

INFOR-Projekt Nr. 162 R

Produkt-Designentwicklung eines Verpackungspapiers unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Nachhaltigkeitskriterien

Schlussbericht

Januar 2014

Papiertechnische Stiftung – PTS –
Heidenau und München

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Papierfabrikation und
Mechanische Verfahrenstechnik

Dr. Frank Miletzky

Projektleiter:
Dr.-Ing. Johannes Kappen

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Projektleiter:
Dr.-Ing. Hans-Joachim Putz

INFOR-Projekt 162 R:

„Produkt-Designentwicklung eines Verpackungspapiers unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Nachhaltigkeitskriterien“

Januar 2014

Papiertechnische Stiftung (PTS) / Heidenau und München

Dr.-Ing. Johannes Kappen (Projektleitung), Dr.-Ing. Christina Dornack, Dr. Gert Meinel, Dr. Günter Müller

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) / TU Darmstadt

Dr.-Ing. Hans-Joachim Putz, M. Sc. Henri Kröling

Projektbegleiter:

Volker Schuberth (Palm; Projektsprecher), Martin Mühlhauser (MM-Karton), Thomas Müller (PK Varel), Marcel Marten (Panther)

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangssituation	5
3	Projektziele	7
4	Material und Methoden	8
4.1	Labor und Pilotversuche	8
4.2	Modellierung	13
4.3	Bewertung der Nachhaltigkeit anhand ausgewählter Parameter	17
4.4	Prinzipien bei der Erstellung neuer Kaskaden	23
5	Ergebnisse Teil 1 – Produktdesign	26
5.1	Bewertung der erzielten Fraktionen	26
5.2	Schlussfolgerungen und Vorschlag geeigneter neue Produktdesigns	31
5.3	Nachhaltigkeitsbewertung der Produkte	33
5.4	Schlussfolgerungen aus der Nachhaltigkeitsbewertung	38
6	Ergebnisse Teil 2 – Faserkaskaden	39
6.1	Darstellung des Portfolios der deutschen Papierindustrie 2012	39
6.2	Bewertung mögliche neuer Faserkaskaden	42
6.3	Schlussfolgerungen - Gesamtbewertung der Kaskaden	52
7	Anhang	53
7.1	Laboranweisung	53
7.2	Berechnung Effizienzfaktor	54
7.3	Papiereigenschaften McNett-Fraktionierung	54
7.4	Papiereigenschaften Technikumsfraktionierung	57
7.5	Faserstoffkaskaden	59
8	Literatur	61

1 Zusammenfassung

Produktdesign stellt, so die zentrale These die bereits im Vorgängerprojekt 143 R verfolgt wurde, einen der wichtigsten Hebel zur Verbesserung der Ressourceneffizienz bei der Erzeugung von Papierprodukten dar. Voraussetzungen für die Hebung des vorhandenen Potenzials sind einerseits Gestaltungsprinzipien und andererseits geeignete Bewertungsmethoden für ressourceneffiziente Papierprodukte.

Im ersten Teil dieses Projektes sollte gezeigt werden, dass die Ausschleusung einer Fraktion aus dem Papiererzeugungsprozess und damit auch aus dem erzeugten Produkt tatsächlich die bereits im Projekt 143 R ermittelten Nutzen einer Energie- und Faserstoffeinsparung ermöglicht. Ziel war die Ausschleusung der Mittelfraktion (R100 und R200). Das angestrebte Ziel konnte nicht erreicht werden. Die gegenüber dem Projekt 143 R veränderten und umfangreicheren Untersuchungen zeigten, dass diese Fraktion wesentlich für den Erhalt der Festigkeitseigenschaften ist.

Dennoch konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die den weiteren Weg für eine ressourcenschonende Gestaltung von Papierprodukten aufzeigen.

Wichtige Teilergebnisse des ersten Projektteils sind:

Bewertung der Fraktionen:

- Die Nutzung der Kreislaufwasserblattbildung ist entscheidend für einen praxisrelevanten Blattaufbau. Dadurch können Auswaschungen vermieden werden, die sonst zu unrealistisch hohen Festigkeitswerten der gebildeten Blätter führen. Auf Hinweis der Projektbegleiter kann dies in der Praxis hilfsweise auch durch Blattbildung mit Prozesswasser erfolgen.
- Erstmals gelang es systematisch verschiedene Faserfraktionen miteinander zu mischen und die Festigkeiten und weitere Eigenschaften der daraus erzeugten Blätter zu ermitteln. Als besonders günstig hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften erwies sich eine Mischung mit möglichst geringem Anteil (20 %) an D200.
- Statt der Mittelfraktion wird daher jetzt erneut, der klassischen Auffassung folgend, auf die Asche als hinderlich für die Entwicklung der Festigkeitseigenschaften verwiesen.
- Zusätzlich konnte ein praxisnahes Verfahren zur Erzeugung verschiedener Faserfraktionen („Technikumsversuche“) erarbeitet werden, mit dem ausreichende Mengen an Altpapierstoff für die beschriebenen Mischversuche gewonnen werden können.

Produktdesign und Nachhaltigkeit

- Mit einem lagigen Produktaufbau konnte eine Flächengewichtsreduzierung bei gleichbleibenden Festigkeitseigenschaften erzielt werden. Die mit den vorgeschlagenen Designs erreichten Einsparungen sind jedoch ggü. dem Projekt 143 R deutlich geringer.
- Es wurden Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit vorgeschlagen. Ein Tool zur vereinfachten Bewertung der Nachhaltigkeit wurde entwickelt und auf die vorgeschlagenen Designs angewandt. Eine Verbesserung der Nachhaltigkeit konnte erzielt werden.

Im zweiten Teil des Projektes konnten erfolgreich Faserkaskaden ermittelt werden, die den heutigen Einsatz von Frischfasern fast ausschließlich in grafischen Papieren grundlegend in Frage stellen. Für einen Einsatz von Primärfaserstoffen insbesondere im Bereich der Verpackungspapiere ergeben sich für diese wesentliche Festigkeitsgewinne, ohne Einschränkungen in anderen Sorten. Sie eröffnet die Möglichkeit der Herstellung leichter Verpackungen und macht Verpackungspapiere unabhängig von den durch den Einsatz von grafischen Altpapieren bedingten Zwängen (Mineralöl, zurückgehende Bereitstellung grafischer Altpapiere). Diesen Chancen stehen allerdings Risiken in Gestalt noch zu lösender technologischer Probleme gegenüber (getrennte Erfassung bzw. Trockensortierung holzfreier Verpackungen, Bleiche brauner Verpackungspapiere). Auch eine Trennung der Teilkreisläufe mit einem deutlich höheren Einsatz an Frischfasern bei der Produktion von Verpackungspapieren könnte sich unter diesen Gesichtspunkten als vorteilhaft erweisen.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen insgesamt einen Weg zu einer deutlich umfassenderen Bewertung von Produktdesigns in der Papiererzeugung auf. Neben der Bewertung des Aufbaus des Produktes und der Bewertung der unterschiedlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit des Produktes hat, aufgrund der Verzahnung der Produkte miteinander im Altpapier-Neupapierkreislauf, die Wahl der Rohstoffe bekanntermaßen auch immer einen Einfluss auf die jeweils anderen Sortenbereiche.

Bereits im Projekt 143 R konnte gezeigt werden, dass die geringfügige Ausschleusung einer als störend erkannten Fraktion, gemeinsam durch alle Erzeuger, einen wesentlichen höheren Effekt im Vergleich mit der Maßnahme eines einzelnen Erzeugers hat. Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes machen zusätzlich deutlich, dass konzeptionelle Entscheidungen zur Gestaltung von Produkten in einem Sortenbereich ebenso wie die Frage der Verteilung des Frischfasereinsatzes zwischen den Sortenbereichen entscheidenden Einfluss auf das erzielbare Gesamtergebnis der Industrie haben.

Es wird empfohlen, diese Ergebnisse als Anstoß einer Diskussion über die brancheninternen Verfahrensweisen zu nutzen. Werden Faserkaskaden gesamthaft betrachtet, lassen sich neue Paradigmen entwickeln, die die gesamte Papierwirtschaft im Sinne der Nachhaltigkeit voranbringen kann. Diese alternativen Verfahrensweisen sollten in der Industrie und ihren Gremien diskutiert und vertieft auf ihre Umsetzbarkeit hin überprüft werden. Darüber hinaus sollte weiter und verstärkt an neuen Verfahren zur selektiven Abtrennung von Asche geforscht werden.

2 Ausgangssituation

Im Rahmen des Projektes INFOR 143 R konnten erstmals Designprinzipien für eine ressourcenschonende Produktgestaltung erarbeitet werden. Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Produktdesign und Recycling sowie den sehr begrenzt zur Verfügung stehenden experimentellen Basisergebnissen ist eine Weiterentwicklung erforderlich, um konkrete Empfehlungen für die Gestaltung eines ressourcenschonenden mehrlagigen Verpackungspapiers ableiten zu können.

Die im Rahmen des Projektes INFOR 143 R erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- o Es gelang, einen Altpapierstoff in die Fraktionen Langfaser / Mittelfaser / Feinstoff zu zerlegen und eine Fraktion, die Mittelfaser, als Fraktion mit geringem Gebrauchswert zu identifizieren.
- o Es wurden neue Rezepturen definiert. Diese bauen auf die Reduzierung des Anteils der Mittelfaser im Blattaufbau auf. Die Flächengewichte konnten so reduziert werden, ohne an Festigkeit zu verlieren. Die Folge ist ein geringerer Materialeinsatz im produzierten Produkt. Damit war die Basis zur Erhöhung der Ressourceneffizienz durch verbessertes Produktdesign in greifbare Nähe gerückt.
- o Gleichzeitig mit der Reduzierung der Mittelfaser im Papierprodukt wird die Ausschleusung der Mittelfraktion aus der Papiererzeugung und damit aus dem Recyclingkreislauf erforderlich. Verschiedene Optionen zur wertschöpfenden Nutzung dieser Fraktion wurden bewertet. Nur wenn eine Nutzung der Mittelfaser gewährleistet ist kann ein solches Produktkonzept auch wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden.
- o Eine modellhafte Abbildung der Stoffkreisläufe konnte erarbeitet werden. Das Modell bilanziert die unterschiedlichen Faserfraktionen und berechnet die resultierenden Papiereigenschaften.
- o Damit gelang erstmals die Koppelung eines Modells zur Abbildung der Altpapier-Neupapier-Stoffkreisläufe mit einem Modell zur Ermittlung der Produkteigenschaften des wiederverwendeten Faserstoffs. Damit lassen sich quantitativ Änderungen in der nationalen Faserbilanz auf die Eigenschaften von Papieren und vice versa der Einfluss von Änderungen der Produktgestaltung in den Papierfabriken auf die nationale Faserbilanz bestimmen.
- o In das Modell konnte ein neu entwickeltes Teilmodell integriert werden mit dem die Festigkeitseigenschaften mehrlagiger Papiere berechnet werden können.
- o Eine wesentliche Hypothese neben dem geringen Beitrag der Mittelfaser zur Festigkeit, war die Hypothese, dass diese Faser einen besonders hohen Energieaufwand in der Trocknung verursacht. Diese Eigenschaft der Mittelfaser konnte bestätigt werden. Durch einen Modellansatz des sog. „Energiereucksacks“ zur Bewertung der durchschnittlichen Blattbildungsenergie konnte der unterschiedliche Einfluss der Fraktionen auf die erforderliche Trocknungsenergie abgebildet werden.
- o Es erfolgte eine überschlägige Ermittlung des Nutzens der Ausschleusung einer Mittelfaserfraktion: Die Ausschleusung von nur 4 % Fasermaterial in jeder

der Papiererzeugungsanlagen ermöglicht eine 11 %-ige Flächengewichtsreduzierung bei vergleichbaren Produkteigenschaften und gleichzeitig eine 15 %-ige Energieeinsparung bei der Trocknung.

- o Damit wurde deutlich, dass durch eine konzertierte Veränderung der Ausschleusung von Material (4 %) ein weit über den singulären Effekt der Ausschleusung in einer einzelnen Papierfabrik hinausgehender Nutzen (11 %) erzielt werden kann.

Der eingeschlagene Weg eröffnet gute Ansatzpunkte mit differenzierteren Altpapierrezepturen mehrlagige Papiere zu erzeugen und dabei sowohl Altpapierstoff als auch Energie einzusparen. Die maximal mögliche Wertschöpfung aus den zur Verfügung stehenden Altpapierfraktionen kann damit erreicht werden.

Diese sehr positiv stimmenden ersten Ergebnisse waren technologisch mit weiteren Altpapierproben zu verifizieren. Insbesondere waren der geringe Gebrauchswert der Mittelfaser, deren auszuschleusender Massenanteil und die möglichen Energieeinsparpotenziale zu bestätigen.

Ein weiterer offener Punkt, der im Rahmen des Projektes 143 R nicht bearbeitet werden konnte, war der Nachweis der Nachhaltigkeit dieses neuen, ressourcenschonenden Produktkonzeptes.

3 Projektziele

Ziel des Projektes ist es, die technologischen Ergebnisse des Vorläuferprojektes 143 R hinsichtlich der Energie- und Faserstoffeinsparung zu verifizieren. Allgemein gültige Designprinzipien für ein ressourcenschonendes Verpackungspapier sollen erarbeitet werden. Dazu soll ein Vergleich zwischen einem konventionell hergestellten Verpackungspapier und einem nach dem neu entwickelten Designprinzip hergestellten Verpackungspapier, erfolgen. Es soll eine Nachhaltigkeitskennzahl entwickelt werden, die eine umfassende Bewertung neuer Produktkonzepte unter Berücksichtigung des Recyclings ermöglicht. Die Nachhaltigkeit soll unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter Kriterien (z. B. Faserstoffe, Wasser, Energie, Reststoffverwertung, Kompostierbarkeit, biologische Abbaubarkeit, Chemikalieneinsatz, Food Safety Emissionen, Carbon Footprint, Label & Zertifikate) bewertet werden. Die Bewertung der Nachhaltigkeit soll praktisch angewandt werden.

Im zweiten Teil des Projektes wird mit Hilfe des „Energierucksacks“ der Energiebedarf des Produktportfolios der deutschen Papierindustrie abgebildet. Darauf basierend werden verschiedene Szenarien betrachtet, um die Möglichkeiten einer insgesamt noch nachhaltigeren Papierherstellung in Deutschland durch eine optimierte Kaskadennutzung des Fasermaterials zu bewerten. Folgende gesamtökologisch zu betrachtende Fragestellungen sind dabei z. Zt. von Interesse:

- Für welche Papierproduktgruppen sollten Frischfasern eingesetzt werden?
- Welche Papierproduktgruppen sollten Reststoffe bzw. Faser-Teilfraktionen bei der Altpapieraufbereitung in optimaler Weise gezielt ausschleusen?
- Wie muss eine optimale Nutzung von Mineralien (Füllstoffen und Pigmenten) aussehen?
- Ist unter Berücksichtigung einer optimierten Nutzungskaskade der Einsatz ungebleichter Faserstoffe sinnvoll?

Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Blattbildungsenergie sollen diese Szenarien Wege einer optimalen Fasernutzungskaskade innerhalb der deutschen Papierindustrie aufzeigen.

In die Bewertung der Nachhaltigkeit sind darüber hinaus die Forderungen der CEPI-Roadmap 2050, u. a. „höchstmögliche Wertschöpfung aus den verfügbaren Ressourcen (Primär- / Sekundärfasern)“ sowie die „Steigerung der Energieeffizienz der Prozesse“ (insgesamt 80 %-ige CO₂-Reduzierung bis 2050), einzubeziehen.

4 Material und Methoden

4.1 Labor und Pilotversuche

In diesem Kapitel werden die experimentellen Methoden zur Fraktionierung, Blattbildung und Papierprüfung skizziert. Eine detaillierte Arbeitsanweisung befindet sich im Anhang.

Probenmaterial – Auswahl und Zusammenstellung der AP Modellmischungen

Die Altpapiersorten 1.02, 1.04 und 4.03 machen ca. 60 % des deutschen Altpapierverbrauchs insgesamt und beinahe den gesamten Altpapierverbrauch für Verpackungspapiere aus [1]. Daher wurde der Einfluss der Entfernung der Mittelfraktion bei diesen drei Sorten untersucht. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wurden diese Altpapiersorten als Modellmischungen aus verschiedenen Papieren zusammengestellt. Die Sorten und Anteile der Papiere wurden gemäß des AiF-Projekts 15408 zusammengestellt. In Tabelle 1 ist die Zusammensetzung der AP Modellmischungen für 1.02, in Tabelle 2 für AP-Sorte 1.04 dargestellt. Für die Sorte 4.03 wurde krafthaltige Wellpappe verwendet.

Tabelle 1: Altpapiermodellmischung der Sorte 1.02

Wichtigste Bestandteile	<i>Durchschnitt berechnet aus AiF 15408 in %</i>	Modellmi- schung in %	Modellpapiersorte
Zeitungen und zeitung-s-ähnliche Beilagen	13	15	Zeitungsdruck
Ungestr. Magazine, Illustrierte, ähnliche Beilagen und Kataloge	7	10	SC Papier
Gestr. Magazine, Illustrierte und ähnliche Beilagen	28	25	LWC
Holzfrei weiße Papiere (auch gestrichen) und Briefumschläge, Versandtaschen (weiß)	9	5	Kopierpapier
Summe grafische Papiere	58	55	
Wellpappe (grau, braun) , Verpackungspapiere	21	25	Wellpappe
Wellpappe (weiß gedeckt)	9	10	Wellpappe weiß gedeckt
Karton (grau)	4	5	Karton
stark farbig bedruckter Karton/Pappe	6	5	Karton
Summe Verpackungspapiere und Karton	42	45	

Tabelle 2: Altpapiermodellmischung der Sorte 1.04

Wichtigste Bestandteile	<i>Durchschnitt berechnet aus AiF15408 in %</i>	Modellmi- schung in %	Modellpapiersorte
Zeitungen und zeitungsfähnliche Beilagen	3	5	Zeitungsdruck
Ungestr. Magazine, Illustrierte, ähnliche Beilagen und Kataloge	2	5	SC Papier
Gestr. Magazine, Illustrierte und ähnliche Beilagen	6	5	LWC
Holzfrei weiße Papiere (auch gestrichen) und Briefumschläge, Versandtaschen (weiß)	7	5	Kopierpapier
Summe grafische Papiere	18	20	
Wellpappe (grau, braun) , Verpackungspapiere	42	45	Wellpappe
Wellpappe (weiß gedeckt)	15	20	Wellpappe weiß gedeckt
Karton (grau/braun/weiß/bedruckt)	14	15	Karton
Summe Verpackungspapiere und Karton	79	80	80

Fraktionierung (Labor)

Um eine die Ergebnisse des INFOR 143 R Projektes zu bestätigen, wurden die Versuche ebenfalls mit einer Fraktionierung durch ein McNett-Verfahren durchgeführt. Im Anschluss an die Fraktionierung wurden die R100 und R200 Fraktionen (zusammenfassend als Mittelfraktion (MF) bezeichnet) gezielt in unterschiedlichem Maße entsprechend dem Versuchsplan entfernt. Die Fraktionen R30 und R50 (Langfaserfraktion (LF)) wurden aufgefangen. Der Feinstoff (FS) D200 wurde mit dem Durchlauf bei der Fraktionierung aufgefangen und zweifach sedimentiert um handhabbare Stoffdichten zu erreichen.

Gemäß dem Versuchsplan (Tabelle 3) wurde der Stoff aus der Langfaserfraktion, der Mittelfraktion und dem Feinstoff in einem Verteilergerät zusammengemischt. Um die Aussagekraft der experimentellen Daten zu verbessern, wurde ein Teil der Versuche an der PTS in Heidenau in gleicher Weise wiederholt (gelb hinterlegt in Tabelle 3).

Tabelle 3: Versuchsplan

MF Anteil	0	33%	50%	66%	100%
4.03	x		x		x
1.02	x	x		x	x
1.04	x	x		x	x

Blattbildung

Da im Rapid-Köthen-Verfahren im Frischwasserbetrieb erhebliche Mengen an Kurzfasern, Füll- und Feinstoffen nicht im Blatt zurückgehalten werden, entspricht die Blattzusammensetzung nicht der Zusammensetzung des Stoffgemisches. Im Gegensatz dazu entspricht in der industriellen Praxis die Papierzusammensetzung weitestgehend der Stoffzusammensetzung. Aufgrund der besseren Übertragbarkeit in die industrielle Praxis wurden im Unterschied zum Vorgängerprojekt deshalb Kreislaufwasserblätter gebildet. Für die Untersuchungen wurden 80 g/m² Blätter gebildet, wobei das Kreislaufwasser mit vier Blättern mit Feinstoff angereichert wurde. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass sich der Aschegehalt nach dem 5. Blatt nicht mehr ändert.

Fraktionierung (Technikum)

Die in Kapitel 5.1 beschriebenen Bedenken führten dazu in einem zweiten Schritt dazu Altpapierstoff im Technikum des PMV im halbertechnischen Maßstab zu fraktionieren. Auf Grund des hohen Aufwands für die Versuche wurde nur die Sorte 1.02 untersucht.

Analog zu den McNett-Versuchen sollten ebenfalls drei Fraktionen (Langfaserfraktion, Mittelfraktion und Feinstoff) erzeugt werden. Für die Fraktionierung wurde der Technikums-Drucksortierer benutzt. Die Abtrennung der Langfaserfraktion erfolgte mit einem 1,3 mm Lochkorb, die Abtrennung des Feinstoffes mit einem 200 µm Lochkorb.

Die Vorgehensweise bei der Fraktionierung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Stoffdichte wurde vor jedem Fraktionierdurchgang mit Frischwasser auf ca. 1 % eingestellt. Aufgrund der begrenzten Eindickraten konnte keine Aufteilung der Fraktionen in je 1/3 der Masse des Ausgangsstoffes (wie bei der McNett-Fraktionierung) erreicht werden. Der Anteil der Langfaserfraktion betrug ca. 30 %, der der Mittelfraktion ca. 40 % und der des Feinstoffes ca. 30 %. Diese Mengenanteile wurden als Ausgangsmaterialzusammensetzung definiert. Die Langfaser- und Mittelfraktion wurden direkt in 50 l Fässer gefüllt, der Feinstoff wurde über drei Tage sedimentiert und dann mit einer Zahnradschleuse vom Boden der Bütte in ein Fass gepumpt. Alle Fässer wurden mit Biozid versetzt und bei 4 °C gekühlt bis zum Versuchsende gelagert. Da sich die Bildung der Blätter über knapp vier Wochen hinzog wurde jeweils zu Beginn, in der Mitte und nach Beendigung der Versuche eine Serie Blätter aus der Ausgangszusammenstellung hergestellt um zu überprüfen, ob ein zeitlicher Einfluss existiert. Eine Veränderung von Papiereigenschaften konnte über den gesamten Zeitraum nicht festgestellt werden.

