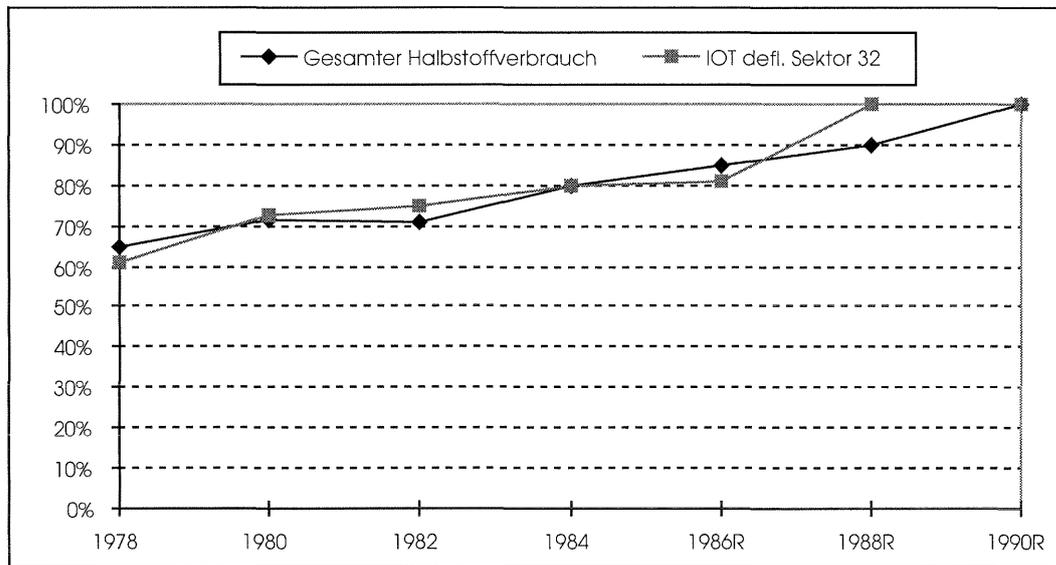
- Wald- und Industrierestholz,
- Primärfasern,
- Altpapier zur Gewinnung von Sekundärfasern,
- Energieträgern sowie
- Füllstoffen und Streichpigmenten.

Der ebenfalls wichtige Bereich des Einsatzes von chemischen Hilfsstoffen konnte aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt werden. Die Vergleichsdaten stammen aus den Verbandsstatistiken des VDP sowie zum Einsatz von Füllstoffen und Streichpigmenten aus eigenen Modellrechnungen. Obwohl die Verbandsangaben aus institutionell gegliederten Bezugseinheiten stammen, sind sie mit den funktional gegliederten Daten der IO-Tabellen vergleichbar, da in der Papierindustrie nur zu einem geringen Anteil (< 10%) branchenfremde Erzeugnisse hergestellt werden und zum anderen die Papierproduktion zu über 95% in der Papierindustrie stattfindet (StBA, 1996b).

Die Vergleichsmethode bestand darin, eine Zeitreihe preisbereinigter Vorleistungsinputs der entsprechenden Zeitreihe physischer Daten gegenüberzustellen. Aufgrund unterschiedlicher Einheiten wurde die relative Entwicklung beider Zeitreihen verglichen, wobei die Datenpunkte für 1990 auf 100% normiert wurden.

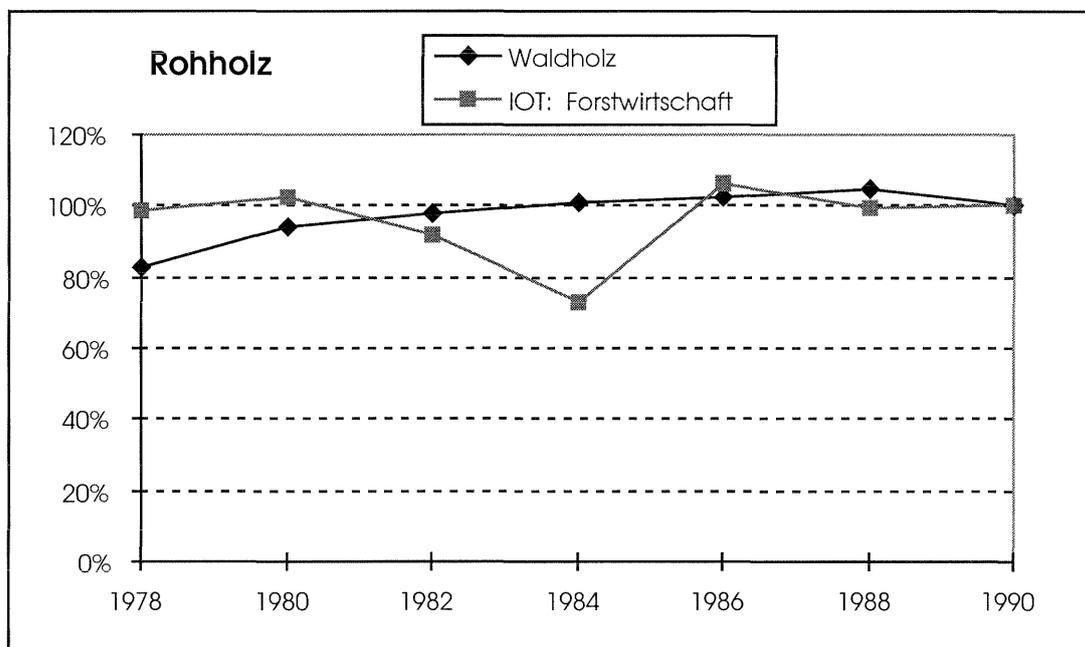
Die Ergebnisse des Vergleichs zeigen, dass die realen Trends in den Daten der IO-Tabellen weitgehend abgebildet sind. Ein Beispiel für eine gute Abbildung ist der Einsatz von Primärfaserstoffen, der mit den sektorinternen Vorleistungen der Papierindustrie verglichen wurde (vgl. Abbildung 8). Ähnlich gut wurden der Verbrauch von Industrierestholz sowie der Energieträger Strom, Kohle und Erdgas abgebildet. In einigen Fällen wird eine recht gute Abbildung durch Ausreißer in einzelnen Jahren gestört, die sich auf die Preisindizes in diesen Jahren zurückführen lassen. Ein Beispiel bietet dafür der Verbrauch von Waldholz (vgl. Abbildung 9).

Abbildung 8: Trendvergleich Halbstoffeinsatz / interne Vorleistungen der Papierindustrie (Quelle: Immenschuh, 1998)



R: nach Revision

Abbildung 9: Trendvergleich Waldholzverbrauch / Vorleistungen der Forstwirtschaft (Quelle: Immenschuh, 1998)



R: nach Revision

In diesem Fall entwickelt sich der Waldholzverbrauch in physischen Einheiten relativ stetig, während die monetären Vorleistungen aus der Forstwirtschaft im Jahr 1984 einbrechen. Der nicht preisbereinigte Wert für dieses Jahr zeigt in Verbindung mit dem Verbrauch in physischen Einheiten, dass zumindest für die Papierindustrie die Holzpreise stark gesunken sind. Diese Preissenkungen werden durch die Preisbereinigung jedoch kaum ausgeglichen, was ein Indiz dafür ist, dass der Holzsortenmix, den die Papierindustrie als Vorleistung bezieht, nicht unbedingt dem durchschnittlichen Output der Forstwirtschaft entspricht.

Die mangelnde Angemessenheit der Preisindizes mag auch der Grund für Trendabweichungen beim Verbrauch von Altpapier und Füllstoffen sein. Beim Altpapierverbrauch kommt noch hinzu, dass die Lieferung von Altpapier dem Sektor Großhandel zugeordnet ist, aber eher als eine Fremdaktivität in diesem Sektor betrachtet werden muss und daher nicht angemessen abgebildet wird. Dies ist bei den weiteren Modellierungsarbeiten zu berücksichtigen. Das Problem der Preisbereinigung hat hingegen für eine Ex-ante-Modellierung keine große Relevanz, da in Preisen des Basisjahres gerechnet wird.

### **5.1.2 Abgleich von Stoffstrommodell und IO-Modell**

Der Abgleich zwischen Stoffstrommodell und Input-Output-Modell für das Basisjahr dient dazu festzulegen, welche Teile der im IO-Modell vorhandenen Güterströme durch das Stoffstrommodell abgedeckt und hinsichtlich ihrer künftigen Entwicklung erklärt werden. Dazu ist die Festlegung von mittleren Preisen für die im Stoffstrommodell in physischen Einheiten abgebildeten Stoffe und Güter notwendig. Eine wichtige Schnittstelle zum IO-Modell stellen die sogenannten charakteristischen Produkte dar.

Tabelle A-22 enthält eine Gegenüberstellung der im Stoffstrommodell abgebildeten Stoffe und Güter mit den IO-Sektoren der amtlichen IO-Tabellen und des Modells MIS.

Tabelle 9 verdeutlicht den Ausschnitt aus der in 58 Sektoren untergliederten IO-Tabelle, der durch das Stoffstrommodell abgedeckt wird. In einigen Fällen ist die Abdeckung der Sektoren vollständig, in anderen Fällen wird nur ein Teil der Güterströme zwischen zwei Sektoren abgebildet. Insgesamt werden (in monetären Einheiten betrachtet) rund 80% der Vorleistungen der Papierindustrie in 1995 abgedeckt.

Tabelle 9: Güterströme innerhalb der amtlichen IO-Tabelle, die teilweise oder vollständig durch das Stoffstrommodell abgedeckt werden

von \ an	Holz-, Zellstoff / Papier	Papierver- arbeitung	Drucke- reien	Sonstige Verbrau- cher	Endnach- frage
Forstwirtschaft	x				
Stromerzeugung / Fernwärme	x				
Gas	x				
Chemische Industrie	(x)				
Mineralölverarbeitung	x				
Steine/Erden	x				
Holz-, Zellstoff / Pa- pier	x	x	x	x	x
Holzbearbeitung	x				
Großhandel	(x)				
Bahntransporte	(x)				
Schiffstransporte	(x)				
Lkw-Transporte	(x)				

x: Sektor vollständig durch Stoffstrommodell abgedeckt

(x): Sektor teilweise durch Stoffstrommodell abgedeckt

Für den Abgleich zwischen Stoffstrommodell und IO-Modell ist eine Monetarisierung der Stoffflüsse erforderlich. Dazu sind gemäß dem Preiskonzept der amtlichen IO-Tabellen Ab-Werk-Preise für das Jahr 1995 zugrunde zu legen. Diese unterscheiden sich konzeptionell von den Anschaffungspreisen dadurch, dass der Wert der Handels- und Transportleistungen sowie die nicht abziehbare Umsatzsteuer nicht enthalten sind. Bei importierten Gütern entsprechen sogenannte Ab-Zoll-Preise den Ab-Werk-Preisen (StBA, 1994). Die benötigten durchschnittlichen Preise waren häufig statistisch nicht erfasst und mussten geschätzt werden.

Äußerst problematisch war es in diesem Zusammenhang, die stark schwankenden Preise für die Rohstoffe Holz, Altpapier und Zellstoff zu handhaben. Zudem war eine Abstimmung der auf der Basis von Einzelpreisen gewonnenen Produktionswerte mit den in den Input-Output-Tabellen veröffentlichten Produktions-, Einfuhr- und Ausfuhrwerten erforderlich.

Als charakteristische Produkte des Stoffstrommodells, die die Schnittstelle zum IO-Modell bilden, wurden die sechs im Modell abgebildeten Papiersortengruppen ausgewählt.

## 5.2 Generierung der Szenarien

Im Zentrum der Szenarienbetrachtung stehen der – insbesondere durch Materialeffizienz- und Kreislaufwirtschaftsstrategien ausgelöste - technische und strukturelle Wandel innerhalb der Papierkette und die damit verbundenen Auswirkungen auf Energieverbrauch und sektorale Wirtschaftsstruktur. Die Entwicklungen innerhalb der Papierkette sind von verschiedenen Einflussgrößen abhängig:

- der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung;
- der Höhe und Struktur der Endnachfrage sowie der Zwischennachfrage, deren Entwicklung auch Einfluss auf den Papierverbrauch sowie den Papiersortenmix haben;
- rechtlichen Rahmenbedingungen;
- technischen Entwicklungen außerhalb der Papierkette, insbesondere der Informations- und Kommunikationstechnik vor dem Hintergrund eines möglichen Einflusses auf die Papiernachfrage;
- sozio-ökonomischen Faktoren, wie z.B. veränderten Preisrelationen oder Verbraucherpräferenzen.

Neben den technischen und strukturellen Entwicklungen innerhalb der Papierkette sind diese Entwicklungen innerhalb des Umfeldbereichs in die Generierung der Szenarien einzubeziehen.

Insgesamt wurden vier Szenarien betrachtet:

- das Basisszenario, das der Projektion mit MIS ohne Einkopplung des Stoffstrommodells entspricht,
- das Referenzszenario, das Referenzannahmen zur Entwicklung der Papierkette bis 2020 hinsichtlich Produkt-Mix, Technik, Materialeinsatz und Energieverbrauch bündelt,
- das Öko-Effizienzzenario, in dem bei gleichem Papierverbrauch wie im Referenzszenario vor allem technische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Umweltentlastung betrachtet werden und
- das Nachhaltigkeitsszenario, charakterisiert durch die nachhaltige Verwendung von Papier, das neben technischen Maßnahmen auch von einem effizienteren Papierverbrauch, einer stärkeren Ausschöpfung von Dematerialisierungspotentialen z.B. durch den Einsatz von IuK-Technologien sowie eine stärkere Akzeptanz von altpapierhaltigen graphischen Papieren ausgeht. In diesem Szenario wird, verglichen mit dem Referenzszenario, ein geringeres Wachstum des Papierverbrauchs angenommen.

Der Unterschied zwischen dem Basisszenario ohne Einkopplung des Stoffstrommodells und dem Referenzszenario mit Einkopplung und unter Verwendung der Referenzannahmen stellt quasi einen Methodeneffekt dar. Im Basisszenario werden die Inputs der Papierindustrie mit der Struktur des Basisjahres 1995 auf das Jahr 2020 hochgerechnet. Hingegen spiegeln die Inputs im Referenzszenario „realistischere“ Annahmen zur Produktionsfunktion der Papierindustrie im Jahr 2020 wider. Quelle der Unterschiede zwischen Referenz-, Öko-Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario sind hingegen variierende Annahmen zur Entwicklung der Papierkette. Durch den Vergleich dieser Szenarien können also „Maßnahmeneffekte“ identifiziert werden.

Bei der Festlegung der Szenarienannahmen wurde versucht, aktuelle verfügbare Informationen zu berücksichtigen. Dennoch bleibt der Versuch von Projektionen über einen so langen Zeitraum mit großen Unsicherheiten behaftet. Deshalb geht es hier auch nicht um eine prognostische Genauigkeit oder Wahrscheinlichkeit (im Sinne: was wird sein?), sondern viel mehr um plausible Annahmen und das Studium ihrer Auswirkungen, relativ zur Referenzentwicklung. Dies sollte bei der Interpretation der Szenarienannahmen und der Modellergebnisse berücksichtigt werden.

Die Annahmen zur gesamtwirtschaftlichen Entwicklung werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Die Darstellung der Entwicklungen in den übrigen Umfeldbereichen erfolgt im Zusammenhang mit der Beschreibung der jeweiligen betroffenen Szenarien.

## **5.2.1 Basisszenario des MIS-Modells**

### **5.2.1.1 Annahmen zu wichtigen ökonomischen Entwicklungen**

Die Rahmenannahmen zur *gesamtwirtschaftlichen Entwicklung* orientieren sich, soweit möglich, am Referenzszenario der Studie "Politiksznarien für den Klimaschutz – II", die im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wurde (DIW et al., 1999). In diesem Vorhaben wurde MIS ebenfalls zur Projektion der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung eingesetzt. Für die exogen vorzugebende Endnachfrage (ohne Investitionen) wurde danach eine jährliche Wachstumsrate in Höhe von

- 2,25% bis 2005 und
- 2,0% bis 2020

angenommen. Dies führt zu einem bis 2005 mit rund 2,0% /a und bis 2020 mit 1,8% /a wachsenden Bruttoinlandsprodukt (BIP).

Das Niveau und die Struktur der exogen vorzugebenden Endnachfrageaggregate für die Jahre 2005 und 2020 wurden ebenfalls in Anlehnung an den MIS-Referenzlauf im Projekt „Politiksznarien“ festgelegt. Eine Ausnahme bilden die Wachstumsraten der

Endnachfrage nach Gütern des Holzstoff, Zellstoff und Papier herstellenden Sektors, der Papierverarbeitung und der Druckereien, für die auf der Grundlage von Marktstudien und Entwicklungen in der Vergangenheit spezifische jährlichen Wachstumsraten angenommen wurden (vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Gleiches gilt für die in diesen Sektoren angesetzten Importquoten.

### **5.2.1.2 Endnachfrage nach Papier und Papierprodukten**

Untersuchungen zur Entwicklung der Nachfrage nach Papier haben gezeigt, dass in den Industrieländern eine hohe Korrelation zur Entwicklung des realen Bruttoinlandsprodukts besteht (FAO, 1994). Nach Schätzungen der FAO wird der Papierverbrauch in Deutschland zwischen 1991 und 2010 um 2,4 % pro Jahr steigen (Grefemann, Halk, Knörndel, 1998). Dies bedeutet eine Steigerung des Papierverbrauchs von 16 Mio. t 1991 auf 25 Mio. t in 2010. Die Unternehmensberatung Jaako Pöyry geht von einer jährlichen Wachstumsrate von 2,5% bis 2010 in Westeuropa aus und schätzt für Deutschland ein leicht darunter liegendes Verbrauchswachstum (Schirp, 1997).

