

# **Sicherung der Runnability von SC- und LWC-Papier bei kostenoptimaler Substitution von Zellstoff durch deinkten Altpapierstoff**

## **Ensuring the runnability of SC and LWC papers made from deinked recycled fibre pulp as a cost-effective substitute for chemical pulp**

Dr. Klaus Erhard, Dipl.-Ing. (FH) Jens Kretzschmar

### **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung / Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielstellung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Armierungswirkung von Recyclingfaserstoffen im Vergleich zu Frischfaserstoffen</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Benchmarks der Industrie</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Steuerung der Bruchzähigkeit durch gezielten Faserstoffeinsatz</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Steuerung der Bruchzähigkeit durch gezielte Aufbereitungsmaßnahmen</b>	<b>17</b>
	7.1 Zellstoffmahlung	18
	7.2 Sortierung des DIP-Stoffes und Mahlung der Langfaserfraktion	19
	7.3 DIP-Bleiche	22
<b>8</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>24</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>26</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>27</b>

## 1 Zusammenfassung / Abstract

### Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Armierungsanforderungen an SC- und LWC-Papiere auf der Grundlage von Bruchzähigkeitsmessungen zu definieren, um die Rohstoffeinstandskosten durch die Steigerung des DIP-Anteils und Reduzierung des Zellstoffeinsatzes ohne Armierungsverlust zu senken. Die Bruchzähigkeit eines Papiers steht im direkten Zusammenhang zur Armierung und damit zu dessen Abrissneigung. Es wurden die Grenzen abgesteckt, in denen kostenoptimale Faserstoffrezepturen ohne Qualitätsverlust einsetzbar sind.

Es erfolgten Labor- und kleintechnische Untersuchungen zur Steigerung der Armierungswirkung durch gezielte Faserstoffauswahl, Variation der Rezeptursammensetzung, Mahlung von Zellstoff, selektive Mahlung der DIP-Langfaserfraktion und die Einstellung bruchzähigkeitsoptimaler Bedingungen der alkalischen Peroxidbleiche. Industriell erzeugte SC-Papiere erreichten Bruchzähigkeitsindizes zwischen 3 mJm/g und 5 mJm/g (MD-CD-Mittelwert). Der Bruchzähigkeitsindex der LWC-Papiere lag aufgrund des geringeren Füllstoffanteils (max. 16%) zwischen 6 und 7 mJm/g.

Der Bruchzähigkeitsindex korrelierte in starkem Maße mit dem Reinforcement-Index, dem Quotienten, gebildet aus „Faserlänge \* Faserdurchmesser / Faserwandstärke“ sowie dem NIR-spektroskopisch bestimmten Holzstoffgehalt. Es war dabei nahezu gleichgültig, ob die armierungsrelevanten Langfasern aus Frischzellstoff oder Recyclingfaserstoff stammten. Verschiedene Faserstoffrezepturen reagierten hinsichtlich ihres Bruchzähigkeitsindex unterschiedlich sensibel auf die Füllstoffzugabe.

Alle Zellstoffe durchliefen mit der Mahlung ein sortenspezifisches Bruchzähigkeitsmaximum. Durch die abgestimmte Mahlung eines eingesetzten Zellstoffes erfolgte ein Bruchzähigkeitsanstieg eines Musterpapiers mit 15% Zellstoffanteil um etwa 15 %, wobei sich die Verbesserung der Armierungswirkung des Zellstoffes überproportional stark in der Faserstoffrezeptur auswirkte.

Durch eine Optimierung der alkalischen Peroxidbleiche von DIP-Stoff wurde die Bruchzähigkeit kleintechnischer Musterpapiere mit 50% DIP-Anteil um 14 % erhöht. Mit der Mahlung der Langfaserfraktion eines DIP-Stoffes wurde nur bei niedrigen Mahlkantenbelastungen (0,4 J/m) eine weitere Bruchzähigkeitssteigerung erreicht. Es wurden damit Wege für eine Flächengewichtssenkung, eine Qualitätssteigerung und geringe Rohstoffeinstandskosten aufgezeigt.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

Mit den erarbeiteten Erkenntnissen und Vorgehensweisen steht das Dienstleistungswerkzeug „Sicherung der Armierungswirkung“ für die Beratung von Faserstoff- und Papiererzeugern, -zulieferern und -verarbeitern zur Verfügung.

---

**Danksagung**

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Nr. IW 050274 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm GmbH gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

---

**Abstract**

The research project was aimed at defining the reinforcement requirements to SC and LWC papers on the basis of fracture toughness measurements, in order to save raw material costs by the increased use of DIP instead of chemical pulp fibres without reinforcement losses. The fracture toughness of paper is directly connected with its reinforcement properties and, thus, tearing behaviour. Limits have been identified for the possible use of cost-optimized furnishes without quality losses.

Laboratory and pilot-scale tests were performed to study the reinforcement-enhancing effects of targeted pulp selection, furnish variations, chemical pulp refining, the selective refining of long-fibre DIP fractions and of parameter settings in alkaline peroxide bleaching optimal for fracture toughness. The fracture toughness indices of industrial SC papers were in the range of 3 mJm/g to 5 mJm/g (MD-CD average), those of LWC papers in the range of 6 to 7 mJm/g due to the lower filler contents (max. 16%).

The fracture toughness index correlates strongly with the reinforcement index, the quotient of „fibre length \* fibre diameter / fibre wall thickness“ and the groundwood content measured by NIR spectroscopy. It didn't make much difference whether the long fibres relevant to reinforcement had come from virgin or recycled-fibre pulps. The sensitivity of fracture toughness indices to filler additions varied, depending on the furnish recipe.

All chemical pulps passed their grade-specific fracture toughness maxima during refining. Adjusted refining conditions of the chemical fibres led to a 15% increase in the fracture toughness of a model paper containing 15% chemical fibres, with the enhanced reinforcement effect of these fibres being noticeable over-proportionately in the furnish.

Optimally adjusted alkaline peroxide bleaching of DIP was found to increase the fracture toughness of 50% DIP-based model papers by 14%. Refining of a long-fibre DIP fraction led to further fracture toughness gains only in the case of low refiner edge loads (0,4 J/m). The results indicate possible ways of grammage reduction, quality increase and lower furnish costs.

The aim of the research project has been achieved.

The findings and procedures elaborated in the project are available to pulp and paper producers, their suppliers and converters as a service tool titled „Ensuring the reinforcement effect“.