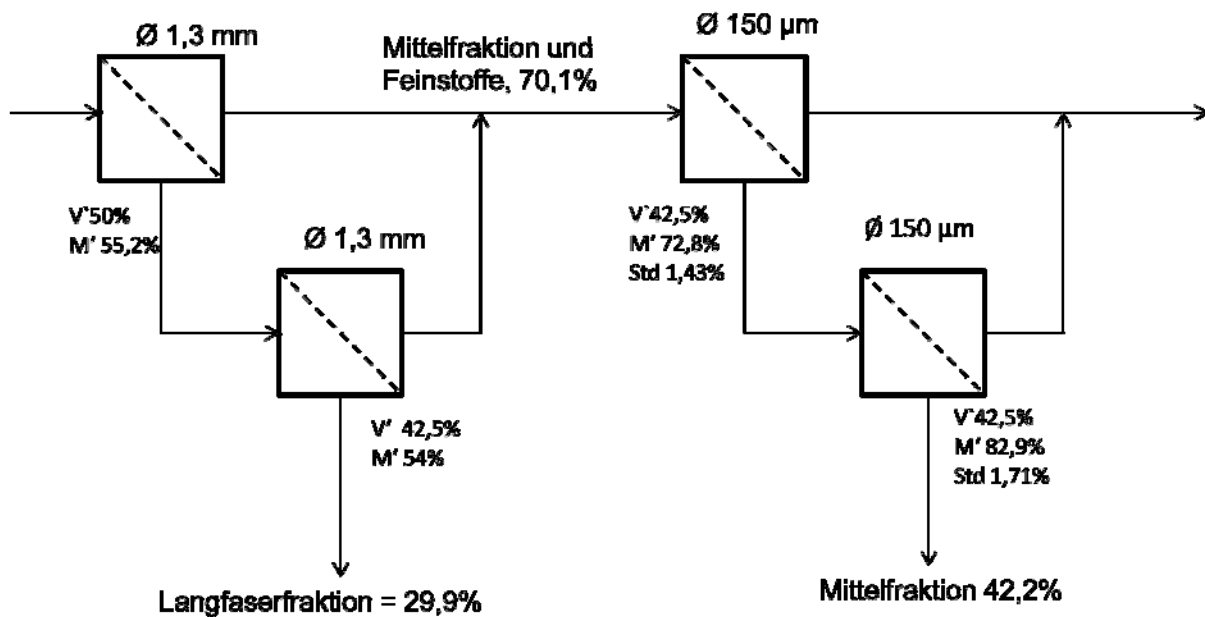


Abbildung 1: Fraktionierung im PMV-Technikum, mit V' =rel. Volumenstrom, M' = rel. Massenstrom

Mit den so erzeugten Ausgangsfraktionen wurden Kreislaufwasserblätter in unterschiedlichen Abmischungen hergestellt. Um bei einer überschaubaren Versuchszahl eine hohe Auflösung zu erreichen, wurde der mögliche Versuchsraum mit folgenden Grundsätzen eingegrenzt:

- Es soll kein Stoff der Langfaserfraktion verworfen werden.
- Es soll nur in geringem Maße Stoff der Feinstofffraktion verworfen werden.

Der erste Spiegelpunkt wurde mit dem erhöhten Festigkeitspotenzial der Langfaserfraktion begründet. Der zweite Spiegelpunkt, dass nur geringfügig bzw. überhaupt kein Feinstoff verworfen wird scheint widersinnig, da dadurch auch der Aschegehalt des Stoffes ansteigt. In vorigen Untersuchungen zeigten sich jedoch deutliche Festigkeitseinbußen, wenn die D200 Fraktion eines Stoffes entfernt wurde. Weiterhin macht der hohe Ascheanteil des Feinstoffes eine innovative stoffliche (z. B. Nanocellulose) oder thermische Verwertung schwierig. Aus diesen Überlegungen entstand der in Tabelle 4 gezeigte Versuchsplan. Der Versuchsplan ist wie folgt aufgebaut: Nach rechts erhöht sich der Anteil des Feinstoffes, nach unten der Anteil der Langfaserfraktion. Aus diesen Anteilen ergibt sich der Anteil der Mittelfraktion, der in der entsprechenden Tabellenzelle steht. Der Ausgangsstoff mit der Zusammensetzung 30 % Langfaser, 40 % Mittelfraktion und 30 % Feinstoff (30/40/30) ist rot gekennzeichnet. Die grünen Felder stellen den Bereich dar, der untersucht wurde. Zusätzlich wurden Blätter aus zwei Mischungen, die entlang der ursprünglichen Projektidee liegen, gefertigt: (35/30/35) und (45/10/45).

Tabelle 4: Technikumsversuchsplan

Langfaseranteil	Feinstoffanteil 							
	0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	100%
0%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	0%
10%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	
20%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	
30%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
40%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%	
50%	50%	40%	30%	20%	10%	0%		
60%	40%	30%	20%	10%	0%			
70%	30%	20%	10%	0%				
80%	20%	10%	0%					
90%	10%	0%						
100%	0%							
Zusätzlich			LF	MF	Fein			
Nr. 1			35	30	35			
Nr. 2			45	10	45			

Papier und Faserstoffprüfung

Folgende Eigenschaften wurden am Papier bzw. Altpapierstoff entsprechend der jeweiligen Norm bzw. Zellcheming-Merkblätter bestimmt:

- Dicke (Rohdichte errechnet)
- Flächenmasse
- Reißlänge
- SCT
- Glührückstand 525 °C
- Schopper-Riegler (McNett-Versuche)
- Wasserrückhaltevermögen (McNett-Versuche & reine Fraktionen Technikum).

4.2 Modellierung

Ziel

Ein Simulationsmodell wurde mit dem Ziel bereitgestellt, den Einfluss einzelner, durch Siebfraktionierung erzeugter Faserstofffraktionen rezyklierter Papiere auf Festigkeitseigenschaften ein- und mehrlagiger Blätter nachzubilden und damit einen optimalen Einsatz von Faserstofffraktionen zu ermitteln. Als Faserstofffraktionen werden die erzeugten Fraktionen Kurzfraktion, Mittelfraktion und Langfraktion verwendet.

Grundlagen

Das Simulationsmodell nutzt im Wesentlichen die bereits für eine Vielzahl von Anwendungen erfolgreich eingesetzten Bausteine der PTS zur Prognose von Produkteigenschaften (vgl. etwa [2]). Jede Faserstofffraktion (einschließlich ihrer anorganischen Bestandteile) wird durch einen Vektor aus morphologischen und chemisch-physikalischen Eigenschaften charakterisiert. Prozesse der Stoffaufbereitung (z. B. das Mischen von Faserstoffen und Fraktionen) werden durch Anwendung von Funktionen auf diese Vektoren abgebildet. Im nächsten Schritt wird unter Berücksichtigung der Blattbildungsbedingungen (im konkreten Fall: Laborblattbildung bei vollständiger Retention organischer und anorganischer Feinstoffe) und der aktuellen Vektormerkmale ein virtuelles Fasernetzwerk (Abbildung 2) erzeugt.

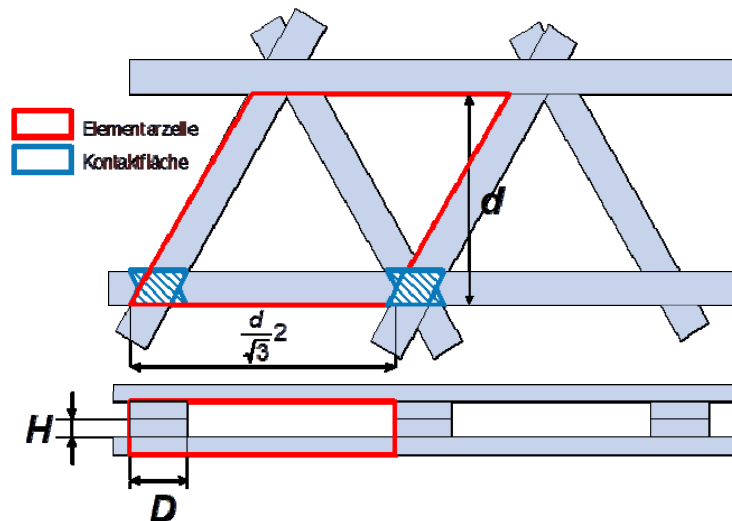


Abbildung 2: Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten) eines x-y-isotropen regelmäßigen Fasernetzwerkes

Auf Basis der geometrischen Struktur des Fasernetzwerkes und physikalischer Fasereinszeleigenschaften können physikalische Gesamteigenschaften des Fasernetzwerkes berechnet werden.

Einfluss von Faserlänge und anorganischen Feinstoffen

Wesentlicher Wirkungsfaktor beim Einsatz von Faserstofffraktionen rezyklierter Papiere sind die mittlere Faserlänge und der Anteil anorganischer Feinstoffe. Es ist bekannt, dass kurze Fasern bei ansonsten gleicher Fasersteifigkeit dichtere Faserhaufwerke erzeugen als lange Fasern. Die dimensionslose topologische Dichte des Faserhaufwerkes im Modell wird über den Quotienten D/d , d. h. das Verhältnis aus mittlerer Faserbreite (D) zum mittleren Abstand paralleler Fasern (d) im virtuellen Fasernetzwerk charakterisiert. Die scheinbare Dichte des Fasernetzwerkes AD_A ist propor-

tional zur topologischen Dichte mit der Dichte des Faserwandmaterials ρ_w ($\sim 1,5 \text{ g/cm}^3$) als Proportionalitätsfaktor.

$$AD_A = \frac{D}{d} \rho_w$$

Basierend auf den Ergebnissen der Versuche (siehe vorhergehendes Kapitel) kann die Abhängigkeit zwischen der topologischen Dichte und der mittleren Faserlänge FL über die Funktion

$$\frac{D}{d} = \frac{1 + FL}{1 + 3,9 * FL}$$

angenähert werden (Abbildung 3).

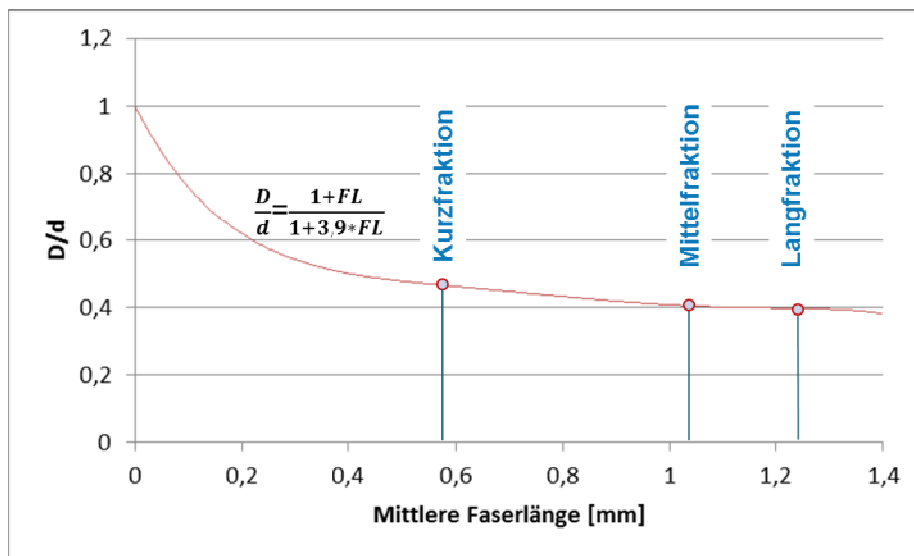


Abbildung 3: Abhängigkeit zwischen mittlerer Faserlänge und topologischer Dichte des virtuellen Fasernetzwerkes

Die Wirkung anorganischer Feinstoffe auf ein Faserhaufwerk kann im Wesentlichen durch drei Mechanismen beschrieben werden:

- Aufweitung (Vergrößerung der Abstände zwischen benachbarten Fasern).
- Füllung (Einlagerung der Partikel in Zwischenräume ohne Schwächung oder Behinderung von Faser-Faser-Bindungen; dies ist auch der dominierende Effekt organischer Feinstoffe).
- Einbindung (Integration der Partikel in die Bindungsflächen).

Alle drei Mechanismen treten bei Vorhandensein anorganischer Feinstoffe simultan auf und bedingen in Bezug auf das (mittlere) spezifische Volumen und die (mittlere) spezifische Bindungskraft unterschiedliche Effekte (Abbildung 4).

Für die Modellierung ist es zweckmäßig, die scheinbare Dichte eines feinstofffreien Faserhaufwerkes AD_A einzuführen.

$$AD_A = AD \cdot \left(1 - \frac{FS_{ret} + ASH_{ret}}{100} \right)$$

Das ist die scheinbare Dichte des armierenden Fasernetzwerkes, d. h. des Faserhaufwerkes bei nachträglicher „Entnahme“ der Masseanteile organischer bzw. anorganischer Feinstoffe FS_{ret} und ASH_{ret} .

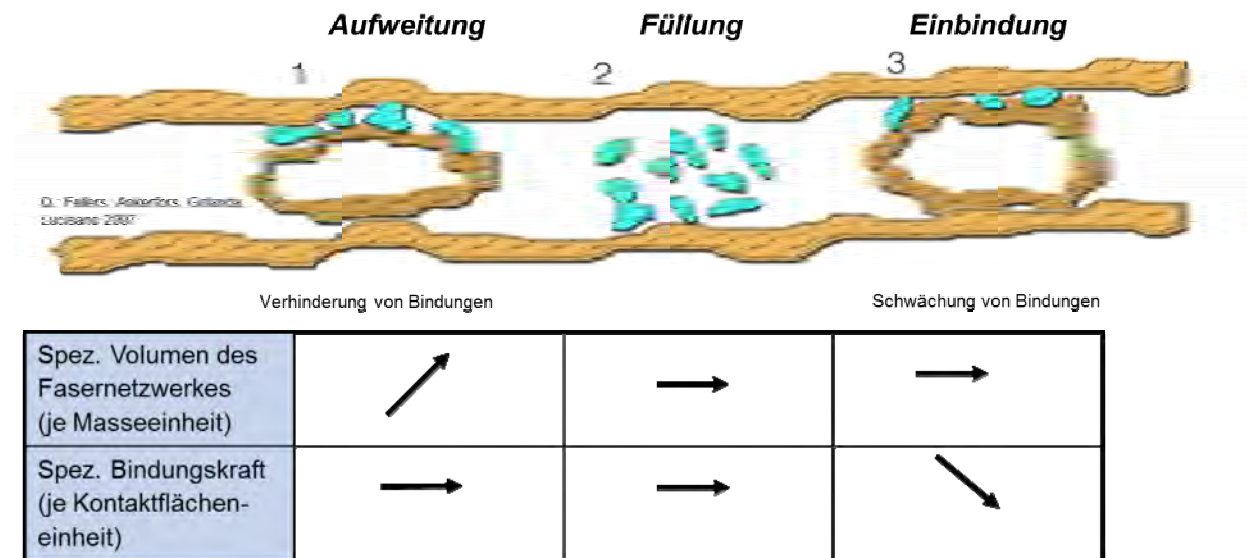


Abbildung 4: Mechanismen der Einlagerung anorganischer Feinstoffe in ein Faserhaufwerk

Ist d_0 die mittlere Distanz des armierenden Fasernetzwerkes ohne Einsatz anorganischer Feinstoffe, dann kann die mittlere Distanz d bei Einsatz organischer Feinstoffe in Abhängigkeit des Masseanteils retendierter „Asche“ ASH_{ret} durch folgende Funktion beschrieben werden,

$$d = \frac{d_0 (1 - f(D50) \cdot ASH_{ret})}{1 - ASH_{ret}}$$

Der Faktor $f(D50)$ ist funktional abhängig vom D50-Parameter (mittlere Partikelgröße). Im Falle der anorganischen Bestandteile in rezyklierten Papieren wurde auf Basis der Versuche in AP1 ein Wert $f(D50) = -0,5505$ bestimmt.

Für die (Scher-)Bindungsfestigkeit b der Fasern im Netzwerk wird folgender empirischer Zusammenhang zum Masseanteil retendierter Asche angenommen:

$$b = b_0 \cdot (1 - ASH_{ret})$$

Analog zu d_0 ist b_0 die Scherbindungsfestigkeit des armierenden Fasernetzwerkes ohne Einsatz anorganischer Feinstoffe.

Zur Abschätzung der Zugfestigkeit (Tensile-Index) wird die bekannte Page-Gleichung [3]

$$\frac{1}{T} = \frac{9}{8Z} + \frac{12 \cdot A_Q \cdot \rho_w}{b \cdot P \cdot FL \cdot RBA}$$

verwendet. Dabei kann die relative Bindungsfläche RBA aus den Parametern des virtuellen regelmäßigen Fasernetzwerkes (Abbildung 2) über

$$RBA = \frac{D^2}{d(D+H)}$$

berechnet werden.

Biegesteifigkeit mehrlagiger Blätter

Ein mehrlagiges Papier ist ein Mehrschichtenverbund, dessen elastische Eigenschaften gemäß der klassischen Laminattheorie (CLT) berechnet werden können. Es genügt dazu die Kenntnis der Schichtdicken t_i und der Elastizitätsmoduli E_i . Zur Vereinfachung werden die Blattschichten als x-y-isotrop angenommen. Die Berechnungsvorschriften sind Abbildung 5 zu entnehmen.

<u>Material model</u>	Layer	z-Axis	Thickness	Elastic Modulus
	1		t_1	E_1
	2		t_2	E_2
	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
	$n-1$		t_{n-1}	E_{n-1}
	n		t_n	E_n

Coordinates in z-direction

$$z_0 = -\frac{\sum t_i}{2}$$

$$z_i = z_{i-1} + t_i$$

Bending Stiffness

$$BS = D - B^2 / A \quad \text{and}$$

$$A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot (z_i - z_{i-1})$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i \cdot (z_i^2 - z_{i-1}^2)$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n E_i \cdot (z_i^3 - z_{i-1}^3)$$

Source: Fellers et al.: Carton Board - Profitable use of pulp and processes, Stockholm, 1983

Abbildung 5: Berechnung der Biegesteifigkeit eines x-y-isotropen Mehrschichtenverbundes

4.3 Bewertung der Nachhaltigkeit anhand ausgewählter Parameter

Nachhaltigkeit – Konzept und Bedeutung für die Papierbranche

Das Konzept der Nachhaltigkeit beruht auf den Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales. Diese können weiterhin in unterschiedliche Bereiche und Indikatoren untergliedert werden (Abbildung 6). Angesichts aktueller, gesellschaftlich bedeutender Entwicklungen wie Klimaerwärmung, Energiewende, Ressourcenverknappung und Nutzungskonkurrenz für Roh- und Reststoffe, erlangen Nachhaltigkeitsaspekte eine immer größere Bedeutung.

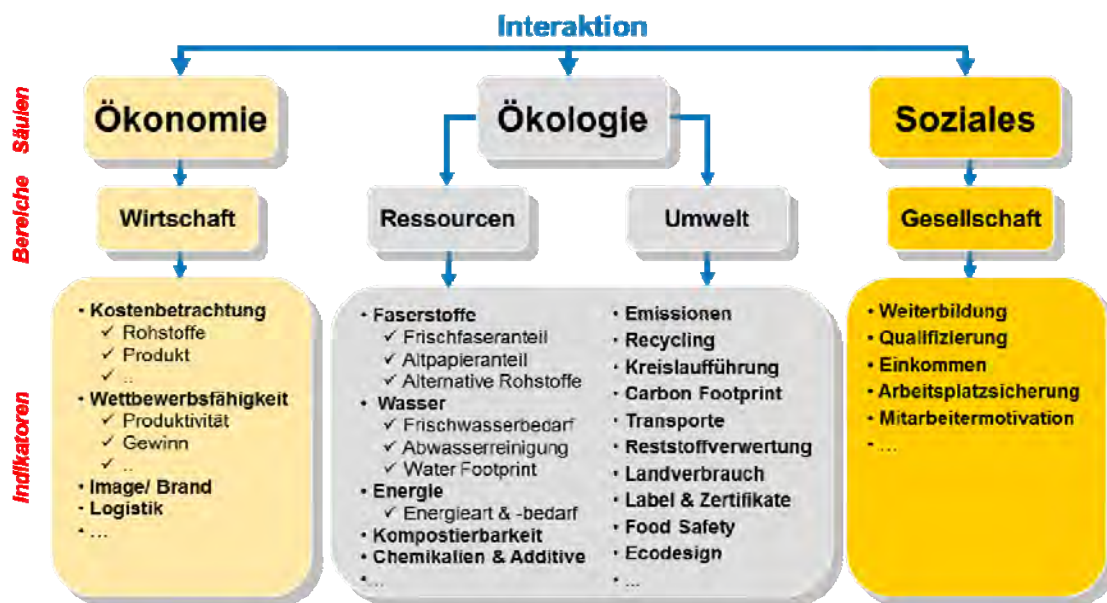


Abbildung 6: Mögliche Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Papierprodukten [4].

Dies gilt im besonderen Maße auch für Papiererzeugnisse. Ablesbar ist dieser Trend beispielsweise an einer wachsenden Nachfrage nach Zertifikaten, Normen, Umweltzeichen und Footprints, welche zur Ermittlung und Kommunikation von Nachhaltigkeitsaspekten über die gesamte Wertschöpfungskette Papier und Karton bis hin zum Endverbraucher herangezogen werden. Auch die Anforderungen seitens der Politik werden immer strenger, beispielsweise hinsichtlich der Grenzwerte für Emissionen. Deshalb ist es heutzutage von besonderer Bedeutung, im Rahmen von Produkt- und Prozessinnovationen auch Nachhaltigkeitsaspekte zu berücksichtigen.

Bei der Entwicklung papierbasierter Produkte spielt neben den Rohstoff- und Prozesskosten auch der verantwortungsvolle Umgang mit den Rohstoffen, beispielsweise Fasern, Energie und Wasser, eine immer größere Rolle. Dies gilt auch für die Umweltwirkungen von Produkten und Prozessen auf den Verbraucher.

Die deutsche Papierwirtschaft ist, verglichen zu anderen Industrien, bereits sehr nachhaltig. Dies ist beispielsweise am umfassenden Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, einer hohen Recyclingrate oder einem reduzierten Wasserverbrauch ablesbar. Altpapier ist dabei der wichtigste Faserrohstoff. In Deutschland wurden 2012 insgesamt 16,2 Mio. t Altpapier verarbeitet, 0,6 % mehr als 2011. Dies macht 72 %

des gesamten Faserstoffeinsatzes zur Herstellung von Papier, Karton und Pappe aus [5].

Allerdings ist die Papierbranche auch heute noch vergleichsweise rohstoff- und energieintensiv. Es besteht insbesondere hinsichtlich der Ressourcennutzung und Treibhausgas-Emissionen noch deutliches Optimierungspotenzial. Derartige Optimierungsprozesse stoßen jedoch zunehmend an ihre technische Grenzen [5]. Daher werden neue, bahnbrechende Technologien erforderlich. Deshalb hat die CEPI (Confederation of European Paper Industries) als europäischer Industrieverband mit der „CEPI 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy“ einen Schwerpunkt auf die Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen gesetzt. Der Fokus liegt hier insbesondere auf einer signifikanten CO₂-Reduktion (-80%) und einer höchstmöglichen Wertschöpfung aus den verfügbaren Ressourcen bis 2050 [6]. Des Weiteren sind in diesem Zusammenhang auch die Aktivitäten zu den „Product Footprint Category Rules (PFCR)“ oder die Entwicklung der „CEPI 10 toes“ zu erwähnen.

Ausgehend vom Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit hat die Papiertechnische Stiftung (PTS) verschiedene Indikatoren definiert, die zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten der Papiererzeugung- und Verarbeitung herangezogen werden können (Abb. 6) [4]. Je nach Position in der Wertschöpfungskette haben diese Indikatoren eine unterschiedlich starke Bedeutung. Dies wird durch Abbildung 7 ersichtlich. In Abhängigkeit von der Lage in der Wertschöpfungskette bestehen unterschiedliche Ansprüche an das Erzeugnis. Ferner werden verschiedene Stoffe in den Prozess eingetragen, die die Nachhaltigkeit des Endprodukts sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können.

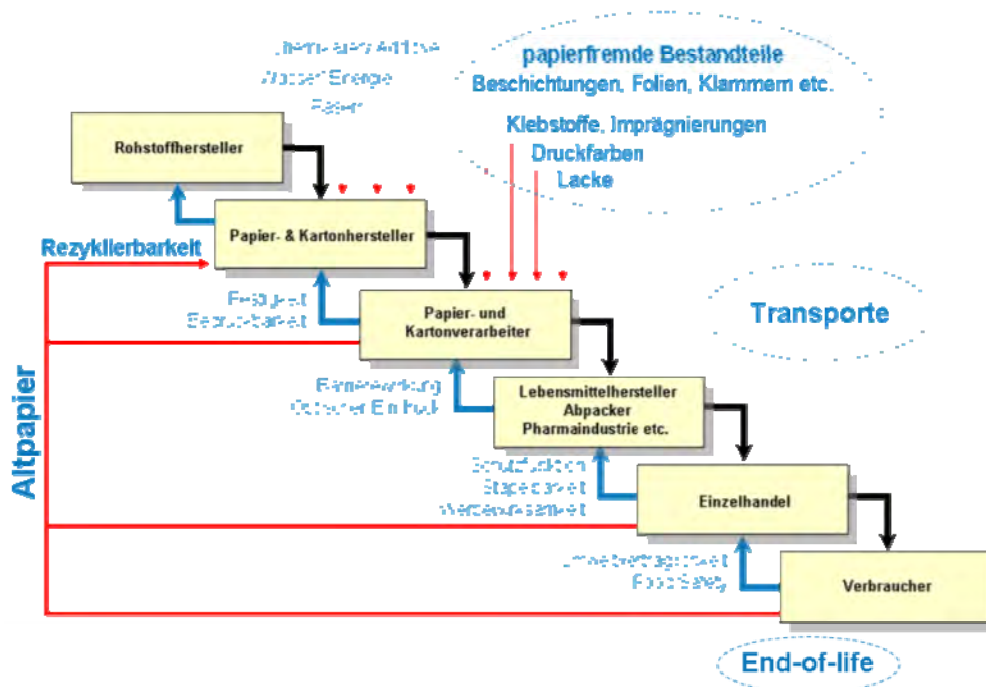


Abbildung 7: Typische Einsatzstoffe und Anforderungen in der Wertschöpfungskette [4].

