



Ökologischer Vergleich von Büropapieren in Abhängigkeit vom Faserrohstoff

im Auftrag der „Initiative Pro Recyclingpapier“

c/o Burson-Marsteller GmbH & Co. KG
Schützenstraße 5, 10117 Berlin
Tel. 030-240 793-96, Fax 030-240 793-99
E-Mail: info@papiernetz.de

IFEU Heidelberg
August 2006

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Tel. 06221-476 70, Fax 06221-476 719
E-Mail: andreas.detzel@ifeu.de

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	1
LANGFASSUNG	6
1 HINTERGRUND UND ZIELE	6
2 UMWELTBEWERTUNG DER PAPIERHERSTELLUNG	7
2.1 Vorgehensweise	7
2.2 Betrachtete Szenarien und deren Modellierungsgrundlagen	8
2.2.1 Randannahmen	8
2.2.2 Daten	9
2.2.3 Geltungsbereich der Szenarien	11
2.3 Indikatoren für die Umweltbewertung	12
2.4 Ergebnisgrafiken	14
2.4.1 Energiegeprägte Umweltbelastungen und Versauerung	15
2.4.2 Wasserseitige Umweltwirkungen	17
2.4.3 Primärenergiebedarf und Sommersmog	19
2.4.4 Gesundheitliche Wirkung – Feinstaub	22
2.5 Umrechnungsbeispiele aus der Praxis	23
3 FAZIT	24
4 QUELLENVERWEISE	25
ANHANG I: ERGEBNISSE (NUMERISCH)	27
ANHANG II: DATENGRUNDLAGEN	30

Abkürzungsverzeichnis

AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
AzB	Abfall zur Beseitigung
AzV	Abfall zur Verwertung
BREF	Best Available Technique Reference Manual
BSB-5	Biologischer Sauerstoffbedarf zum Abbau der organischen Stoffe innerhalb von 5 Tagen
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIP	Deinking Pulp
ECF	Ohne Einsatz von elementarem Chlor gebleicht (elementary chlorine-free)
HKW	Heizkraftwerk
IPR	Initiative Pro Recyclingpapier
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NO _x	Stickoxide
PKW	Personenkraftwagen
PM10	Feinstaub mit Partikeldurchmesser kleiner als 10 µm
PO ₄	Phosphat
POCP	Photooxidantienbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)
ROE	Rohöl-Ressourcen-Äquivalenzwert
SO ₂	Schwefeldioxid
TCF	Total chlorfrei gebleicht (total chlorine-free)
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt, Dessau

Verwendete Einheiten und Größen

μm	Mikrometer, 10^{-6}m
l	Liter
m^3	Kubikmeter, 1000 Liter
mg	Milligramm
g	Gramm
kg	Kilogramm, 1000 g
t	Tonne, 1000 kg
kJ	Kilojoule, 1000 Joule
MJ	Megajoule, 1.000.000 Joule
W	Watt
MWh	Megawattstunden, 1.000 kWh (Kilowattstunden)
a	Jahr

Kurzfassung

Deutschland ist der größte Hersteller und Konsument von grafischen Papieren in Europa. Im Segment der ungestrichenen Druck- und Büropapiere werden jährlich 1,5 Millionen Tonnen produziert, wovon gut 20 Prozent oder rund 300 000 Tonnen aus Recyclingpapier sind.¹

Das Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg hat im Auftrag der „Initiative Pro Recyclingpapier“ die Herstellung von Frischfaser- und Recyclingpapier analysiert. Das Hauptergebnis lautet: Bei allen betrachteten Indikatoren ist die Umweltbilanz des Recyclingpapiers eindeutig im Vorteil.

Umweltbundesamt empfiehlt Recyclingpapier

Im August 2000 veröffentlichte das Umweltbundesamt (UBA) das Hintergrundpapier „Ökobilanzen für graphische Papiere“. Grundlage war die Ökobilanz für grafische Papiere, die eine Projektgruppe unter Federführung des IFEU durchgeführt hatte.

Das UBA hebt in seinem Hintergrundpapier als eine zentrale Erkenntnis hervor, dass es „wesentlich umweltverträglicher ist, graphische Papiere aus Altpapier herzustellen, als dafür frische Fasern aus dem Rohstoff Holz zu benutzen“.

Neue Datengrundlage war erforderlich

Die genannte Ökobilanz ist mittlerweile gut zehn Jahre alt. Die „Initiative Pro Recyclingpapier“ beauftragte das IFEU mit einer Studie zur Aktualisierung der Datengrundlagen. In erster Linie wollte man Frischfaser- und Recyclingpapier im Kopier- und Bürobereich miteinander vergleichen und ökologisch bewerten. Dabei berücksichtigte man wesentliche Prozessschritte von der Rohmaterialgewinnung, angefangen im Forst oder der Altpapieraufbereitung, bis hin zum fertigen in Deutschland hergestelltem Papier. Im Unterschied zur UBA-Ökobilanz wird auf eine Betrachtung anderer grafischer Papiere sowie die Entsorgung der gebrauchten Papiere verzichtet.

Modellannahmen

In der nun vorliegenden Arbeit wird die Herstellung des Frischfaserpapiers und des Recyclingpapiers jeweils separat betrachtet. Sie endet mit dem fertigen Kopierpapier, quasi am Werkstor der Papierfabrik. Zusätzlich fällt der Blick auf die Chemikalien- und Energievorketten sowie die entlang der Prozesskette erforderlichen Transporte (siehe Abbildung 1).

Zur besseren Vergleichbarkeit wird ausschließlich die Papierproduktion in Deutschland betrachtet. Das bilanzierte Sekundärfaserpapier – in den Abbildungen als „Sekundär D“ bezeichnet – wird aus Deinking Pulp, das Primärfaserpapier aus gebleichtem Sulfatzellstoff produziert. Der hierzulande eingesetzte Marktzellstoff stammt weitgehend aus Ländern wie Schweden und Finnland, gefolgt von Überseeländern, zum Beispiel Brasilien. Diese Regionen sind in den Abbildungen durch die Begriffe „Primär Nord“ und „Primär Süd“ zusammengefasst.

¹ Verband Deutscher Papierfabriken e.V., „Papierkompass 2006“, Bonn, 2006

Die gewählten Szenarien bilden dabei die jeweils mittlere Situation ab, so dass einzelne Werke durchaus über oder unter den beschriebenen Ergebnissen liegen können. Die verwendeten Daten geben den aktuellen Sachstand wieder, soweit dieser anhand öffentlich zugänglicher Quellen recherchiert werden konnte.

Als Vergleichsgröße wurde die Herstellung von 1000 kg Büropapier gewählt.

Untersuchte Indikatoren für die Umweltbewertung

Um die ökologischen Wirkungen der Papierherstellung einschätzen zu können, orientierte man sich an verschiedenen Indikatoren. Diese spiegeln die Belastung von Luft, Boden, Wasser und (Energie-)Ressourcen wider.

Darstellung der Ergebnisse

Die Studienergebnisse sind als gestaffelte Balkendiagramme dargestellt. Hierbei wird zwischen verschiedenen Abschnitten (Sektoren) der Papiererzeugung differenziert. Die einzelnen Sektoren enthalten neben den Hauptprozessen auch alle relevanten Vorketten wie die Energiebereitstellung, die Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie Transporte von Roh- und Hilfsstoffen (Holz, Altpapier, Natronlauge etc.). Unterschieden wird nach der Holz- bzw. Altpapierbereitstellung, der Zellstoff-/DIP-Herstellung, dem Zellstofftransport sowie der Papierherstellung.

Ergebnisse im Überblick

- Der Energiebedarf der Zellstoffherstellung aus Holz ist deutlich höher als der zur Altpapieraufbereitung.
- Die Produktion von Recyclingpapier schneidet bei den Indikatoren fossiler Ressourcenbedarf, Treibhauseffekt und Versauerung im Vergleich deutlich besser ab – und dies trotz eines erheblichen Einsatzes von Produktionsreststoffen (Ablauge, Rinde) bei der Frischfaserpapierherstellung
- Die erhöhten Schwefelgehalte der Ablauge führen bei der Energiegewinnung zur Frischfaserherstellung zusätzlich zu einem deutlichen Anstieg des Ergebnisses der Versauerung bei der Primärpapierherstellung.
- Die langen Transportwege für Primärfasern südlicher Herkunft wirken sich besonders stark auf den fossilen Ressourcenbedarf und den Treibhauseffekt aus.
- Der deutlich höhere Prozesswasserbedarf der Frischfaserpapierherstellung ist auf Unterschiede bei der Zellstoff- und DIP-Herstellung zurückzuführen: Das Kochen des Holzes zur Fasergewinnung ist ein wasserintensiveres Verfahren als das Recyclingverfahren.

Tabelle 1 und 2 zeigen anhand verschiedener Beispiele die eingesparten Emissionen, die sich aus einer Recyclingpapierproduktion ergeben. Allein die Herstellung von einem Paket Recyclingpapier mit 500 Blatt erspart im Vergleich zum Frischfaserpapier aus Zellstoff südlicher Herkunft so viele fossile Ressourcen, dass damit eine 100-W-Glühlampe 44 Stunden leuchten könnte.

Eine Tonne Recyclingpapier spart im Vergleich zum Frischfaserpapier aus nordischem Zellstoff die Menge an CO₂ ein, die ein durchschnittliches Auto auf rund 1000 km ausstößt.

Würde das gesamte in Deutschland eingesetzte Kopierpapier (800.000 t pro Jahr) aus Altpapier hergestellt, so wäre der Prozesswasserbedarf um rund 25,4 Mio. m³ geringer als bei der Produktion der gleichen Menge Frischfaserpapier. Dies entspricht dem Fassungsvermögen der Wuppertalsperre.

Fazit und Empfehlung

Für alle betrachteten Indikatoren sind die Umweltlasten bei der Recyclingpapierherstellung am niedrigsten. Der Empfehlung des Umweltbundesamtes zur Verwendung von Recyclingpapier sowie Papieren mit einem möglichst hohen Altpapieranteil sollte man nach Auffassung des IFEU daher auch weiterhin folgen.

Besonders gilt dies, wenn bei der Herstellung von Frischfaserpapier hohe Transportentfernungen zurückgelegt werden. So sollte aus ökologischen Gründen auf Zellstoffe aus Übersee verzichtet werden und Altpapier zur Produktion von Recyclingpapier aus regionaler Sammlung stammen.