---

---

**Acknowledgement**

The results presented in this report were obtained within the scope of research project No. IW 050274 funded by the Federal Ministry of Economics and Technology – under the umbrella of EuroNorm – in the programme for the "Promotion of Research, Development and Innovation in Small and Medium-sized Enterprises and External Industrial Research Institutions in the New German Countries". We would like to express our gratitude for this funding and support.

---

**2 Zielstellung****Ziel**

Das Projekt verfolgte die Hauptziele:

- Definition der Festigkeitsanforderungen an SC- und LWC-Papiere auf Basis der Bruchzähigkeitsmessung und der MAPS-Analyse zur Charakterisierung der Armierungswirkung und Abrisswahrscheinlichkeit,
- Senkung der Rohstoffeinstandskosten für SC- und LWC-Papiere durch Steigerung des DIP-Anteils und Reduzierung des Zellstoffanteils in der Papierrezeptur,
- Sicherung der auf Armierungswirkung zurückzuführenden Festigkeit von LWC- und SC-Papieren durch Untersuchungen zur Bruchzähigkeit oder MAPS-Analyse als Grundlage kostenoptimaler Rezepturen und
- Aufbau eines Dienstleistungs-Tools zur Sicherung der Stoffqualität (Rezeptur) bei kostenoptimalem Rohstoffeinsatz für gleiche oder bessere Produktqualität.

---

**Rahmen der Untersuchung**

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen wurden an Stoffen und Papieren der industriellen Praxis vorgenommen, die systematischen Aufbereitungsversuche zur Steigerung der Qualität des DIP-Stoffs erfolgten im Technikum der PTS Heidenau. Der experimentelle Umfang wurde durch Anwendung der statistischen Versuchsplanung optimal gestaltet.

---

### 3 Stand der Technik

#### **SC-Papiere (super- calendered)**

Bei SC-Papieren handelt es sich um hochgefüllte und super-kalandrierte Papiere im Flächenmassebereich von etwa 39 – 80 g/m<sup>2</sup>, wobei der bevorzugt erzeugte Bereich der Flächenmasse zwischen 50 und 60 g/m<sup>2</sup> liegt. SC-Papiere werden vor allem zu Magazinen, Katalogen, Werbeeinlagen und Flyern verarbeitet. Dabei wird dieses Papier überwiegend im Tiefdruckverfahren bedruckt.

Hinsichtlich der erzeugten Qualitätsstufen unterscheidet man zwischen SC-A- und SC-B-Papieren, wobei die höhere Qualitätsstufe des SC-A-Papiers sich durch vorrangigen Einsatz von Holz- und Zellstoff auszeichnet und SC-B-Papier mit wachsendem DIP-Anteil erzeugt wird.

Zur Erzeugung der SC-A-Papiere setzt sich der Faserstoffanteil etwa zu 70 – 90 % aus Holzstoffen [SGW (Steinschliff), PGW (Druckschliff) oder TMP (Thermo-Mechanical Pulp)] und zu 10 – 30 % aus Zellstoff zusammen. Der Füllstoffgehalt hängt von der angestrebten Flächenmasse ab und kann bei einem 60 g/m<sup>2</sup> Papier bis zu 35 % betragen. Meist wird Kaolin eingesetzt.

Etwas geringeren Qualitätsanforderungen kann das SC-B-Papier genügen. SC-B-Papiere enthalten deshalb mehr Holzstoffe (ca. 75 – 90 %) und der Zellstoffanteil ist auf 25 % begrenzt. Der Füllstoffgehalt liegt hier im Bereich von 8 – 15 %. In diesem Papier wurden zuerst Holz- und Zellstoffanteile durch bis zu 30 % DIP-Stoff ersetzt [1, 2, 3].

---

#### **LWC-Papiere (light-weight coated)**

LWC-Papiere besitzen ähnliche Anwendungsgebiete wie SC-Papiere und werden vorrangig im Offsetverfahren bedruckt. Der erzeugte Bereich der Flächenmasse liegt etwa zwischen 39 – 70 g/m<sup>2</sup>, wobei der Strichauftrag 5 – 12 g/m<sup>2</sup> und Seite ausmacht und von der Flächenmasse des Papiers und den Qualitätsanforderungen abhängt.

Der Zellstoffanteil in der Faserstoffmischung ist aufgrund der höheren Festigkeitsanforderungen deutlich höher als beim SC-Papier und kann 30 – 50 % betragen. Dem entsprechend werden 50 – 70 % Holzstoffe eingesetzt, wobei sowohl Steinschliff als auch Refinerschliff zugemischt werden. Hierbei sorgt der Steinschliff für gute optische Eigenschaften und der Refinerschliffanteil steigert die Festigkeit des Papiers. Um möglichst wenig Festigkeitsverluste im Rohpapier zu erleiden, beträgt der Füllstoffgehalt hier nur 4 – 10 % und wird durch den Gautschbruch- und Ausschusseinsatz initiiert [1].

Da die Festigkeits- und Qualitätsanforderungen an LWC-Papier beim Streichen und Bedrucken hoch sind, hat hier der DIP-Einsatz bisher nur für Papiere höherer und mittlerer Flächenmasse Bedeutung erlangt, wobei weniger Zellstoff eingesetzt wird und der DIP-Gehalt im Stoff durch den tolerierbaren Füllstoffgehalt im Rohpapier begrenzt ist [3, 4, 5, 6, 7, 8].

---

---

**Festigkeitsanforderungen an SC- und LWC-Papiere**

Die erzeugten Bereiche der Flächenmasse machen deutlich, dass an diese Papiere erhebliche Festigkeitsanforderungen gestellt werden. Erreichen diese Papiere die in der Papiererzeugung und Verarbeitung geforderten Festigkeitsanforderungen nicht, so kommt es zu vermehrten Bahnabrissen. Sie führen beim Streichen und Satinieren in der Papiererzeugung und beim Bedrucken zu Stillständen und Produktivitätsverlusten sowie zur Reklamation dieser Papiere.

---

**Faserstoffeinsatz**

In holzhaltigen SC- und LWC-Druckpapieren wird die Festigkeit des Papiers traditionell durch einen Rohstoffmix aus Holzstoffen sowie Armierungsfaserstoff sichergestellt. Hierbei kommen neben praktisch splitterarmen Holzstoffen vor allem kostenintensive, hochwertige Armierungszellstoffe zum Einsatz. Für beide Papiere bestehen ähnliche Eigenschaftsanforderungen an den Faserstoffmix hinsichtlich Papierfestigkeit und Runnability.