Ziele der Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen des Arbeitspaketes

Ziel des Arbeitspaketes war es, ein Excel-basiertes Tool zur Bewertung der Nachhaltigkeit zu entwickeln. Dieses Tool sollte im Rahmen der Produktentwicklung möglichst einfach anwendbar sein und die Arbeiten unter Gesichtspunkten der Nachhal-

tigkeit unterstützen. Die Bewertung sollte dabei anhand von Kriterien erfolgen, welche eine besondere Bedeutung für die Nachhaltigkeit von Papierprodukten haben.

Nach Abstimmung mit den Projektbegleitern wurden folgende Nachhaltigkeitsindikatoren ausgewählt und als Basis für die Berechnungen festgelegt:

- CO₂-Emissionen
- Abwasserbelastung (CSB)
- Wirtschaftlichkeit.

Diese Indikatoren sollten im Zuge der Nachhaltigkeitsbewertung zusätzlich auch in einem Netzdiagramm zusammengeführt werden, welches die Nachhaltigkeitseffekte in Abhängigkeit vom jeweiligen Produktkonzept darstellt. Unter Einsatz von Berechnungstool und Netzdiagramm sollte die Nachhaltigkeit beispielhaft für verschiedene Produktkonzepte evaluiert werden. Ausgangspunkt für die Berechnungen sollte eine Referenz- und eine Zielrezeptur für das jeweilige Produktkonzept sein, welche auf den Ergebnissen aus AP2 aufbaut. Basierend auf diesen Erkenntnissen sollten Rückschlüsse auf ein optimales Produktkonzept unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten gezogen werden.

Indikator Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen stellen in der Papier- und Kartonerzeugung einen wichtigen Nachhaltigkeitsindikator dar. Sie sind insbesondere mit dem Energieverbrauch verknüpft. Unter Treibhausgasemissionen werden insbesondere die Emissionen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) oder Kohlenfluorkohlenwasserstoffe (CFCs) verstanden. Um die Klimawirkung dieser Treibhausgase (THG) vergleichen zu können, werden diese üblicherweise normiert, indem sie in Form von sogenannten CO₂-Equivalenten [CO₂-eq], ausgedrückt werden. Als Bezugsgröße dient das Kohlendioxid.

Im Projekt lag der Fokus allein auf den Kohlendioxidemissionen im Rahmen der Produkterzeugung. Dabei soll durch eine verbesserte Rohstoffzusammensetzung die benötigte Trocknungsenergie (und damit CO₂-Emissionen) reduziert werden. Als Maß für die benötigte Trocknungsenergie kann das Wasserrückhaltevermögen (WRV) dienen. Um eventuelle Einsparungen an Trocknungsenergie zu quantifizieren, muss der WRV-Wert mit dem Energieverbrauch gekoppelt werden. Dabei wurden folgende Annahmen für den theoretisch benötigten Energieverbrauch getroffen:

- Die benötigte Trocknungsenergie wird durch die Verdampfungsenthalpie des Wassers bestimmt.
- Das WRV entspricht dem Trockengehalt nach der Presse.
- Der Mischungs-WRV setzt sich linear aus den Einzelkomponenten zusammen.
- Jeder Prozentpunkt WRV ist gleich schwer zu entfernen.

Die tatsächlichen Energieverbräuche in einer Trockenpartie sind deutlich höher als ein auf diese Weise errechneter, theoretischer Wert. Die Effizienz der Trockenpartie ist deutlich geringer als 100 %. Um CO₂-Einsparungen quantifizieren zu können, muss diese Ineffizienz durch einen Effizienzfaktor mitberücksichtigt werden. Da in Papierfabriken unterschiedliche Altpapiersorten gemischt werden, ist es nicht möglich, einer AP-Sorte eine Trocknungsenergie direkt zuzuordnen. Stattdessen werden

die theoretischen und praktischen Energiebedarfe über die Bereiche Verpackungspapier 1 und 2 (VP1 und VP2) integriert.

Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Alle Altpapier (AP) - Sorten sind gleich zu trocknen.
- Verpackungspapier ist aus AP Sorten 1.02, 1.04, 4.03 sowie Zellstoff und Holzstoff gefertigt.
- Alle Maschinen arbeiten ähnlich effizient.

Damit ergibt sich folgende Formel für den Effizienzfaktor:

$$\eta_{Trocknung} = \frac{\text{Theoretischer_Energiebedarf}}{\text{Praktischer_Energiebedarf}}$$

Mit den vorliegenden Daten und Annahmen wurde der Effizienzfaktor auf 60 % bestimmt. Die detaillierte Beschreibung der Rechnung ist im Anhang zu finden.

Die mit Hilfe des Effizienzfaktors ermittelte Trocknungsenergie wurde zur Berechnung der CO₂-Äquivalente je Sorte herangezogen. Zur Berechnung der CO₂-Äquivalente je Sorte war neben der Trocknungsenergie je Sorte auch die Bestimmung des Emissionsfaktors in g CO₂/kWh notwendig. Dieser Emissionsfaktor wurde aus Daten des VDP-Leistungsberichts 2011 abgeleitet. Er errechnete sich aus 52.859.772 MWh für die insgesamt eingesetzten Brennstoffe in 2011 und den entsprechenden 8.485.643 t fossilen CO₂ in 2011 [7]. Es ergab sich daraus ein Emissionsfaktor von 161 g CO₂/kWh in 2011. Dieser basiert auf dem typischen Energiemix in Deutschland im Jahr 2011.

Die mit diesem Emissionsfaktor ermittelten CO₂-Äquivalente je Sorte waren 205 kg/t für die Sorte 1.02, 193 kg/t für Sorte 1.04 und 210 kg/t für Sorte 4.03. Diese ermittelten CO₂-Äquivalente je Sorte gingen in die Nachhaltigkeitsberechnung ein. Die Grundlage für die Ermittlung der CO₂-Äquivalente je Sorte ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht zur Ermittlung der CO₂-Äquivalente je Sorte.

Sorte	WRV	Verdampfungs-enthalpie	Trocknungs-energie	Effizienzfaktor	Emissionsfaktor	CO ₂ -Äquivalente
	%	kWh/t	kWh/t	%	g CO ₂ /kWh	kg/t
1.02	113	770	1275	60	161	205
1.04	107	728	1205	60		193
4.03	116	791	1309	60		210

Zusätzlich zu den AP-Sorten wurden Sulfat-Zellstoff sowie Holzstoff in die Betrachtung mit einbezogen, um auch den Einfluss von Frischfasern zu berücksichtigen. Die dazu notwendigen CO₂-Äquivalente sind der Datenbank EcoInvent entnommen [8]. Dabei wurden für Sulfat-Zellstoff 520 kg/t und für Holzstoff 850 kg/t angesetzt.

Indikator Chemischer Sauerstoffbedarf

Der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) ist ein Summenparameter und ein Maß für die Summe aller im Wasser vorhandenen, unter bestimmten Bedingungen oxidierbaren Stoffe. Er gibt die Menge an Sauerstoff an, die zu ihrer Oxidation benötigt würde, wenn Sauerstoff das Oxidationsmittel wäre. Der CSB dient, zusammen mit anderen Werten, der Berechnung und der Kontrolle der Reinigungsleistung einer Kläranlage und der Überwachung der Einleite-Grenzwerte. Er ist ein charakteristischer Parameter zur Überwachung der Abwasserbelastung und somit ein wichtiger Indikator im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung bei der Erzeugung von Papierprodukten.

Um das über Altpapier eingebrachte CSB-Potenzial abschätzen zu können, wurden Daten aus einem am PMV durchgeführten Forschungsvorhaben herangezogen. In diesem wurde der CSB nach DIN 38409-T41-80 bestimmt und in kg O₂/t Altpapier angegeben [1]. Basierend darauf wurden folgende CSB-Werte je Sorte als Eingangsgröße für den Nachhaltigkeitsrechner verwendet (Bezugsjahr 2010): Es wurden 26,5 kg O₂/t für die Sorte 1.02, 28,6 kg O₂/t für die Sorte 1.04, 24,1 kg O₂/t für die Sorte 4.03 und 8,1 kg O₂/t für die Sorte 1.11 angesetzt. Diese CSB-Werte je Sorte gingen in die Nachhaltigkeitsberechnung ein. Zusätzlich zu den vorgenannten AP-Sorten wurde der Chemische Sauerstoffbedarf von Sulfat-Zellstoff und Holzstoff betrachtet. Basierend auf PTS Daten [9] wurden in diesem Zusammenhang ein Mittelwert von 2 kg O₂/t für Sulfat-Zellstoff und 25 kg O₂/t für Holzstoff verwendet.

Indikator Wirtschaftlichkeit

Neben den ökologischen Aspekten spielt unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten insbesondere auch die Bewertung der ökonomischen Aspekte eine bedeutende Rolle. Im Kontext des Projektes lag der Fokus deshalb neben den ökologischen Aspekten auch auf den Rohstoffkosten als ökonomische Einflussgröße. Bei den Rohstoffkosten wurden die Faserstoffkosten betrachtet. Die anzusetzenden Kosten wurden für die AP-Sorten 1.02, 1.04, 4.03 und 1.11 sowie für Sulfat-Zellstoff und Holzstoff erhoben. Als Datenbasis für das AP diente der Infobrief Altpapier [10] sowie PMV-Daten [11]. Dazu wurden die folgenden Mittelwerte in €/t frei Fabrik angesetzt, wobei die Beträge in Klammern dem jeweiligen aus der Literatur ermittelten Kostenbereich in €/t entsprechen. Für die Sorte 1.02 wurden 77,50 €/t (75-80 €/t), für die Sorte 1.04 wurden 107,50 €/t (105-110 €/t) und für die Sorte 1.11 wurden 107,50 €/t (105-110 €/t) angesetzt. Die Sorte 4.03 ging mit 117,50 €/t in die Berechnung mit ein, da deren Kosten etwa 7,5 - 10 €/t über der Sorte 1.04 liegen [11]. Diese gemittelten Kosten in €/t fanden Eingang in die Nachhaltigkeitsberechnung. Zusätzlich zu den AP-Sorten wurden Sulfat-Zellstoff sowie Holzstoff in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einbezogen. Als Preise wurden 620 €/t [12] für Sulfat-Zellstoff und 350 €/t für Holzstoff angenommen. Letzterer stellt aufgrund der integrierten Erzeugung eine Abschätzung dar.

Zusammenführen der Einzelaspekte

Die zuvor beschriebenen Nachhaltigkeitsindikatoren a) Treibhausgasemissionen, b) CSB und c) Faserstoffkosten wurden mit den Projektbegleitern zu Projektbeginn abgestimmt und festgelegt. Sie sind von besonderer Bedeutung für die Nachhaltigkeit von papierbasierten Produkten und fanden deshalb entsprechend Eingang in die Nachhaltigkeitsberechnungen.

Für die Berechnungen wurde, gemäß der Zielstellung, ein Excel-basiertes Tool entwickelt, welches im Rahmen der Produktentwicklung einfach anwendbar ist und die-

se unter Nachhaltigkeitsaspekten unterstützt. Berücksichtigung im Tool fanden die erwähnten Nachhaltigkeitsindikatoren, die AP-Sorten 1.02, 1.04, 4.03 und 1.11 sowie Sulfat-Zellstoff und Holzstoff als Frischfasern. Dabei war eine Variationsmöglichkeit der Anteile je Altpapierstoff von 0-100 % möglich.

Gleichzeitig wurde auch der Wirkungsgrad für die Abwasserreinigungsanlage (ARA) im Tool berücksichtigt. Hier liegt die Variationsmöglichkeit im Bereich von 0-100 %, wodurch direkt Einfluss auf den CSB-Wert ausgeübt werden kann. In den Berechnungen wurde ein Wirkungsgrad von 80 % angesetzt und für alle Berechnungen konstant gehalten.

Das Tool führt somit alle Einzelaspekte entsprechend zusammen und ermöglicht es, die Nachhaltigkeit in Abhängigkeit vom jeweiligen Produktkonzept zu ermitteln. Dabei besteht das Tool aus einem Eingabe- und einem Ausgabefenster. Im Eingabefenster können die Referenz- und Zielrezeptur eingegeben und entsprechend variiert werden. Die blau dargestellten Zahlen im Eingabefenster können dabei angepasst werden. Die Berechnungen selbst basieren jeweils auf den unterschiedlichen Referenz- und Zielrezepturen basierend auf AP2. Das Ausgabefenster gibt als Ergebnis die jeweilige flächenspezifische Differenz der Umweltwirkungen von Ziel- und Referenzrezeptur in Abhängigkeit von den jeweils gewählten Parametern aus. Die Indikatoren wurden für die Berechnungen und Auswertungen zusätzlich in einem Netzdiagramm zusammengeführt, um eine grafische Darstellung der Effekte in Abhängigkeit von der Variation der jeweiligen Parameter zu erhalten.

4.4 Prinzipien bei der Erstellung neuer Kaskaden

Ausgangspunkt für den Entwurf neuer Kaskaden der Faserstoffverwertung in der deutschen Papierindustrie ist ein geeignetes Modell zur Beschreibung des Ist-Zustandes. Es wird dazu auf den bereits im Vorgängerprojekt (INFOR 143 R [13]) gewählten Ansatz zurückgegriffen, Recyclingzyklen wesentlicher Papiersorten zu abstrahieren und zu verknüpfen. Im Rahmen eines EXCEL-basierten Modells werden 4 Recyclingkreisläufe und deren Verknüpfungen bilanziert (Abbildung 8):

- Holzfrie grafische Papiere (GP1)
- Holzhaltige grafische Papiere (GP2)
- Maschinenkarton und Wickelpappen (VP1)
- Pack- und Wellpappenpapiere (VP2)

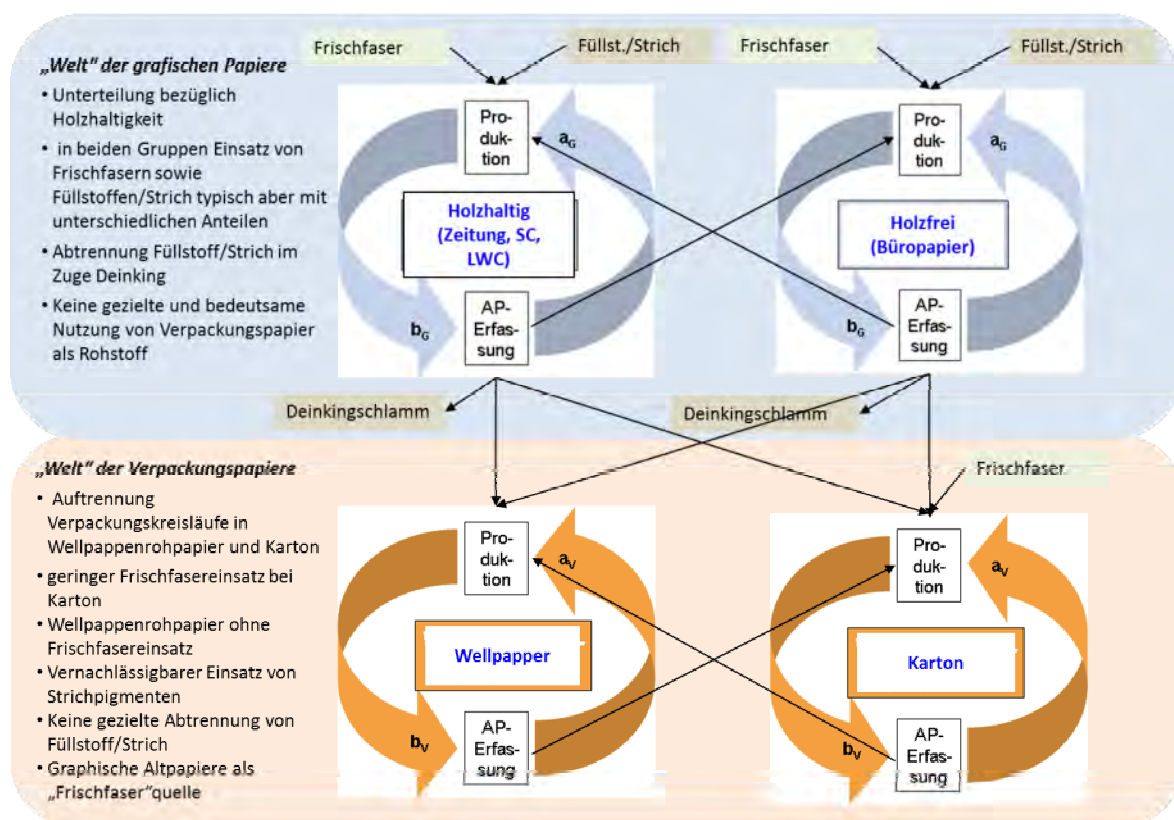


Abbildung 8: Wesentliche Recyclingzyklen der deutschen Papierindustrie und deren Verknüpfungen

Zusätzlich zu den Masseströmen enthält das Bilanzmodell Informationen zur Zusammensetzung der Faserstoffströme:

- Zusammensetzung der organischen Faserstoffbestandteile in Bezug auf Faseralter (Generationenzusammensetzung)
- Anteil anorganischer Faserstoffbestandteile.

Jeder Einzelzyklus wird durch 8 Eingabeparameter (Einheit: Mio. t/Jahr) gesteuert (Abbildung 9):

- Einsatz Frischfaser
- Einsatz anorganischer Mineralien (differenziert nach Streichpigmenten und Füllstoffen)
- Rejekte der Stoffaufbereitung (20 % organische und 80 % anorganische Bestandteile)
- Produktionsmenge
- Papierprodukte als Altpapierquelle der jeweils anderen 3 Recyclingzyklen.

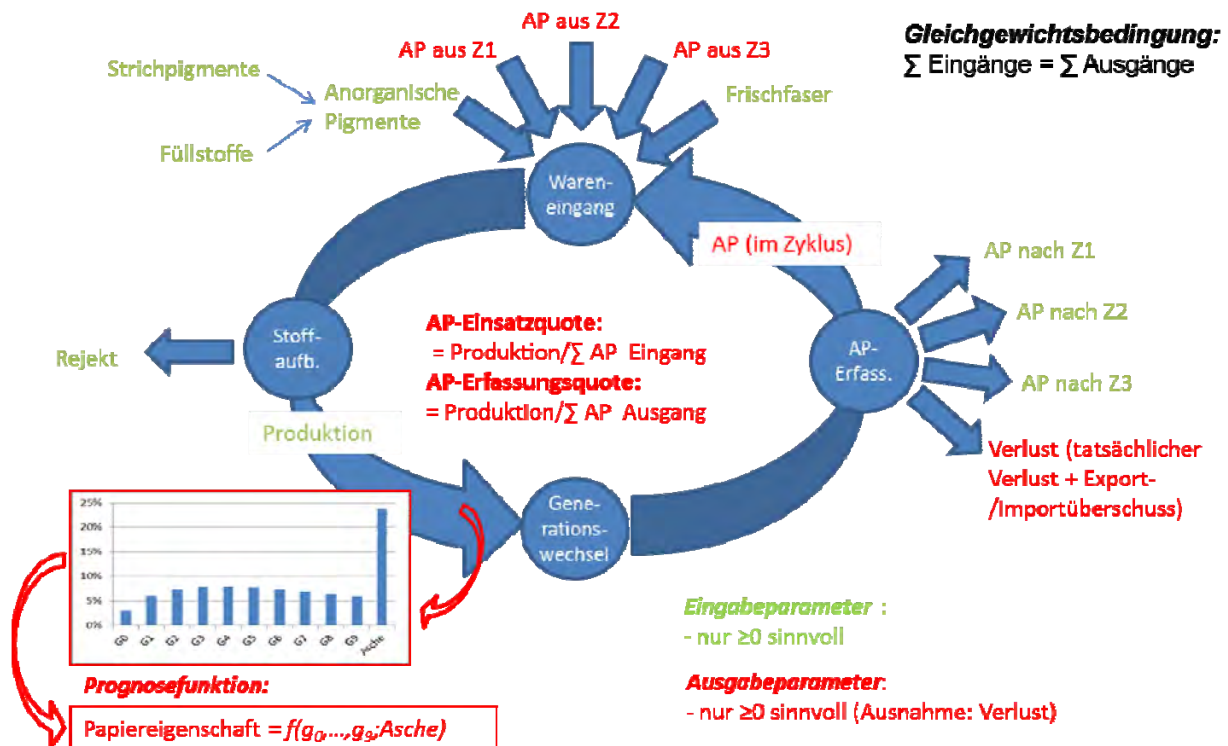


Abbildung 9: Ein- und Ausgabeparameter eines einzelnen Zyklus in einem 4-Zyken-Modell (Z1, Z2 und Z3 sind die jeweils komplementären Zyklen)

Der gewählte Abstraktionsgrad für die Modellierung der Faserstoffströme der deutschen Papierindustrie bedingt unter anderem folgende Einschränkungen und Nebenbedingungen:

1. Hygienepapiere sowie technische und Spezialpapiere (Anteil an der Gesamtproduktion 2011: 12,5 %) bleiben unberücksichtigt, da diese kaum in den Recyclingkreislauf gelangen.
2. Ex- und Import von Faserstoffen werden von den nationalen Stoffströmen nicht unterschieden; eventuelle Export- oder Importüberschüsse werden durch den Ausgabeparameter „Verlust“ berücksichtigt.
3. Es erfolgt keine Differenzierung nach AP-Sorten, d.h. in den Recyclingzyklen der grafischen bzw. der Verpackungspapiere erfolgt ausschließlich der Einsatz der unteren Sorten 1.11 bzw. 1.01/1.02/1.04.

Zusätzlich zur Massenbilanzierung und Bestimmung der generativen Faserstoffzusammensetzung liefert das Bilanzmodell:

- a) Eine Prognose der mittleren Produktqualität in jedem Zyklus. Dies erfolgt auf Basis eines Prognosetools, welches zu erwartende (mittlere) mechanische Eigenschaften eines Laborblattes mit einem Flächengewicht von 80 g/m^2 berechnet (14).
- b) Die Berechnung des Gesamtenergieverbrauches sowie der dadurch implizierten CO₂-Belastung.

Das Ziel des Entwurfs neuer Fasernutzungskaskaden besteht nunmehr darin, die Eingabeparameter der 4 verknüpften Recyclingzyklen so zu variieren, dass bei Sicherstellung definierter Produktionsmengen und mechanischer Produkteigenschaften der Ressourceneinsatz minimiert wird.

5 Ergebnisse Teil 1 – Produktdesign

5.1 Bewertung der erzielten Fraktionen

Im folgenden Kapitel wird dargestellt, wie sich die Papiereigenschaften entwickeln, wenn die Mittelfraktion entfernt wird. Insgesamt wurden im Projekt zwei Versuchsansätze abgearbeitet, einer im Labormaßstab mit einer Fraktionierung mittels McNett und einer mit einer Fraktionierung im Pilotmaßstab. In diesem Kapitel werden von den untersuchten Papiereigenschaften nur das WRV (nur McNett), der E-Modul (nur Technikum) und die Reißlänge dargestellt, da die anderen Papiereigenschaften meist ähnlichen Mustern folgen. Die Daten zu SCT, Glührückstand, Rohdichte, Scott Bond und Schopper Riegler befinden sich im Anhang.

Versuche im Labormaßstab

Die Entwicklung der Reißlänge ist in Abbildung 10 dargestellt. Die mit „PTS“ gekennzeichneten Punkte sind Doublierungen, die zur Verbesserung der Aussagekraft an der PTS in Heidenau durchgeführt wurden. Die Entfernung der Mittelfraktion mittels McNett führt zu keinen deutlichen Festigkeitssteigerungen. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den über 20 %igen Festigkeitssteigerungen, die im INFOR-Projekt 143 R gefunden wurden (Abbildung 11). Um auszuschließen, dass die Unterschiede durch die Kreislaufwasserblattbildung zustande kamen, wurden aus den entsprechenden Abmischungen auch Frischwasserblätter gebildet (Abb. 36, Anhang). Es wird deutlich dass auch mit der Frischwasserblattbildung nicht die Festigkeitsgewinne von INFOR-Projekt 143 R erreicht werden.