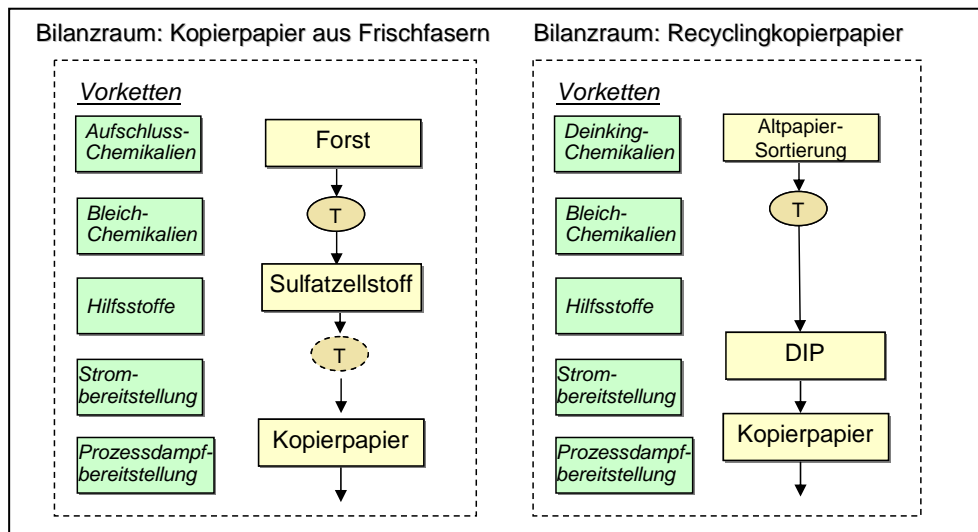


Abbildung 1: Bilanzgrenzen für die bei der aktuellen Umweltbewertung berücksichtigten Prozesse. T steht hier für Transport

Vergleich von Frischfaserpapier aus nordischem Zellstoff mit Recyclingpapier	Ressourcen [kg Rohöl-Äquivalente]	Treibhauseffekt [kg CO ² -Äquivalente]	Prozesswasser [kg]
Bezogen auf ein Paket Kopierpapier (500 Blatt)			
	0,08	0,5	80
Bezogen auf 1 t Papier (400 Pakete à 500 Blatt)			
	33	183	31.800
Bezogen auf 800.000 t Büropapier (durchschnittlicher Jahresverbrauch in Deutschland)			
	26.500.000	146.000.000	25.400.000.000

Tabelle 1: Ersparnis der Emissionen bei der Produktion von Recyclingpapier im Vergleich zur Produktion von Frischfaserpapier aus Zellstoff nordischer Herkunft

Vergleich von Frischfaserpapier aus südlichem Zellstoff mit Recyclingpapier	Ressourcen [kg Rohöl-Äquivalente]	Treibhauseffekt [kg CO ² -Äquivalente]	Prozesswasser [kg]
Bezogen auf ein Paket Kopierpapier (500 Blatt)			
	0,21	0,9	80
Bezogen auf 1 t Papier (400 Pakete à 500 Blatt)			
	82	347	31.800
Bezogen auf 800.000 t Büropapier (durchschnittlicher Jahresverbrauch in Deutschland)			
	65.900.000	278.000.000	25.400.000.000

Tabelle 2: Ersparnis der Emissionen bei der Produktion von Recyclingpapier im Vergleich zur Produktion von Frischfaserpapier aus Zellstoff südlicher Herkunft

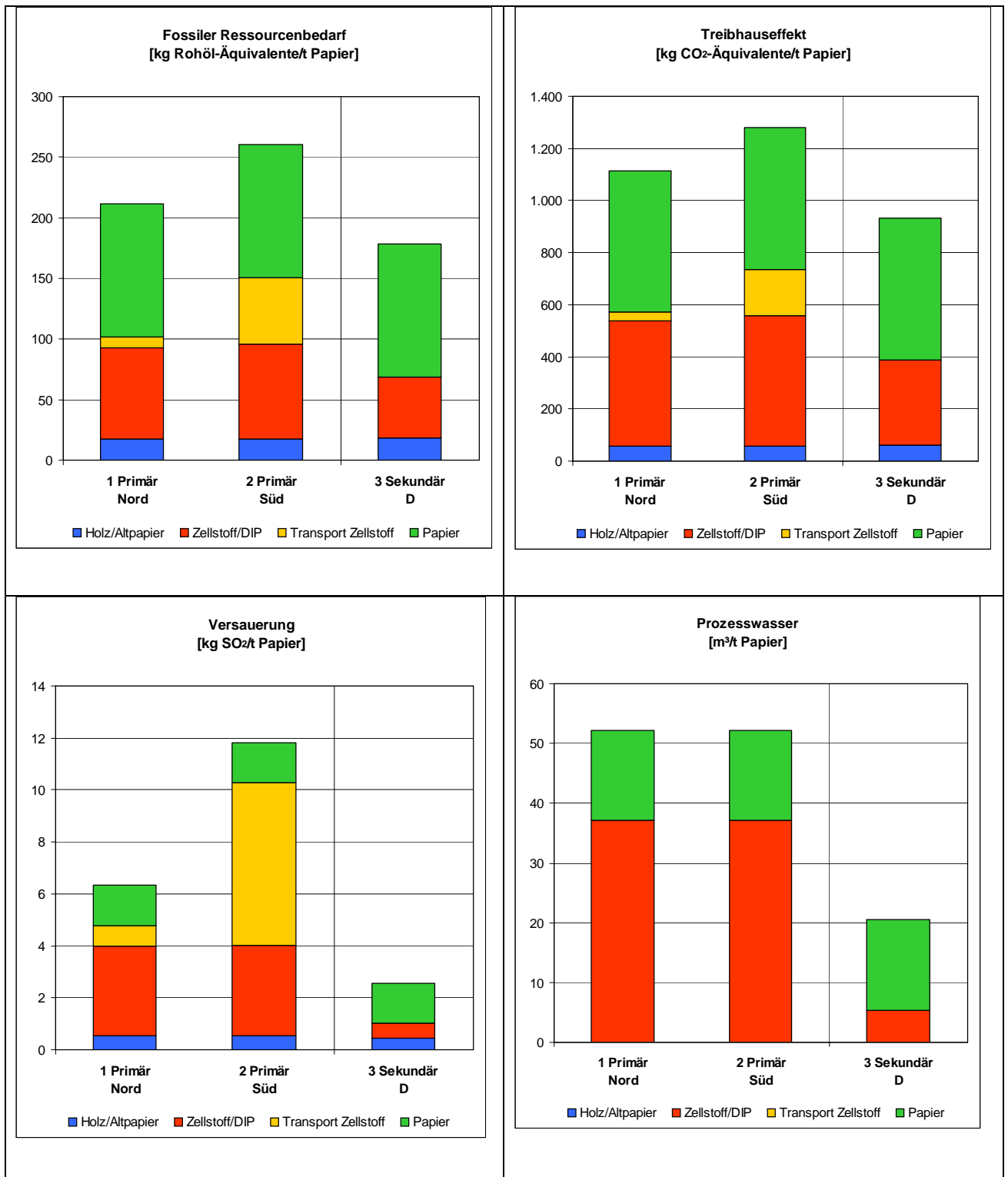


Abbildung 2: Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Frischfaser- und Recyclingpapieren am Beispiel des Indikators fossiler Ressourcenbedarf, Treibhauseffekt, Versauerung und Prozesswasser

Langfassung

1 Hintergrund und Ziele

Deutschland ist der größte Hersteller und Konsument von graphischen Papieren in Europa. Im Bereich der Büropapiere bietet der Handel ein reichhaltiges Angebot unterschiedlicher Papiersorten, die sich hinsichtlich des Flächengewichts, Weißgrads oder des Faserrohstoffs unterscheiden. Beim Faserrohstoff differenziert man zwischen Primärfasern und Sekundärfasern. Primärfasern werden aus frischem Holz gewonnen, während Sekundärfasern durch das Recycling von Altpapier erhalten werden.

Im Jahr 2000 veröffentlichte das Umweltbundesamt ein Hintergrundpapier zur ökologischen Bewertung von graphischen Papieren [UBA 2000]. Grundlage war die Ökobilanz für graphische Papiere, die das Institut für Energie und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg federführend durchgeführt hatte [IFEU 1998].

Das Umweltbundesamt hebt in seinem Hintergrundpapier als eines der zentralen Erkenntnisse hervor, dass es „wesentlich umweltverträglicher ist, graphische Papiere aus Altpapier herzustellen, als dafür frische Fasern aus dem Rohstoff Holz zu benutzen“. Als Schlussfolgerung empfiehlt das Umweltbundesamt die Verwendung von Recyclingpapier sowie Papieren mit einem möglichst hohen Altpapieranteil.

Die ökologischen Vorteile von Recyclingpapier haben u.a. dazu geführt, dass Recyclingkopierprodukte zum Führen des Umweltzeichens „Blauer Engel“ berechtigt sind.

Die Ökobilanzen samt dem genannten Hintergrundpapier dienten bislang auch der „Initiative Pro Recyclingpapier“ (IPR), einer „Wirtschaftsallianz zur Verbesserung der Akzeptanz von Recyclingpapier“², als wichtige ökologische Argumentationshilfe. Darüber hinaus greift die IPR auf weitere Literaturdaten zur Umweltbelastung bei der Faser- und Papierherstellung zurück [Trauth 1997], die auch Eingang in den auf der Homepage der IPR befindlichen „Nachhaltigkeitsrechner“ gefunden haben.

Die genannten Arbeiten haben eine mittlerweile zehn Jahre alte Datengrundlage. Aus diesem Grunde beauftragte die IPR das IFEU Heidelberg mit einer Studie zur Aktualisierung der Datengrundlagen zur ökologischen Bewertung von Kopier-/Büropapieren aus Recyclingfasern im Vergleich zu solchen aus Frischfasern. Dabei sollten die wesentlichen Prozessschritte von der Rohmaterialgewinnung, d.h. Forst- bzw. Altpapieraufbereitung, bis zum fertigen in Deutschland hergestelltem Papier berücksichtigt werden.

Die in Deutschland eingesetzten Papierzellstoffe stammen überwiegend aus den nordischen Nachbarländern Schweden und Finnland. Zunehmend kommt der Papierzellstoff jedoch auch aus Überseeeländern der südlichen Hemisphäre. So liegt Brasilien mittlerweile an vierter Stelle aller Lieferländer [VDP 2005]. Dieser Sachverhalt sollte ebenfalls in die Untersuchung einbezogen werden.

² Siehe www.papiernetz.de

Als Nebenaspekt wurde die Problematik einer zunehmenden Zellstoffproduktion in Ländern wie Brasilien, aber auch in Südeuropa durch den Anbau der schnell wachsenden, und damit einen hohen Flächenertrag erbringenden Eukalyptuswälder untersucht. Die aktuellen Erkenntnisse zum Thema „Eukalyptusplantagen zur Zellstoffherzeugung“ sind als getrenntes Dokument über die „Initiative Pro Recyclingpapier“ kostenlos erhältlich.

2 Umweltbewertung der Papierherstellung

2.1 Vorgehensweise

Die Umweltbilanzierung der vorliegenden Studie weist einige Unterschiede auf zu den vorgenannten Arbeiten [UBA 2000; Trauth 1997], die sich vor allem an den sogenannten Bilanzgrenzen festmachen lassen (s.a. Abb. 2-1).

In der UBA-Ökobilanz für grafische Papiere wurde in allen Untersuchungsszenarien immer der gesamte grafische Papiermarkt in Deutschland betrachtet. Zum einen heißt dies, dass nicht nur die Papierherstellung, sondern auch die Entsorgung der gebrauchten Papiere modelliert wurde. Zum anderen wurden die verschiedenen graischen Papiere, also Zeitschriften-, Zeitungsdruck und Kopierpapiere gleichzeitig mittels eines großen Stoffstrommodells bilanziert. Aussagen bezüglich einzelner Anwendungsbereiche, z.B. der Büropapiere, waren damit nicht ohne Weiteres möglich.

Während in die UBA-Ökobilanz auch die Umweltwirkungen aus den Rohstoff- und Energievorketten einfließen, wurden diese in der Datensammlung von Trauth [1997] nicht berücksichtigt. Im letzteren Fall betrachten die Daten dagegen den spezifischen Rohstoff-, Energie- und Wasserbedarf bei der Zellstoff- und Papierherstellung.