Die Papiernachfrage lässt sich in die Zwischennachfrage und die Endnachfrage nach Papier aufteilen. Innerhalb des IO-Modells wird die Zwischennachfrage nach Papier durch die Entwicklung der Papier abnehmenden Sektoren bestimmt. Im Referenzszenario werden dabei die spezifischen Papierinputs der Abnehmersektoren konstant gehalten. Damit werden gleichbleibende Verbrauchsverhalten und Produktionstechnik bei den Abnehmerbranchen unterstellt. Die Endnachfrage nach Papier wird fast vollständig durch die Ausfuhr abgedeckt, während die privaten Haushalte mengenmäßig unbedeutend sind. Wichtiger ist die Nachfrage der Haushalte nach Papierwaren (Güter der Papierverarbeitung). Für das Referenzszenario wurde die Endnachfrage nach Papier, Papierwaren und Druckerzeugnissen vorgegeben (vgl. Tabelle 10). Grundlage dafür waren Vergangenheitstrends und Einschätzungen zu zukünftigen Marktentwicklungen (Hoppe/Baumgarten, 1997; Kessler, 1997; Hennig, 1994). Hinter den Annahmen steht zum einen die Überlegung, dass im Vergleich zur Vergangenheitsentwicklung in diesen drei Industriesektoren künftig mit einem schwächeren Wachstum aufgrund von Sättigungserscheinungen zu rechnen ist. Zum anderen wird von einer Fortsetzung der im letzten Jahrzehnt beobachteten verstärkten Exportorientierung der deutschen Papierindustrie ausgegangen, mit einem bis 2005 relativ hohen und danach abgeschwächten Wachstum der Auslandsnachfrage.

Tabelle 10: Jährliche Wachstumsraten der Endnachfrage nach Gütern der Papierherstellung, der Papierverarbeitung und der Druckereien bis 2020 im Referenzszenario

	1995 – 2005		2005 – 2020	
	Haushalte	Exporte	Haushalte	Exporte
Papierherstellung	2,5%	5,0%	2,0%	3,0%
Papierverarbeitung	1,5%	2,0%	1,0%	1,5%
Druckereien	1,5%	2,0%	0,7%	1,5%

Quelle: Eigene Annahmen

Im Gegensatz zur Exportquote<sup>9</sup> ist die Importquote<sup>10</sup> der Papierindustrie im letzten Jahrzehnt weitgehend konstant geblieben, so dass auch für die weitere Entwicklung bis 2020 konstante Importquoten angesetzt wurden. Für die Sektoren „Papierverarbeitung“ und „Druckereien“ wurden in MIS leicht steigende Importquoten angesetzt.

### 5.2.1.3 Ergebnisse der Basisprojektion als Grundlage für weitere Szenarioannahmen

Mit den in den vorigen Abschnitten erläuterten Annahmen wurde der Basislauf des Modells MIS gestartet, um die modellexogene Nachfrage nach Papier als Ausgangsgröße für das Stoffstrommodell zu berechnen. Dabei wurden die in MIS enthaltenen Optionen zur Berücksichtigung von Preiselastizitäten (CES-Funktionen) und des energieeffizienten autonomen technischen Fortschritts mittels AEEI-Faktoren ausgeschaltet. Damit werden zwar einerseits Mechanismen zur Berücksichtigung des technischen Wandels in MIS ausgeschaltet, andererseits war es jedoch notwendig, Überlagerungseffekte zwischen den MIS-eigenen Mechanismen und der expliziten Modellierung des technischen und strukturellen Wandels durch die Modellkopplung zu vermeiden.

Die Ergebnisse des MIS-Basislaufs ergeben eine Zunahme der modellexogenen Nachfrage nach Papier

- zwischen 1995 und 2005 um 2,0 % pro Jahr und
- zwischen 2005 und 2020 um 1,87 % pro Jahr (vgl. Tabelle 11).

<sup>9</sup> Anteil der Exporte an der Produktion

<sup>10</sup> Anteil der Importe am Inlandsverbrauch

Tabelle 11: Entwicklung der modellexogenen Papiernachfrage in Deutschland, 1995 - 2020

	1995 Mio. DM	2005 Mio. DM	2020 Mio. DM
Papiernachfrage	21089	25695	33950

Quelle: eigene Berechnungen

## 5.2.2 Szenarien zur Entwicklung der Papierkette

### 5.2.2.1 Nachfrage nach Papier und Papierprodukten

#### Vergangenheitsentwicklung

Die Zuordnung der Zunahme der modellexogenen Papiernachfrage zu einzelnen Papiersortengruppen ergibt sich nicht aus der oben erläuterten Rechnung, da im IO-Modell nicht zwischen diesen Papiersortengruppen unterschieden wird. Es ist daher erforderlich, die Zunahme der gesamten Papiernachfrage durch Hinzuziehen weiterer sortenspezifischer Informationen auf Papiersortengruppen aufzuschlüsseln. Ein Blick auf die Vergangenheitsentwicklung zeigt folgendes Bild:

Tabelle 12: Entwicklung der Papiernachfrage zwischen 1980 und 1995, nach Sortengruppen aufgeschlüsselt

	1980	1985	1990	1995
Verbrauch insgesamt (kt)	9.642	10.548	14.542	15.823
Zeitungsdruckpapier (ZDP)	14,5%	13,3%	13,3%	14,8%
Graph. Pap. ohne ZDP	35,9%	35,7%	35,2%	33,4%
Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke	40,8%	39,7%	39,8%	39,8%
Hygienepapiere	5,5%	6,1%	5,5%	5,6%
Technische und Spezialpapiere	3,3%	5,2%	6,2%	6,4%

(Quelle: Statistiken des VdP, versch. Jahrgänge; eigene Berechnungen)

Der Papierverbrauch hat sich zwischen 1980 und 1995 um rund 64% erhöht. Die Anteile der einzelnen Papiersorten sind in diesem Zeitraum relativ konstant geblieben. Auffällig ist die Verdopplung des Anteils der technischen und Spezialpapiere, allerdings auf insgesamt niedrigem Niveau. Leicht zurückgegangen sind die Anteile der graphischen Papiere (ohne Zeitungsdruckpapier) sowie der Verpackungspapiere.

### Referenzszenario und Öko-Effizienz-Szenario

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung insbesondere bei den graphischen Papiersorten wurden verschiedene Quellen zur künftigen Entwicklung des Papiermarktes herangezogen (Hoppe/Baumgarten, 1997; Kessler, 1997; Hennig, 1994; Otto/Hennig, 1992, Clark, 1994). Daraus geht hervor, dass bis zum Jahr 2000 überdurchschnittliche Wachstumsraten vor allem bei Werbedruck, Katalogen und Direct Mail zu erwarten sind. Hingegen ist der Papierverbrauch für Bücher leicht rückläufig. Dementsprechend werden überdurchschnittliche Wachstumsraten vor allem bei holzfreien und gestrichenen Papiersorten erwartet, während die Entwicklung bei den holzhaltigen Papiersorten eher unterdurchschnittlich eingeschätzt wird.

Auf der Basis dieser Informationen und bei Berücksichtigung der Vorgaben für die gesamte Papiernachfrage wurden für die einzelnen Papiersorten die in Tabelle 13 aufgeführten Wachstumsraten angenommen. Hinter diesen Annahmen stecken Annahmen zur Entwicklung der verschiedenen Papierprodukte. Danach erzielten vor allem Werbedrucksachen hohe und Zeitschriften leicht überdurchschnittliche Wachstumsraten. Vor allem Zeitungen und Bücher entwickeln sich unterdurchschnittlich. Für Verpackungen und Hygienewaren werden gewisse Marktsättigungserscheinungen und damit leicht unterdurchschnittliche Verbrauchsentwicklungen angenommen.

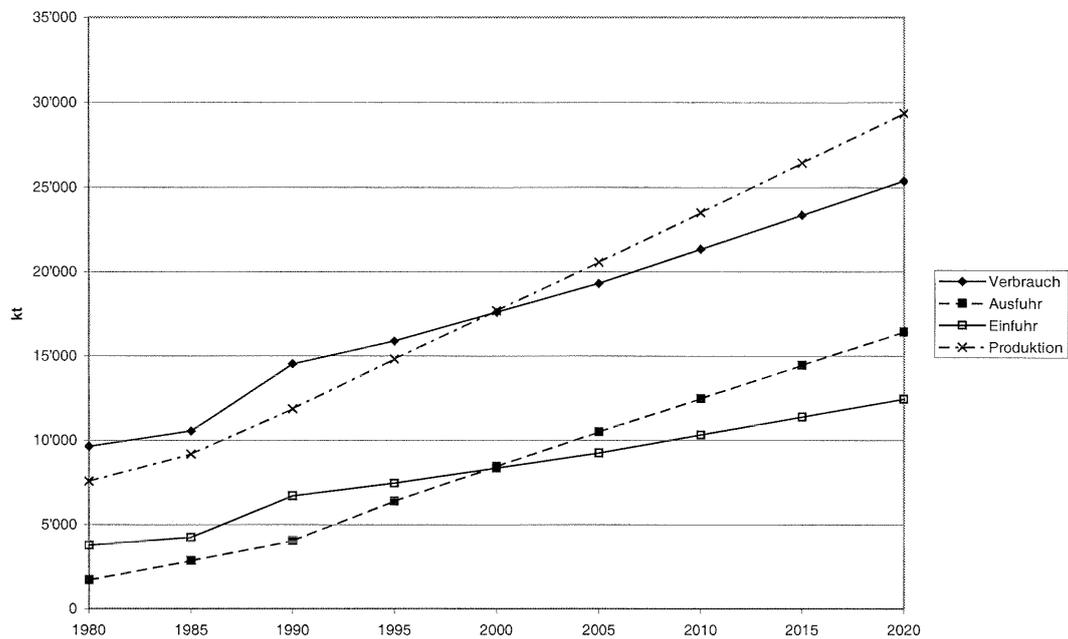
Tabelle 13: Angenommene jährliche Wachstumsraten des Papierbedarfs nach Papiersorten bis 2020 im Referenzszenario, Deutschland

	1995 – 2005 (%/a)	2005 – 2020 (%/a)
Zeitungsdruckpapier	1,09%	0,55%
Sonstige Druckpapiere	3,40%	2,90%
Büro-/Administrationspapiere	2,16%	2,17%
Verpackungspapiere, -kartons	1,30%	1,30%
Hygienepapiere	1,30%	1,30%
Spezialpapiere	1,68%	1,70%

(Quelle: eigene Schätzungen)

Beim Export der einzelnen Papiersorten zeigt die vergangene Entwicklung ein im Zeitverlauf sehr uneinheitliches Bild mit hohen Wachstumsraten über denen des Inlandsverbrauchs. Zukunftsprognosen waren nicht verfügbar. Für alle Papiersorten wurde ein einheitlicher Exportzuwachs von 5% /a bis 2005 und 3% /a bis 2020 angenommen. Der jährliche Exportzuwachs von Faserstoffen, die für den Export insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen, wurde für den gesamten Projektionszeitraum mit 1,5 % /a angesetzt. Diese Entwicklung unterstellt somit, dass die Bundesrepublik Deutschland im Papiersektor nach 2000 vom Nettoimporteure zum Nettoexporteur wechselt und im Jahr 2020 ca. 15 % seiner Produktion netto ausführt (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10: Entwicklung von Papierverbrauch, -außenhandel und -produktion bis 2020 in Deutschland – Referenzszenario



(Quelle: eigene Berechnungen)

Die Entwicklung der Sortenstruktur des Papierverbrauchs bis 2020 geht zu Gunsten der sonstigen Druckpapiere und vorwiegend zu Lasten der Verpackungspapiere und des Zeitungsdruckpapiers (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Entwicklung der Sortenstruktur des Papierverbrauchs bis 2020 - Referenzszenario

	1995	2005	2020
Zeitungsdruckpapier	14,9%	13,6%	11,3%
Sonstige Druckpapiere	27,8%	32,0%	37,4%
Büro-/Administrationspapiere	5,8%	5,9%	6,1%
Verpackungspapiere	39,6%	37,1%	34,3%
Hygienepapiere	5,5%	5,2%	4,8%
Spezialpapiere	6,3%	6,2%	6,2%

Quelle: eigene Berechnungen

### Nachhaltigkeitsszenario

In diesem Szenario wird von einem deutlich geringeren Wachstum der Papiernachfrage ausgegangen, das auf verschiedene Maßnahmen zurückzuführen ist,

- einen effizienteren Umgang mit graphischen Papieren im Haushalts- und Bürobereich;
- ein geringeres spezifisches Papiergewicht bzw. eine effizientere Nutzung von Papier, z.B. für Verpackungen, Zeitungen und Zeitschriften;
- einen geringeren Einsatz von Papier zu Werbezwecken, z.B. wegen einer kritischeren Haltung der Haushalte, und verstärkter Werbung über visuelle Medien und Internet;
- eine stärkere Ausschöpfung von Dematerialisierungspotentialen durch die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK-Technologien) anstelle von Papier.

Die Realisierungspotentiale dieser Maßnahmen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur schwer einzuschätzen. Dies gilt insbesondere für das Substitutionspotential durch IuK-Technologien.

Beispiele für den effizienteren Umgang mit Papier im Büro- und Haushaltsbereich sind:

- die Weiterverwendung einseitig beschrifteten oder bedruckten Papiers,
- die Verwendung von Kopierern und Druckern mit der Option des zweiseitigen Ausdrucks,
- organisatorische Veränderungen zur Verringerung von Fehldrucken etc.,
- Verwendung von Papier mit geringerem spezifischen Papiergewicht.

Anstrengungen bei der British Telecom und AT&T führten innerhalb weniger Jahre zur Senkung ihres spezifischen Papierverbrauchs um 15% bzw. 30% (Robins/Roberts, 1996; Robins, 1995). Untersuchungen zum Verpackungsverbrauch zeigen, dass Unternehmen, die sich dieser Thematik annehmen, in relativ kurzer Zeit spezifische Verringerungen des Verpackungsverbrauchs um 20 – 30 % erreichen können (IIED, 1996).

Ein Einfluss von Informations- und Kommunikationstechnologien auf den Verbrauch grafischer Papiere ist in zweierlei Hinsicht denkbar. Zum einen ist mit einer Verschiebung des Sorten-Mix zu rechnen, bei der es zu einer Verbrauchszunahme von Formatpapieren (Kopierpapier etc.) und einer Abnahme von Formularen und Vordrucken kommt (van den Reek, 1999). Zum anderen ist auch die Reduktion des Papierverbrauchs als Folge denkbar, beispielsweise weil zunehmend

- elektronisches Dokumentenmanagement die Papierablage verdrängt,

- über Email oder ähnliche Kommunikationskanäle kommuniziert wird,
- Zugang zu Informationen aller Art (Zeitungs-, Zeitschriften- oder Kataloginhalte, Nachschlagewerke) über elektronische Medien wie CD-ROMs oder vor allem das Internet stattfindet.

Bisher decken elektronische Medien weitgehend den Zuwachs des Informations- und Kommunikationsbedarfs ab oder erzeugen diesen sogar. Wenig ergonomische Displaytechniken haben bisher nicht zu einer Verdrängung von Papier geführt. Der Übergang von Papier als Informationsträger zu elektronischen Informationsträgern könnte in Zukunft jedoch einen deutlichen Schub durch neue Entwicklungen wie das „elektronische Papier“ (Heise, 1999a) oder die „elektronische Tinte“ (Heise, 1999b) erfahren, die sich wie Papier handhaben lassen, jedoch elektronisch wiederbeschreibbar sind. Ebenfalls in der Entwicklung sind farbige hochflexible und ebenfalls elektronisch ansteuerbare Polymerdisplays (Visser, 2000). Experten, die in der Delphi-Umfrage befragt wurden, rechnen mit einer Kommerzialisierung dieser Techniken um das Jahr 2010 (ISI, 1998).

Ob sich diese Entwicklungen durchsetzen und zu einer Substitution von Papier führen, hängt sehr stark von den künftigen Kosten der Papiersubstitute und der Akzeptanz der Verbraucher ab. Entsprechend schwer ist eine Prognose möglich. Im Nachhaltigkeits-szenario wird von einer gegenüber dem Referenzszenario stärkeren Akzeptanz und Diffusion derartiger Produkte ausgegangen und dementsprechend von einer stärkeren Ausschöpfung von Dematerialisierungspotentialen.

Bei der Abschätzung des Einflusses der beschriebenen Maßnahmen auf den Papierverbrauch wurde vom Verbrauch der Papierprodukte im Referenzszenario ausgegangen und für die beiden Projektionsjahre 2005 und 2020 die in Tabelle 15 aufgeführten Verbrauchsfaktoren gegenüber dem Referenzszenario angenommen. Die Annahmen konzentrieren sich dabei auf die graphischen Papierprodukte sowie Verpackungen und Bürobedarf. Der Verbrauch von technischen und Spezialpapieren, Hygienewaren und sonstigen Papierwaren sowie sonstigen Druckerzeugnissen wurde gegenüber dem Referenzszenario konstant gehalten.

Des Weiteren kommt es im Nachhaltigkeitsszenario zu einer deutlichen Verlangsamung des Verbrauchswachstums, verglichen mit der Entwicklung im Referenzszenario (vgl. Abbildung 11). Während der Papierverbrauch 2020 im Referenzszenario auf über 25 Mio. t ansteigt (dies entspricht ca. 310 kg/E • a), liegt er im Nachhaltigkeitsszenario bei knapp unter 20 Mio. t (ca. 240 kg/E • a).