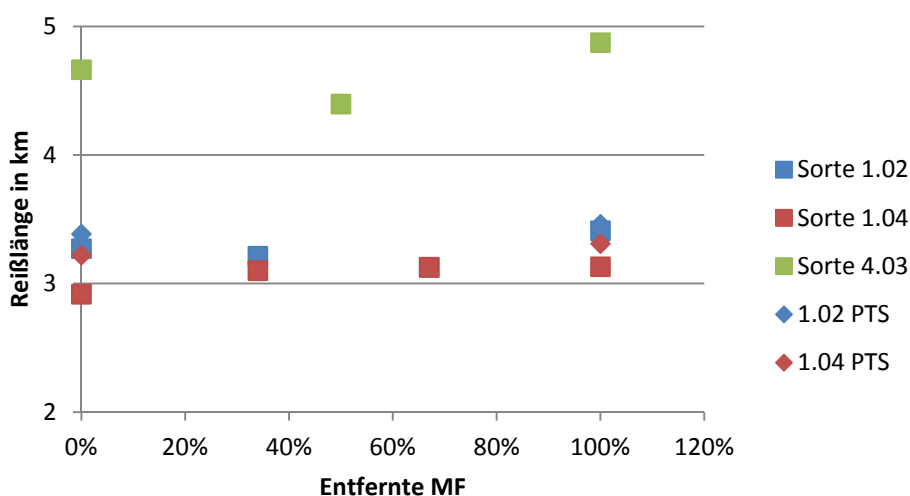


Abbildung 10: Reißlänge als Funktion der Anteils der entfernten Mittelfraktion (MF)

Eine mögliche Ursache dafür ist, dass im INFOR 143 R Altpapierstoff aus der Industrie verwendet wurde. Im Vergleich zu den Kreislaufwasserblättern besitzen die Frischwasserblätter ein deutlich höheres Festigkeitsniveau. Dieses wird dadurch verursacht das aufgrund der geringen Retention der Ascheanteil im Papier geringer ausfällt. Dies steht in gewissem Widerspruch zu anderen Studien, bei denen ein Entfernen des D200 Anteils zu drastischen Festigkeitseinbußen geführt hat.

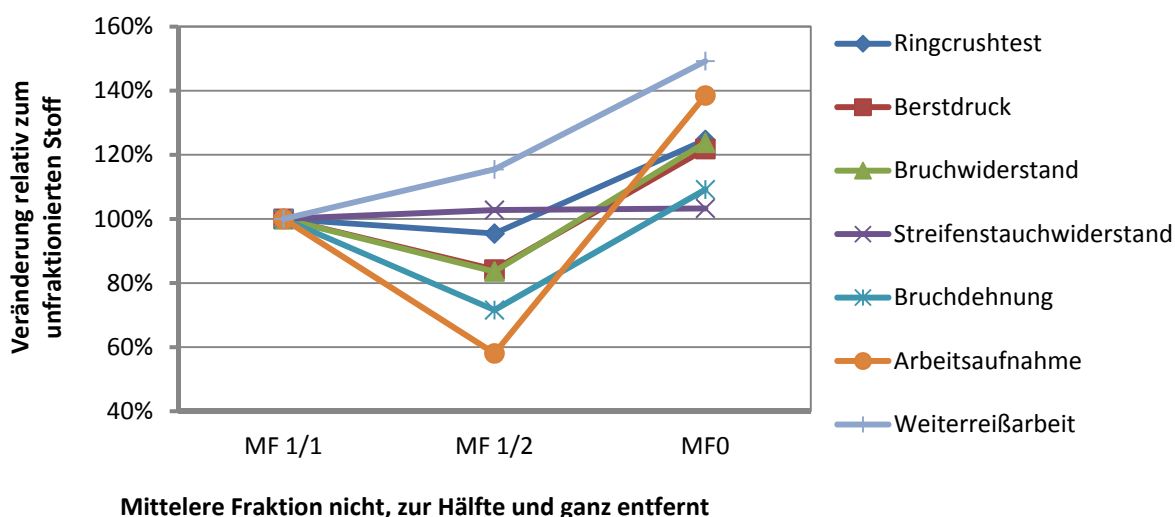


Abbildung 11: Eigenschaften als Funktion der Entfernung der Mittelfraktion (MF) (INFOR 143 R)

Da die Mittelfraktion weitestgehend aschefrei ist, führt ihr Entfernen zu einer Erhöhung des Ascheanteils im Altpapierstoff, der sich durch die Kreislaufwasserblattbildung auch im Papier wiederfinden sollte. Auf der anderen Seite wird die Mittelfraktion benötigt, damit die Feinstoffe bei der Blattbildung nicht durch das grobe Fasernetzwerk der Langfaserfraktion hindurchrauschen. Die Erfahrung in anderen Projekten zeigt zudem, dass eine vollständige Retention selbst mit Kreislaufwasserblattbildung manchmal nicht möglich ist. Diese Effekte spiegeln sich in den gemessenen Glührückständen des Papiers wider (Abb. 34, Anhang).

Für die Anwendung dieser Produktdesign-Prinzipien im Bereich von mehrlagigem Karton ist die Rohdichte wichtig, da sich hierüber die Biegesteifigkeit beeinflussen lässt. Bei den im Projekt durchgeführten Messungen lässt sich kein eindeutiger Trend feststellen, sowohl die Sorten untereinander unterscheiden sich in ihrer Eigenschaftsentwicklung deutlich als auch die Papiere derselben Altpapiersorten aus den Laboratorien in Darmstadt und Heidenau (Abb. 35, Anhang).

Neben möglicherweise verbesserten Produkteigenschaften war ein zweites Ziel die zum Trocknen benötigte Energie zu verringern, repräsentiert durch das WRV des Stoffes. Hier wurden leider im INFOR-Projekt 143 R keine Messungen nach der Zusammenmischung des Stoffes durchgeführt. Grundgedanke war durch das Entfernen der Mittelfraktion mit ihrem relativ hohem WRV, die Trocknungsenergie zu reduzieren. In diesem Projekt wurde das WRV der jeweils zusammengemischten Stoffe gemessen (Abbildung 12). Sowohl bei der Sorte 1.04 als auch 1.02 erhöht sich das WRV leicht mit Entfernen der Mittelfraktion. Auffällig ist die absolute Differenz der Messwerte zwischen den Laboratorien in Darmstadt und Heidenau. Möglicherweise hat hier die Wasserhärte des Leitungswassers einen Einfluss. Die in Darmstadt gemessenen Werte entsprechen eher den erwarteten und liegen im Bereich der Trockengehalte der Papierbahn nach der Presse.

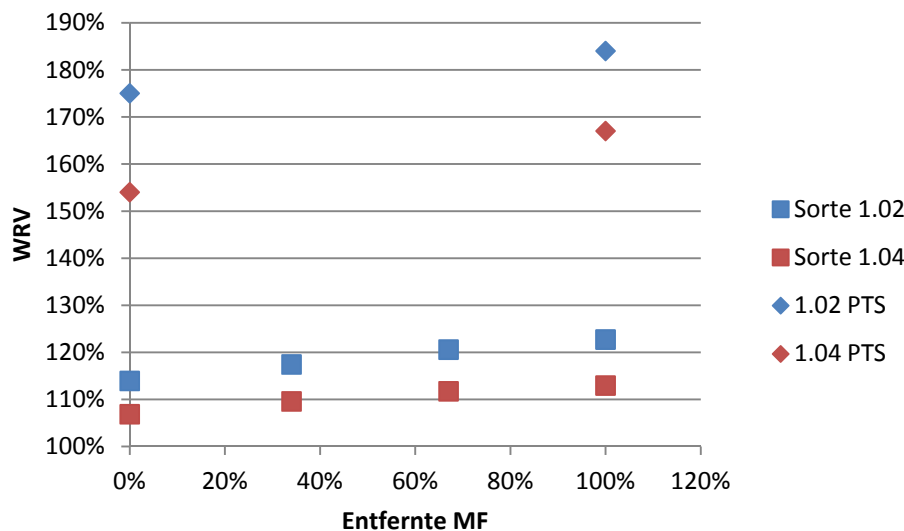


Abbildung 12: WRV als Funktion des Anteils der entfernten Mittelfraktion (MF)

Schlussfolgerung aus dem Laborversuchen

Leider konnten die positiven Ergebnisse aus INFOR 143 R nicht bestätigt werden. Weder lassen sich durch Entfernung der Mittelfraktion die Festigkeiten deutlich steigern, noch lässt sich die benötigte Trocknungsenergie reduzieren. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen beiden Projekten könnte der Altpapierstoff sein. Im Vorgängerprojekt wurde Altpapierstoff aus einer Verpackungspapierfabrik entnommen, während im vorliegenden Projekt eine Modellmischung verwendet wurde. Die Nachversuche mit Frischwasserblättern zeigen weiterhin, dass es notwendig ist Kreislaufwasserblätter zu fertigen, wenn man die Zusammensetzung des Ausgangsstoffs, z. B. durch Fraktionieren, verändert.

Das Fraktionieren mittels McNett verursacht in dieser Art möglicherweise auch die zum Teil hohen Streuungen der Messwerte und inkonsistente Trends. Da für jeden Versuchspunkt vier Mal mit den jeweils entsprechenden Ungenauigkeiten fraktioniert wurde ist auch die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Punkten von dieser Fehlerquelle betroffen. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes für die Fraktionierungen konnten auch nur vier Punkte pro Altpapierstoff untersucht werden. Durch diese geringe Anzahl an Punkten ist es zum einen schwierig zu erkennen, ob eine Abweichung vom Trend aufgrund von Mess- und Versuchsungenauigkeiten oder durch tatsächliches nichtlineares Verhalten verursacht wird. Schlussendlich ist auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse von McNett-Fraktionierungen in die industrielle Praxis fraglich, da nach sehr unterschiedlichen Prinzipien fraktioniert wird.

Um die beschriebenen Probleme zu umgehen und Ergebnisse mit einer höheren Güte zu erreichen, wurde ein zweiter Versuchsplan aufgestellt (siehe Kapitel 4.1 und unten).

Versuche im Technikumsmaßstab

Ziel des zweiten Versuchsplanes war es ein realitätsnahes Fraktionieren im Technikumsmaßstab zu nutzen, um mögliche Potenziale für ein nachhaltiges Produktdesign zu schaffen. Die drei Fraktionen wurden dabei in einer solchen Menge hergestellt, dass sie zum Zusammenmischen aller Versuchspunkte ausreichten. Dadurch wurden Schwankungen und Ungenauigkeiten aus der Fraktionierung als Feh-

lerquelle eliminiert. Weiterhin war es durch die große Menge an Altpapierstoff möglich einen engmaschigen Versuchsplan abzuarbeiten, der robuste Ergebnisse liefert und auch eventuelle Nichtlinearitäten abbilden kann.

Analyse der Technikumsfraktionen

Um die drei im Technikum erstellten Fraktionen zu charakterisieren, wurde das Soft-McNett-Tool der PTS verwendet. Hierbei lassen sich aus mit dem Fiberlab gewonnenen Daten die Massenanteile der McNett-Fraktionen einer Altpapierstoffsuspension errechnen. Die im Technikum erzeugten Fraktionen entsprechen aufgrund unterschiedlicher Fraktioniermechanismen nicht denen aus dem McNett, die Fraktionierung lässt sich jedoch trotzdem durch das Soft-McNett-Tool charakterisieren (Abb. 37, Anhang). Die Ascheanteile der Fraktionen betragen: LF 21 %, MF 9 % und FS 56 %.

Einfluss der Zusammensetzung auf die Papiereigenschaften

Im folgenden Abschnitt werden die Papiereigenschaften Reißlänge, E-Modul, Rohdichte und Glührückstand dargestellt. Im Anhang finden sich die Daten zu SCT-, Scott-Bond- und Schopper-Riegler Messungen. Als Darstellungsform wurde eine Tabelle gewählt, die dem Versuchsplan (s. Tab. 4Tabelle) entspricht. In der Spalte ist der Anteil der Feinstoffe (FS) differenziert, in der Zeile der der Langfaserfraktion (LF). Im jeweiligen Feld steht, statt des sich aus LF und FS ergebenden Anteils der Mittelfraktion (MF), der Messwert der entsprechenden Papiereigenschaft aus den abgemischten LF-, FS- und MF-Anteilen. Die Messwerte der Papiere aus den reinen Fraktionen, also die Eckwerte dieses Versuchskeils sind aus Gründen der Übersichtlichkeit am rechten Rand platziert.

Die Entwicklung der Reißlänge ist in Tabelle 5 dargestellt. Die anderen Festigkeiten (SCT und Scott-Bond) verhalten sich analog und sind daher nur im Anhang aufgeführt. Die Reißlänge der reinen LF und MF sind auf einem ähnlichem Niveau wohingegen die reinen Feinstoffblätter aufgrund des hohen Aschegehaltes eine sehr niedrige Festigkeit besitzen. Dementsprechend ist im Versuchskeil nur ein Gradient der Reißlänge in Spaltenrichtung feststellbar. Ein Variieren des Verhältnisses LF/MF (vertikale Bewegung in der Tabelle) hat keinen Einfluss auf die Reißlänge. Als wichtige Erkenntnis geht aus den Versuchen hervor, dass sich keine Festigkeitsverluste einstellen wenn Feinstoff (D200) entfernt wird, was im Gegensatz zu veröffentlichten und nicht veröffentlichten Studien steht, in denen mittels McNett fraktioniert wurde. Ein gewisser Anteil an Feinstoff befindet sich jedoch aufgrund der Fraktionierungsbedingungen auch in der MF und vor allem in der LF Fraktion. Hirsch [15] konnte zeigen, dass es ein Reißlängenmaximum bei einem bestimmten Feinstoffgehalt gibt. Dies würde erklären, wieso ein vollständiges Entfernen des Feinstoffes mittels McNett die Festigkeit reduziert, ein teilweises Entfernen wie im vorliegenden Versuch jedoch eine Verbesserung der Festigkeit zur Folge hat. Die in diesem Versuch ermittelten Ergebnisse bestätigen auch die industrielle Erfahrung, dass viel Asche/Feinstoff die Festigkeit grundsätzlich negativ beeinträchtigt.

Tabelle 5: Reißlänge Technikumsversuche

(Reißlänge in m)

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	3603	3400				
40 %	3666	3420	3098		LF	3980
50 %	3562	3331	3008	2960	MF	3831
60 %	3665	3467	3060		FS	1341
70 %	3523	3514				
80 %	3641					

Der E-Modul verhält sich ähnlich wie die Reißlänge, jedoch sind die Unterschiede zwischen den Fraktionen und deren Abmischungen deutlich geringer (Tabelle).

Tabelle 6: E-Modul Technikumsversuche

(E-Modul in MPa)

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	2750	2635				
40 %	2930	2920	2720		LF	2920
50 %	2980	2890	2640	2670	MF	2630
60 %	2780	2720	2700		FS	1640
70 %	2760	2830				
80 %	2780					

In Tabelle 7 ist der Glührückstand der Papiere dargestellt. Betrachtet man die reinen Fraktionen, so hat erwartungsgemäß das Papier aus der Feinstofffraktion den höchsten Glührückstand. Auf den ersten Blick verwunderlich erscheint, dass die LF Fraktion einen höheren Glührückstand als die MF besitzen soll. Dies lässt sich jedoch durch die Fraktionierungsbedingungen erklären. Da die LF-Fraktion als erstes abgetrennt wurde, befindet sich im Wasser noch ein relativ großer Anteil der Füll- und Feinstoffe, wohingegen die Mittelfraktion durch die Fraktionierung mit einem 200 µm Siebkorb und geringen Rejektraten stark eingedickt wurde und dementsprechend die verbleibenden Füll- und Feinstoffe mit dem Wasser in die Feinstofffraktion geschleppt wurden. Bei 20 % Feinstoffanteil sieht man, dass der Aschegehalt im Papier nicht steigt, wenn die aschearme MF durch die aschereichere LF-Fraktion ersetzt wird. Dies deutet darauf hin, dass die Mittelfraktion zur mechanischen Retention der Füllstoffe benötigt wird.

Tabelle 7: Glührückstand Technikumsversuche

(Glührückstand 525°C in %)

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	21,8	21,2				
40 %	23,7	27,9	30,2		LF	14,0
50 %	20,8	31,8	27,9	31,9	MF	8,8
60 %	18,8	23,6	29,6		FS	52,1
70 %	16,8	22,9				
80 %	18,9					

Die Rohdichte nimmt mit steigendem Feinstoffanteil zu. Wie bei den vorigen Papiereigenschaften ist kein Unterschied zwischen der LF und MF erkennbar (Tab. 20, Anhang).

5.2 Schlussfolgerungen und Vorschlag geeigneter neue Produktdesigns

Als Referenz für ein zu optimierendes Verpackungspapier wird ein zweilagiger Lagenaufbau gewählt (Abbildung 13). Das Ziel der Optimierung besteht darin, nach einer 2-stufigen Fraktionierung des Faserstoffes der Rückenlage (1.02) des Referenzmusters die Fraktionen so in 3 Lagen (Schonschicht, Einlage und Rücken) aufzuteilen (Abbildung 14), dass das resultierende 4-lagige Papier mit einem geringeren Faserstoffeinsatz dieselbe Biegesteifigkeit erreicht, wie das Referenzpapier.



Abbildung 13: Referenzpapier (2-lagig; 110 g/m²)



Abbildung 14: Optimierungsziel (4-lagig; Flächenmasse <110g/m²)

Als Fraktionen der 1.02 werden die im Rahmen der experimentellen Fraktionierung gewonnenen Fraktionen (siehe Abschnitt 5.1) angenommen. Für eine rechnergestützte Optimierung kommt das in Abschnitt 4.2 beschriebene Modell zum Einsatz. Entsprechend der Ergebnisse in Abschnitt 5.1 werden die Vektoren der morphologischen und chemisch-physikalischen Eigenschaften der Einzelfraktionen gemäß Tabelle 8 definiert. Für den Altpapierstoff der Decklage wird ein E-Modul von 4,8 GPa angenommen. In Tabelle 9 sind die Eigenschaften des Referenzmusters zusammengefasst.

Tabelle 8: Vektoren der morphologischen sowie chemisch-physikalischen Eigenschaften der Faserfraktionen

	FS ₁	FS ₂	FL _{FS}	KF	FL _{KF}	WL _{KF}	CWT _{KF}	LF	FL _{LF}	WL _{LF}	CWT _{LF}	ASH ₅₇₅	SR	WRV	FZ	b
	%	%	µm	%	µm	µm	µm	%	µm	µm	µm	%	°	%	MPa	MPa
Langfraktion	1,4%	1,4%	150	53,9%	974,28	22	4,5	43,3%	2951	31	4,5	14,0%	40,5	119%	480	13
Mittelfraktion	1,6%	1,6%	150	71,2%	918,61	21	4,5	25,5%	2505	30	4,5	8,9%	33	118%	480	13
Kurzfraktion	16,7%	16,7%	150	65,5%	565,34	17	4,5	1,1%	1299	22	4,5	52,1%	78	120%	480	13

Eine mögliche optimierte Aufteilung der 3 Fraktionen in Schonschicht, Einlage und Rücken ist in Tabelle 10 dargestellt. Wird die Langfaserfraktion allein für Schonschicht und Rücken eingesetzt und die verbleibende Mittel- und Kurzfaserfraktion für die Einlage verwendet, kann etwa 1,5 % der Sorte 1.02 eingespart werden bzw. wird entsprechend bei gleicher Biegesteifigkeit das Flächengewicht reduziert.

In Tabelle 11 ist eine alternative Optimierung demonstriert. Die Aufteilung der Fraktionen auf Schonschicht, Einlage und Rücken erfolgt wie in Tabelle 10, allerdings wird statt einer Reduzierung des Einsatzes von 1.02 eine Verringerung des Zellstoffeinsatzes angestrebt. Durch die Erhöhung der Biegesteifigkeit des Verbundes aus Schonschicht, Einlage und Rücken kann der Zellstoffeinsatz in der Decklage um etwa 10 % reduziert werden, ohne die Gesamtbiegesteifigkeit zu verringern.

Tabelle 9: Papiereigenschaften der Einzellagen sowie Biegesteifigkeit des mehrlagigen Referenzmusters

	Langfr.	Mittelfr.	Kurzfr.	Total	AD	RL	E	SCT I.	BS 2P
					g/cm ³	m	Gpa	Nm/g	Nmm
Decke	10	0	0	10	0,55		4,80		
Schonsc	0	0	0	0	0,64	3475	2,64	12,38	
Einlage	30	40	30	100	0,64	3569	2,67	12,71	
Rücken	0	0	0	0	0,64	3475	2,64	12,38	
Gesamt	40,0	40,0	30,0	110					0,8748

Design 1

Tabelle 10: Papiereigenschaften der Einzellagen sowie Biegesteifigkeit eines optimierten Papiers bei etwa gleicher Biegesteifigkeit (bei geringerem Einsatz an 1.02)

	Langfr.	Mittelfr.	Kurzfr.	Total	AD	RL	E	SCT I.	BS 2P
					g/cm ³	m	Gpa	Nm/g	Nmm
Decke	10,0	0,0	0,0	10	0,55	4333	4,80	15,43	
Schonsc	14,8	0,0	0,0	15	0,55	4333	2,95	15,43	
Einlage	0,0	39,4	29,6	69	0,68	3259	2,55	11,60	
Rücken	14,8	0,0	0,0	15	0,55	4333	2,95	15,43	
Gesamt	39,6	39,4	29,6	108,5					0,8721

Design 2

Tabelle 11: Papiereigenschaften der Einzellagen sowie Biegesteifigkeit eines optimierten Papiers bei etwa gleicher Biegesteifigkeit (bei geringerem Zellstoffeinsatz)

	Langfr.	Mittelfr.	Kurzfr.	Total	AD	RL	E	SCT I.	BS 2P
					g/cm ³	m	Gpa	Nm/g	Nmm
Decke	9,1	0	0	9	0,55	4333	4,80	15,43	
Schonsc	15	0	0	15	0,55	4333	2,95	15,43	
Einlage	0	40	30	70	0,68	3259	2,55	11,60	
Rücken	15	0	0	15	0,55	4333	2,95	15,43	
Gesamt	39,1	40,0	30,0	109,1					0,8751

Validierung

Die in der Einlage prognostizierten Eigenschaften bei der in Tabelle 10 und Tabelle 11 angesetzten Zusammensetzung aus 57 % Mittel- und 43 % Kurzfraktion wurde im Rahmen eines Validierungsversuches überprüft. Die Abweichungen zwischen Prognose und Validierung betragen ca. 5 % (Tabelle 12) und liegen somit im Bereich der Wiederholgenauigkeit der Festigkeitsprüfungen. Eine signifikante Abweichung zwischen Prognose und Validierung kann somit nicht festgestellt werden.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Lageneigenschaften des Validierungsversuches mit den auf Basis des Modells prognostizierten Eigenschaften

	Einlage				Schonlage und Rücken			
	AD	RL	E	SCT-I	AD	RL	E	SCT-I
	g/cm ³	m	GPa	Nm/g	g/cm ³	M	GPa	Nm/g
Prognose	0,68	3259	2,55	11,60	0,55	4333	2,95	15,43
Validierung	0,65		2,72		0,58		2,82	

5.3 Nachhaltigkeitsbewertung der Produkte

Nachfolgend werden anhand von Szenarien die Ergebnisse für die unterschiedlichen Produktkonzepte dargestellt. Diese basieren auf dem Vorschlag geeigneter neuer Produktdesigns, welcher die Reduzierung des Rohstoffeinsatzes (Altpapierstoff) durch Auswahl geeigneter Rezepturen zum Ziel hatte. Ausgehend von einem 2-lagigen Verpackungspapier mit Zellstoff (ZS) in der Decklage und Altpapier (AP) in der Mittellage wurden vier unterschiedliche Szenarien berechnet.

Bewertung Design 1

Die flächenbezogene Masse (mA) des AP wird reduziert und die mA der Zellstofflage wird konstant gehalten. Im Rechner sind diese Änderungen durch eine Anpassung der Rezeptur und der Flächenmasse erkennbar. Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt das Eingabefenster des Rechners mit Referenz- und Zielrezeptur (links) sowie das Ausgabefenster mit der entsprechend korrespondierenden, flächenspezifischen Differenz der Umweltwirkungen (rechts).