Der Ansatz der vorliegenden Studie ist gewissermaßen ein Mittelweg. Die Herstellung des Frischfaserpapiers und des Recyclingpapiers wird jeweils separat betrachtet und mit dem fertigen Kopierpapier quasi am Werkstor der Papierfabrik beendet. Andererseits werden die Chemikalien- und Energievorketten sowie die entlang der Prozesskette erforderlichen Transporte mit berücksichtigt. Zum besseren Verständnis ist dies in Abbildung 2-1 vereinfacht dargestellt.

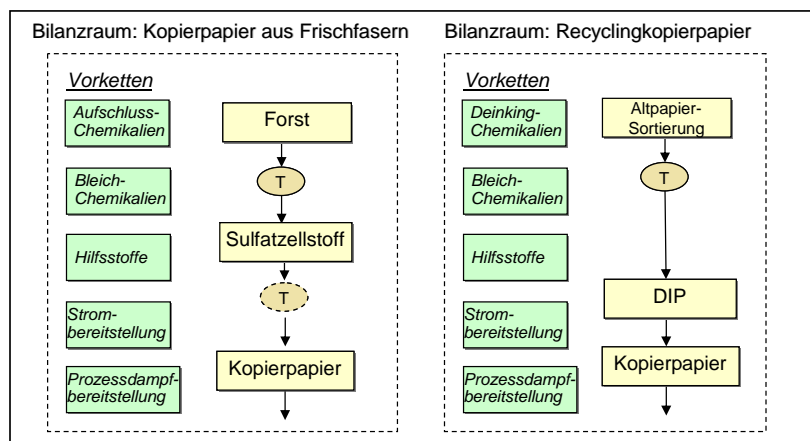


Abbildung 2-1: Bilanzgrenzen für die bei der aktuellen Umweltbewertung berücksichtigten Prozesse.

T steht hier für Transport

2.2 Betrachtete Szenarien und deren Modellierungsgrundlagen

2.2.1 Randannahmen

Die in Deutschland konsumierten Büropapiere stammen zu einem guten Teil aus inländischer Produktion, werden aber auch vom Weltmarkt bezogen. Für die vorliegende Berechnung wurde aufgrund der im gegebenen Rahmen erhebbaren Daten sowie zur besseren Vergleichbarkeit ein Modell gewählt, das ausschließlich die Produktion in Deutschland betrachtet.

Das bilanzierte Sekundärfaserpapier wird aus Deinking Pulp, das Primärfaserpapier aus gebleichtem Sulfatzellstoff produziert. Sekundärfaserpapiere aus nicht deinkten Recyclingfasern (sog. Umweltschutzpapiere) sowie Papiere aus Sulfitzellstoff werden aufgrund ihrer relativ geringen Bedeutung für den deutschen Büropapiermarkt nicht betrachtet.

Für den Prozess der Büropapierherstellung macht es aus technischer Sicht keinen wesentlichen Unterschied, ob die Papiermaschine mit Sulfatzellstoff oder Deinking Pulp betrieben wird. Unterschiede zwischen einzelnen Papierprodukten werden vielmehr durch die Effizienz der jeweiligen Papiermaschine oder die ortsspezifischen Randbedingungen bestimmt. Um solche Effekte auszublenden, wird die Papierherstellung in der vorliegenden Untersuchung in allen Szenarien als gleich angesetzt.

Büropapiere aus Sekundärfasern werden im sogenannten integrierten Verfahren hergestellt. Dabei erfolgen die Herstellung von Deinking Pulp aus Altpapier und die nachfolgende Papierherstellung am gleichen Standort. Der in Deutschland zur Produktion von Büropapier verwendete Sulfatzellstoff stammt jedoch weitgehend aus dem Import. Die wichtigsten Herkunftsländer sind dabei Schweden und Finnland. Dahinter folgen gleich Überseeländer wie z.B. Brasilien.

In der vorliegenden Studie ist diese Situation näherungsweise über ein Szenario mit Zellstoff nordischer Herkunft und über eins mit Zellstoff aus Übersee abgebildet.

Es wurde angenommen, dass der Marktzellstoff vor allem aus Werken kommt, die siedlungsfern gelegen und damit ohne Anbindung an eine Nahwärmeversorgung sind. Bei siedlungsnahen Werken kann die Überschusswärme in die Nahwärmeversorgung eingespeist werden. Dieser Aspekt wurde in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Damit stehen in der vorliegenden Studie drei Szenarien im Vordergrund:

1. Büropapier aus Primärfasern nordischer Provenienz (Kürzel: „Primär Nord“)
2. Büropapier aus Primärfasern südlicher Provenienz (Kürzel: „Primär Süd“)
3. Büropapiere aus Sekundärfasern (Kürzel: „Sekundär D“)

Als Vergleichsgröße wurde die Herstellung von 1000 kg Bürokopierpapier gewählt.

2.2.2 Daten

Eine wesentliche Komponente des Projekts war es, aktuelle Daten zur Abbildung der Herstellung von Sulfatzellstoff und Deinking Pulp zu recherchieren. Der Fokus lag dabei auf der Auswertung öffentlich zugänglicher Informationen. Ergänzt wurden die Daten durch eine Datenerhebung bei der Firma Steinbeis Temming sowie weiterer telefonischer Anfragen.

Insgesamt wurden folgende Datenquellen verwendet:

- Datenband zur Ökobilanz graphischer Papiere [UBA 1998b]
- Umweltberichte von Faserstoff- und Papierherstellern (Liste im Anhang)
- Referenzdokument über die „Besten Verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie“ [BREF Zellstoff]
- Datensammlung Ecoinvent [ECOINVENT 2003]
- Datenerhebung bei Steinbeis Temming Papier Glückstadt [STP 2006]
- Telefonische Kommunikation mit Zellstoffwerk Rosenthal
- Interne Datenbank des IFEU Heidelberg.

Nachfolgend wird in einer Kurzbeschreibung dargestellt, wie die verfügbaren Daten zur Modellierung der Szenarien verwendet wurden.

Szenario: Büropapier aus Sekundärfasern

Die Herstellung von Büropapier aus Sekundärfasern umfasst die Prozesse:

- *Altpapiersortierung und Anlieferung zur Altpapieraufbereitung*

Verwendete Daten: [UBA 1998], die Energievorketten wurden auf den Stand 2004 aktualisiert; Quelle: IFEU-Datenbank.

- *Altpapieraufbereitung, DIP-Herstellung*

Daten zu Endenergieverbrauch, Chemikalienbedarf und Abwasser: [STP 2006].

Der Mix an Energieträgern wurde so gewählt, dass er näherungsweise die mittlere deutsche Situation bei der DIP-Herstellung abbildet. Er wurde aus öffentlich verfügbaren Informationen der größten deutschen DIP-Hersteller überschlägig abgeleitet. Quelle: [IFEU 2006b].

- *Büropapierherstellung*

Im letzten betrachteten Prozessschritt wird aus dem produzierten DIP Papier hergestellt. Die notwendigen Daten zur Papierherstellung stammen aus [UBA 2000], die der berücksichtigten Vorketten für Energie und Vorstoffe aus [Ecoinvent 2003, UBA 2000, Umberto 2005].

Szenarien für Büropapier aus Primärfasern

Die Herstellung von Büropapier aus Primärfasern umfasst die Prozesse:

- *Forstwirtschaftliche Holzbereitstellung*

Bereitstellung von Holz nordischer Herkunft [UBA 2000].

- *Herstellung von Markt-Sulfatzellstoff*

Für die Prozessdaten wurde im Wesentlichen der Datensatz für die elementarchlorfrei gebleichte (ECF) Sulfatzellstoffherstellung aus [Ecoinvent 2003] herangezogen.

Datenquellen für die Vorketten der extern bezogenen Energie sowie sämtliche relevanten Vorstoffe und Hilfschemikalien inklusive ihrer Vorketten: [Ecoinvent 2003, UBA 2000, Umberto 2005].

- *Mahlung des Zellstoffes*

An die Zellstoffherstellung schließt sich bei Marktzellstoffen eine Mahlung an. Die angesetzten Energieverbrauchswerte für die Mahlung basieren auf [Bos 1999] und sind abgestimmt mit Erfahrungswerten von [STP 2006].

- *Büropapierherstellung*

Im letzten betrachteten Prozessschritt wird aus dem angelieferten Zellstoff Papier hergestellt. Die notwendigen Daten zur Papierherstellung stammen aus [UBA 2000], die der berücksichtigten Vorketten für Energie und Vorstoffe aus [Ecoinvent 2003, UBA 2000, Umberto 2005].

Der wesentliche Unterschied der beiden Szenarien zu Büropapier aus Primärfasern liegt im Transport des Zellstoffes von der Zellstofffabrik zur Papierfabrik. Im ersten Szenario „Büropapier aus Primärfasern nordischer Provenienz“ wird ein kombinierter Transport (Wasser- und Landtransport) aus Skandinavien [UBA 2000], im zweiten Szenario „Büropapier aus Primärfasern südlicher Provenienz“ ein kombinierter Transport aus Brasilien angenommen (IFEU-Annahmen).

Eine Auflistung der verwendeten Datensätze findet sich in tabellarischer Form im Anhang II.

2.2.3 Geltungsbereich der Szenarien

Aus den vorangehenden Kapiteln wird deutlich, dass die betrachteten Szenarien nicht den gesamten deutschen Büropapiermarkt umfassen, sondern nur einen, wenn auch relevanten, Teilbereich davon.

Die zur Bilanzierung verwendeten Daten stammen einerseits aus originalen Datenerhebungen, zu einem größeren Teil jedoch aus öffentlich verfügbaren Datenquellen. Alle verwendeten Daten wurden auf ihre Plausibilität geprüft. Die nach dem Urteil der Verfasser sachgerechtesten Daten wurden für die Bilanzierung verwendet. Zur Nachvollziehbarkeit der getroffenen Festlegungen sind die zentralen Rechenwerte im Anhang dokumentiert.

Die Fokussierung auf Teilbereiche des Marktes sowie die Zusammenstellung der Datensätze aus unterschiedlichen Datenquellen führen notwendigerweise zu gewissen Einschränkungen für den Geltungsbereich der Szenarien bzw. der Studie, auf die hier kurz hingewiesen werden soll.

Modellierte Szenarien statt Einzeldarstellungen

Die für die vorliegende Studie modellierten Szenarien repräsentieren nicht ein bestimmtes Werk oder ein konkretes Papierprodukt. Die Daten eines individuellen Herstellers können daher von den hier verwendeten Daten abweichen.

Die zugrunde gelegten Input-/Output-Daten der Sulfatzellstoffherstellung liegen in der Regel in der Bandbreite, die gemäß [BREF Zellstoff 2001] als typisch angesehen werden kann. Diese Einschätzung lässt sich auch anhand der dem IFEU vorliegenden internen Daten bestätigen. So gibt es moderne Zellstoffwerke, die etwa bezüglich der Energiebilanz oder der Luft- und Wasseremissionen deutlich bessere Werte aufweisen als die in der vorliegenden Studie verwendeten Daten. Andererseits dürften in Deutschland auch Zellstoffe mit ungünstigeren Werten gehandelt werden. Besonders bei Überseezellstoffen ist dies anzunehmen, die Datenverfügbarkeit ist in diesem Bereich jedoch nicht ausreichend, um eine gesicherte Aussage treffen zu können.