Abbildung 11: Entwicklung des inländischen Papierverbrauchs bis 2020 im Referenz- und im Nachhaltigkeitsszenario, Deutschland

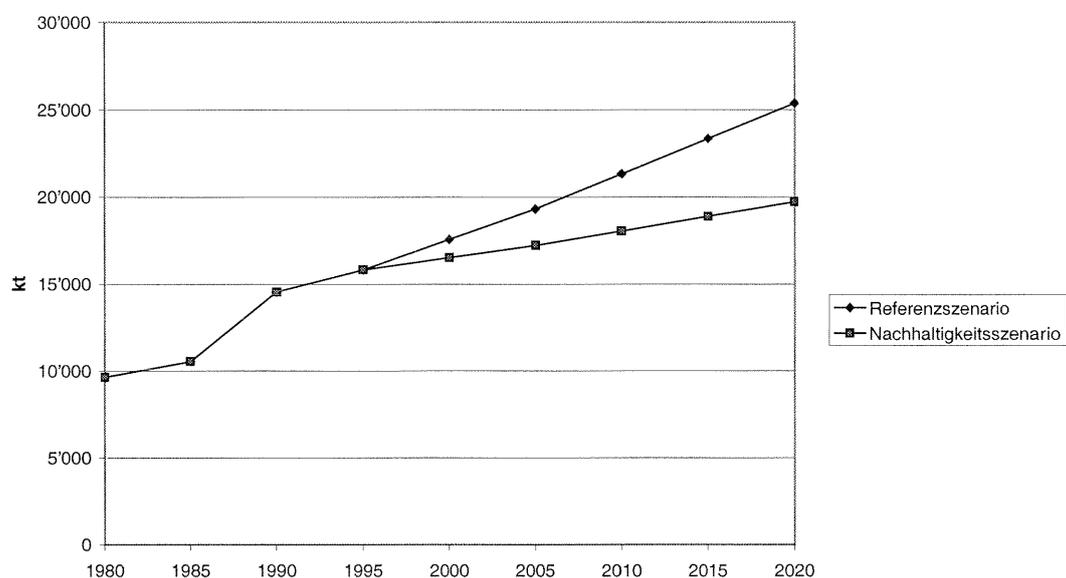
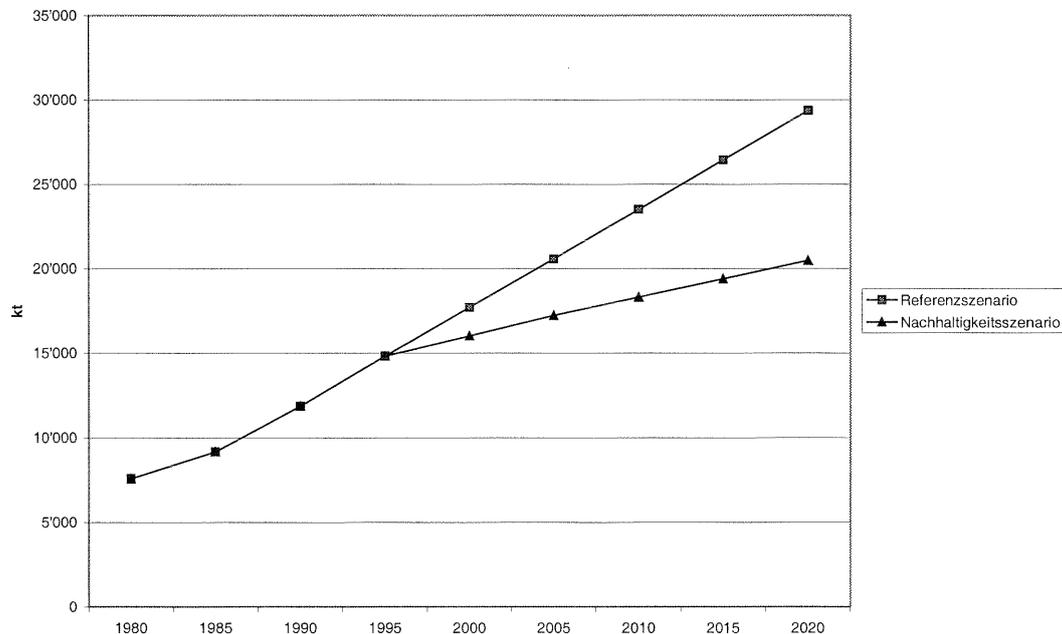


Tabelle 15: Faktoren zur Ableitung des Verbrauchs von Papierprodukten im Nachhaltigkeitsszenario

	Verbrauchsniveau gegenüber Referenzszenario		Inlandspapierverbrauch im Nachhaltigkeitsszenario		
	2005	2020	1995	2005	2020
			kt	kt	kt
Papier, unverarbeitet, Büro	85%	70%	788	841	974
Papier, unverarbeitet, Industrie	100%	100%	542	661	890
Verpackungen	90%	80%	5.960	6.103	6.585
Hygienewaren	100%	100%	881	1.003	1.217
Bürobedarf	80%	70%	558	508	540
Sonstige Papierwaren	100%	100%	517	588	714
Zeitungen	90%	70%	2.258	2.179	1.695
zeitschriften	90%	70%	1.590	1.797	1.881
Bücher	80%	70%	380	298	224
Werbedrucksachen	80%	70%	1.844	2.520	4.029
Sonstige Drucksachen	100%	100%	578	718	973
Summe			15.897	17.216	19.721

Im Nachhaltigkeitsszenario wird auch von einem im Vergleich zum Referenzszenario niedrigeren Exportwachstum ausgegangen, da unterstellt wird, dass sich verbrauchsmindernde Trends auch im Ausland durchsetzen und dementsprechend die ausländische Papiernachfrage geringer als im Referenzszenario ist. Gegenüber dem Referenzszenario wurden die jährlichen Wachstumsraten bei Faserstoffen mit 1%/a bis 2020 angesetzt und bei Papier mit 2,5% bis 2005 und 1,5% bis 2020. Wie im Referenzszenario wurden die Importquoten auf dem Stand von 1995 eingefroren. Daraus ergibt sich im Nachhaltigkeitsszenario die folgende Entwicklung der Papierproduktion (vgl. Abbildung 12):

Abbildung 12: Entwicklung der Papierproduktion in Deutschland bis 2020 im Referenz- und im Nachhaltigkeitsszenario



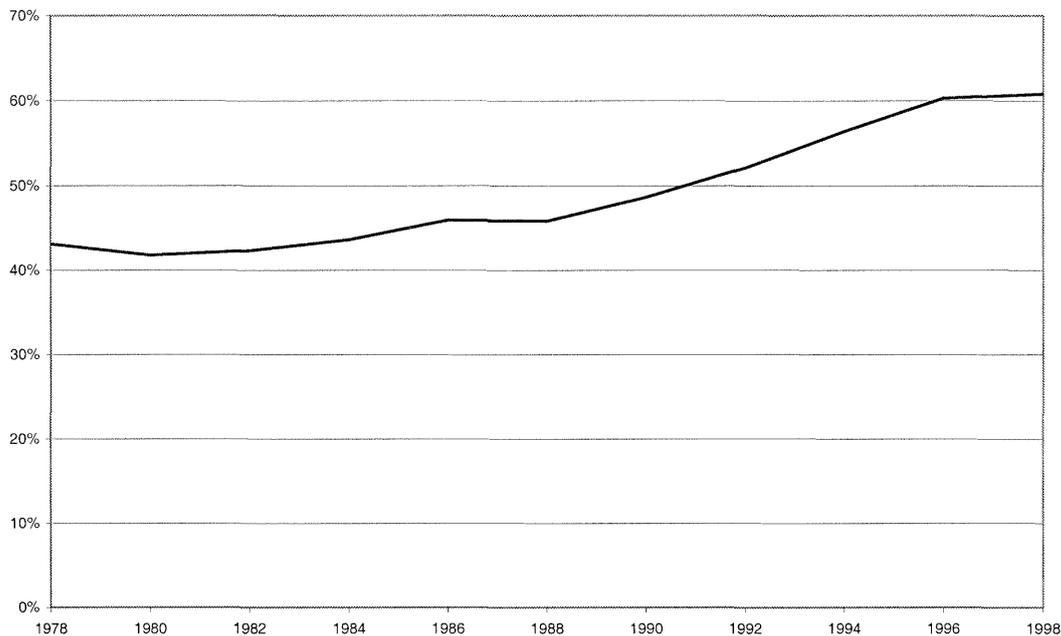
### 5.2.2.2 Entwicklung des Faserstoffeinsatzes zur Papierherstellung

Eine wichtige Einflussgröße für den Ressourcen- und Energieverbrauch in der Papierkette ist der Altpapiereinsatz bei der Papierherstellung, da dies zu einer Substitution von Primärfasern mit den damit verbundenen Umweltbelastungen führt.

#### Vergangenheitsentwicklung

In der Vergangenheit hat die Bedeutung von Altpapier als Faserstoffquelle für die Papierherstellung stark zugenommen. Dessen Einsatzquote im Verhältnis zur Papierproduktion ist von 43% im Jahr 1978 auf rund 61% im Jahr 1998 gestiegen (vgl. Abbildung 13), so dass Altpapier inzwischen der mengenmäßig wichtigste Rohstoff für die Papierherstellung in Deutschland ist.

Abbildung 13: Entwicklung der Altpapiereinsatzquote in Deutschland



(Quelle: Statistiken des VdP, versch. Jahrgänge)

### Szenarioannahmen

Die Haupteinsatzbereiche für Altpapier liegen in der Herstellung von Verpackungspapieren, Hygienepapieren und Zeitungsdruckpapier. Bei Verpackungspapieren mit fast 100% und bei Zeitungsdruckpapieren gar mit über 100% Altpapiereinsatzquote sowie bei den Spezialpapieren gilt das Potential als ausgeschöpft (Göttsching, 1996). Hygienepapiere bieten zwar noch ein Steigerungspotential, sind aber mengenmäßig vergleichsweise unbedeutend. Ein deutliches Wachstum des Altpapiereinsatzes ist daher nur im Bereich der sonstigen Druck- und Pressepapiere sowie der Büro- und Administrationspapiere möglich. Definitionsgemäß kann Altpapier nur zur Herstellung der sogenannten holzhaltigen Papiersorten eingesetzt werden. Allerdings ist in einigen Bereichen die Substitution von holzfreien Sorten wie z.B. Kopierpapier durch altpapierhaltige Sorten oder Recyclingpapiere möglich.

Bei den sonstigen Druck- und Pressepapieren und den Büro- und Administrationspapieren lag die durchschnittliche Altpapiereinsatzquote 1995 bei rund 8% bzw. 15%. Einzelne Hersteller holzhaltiger Sorten decken ihren Faserstoffbedarf bei holzhaltigen SC- und LWC-Papieren bereits bis zu 30% durch Altpapierstoff (Haindl, 1997; Krauthauf/Stöckler, 1999). Auch bei hochwertigen Büchern ist ein 25 - 50 %er Altpapierstoffanteil am Faserstoffbedarf möglich (Buchert et al., 1997). Die Verwendung von Altpapier wird in Deutschland auch durch das verhältnismäßig geringe Alter der Altpapierfasern erleichtert. Der Grund dafür liegt im hohen Einfuhranteil von Papier zum Druck von Zeitungen und Zeitschriften, die bevorzugt zum Deinking eingesetzt

werden, sowie im hohen Primärfasergehalt der importierten Papiersorten. Die Frage der maximalen Altpapiereinsatzquote ist daher weniger eine Frage der technischen Möglichkeiten, sondern eher der Marktakzeptanz.

Die den verschiedenen Szenarien zugrunde liegenden Annahmen zum Altpapiereinsatz spiegeln daher in erster Linie unterschiedliche Annahmen zur Akzeptanz von altpapierhaltigen grafischen Papiererzeugnissen wider. In allen Szenarien werden identische Annahmen zur Altpapiereinsatzquote bei der Herstellung von Zeitungsdruckpapier, Verpackungspapieren, Hygienepapieren und Spezialpapieren getroffen (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Entwicklung der Altpapiereinsatzquoten<sup>11</sup> bis 2020

<b>Referenzszenario</b>			
	<b>1995</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
Zeitungsdruckpapier	113%	115%	115%
Sonstige Druckpapiere	8%	23%	30%
Büro-/Admin.-papiere	15%	23%	30%
Verpackungspapier	95%	98%	98%
Hygienepapiere	70%	75%	80%
Spezialpapiere	46%	45%	45%
<b>Effizienzzenario</b>			
	<b>1995</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
Sonstige Druckpapiere	8%	30%	50%
Büro-/Admin.-papiere	15%	30%	50%
<b>Nachhaltigkeitsszenario</b>			
	<b>1995</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
Sonstige Druckpapiere	8%	40%	70%
Büro-/Admin.-papiere	15%	40%	70%

In der Vergangenheit wurde durch den Einsatz von Altpapier überwiegend Holzstoff ersetzt. Da in den Szenarienbetrachtungen jedoch zusätzliches Altpapier vorwiegend in graphischen Papieren zum Einsatz kommt, wird angenommen, dass sowohl Zellstoff als auch Holzstoff anteilsgemäß ersetzt werden.

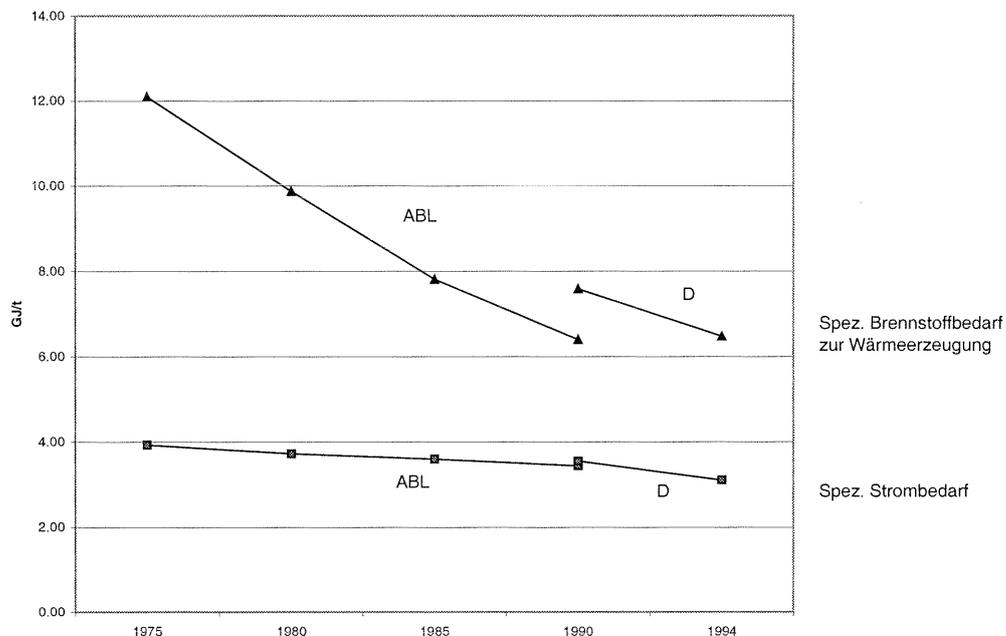
<sup>11</sup> Eine Quote von über 100% ist möglich, da bei der Altpapieraufbereitung Verluste anfallen, die hier mitgezählt werden.

### 5.2.2.3 Energiebedarf und Energiebereitstellung

#### Vergangenheitsentwicklung

In den letzten zwanzig Jahren hat die Papierindustrie ihre Energieeffizienz erheblich gesteigert (vgl. Abbildung 14). Während der spezifische Stromverbrauch nur leicht gesunken ist, wurden beim spezifischen Brennstoffbedarf zur Wärmeerzeugung erhebliche Fortschritte erzielt. Dies ist beim Strom auf erhöhte Automation und Leistungen der Papiermaschine und größeren Aufwand bei der Aufbereitung zu erklären, während die Brennstoffeinsparungen auf bessere Prozesstechnik mit geringeren Wärmeverlusten zurückzuführen sind (Diekmann, Eichhammer et al., 1999).

Abbildung 14: Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs der Papierindustrie



(Quelle: AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen)

Die spezifischen Netto-Effizienzgewinne lagen in diesem Zeitraum für den Stromverbrauch bei 0,7% - 1,1 % pro Jahr bzw. 2,7% zwischen 1990 und 1994 und für den Brennstoffbedarf bei 3,1% bis 4,6% pro Jahr (vgl. Tabelle 17).