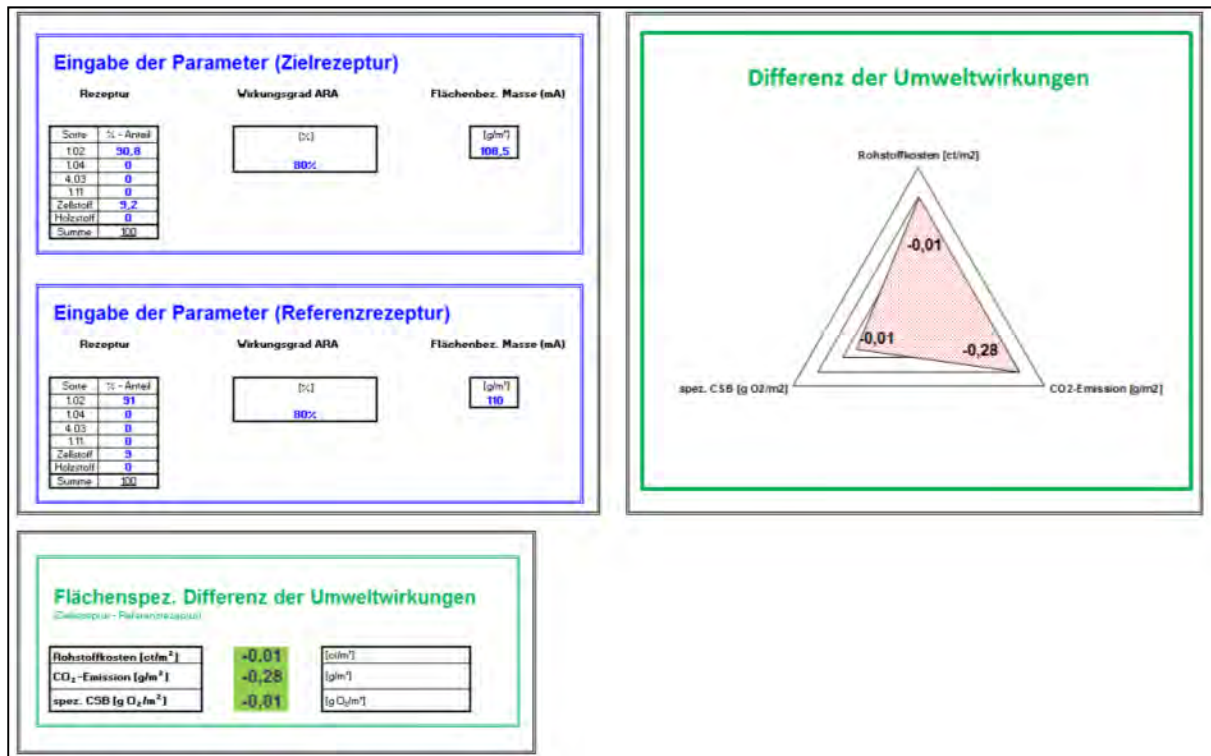


Abbildung 15: Darstellung der Umweltwirkungen für Szenario 1

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zielrezeptur verglichen zur Referenzrezeptur unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkte gering vorteilhafter ist. Dies wird deutlich an der Einsparung von Rohstoffkosten in Höhe von 0,01 ct/m², einer Verringerung der CO₂-Äquivalente um 0,28 g CO₂/m² und einer Reduktion des CSB um 0,01 kg O₂/t. Bezogen auf eine Tonne Produkt lassen sich die Einspareffekte mit ca. 0,66 €/t und 2,6 kg CO₂/t beziffern. Diese Effekte erscheinen auf den ersten Blick minimal, sind aber der geringen Variation der Flächenmasse geschuldet. Bezogen auf eine Jahresproduktion von mehreren Zehntausend Tonnen sind hier spürbare Effekte zu erwarten.

Bewertung 2

Im Rahmen des zweiten Szenarios wurden, basierend auf den Empfehlungen aus AP2, die mA des AP konstant gehalten und die mA des Zellstoffs reduziert (Abbildung 16).

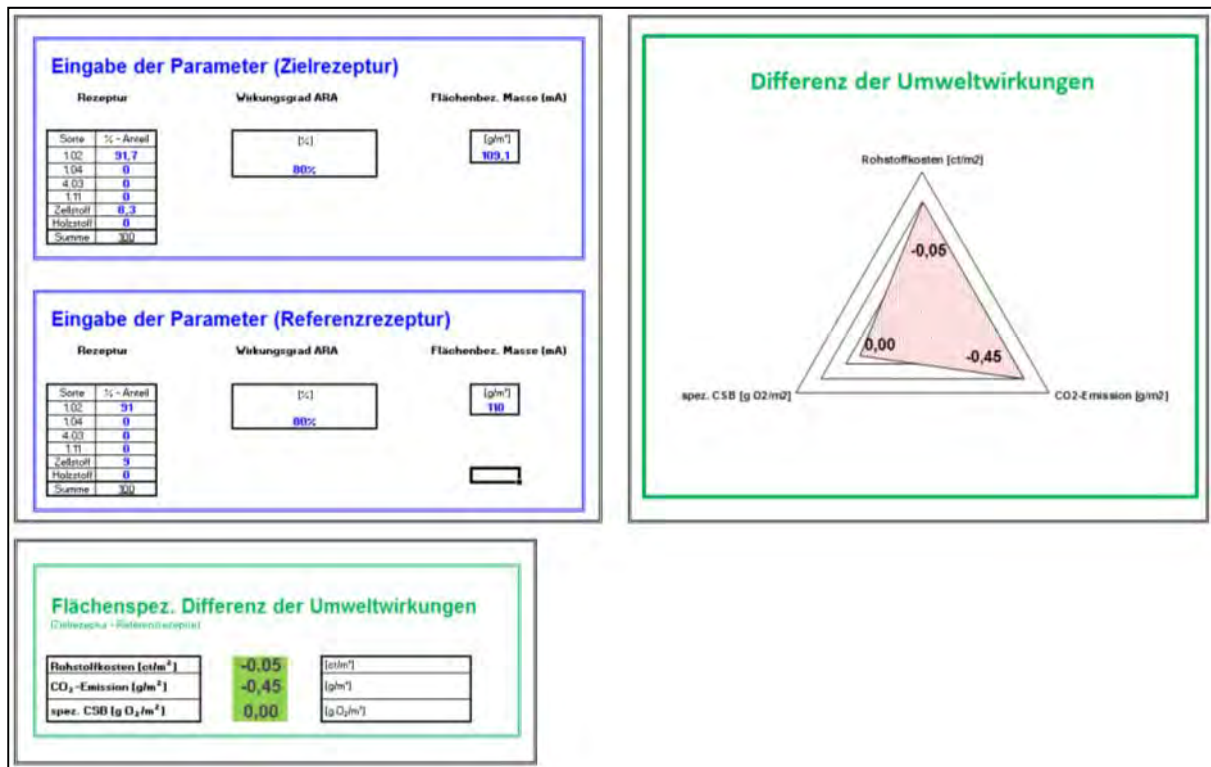


Abbildung 16: Darstellung der Umweltwirkungen für Design 2

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zielrezeptur verglichen zur Referenzrezeptur unter Nachhaltigkeitsaspekten wiederum gering vorteilhafter ist. Dies wird deutlich an der Einsparung von Rohstoffkosten in Höhe von 0,05 ct/m² und einer Verringerung der CO₂-Äquivalente um 0,45 g CO₂/m². Für diese beiden Indikatoren ist der festgestellte Effekt sogar etwas deutlicher als bei Szenario 1. Beim CSB war hingegen unter den gewählten Bedingungen keine Veränderung feststellbar. Bezogen auf eine Tonne Produkt lassen sich die Einspareffekte mit ca. 4,85 €/t und 4,1 kg CO₂/t beziffern.

Bewertung Design 1 mit modifiziertem AP-Einsatz

Im Rahmen des dritten Szenarios wurden, basieren auf den Empfehlungen für Design 1, die mA des AP reduziert und die mA der Zellstofflage konstant gehalten (Abbildung 17a). Allerdings wurde zusätzlich, anstatt der Sorte 1.02, jetzt die Sorte 1.04 eingesetzt.

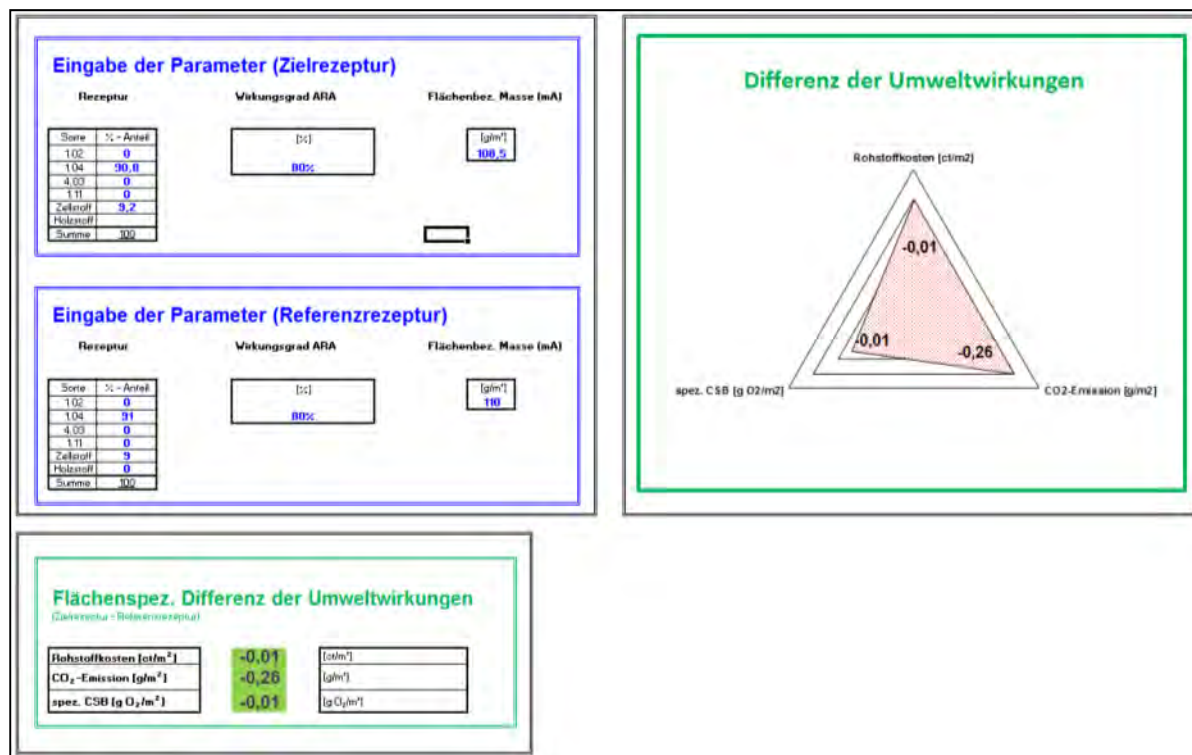


Abbildung 17a: Darstellung der Umweltwirkungen für Design 1 mit modifiziertem AP-Einsatz

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zielrezeptur verglichen zur Referenzrezeptur unter Nachhaltigkeitsaspekten erneut vorteilhafter ist. Dies wird deutlich an der Einsparung von Rohstoffkosten in Höhe von 0,01 ct/m² und einer Verringerung der CO₂-Äquivalente um 0,26 g CO₂/m². Damit ist der Einsparungseffekt hinsichtlich der Rohstoffkosten und des CSB mit Szenario 1 vergleichbar. Die Verringerung der CO₂-Äquivalente ist hingegen minimal geringer als bei Szenario 1 (0,28 g CO₂/m²).

Bezogen auf eine Tonne Produkt lassen sich die Einspareffekte mit ca. 1,10 €/t und 2,4 kg CO₂/t beziffern.

Bewertung Design 2 mit modifiziertem AP-Einsatz

Im Rahmen des vierten Szenarios wurde für Design 2 anstatt der Sorte 1.02 jetzt die Sorte 1.04 eingesetzt (Abbildung 17b).

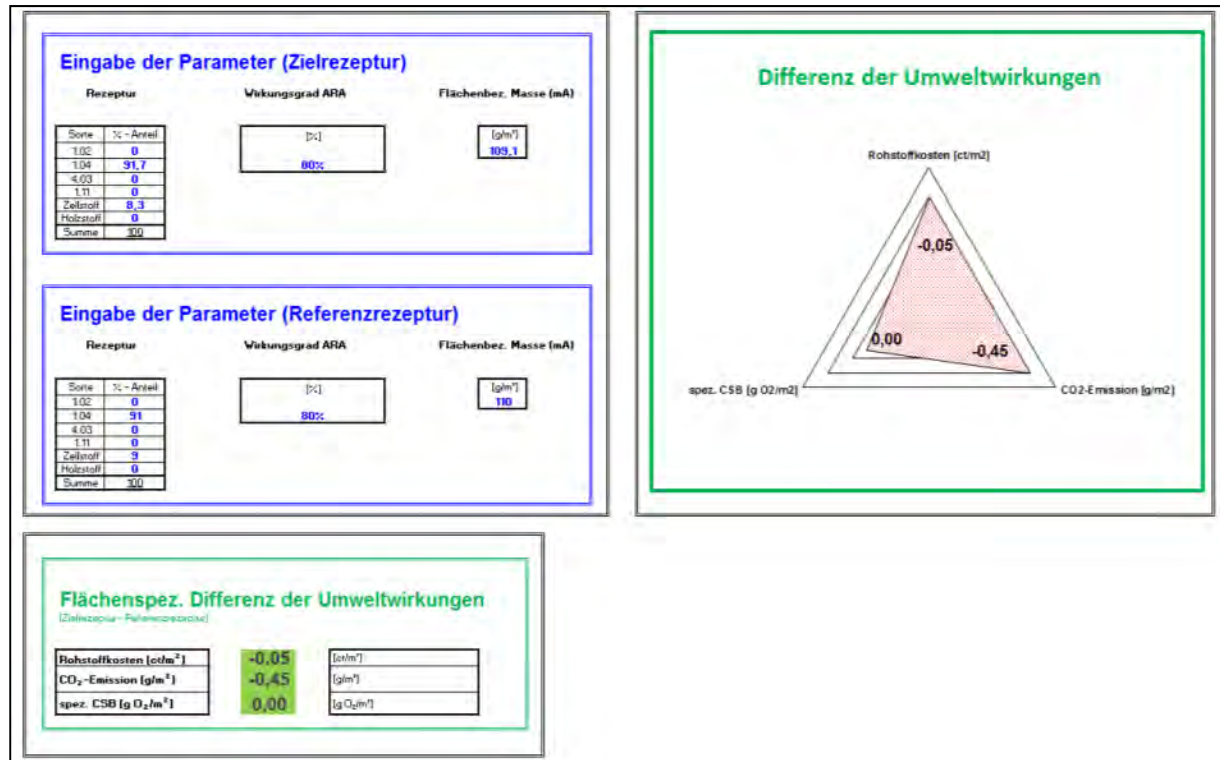


Abbildung 17b: Darstellung der Umweltwirkungen für Design 2 mit modifiziertem AP-Einsatz

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zielrezeptur verglichen zur Referenzrezeptur unter Nachhaltigkeitsaspekten erneut vorteilhafter ist. Dies wird deutlich an der Einsparung von Rohstoffkosten in Höhe von 0,05 ct/m² und einer Verringerung der CO₂-Äquivalente um 0,45 g CO₂/m². Damit ist der Einsparungseffekt hinsichtlich der Rohstoffkosten und des CSB mit Design 2 vergleichbar. Es zeigen sich keine Effekte in Abhängigkeit von der eingesetzten AP-Sorte.

Bezogen auf eine Tonne Produkt lassen sich die Einspareffekte mit ca. 4,85 €/t und 4,1 kg CO₂/t beziffern.

5.4 Schlussfolgerungen aus der Nachhaltigkeitsbewertung

Die ermittelte flächenspezifische Differenz der Umweltwirkungen fällt vergleichsweise gering aus. Dies war aufgrund der geringen Variation und Einflussnahme für die unterschiedlichen Produktkonzepte allerdings auch nicht anders zu erwarten. Auch wenn die ermittelten Effekte zunächst gering erscheinen, sind bezogen auf eine Jahresproduktion von mehreren Tausend Tonnen spürbare Effekte zu erwarten.

Ferner konnte gezeigt werden, dass eine Reduktion der Flächenmasse der Zellstofflage größere Effekte hinsichtlich der Nachhaltigkeit erzeugt, als eine Reduktion der Flächenmasse der Altpapierlage(n). Auch diese Effekte waren zu erwarten, da AP verglichen zu Frischfaser deutlich geringere Rohstoffkosten sowie CO₂-Emissionen verursacht.

Interessanterweise bringt die Variation der Sorten 1.02 und 1.04 unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten keine großen Vorteile mit sich. Hier sind die durchgeführten Variationen je Produktkonzept bzw. die Unterschiede der beiden Sorten zu gering, als dass sie sich deutlich unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten auswirken würden. Die festgestellten Effekte sind insbesondere auf die Variation der Flächenmasse zurückzuführen.

Basierend auf den Erkenntnissen können folgende Rückschlüsse hinsichtlich eines optimalen Produktkonzepts unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten gezogen werden:

- Altpapier weist, verglichen zu anderen typischen Faserstoffen der Kartonerzeugung, deutlich geringere CO₂-Emissionen/kg auf. Deshalb ist unter Klimagesichtspunkten der Einsatz von Altpapier zu fördern und Altpapier bei der Faserstoffauswahl zu bevorzugen.
- Der Einsatz von Altpapier sollte aufgrund des vorteilhaften Einflusses auf das Treibhauspotenzial bevorzugt werden.
- Die Grammatur von Karton sollte unter Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften weitestgehend reduziert werden, da hier deutliches Einsparpotenzial bei den CO₂-Emissionen und Kosten besteht.
- Der Einsatz von Altpapier unterstützt die Kreislaufwirtschaft und den Ressourcenschutz.
- Altpapiereinsatz ist ökologisch sowie ökonomisch vorteilhaft und notwendig.

6 Ergebnisse Teil 2 – Faserkaskaden

6.1 Darstellung des Portfolios der deutschen Papierindustrie 2012

Für die quantitative Betrachtung der Faserkaskaden ist es notwendig sowohl die Produktionsmengen nach Sorten, Einsatzquoten von Altpapier und Frischfasern als auch typische Energieverbräuche der einzelnen Produktgruppen zu quantifizieren.

In Tabelle 13 sind die Produktionsmengen und Altpapiereinsatzquoten dargestellt.

Tabelle 13: Jährliche Produktionsmengen und Rohstoffeinsätze 2012 [7]

Papiersorte	AP-Einsatz- quote %	Produktions- menge Mio t	AP-Verbrauch Mio t
Zeitungsdruckpapier	108,7%	1,718	1,867
LWC-Papier	57,9%	1,835	1,062
SC-Papier	57,9%	1,955	1,132
Recyclingpapier	108,9%	0,236	0,257
Holzfreie Papiere	0,8%	3,268	0,026
Rest	0,5%	0,168	0,001
Karton	85,0%	2,95	2,508
WP	109,0%	7,56	8,240
Hygiene	51,0%	1,4	0,714
Spezialpapiere/technische P.	39,0%	1,51	0,589
Gesamt		22,6	16,397

Es ist weiterhin erforderlich, die Mengen an Papierprodukten in den wesentlichen Altpapiersorten (1.02, 1.04, 1.11) in Deutschland zu erfassen. Die Angaben in Tabelle 14 stützen sich dabei wesentlich auf Analysen der TU Darmstadt, die im Rahmen des Forschungsvorhabens INFOR 155 [16] für eine Abschätzung der Papierproduktkreisläufe 2011 herangezogen wurden. Dieselbe Methodik wurde für das Jahr 2012 adaptiert.

Tabelle 14: Papierprodukte in verschiedenen Altpapiersorten im Jahr 2012

Papiersorte	AP-Quelle	Produkte im Altpapier				
		ZD	SC/LWC	hf	Karton	WP
		Mio. t	Mio. t	Mio. t	Mio. t	Mio. t
Zeitungsdruckpapier	1.11	0,654	0,542	0,598	0,056	0,019
LWC-Papier	1.11	0,372	0,308	0,340	0,032	0,011
SC-Papier	1.11	0,396	0,328	0,362	0,034	0,011
Recyclingpapier	1.11	0,090	0,075	0,082	0,008	0,003
Holzfreie Papiere	hf			0,026		
Karton	40% 1.02 +60% 1.04	0,165	0,226	0,476	0,471	1,168
WP	40% 1.02 +60% 1.04	0,544	0,742	1,566	1,549	3,840

In Abbildung 18 sind die aus Tabelle 13 und Tabelle 14 resultierenden Faserstoffströme in einem Mengenfließbild für die wesentlichen Produktgruppen zusammengefasst.

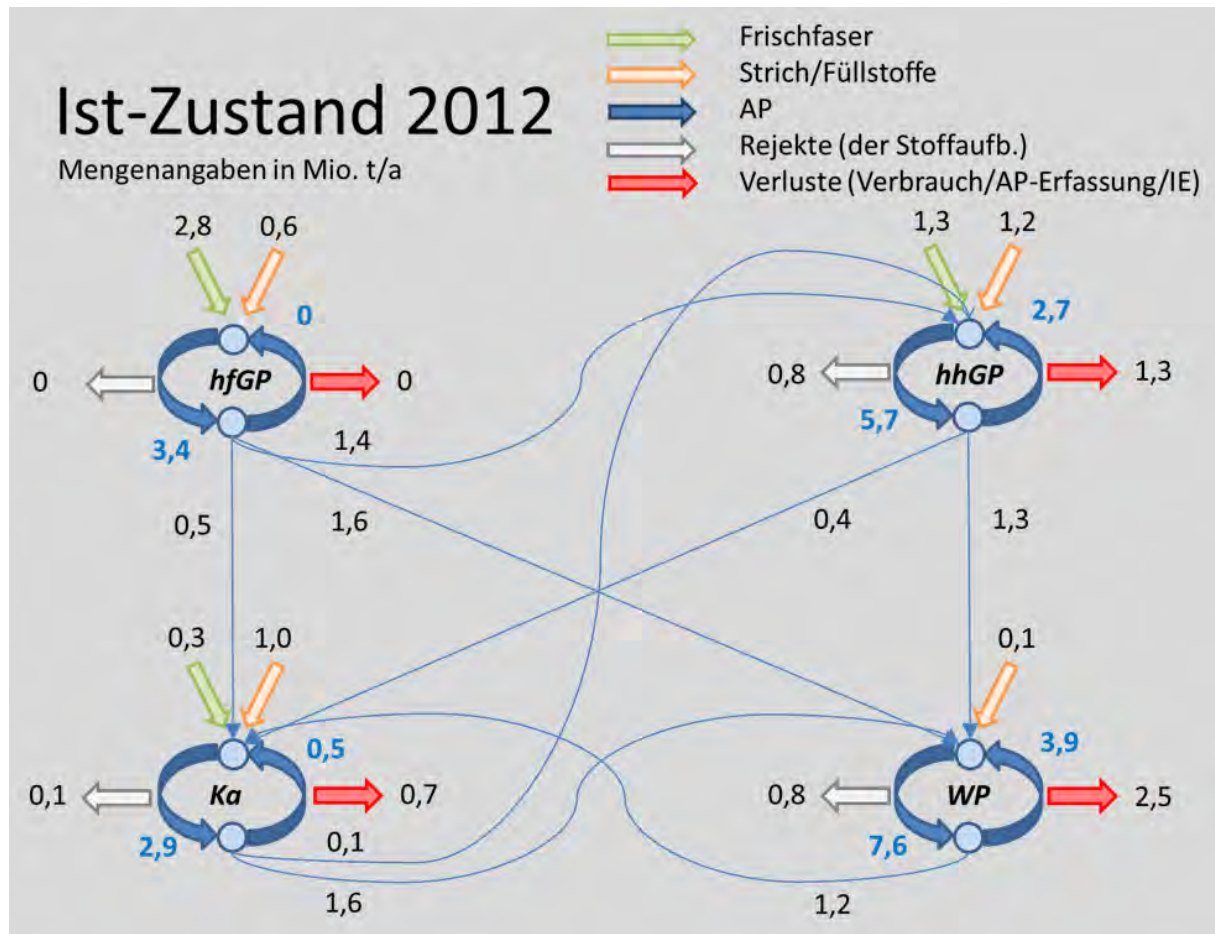


Abbildung 18: Mengenfließbild der Faserstoffströme innerhalb und zwischen den wesentlichen Papierproduktgruppen 2012

Für die qualitative Bewertung unterschiedlicher Kaskaden in einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise ist es weiterhin notwendig die Energieverbräuche für die einzelnen Prozesse und Prozessschritte darzustellen.