---

**Substitution von Zellstoff und Holzstoff durch DIP**

Der erhebliche Preisdruck in jüngster Vergangenheit hat dazu geführt, dass die Hersteller der ungestrichenen und gestrichenen Druckpapiere gezwungen sind, bisher eingesetzte Holz- und Zellstoffanteile vermehrt durch deinkten Altpapierstoff (DIP) zu ersetzen. Dieser Weg wird von der deutschen Papierindustrie begangen und hat sich bereits für die oberen Flächenmassebereiche als gangbar erwiesen. Dies ist der hohen Papierrecyclingquote und der Kooperationen zwischen den Papiererzeugern und Lieferanten von Systemkomponenten für Stoffaufbereitung und Papiermaschine zu verdanken.

Diese Entwicklung basiert vor allem auf empirischen Untersuchungen und wurde in Abhängigkeit von der Papierqualität vorangetrieben. So ist heute für die höheren Flächenmassebereiche (MWC) und sowie für SC-B-Papier der Einsatz von DIP Stand der Technik.

---

**Füllstoff- und Hilfsmiteileinsatz**

Seitens der Füllstoffeinsätze bestehen Unterschiede, die vor allem durch die Festigkeitsanforderungen an das Rohpapier diktiert werden. Während der Ganzstoff von SC-Papieren die notwendigen Füllstoffe zur Einstellung der Papiereigenschaften hinsichtlich der Optik und Oberflächenbeschaffenheit enthält, ihr Anteil liegt für hochwertige Sorten (SC-A-Papiere) im Bereich von 30 bis 35 %, dürfen die Rohpapiere für LWC nur begrenzt Füllstoff enthalten, um die Runnability der Bahn durch Wiederbefeuchten beim Streichen zu gewährleisten. Nach dem Streichen besitzen diese Papiere ebenfalls einen Pigmentgehalt im Bereich von 24 – 38 % in Abhängigkeit von Strichauftrag und Flächenmasse.

Außerdem bestimmt das Druckverfahren den Füllstoffeintrag in SC-Papieren. Während beim Tiefdruck höhere Füllstoffgehalte tolerierbar sind erfordert das Offsetverfahren, bedingt durch die hochviskosen Druckfarben, eine erhöhte Rumpf- und Spaltfestigkeit des Papiers, der man auch durch geringere Füllstoffgehalte im SC-Papier nachkommt. Für LWC-Papiere wird das Herausreißen von Strichpartikeln beim Offsetdruck durch den Strichaufbau zum Rohpapier vermieden, wobei die Penetration der Streichfarbe in die Papieroberfläche und die klebende Wirkung der Strichbindemittel für die Haftung des Striches sorgen. Außerdem können Trockenfestmittel die Faser-Faser-Bindung in diesen Produkten verstärken.

---

---

**Funktion des Holzstoffes**

Holzstoffe tragen vor allem zur Ausbildung der optischen Papiereigenschaften und der notwendigen Steifigkeit und der Papierstruktur bei. Insbesondere bei Papieren des unteren Flächenmassebereichs sind die Anforderungen an die Qualität des Holzstoffes hoch. Das betrifft die vom Holzstoff dominierten SC-Papiere hinsichtlich Feinstoffgehalt und Splittergehalt, gemessen als Rückstand R16. Die Feinstoffe erzeugen dabei im Verbund mit den Füllstoffen beim SC-Papier die geforderte Oberflächenbeschaffenheit und Bedruckbarkeit des Papiers beim Kalandrieren. Splitter und gröbere Formbestandteile sind nicht tolerierbar. Sie vermindern die Qualität und würden als Defektstellen im Papier die Runnability und Printability verschlechtern.

---

**Funktion des Zellstoffes**

Die Zellstoffe in holzhaltigen Druckpapieren dienen der Armierung und damit der Sicherung der Runnability dieser Papiere, sowohl in der Erzeugung beim Streichen als auch in der Verarbeitung beim Bedrucken. Unter Armierung ist die Festigkeit zu verstehen, die die Ausbildung eines Anrisses, ausgehend von einem Papierdefekt, verhindert. Dadurch werden Abrisse reduziert oder vermieden.

Neben der Verbesserung der Armierungswirkung und der Steigerung der initialen Nassfestigkeit, verursacht Zellstoff durch Verschlechterung von Formation und Opazität die auch Eigenschafts- und Kostennachteile [9].

Hinsichtlich der morphologischen Eigenschaften des einzusetzenden Zellstoffs ist der Auswahl des am besten geeigneten Zellstoffs größte Aufmerksamkeit zu schenken, da durch Mahlung die Tear- und Tensile-Festigkeitseigenschaften sowie die Bruchzähigkeit der Druckpapiere nur unwesentlich beeinflusst aber die Entwässerungsfähigkeit und Trocknung verschlechtert werden [9].

---

**Funktion des DIP-Stoffes**

Der Einsatz von DIP-Stoff in holzhaltigen Druckpapieren hat Auswirkungen auf grundlegende Papiereigenschaften. Während sich der Weißgrad, die initiale Nassfestigkeit, die Papierfestigkeit, die Armierungswirkung sowie die Runnability verschlechtern, werden die Formation und Opazität und die Dimensionsstabilität verbessert.

---

**Aufbereitungsstrategien für DIP-Stoffe**

DIP-Stoffe bedürfen einer besonderen Aufbereitung, um die optischen und mechanischen Eigenschaften in diesem Druckpapier zu erreichen. Durch eine intensive Druckfarbenentfernung, Sortierung, Bleiche und Teilentaschung werden die optischen Eigenschaften soweit aufgebessert (Weißgrad bis etwa 72%), dass diese den Anforderungen an SC- und LWC-Papiere genügen. Durch eine Mahlbehandlung der längeren Fasern und der gröberen Holzstoffbestandteile soll das Festigkeitsniveau des DIP-Stoffes angehoben und das Festigkeitspotenzial verbessert werden. Um die Faserschädigung dabei möglichst gering zu halten, erfolgt dies bei geringer Mahlungsintensität, um die Faserlänge zu erhalten und Zugfestigkeit zu entwickeln, ohne dass die Weiterreißarbeit abfällt [1 - 8, 10, 11, 12, 13]. Hier baute das Forschungsprojekt auf den Ergebnissen von LINCK und SELDER [11] auf, um die bruchmechanischen Eigenschaften holzhaltiger Druckpapiere zu erfassen. Dabei sollte erreicht werden, dass die notwendige Armierungswirkung mit geringem Zellstoffanteil gesichert wird, ohne dass die Runnability darunter leidet.