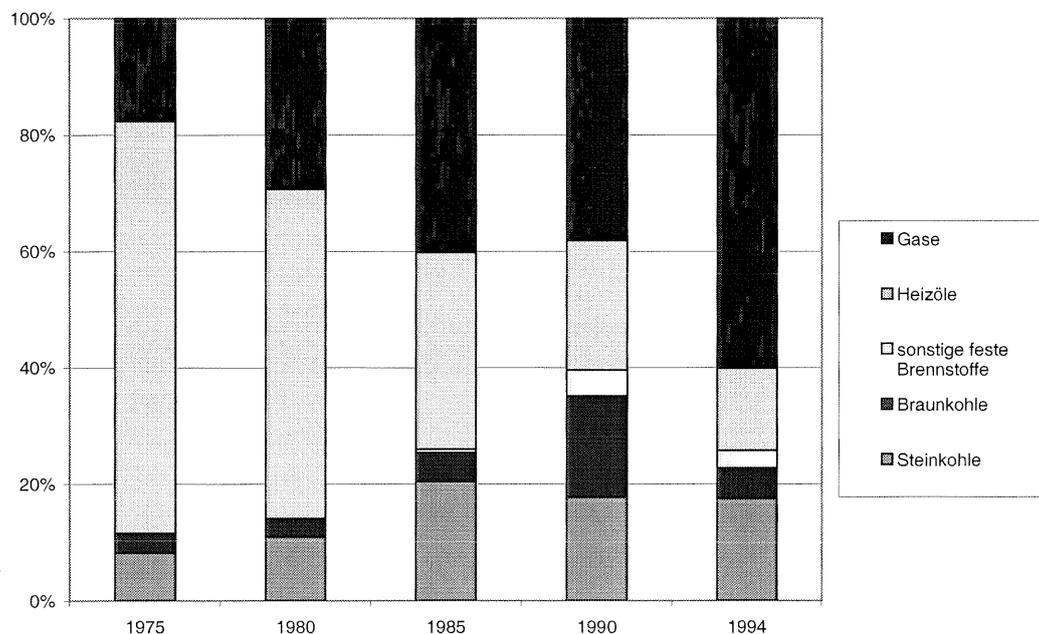
Tabelle 17: Entwicklung der spezifischen Endenergieverbräuche

	ABL		D	
	Spez. Strom- verbrauch (%/a)	Spez. Brennstoff- verbrauch (%/a)	Spez. Strom- verbrauch (%/a)	Spez. Brennstoff- verbrauch (%/a)
1975 – 1980	-1,1%	-4,0%		
1980 - 1985	-0,7%	-4,6%		
1985 – 1990	-0,9%	-3,9%		
1990 – 1995			-2,7%	-3,1%

(Quelle: AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen)

Ein Blick auf Abbildung 15 verdeutlicht den starken Wandel in der Zusammensetzung der Energieträger zur Wärmeerzeugung. Die Bedeutung der Mitte der siebziger Jahre dominierenden Mineralölprodukte hat seitdem stark nachgelassen, während Erdgas in diesem Zeitraum zum wichtigsten Energieträger geworden ist. Das Intermezzo der Braunkohle ist auf die ostdeutschen Papierfabriken während der ersten Jahre nach der deutschen Wiedervereinigung zurückzuführen.

Abbildung 15: Entwicklung der Energieträgerstruktur zur Wärmeerzeugung



(Quelle: AG Energiebilanzen, eigene Berechnungen)

Für die Energiebereitstellung ist ebenfalls von Bedeutung, dass in der Papierindustrie ein hoher Anteil des Strombedarfs durch Eigenerzeugung vorwiegend in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) bereitgestellt wird. Allerdings ist der Anteil der Stromeigenerzeugung rückläufig. Gleichwohl besteht in der Papierindustrie weiterhin ein hohes Einsatzpotential für die energieeffizienten KWK-Anlagen, das derzeit wegen der niedrigen Strompreise in der Marktberaumungsphase der Liberalisierung nicht genutzt wird.

### **Szenarioannahmen**

Die verwendeten Szenarioannahmen zum Energiebedarf und der Energiebereitstellung in der Papierindustrie orientieren sich weitgehend an den Szenarien der IKARUS-Datenbank (FIZ, o. J.). Dem Referenzszenario wurden die spezifischen Energiebedarfswerte aus dem IKARUS-Szenario „Standard“ zugrunde gelegt. Für das Öko-Effizienzzenario und das Nachhaltigkeitsszenario wurde eine stärkere Diffusion energieeffizienter Techniken angenommen. Dementsprechend wurden hier die Daten aus dem IKARUS-Szenario „Superspar“ übernommen. Die Annahmen im Einzelnen sind im Anhang (Tabelle A-25) zusammengefasst. In die Annahmen zur künftigen Struktur des Energieträgereinsatzes flossen außerdem Ergebnisse aus Rechenläufen des Papierflussmodells zum Aufkommen energetisch nutzbarer Reststoffe aus der Faserstoff- und Papierproduktion ein. Die Annahmen zur Energiebereitstellung sind ebenfalls dem Anhang zu entnehmen (vgl. Tabelle A-26).

Die wichtigsten Annahmen sind zusammengefasst:

- weitere Erhöhung der Prozess-Energieeffizienzen, allerdings geringer als in der Vergangenheit,
- Zunahme der Energieausbeute durch KWK-Anlagen,
- Verbesserung der mittleren Wirkungsgrade der Energieumwandlungstechniken,
- weiterer Shift des Brennstoff-Mix hin zu mehr Erdgas und Energieträger aus Reststoffen der Produktionsprozesse.

## **5.3 Ergebnisse der Modellrechnungen: Auswirkungen auf Energieverbrauch und Wirtschaftsstruktur**

Die Ergebnisse der Modellrechnungen lassen sich in drei Teile untergliedern,

- die Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Stoffstrommodell,
- die daraus abgeleiteten Änderungen der Verflechtungsmatrix im IO-Modell und
- die Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem IO-Modell.

### 5.3.1 Ergebnisse des Stoffstrommodells

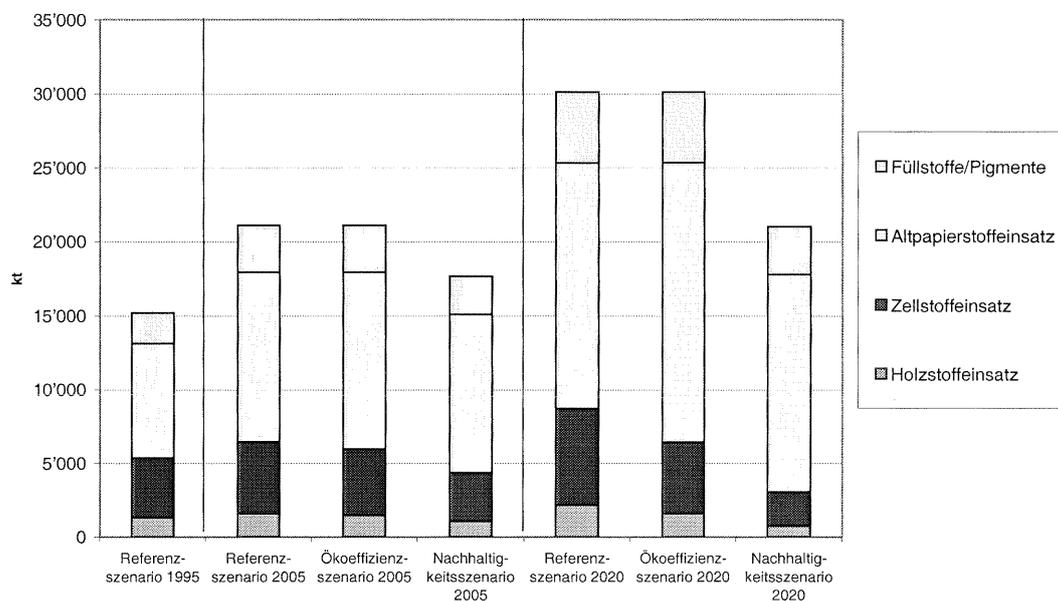
Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Stoffstrommodell zeigen die Auswirkungen der unterschiedlichen Szenarienannahmen auf die Stoffströme der Papierkette. Ausgangspunkt sind die in Abbildung 12 dargestellten und in Tabelle 18 erneut aufgeführten Papierproduktionsdaten.

Tabelle 18: Entwicklung der Papierproduktion bis 2020 (gerundet)

	1995	2005	2020
Referenzszenario	14.827	20.600	29.400
Öko-Effizienzzenario	14.827	20.600	29.400
Nachhaltigkeitsszenario	14.827	17.200	20.500

Zunächst wirken sich die untersuchten Varianten auf den Rohstoff- und Faserstoffbedarf aus. Abbildung 16 zeigt die Entwicklung des Faserstoff- und Füllstoffeinsatzes<sup>12</sup> in den unterschiedlichen Szenarien.

Abbildung 16: Entwicklung des Faser- und Füllstoffeinsatzes zur Papierproduktion



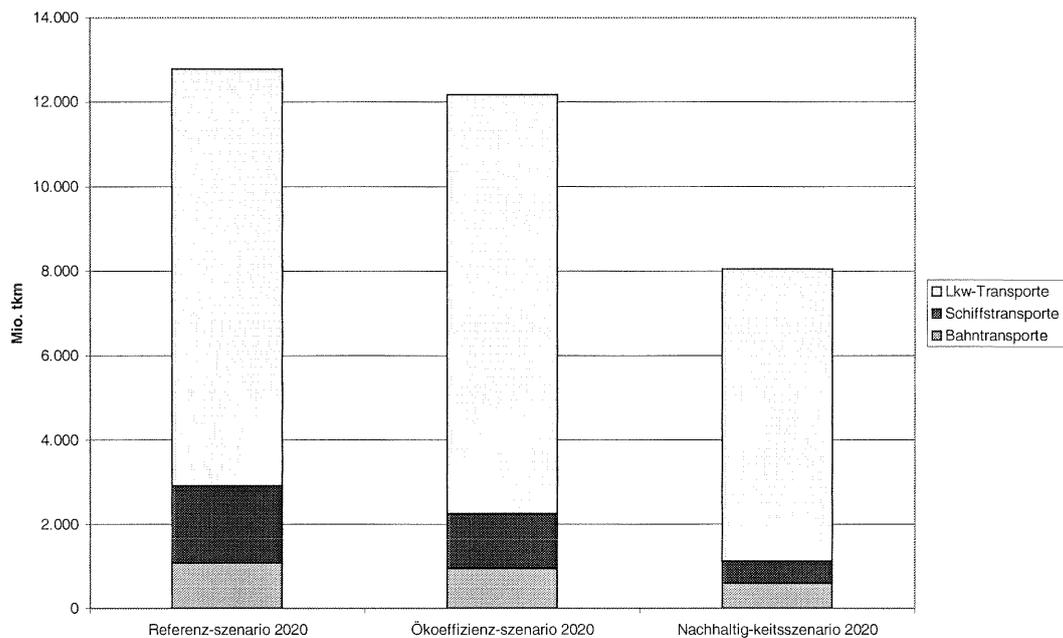
Im Wesentlichen verändert sich der Anteil von Altpapierstoff am Input zur Papierherstellung. Er erhöht sich im Referenzszenario von 51% in 1995 auf 55% in 2020. Im Öko-Effizienzzenario beträgt er in 2020 63% und im Nachhaltigkeitsszenario 70%.

<sup>12</sup> Der Verbrauch von Streichpigmenten ist im Füllstoffverbrauch mit enthalten.

Der Bedarf an Füllstoffen und Streichpigmenten sowie Hilfsstoffen für die Papierherstellung sinkt im Nachhaltigkeitsszenario aufgrund der gesunkenen Papierproduktion, insbesondere von Druck- und Pressepapieren (vgl. Tabelle 19). Der Übergang zu einer stärker auf dem Rohstoff Altpapier basierenden Papierwirtschaft führt zu einem höheren Verbrauch von Hilfsstoffen für die Faserstoffherstellung, da hierdurch zum großen Teil Holzstoff, der ohne den Einsatz von Hilfsstoffen produziert wird und Sulfatzellstoff, der im Ausland hergestellt wird, substituiert werden.

Abbildung 17 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Szenarien bei den Transporten innerhalb der Papierkette im Jahr 2020. Diese zeigen vor allem einen Rückgang der Schiffstransporte zwischen Referenz- und Öko-Effizienzzenario, während die sonstigen Unterschiede gering ausfallen. Beim Vergleich zwischen Öko-Effizienzzenario und Nachhaltigkeitsszenario wirken sich wiederum die Unterschiede im Niveau der Papierproduktion aus.

Abbildung 17: LkW-, Schiffs- und Bahntransporte in der Papierkette für 2020



(Quelle: Eigene Berechnungen)

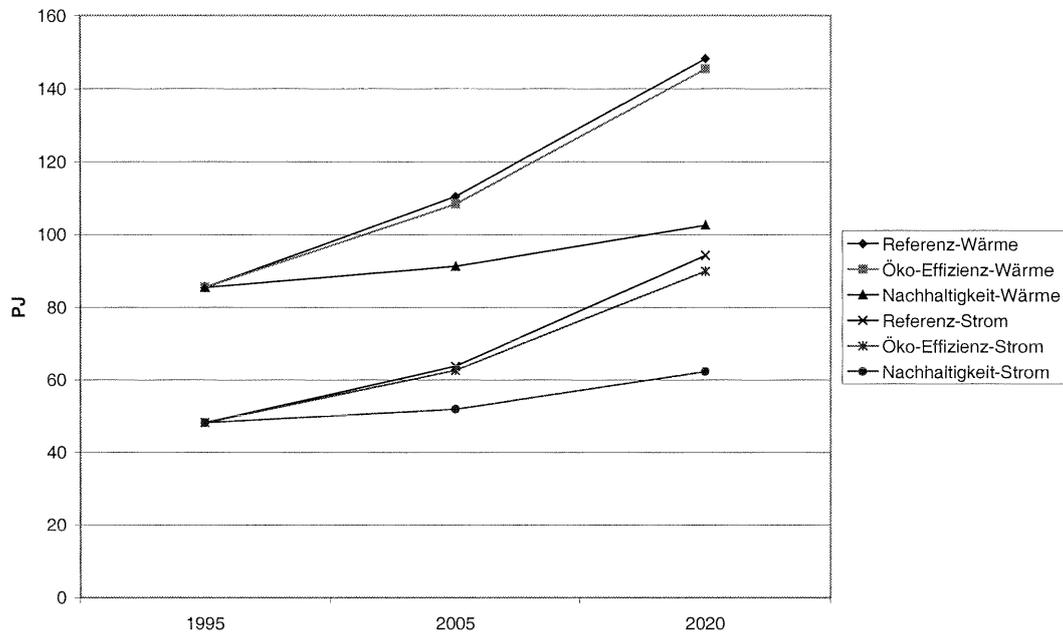
Wichtige Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der Entwicklung des Energieverbrauchs, wie Abbildung 18 zeigt. Hinsichtlich des Strom- und Wärmebedarfs unterscheiden sich Referenz- und Ökoeffizienzzenario kaum. Deutliche Energieeinsparungen ergeben sich im Nachhaltigkeitsszenario durch die geringere Papierproduktion.

Tabelle 19: Einsatz von Rohstoffen, Hilfsstoffen und Faserstoffen zur Papierherstellung, 1995 – 2020, in kt

	Referenz- szenario 1995	Referenz- szenario 2005	Ökoeffizienz- szenario 2005	Nachhaltig- keitsszenario 2005	Referenz- szenario 2020	Ökoeffizienz- szenario 2020	Nachhaltig- keitsszenario 2020
Holzstoffeinsatz	1.320	1.596	1.468	1.074	2.154	1.590	751
Zellstoffeinsatz	4.025	4.868	4.477	3.276	6.569	4.849	2.291
Altpapierstoffeinsatz	7.773	11.492	12.013	10.766	16.618	18.904	14.765
Füllstoffe/Pigmente	2.108	3.156	3.156	2.574	4.788	4.788	3.223
Zusammen	15.226	21.113	21.114	17.690	30.128	30.130	21.030
Hilfsstoffe							
Faserstoffherstellung	230	396	408	367	592	647	514
Papierherstellung	758	1.074	1.074	892	1.557	1.557	1.071

(Quelle: Eigene Berechnungen)

Abbildung 18: Entwicklung des Strom- und Wärmebedarfs in der Papierindustrie bis 2020

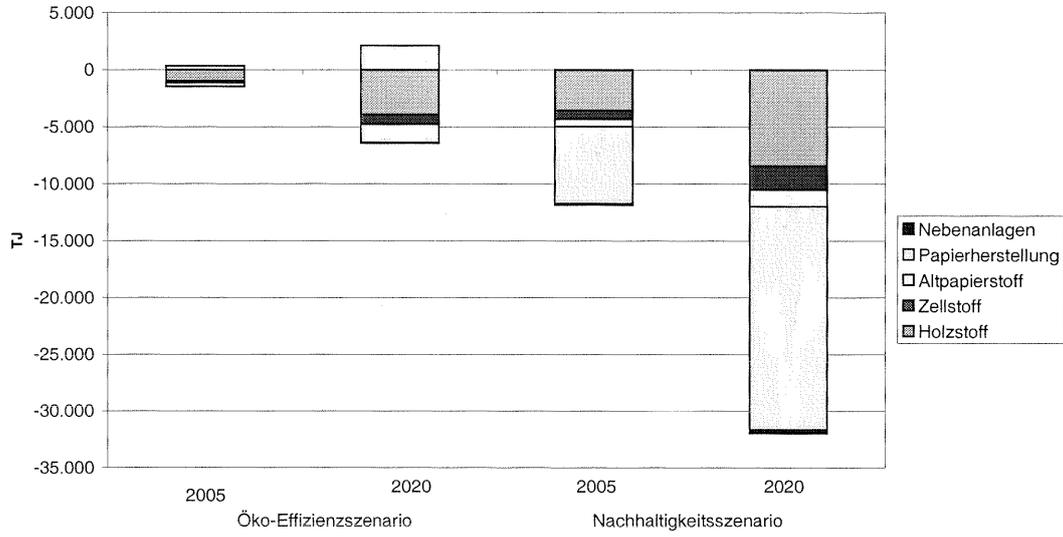


(Quelle: Eigene Berechnungen)

In den Abbildungen 19 und 20 sind die Abweichungen des Strom- und Wärmebedarfs zwischen Öko-Effizienz sowie Nachhaltigkeitsszenario und dem Referenzszenario nach Prozessen aufgeschlüsselt. Ursächlich für den Strombedarfsrückgang im Öko-Effizienzzenario ist vor allem die Substitution von Holzstoff durch Altpapierfasern. Die Substitution von Zellstofffasern führt zu einem geringen Rückgang des Energieaufwandes zur Aufbereitung von importiertem Sulfatzellstoff. Die Energieeinsparungen bei der Papierherstellung fallen gering aus. Der Produktionsrückgang im Nachhaltigkeitsszenario führt zu einer Verringerung des Energiebedarfs in allen Bereichen der Papier- und Faserstoffproduktion.