Bei den verwendeten Daten handelt es sich also um generische Daten, welche kein konkretes Werk darstellen, jedoch im Mittel die nordische Marktzellstoffherstellung bestmöglich abbilden.

Vergleichbares gilt für die DIP-Herstellung in Deutschland, hier wurde ebenfalls gemittelt. Damit umfasst der generische Datensatz die Herstellung von DIP für Büro- und andere Papieranwendungen. So wird eine gewisse Analogie zum Datensatz für die nordische Zellstoffherstellung erreicht, der ebenso wenig ausschließlich zur Büropapierherstellung verwendet wird.

Zu erwähnen bleibt zudem, dass importierte Primärfaserpapiere, insbesondere solche aus den nordischen Ländern, häufig ebenfalls in integrierten Papierwerken hergestellt werden. Aus den eingangs genannten Gründen sind diese jedoch in der vorliegenden Studie nicht betrachtet worden.

2.3 Indikatoren für die Umweltbewertung

Die folgenden Umweltwirkungskategorien und Indikatoren wurden betrachtet:

- Fossiler Ressourcenverbrauch – angegeben als Rohöläquivalente
- Treibhauseffekt
- Versauerung
- Aquatische Eutrophierung
- Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)
- Prozesswasserbedarf
- Primärenergiebedarf (fossiler Energiebedarf, Gesamtenergiebedarf)
- Sommersmog
- Gesundheitliche Wirkung – ausgedrückt als Feinstaub

Der *fossile Ressourcenbedarf* ist dargestellt als Rohöl-Ressourcen-Äquivalenzwert und wird in kg angegeben. Er errechnet sich aus der Verbrauchsmenge eines fossilen Energieträgers (Steinkohle, Braunkohle, Rohgas, Rohöl) und dem sogenannten Rohöl-Ressourcen-Äquivalenzfaktor. Dieser berücksichtigt die statischen Reichweiten des jeweiligen Rohstoffs (wie weit in die Zukunft reichen diese Vorräte) sowie dessen unteren Heizwert. Der Rohöl-Ressourcen-Äquivalenzfaktor ist umso größer, je geringer die statische Reichweite und je größer der untere Heizwert des betrachteten Rohstoffes ist. Für Rohöl ist der Äquivalenzfaktor = 1.

Unter dem Begriff *Treibhauseffekt* werden alle treibhausrelevanten Emissionen – umgerechnet als CO₂-Äquivalente – beschrieben. Hierzu gehören unter anderem Emissionen von fossilem Kohlendioxid oder Methan.

Die Umweltwirkungskategorie *Versauerung* beinhaltet unter anderem die Emissionen von Salzsäure, Schwefeloxiden, Schwefelwasserstoffen, Stickoxiden und Ammoniak. Sie werden angegeben als SO₂-Äquivalente (Schwefeldioxid). Versauerung kann sowohl in Gewässern, als auch in Böden (saurer Regen) auftreten.

Der *chemische Sauerstoffbedarf* (CSB) gibt Auskunft über die gesamte oxidierbare organische (gelöste) Schmutzfracht im Abwasser. Der CSB gibt die Menge an Sauerstoff (in mg/l) an, die zur Oxidation dieser Schmutzfracht benötigt würde, wenn Sauerstoff das Oxidationsmittel wäre. Er kann somit ein Maß für die mögliche Sauerstoffzehrung in Gewässern darstellen. Neuerdings wird der CSB auch als Indikator für Substanzen mit aquatisch toxischer Wirkung diskutiert.

Der *Prozesswasserbedarf* ist ein Maß für den Wassereinsatz im Produktionsprozess. Betrachtet wird hierbei das Wasser, welches in direkten Kontakt mit dem Prozess kommt. Kühlwasser bleibt hierbei unberücksichtigt, da dieses in der Regel in peripheren Systemen eingesetzt wird und nur minimale chemische Veränderungen erfährt.

Der Indikator *aquatische Eutrophierung* repräsentiert das Umweltproblem „Sauerstoffzehrung“. Er berücksichtigt den Parameter CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) sowie wassersei-

tige Nitrit-, Nitrat-, Ammonium-, Stickstoffverbindungs- und Phosphatmissionen. Hierbei bewirken die wasserseitigen Emissionen (ohne CSB) zunächst einen Nährstoffeintrag in Oberflächengewässer, welcher in Folge des dadurch verursachten Pflanzenwachstums im Anschluss genauso wie der CSB zu einer Sauerstoffzehrung führen kann. Angegeben werden die Wirkungen als PO_4 -Äquivalente (Phosphat-Äquivalente).

Hinter dem Indikator *Primärenergiebedarf* wird die gesamte zur Erzeugung von Prozessenergie benötigte Primärenergie – nicht zu verwechseln mit der Endenergie – als KEA (kumulierter Primärenergieaufwand) ausgedrückt, dargestellt und in MJ pro Tonne Papier angegeben. Hierbei wird unterschieden zwischen *fossilem Primärenergiebedarf* und *Gesamtenergiebedarf*. Während der fossile Primärenergiebedarf lediglich die Bereitstellung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Gas oder Erdöl beschreibt, berücksichtigt der KEA neben dem fossilen Energiebedarf unter anderem auch den Bedarf an regenerativen Energieträgern wie zum Beispiel Holz. Bei der Frischfaserpapierherstellung werden die im Zellstoffprozess anfallenden Holzrest- und Abfallstoffe zur Deckung eines großen Teils des Energiebedarfs genutzt.

Sommersmog oder bodennahes Ozon wird ausgedrückt als *POCP* (Photochemical Ozone Creation Potential, Photooxidantienbildung). Das photochemische Ozonbildungspotenzial beschreibt die Bildung von bodennahem Ozon, das als schädliches Spurengas einzuordnen ist und im Verdacht steht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen sowie Gesundheitsbeschwerden hervorzurufen. Photooxidantien sind reaktive Stoffe und können in der Umwelt vielfache chemische Reaktionen auslösen, die zur Luftverschmutzung beitragen. Der POCP wird auf die Wirkung des Referenzstoffes Ethen bezogen und beinhaltet Kohlenwasserstoffe. Angegeben werden die Indikatorergebnisse entsprechend in kg Ethen-Äquivalente pro Tonne Papier. POCP-Werte sind nicht konstant, sie variieren je nach Ort und Zeit aufgrund meteorologischer Bedingungen.

Über den Parameter *Feinstaub/PM10* werden Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ausgedrückt. Als Feinstaub werden Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $10\ \mu\text{m}$ bezeichnet. Partikel dieser Größe werden von den Schleimhäuten im Nasen-/Rachenraum bzw. den Härchen im Nasenbereich nur bedingt zurückgehalten. Berücksichtigt werden neben direkten Emissionen auch Partikelneubildungen aus Vorläufersubstanzen wie zum Beispiel aus Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden, Ammoniak oder flüchtigen organischen Verbindungen.

2.4 Ergebnisgrafiken

Für die Darstellung der ökologischen Bilanzierung werden gestaffelte Balkendiagramme verwendet. Hierbei wird eine Unterscheidung nach verschiedenen Abschnitten (Sektoren) der Papiererzeugung vorgenommen. Die einzelnen Sektoren enthalten neben den Hauptprozessen auch alle relevanten Vorketten wie die Energiebereitstellung oder die Bereitstellung von Hilfsstoffen sowie die Transporte von Roh- und Hilfsstoffen (Holz, Altpapier, Natronlauge etc.). Die in den Zellstoff-/DIP-Herstellungsprozess sowie Papierherstellungsprozess eingegangenen Größen sind im Anhang II benannt. Sie beruhen für die Zellstoffherstellung im Wesentlichen auf Daten aus [Ecoinvent 2003], für die DIP-Herstellung auf Daten von [STP 2006] sowie weiteren öffentlich zugänglichen Daten und für die Papierherstellung auf [UBA 2000].

Im Anhang sind die in den Grafiken abgebildeten Ergebnisse nochmals als Zahlenwerte in einer Tabelle aufgeführt. Sie beziehen sich auf die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Randbedingungen. Die **Papierherstellung aus Frischfasern** wird in die Teilprozesse

- Holzbereitstellung [Holz/Altpapier]
- Zellstoffherstellung [Zellstoff/DIP]
- Transport des Zellstoffes zur Papierfabrik [Transport Zellstoff]
- sowie Papierherstellung aus Zellstoff [Papier]

unterteilt. Zur besseren Orientierung ist in der Aufzählung der Teilprozesse zusätzlich in eckigen Klammern die Bezeichnung angegeben, wie sie auch in den Diagrammen verwendet wird.

Die **Papierherstellung aus Altpapier** wird in die Sektoren

- Altpapierbereitstellung [Holz/Altpapier]
- Herstellung von Deinking Pulp (DIP) [Zellstoff/DIP]
- sowie Papierproduktion aus Recyclingfasern [Papier]

unterteilt. Zellstofftransporte zur Papierfabrik wurden ausschließlich für den betrachteten Sulfatzellstoff aus nordischen Ländern und den Sulfatzellstoff aus Brasilien berücksichtigt. Die Verarbeitung von DIP aus Deutschland erfolgt in integrierten Werken, in welchen aus DIP direkt Papier hergestellt wird, sodass ein Transport entfällt.

Die Größe des Teilbalkens „Papier“ ist innerhalb einer Wirkungskategorie für alle betrachteten Szenarien gleich groß, da für die betrachteten Faserarten jeweils der gleiche Papierherstellungsprozess angenommen wurde (vgl. Absatz 2.2.2 Daten).

Als Bezugsgröße wurde jeweils eine Tonne produziertes Papier gewählt.

2.4.1 Energiegeprägte Umweltbelastungen und Versauerung

Zunächst werden die vorwiegend durch die Energiebereitstellung geprägten Umweltwirkungen, nämlich der *fossile Ressourcenbedarf*, der *Treibhauseffekt* und die *Versauerung* betrachtet. Zur Veranschaulichung werden die Ergebnisse im abschließenden Unterkapitel auf anschauliche Größen beispielhaft umgerechnet.

Die hier graphisch dargestellten Ergebnisse sind im Anhang I nochmals als Berechnungsergebnisse tabellarisch aufgelistet.

Der Energiebedarf der Zellstoffherstellung aus Holz ist deutlich höher als der zur Altpapieraufbereitung. Trotz des erheblichen Einsatzes von Produktionsreststoffen (Ablauge, Rinde) sind die Ergebnisse der Frischfaserpapierherstellung im Falle des fossilen Ressourcenbedarfs, des Treibhauseffekts und der Versauerung deutlich höher als bei der Recyclingpapierherstellung.

Fossiler Ressourcenbedarf/Treibhauseffekt

Insgesamt hat die Recyclingpapierherstellung von den drei betrachteten Fällen den niedrigsten *fossilen Ressourcenbedarf* und leistet den geringsten Beitrag zum *Treibhauseffekt*. So ist der *fossile Ressourcenbedarf* der Recyclingpapierherstellung unter den gewählten Randbedingungen um bis zu einem Drittel geringer als für Primärfaserpapierherstellung bei Übersee-transport.