---

---

**Zugbeanspruchung der Papierbahn**

SC- und LWC-Papiere werden auf schnell laufenden Papiermaschinen erzeugt und ihre Verarbeitung erfolgt in schnell laufenden Druckmaschinen. Die erhebliche Zugbeanspruchung muss durch das Papier, d. h. durch seine Festigkeitseigenschaften, aufgefangen werden, ohne zu reißen.

---

**„in-plane“-Messung der Bruchzähigkeit**

Auf der Bruchmechanik des Papiers aufbauend wurde vom STFI in Stockholm das Verfahren der Bruchzähigkeitsprüfung (fracture toughness) gemäß SCAN-P 77 entwickelt und gemeinsam mit Fa. Lorentzen & Wettre zur kommerziellen Reife gebracht [14, 15]. Durch die Bruchzähigkeitsprüfungen werden die Spannungszustände im Bereich eines Risses beschrieben, die sich nach Zugbelastung in der Papierebene gemäß Modus I (Abb. 3.1) ergeben.

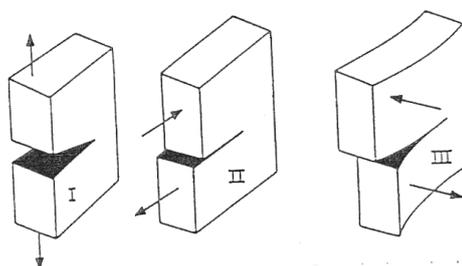


Abb. 3.1 Die drei möglichen Belastungs-Modi in der Bruchmechanik

Dies geschieht durch Zugfestigkeitsprüfung einer defektfreien und einer definiert gekerbten Probe und die numerische Auswertung des J-Integrals, welches die Belastungsintensität wiedergibt.

---

**Aussage der Bruchzähigkeitsmessung**

Mit Hilfe der Bruchzähigkeit ist es möglich, das Laufverhalten von Papier zu bewerten. Dies ist besonders wichtig, wenn man davon ausgeht, dass die Verformung an einem Papierdefekt oder einem Anriss und damit das Weiterreißen durch die Armierungswirkung der Zellstoffe oder der langen Fasern aus dem DIP-Stoff verhindert werden soll.

---

## 4 Armierungswirkung von Recyclingfaserstoffen im Vergleich zu Frischfaserstoffen

**Durchgeführte Untersuchungen** Es wurden eine Vielzahl industriell für die Erzeugung von SC- und LWC-Papier aufbereiteter Zellstoffe, Holzstoffe und DIP-Stoffe sowie ausgewählte Mischungen dieser Faserstoffe untersucht.

Die für die Armierung ausschlaggebende Größe war die an Laborpapieren gemessene Bruchzähigkeit (FTI – fracture toughness). Die Diskussion der Armierungswirkung erfolgte unter Einbeziehung des Entwässerungsverhaltens, der Fasermorphologie und des Holzstoffgehaltes.

**Armierungseigenschaften industriell eingesetzter Faserstoffe**

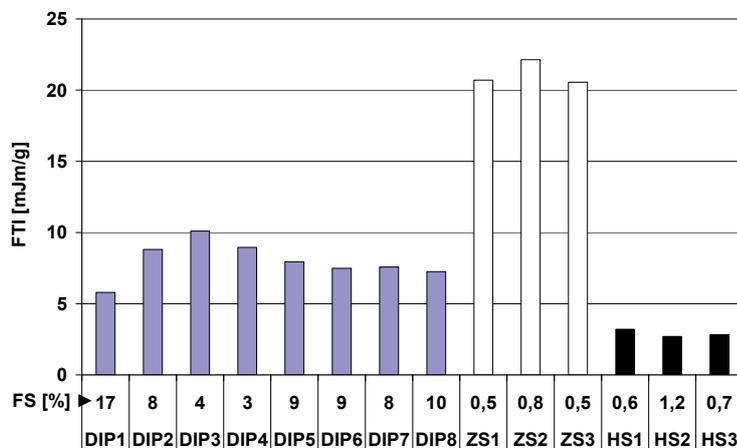


Abb. 4.1 Bruchzähigkeits-Index (FTI – fracture toughness index) industriell eingesetzter Faserstoffe

Die außerordentlich gute Armierungswirkung der Zellstoffe wurde weder durch aufgebereitete DIP-Stoffe noch durch Holzstoffe auch nur annähernd erreicht. Die Bruchzähigkeit der DIP-Stoffe lag zwischen den Werten der Zell- und der Holzstoffe. Zellstoff konnte also substituiert werden, wenn gleichzeitig auch Holzstoff substituiert wird.

Die Unterschiede zwischen den DIP-Stoffen wurden hauptsächlich durch deren unterschiedlichen Füllstoffgehalt hervorgerufen. Der Vergleich von DIP3 und DIP4 zeigte aber, dass auch Einflüsse vom Faserstoff ausgingen, welche nicht auf den Füllstoffgehalt zurückzuführen waren. Dies bedeutet, die Festigkeit der DIP-Stoffe kann durch eine gezielte Erzeugung beziehungsweise Aufbereitung beeinflusst werden und die Zellstoffsubstitution in SC- und LWC-Papieren hängt von einer gezielten Aufbereitung ab.

**Einflussgrößen  
der  
Bruchzähigkeit**

Tab. 4.1 Entwässerungseigenschaften und Holzstoffgehalt industriell eingesetzter Faserstoffe

Parameter	DIP 1	DIP 2	DIP 3	DIP 4	DIP 5	DIP 6	DIP 7	DIP 8	ZS1	ZS2	ZS3	HS1	HS2	HS3
Entwässerungswiderstand [SR]	75	61	67	57	68	69	59	73	20	47	47	75	81	82
HS im Faserstoff (NIR) [%]	64	34	56	65	64	58	63	60	8	9	8	100	100	100

Der Entwässerungswiderstand der ausgewählten DIP-Stoffe schwankte um mehr als 10 SR-Punkte. Der Einsatz von DIP gegenüber Holzstoff bot deutlich bessere Entwässerungseigenschaften. Auch für das Entwässerungsverhalten galt, dass Zellstoff durch DIP-Stoff substituiert werden konnte, wenn gleichzeitig Holzstoff substituiert wurde. Je geringer der NIR-spektroskopisch bestimmte Holzstoffgehalt (kalibrierte Messung des Ligningehalts) von Faserstoffmischungen war, desto geringer war ihr Entwässerungswiderstand und desto höher war ihre Bruchzähigkeit.