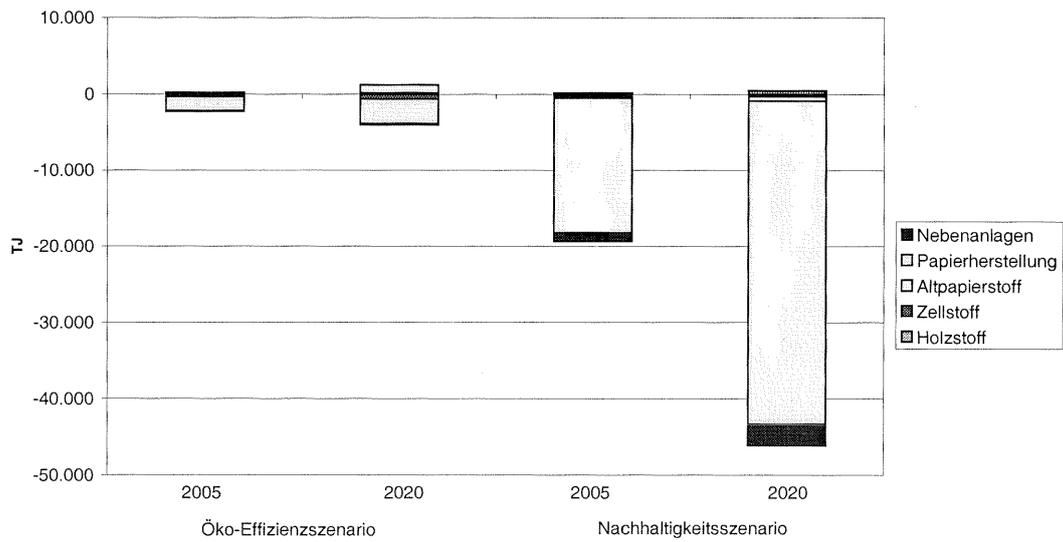
Wegen der hohen Bedeutung der Papierherstellung für den Wärmebedarf der Papierindustrie liegen hier auch die Hauptunterschiede zwischen den drei Szenarien. Auch beim Wärmebedarf fällt der Unterschied zwischen Referenz- und Ökoeffizienzzenario relativ gering aus. Ursächlich für den Rückgang im Nachhaltigkeitsszenario ist auch hier die geringere Papierproduktion.

Abbildung 19: Abweichungen des Strombedarfs vom Referenzszenario



Quelle: Eigene Berechnungen

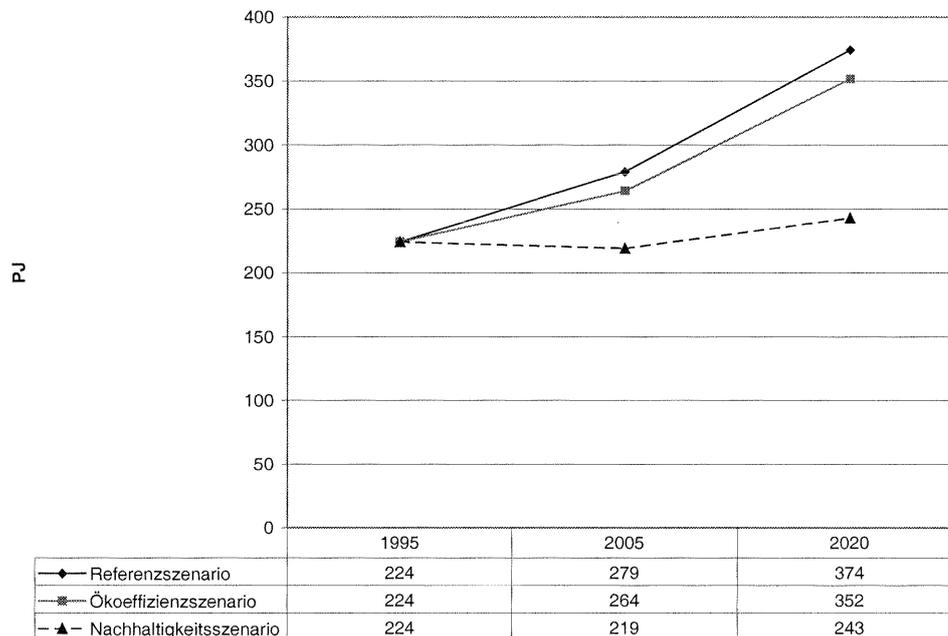
Abbildung 20: Abweichungen des Wärmebedarfs vom Referenzszenario



(Quelle: Eigene Berechnungen)

Auf der Energiebereitstellungsseite findet eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz durch die vermehrte Stromgewinnung in effizienten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen innerhalb der Papierindustrie statt. Hinzu kommt eine stärkere Energiegewinnung durch den Einsatz von Reststoffen aus der Faser- und Papierherstellung. Dies führt zusammen mit den Effizienzgewinnen in den Produktionsprozessen zu einem insgesamt geringeren Primärenergiebedarf. Dies verdeutlicht Abbildung 21, die den Energieverbrauch der Papierindustrie in Primärenergieäquivalenten darstellt. In dieser Darstellung wird auch der Unterschied zwischen Referenz- und Öko-Effizienzzenario deutlicher. Im Nachhaltigkeitsszenario geht der Primärenergieverbrauch bis 2005 sogar leicht zurück, bevor er bis 2020 nochmals ansteigt. Im Jahr 2020 liegt der Primärenergieverbrauch im Öko-Effizienzzenario um rund 6% unter dem entsprechenden Wert des Referenzszenarios, im Nachhaltigkeitsszenario liegt er sogar um ca. 35% niedriger. Deutlichere Energieeinsparungen durch technische Maßnahmen sind erst bei weitergehenden, „radikaleren“ Verfahrensumstellungen in der Papierindustrie möglich (de Beer, 1998). Die Bereitschaft dazu ist in der deutschen Papierindustrie bisher noch nicht abzusehen.

Abbildung 21: Entwicklung des Energieverbrauchs der Papierindustrie bis 2020 in Primärenergieäquivalenten



(Quelle: Eigene Berechnungen)

### 5.3.2 Änderungen der Verflechtungsmatrix im IO-Modell

Die unterschiedlichen zur Entwicklung der Papierkette getroffenen Szenarienannahmen führen zu differierenden Entwicklungen der Papierindustrie. Diese Unterschiede spiegeln sich in unterschiedlichen Verläufen von Produktion, Verbrauch und Außenhandel sowie insbesondere in unterschiedlichen Entwicklungen der Vorleistungen der Papierindustrie wider. In vorigen Abschnitt wurden die wichtigsten Veränderungen der Stoffströme innerhalb der Papierkette erläutert. Die Übersetzung dieser Veränderungen in das Input-Output-Modell MIS erfolgt durch Monetarisierung der physischen Güterflüsse und Aggregation in die Sektorklassifikation von MIS. Bei der Betrachtung der Sektorstruktureffekte kommt ein weiteres Szenario ins Spiel, nämlich das Basis-szenario, das die Entwicklung bis 2020 ohne Einkopplung der Ergebnisse des Stoffstrommodells beschreibt. Tabelle 20 enthält eine Übersicht über Inputs und Outputs der Papierindustrie im Jahr 2020 in den einzelnen Szenarien.

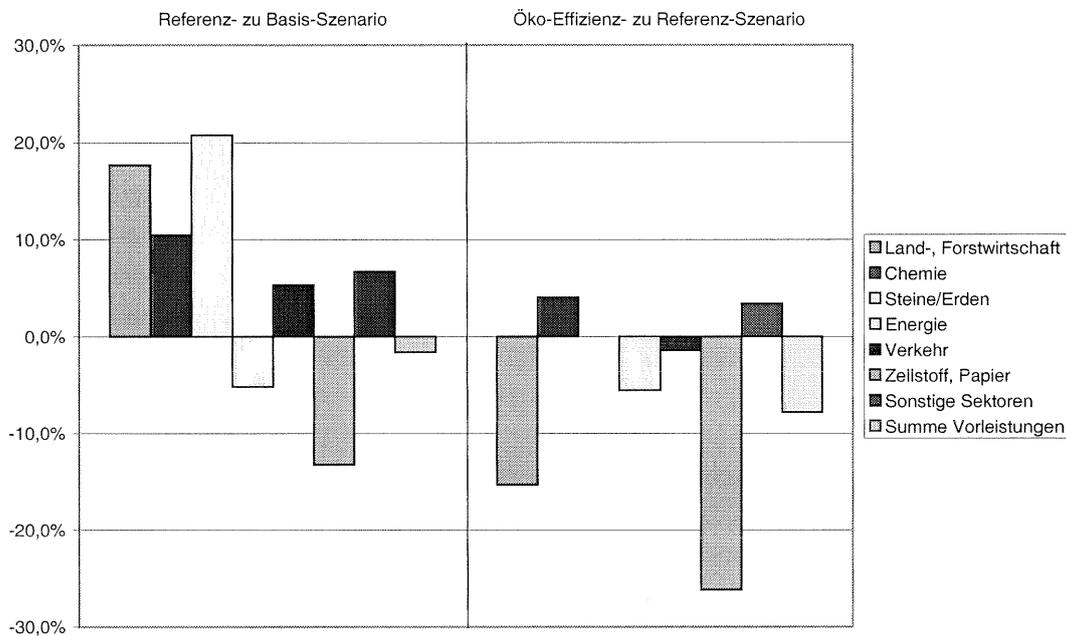
Der Methodeneffekt, der die Unterschiede zwischen Basis- und Referenzszenario wiedergibt, fällt relativ deutlich aus (vgl. Abbildung 22). Ein Vergleich der beiden Szenarien ergibt vor allem Unterschiede bei den sektoreigenen Vorleistungen und Importen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bereits im Referenzszenario mit einem steigenden Einsatz von Altpapier zur Papierherstellung gerechnet wird und dadurch Holz- und Sulfitzellstoff einerseits sowie importierter Sulfatzellstoff andererseits substituiert werden. Im Referenzfall liegen die Energiekosten um rund 5% unter dem Wert des Basisszenarios. Die Berücksichtigung des im Jahr 2000 in Betrieb genommenen Sulfatzellstoffwerks sowie die Annahme einer Kapazitätserhöhung nach 2005 führen zu einem höheren Bedarf an Waldholz (Sektor Forstwirtschaft). Wegen der Veränderungen beim Papiersortenmix, u.a. durch einen Shift hin zu mehr gestrichenen Papieren, steigt die Vorleistungsnachfrage nach Füllstoffen und Streichpigmenten sowie chemischen Hilfsstoffen. Durch den Shift hin zu höherwertigen Papiersorten steigt auch die Bruttowertschöpfung, auch wenn deren Anteil am Produktionswert als konstant angenommen wurde.

Vergleicht man die Inputstruktur der Papierindustrie zwischen Referenz- und Öko-Effizienz-szenario, so werden die mit der Realisierung der unterschiedlichen Entwicklungspfade verbundenen Unterschiede deutlich. Auffällig ist hier vor allem der Rückgang der sektoreigenen Vorleistungen und Importe. Die weiter zunehmende Verschiebung der Rohstoffbasis zum Altpapier führt hier zu einem Rückgang der eigenen Zellstoff- und Holzstoffproduktion mit dem damit verbundenen Holzbedarf sowie der Zellstoffimporte. Der Anteil der Energiekosten geht im Öko-Effizienz-szenario ebenfalls zurück. Beim Bahn- und Schiffsverkehr für den Transport von Holz und Sulfatzellstoff ist ebenfalls ein Bedeutungsverlust zu verzeichnen

Tabelle 20: Vergleich der Vorleistungen der Papierindustrie im Jahr 2020 zwischen den Szenarien (Quelle: Eigene Berechnungen)

	Basis-	Referenz-	Öko-	Nachhalt.-	Abweichungen					
	szenario	szenario	Effizienz-	szenario	Referenz zu Basis		Öko-Effizienz zu Referenz		Nachhaltigkeit zu Referenz	
	Mio. DM	Mio. DM	Szenario	Mio. DM	Mio. DM	in %	Mio. DM	in %	Mio. DM	in %
Land-, Forstwirtschaft	781	919	778	563	138	18%	-141	-15%	-356	-39%
Chemie	1.927	2.129	2.215	1.593	202	10%	86	4%	-536	-25%
Steine/Erden	713	861	861	580	148	21%	0	0%	-281	-33%
Kohlesektor	286	169	156	102	-117	-41%	-13	-8%	-68	-40%
Mineralölverarbeitung	756	508	483	334	-248	-33%	-24	-5%	-174	-34%
Gaserzeugung, -verteilung	709	604	575	397	-105	-15%	-29	-5%	-207	-34%
Strom/Dampf	4.322	4.495	4.216	2.970	173	4%	-280	-6%	-1525	-34%
Raumwärme	749	690	677	478	-59	-8%	-13	-2%	-213	-31%
Bahnverkehr	192	178	156	96	-14	-7%	-22	-12%	-82	-46%
Schiffsverkehr	92	73	52	21	-19	-21%	-21	-29%	-52	-71%
Sonstiger Verkehr	1.712	1.851	1.864	1.316	139	8%	13	1%	-535	-29%
Zellstoff/Papier	11.101	9.628	7.107	3.358	-1473	-13%	-2521	-26%	-6270	-65%
Dienstleist. (inkl. AP-Recycl.)	7.430	8.122	8.545	6.263	692	9%	423	5%	-1859	-23%
Sonstige Sektoren	2.875	2.876	2.828	2.707	1	0%	-48	-2%	-169	-6%
Summe Vorleistungen	33.645	33.105	30.514	20.778	-540	-2%	-2590	-8%	-12327	-37%
Bruttowertschöpfung	8.482	9.149	9.018	6.269	667	8%	-131	-1%	-2880	-31%
Produktionswert	42.127	45.438	44.789	31.134	3311	8%	-650	-1%	-14305	-31%
Importe gleichartiger Güter	29.050	25.288	23.282	15.942	-3762	-13%	-2007	-8%	-9346	-37%
Güteraufkommen	71.177	70.727	68.071	47.076	0	0%	0	0%	-24101	-34%
Ausgleich (Kosteneinsparungen)		3.635	8.363	28.189						

Abbildung 22: Vergleich der Vorleistungen der Papierindustrie im Jahr 2020 zwischen Basis-, Referenz- und Öko-Effizienzzenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Nachhaltigkeitsszenario dominieren die Niveaueffekte die ebenfalls vorhandenen Struktureffekte. Die zurückgehende Papierproduktion führt hier natürlich zu einem entsprechenden Rückgang der Vorleistungen der Papierindustrie.

Die Berücksichtigung des Rückgangs der Vorleistungsnachfrage nach Papier im Nachhaltigkeitsszenario beinhaltet eine Anpassung der Outputs der Papierindustrie bzw. der Inputs der Papier nachfragenden Sektoren. Dabei wurde zwischen großen Papierverbrauchern, wie dem Papier verarbeitenden Gewerbe und der Druckindustrie und den anderen Sektoren unterschieden. Für das Papier verarbeitende Gewerbe wurde angenommen, dass der Rückgang der Papiernachfrage mit einem entsprechenden Rückgang der Nachfrage nach den zugehörigen Papierwaren einhergeht. Es wurde daher nicht der Inputkoeffizient „Papier an Papierverarbeitung“ verändert, sondern der gesamte Output der Papierverarbeitung gesenkt und entsprechend auch die Lieferungen der Papierverarbeitung an die übrigen Produktionsbereiche. Bei den Druckereien wurde angenommen, dass die Informationen weiterhin verbreitet werden, nur nicht mehr auf Papier als Informationsträger, sondern über andere Medien. Hier wurden daher die Vorleistungslieferungen der Papierindustrie an die Druckereien gesenkt, ohne dass der Produktionswert der Druckindustrie verändert wurde.

Insgesamt ergeben sich im Referenz-, Öko-Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario gegenüber dem Basisszenario Kosteneinsparungen für die Papierherstellung und die Papier beziehenden Sektoren. Nach Carter (1990) sind zwei grundlegende Fol-

geeffekte denkbar, deren Realisierung stark vom Wettbewerbsumfeld des betroffenen Industriezweiges abhängen. Zum einen können Kosteneinsparungen zu Preissenkungen bei den hergestellten Produkte führen. Je nach Nachfrageelastizitäten der beziehenden Sektoren kann dies zu einer Nachfragesteigerung führen oder die beziehenden Sektoren geben die Preissenkungen ihrerseits weiter. Der Mechanismus der Weitergabe von Preissenkungen kann sich bis zur Endnachfrage fortsetzen und führt dort letztendlich zu einem zusätzlich verfügbaren Einkommen mit den damit verbundenen Nachfrageeffekten. Zum anderen ist infolge der Kosteneinsparungen auch eine Erhöhung der Bruttowertschöpfung denkbar, die je nach Ausschüttung an Arbeitnehmer und Unternehmer und deren marginalen Konsumquoten zu einer Erhöhung der Endnachfrage in gleicher Größenordnung führen muss. In der Realität wird es vermutlich oft zu einer Mischung der beiden Effekte kommen.

Die endogene Modellierung der Folgeeffekte von Änderungen der sektoralen Kostenstruktur mit einem Input-Output-Modell wirft methodische Fragen auf, die in der Modelldiskussion bisher noch nicht abschließend erörtert wurden. Im Rahmen dieses Vorhabens musste diese Frage ebenfalls unbeantwortet bleiben. In den Modellrechnungen wurden die Kosteneinsparungen durch eine Ausgleichsvariable aufgefangen, deren jeweilige Höhe in Tabelle 20 ausgewiesen ist.