Die Energieverbräuche bei der Papierherstellung wurden in thermische, elektrische und stoffliche Energieverbräuche aufgeteilt, da diese drei Formen zwar dieselbe Einheit haben jedoch sehr unterschiedliche Wertigkeit besitzen (Tabelle 15). Die Werte wurden aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen. Die Herkunft der Werte ist durch die Hintergrundfarbe der jeweiligen Zelle festgelegt (s. Anhang, Tab. 21).

Tabelle 15: Energieverbrauch nach Sorten

Papierherstellung/Blattbildungsenergien

	GP1	GP2	VP1	VP2		
Stoffaufbereitung	117	486	161	103	in kWh/t	elektrisch
Stoffaufbereitung	0	100	0	0	in kWh/t	thermisch
Energieinhalte Stoffverluste	100	383	119	119	In kWh/t	
Papiermaschine	524	626	249	251	in kWh/t	elektrisch
Papiermaschine	1517	1139	1208	1261	in kWh/t	thermisch
Strichtrocknung					in kWh/t	Gas
			20	20	in kWh/t	elektrisch
Stoffverluste			-316	-316	in kWh/t	Stofflich

Für eine ganzheitliche Bewertung ist es zudem notwendig, die bei der Produktion von Holzstoff oder Zellstoff benötigten Energien mit einzubeziehen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Energiedaten Rohstoffe

Rohstoffe

Holzstoff

Thermisch	0	kWh/t
Elektrisch	1880	kWh/t
Stofflich	367	kWh/t

Zellstoff

Thermisch	-820	kWh/t
Elektrisch	720	kWh/t
Stofflich	3505	kWh/t

6.2 Bewertung mögliche neuer Faserkaskaden

Überblick

Ausgehend von der aktuellen Faserstoffkaskade (s. Abb. 18) wurden insgesamt 6 neue Kaskaden (Tabelle 17) in Bezug auf die Möglichkeit einer Energiereduzierung untersucht. Die Kaskaden 1 bis 4 wurden in einer ersten Runde den Projektbegleitern vorgestellt. Auf deren Anregung hin wurden 2 weitere Kaskaden A und B weiter untersucht. Für die Kaskaden 1 bis 3 sowie A und B wurden im Interesse der Vergleichbarkeit gleiche Produktionsmengen der Hauptpapiersorten unterstellt. Aus demselben Grunde blieben die Gesamteinsatzmengen von Frischfasern in den Varianten 1 bis 3 und B konstant.

Tabelle 17: Übersicht der untersuchten alternativen Faserstoffkaskaden

Kaskade Nr.	Inhalt
1	Komplette Umverteilung des Frischfasereinsatzes von grafischen Papieren hin zu Verpackungspapieren
2	Wie Kaskade 1, aber mit veränderter Aufteilung des Frischfasereinsatzes zwischen Karton- und Wellpappenrohpaierherzeugung
3	Ein möglicher Zwischenzustand beim Übergang vom Ist-Zustand hin zu Kaskade 1
4	Wie Kaskade 1 aber Reduzierung der Produktionsmengen von Verpackungspapieren infolge leichter Verpackungen
A	Eine vollständige Trennung der Kaskaden „Grafische Papiere“ und „Verpackungspapiere“
B	Entsprechend Ist-Zustand aber bei nahezu vollständiger Entaschung in der Altpapier-Stoffaufbereitung bei Verpackungspapieren

Kaskade 1:

Die grundlegenden Schwachstellen der aktuellen Faserstoffkaskade (s. Abb. 18) bestehen in folgenden Sachverhalten:

1. Der Rückgang der Produktion grafischer Papiere führt zu zunehmender Unterversorgung mit Frischfasern bei Verpackungspapieren („Recyclingkollaps“; siehe INFOR 171 R).
2. Über grafische Altpapiere erhalten Verpackungspapiere für die Produktqualität problematische Inhaltsstoffe (Asche, Mineralöle).

Eine wirksame Alternative zu dieser Kaskade könnte eine vollständige Neuorientierung des Einsatzes von Frischfasern sein (Abbildung 19Abbildung), d. h.:

- des Einsatzes primärer Faserstoffe erfolgt ausschließlich für die Herstellung von Verpackungspapieren,
- die Deckung des Faserbedarfs bei der Herstellung von grafischen Papieren erfolgt ausschließlich auf Basis von Verpackungsaltpapieren.

Eine derartige Neuorientierung der Faserstoffkaskade stellt eine Reihe technologischer Herausforderungen dar, wie z. B. die:

- genaue Trennung in holzhaltige und holzfreie (Verpackungs-)Altpapiersorten bei der Trockensortierung,
- nachträgliche Bleiche „brauner“ Verpackungsaltpapiere,
- stärkere Entaschung von grafischen Altpapieren.

Die grundlegenden Veränderungen in der Zusammensetzung der Faserstoffe in Bezug auf Faseralter und Asche illustrieren die Abbildung 38 und Abbildung 39 im Anhang.

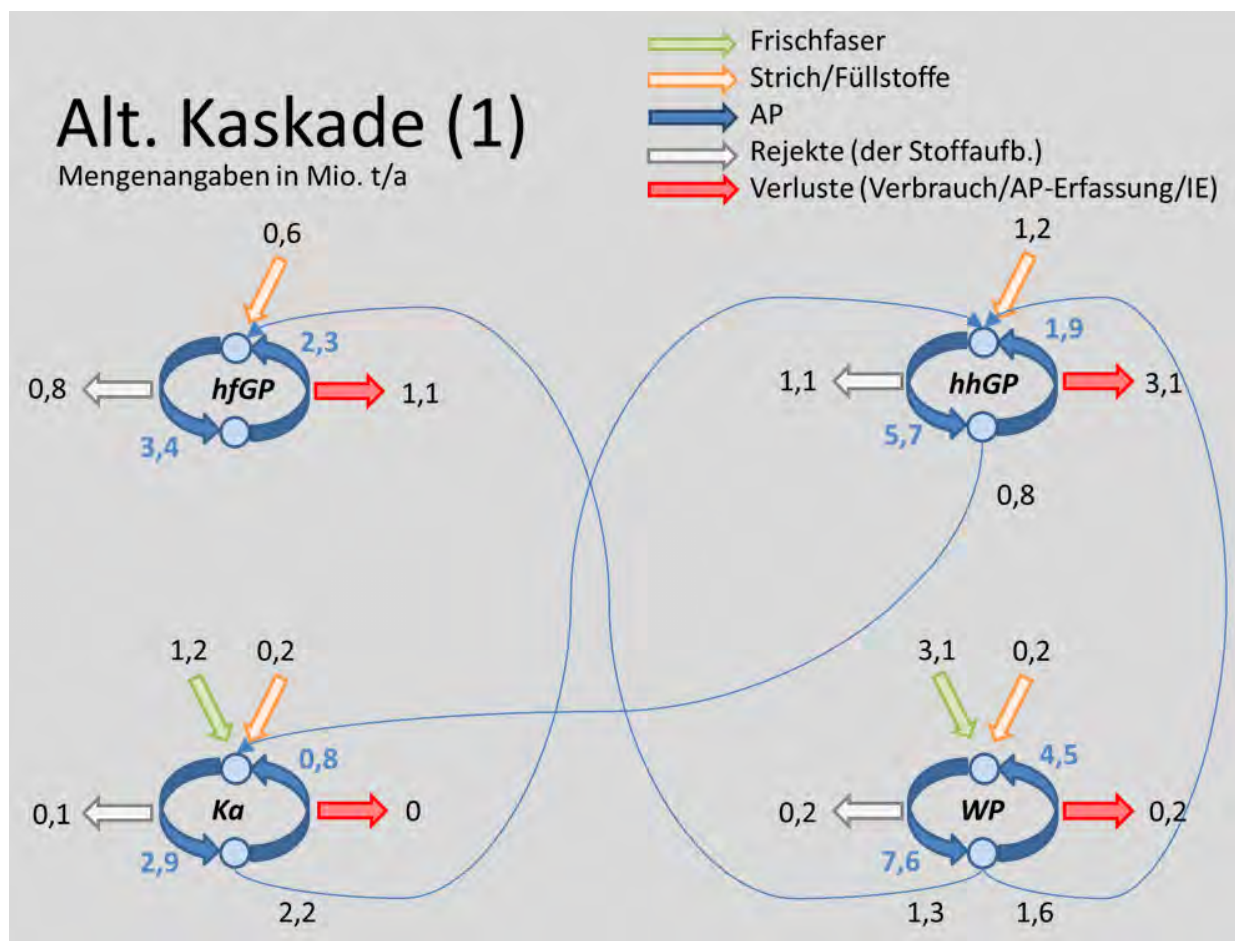


Abbildung 19: Alternative Faserstoffkaskade 1

Kaskade 2:

Kaskade 2 entspricht im wesentlichen Kaskade 1, wobei allerdings die Altpapiereinsatzquote für Karton erhöht und die für Wellpappenrohre reduziert wurde, ohne den Gesamteinsatz an Frischfasern gegenüber Kaskade 1 zu verändern (Abbildung 20). Diese Kaskade illustriert die Wirkung des Faktors „Verhältnis der Altpapiereinsatzquoten zwischen Karton- und Wellpappenrohreherzeugung“

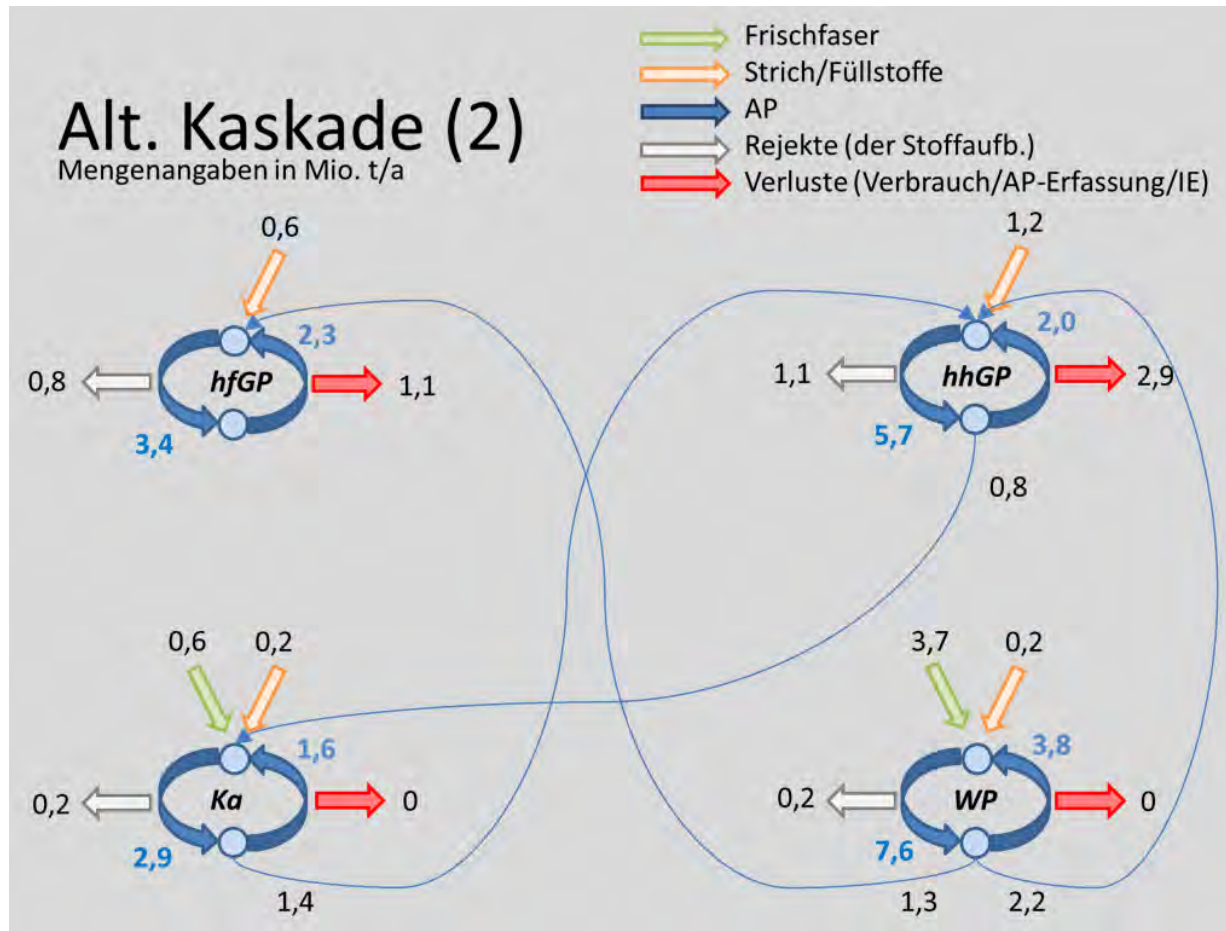


Abbildung 20: Alternative Faserstoffkaskade 2

Kaskade 3:

Kaskade 3 beschreibt einen fiktiven Zustand bei Übergang von der aktuellen Faserstoffkaskade hin zur Kaskade 1 (Abbildung 21).

- Sortierung nach holzhaltigen und holzfreien Verpackungsaltpapieren wie in Kaskade 1.
- Der Frischfasereinsatz für grafische Papiere wird gegenüber dem Ist-Zustand etwa halbiert.
- In gleichem Maße wird der Frischfasereinsatz für Verpackungspapiere erhöht.

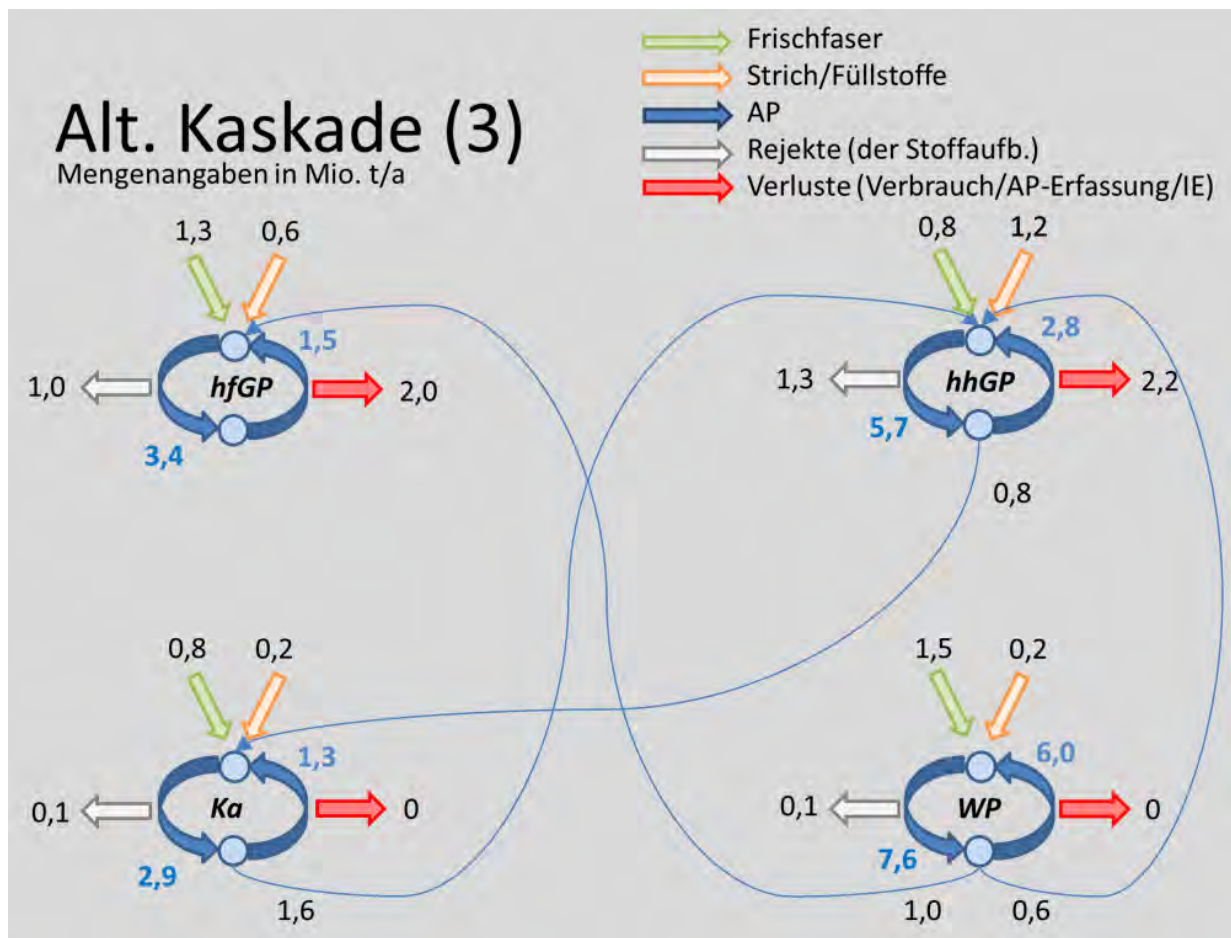


Abbildung 21: Alternative Faserstoffkaskade 3

Kaskade 4:

Infolge der niedrigeren Altpapiereinsatzquote gegenüber dem Ist-Zustand zeichnen sich die Verpackungspapiere in Kaskade 1 durch deutlich höhere Festigkeitseigenschaften aus (siehe Ergebnisse der Berechnung von Papiereigenschaften in Abbildung 25 bis Abbildung 29). Entsprechend ergibt sich die Möglichkeit der Herstellung leichter Verpackungen (Abbildung 22). Der Frischfasereinsatz bei der Herstellung der Verpackungspapiere kann somit um mindestens 10 % reduziert werden.

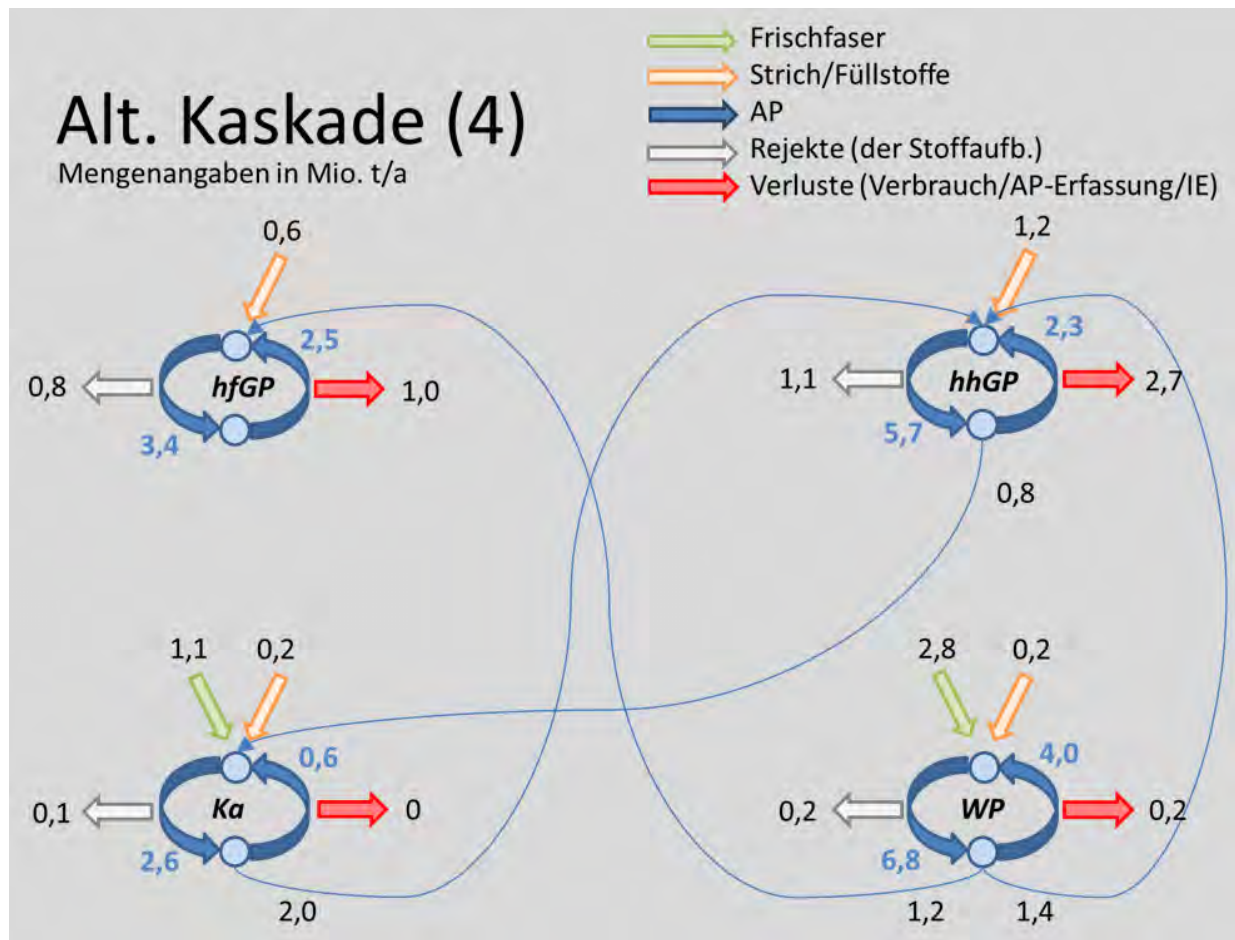


Abbildung 22. Alternative Faserstoffkaskade 4

Kaskade A:

Die alternative Kaskade A ist eine Option für eine vollständige Trennung der Kaskade für grafische Papiere von der für Verpackungspapiere. In dieser Option wird angenommen, dass die zur Herstellung von Verpackungspapieren bislang verwendeten grafischen Altpapiere vollständig durch Frischfasern substituiert werden. Umgekehrt wird der Frischfasereinsatz bei der Herstellung holzhaltiger grafischer Papiere vollständig aus dem Aufkommen (holzfreier) grafischer Altpapiere gedeckt – holzhaltige grafische Papiere verschwinden also vom Markt. Trotzdem zieht eine solche Option zwangsläufig einen erhöhten Frischfasereinsatz nach sich (Abbildung 23).