**Füllstoff-  
bereinigung**

Wegen des signifikanten Füllstoffeinflusses erfolgte für den Vergleich unterschiedlicher gefüllter Papiere eine rechnerische Füllstoffbereinigung.

Füllstoff verringert die Festigkeit der Papierstruktur auf zwei verschiedene Weisen. Zum einen werden Fasern gegen Füllstoff ausgetauscht, die Papierstruktur also linear verdünnt. Zum anderen werden Faser-Faser-Bindungen behindert und es kommt zu einem zusätzlichen Festigkeitsverlust, welcher ebenfalls mindestens linear erfolgt.

Als Ergebnis beider Effekte nimmt die Festigkeit exponentiell mit dem Füllstoffgehalt ab. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen wurde der Bruchzähigkeitsindex mit Hilfe des, als Glührückstand bei 525°C bestimmten Füllstoffanteils (FS) korrigiert:

$$FTI_{\text{füllstoffbereinigt}} = \frac{FTI}{\left(1 - \frac{\text{Glührückst. } 525^{\circ}\text{C} [\%]}{100}\right)^2} \quad (\text{Gleichung 1})$$

### Fasermorphologie und FTI

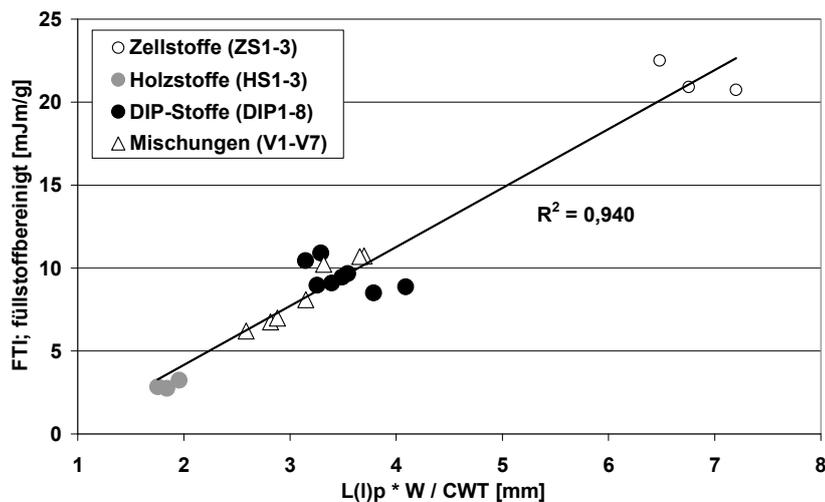


Abb. 4.2 Korrelation der fasermorphologischen Kennwerte und füllstoffbereinigtem Bruchzähigkeitsindex (Laborpapiere 80 g/m<sup>2</sup>)

Bereits die Faserlänge  $L(l)p$  zeigte eine sehr starke Korrelation zum Bruchzähigkeitsindex. Sie war für den untersuchten Mischungsbereich von Zellstoff, Holzstoff und DIP-Stoff eine armierungsbestimmende Größe. Hierbei führte die Längengewichtung der Faserlängenverteilung gegenüber Anzahl- beziehungsweise der Massengewichtung zu einem, ca. 10% höheren Korrelationskoeffizienten. Für die Korrelation war es hingegen nicht von Bedeutung, ob die dargestellte, projizierte Länge der Faser oder ihre Konturlänge verwendet wurde.

Die Einbeziehung von Faserdurchmesser ( $W$ ) und Faserwandstärke ( $CWT$ ) in den in Abb. 4.2 dargestellten Quotienten trug der Tatsache Rechnung, dass neben der Faserlänge auch die transversalen Faserdimensionen für die Armierung von Bedeutung waren. So erhöht sich die Faser-Faser-Bindungsfläche durch ein geringeres Wandstärke-zu-Durchmesser-Verhältnis aufgrund einer stärkeren Faserkollapsneigung; zudem wird die Einzelfaserfestigkeit beeinflusst.

Es wurde eine strenge Korrelation zwischen dem Quotienten „ $L(l)p \cdot W / CWT$ “ und dem nach Gleichung 1 füllstoffbereinigten Bruchzähigkeitsindex beobachtet.

### Reinforcement-Index und FTI

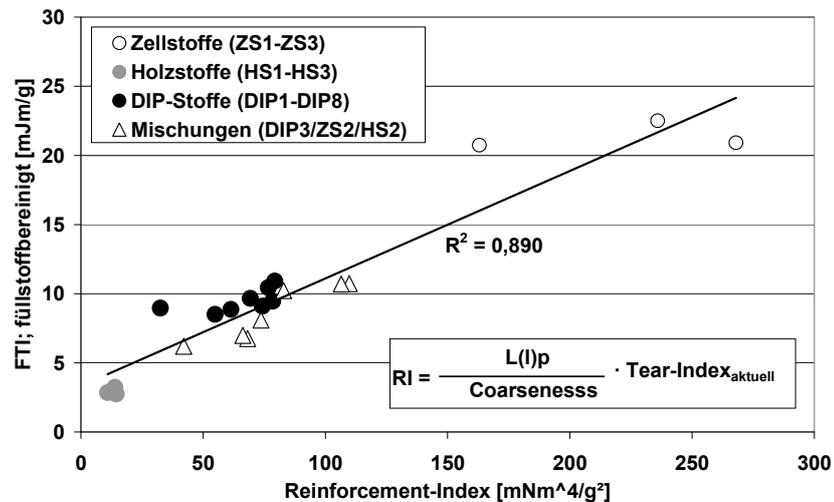


Abb. 4.3 Korrelation von Reinforcement-Index und Bruchzähigkeitsindex (Laborpapiere 80 g/m<sup>2</sup>)

Auch zwischen dem Reinforcement-Index (RI) – unter Einbeziehung der Faserlänge, aschebereinigten Coarseness und dem aktuellen, nicht füllstoffbereinigten Tear-Index – und dem füllstoffbereinigten Bruchzähigkeitsindex wurde eine starke Korrelation beobachtet.

### Feinstoffgehalt und Splitter

Ein Korrelation zwischen der Bruchzähigkeit und dem Gehalt an bindungsaktiven Feinstoff (Faserlänge < 0,2 mm) wurde nicht beobachtet. Dies bestätigten sowohl die Faserfraktionierung nach Haindl-McNett als auch die Untersuchungen der Faserlängenfraktionen mit Hilfe des FiberLab-Messgerätes.