### **5.3.3 Ergebnisse der IO-Modellrechnungen – Sektorale Auswirkungen von Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzstrategien**

Auch bei der Beschreibung der Ergebnisse der IO-Modellrechnungen soll zwischen dem Methodeneffekt, der im Vergleich von Referenz- und Basisszenario deutlich wird, und den Maßnahmeneffekten oder Strategieeffekten unterschieden werden. Die Beschreibung der sektoralen Auswirkungen erfolgt anhand zweier Leitindikatoren, nämlich der Bruttowertschöpfung als Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt einerseits und dem Energieverbrauch andererseits. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen für das Jahr 2020 dargestellt und erläutert. Dabei sei nochmal darauf hingewiesen, dass hier nur die Auswirkungen innerhalb der Papierkette betrachtet wurden. Kompensationseffekte, die z.B. durch eine höhere Endnachfrage oder eine wachsende Nachfrage nach IuK-Technologien und EDV-Dienstleistungen (v.a. im Nachhaltigkeitsszenario) ausgelöst werden, mussten angesichts des erheblichen zusätzlichen Modellierungs- und Datenrechercheaufwands sowie des methodischen Schwerpunkts des durchgeführten Vorhabens außer Betracht bleiben. Insofern geben die Ergebnisse kein komplettes Bild der sektoralen Struktureffekte wieder.

Der Methodeneffekt fällt für das Jahr 2020 sehr deutlich aus, wie in Abbildung 23 und Abbildung 24 zu sehen ist. Die Modellrechnung ohne Einkopplung des Stoffstrommodells würde danach die Bruttowertschöpfung im Dienstleistungsbereich (v.a. Altpapierrecycling) und in der Papierindustrie um jeweils 400 - 450 Mio. DM unterschätzen. Für die Papierindustrie entspricht dies rund 5% der gesamten Brut-

towertschöpfung. Insbesondere bei den Brennstoffen würde eine Überschätzung der Bruttowertschöpfung erfolgen, während die Bedeutung der Sektoren Steine/Erden, Chemie, Sonstiger Verkehr und Stromerzeugung zu gering ausfielen. Beim Energieverbrauch würde im Basisszenario ohne Modellkopplung eine deutliche Überschätzung für die Papierindustrie erfolgen, da die Fortschritte in Richtung Energieeffizienz unberücksichtigt blieben. Für das Jahr 2020 liegt der Energieverbrauch im Referenzszenario um ca. 45 PJ unter dem Wert des Basisszenarios, was einem Rückgang von ca. 14% entspricht.

In Abbildung 25 sind die sektoralen Struktureffekte in Öko-Effizienzzenario und Nachhaltigkeitsszenario zusammengefasst. Sie gibt die Abweichungen der Bruttowertschöpfung vom Referenzszenario zusammengefasst wieder. Im Öko-Effizienzzenario sinkt die Bruttowertschöpfung, bedingt durch die geringeren Vorleistungen der Papierindustrie, um insgesamt 820 Mio. DM. Im Nachhaltigkeitsszenario fällt der Rückgang der Bruttowertschöpfung mit rund 14,5 Mrd. DM deutlich höher aus. Wichtige Bereiche sind hier die Papierindustrie, die Papierverarbeitung sowie der Bereich der Dienstleistungen, der auch das Altpapierrecycling umfasst. Die gleiche Auswertung für den Energieverbrauch (vgl. Abbildung 26) zeigt, dass hier die Papierindustrie und der Energiebereich eindeutig dominieren. Die Auswirkungen auf die übrigen Produktionsbereiche halten sich demgegenüber in Grenzen.

Abbildung 23: Abweichungen des Referenzszenarios vom Basisszenario – Bruttowertschöpfung 2020

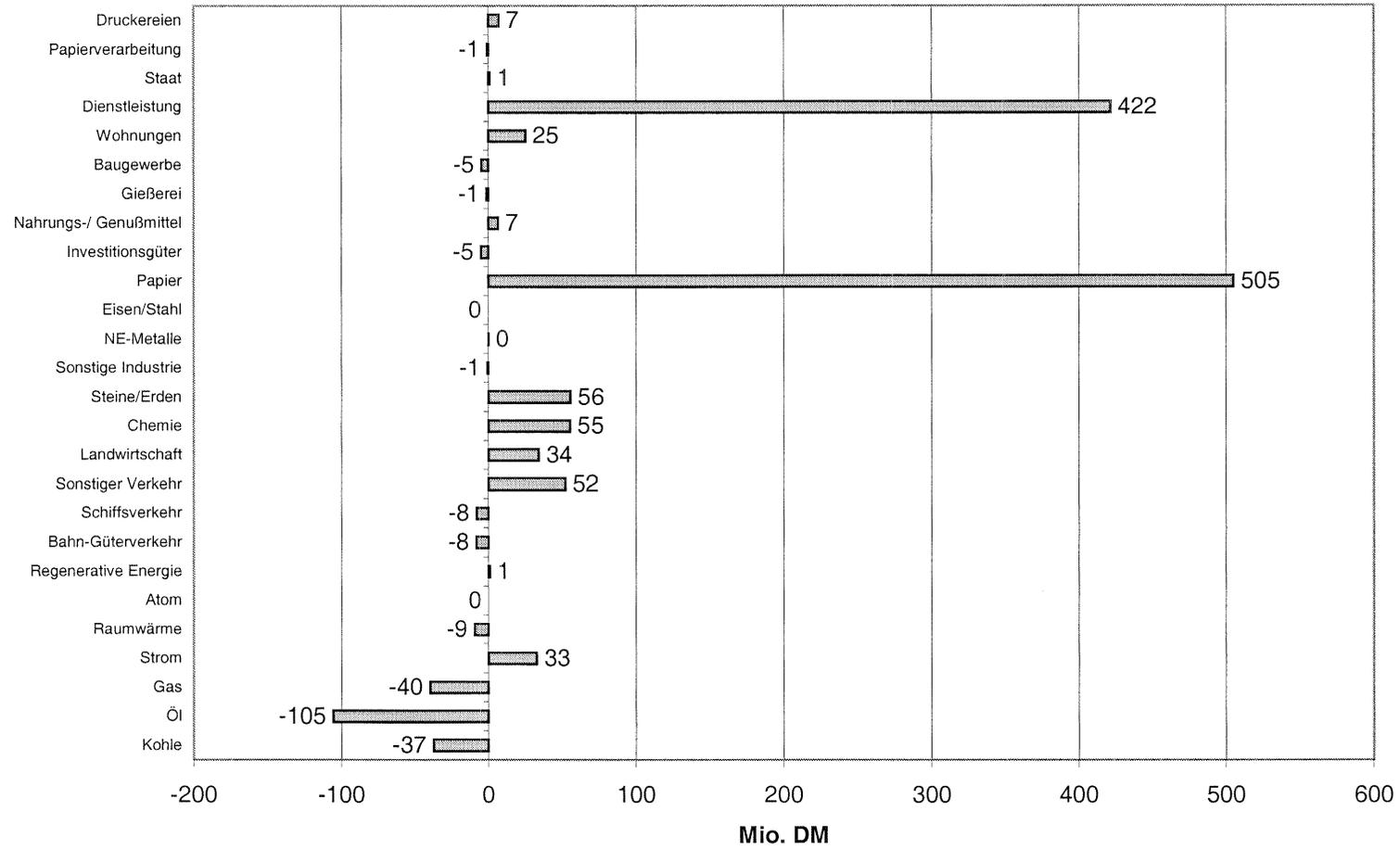


Abbildung 24: Abweichung des Referenzszenarios vom Basisszenario: Energieverbrauch 2020

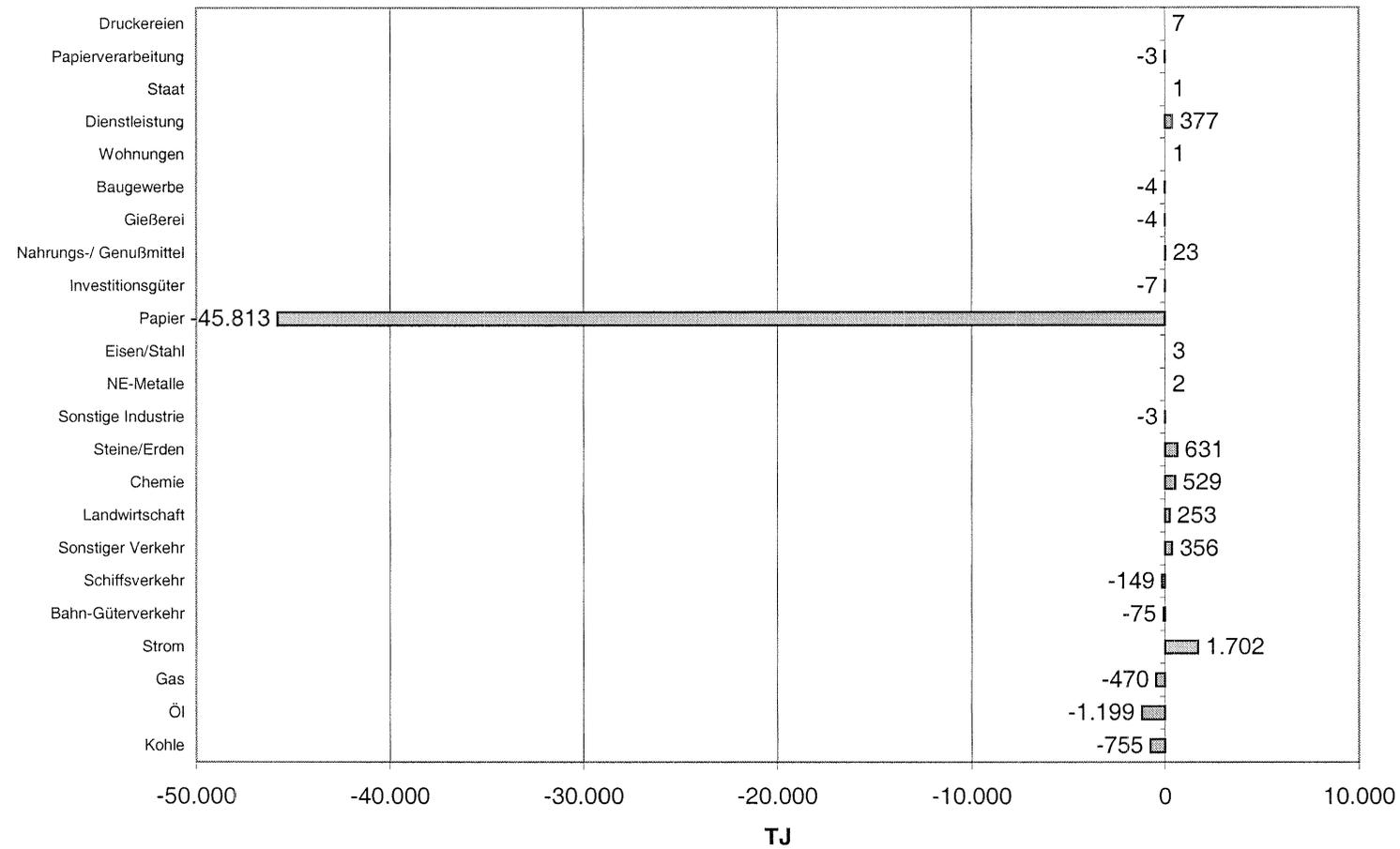


Abbildung 25: Abweichungen vom Referenzszenario: Bruttowertschöpfung 2020

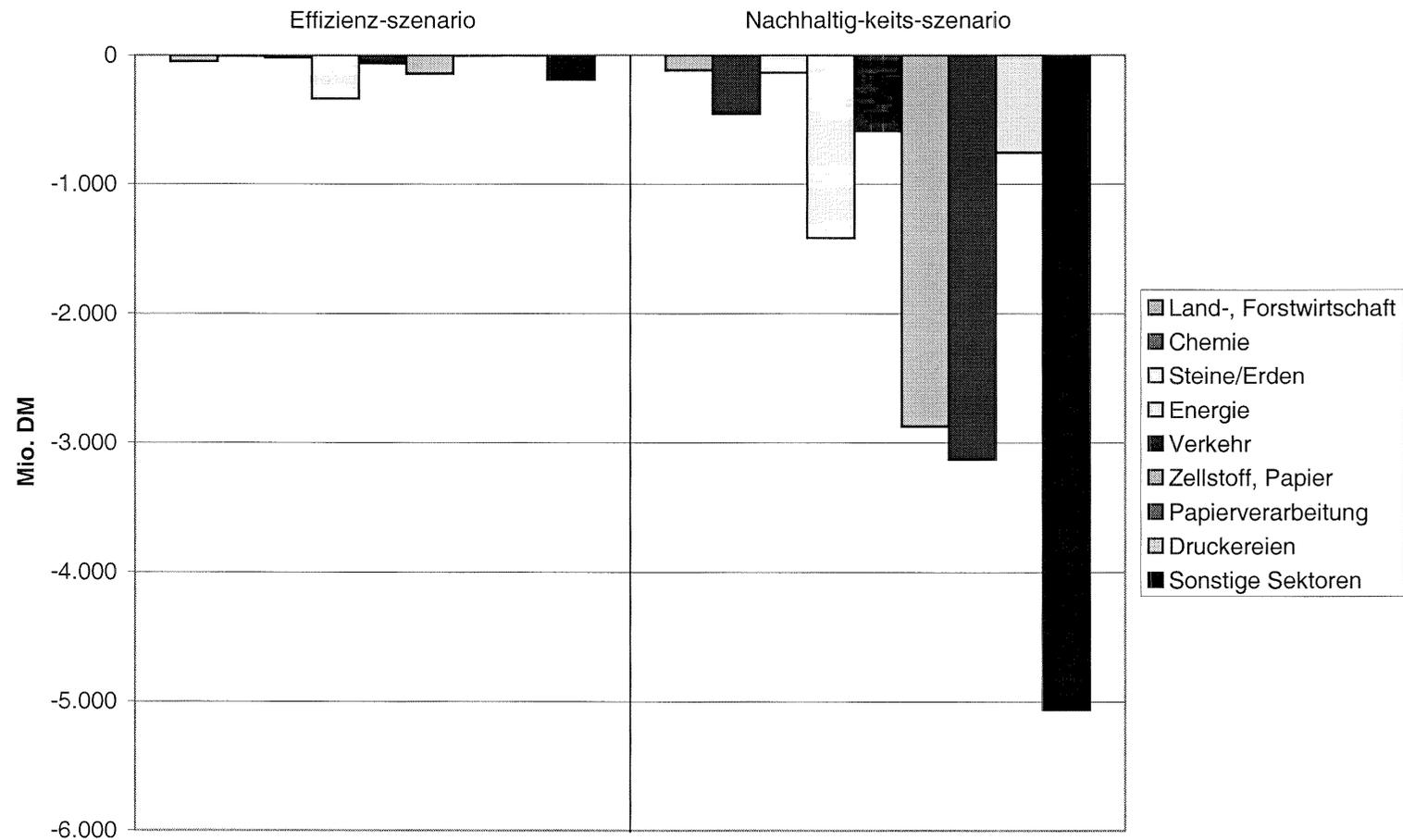
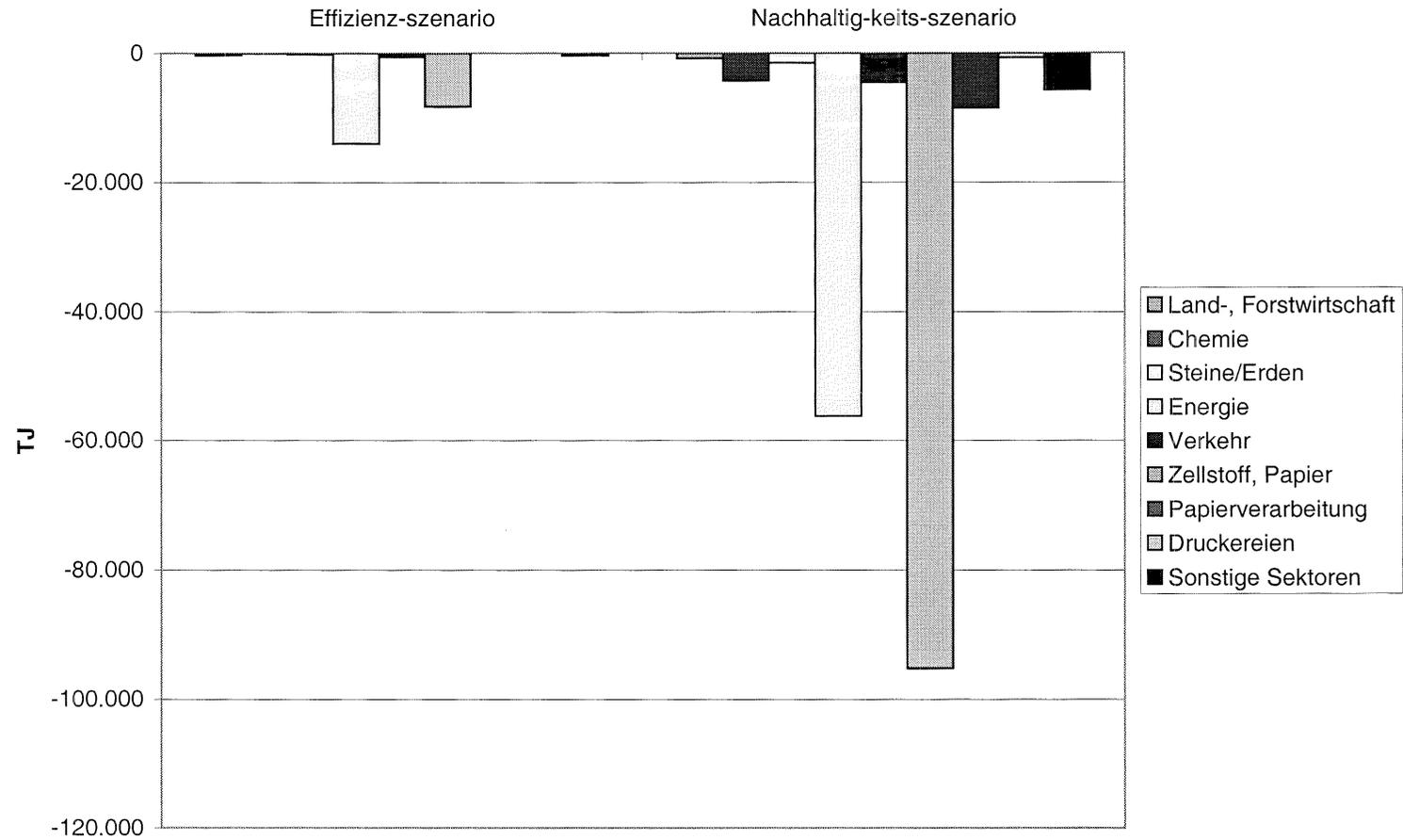


Abbildung 26: Abweichungen vom Referenzszenario: Energieverbrauch 2020



## 6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Das zentrale Anliegen des Forschungsvorhabens war die Modellierung des mit einer verstärkten Kreislaufwirtschaft verbundenen technischen und strukturellen Wandels durch die Kopplung eines technikbasierten Stoffstrommodells mit einem volkswirtschaftlichen Input-Output-Modell. Die Modellkopplung sollte am Beispiel des Papierstoffstroms erfolgen, aber auch Aussagen zu Übertragungsmöglichkeiten auf andere Branchen erlauben.