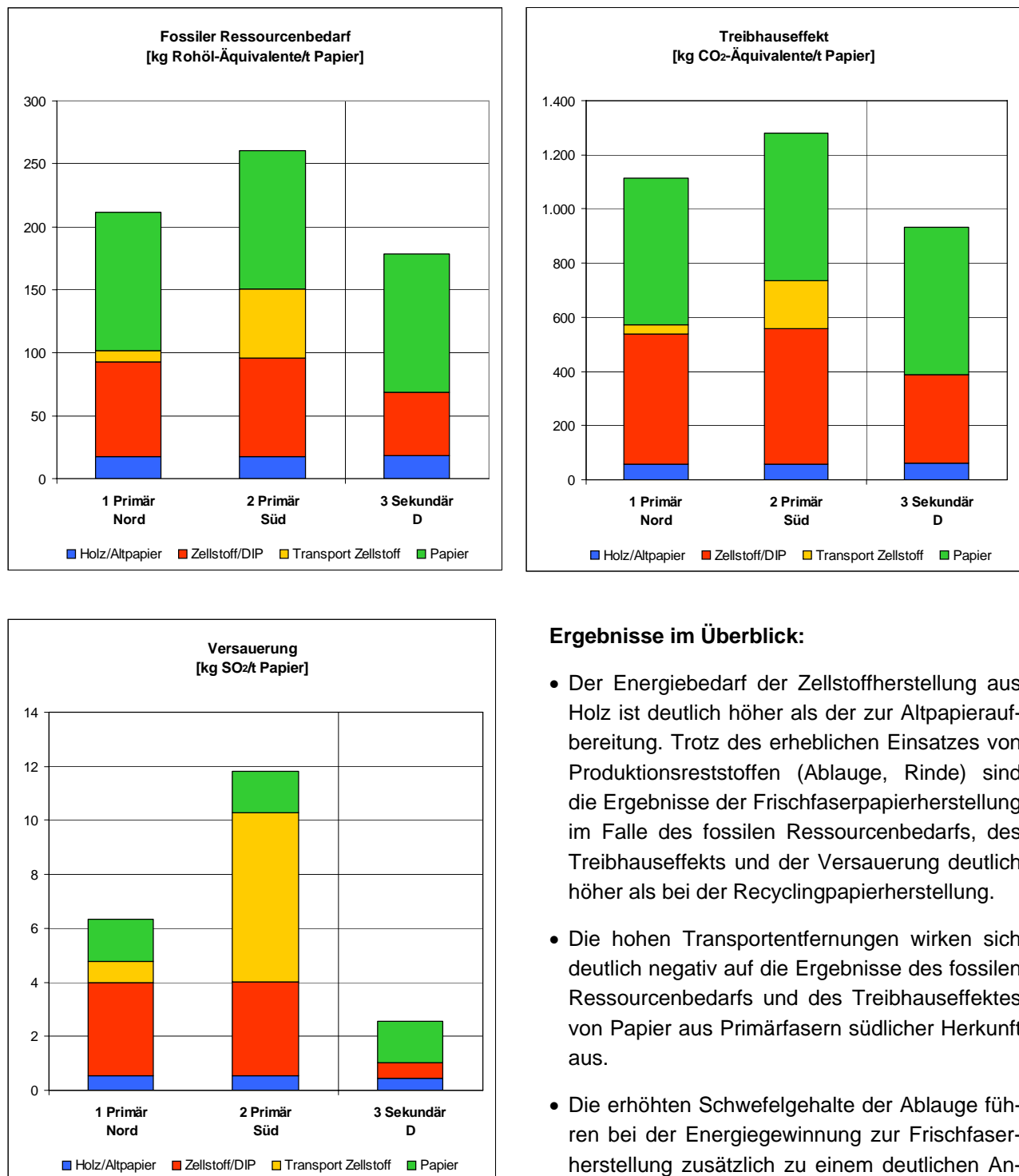
Die hohen Transportentfernungen wirken sich deutlich negativ auf die Ergebnisse des fossilen Ressourcenbedarfs und des Treibhauseffektes von Papier aus Primärfasern südlicher Herkunft aus.

Vergleicht man die beiden Primärpapiere, so ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen dem Primärpapier mit Zellstoff aus nordischer bzw. südlicher Herkunft durch die deutlich höhere Transportentfernung des Zellstoffes aus Südamerika hervorgerufen wird.

Versauerung

Im Falle des Indikators Versauerung wiederholt sich das Muster in den Ergebnissen, allerdings mit klarer Ausprägung zugunsten des Recyclingpapiers: Die Recyclingpapierherstellung leistet pro Tonne Papier mit Abstand den geringsten Beitrag zur Versauerung – er ist weniger als halb so hoch wie der Beitrag der Primärpapierherstellung (Zellstoff nordischer Herkunft). Die Ursache hierfür liegt vor allem in der Nutzung der schwefelhaltigen, heizwertreichen Prozessablage als Energieträger bei der Primärfaserherstellung. Die entstehenden Schwefeloxidverbindungen tragen wesentlich zur Versauerung bei.

Beim Zellstoff südlicher Provenienz kommen zusätzlich hohe transportbedingte Emissionen zum Tragen. Da diese jedoch überwiegend auf hoher See verursacht werden, fallen sie als Umweltlast weniger ins Gewicht. In der abgebildeten Grafik (Abbildung 2-2) sind die Ergebnisse jedoch in vollem Umfang berücksichtigt. Bei der Bewertung der Wirkungen ist somit gesondert zu berücksichtigen, wo diese Wirkung auftritt.



Ergebnisse im Überblick:

- Der Energiebedarf der Zellstoffherstellung aus Holz ist deutlich höher als der zur Altpapieraufbereitung. Trotz des erheblichen Einsatzes von Produktionsreststoffen (Ablauge, Rinde) sind die Ergebnisse der Frischfaserpapierherstellung im Falle des fossilen Ressourcenbedarfs, des Treibhauseffekts und der Versauerung deutlich höher als bei der Recyclingpapierherstellung.
- Die hohen Transportentfernungen wirken sich deutlich negativ auf die Ergebnisse des fossilen Ressourcenbedarfs und des Treibhauseffektes von Papier aus Primärfasern südlicher Herkunft aus.
- Die erhöhten Schwefelgehalte der Ablauge führen bei der Energiegewinnung zur Frischfaserherstellung zusätzlich zu einem deutlichen Anstieg [des Ergebnisses] der Versauerung bei der Primärpapierherstellung.

Abbildung 2-2: Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Frischfaser- und Recyclingpapieren am Beispiel der Indikatoren fossiler Ressourcenbedarf, Versauerung sowie Treibhauseffekt

2.4.2 Wasserseitige Umweltwirkungen

Eine weitere Sicht auf die ökologischen Effekte der Papierherstellung bietet die Betrachtung wasserseitiger Umweltwirkungen. Hierzu gehören die *aquatische Eutrophierung*, der *chemische Sauerstoffbedarf (CSB)*, und der *Prozesswasserbedarf*.

Die hier graphisch dargestellten Ergebnisse sind im Anhang I nochmals als Berechnungsergebnisse tabellarisch aufgelistet. In den drei betrachteten Indikatoren fallen die Ergebnisse deutlich zugunsten des Recyclingpapiers aus. Die Profile, wie sie in Abbildung 2-3 zu sehen sind, sind für den Prozesswasserbedarf, den CSB und die aquatische Eutrophierung jeweils ähnlich und unterscheiden sich lediglich in ihrer Ausprägung.

Der Beitrag zur aquatischen Eutrophierung ist bei der Papierherstellung aus Frischfasern unter den betrachteten Randbedingungen gut doppelt so hoch wie bei der Recyclingpapierherstellung.

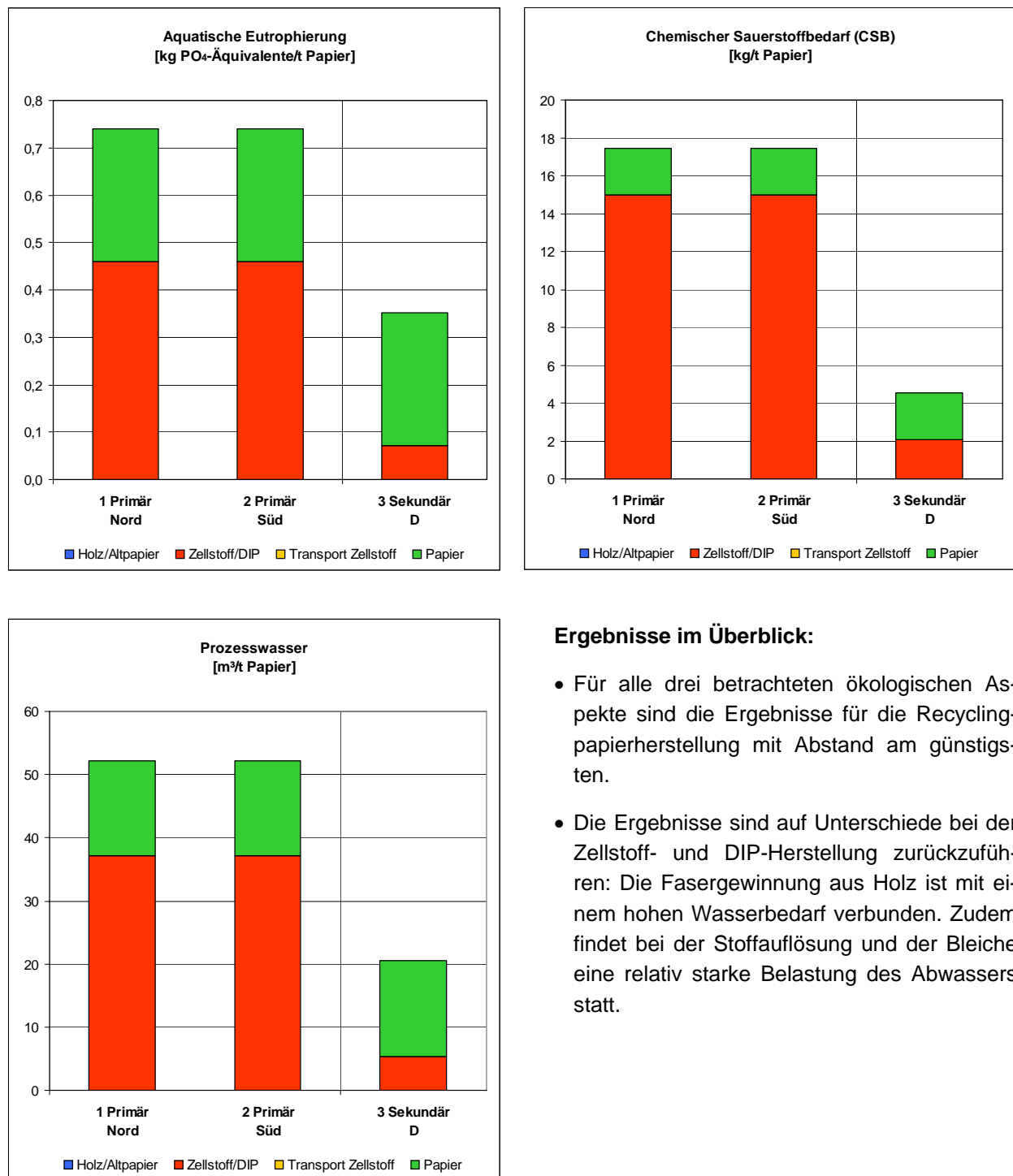
Der deutlich höhere Prozesswasserbedarf der Frischfaserpapierherstellung ist auf Unterschiede bei der Zellstoff- und DIP-Herstellung zurückzuführen: Das Kochen des Holzes zur Fasergewinnung ist ein wasserintensiveres Verfahren als das Recyclingverfahren. Der Prozesswasserbedarf der Papierherstellung aus Holz ist rund zweieinhalb mal so hoch wie der für die Papierherstellung aus Altpapier.