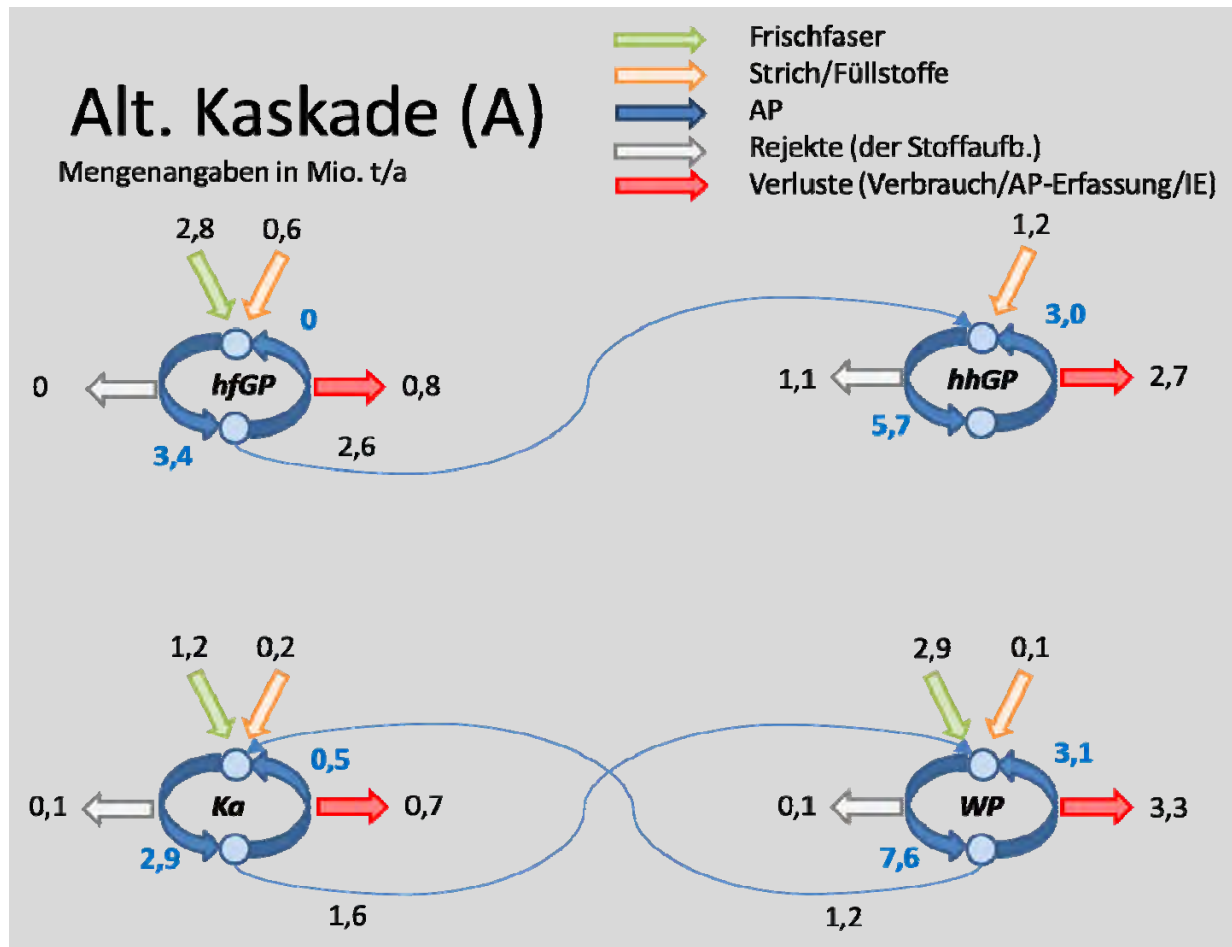


Abbildung 23: Alternative Faserstoffkaskade A

Kaskade B:

Im Rahmen der alternativen Kaskade B wird gegenüber dem ist-Zustand der Ascheanteil in den Verpackungspapieren durch technische Maßnahmen (z. B. Integration einer Flotation in die Stoffaufbereitung) auf unter 5 % reduziert (Abbildung 24). Mit gegenwärtigen Abtrennmethoden würde ein solch niedriger Aschegehalt sowohl einen erhöhten Energieeinsatz als auch höhere Faserverluste in der Stoffaufbereitung für Verpackungspapiere nach sich ziehen. Der notwendige höhere Energieaufwand kann momentan nicht seriös abgeschätzt werden und wurde deshalb in Abbildung 30 (s. Anhang) für die Kaskade B nicht berücksichtigt.

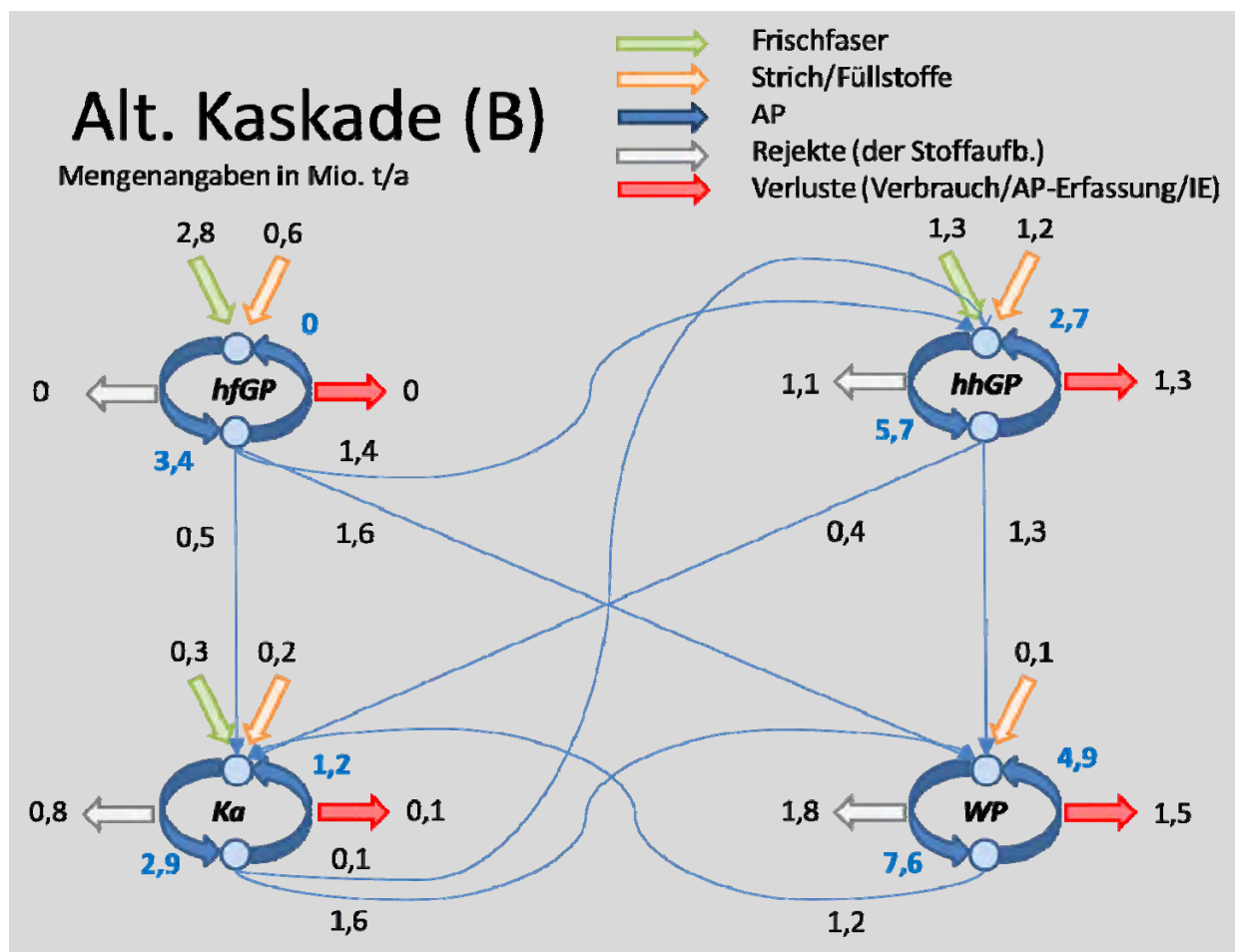


Abbildung 24: Alternative Faserstoffkaskade B

Ergebnisse – Auswirkungen geänderter Faserkaskaden auf wichtige Papiereigenschaften

Im Folgenden wird ein Überblick wesentlicher Produkteigenschaften und Energieverbräuche in den verschiedenen Kaskaden dargestellt (Abbildungen 25 - 30).

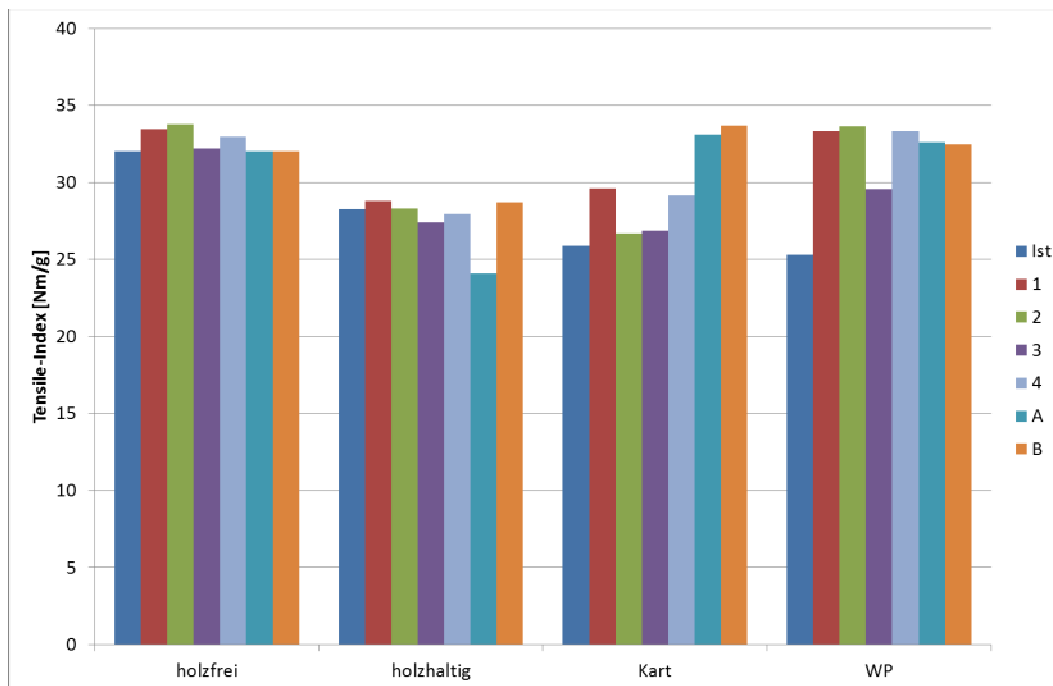


Abbildung 25: Tensile-Index

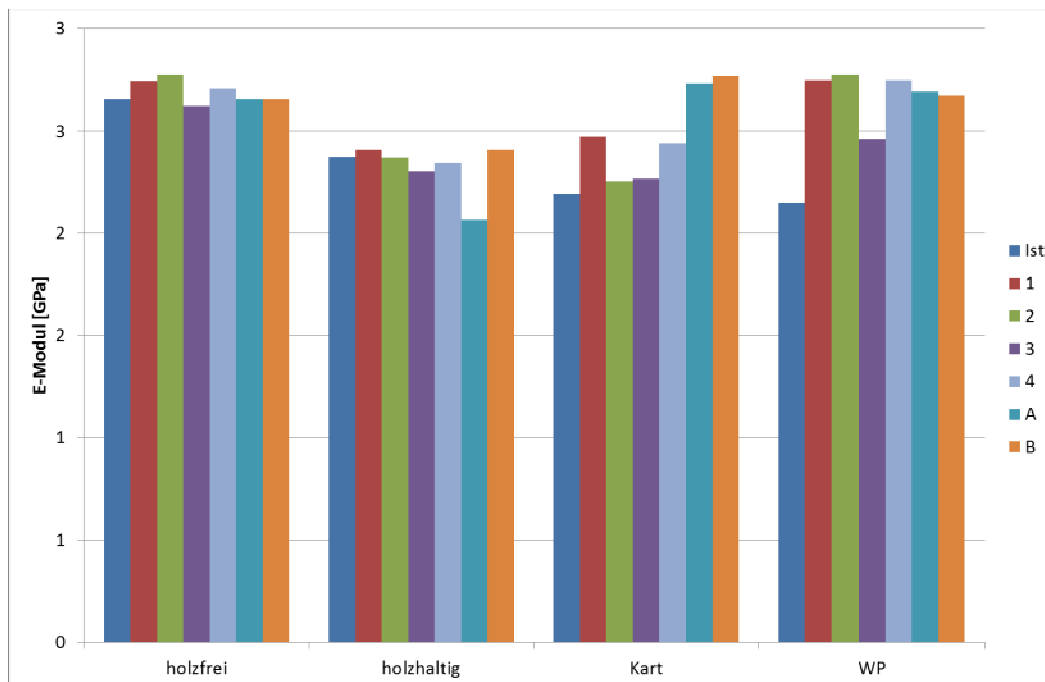


Abbildung 26: Elastizitätsmodul

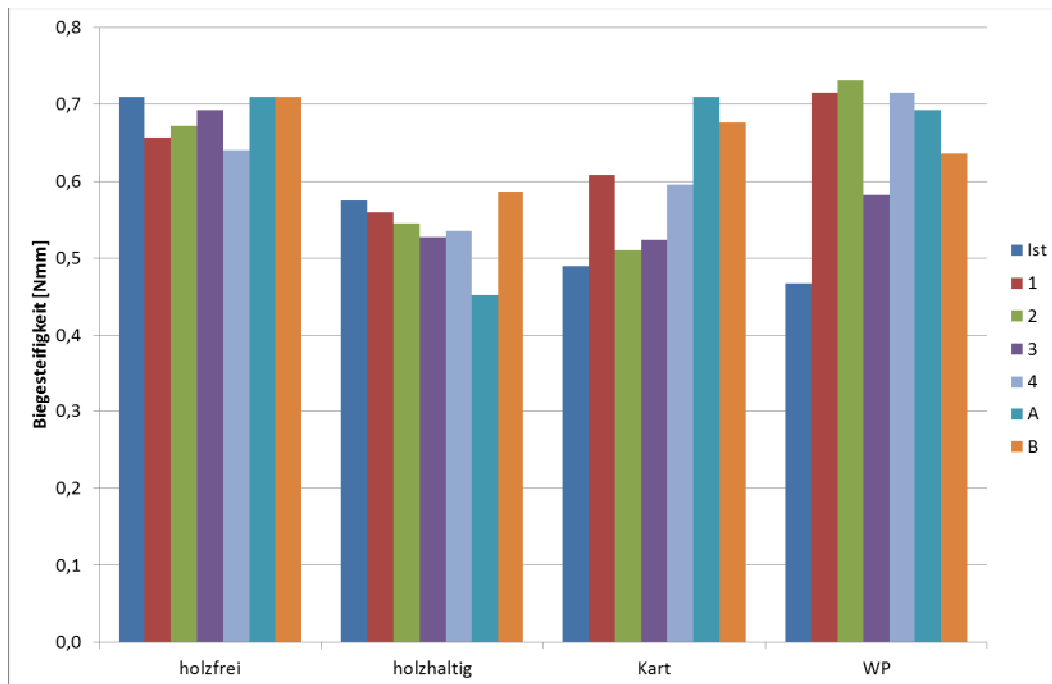


Abbildung 27: Biegesteifigkeit

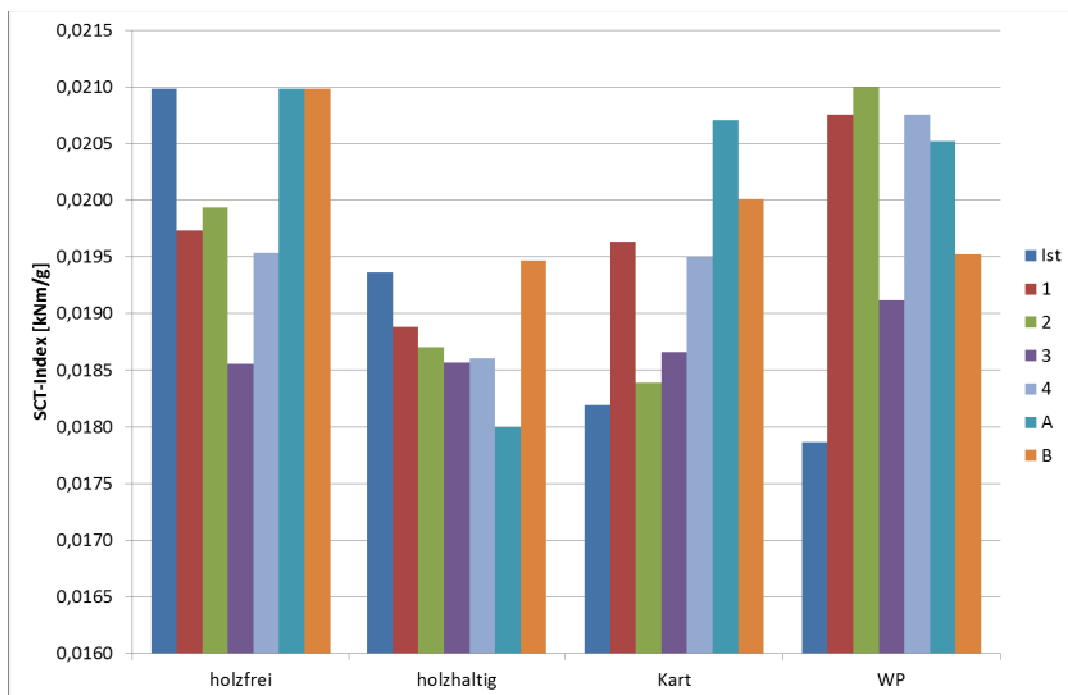


Abbildung 28: SCT-Index

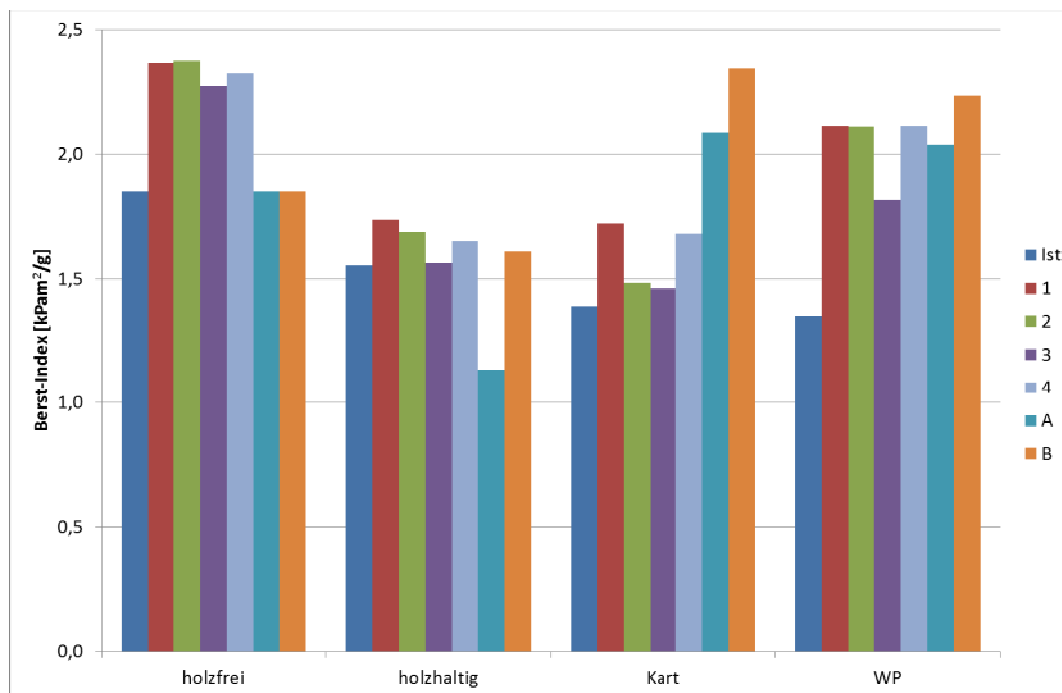


Abbildung 29: Berstindex

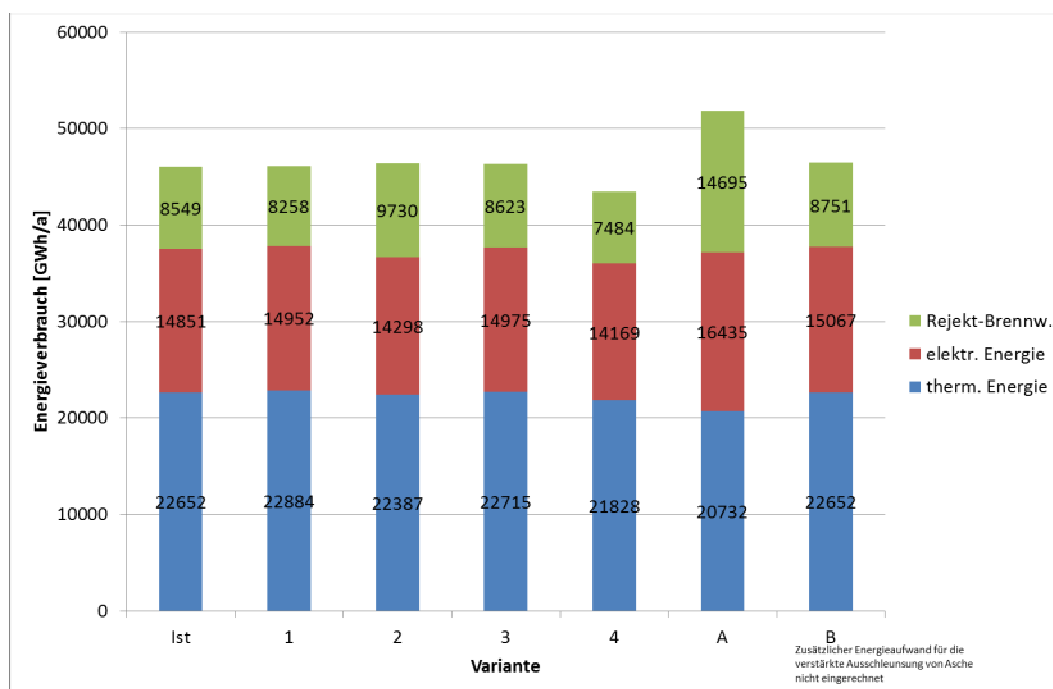


Abbildung 30: Gesamtenergieverbrauch pro Jahr

Bei der Ermittlung des Energiebedarfs (Abbildung 30) ist zu beachten, dass ein zusätzlicher Aufwand für den Betrieb einer Entaschung in der Stoffaufbereitung und alle damit in Verbindung stehenden Folgeaufwendungen nicht berücksichtigt wurde. Grund hierfür ist insbesondere, dass ausreichend selektive verfahrenstechnische Lösungen für Altpapierstoffe für Verpackungspapiere derzeit nicht verfügbar sind.

6.3 Schlussfolgerungen - Gesamtbewertung der Kaskaden

Die alternative Kaskade 4 stellt insbesondere unter Nachhaltigkeitsaspekten eine interessante Alternative zur bestehenden Faserstoffkaskade dar. Sie eröffnet die Möglichkeit der Herstellung leichterer Verpackungen und macht Verpackungspapiere unabhängig von den durch den Einsatz von grafischen Altpapieren bedingten Zwängen (Mineralöl, zurückgehende Bereitstellung grafischer Altpapiere). Diesen Chancen stehen allerdings Risiken in Gestalt noch zu lösender technologischer Probleme gegenüber (getrennte Erfassung bzw. Trockensortierung holzfreier Verpackungen, Bleiche brauner Verpackungspapiere).

Ein Übergang von der aktuellen Faserstoffkaskade zur Kaskade 4 ist ein längerer Prozess. In den Zwischenzuständen - repräsentativ steht dafür die Kaskade 3 - sind unter Qualitäts- und Energieaspekten keine Nachteile für die jeweiligen Papierprodukte abzusehen. Damit erscheint eine Entwicklung hin zu einer veränderten Fasernutzung grundsätzlich möglich zu sein.

Aus der Sicht einer grundlegenden Verbesserung der Festigkeitseigenschaften von Verpackungspapieren sind auch die Kaskaden A und B attraktiv. Mit Ausnahme der Festigkeitseigenschaften der Zeitungs- und Magazinpapiere im Rahmen der Kaskade A sind auch für die grafischen Papiere keine nennenswerten Nachteile errechnet worden. Der erhöhte Bedarf an Frischfasern zur Herstellung von Verpackungspapieren zieht aber einen deutlich höheren Energieverbrauch bei der Herstellung der Primärfaserstoffe nach sich. Durch Maßnahmen der Gewichtsreduzierung (vgl. Kaskade 4) kann die Gesamtenergiebilanz verbessert werden. Ob gegenüber dem Ist-Zustand der Gesamtenergieverbrauch reduziert werden kann muss in Frage gestellt werden. Sowohl für die Herstellung von Zeitungs- und Magazinpapieren in Kaskade A als auch für die Herstellung von Verpackungspapieren in Kaskade B sind neue Technologien einer effektiven Entaschung grafischer Altpapiere bereitzustellen.

7 Anhang

7.1 Laboranweisung

INFOR 162 R: Anweisung zur Erstellung Blätter mit unterschiedlichem Anteil der Mittelfraktion

Ziel der Untersuchung ist es herauszufinden, wie sich die Papiereigenschaften ändern, wenn dem Altpapierstoff die R100 und R200 Fraktionen ganz oder teilweise entzogen werden. R100 und R200 wird nachher als MF bezeichnet. Die experimentelle Arbeit gliedert sich in vier Stufen: Gewinnung der Einzelfraktionen, den Altpapierstoff neu zusammenzusetzen, Blattbildung und Papierprüfung.

Vorbereitung

Altpapier entsprechend der Mischungsverhältnisse mischen und über Nacht einweichen, mit 100.000 Umdrehungen desintegrieren (hohe Anzahl der Umdrehungen nötig wegen hohem Stippengehalt speziell bei 4.03).