In einem technikbasierten Stoffstrommodell auf mittlerem Aggregationsniveau wurde der inländische Stoffstrom "Papier" von der Rohstoffgewinnung über Produktions-, Nutzungs-, Verwertungs- und Beseitigungsschritte abgebildet. Mit dem Stoffstrommodell wurde dann auf der Basis des vorhandenen Fachwissens und absehbarer Entwicklungen eine disaggregierte, technologisch fundierte Prognose des Stoffstroms "Zellstoff und Papier" für die Bezugsjahre 2005 und 2020 als Referenzszenario erstellt. Wichtige ökonomische Randgrößen, wie z.B. die Nachfrage nach End- und Zwischenprodukten für die Jahre 2005 und 2020 wurden einem dynamischen Input-Output-Modell entnommen und angepasst. Neben dem Referenzszenario wurden alternative Szenarien generiert, in denen Strategien verstärkter Energieeffizienz, zunehmenden Recyclings und neuer Produktkonzepte gebündelt wurden. In einem zweiten Schritt wurden die Prognoseergebnisse des Stoffstrommodells in das dynamische Input-Output-Modell übersetzt und zur Anpassung der Verflechtungsbeziehungen verwendet. Mit diesen neuen Strukturdaten wurden mittels des IO-Modells die Auswirkungen der verschiedenen Entwicklungspfade auf die sektorale Struktur in der Volkswirtschaft ermittelt. Die Szenarienergebnisse wurden mit Modellrechnungen, die ohne Einkopplung des Stoffstrommodells durchgeführt wurden (Basisszenario), verglichen.

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen, dass die durchgeführte Modellkopplung einen gangbaren Weg zur Einbeziehung des technischen und intrasektoralen Wandels in Input-Output-Modelle darstellt. Der in Kapitel 5.3 beschriebene Methodeneffekt weist deutlich auf den Nutzen der Einbindung mikroanalytischer technikbasierter Informationen für die Projektionsgüte von Input-Output-Modellen hin. Die Kopplung mit einem Stoffstrommodell als Satellitenmodell ist dabei gut geeignet als Rahmen zur Generierung von Kreislaufwirtschafts- und Materialeffizienzzenarien.

Abgesehen von diesem insgesamt positiven Fazit soll auch auf einige methodische und Datenprobleme sowie offene Fragen hingewiesen werden, die im Laufe der Projektbearbeitung deutlich wurden:

- Die Harmonisierung des Top-Down-orientierten Input-Output-Modells mit dem Bottom-Up-orientierten Stoffstrommodells hat sich als vergleichsweise zeitaufwen-

dig erwiesen, obwohl die Datenlage zur Papierkette als relativ gut bezeichnet werden kann. Probleme bereiteten dabei die hohe Variationsbreite prozessbezogener Daten sowie unterschiedliche Datenkonzepte und –abgrenzungen (z.B. institutionelle vs. funktionale Abgrenzung, zeitliche und räumliche Repräsentativität).

- Durchschnittliche Ab-Werk-Preise, die zum Abgleich des auf monetären Einheiten basierenden IO-Modells mit dem in physischen Einheiten operierenden Stoffstrommodells für eine Vielzahl von Rohstoffen und Zwischenprodukten waren nur in einigen Fällen einigermaßen zuverlässig ableitbar. Zudem sind die Preise der an der Papierkette beteiligten Güter starken Schwankungen ausgesetzt, die eine angemessene Preisschätzung erschwerten.
- Aufgrund der unzureichenden Datenlage war es im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich, eine vollständige und disaggregierte Zuordnung von Papiersorten und Papierprodukten zu den belieferten IO-Sektoren zu leisten. Dies würde die Projektion der Papiernachfrage verbessern.
- Ebenfalls war die Einbeziehung von Änderungen des Kapitalstocks, die mit technischen Veränderungen oder Verschiebungen von Produkt- und Prozess-Mix verbunden sind, noch nicht möglich. Dies hätte zu den bestehenden Datenproblemen noch weiteren Datenbedarf verursacht. In diesem Bereich wären Arbeiten noch zu leisten, die die Palette der modellmäßig einbezogenen Struktureffekte ausweiten würden. Allerdings dürfte die Bedeutung der zusätzlichen Effekte um eine Größenordnung unter derjenigen der bereits einbezogenen Effekte liegen.
- Eine wichtige, methodisch noch offene Frage betrifft den Umgang mit veränderten Kostenstrukturen und insbesondere Kosteneinsparungen, die sich im Zuge des technischen und strukturellen Wandels ergeben. Die damit verbundenen Nachfrage- und Innovationseffekte sind bisher im Rahmen von Input-Output-Modellen nur sehr eingeschränkt darstellbar. Hier ist noch erheblicher Forschungsbedarf vorhanden.

Auf den recht vielversprechenden Ergebnissen dieses Vorhabens kann in mehrererlei Hinsicht aufgebaut werden:

Zunächst ist eine Ergänzung des Papierflussmodells um vergleichbare Satellitenmodelle denkbar, die weitere kreislaufwirtschaftsrelevante Stoffströme abdecken könnten; dies sind insbesondere die energieintensiven Grundstoffindustrien (Chemie, Eisenschaffende, NE-Metalle, Steine/Erden), aber auch Industriezweige mit einem höheren Verarbeitungsgrad (z.B. Elektrotechnik, Straßenfahrzeugbau), in denen produktpolitische Entscheidungen einen hohen Einfluss auf Materialeffizienz und Stoffkreisläufe haben. Die Vernetzung der verschiedenen Satellitenmodelle würde die detaillierte Modellierung von Wechselwirkungen und Substitutionseffekten im Hinblick auf Technikeinsatz und Güternachfrage erlauben.

Darüber hinaus würde eine stärkere Einbeziehung von Preisabhängigkeiten in den Stoffstrommodellen die Modellierung eines weiteren Einflussfaktors auf Technikauswahl und Güternachfrage ermöglichen.

Im durchgeführten Vorhaben stand der Aspekt der Kopplung zweier unterschiedlicher Modelltypen im Vordergrund. Modellmäßig nicht betrachtet wurden Möglichkeiten der Optimierung der künftigen Entwicklung von Stoff- und Energieflüssen. Ähnlich wie bei linearen Energieflussoptimierungsmodellen (wie z.B. IKARUS) sind auch für Stoffstrommodelle Optimierungsansätze denkbar.

## 7 Literatur

- Almon, C.: The Inforum Approach to Interindustry Modeling. In: Economic Systems Research, Nr. 3, 1991, S. 1 – 7.
- Auhorn, W.J.; Linhart, F.: Chemische Hilfsstoffe. In: Götsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt: Ein Handbuch. Düsseldorf/Wien/New York, 1990, S. 89 - 92.
- Ayres, R.: Resources, Environment and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle. New York, 1978.
- Ayres, R.: Thermodynamics and Process Analysis for Future Economic Scenarios. In: Environmental and Resource Economics, Nr. 6, 1995, S. 207 – 230.
- Baccini, P.; Bader, H.-P.: Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg, Berlin, Oxford, 1996.
- Baumann, W.; Herberg-Liedtke, B.: Papierchemikalien: Daten und Fakten zum Umweltschutz. Berlin, Heidelberg, 1994.
- Baumgarten, H.L.: Papiertechnik. Manuskript TUD-PTM 01/96. Dresden, 1996.
- de Beer, J.: Potential for Industrial Energy Efficiency Improvement in the Long Term. Diss. Universität Utrecht. Utrecht, 1998.
- Behrendt, S.; Pfitzner, R.; Kreibich, R.: Wettbewerbsvorteile durch ökologische Dienstleistungen: Umsetzung in der Unternehmenspraxis. Berlin, Heidelberg, 1999.
- Böhm, E.: Entwicklungstendenzen in der Umwelttechnologie. In: Zahn, Erich (Hrsg.): Handbuch Technologiemanagement. Stuttgart 1995, S. 151 – 168.
- Böhm, E. et al.: Modell Chemische Technik: Anwendung für die Bereiche Düngemittel, Waschmittel, Farben und Lacke. Karlsruhe, 1979.
- Bölle, C.-D.: Zur Methodik der Konzeption einer industriellen Energieversorgung unter besonderer Berücksichtigung der Papiererzeugung. Diss., Universität Karlsruhe. Karlsruhe, 1994.
- Buchert, M.; Achtner-Theiß, E.; Wollny, V.: Schwarze Kunst auf grünen Pfaden: Buchherstellung nach ökologischen Grundsätzen. Göttingen, 1997.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, Hrsg.): Energie Daten 1999: Nationale und internationale Entwicklung. Bonn, 1999.
- Carter, A.P.: Upstream and Downstream Benefits of Innovation. In: Economic Systems Research, Nr. 3, 1990, S. 241 – 257.
- Chapman, P.: Energy Costs: a Review of Methods. In: Energy Policy, Juni, 1974.
- Clark, D.: Zukünftige Marktbedingungen für gestrichenes Papier. In: Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 6, 1994, S. 201 – 204.
- Diekmann, J.; Eichhammer, W.; Neubert, A.; Heilwig, R.; Schломann, B.; Ziesing, H.-J.: Energie-Effizienz-Indikatoren. Heidelberg, 1999.
- DIW/KfA-STE/FhG-ISI/Öko-Institut: Politikszenerarien für den Klimaschutz – II: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO<sub>2</sub> –Emissionen in Deutschland bis 2020. Berlin, Jülich, Karlsruhe, 1999.
- Edler, D.: Ein dynamisches Input-Output-Modell zur Abschätzung der Auswirkungen ausgewählter neuer Technologien auf die Beschäftigung in der Bundesrepublik Deutschland. Beiträge zur Strukturforchung, Heft 116. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, 1990.
- Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Die Industriegesellschaft gestalten: Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn, 1994.
- Fachinformationszentrum Karlsruhe (FIZ, Hrsg.): IKARUS-Datenbank (CD-ROM), Karlsruhe, o.J.
- Fleig, J. (Hrsg.): Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft. Stuttgart, 2000.
- Fleissner, P.; Böhme, W.; Brautzsch, H.-U.; Höhne, J.; Siassi, J.; Stark, K.: Input-Output-Analyse: Eine Einführung in Theorie und Anwendungen. Wien, New York, 1993.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, Hrsg.): Pulp and Paper towards 2010: An executive summary. Rom, 1994.
- Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforchung (ISI): Delphi 98 – Umfrage: Zukunft nachgefragt: Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Karlsruhe, 1998.

- Gielen, D.: Materialising dematerialisation: Integrated energy and materials systems engineering for greenhouse gas emission mitigation. Delft, 1999.
- Göttsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt: Ein Handbuch. Düsseldorf/Wien/New York, 1990.
- Göttsching, L.; Hamm, U.; Platzer, E.; Putz, H.-J.: Analysis of Waste Paper Recycling and Disposal Options in Germany. Sub-Studie Nr. 15 für: International Institute for Environment and Development (IIED): Towards A Sustainable Paper Cycle. London, 1996.
- Grefermann, K.: Druckindustrie: Strukturwandlungen und Entwicklungsperspektiven. Berlin, München, 1990.
- Grefermann, K.: Papier- und Pappeverarbeitung: Strukturwandlungen und Entwicklungsperspektiven. Berlin, München, 1986.
- Grönberg, R.: Diagnose und Prognose von Veränderungen der Inputkoeffizienten in offenen Input-Output-Systemen. Augsburg, 1980.
- Großmann, H.; Rebmann, G.; Klein, R.; Metz, A.-M.; Borchers, B.: Daten zur Altpapieraufbereitung. Abschlußbericht an das Umweltbundesamt. Texte 19/94, Berlin, 1994.
- Fa. Haindl Papier GmbH: Umwelterklärung der Haindl Papier GmbH, Standort Augsburg. Augsburg, 1997.
- Heijungs, R.: A generic method for the identification of options for cleaner products. In: Ecological Economics, Nr. 10, 1994, S. 69 – 81.
- Heise Online: „Elektronisches Papier geht in Produktion“. Meldung vom 29.6.1999, <http://www.heise.de/newsticker/>.
- Heise Online: „Faltbare Plastikdisplays mit elektronischer Tinte“. Meldung vom 13.10.1999, <http://www.heise.de/newsticker/>.
- Hennig, H.: Marktbedingungen der Zukunft für gestrichenes graphisches Papier – Am Beispiel holzfrei gestrichener Papiere. In: Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 6, 1994, S. 205 – 213.
- Hiessl, H.; Meyer-Krahmer, F.; Schön, M.: Auf dem Weg zu einer ökologischen Stoffwirtschaft. Teil II: Die Rolle einer ganzheitlichen Produktpolitik. In: Gaia, Nr. 4, 1995, S. 89 – 99.

- Holub, H.-W.; Schnabl, H.: Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse: Einführung. München, Wien, 1994.
- Hoppe, J.; Baumgarten, H.L.: Die Zukunft des Papiers im elektronischen Zeitalter – Papier auf dem Weg in sein 3. Jahrtausend (Teil 2). In: Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 19, 1997, S. 918 – 927.
- Idenburg, A.: Technological Choices and the Eco-Efficiency of the Economy: A Dynamic Input-Output-Approach. Paper presented at the Twelfth International Conference on Input-Output-Techniques. New York, 18. – 22.5.1998.
- Immenschuh, M.: Wirklichkeitstreue von Vorleistungskoeffizienten der Input-Output-Tabelle. Eine Analyse der Papierindustrie. Diplomarbeit an der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 1998.
- International Institute for Environment and Development (IIED): Towards a Sustainable Paper Cycle. London, 1995.
- James, D.E; Musgrove, A.R. deL.; Stocks, K.J.: Integration of an economic input-output model and a linear programming technological model for energy systems analysis. In: Energy Economics, Nr. 4, 1986, S. 99 – 112.
- Jochem, E.; Bradke, H.: Energieeffizienz, Strukturwandel und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie. Monographien des Forschungszentrums Jülich, Band 19, Jülich, 1996.
- Jochem, E.; Schleich, J; Ostertag, K.; Walz, R.: Evaluation of costs of response strategies to climate change. In: The Shared Analysis Project: Economic Foundations for Energy Policy, Volume 13.
- Kessler, H.: Produktion grafischer holzhaltiger Papiere und zukünftige Entwicklungen. In: Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 22, S. 1080 – 1085, 1997.
- Krauthauf, E.; Stöckler, A.: Altpapiereinsatz in höherwertigen graphischen Druckpapieren. In: Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 1, S. 9 – 12, 1999.
- Kuhn, M.; Radermacher, W.; Stahmer, C.: Umweltökonomische Trends 1960 bis 1990. In: Wirtschaft und Statistik, Nr. 8, S. 658 – 677, 1994.
- Leontief, W.: Techniques for Consistent Forecasting of Future Demand for Major Minerals Using an Input-Output Framework. Insitute for Economic
- Leontief, W.; Koo, J.; Nasar, S.; Sohn, I.: Input-Output-Economics. New York, 1986.