Die organische Schmutzfracht des Abwassers aus der Frischfaserpapierherstellung ist deutlich höher als bei der Recyclingpapierherstellung. Dies spiegelt sich in einem fast viermal so hohen CSB-Wert der Frischfaserpapierherstellung wider.

Die berechneten Werte zu diesen Indikatoren sind zusätzlich in Anhang I tabellarisch aufgelistet.

Es ist anzumerken, dass der Prozesswasserbedarf von modernen Papiermaschinen zur Herstellung von Papier aus Zellstoff/DIP deutlich unter den verwendeten Werten liegen kann. Da für alle drei betrachteten Fälle – Frischfaserpapier aus Zellstoff südlicher und nordischer Herkunft sowie Recyclingpapier aus DIP – der gleiche Papierprozess angenommen wurde (siehe Kapitel 2.2.1), hat dies jedoch keine Auswirkungen auf die absoluten Unterschiede in den dargestellten Indikatoren.

Transporteffekte, wie sie unter anderem beim Treibhauseffekt oder dem Ressourcenbedarf sichtbar werden, spielen hier keine Rolle.



Ergebnisse im Überblick:

- Für alle drei betrachteten ökologischen Aspekte sind die Ergebnisse für die Recyclingpapierherstellung mit Abstand am günstigsten.
- Die Ergebnisse sind auf Unterschiede bei der Zellstoff- und DIP-Herstellung zurückzuführen: Die Fasergewinnung aus Holz ist mit einem hohen Wasserbedarf verbunden. Zudem findet bei der Stoffauflösung und der Bleiche eine relativ starke Belastung des Abwassers statt.

Abbildung 2-3: Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Frischfaser- und Recyclingpapieren am Beispiel der Größen Chemischer Sauerstoffbedarf, Prozesswasserbedarf und aquatische Eutrophierung

2.4.3 Primärenergiebedarf und Sommersmog

In Ergänzung zu Kapitel 2.4.1 werden hier die Indikatoren zum Primärenergiebedarf – *fossiler Primärenergiebedarf* und *gesamter Primärenergiebedarf* – beschrieben. Zusätzlich sind die Indikatorergebnisse zum *Sommersmog/POCP* dargestellt.

Auch für diese drei Indikatoren sind die Ergebnisse für die Recyclingpapierherstellung deutlich niedriger als für die Herstellung von Frischfaserpapier.

Fossiler Energiebedarf der Papierherstellung

Zur Herstellung von Recyclingpapier müssen weniger *fossile Energieträger* als zur Herstellung von Frischfaserpapier bereitgestellt werden. Je nach Herkunft der Zellstoffe kann bis zu ein Viertel der fossilen Energieträger durch die Herstellung von Kopierpapier aus Altpapier eingespart werden.

Die Unterschiede in dieser Kategorie ergeben sich bei der Faserherstellung und beim Transport. Die Faserherstellung ist für das Recyclingpapier um rund ein Viertel günstiger als für das Primärpapier.

Relevanz nicht fossiler Energieträger

Die fossilen Energieträger stellen jedoch nur einen Teil der im Prozess benötigten Energie dar. In Frischfaserzellstoffwerken wird der überwiegende Teil (über 90 %) der benötigten Energie durch die Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen des Zellstoffprozesses (Holz, Holzbestandteile, Ablauge) bereitgestellt. Lediglich ein geringer Anteil der Energie wird über – externe – fossile Energieträger bereitgestellt. Die zusätzliche Nutzung der Rest- und Abfallstoffe wird im Indikator *Gesamtenergiebedarf* berücksichtigt. Dort wird sowohl der Energiebedarf in Form von Primärenergie aus fossilen wie auch aus erneuerbaren Energieträgern betrachtet.

Der gesamte primäre Energieträgerbedarf der Papierherstellung aus Holz ist rund zweieinhalb mal so hoch wie der der Recyclingpapierherstellung.

Ein Vergleich zwischen dem gesamten primären und dem fossilen Energiebedarf zeigt, was oben bereits angedeutet wurde: Der Gesamtenergiebedarf der Primärpapierherstellung ist rund zweieinhalb mal höher als der fossile Energiebedarf ebendieser Primärpapierherstellung.

Sommersmog

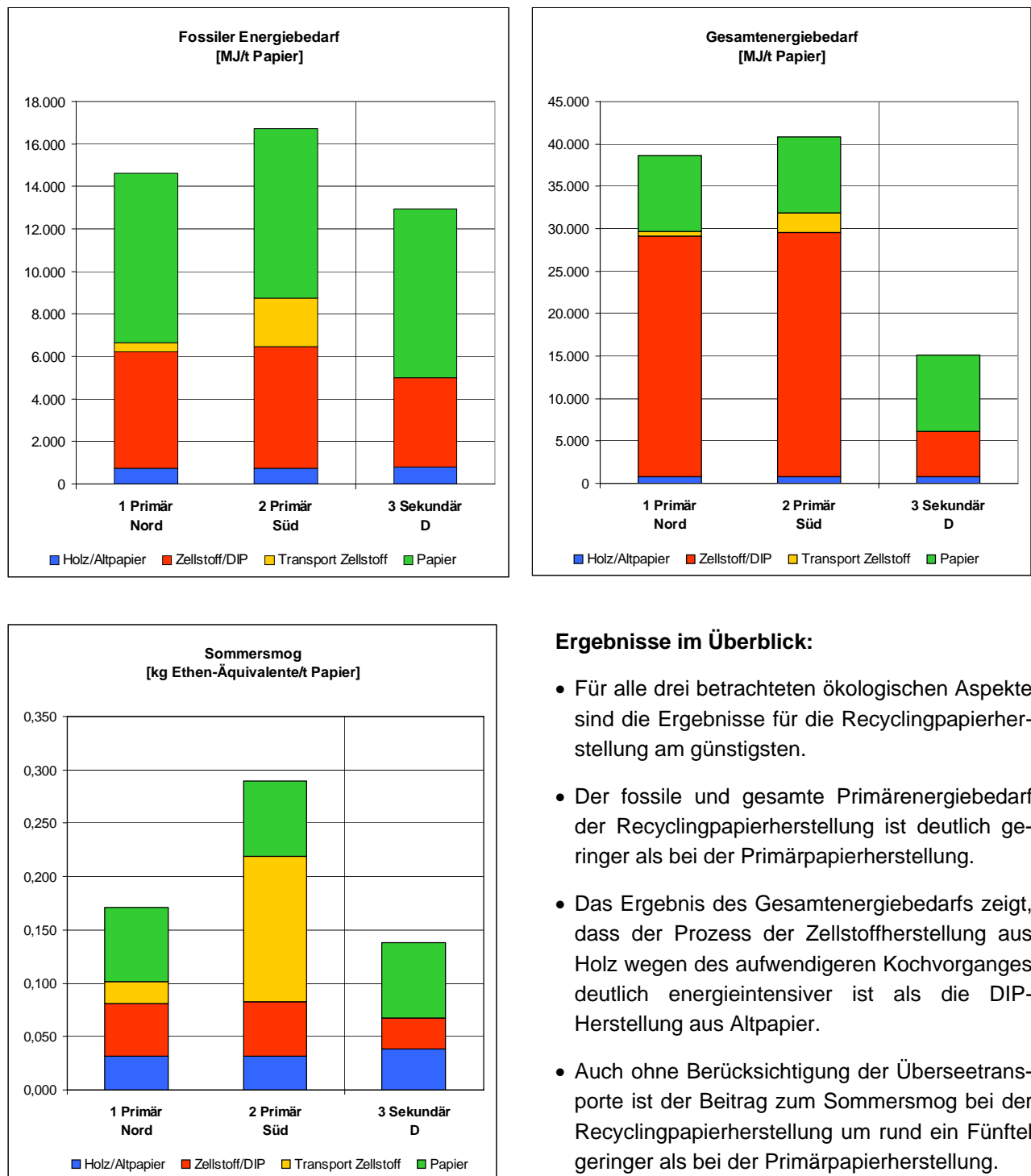
Auch bei Betrachtung der Ergebnisse zum Sommersmog fällt der hohe Beitrag aus dem Transport des Überseezellstoffes ins Auge. Jedoch sollte auch hier aus den gleichen Erwägungen wie bei der Versauerung (Kapitel 2.4.1) das Ergebnis nicht überbewertet werden, da die Wirkung des Sommersmogs auf hoher See nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Auch ohne Berücksichtigung der transportbedingten Beiträge liegen die Ergebnisse der Recyclingpapierherstellung im Indikator Sommersmog um rund ein Fünftel unter denen der Papierherstellung aus Frischfasern.

Während sich in den anderen bisher betrachteten Umweltwirkungskategorien die Ergebnisse für die Altpapieraufbereitung und Holzbereitstellung ungefähr die Waage halten, liegen in

diesem Indikator die Ergebnisse für die Holzbereitstellung niedriger als für das Altpapier. Bei der Holzbereitstellung sind die Beiträge zum Indikator Sommersmog im Wesentlichen transportbedingt, die Beiträge im Falle der Altpapierbereitstellung werden durch den Sortieraufwand geprägt. Diese Ergebnisse im Sektor Holz- bzw. Altpapierbereitstellung werden im Gesamtbild jedoch durch die deutlich niedrigeren Indikatorergebnisse bei der Recyclingfaserherstellung im Vergleich zur Frischfaserherstellung kompensiert.

Die Einzelergebnisse der Berechnungen sind in Anhang I aufgeführt.



Ergebnisse im Überblick:

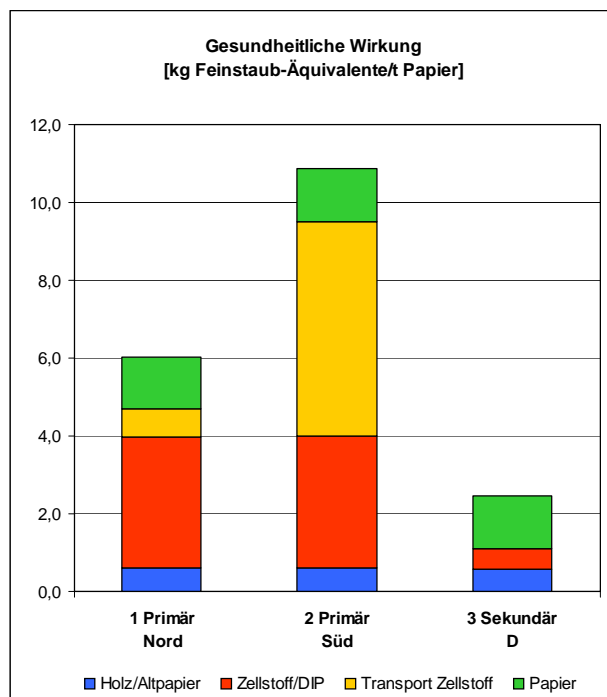
- Für alle drei betrachteten ökologischen Aspekte sind die Ergebnisse für die Recyclingpapierherstellung am günstigsten.
- Der fossile und gesamte Primärenergiebedarf der Recyclingpapierherstellung ist deutlich geringer als bei der Primärpapierherstellung.
- Das Ergebnis des Gesamtenergiebedarfs zeigt, dass der Prozess der Zellstoffherstellung aus Holz wegen des aufwendigeren Kochvorganges deutlich energieintensiver ist als die DIP-Herstellung aus Altpapier.
- Auch ohne Berücksichtigung der Überseetransporte ist der Beitrag zum Sommersmog bei der Recyclingpapierherstellung um rund ein Fünftel geringer als bei der Primärpapierherstellung.