Von Splittern oder anderen größeren Formbestandteilen ausgehende Anrisstellen sind nicht zu befürchten, alle eingesetzten Faserstoffe enthielten aufgrund ihrer industriellen Sortierung nur einen sehr geringen HF-Rückstand und keine Splitter.

## 5 Benchmarks der Industrie

**Durchgeführte Untersuchungen** Eine Auswahl von SC-, LWC- und LWC-Rohpapieren der industriellen Praxis wurden hinsichtlich ihrer Bruchzähigkeitseigenschaften beurteilt. Die Bruchzähigkeit wurde im Zusammenhang mit dem Füllstoffgehalt und dem NIR-spektroskopisch bestimmten Holzstoffanteil diskutiert.

**Papiermuster** Tab. 5.1 Untersuchte Papiermuster

Muster	Flächen- bez. Masse	Weißgrad R457 D65	Opazität C C/2
	g/m <sup>2</sup>	%	%
SC1-4	55-56	67-69	93-95
ZDP	43	60	93
LWC 1,2,4 (RP)	38-45	69-75	86-91
LWC 1-4	59-61	74-80	92-94

Die flächenbezogene Masse der untersuchten SC-Qualitäten lag im Bereich um 55 g/m<sup>2</sup>, die der LWC-Qualitäten um 60 g/m<sup>2</sup>. Vergleichend wurden auch die LWC-Rohpapiere (RP) und ein Zeitungsdruckpapier (ZDP) untersucht.

Der Strichauftrag, welcher bei den LWC-Papieren etwa ein Viertel der Papiermasse ausmachte, sorgte für sehr gute Weißgrade. Der Weißgrad der SC-Papiere reichte an den einiger LWC-Papiere heran, was den Trend, die Qualitätslücke zwischen SC und LWC-Papieren zu schließen [16] widerspiegelte.

## Bruchzähigkeit

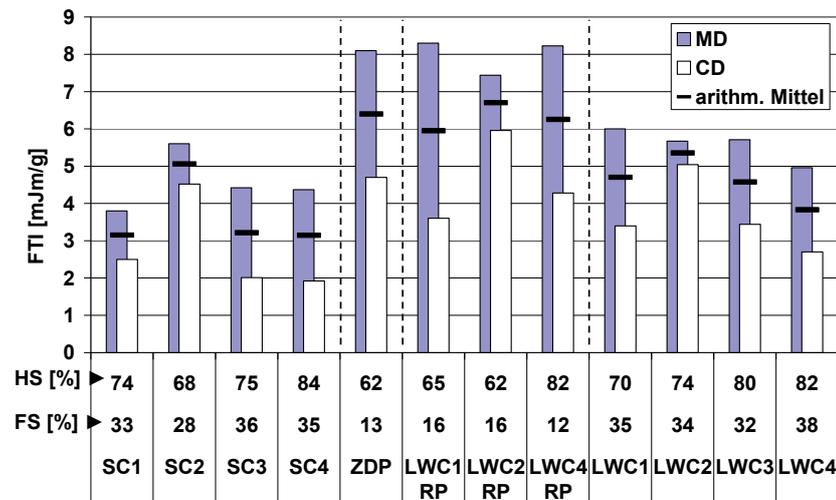


Abb. 5.1 Bruchzähigkeitsindex, NIR-spektroskopisch bestimmter Holzstoffanteil (HS) und Füllstoffgehalt (FS) industriell erzeugter Papierqualitäten

Für SC-Papiere war ein Füllstoffgehalt von 35 % Stand der Technik, höhere Bruchzähigkeitskennwerte waren durch eine Füllstoffreduktion (SC2) möglich. Die LWC-Papiere, welche auf der Basis von DIP-Stoff gefertigt wurden, enthielten ebenfalls bis zu 38 % Pigment, wobei 12 bis 16 % auf den Massefüllstoff und 18 - 24 % auf das Strichpigment entfielen. Dem Einsatz von DIP-Stoffen mit hohem Füllstoffanteil für die LWC-Erzeugung stand nichts entgegen, da auch in den untersuchten LWC-Rohpapieren ein hoher Füllstoffanteil gefunden wurde. Die Unterschiede der MD-Bruchzähigkeit zwischen den verschiedenen LWC-Papieren waren gering, zwischen den verschiedenen SC-Papieren gab es hingegen größere Unterschiede. LWC-Papiere besaßen im Allgemeinen eine höhere Bruchzähigkeit als SC-Papiere, da Pigmente hauptsächlich im Strich enthalten waren und im Gegensatz zur Füllstoffzugabe in der Masse die Faser-Faser-Bindungen weniger behindert wurden.

Auffällig waren die unterschiedlichen Längs-Quer-Verhältnisse der Bruchzähigkeit der Papiere. Für einige Papiere wurde die MD-Bruchzähigkeit auf Kosten der CD-Bruchzähigkeit weit ausgereizt (LWC1). Die Papiere, welche ein geringeres Längs-Quer-Verhältnis aufwiesen (LWC2), besaßen möglicherweise ein Optimierungspotential für die MD-Bruchzähigkeit, zum Beispiel durch eine stoffauflaufbedingte Änderung des Längs-Quer-Verhältnisses. Diese Optimierungsmöglichkeit stünde jedoch der Einstellung eines geringen MD/CD-Verhältnisses der Feuchte- oder Nassdehnung beziehungsweise der Trockenschrumpfung entgegen.

Die LWC-Papiere und das Zeitungsdruckpapier wurden mit einem vergleichbaren Holzstoffgehalt gefertigt, der Holzstoffanteil der SC-Papiere lag deutlich höher. Die Korrelation zwischen Bruchzähigkeitsindex und NIR-spektroskopisch vermessenen Holzstoffgehalt wurde an den industriell erzeugten Papieren, trotz der Quereinflüsse durch Füllstoff beziehungsweise Strichauftrag bestätigt.