- Leontief, W.; Duchin, F.: *The Future Impacts of Automation on Workers*. New York, 1986.
- Mäenpää, I.: *FMS3 Model System: An Overview*. Thule Institute, University of Oulu, Oulu, 1996.
- Meade, D.: *The Impact of the Electric Car on the U.S. Economy:1998-2005*. In: *Economic Systems Research*, Nr. 4, 1995, S. 413 – 438.
- Meyer, B.; Bockermann, A.; Ewerhart, G.; Lutz, C.: *Marktkonforme Umweltpolitik: Wirkungen auf Luftschadstoffemissionen, Wachstum und Struktur der Wirtschaft*. Reihe Umwelt und Ökonomie, Band 28. Heidelberg, 1999.
- Miller, R.E.; Blair, P.D.: *Input-Output-Analysis: Foundation and Extensions*. Englewood Cliffs, 1985.
- Möller, A.; Rolf, A.: *Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen unter besonderer Berücksichtigung von Petri-Netzen*. In: Schmidt, M.; Schorb, A.: *Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits*. Berlin, Heidelberg, 1995.
- Otto, H; Hennig, H.: *Graphische Papiere in Europa: Nachfrage, Verwendungsbereiche, Perspektiven*. In: *Wochenblatt für Papierfabrikation*, Nr. 22, S. 901 – 910, 1992.
- Patel, M.K.: *Closing Carbon Cycles*. Thesis, Utrecht, 1999.
- Pfaffenberger, W.; Kemfert, C.: *Das gesamtwirtschaftliche Informationssystem Ikarus (MIS)*. In: Molt, S.; Fahl, U. (Hrsg.): *Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland – Stand der Entwicklung*. Jülich, 1997.
- Pfaffenberger, W.; Ströbele, W.: *Projekt Ikarus: Makroökonomische Einbettung: Makroökonomisches Informationssystem Ikarus, Band 1, Beschreibung des Modells MIS*. Oldenburg, 1995.
- Plätzer, E. T.: *Papier versus Neue Medien: Eine Analyse der Umweltverträglichkeit von Presseinformationen im Licht des technologischen Wandels*. Diss. TU Darmstadt, Darmstadt, 1998.
- von Raven, A.; Höke, U.: *Papierveredelung*. In: Göttching, L. (Hrsg.): *Papier in unserer Welt: Ein Handbuch*. S. 154 - 160. Düsseldorf/Wien/New York, 1990.
- Richter, J.: *Aktualisierung und Prognose technischer Koeffizienten in gesamtwirtschaftlichen Input-Output-Modellen*. Heidelberg, 1991.

- Robins, N.; Roberts, S.: Rethinking Paper Consumption. Discussion Paper. International Institute for Environment and Development, London, 1996.
- Roffael, E.; Dix, B.; Pfeifer, R.; Gensch, C.-O.; Griebhammer, R.: Verwendung von Durchforstungsholz und Altpapier zur Papierherstellung unter Berücksichtigung forstwirtschaftlicher Belange. Studie für das Umweltministerium Baden-Württemberg. Luft, Boden, Abfall, Heft 37. Stuttgart, 1995.
- Schmidt, W.-P.: Life Cycle Assessment (LCA) zur Bestimmung der ökologisch optimalen Recyclingrate von Papier. Diplomarbeit am Fachgebiet Abfallwirtschaft der TU Berlin. Berlin, 1994.
- Schumann, J.: Input-Output-Analyse. Berlin, 1968.
- Statistisches Bundesamt (StBA): Außenhandel nach Waren und Ländern (Spezialhandel), Dezember und Jahr 1995. Fachserie 7; Reihe 2: Metzler-Poeschel, Stuttgart, 1997.
- Statistisches Bundesamt (StBA): Beschäftigung, Umsatz und Energieversorgung der Unternehmen und Betriebe im Bergbau und im Verarbeitenden Gewerbe. Fachserie 4, Reihe 4.1.1. Metzler-Poeschel, Stuttgart, 1996c.
- Statistisches Bundesamt (StBA): Input-Output-Tabellen 1986, 1988, 1990. Fachserie 18, Reihe 2. Stuttgart, 1994.
- Statistisches Bundesamt (StBA): Produktion im Produzierenden Gewerbe 1995. Fachserie 4; Reihe 3.1. Metzler-Poeschel, Stuttgart, 1996.
- Statistisches Bundesamt (StBA): Struktur der Produktion 1994. Fachserie 4; Reihe 3.2. Metzler-Poeschel, Stuttgart, 1996b.
- Verband Deutscher Papierfabriken (VdP): Papier '97. Ein Leistungsbericht. Bonn, 1997.
- Walz, R.; Dreher, C.; Nathani, C.; Schleich, J.; Schön, M.: Arbeitswelt in einer nachhaltigen Wirtschaft – Rahmenbedingungen und Zukunftsperspektiven. Zwischenbericht an das Umweltbundesamt. Karlsruhe, 1999.
- Weidhaas, A.G.: Altpapier-Aufbereitung. In: Götsching, L. (Hrsg.): Papier in unserer Welt: Ein Handbuch. S. 128 – 140. Düsseldorf/Wien/New York, 1990.

## Anhang

Tabelle A-21: Sektorale Gliederung des Modells MIS in der angepassten Version

MIS-Gliederung		Gliederung des Statistischen Bundesamtes
Nr.	Bezeichnung	Bezeichnung (Nr. SIO)
1	Kohle	Kohle, Erzeugnisse des Kohlenbergbaus (6)
2	Öl	Mineralölerzeugnisse (10)
3	Gas	Gaserzeugung, -verteilung (4) Erdöl, Erdgas (8)
4	Strom und Dampf	Elektrizität, Dampf, Warmwasser
5	Raumwärme	-
6	Kernbrennstoff	Auslagerung aus Sektor Chemische Erzeugnisse, Spalt- u. Brutstoffe (9)
7	Regenerative Energie	Auslagerung aus Energiesektoren
8	Sonstige Energie	Rest der Energie (Müll etc.)
9	Eisenbahnverkehr	Dienstleistungen der Eisenbahnen
10	Schifffahrt	Dienstleistungen d. Schifffahrt, Wasserstraßen, Häfen
11	Sonstiger Verkehr	Dienstleistungen des sonstigen Verkehrs
12	Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei	Landwirtschaft (1) Forstwirtschaft, Fischerei usw. (2)
13	Chemie / Gummi	Chemische Erzeugnisse, Spalt- u. Brutstoffe (ohne Spalt- und Brutstoffe) (9) Kunststoffherzeugnisse (11) Gummierzeugnisse (12)
14	Steine / Erden	Steine u. Erden, Baustoffe usw. (13)
15	Sonstige Industrie	Bergbauerzeugnisse (ohne Kohle, Erdöl, Erdgas) (7) Feinkeramische Erzeugnisse (14) Glas u. Glaswaren (15) Musikinstrumente, Spielwaren, Sportgeräte, Schmuck usw. (29) Holzbearbeitung (30) Holzverarbeitung (31) Leder, Lederwaren, Schuhe (35) Textilien (36) Bekleidung (37)
16	NE-Metalle	NE-Metalle, NE-Metallhalbzeug (17)
17	Eisen / Stahl	Eisen und Stahl (16)
18	Papier / Zellstoff	Zellstoff, Holzschliff, Papier, Pappe (32)

<b>MIS-Gliederung</b>		<b>Gliederung des Statistischen Bundesamtes</b>
<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Bezeichnung (Nr. SIO)</b>
19	Fahrzeug / Elektro	Stahl- u. Leichtmetallbauerzeugn., Schienenfahrzeuge (20) Maschinenbauerzeugnisse (21) Büromaschinen, ADV-Geräte u. -Einrichtungen (22) Straßenfahrzeuge (23) Wasserfahrzeuge (24) Luft- und Raumfahrzeuge (25) Elektrotechnische Erzeugnisse (26) Feinmechanische u. Optische Erzeugnisse, Uhren (27) Eisen-, Blech- und Metallwaren (28)
20	Nahrungs- / Genußmittel	Nahrungsmittel (38) Getränke (39) Tabakwaren (40)
21	Gießereien / Walzwerke	Gießereierzeugnisse (18) Erzeugnisse der Ziehereien, Kaltwalzwerke usw. (19)
22	Baugewerbe	Hoch- u. Tiefbauleistungen u.ä. (41) Ausbauleistungen (42)
23	Wohnungen	Gebäude- und Wohnungsvermietung (51)
24	Dienstleistungen	Gewinnung und Verteilung von Wasser (5) Großhandel u.ä., Rückgewinnung (43) Einzelhandel (44) Postdienst u. Fernmeldewesen (47) Kreditinstitute (49) Versicherungen (ohne Sozialversicherung) (50) Marktbestimmte Leistungen des Gastgewerbes und der Heime (52) Leistungen der Wissenschaft, Kultur und der Verlage (53) Marktbestimmte Leistungen des Gesundheits- und Veterinärwesens (54) Sonstige marktbestimmte Dienstleistungen (55) Leistungen der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck, häusliche Dienste (58)
25	Staat	Gebietskörperschaften (56) Sozialversicherung (57)
26	Papierverarbeitung	Papierverarbeitung (33)
27	Druckereien	Erzeugnisse der Druckereien und Vervielfältigung (34)

Tabelle A-22: Zuordnung der im Papierflussmodell enthaltenen Stoffe und Güter zu den Sektoren der amtlichen IO-Tabellen und des Modells MIS

Papierflussmodell	IO-Sektoren (StBA)	IO-Sektoren (MIS)
<b>Rohstoffe / Zwischenprodukte</b>		
Industrierestholz	(30) Holzbearbeitung	(15) Sonst. Industrie
Nadelholz	(2) Forstwirtschaft	(12) Landw./Forstw./Fischerei
Laubholz	(2) Forstwirtschaft	(12) Landw./Forstw./Fischerei
Altpapier	(41) Großhandel	(24) Dienstleistungen
Holzschliff	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
TMP-Holzstoff	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Sulfit-Zellstoff	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Sulfat-Zellstoff	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Altpapierstoff	(-)	(-)
Fuellstoffe / Streichpigmente	(13) Steine, Erden	(14) Steine / Erden
Stärke	(9) Chemische Industrie	(13) Chemie/Kunstst./Gummi
Chemische Hilfsstoffe	(9) Chemische Industrie	(13) Chemie/Kunstst./Gummi
<b>Papiersorten (= charakteristische Produkte)</b>		
Zeitungsdruckpapier (ZDP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Sonstige Druckpapiere (SDP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Büro- und Administrationspapiere (BP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Verpackungspapiere, -kartons- und pappen (VP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Hygienepapiere (HP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
Technische und Spezialpapiere (SP)	(32) Zellstoff, Papier	(18) Papier / Zellstoff
<b>Papierprodukte</b>		
Verpackungen	(33) Papierverarbeitung	(26) Papierverarbeitung
Hygieneartikel	(33) Papierverarbeitung	(26) Papierverarbeitung
Bürobedarf	(33) Papierverarbeitung	(26) Papierverarbeitung
Sonstige Papierwaren	(33) Papierverarbeitung	(26) Papierverarbeitung
Zeitungen	(34) Druckereien	(27) Druckereien
Zeitschriften	(34) Druckereien	(27) Druckereien
Bücher	(34) Druckereien	(27) Druckereien
Sonstige Drucksachen	(34) Druckereien	(27) Druckereien
Werbedrucksachen	(34) Druckereien	(27) Druckereien
<b>Energieträger</b>		
Strom	(3) Strom/Dampf	(4) Strom/Dampf
Fernwärme	(3) Strom/Dampf	(4) Strom/Dampf
Raumwärme	(-)	(5) Raumwärme
Braunkohle	(6) Kohle	(1) Kohle
Steinkohle	(6) Kohle	(1) Kohle

Heizöl	(10) Herst. v. Mineralölerzeugnissen	(2) Öl
Sonstige Mineralölprodukte	(10) Herst. v. Mineralölerzeugnissen	(2) Öl
Erdgas	(4) Erzg./Vert. von Gas	(3) Gas
<b>Transporte</b>		
Bahntransporte	(45) Dienstl. der Eisenbahnen	(9) Eisenbahnverkehr
Schifftransporte	(46) Dienstl. der Schifffahrt etc.	(10) Schifffahrt
Lkw-Transporte	(48) Dienstl. des sonstigen Verkehrs	(11) Sonstiger Verkehr

Tabelle A-23: Annahmen zum spezifischen Energiebedarf der Faserstoff- und Papierherstellungsprozesse

	Referenz 1995		Referenz 2005		Referenz 2020	
	Wärme	Strom	Wärme	Strom	Wärme	Strom
	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)
Holzschliffproduktion	0	6'790	0	6'585	0	6'473
TMP-Herstellung	-1'250	8'750	-1'250	8'221	-1'250	8'121
Sulfitzellstoffproduktion	0	0	0	0	-200	0
Altpapieraufbereitung	600	1'200	600	1'200	600	1'200
Papiermaschine (Trockenpartie)	4'830	1'800	4'435	1'748	4'130	1'890
	Referenz 1995		Öko-Effizienz 2005		Öko-Effizienz 2020	
	Wärme	Strom	Wärme	Strom	Wärme	Strom
	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)	(MJ/t)
Holzschliffproduktion	0	6'790	0	6'508	0	6'293
TMP-Herstellung	-1'250	8'750	-1'250	8'136	-1'250	7'986
Sulfitzellstoffproduktion	0	0	-424	0	-1'000	0
Altpapieraufbereitung	600	1'200	573	1'146	568	1'135
Papiermaschine (Trockenpartie)	4'830	1'800	4'345	1'733	4'020	1'835

Tabelle A-24: Annahmen zur Energiebereitstellung in der Papierindustrie

	Referenz			Öko-Effizienz	
	1995	2005	2020	2005	2020
<b>Wärmebereitstellung</b>					
KWK	76%	80%	85%	70%	70%
Dampferzeuger	24%	20%	10%	20%	15%
BHKW			5%	10%	15%
<b>Mittlere Stromkennzahl</b>					
KWK	0,3	0,35	0,4	0,35	0,4
BHKW		0,7	0,7	0,7	0,7
<b>Mittlere Wirkungsgrade bzw. Brennstoffausnutzungsgrade</b>					
KWK	78%	80%	80%	80%	80%
Dampfkessel	82%	85%	85%	85%	85%
BHKW		90%	90%	90%	90%
<b>Brennstoffmix</b>					
Steinkohle	22,6%	20,0%	15,0%	20,0%	15,0%
Braunkohle	4,8%	3,0%	0,0%	3,0%	0,0%
Heizöl L	3,4%	5,0%	8,0%	5,0%	8,0%
Heizöl S	9,8%	6,0%	3,0%	6,0%	3,0%
Gase	54,5%	60,0%	65,0%	60,0%	65,0%
Sonstige BS	4,9%	6,0%	9,0%	6,0%	9,0%

Abbildung A-27: Übersicht über das Stoffstrommodell (erste Hierarchieebene)

Papierflußmodell 1995

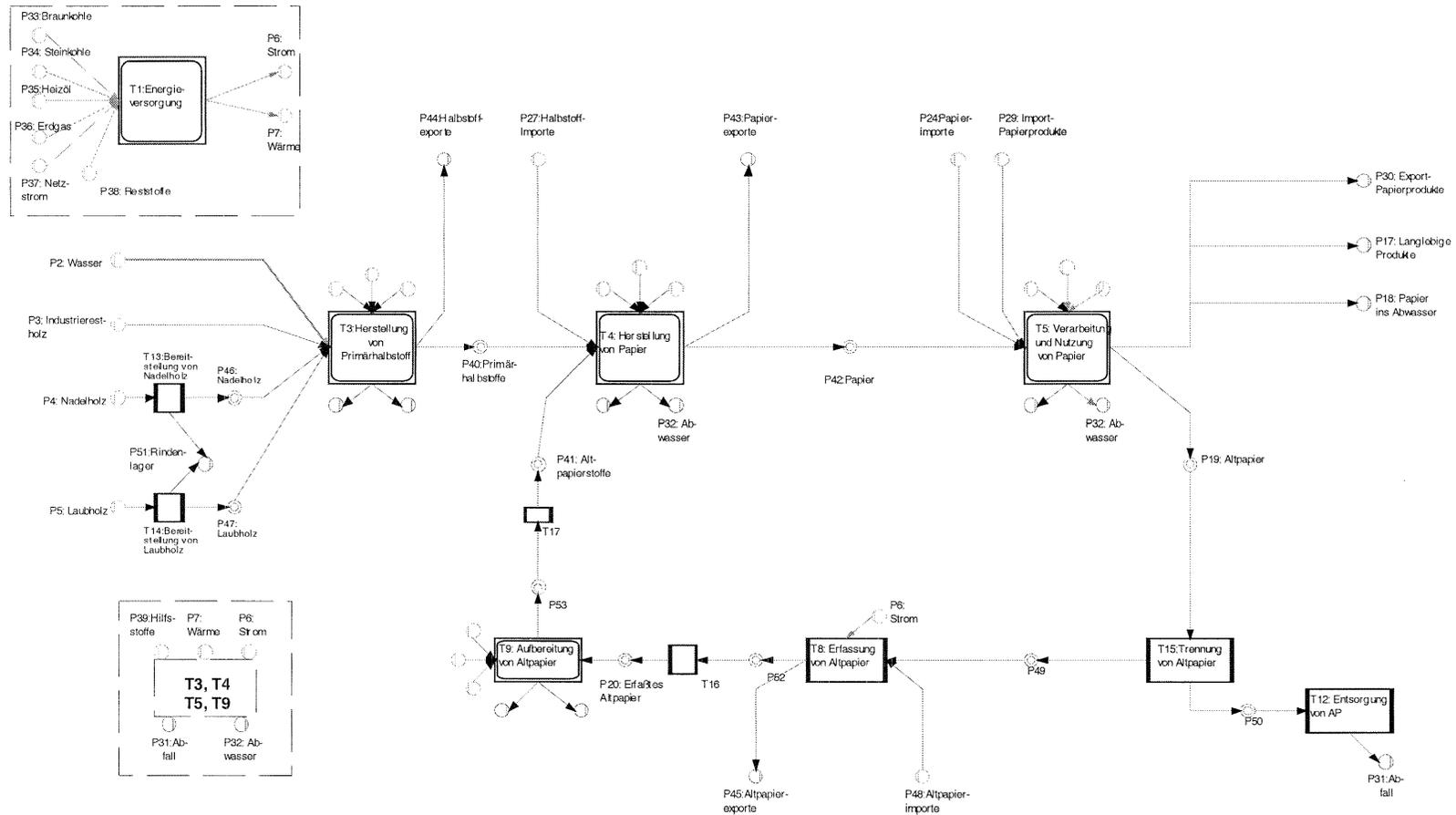


Abbildung A-28: Überblick über das Stoffstrommodell (Modul Papierverarbeitung)