Abbildung 2-4: Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Frischfaser- und Recyclingpapieren am Beispiel des fossilen Primärenergiebedarfs, des primären Gesamtenergiebedarfs und des Sommersmogs

2.4.4 Gesundheitliche Wirkung – Feinstaub

Feinstaubemissionen der Papierherstellung

Die Feinstaubemissionen aus der Herstellung von Papier aus Sekundärfasern liegen gemäß der Abbildung deutlich unter denen aus der gesamten Prozesskette der Herstellung von Papier aus Sulfatzellstoff. Dies ist im Wesentlichen auf den niedrigeren Energiebedarf und den geringeren Transportaufwand der Recyclingpapierherstellung zurückzuführen.



Ergebnisse im Überblick:

- Die Belastung durch die PM10-Äquivalente der Recyclingpapierherstellung ist deutlich niedriger als die bei der Frischfaserpapierherstellung.

Abbildung 2-5: Ergebnisse des ökologischen Vergleichs von Frischfaser- und Recyclingpapieren in den Umweltindikatoren PM10-Äquivalente (Feinstaub)

2.5 Umrechnungsbeispiele aus der Praxis

Dass sich die Verwendung von Recyclingpapier anstelle von Frischfaserpapier selbst bei haushaltsüblichen Mengen sichtbar lohnt, verdeutlichen folgende Vergleiche:

Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 zeigen anhand verschiedener Beispiele die eingesparten Emissionen, die sich aus einer Recyclingpapierproduktion im Vergleich zu einer Frischfaserpapierproduktion ergeben bzw. – je nach Bezugsgröße – ergäben. Beispielhaft werden die Unterschiede auf ein Paket Kopierpapier (500 Blatt à 80 g), eine Tonne Kopierpapier (entspricht 400 Paketen à 500 Blatt) oder den gesamten Büropapierbedarf in Deutschland (ca. 800.000 t) bezogen.

So erspart die Herstellung von nur einem Paket Recyclingpapier im Vergleich zum Frischfaserpapier südlicher Herkunft so viele fossile Ressourcen, dass damit eine 100-W-Glühlampe 44 Stunden lang zum Leuchten gebracht werden könnte.

Eine Tonne Recyclingpapier spart im Vergleich zum Frischfaserpapier aus nordischem Zellstoff die Menge an CO₂ ein, die ein durchschnittliches Auto auf rund 1000 km ausstößt.

Würde das gesamte in Deutschland eingesetzte Kopierpapier (800.000 t pro Jahr) aus Altpapier hergestellt werden, so wäre der Prozesswasserbedarf um rund 25,4 Mio. Kubikmeter geringer als bei der Produktion der gleichen Menge Frischfaserpapier – das entspricht der Wassermenge, die zum Beispiel die Wuppertalsperre fasst.

Vergleich von Frischfaserpapier aus nordischem Zellstoff mit Recyclingpapier	Ressourcen [kg Rohöl-Äquivalente]	Treibhauseffekt [kg CO ₂ -Äquivalente]	Prozesswasser [kg]
Bezogen auf ein Paket Kopierpapier (500 Blatt)			
	0,08	0,5	80
Bezogen auf 1 t Papier (400 Pakete à 500 Blatt)			
	33	183	31.800
Bezogen auf 800.000 t Büropapier (durchschnittlicher Jahresverbrauch in Deutschland)			
	26.500.000	146.000.000	25.400.000.000

Tabelle 2-1: Ersparnis der Emissionen bei der Produktion von Recyclingpapier im Vergleich zur Produktion von Frischfaserpapier aus Zellstoff nordischer Herkunft

Vergleich von Frischfaserpapier aus südlichem Zellstoff mit Recyclingpapier	Ressourcen [kg Rohöl-Äquivalente]	Treibhauseffekt [kg CO ₂ -Äquivalente]	Prozesswasser [kg]
Bezogen auf ein Paket Kopierpapier (500 Blatt)			
	0,21	0,9	80
Bezogen auf 1 t Papier (400 Pakete à 500 Blatt)			
	82	347	31.800
Bezogen auf 800.000 t Büropapier (durchschnittlicher Jahresverbrauch in Deutschland)			
	65.900.000	278.000.000	25.400.000.000

Tabelle 2-2: Ersparnis der Emissionen bei der Produktion von Recyclingpapier im Vergleich zur Produktion von Frischfaserpapier aus Zellstoff südlicher Herkunft

3 Fazit

In der vorliegenden Studie wurde das ökologische Profil von in Deutschland hergestelltem Büropapier aus Sekundärfasern mit solchem aus Primärfasern verglichen. Bei den Primärfasern wurde davon ausgegangen, dass es sich um Sulfatzellstoff nordischer Herkunft handelt, der als Marktzellstoff nach Deutschland transportiert wird. Als Szenarienvariante des Primärfaserpapiers wurde der Zellstofftransport aus Übersee bilanziert.

Die gewählten Szenarien repräsentieren nicht ein bestimmtes Werk oder ein konkretes Papierprodukt. Vielmehr bilden sie die mittlere Situation der nordischen Herstellung von Marktzellstoffen und der deutschen Herstellung von Deinking Pulp bestmöglich ab. Die verwendeten Daten geben den aktuellen Sachstand wieder, soweit dieser anhand öffentlich zugänglicher Quellen recherchiert werden konnte.

Für die Bewertung der ökologischen Profile der verglichenen Papiere erwiesen sich die Indikatoren *fossiler Ressourcenbedarf*, *Treibhauseffekt*, *Versauerung*, *aquatische Eutrophierung*, *Wasserbedarf* und *CSB* als die belastbarsten und aussagekräftigsten.

Für alle betrachteten Indikatoren sind die Umweltlasten bei der Recyclingpapierherstellung am niedrigsten. Der Empfehlung des Umweltbundesamtes zur Verwendung von Recyclingpapier sowie Papieren mit einem möglichst hohen Altpapieranteil sollte man nach Auffassung des IFEU daher auch weiterhin folgen.

Besonders gilt dies, wenn bei der Herstellung von Frischfaserpapier hohe Transportentfernungen zurückgelegt werden. So sollte aus ökologischen Gründen auf Zellstoffe aus Übersee verzichtet werden und Altpapier zur Produktion von Recyclingpapier aus regionaler Sammlung stammen.

4 Quellenverweise

[Bos 1999] **Das Papierbuch**: Handbuch der Papierherstellung. HG: ECA Pulp & Paper b.v., Houten 1999

[BREF Zellstoff 2001] **Integrated Pollution Prevention and Control (IPCC)**. Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry. European Commission, December 2001. Download: <http://eippcb.jrc.es>

[Ecoinvent 2003] **Life Cycle Inventories of Packagings and Graphical Papers**. Hischer, R: Ecoinvent Report No. 11. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf 2005

[Ecoinvent 2005] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. **Ecoinvent** v.1.2, Lausanne 2005

[IFEU 1998] **Ökologischer Vergleich graphischer Papiere**. Im Auftrag des Umweltbundesamts, Berlin; FKZ 10350120. Erstellt von der Projektgemeinschaft: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu), Büro für angewandte Waldökologie (BaWÖ) Duvensee, Hamburger Institut für Umweltinformatik (IFU), Institut für Umweltschutz (INFU) der Universität Dortmund und Dr. Rainer Stern aus Freiburg, Berlin 1998

[STP 2006] **Persönliche Informationen der Steinbeis Temming Papier GmbH & Co.** Stadtstraße 2-14, D-25348 Glückstadt. Ansprechpartner: Herr Volker Gehr, 2006

[Trauth 1997] **Umweltbelastungen im Detail**. Tabellarische Zusammenstellung zum Vergleich der Umweltbelastungen bei der Herstellung von Primär- und Sekundärfaserpapier von Jupp Trauth, Forum Ökologie & Papier. 1997

[UBA 2000] **Hintergrundpapier: Ökobilanzen für graphische Papiere**. Berlin, August 2000. Download: www.umweltbundesamt.de

[Umberto 2005]: ifeu – Institut für Umweltinformatik, Hamburg, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg: Umberto v.5. Hamburg/Heidelberg 2005

Umwelterklärungen aus der papiererzeugenden Industrie

[Lang Papier 2004] Myllykoski Continental, Lang Papier. **Umwelterklärung 2004**. Ettringen 2004. <http://www.myllykoski.com>

[LEIPA 2005] Leipa Georg Leinfelder GmbH: **Umweltbericht 2005**, Standort Schwedt. <http://www.leipa.de>

[StoraEnso Eilenburg 2004] Stora Enso Sachsen GmbH, Eilenburg. **Vereinfachte Umwelterklärung 2004**. <http://www.storaenso.com>

[STUA Köln 2004] Staatliches Umweltamt Köln, Dezernat 21 – Anlagenzulassung: **Rheinpapier**, Hürth, Köln April 2004 <http://www.stua-k.nrw.de/abt2/dez21/dez21papierfabrik.htm>

[UPM Augsburg 2005]] UPM-Kymmene Papier GmbH & Co. KG, Werk Augsburg. **Umwelterklärung 2005**. <http://w3.upm-kymmene.com>

[UPM Schongau 2005] UPM-Kymmene Papier GmbH & Co. KG, Werk Schongau. **Umwelt-
erklärung 2005**. <http://www2.upm-kymmene.com>

[UPM Schwedt 2005] UPM-Kymmene Papier GmbH & Co. KG, Werk Schwedt. **Umwel-
klärung 2005**. <http://w3.upm-kymmene.com>

Anhang I: Ergebnisse (numerisch)

Übersicht zu den kalkulatorischen Ergebnissen der untersuchten Szenarien

Fossile Ressourcen [kg Rohöl-Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	17,8	17,8	18,3
Zellstoff/DIP	74,8	77,8	50,4
Transport Zellstoff	9,2	55,5	–
Papier	109,7	109,7	109,7
Summe	211,5	260,8	178,4

Treibhauseffekt [kg CO₂-Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	57	57	60
Zellstoff/DIP	481	500	329
Transport Zellstoff	34	179	–
Papier	543	543	543
Summe	1.116	1.280	933

Versauerung [kg SO₂-Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0,55	0,55	0,45
Zellstoff/DIP	3,43	3,47	0,57
Transport Zellstoff	0,80	6,26	–
Papier	1,56	1,56	1,56
Summe	6,35	11,83	2,57

Aquatische Eutrophierung [PO₄-Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0,000	0,000	0,000
Zellstoff/DIP	0,461	0,461	0,071
Transport Zellstoff	–	–	–
Papier	0,280	0,280	0,280
Summe	0,741	0,741	0,352