**Festigkeitsvorteil der LWC-Papiere**

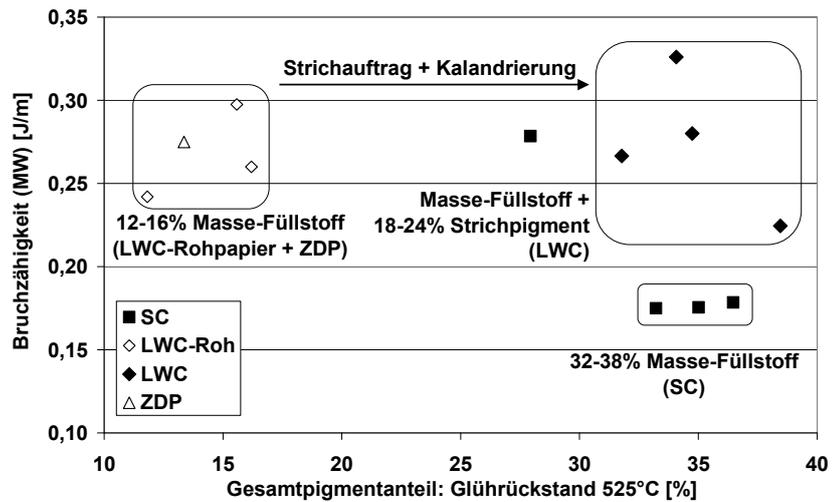


Abb. 5.2 Vorteile der LWC-Papiere

Aus der Abb. 5.2 geht der Einfluss des Gesamtfüllstoffgehaltes, der Füllstoffverteilung zwischen Strich und Masse sowie der Kalandrierung auf die Bruchzähigkeit hervor.

Die LWC-Papiere besaßen aufgrund des geringeren Massefüllstoffgehaltes einen Festigkeitsvorteil gegenüber den SC-Papieren. Der Strichauftrag und die anschließende Kalandrierung der LWC-(Roh)papiere führten zu keinem Bruchzähigkeitsverlust. Lediglich der Bruchzähigkeitsindex sank aufgrund der Erhöhung des Flächengewichtes durch den Strich.

Das Zeitungsdruckpapier war den LWC-Rohpapieren in puncto Bruchzähigkeit gleichwertig.

**FTI-Benchmarks**

Als Benchmarks für die zu erreichenden Bruchzähigkeitseigenschaften wurden die arithmetischen Mittelwerte (MW) der Bruchzähigkeitsindizes der industriell hergestellten SC- und LWC-Papiere herangezogen:

Tab. 5.2 Festigkeitsbenchmarks industriell erzeugter Papiere

Sorte		SC	LWC RP	LWC
Glührückstand 525°C	%	33	15	35
FTI (MW)	mJm/g	3,6	6,3	4,6
FTI (MW), füllstoffbereinigt	mJm/g	8,1	8,6	-

Die Papiermuster einer Sorte unterschieden sich nur geringfügig hinsichtlich der Flächenmasse und des Füllstoffgehaltes. Die Unterschiede der Flächenmasse wurden durch Verwendung des flächenmassebezogenen Bruchzähigkeitsindizes, die der Massefüllstoffgehalte durch die Füllstoffkorrektur bereinigt.

---

**Fazit** Zwischen den verschiedenen Qualitäten der SC- beziehungsweise LWC-Papiere wurden nur geringe Bruchzähigkeitsunterschiede beobachtet.

Dominierende Einflussgrößen der Bruchzähigkeit waren wie erwartet der Füllstoffgehalt in der Masse sowie der Holzstoffgehalt. LWC-Papiere profitierten hinsichtlich ihrer Bruchzähigkeit von ihrem geringeren Massefüllstoffgehalt.

---

## 6 Steuerung der Bruchzähigkeit durch gezielten Faserstoffeinsatz

**Durchgeführte Untersuchungen** Auf einer kleintechnischen Papiermaschine wurden SC-Papiere (trocken geglättet) und LWC-Rohpapiere (ungestrichen, ungeglättet) verschiedener Rezepturzusammensetzung und mit unterschiedlichem Füllstoffanteil erzeugt. Neben der Bruchzähigkeit wurden auch eine Reißkraftanalyse nach der MAPS-Methode (Mechanical analysis of paper structure) sowie Formationsmessungen durchgeführt.

---

**Eingesetzte Rohstoffe und deren Kosten**

Für die Versuche kamen Mischungen von drei, der im Abschnitt 0 vorgestellten Faserstoffe zur Anwendung. Es wurden SC-Papiere mit einem Flächengewicht von etwa 55 g/m<sup>2</sup> und LWC-Rohpapiere mit einem Flächengewicht von etwa 45 g/m<sup>2</sup> erzeugt.

Für die Rezepturkosten wurden der aktuelle Zellstoffspreis (NBSK) von 565 €/t, ein angenommener Preis für integriert erzeugten Holzschliff von 340 €/t und die Kosten für einen aufgebesserten DIP-Stoff von 300 €/t zu Grunde gelegt.

Tab. 6.1 Eingesetzte Faserstoffrezepturen (R1 - R5) und deren Kosten

Rezeptur		R1	R2	R3	R4	R5
Anteil ZS	%	-	15	30	-	70
Anteil HS	%	-	35	70	70	-
Anteil DIP	%	100	50	-	30	30
<b>Kosten</b>	<b>€/t</b>	<b>300</b>	<b>353</b>	<b>406</b>	<b>328</b>	<b>482</b>

---

**Füllstoffe** Als Füllstoff kam eine Mischung von 33 % gefällttem Calciumcarbonat (PCC) und 66 % Kaolin zum Einsatz. Für SC-Papiere wurde ein Gesamtfüllstoffgehalt von 15 % beziehungsweise 30 % angestrebt. Zudem wurden SC- und LWC-Rohpapiere ohne Füllstoffzusatz erzeugt, welche nur den durch den DIP-Stoff eingetragenen Füllstoff enthielten.

---

**Hilfsstoffe** Der Faserstoffsuspension wurden im Stoffauflauf 0,15 % eines kationischen Retentionsmittels zugesetzt.

---

**Kalandrierung (SC-Papiere)** Die SC-Papiere wurden im kleintechnischen Kalandrierer mit einer Linienkraft von 200 kN/m, bei einer Temperatur von 80°C und einer Geschwindigkeit von 5 m/min mit 8 NIP-Durchläufen trocken geglättet.