A) Gewinnung der Einzelfraktionen

Vom Ausgangsstoff werden 4 x 10 g otro mit dem McNett-Gerät fraktioniert (die Anzahl der Fraktionierungen muss eventuell angepasst werden, falls nicht genug Stoff vorhanden ist). Der D200 Feinstoff wird in Büten aufgefangen. Die aufgefangenen Feinstoffe werden über Nacht sedimentiert. Das darauf stehende Wasser wird !vorsichtig! mit einem Schlauch oder einer Pumpe entfernt. Normalerweise ist es nicht möglich die untersten ca. 10 cm Wasser zu entfernen, ohne dass Feinstoff aufgewirbelt und entfernt wird. Daher wird der Rest in ein Fass mit geringerem Durchmesser umgefüllt und erneut über Nacht sedimentiert und das überstehende Wasser entfernt.

Die Rückstände auf den Sieben R30, R50, R100 und R200 werden in einem Fläschchen gekühlt aufbewahrt.

B) Fraktionen zusammensetzen

Der Ausgangsstoff enthält einen gewissen Anteil an D200. Durch die Sedimentationsmethode werden leider nicht alle D200 Feinstoffe aufgefangen. Würde man alle Fraktionen nach der Fraktionierung wieder zusammenmischen wäre der D200 deshalb unterrepräsentiert. Über das aufgefangene Volumen und die Stoffdichte kann man errechnen wie viel Prozent der Feinstoffe verloren gegangen sind (Achtung: durch die Stoffdichtebestimmung gehen auch Feinstoffe „verloren“ und stehen damit nicht zur Blattbildung zur Verfügung).

Die feuchten Rückstände R30 bis R200 werden einzeln ausgewogen und ein dem Feinstoffverlust entsprechender Anteil wird verworfen.

Die einzelnen Fraktionen werden dann entsprechend der Anforderungen (siehe Versuchsmatrix Blattbildung) zusammengesetzt. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Fraktionen R30 bis R200 nach dem Mischen erneut 6.000 Umdrehungen desintegriert werden sollten, um entstandene Stippen aufzulösen.

C) Blattbildung

Die Blattbildung erfolgt im „Kreislauf-Modus“: 4 Blätter werden verworfen, das fünfte Blatt kann verwendet werden (mindestens drei Blätter sollen gebildet werden).

Bestimmung des Mahlgrades und WRVs.

Folgende Messungen werden durchgeführt

- Zugprüfung
- SCT
- Füllstoffgehalt
- Flächenmasse
- Dichte/Dicke.

7.2 Berechnung Effizienzfaktor

$$\eta_{Trocknung} = \frac{\text{Theoretischer_Energiebedarf}}{\text{Praktischer_Energiebedarf}}$$

Sowohl die Bestimmung des theoretischen als auch der industriellen Energiebedarfs muss mit einigen Zwischenschritten durchgeführt werden.

$$\text{Theoretischer_Energiebedarf} = \text{Produzierte Menge} * \text{WRV} * \Delta h_v$$

Die produzierte Menge entspricht der in Kapitel 6.1 dargestellten Menge für VP1 und VP2. Es wurde weiterhin angenommen, dass diese Papiere ausschließlich aus den AP Sorten 1.02, 1.04 und 4.03 bestehen, die entsprechenden Einsatzmengen wurden dem VDP Leistungsbericht entnommen, da sich das WRV der einzelnen Sorten unterscheidet wurde für die Berechnung ein Einsatzmengen gewichtetes Mittel benutzt.

Der praktische Energiebedarf wurde ähnlich ermittelt. Hier wurde ebenfalls die produzierte Menge mit den in Kapitel 6.1 dargestellten thermischen Energieverbräuchen multipliziert. Die Energieverbräuche wurden dabei ebenfalls Produktionsmengen gewichtet gemittelt.

7.3 Papiereigenschaften McNett-Fraktionierung

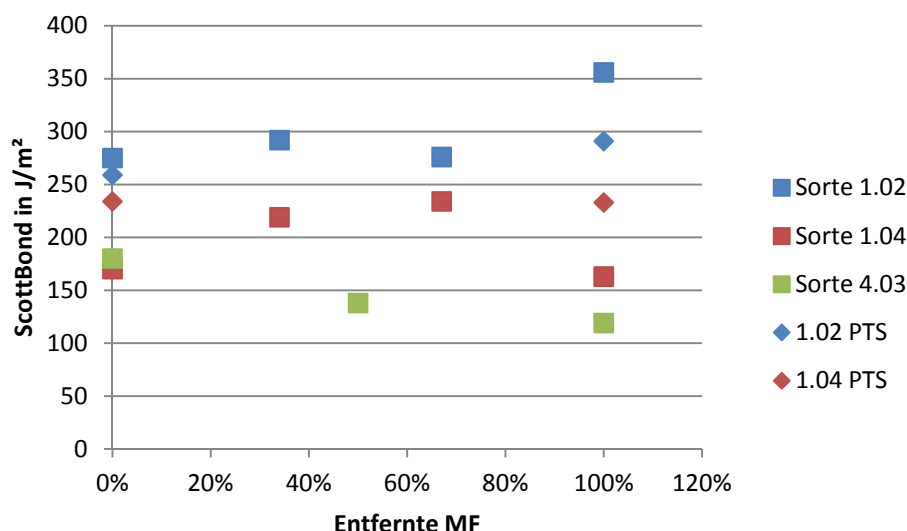


Abbildung 31: Scott-Bond als Funktion der Mittelfraktion

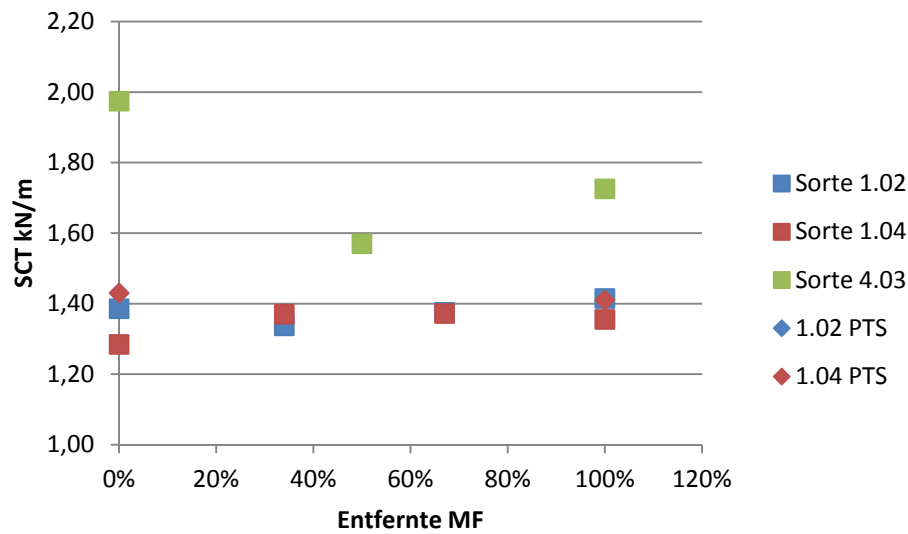


Abbildung 32: SCT als Funktion der Mittelfraktion

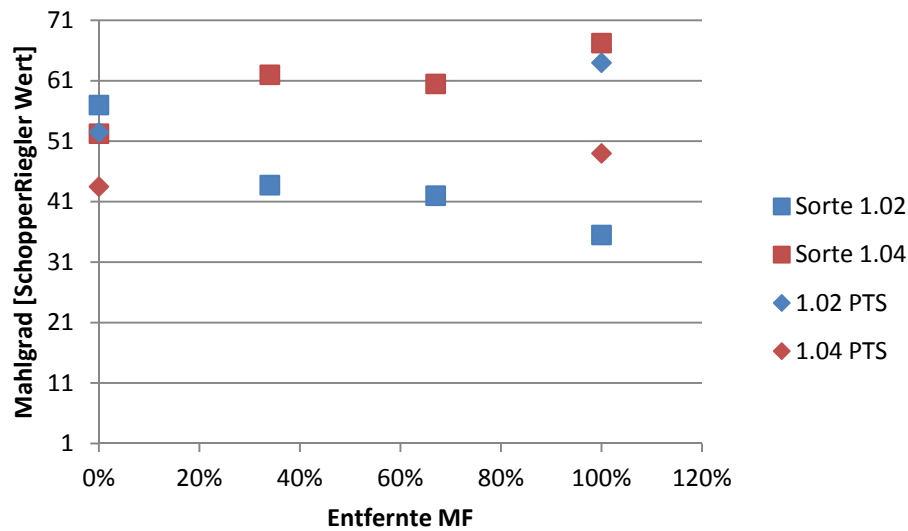


Abbildung 33: Schopper-Riegler Wert als Funktion der Mittelfraktion

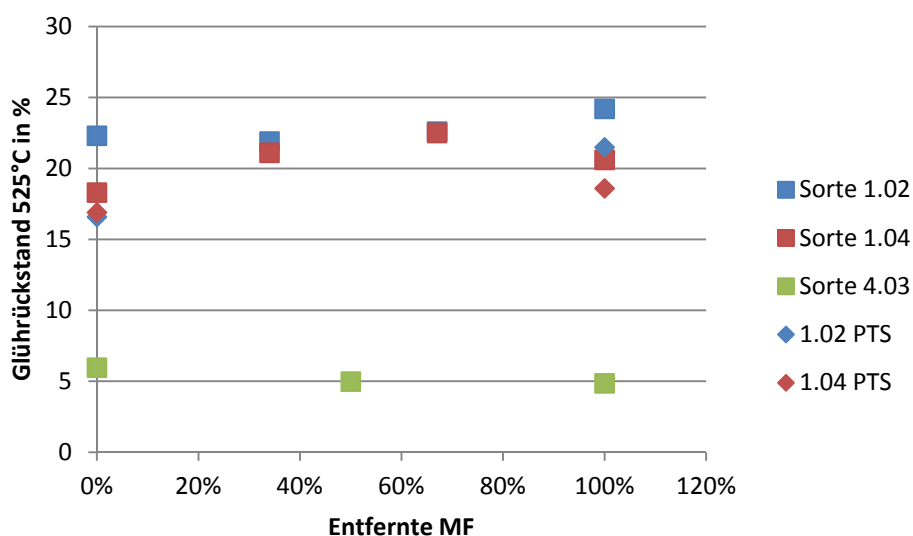


Abbildung 34: Glührückstand als Funktion der Mittelfraktion

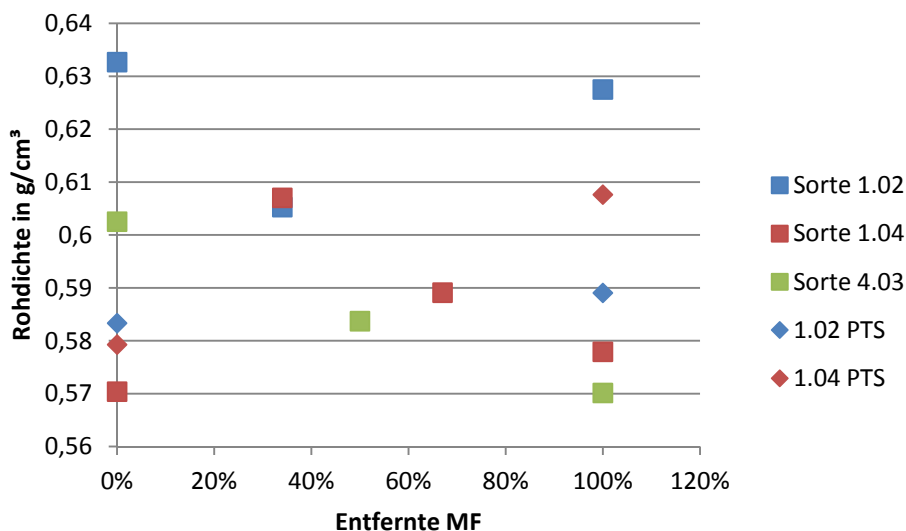


Abbildung 35: Rohdichte als Funktion der Mittelfraktion

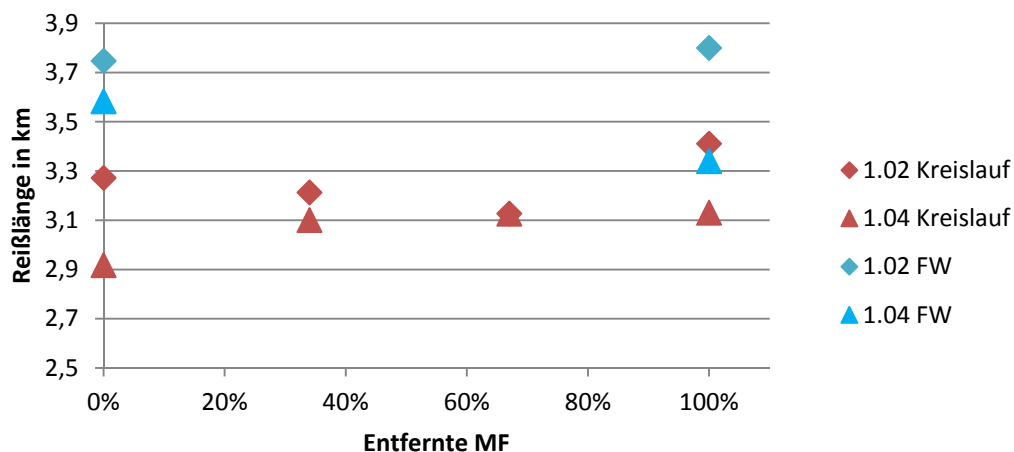


Abbildung 36: Reißlänge als Funktion der Mittelfraktion für Frisch- und Kreislaufwasserblätter

7.4 Papiereigenschaften Technikumsfraktionierung

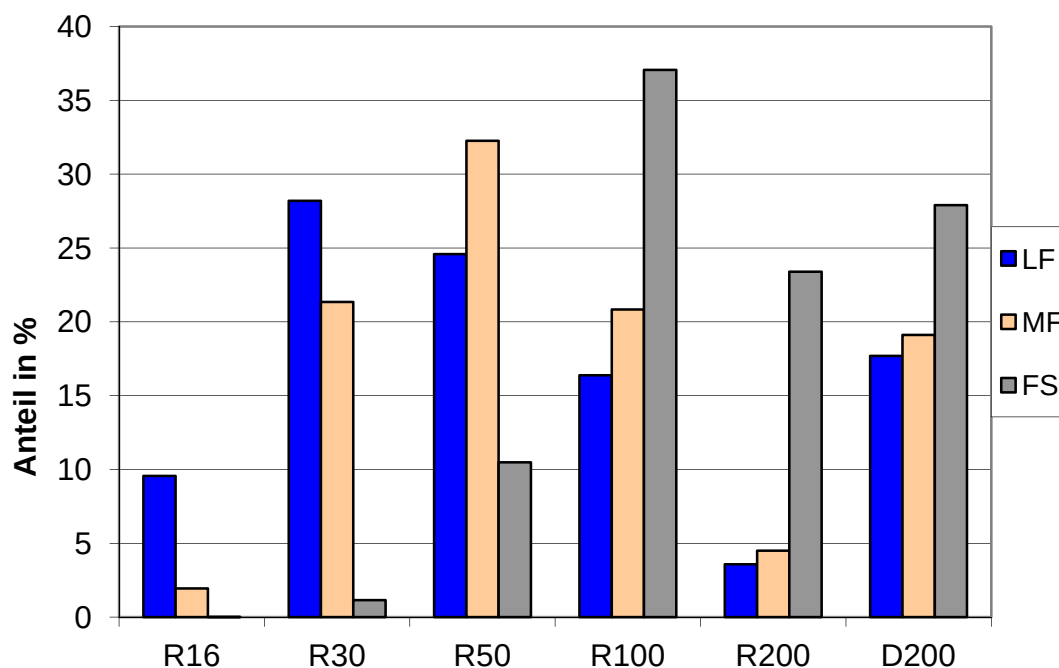


Abbildung 37: Soft-McNett Analyse der Technikumsfraktionen

Tabelle 18: Schopper-Riegler Werte Technikumsversuchsplan

Schopper-Riegler

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	55	67				
40 %	59	66,5	76,5		LF	40,5
50 %	59,5	69,5	75,5	80,5	MF	33
60 %	57	70,5	77,5		FS	78
70 %	61	72,5				
80 %	64,25					

Tabelle 19: SCT Werte Technikumsversuchsplan

SCT in kN/m

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	1,24	1,37				
40 %	1,22	1,24	1,20		LF	1,309
50 %	1,28	1,26	1,20	1,12	MF	1,328
60 %	1,30	1,27	1,23		FS	0,948
70 %	1,26	1,24				
80 %	1,18					

Tabelle 20: Rohdichte Technikumsversuche

Rohdichte in g/cm³

Anteil LF ↓ / FS →	20 %	30 %	40 %	50 %		
30 %	0,588	0,632				
40 %	0,612	0,624	0,666		LF	0,576
50 %	0,618	0,632	0,639	0,667	MF	0,564
60 %	0,606	0,621	0,660		FS	0,707
70 %	0,606	0,627				
80 %	0,613					

Tabelle 21: Quellen Code für Tabelle 15

INFOR Projekt 63

INFOR Projekt 143 R

INGEDE - File 7435

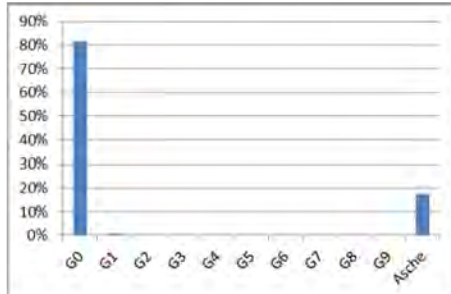
IPPC 2001

Oinonen17

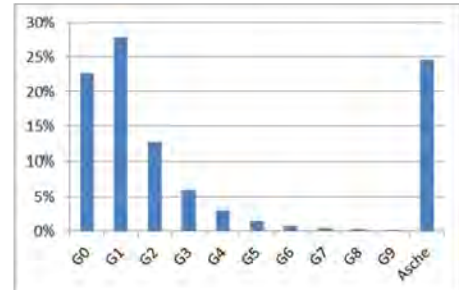
Eigene Abschätzungen

7.5 Faserstoffkaskaden

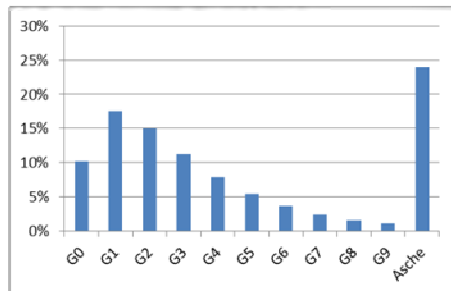
hfGP: MFA = 0,01



hhGP: MFA = 1,36



Ka: MFA = 2,65



WP: MFA = 3,06

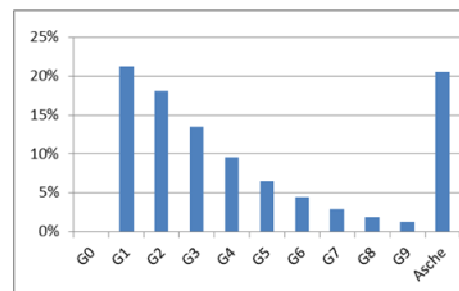
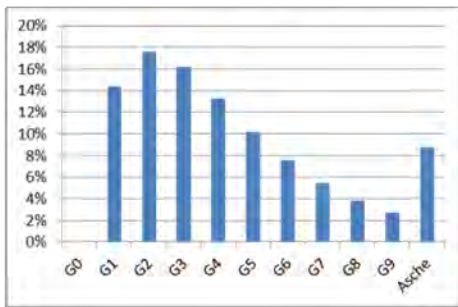
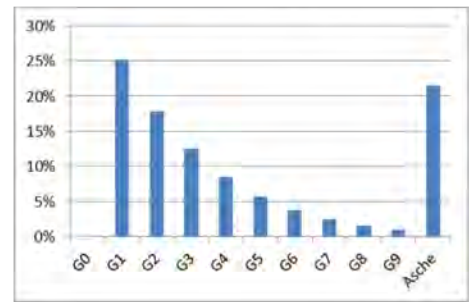


Abbildung 38: Generationenverteilung, mittleres Faseralter und Asche in den Faserstoffen der Hauptpapiersorten 2012

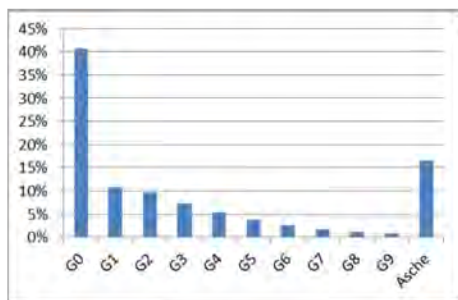
hfGP: MFA = 3,73



hhGP: MFA = 2,83



Ka: MFA = 1,60



WP: MFA = 1,32

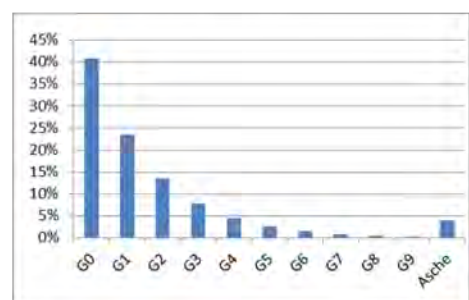


Abbildung 39: Generationenverteilung, mittleres Faseralter und Asche in den Faserstoffen der Hauptpapiersorten der alternativen Faserstoffkaskade 1

8 Literatur

- 1 H.-J. Putz, S. Weinert
Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapiersorten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen.
Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben 15408N, 2010.
- 2 S. Altmann, G. Meinl, A. Strunz
Sicherung der Produkteigenschaften von Verpackungspapieren und Karton bei sich verändernden globalen Rahmenbedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben IK-MF 090036; 2011
<http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/IK-MF090036.pdf>
- 3 D. H. Page
A theory for the tensile strength of paper.
Tappi 52(4): 674(1969).
- 4 G. Müller, I. Demel
Environmentally Friendly Paper and Board Production, in: Handbook of Paper and Board, Herbert Holik (Ed.), Wiley, 2013
- 5 N.N.
VDP – Verband Deutscher Papierfabriken (Hrsg.) 2013: Papier 2013. Ein Leistungsbericht. Bonn.
- 6 N.N.
Unfold the future. The Forest Fibre Industry. 2050 Roadmap to a low-carbon bio-economy.
Confederation of European Paper Industries, Brüssel 2011.
- 7 N.N.
VDP – Verband Deutscher Papierfabriken (Hrsg.) 2013: Papier 2013. Ein Leistungsbericht. Bonn.
- 8 N.N.
Ecolnvent Database, ecoinvent Centre, St-Gallen
- 9 R. Spörl, A. Wagenknecht H.-J. Öller
PTS-Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben "Prognose der temperaturabhängigen Rest-CSB-Freisetzung", IGF 14696 BR.
http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/AiF_14696.pdf
(Zugriff: 24.09.2013)
- 10 N.N.
Infobrief Altpapier, Ausgabe 04/2013 - April 2013, MRB International GmbH (Hrsg.), Coesfeld
- 11 H. Kröling
PMV, mündliche Mitteilung, 18.04.2013
- 12 www.foex.fi (Zugriff: 20.09.2013)
- 13 J. Bösner, S. Schabel, W. Dietz, J. Kappen, G. Meinl, D. Römer
Ressourcenoptimiertes Produktdesign. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben INFOR 143 R, VDP 2012
- 14 S. Altmann, G. Meinl, A. Strunz
Sicherung der Produkteigenschaften von Verpackungspapieren und Karton bei sich verändernden globalen Rahmenbedingungen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben IK 090036.
<http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/Dokumente/Forschung/Forschungsprojekte/IK-MF090036.pdf>
- 15 G. Hirsch
Altpapierfeinstoffe – Trennbarkeit und Festigkeitspotenzial. Dissertation. Darmstadt, 2012.
- 16 I. Demel, J. Kappen, A. Kersten, H.-J. Putz
Bewertung von Maßnahmen zur Problemlösung von Mineralöl in Verpackungspapieren und Karton.
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben INFOR 155, VDP 2012
- 17 H. Oinonen
Jüngste Fortschritte in der Zellstoff- und Papiertechnologie. Wochenblatt für Papierfabrikation, 15-16/2009, S 716-725