CSB [kg/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0,00	0,00	0,00
Zellstoff/DIP	15,01	15,01	2,09
Transport Zellstoff	–	–	–
Papier	2,44	2,44	2,44
Summe	17,45	17,45	4,53

Prozesswasser [kg/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0	0	1
Zellstoff/DIP	37179	37179	5408
Transport Zellstoff	–	–	–
Papier	15055	15055	15055
Summe	52234	52234	20463

Fossiler Energiebedarf (primär) [kJ/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	730.486	730.486	774.053
Zellstoff/DIP	5.507.890	5.768.549	4.221.246
Transport Zellstoff	419.278	2.269.836	0
Papier	7.956.721	7.956.721	7.956.721
Summe	14.614.374	16.725.591	12.952.019

Gesamtenergiebedarf (primär) [kJ/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	803.563	803.563	807.501
Zellstoff/DIP	28.365.846	28.708.851	5.352.290
Transport Zellstoff	463.494	2.314.052	0
Papier	8.975.756	8.975.756	8.975.756
Summe	38.608.659	40.802.221	15.135.547

Sommersmog [kg Ethen-Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0,031	0,031	0,038
Zellstoff/DIP	0,050	0,051	0,029
Transport Zellstoff	0,020	0,137	0,000
Papier	0,070	0,070	0,070
Summe	0,171	0,290	0,138

Gesundheitliche Wirkung (Feinstaub) [kg PM10 Äquivalente/t Papier]	1 Primär Nord	2 Primär Süd	3 Sekundär D
Holz/Altpapier	0,62	0,62	0,57
Zellstoff/DIP	3,35	3,38	0,54
Transport Zellstoff	0,73	5,51	0,00
Papier	1,35	1,35	1,35
Summe	6,037	10,856	2,453

Anhang II: Datengrundlagen

Im Folgenden sind die wesentlichen Rechenwerte zur Modellierung der Herstellung von Sulfatzellstoff, DIP und Büropapier dargestellt.

Sulfatzellstoff

Herstellung von Primärzellstoff nordischer und südlicher Herkunft

Input je 1000 kg Markt-Sulfatzellstoff		
Datenbasis: Ecoinvent		
Holz/Prozesswasser	Koeffizient	Einheit
Nadelholz	911	kg
Hartholz	909	kg
Sägerestholz (lufttrocken)	390	kg
Wasser (Prozess)	38.000	kg
Chemikalien	Koeffizient	Einheit
Calciumoxid	8,4	kg
Sauerstoff	23,7	kg
Schwefelsäure	30,1	kg
Schwefeldioxid	2	kg
Natriumchlorat	30,8	kg
Natriumhydroxid	35,6	kg
Wasserstoffperoxid	5,4	kg
Calciumcarbonat	1	kg
Methanol	2,7	kg
Magnesiumsulfat	3,6	kg
Talkum	2,2	kg
Energie	Koeffizient	Einheit
Energie, elektrisch	0	kJ
Steinkohle	8,69	kg
Erdgas	24,1	kg
Heizöl, schwer	17,56	kg

Tabelle A-1: Berechnungsgrundlagen zur Sulfatzellstoffherstellung – Inputdaten

Output je 1000 kg Markt-Sulfatzellstoff			
Datenbasis: Ecoinvent			Abweichende Datenquelle
Abwasser	Koeffizient	Einheit	
Abwasser (Prozess)	37.000	kg	
BSB-5	0,9	kg	BREF
CSB	15,5	kg	BREF
Feststoffe, gelöst	1,05	kg	BREF
Phosphorverbindungen als Phosphor	0,02	kg	BREF
Stickstoffverbindungen als Stickstoff	0,175	kg	BREF
AOX	0,19	kg	
Abluft	Koeffizient	Einheit	
Schwefeldioxid	0,83	kg	
TRS	0,19	kg	
Stickstoffoxide, unspezifisch	1,85	kg	
Staub	0,05	kg	
Kohlendioxid, fossil	168,87	kg	
Staub (PM10)	0,4	kg	
Abfall	Koeffizient	Einheit	
Aschen u. Schlacken (AzB)	5,1	kg	
Sondermüll (AzB)	0,26	kg	
Schlämme (AzB)	8,1	kg	
Abfälle, unspezifiziert (AzB)	8,1	kg	
Grünlauge (AzB)	4,5	kg	

Tabelle A-2: Berechnungsgrundlagen zur Sulfatzellstoffherstellung – Outputdaten

Mahlung	
Datenbasis: Steinbeis Temming	
Energie, elektrisch	900.000 kJ/t Zellstoff (Nord)
	1.080.000 kJ/t Zellstoff (Brasilien)*
Energiesplit wie Papierherstellung	

Tabelle A-3: Berechnungsgrundlagen zur Sulfatzellstoffherstellung – Energiebedarf zur Zellstoffmahlung

* Basierend auf [Bos 1999] in Abstimmung mit Erfahrungswerten von [STP 2006]

Deinking Pulp

Herstellung von Sekundärzellstoff in Deutschland

Input je 1000 kg DIP (TS90)		
Datenbasis: STP		
Rohstoff/Wasser	Koeffizient	Einheit
Altpapier, sortiert (AzV)	1.379	kg
Wasser (Prozess)	5.400	kg
Chemikalien	Koeffizient	Einheit
Wasserstoffperoxid	9	kg
NaOH	8,5	kg
Fettsäuren	9	kg
Wasserglas	18	kg
Natriumdithionit	3	kg
Energie	Koeffizient	Einheit
Energie, elektrisch	2.070.000	kJ
Output DIP-Herstellung		
Abwasser	Koeffizient	Einheit
Abwasser (Prozess)	5.400	kg
CSB	2,16	kg
BSB-5	0,135	kg
AOX	0,0162	kg
Phosphorverbindungen als Phosphor	0,004	kg
Stickstoffverbindungen als Stickstoff	0,029	kg
Luftemissionen	Koeffizient	Einheit
Staub	0,01	kg

Tabelle A-4: Berechnungsgrundlagen zur DIP-Herstellung – Input- und Outputdaten

Überschlägige Analyse der eingesetzten Energieträger bei der DIP-Produktion

Bezugsjahr	2005	2005	2005	2004	2004	? (Genehmigung)	2005	2005
Betreiber	UPM	UPM	UPM	Stora Enso	Myllykoski	Myllykoski	Leipa	STP
Standort	Schongau	Augsburg	Schwedt	Eilenburg	Ettringen	Hürth	Schwedt	
Altpapiereinsatz [t/a]	678.300	185.900	363.200	484.977	574.466	355.600	606.518	180.000
Holz?	Holz, Zellstoff, Pigmente	Holz, Zellstoff, Pigmente	Nein	Nein	Holz + Zellstoff	Nein	Nein	
produzierte Menge (Papier, DIP etc.) [t/a]	712.600	457.300	286.300	381.099	571.542	280.000	680.392	230.000
Gesamt Dampfbedarf				841 kWh/t				5,8 GJ/t
Gesamt Strombedarf				588 kWh/t				1000 kWh/t
Strom (Fremdstrom) [MWh]	609.100	516.800	212.100	101.223	627.000	348.000	578.287	
Dampf						617700 t	818824 MWh	
Erdgas [MWh]	958.100	751.700	172.100	879.410	437.000		83886317 m ³	
Biogas							2754522 m ³	
Heizöl, leicht [MWh]		690	840		409.000			
Regenerative Energieträger ohne Reststoffe	151.072		210.180					
Reststoffe	321.028		140.120					20 %
Ersatzbrennstoffe [MWh]				8.396				
Wasserkraft [MWh]	61.900							
Treibstoffe [MWh]	2.290	3.160	2.900					
Steinkohle								80 %
Braunkohle						Strom- und Dampf- bereitstellung		

Tabelle A-5: Berechnungsgrundlagen zur DIP-Herstellung – Energieträgereinsatz verschiedener DIP-Produzenten in Deutschland

Angesetzter Mix der Energieträger zur DIP-Produktion

Energiesplit, elektrisch DIP	
Mix-Deutschland für DIP	Anteil
Netzstrom	50 %
Erdgas	32,5 %
Heizöl leicht + schwer	2,5 %
Reststoffe + Regenerative Energieträger	10 %
Steinkohle	2,5 %
Braunkohle	2,5 %

Tabelle A-6: Berechnungsgrundlagen zur DIP-Herstellung

Der Energieträger-Mix für die DIP-Herstellung in Deutschland wurde über die Betrachtung der größten DIP-Hersteller überschlägig abgeleitet. Die Daten dienen als Berechnungsgrundlage der vorliegenden Untersuchung.

Basis: UPM Augsburg, UPM Schongau, UPM Schwedt, StoraEnso Eilenburg, Myllykoski Ettringen, Rheinpapier Hürth, Leipa Schwedt, STP (siehe Tabelle oben). Netzstromanteil wurde aus Datengrundlage zu UBA/Graphische Papiere abgeleitet.

Papierherstellung aus Primär- und Sekundärfasern

Input je 1000 kg Papier		
Datengrundlage: UBA, Recycling-Kopierpapier		
Material	Koeffizient	Einheit
DIP (TS90)/Marktzellstoff	968	kg
Bindemittel, synthetisch	18,9	kg
Kaolin (TS90)	130	kg
Stärke	56	kg
Hilfsstoffe (Papierproduktion)	6,23	kg
Wasser (Prozess)	14.800	kg
Energie	Koeffizient	Einheit
Energie, elektrisch	1.803.600	kJ
Energie, thermisch	5.800.000	kJ
Output je 1000 kg Papier		
Material	Koeffizient	Einheit
Papier	1.000	kg
Abwasser (Prozess)	14.800	kg
CSB	2,44	kg
BSB-5	0,1525	kg
AOX	0,0183	kg
Phosphorverbindungen als Phosphor	0,0061	kg
Stickstoffverbindungen als Stickstoff	0,127	kg

Tabelle A-7: Berechnungsgrundlagen zur Papierherstellung – Input- und Outputdaten

Energiesplit, elektrisch	
Datengrundlage: UBA	
	Anteil
Netzstrom	45 %
HKW, Gas	27,5 %
HKW Reststoffe	27,5 %

Tabelle A-8: Berechnungsgrundlagen zur Papierherstellung – Strombereitstellung

Energiesplit, thermisch	
Datengrundlage: Abschätzung IFEU *	Anteil
Erdgas	65 %
Heizöl leicht + schwer	5 %
Regenerative Energieträger + Reststoffe	20 %
Steinkohle	5 %
Braunkohle	5 %

Tabelle A-9: Berechnungsgrundlagen zur Papierherstellung – Bereitstellung thermischer Energie

* Der Energiesplit für thermische Energie wurde über die Betrachtung der größten DIP-Hersteller überschlägig abgeleitet. Basis: UPM Augsburg, UPM Schongau, UPM Schwedt, StoraEnso Eilenburg, Millkoski Ettringen, Rheinpapier Hürth, Leipa Schwedt, STP (siehe Tabelle oben).

Transporte von Zellstoff/DIP

Transporte	
Modell 1 – Zellstoff nordischer Herkunft	Kombinierter Transport von Zellstoff aus Skandinavien
Modell 2 – Zellstoff südlicher Herkunft	Überseetransport von Zellstoff aus Brasilien
Modell 3 – DIP, Deutschland	Kein Transport

Tabelle A-10: Berechnungsgrundlagen zur Papierherstellung – Zellstofftransporte