---

### Vergleich industrieller Benchmarks und kleintechnischer Modellpapiere

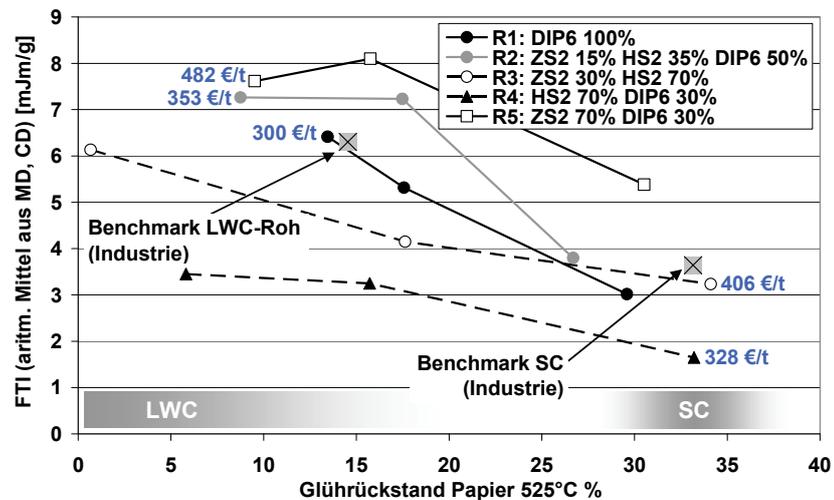


Abb. 6.1 Gegenüberstellung von industriellen Benchmarks und den erreichten Bruchzähigkeitsindizes der kleintechnischen Papiere

Die Gegenüberstellung der erreichten Bruchzähigkeitsindizes kleintechnischer Papiere und der industriellen Benchmarks zeigte, dass die geforderten Festigkeitskennwerte kleintechnisch nur von der Rezeptur R5 (70 % Zellstoff), welche eine hypothetische Rezeptur mit hohem Zellstoffanteil simulierte, übertroffen wurden. Ein verminderter Zellstoffeinsatz, wie bei der Standardrezeptur R2 führte vor allem bei hohem Füllstoffanteil zu Festigkeitseinbußen. Trotzdem wurden auch bei 100 %-igem DIP-Einsatz respektable Bruchzähigkeitsindizes erreicht.

Die Bruchzähigkeit sank für alle Rezepturen mit größer werdendem Füllstoffgehalt ab. Die Rezepturzusammensetzung bestimmte auf welchem Festigkeitsniveau und wie sensibel die Bruchzähigkeit auf den Füllstoffzusatz reagierte. Papiere aus 100 % DIP sprachen am empfindlichsten auf eine Füllstoffhöhung an. Wie auch einige SC- und LWC-Hersteller bewiesen, konnten lauffähige Papiere auch ausschließlich aus DIP-Stoff (R1) produziert werden, was eine geeignete und wirtschaftliche Aufbereitung voraussetzte. Ein Ersatz von DIP-Stoff durch Holzstoff ohne gleichzeitige Zellstoffzugabe ließ die Bruchzähigkeit drastisch sinken (R4).

## Formation und Bruchzähigkeit

Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Bereiche geringerer Flächenmasse, welche bei schlechter Formation häufiger beziehungsweise stärker ausgeprägt auftreten, als Anrisstellen fungieren und damit die Bruchzähigkeit verschlechtern. Dem war jedoch für die untersuchten Papiere nicht so.

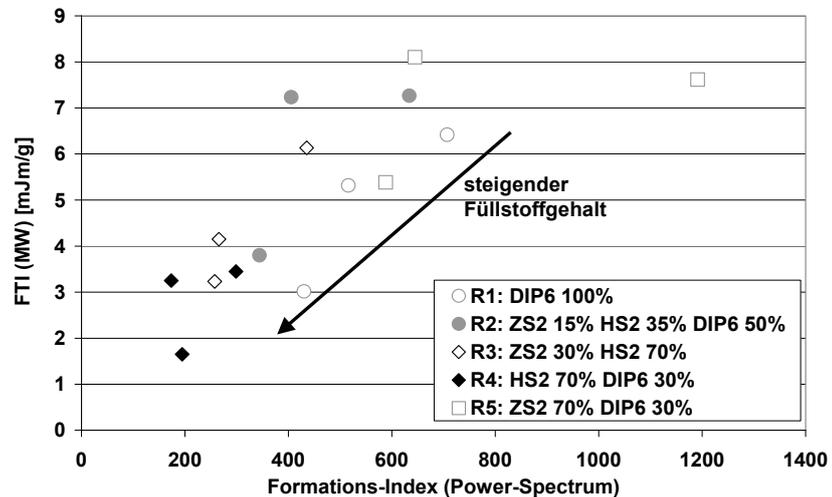


Abb. 6.2 Bruchzähigkeitsindex und Formation (SC-Papiere)

Wie dargestellt führten jene Rezepturen, welche eine schlechte Formation hervorriefen (hoher Zellstoffgehalt) stets zu guten Bruchzähigkeitskennwerten. Papiere mit guter Formation (hoher Holzstoffgehalt) besaßen hingegen eine geringere Bruchzähigkeit.

Sicherlich wird dieser Zusammenhang aber nicht für Formationschwankungen gelten, welche nicht auf Faserstoffeinflüssen sondern beispielsweise auf Maschineneinstellungen beruhen.

## 7 Steuerung der Bruchzähigkeit durch gezielte Aufbereitungsmaßnahmen

### Durchgeführte Untersuchungen

In systematischen Laboruntersuchungen wurden die durch

- Zellstoffmahlung,
- Sortierung und Mahlung der DIP-Langfaserfraktion sowie durch
- angepasste DIP-Bleiche

erzielbaren Bruchzähigkeitssteigerungen bewertet. Anschließend erfolgte die kleintechnische Erzeugung von Versuchspapieren unter Nutzung der entsprechend aufbereiteten Faserstoffe. Hierbei wurde eine Standardrezeptur bestehend aus 15 % Zellstoff, 35 % Holzschliff und 50 % DIP-Stoff eingesetzt. Zur Bewertung des Aufbereitungsergebnisses wurde jeweils eine der Faserstoffkomponenten durch ihre „optimal“ aufbereitete Variante ersetzt.

Der Füllstoff- und Retentionsmitteleinsatz sowie die Kalandereinstellungen wurden analog der im Abschnitt 0 dargestellten Bedingungen gewählt.

## 7.1 Zellstoffmahlung

### Durchgeführte Untersuchungen

Die Mahlung erfolgte im kleintechnischen Refiner der PTS Heidenau. Es kam eine Scheibengarnitur mit einem Schnittwinkel von  $60^\circ$  zum Einsatz. Die Mahlkantenbelastung (SEL) betrug  $2,0 \text{ J/m}$ , bei einer Stoffdichte von  $4 \%$ . Die spezifische Mahlergie wurde systematisch im Bereich von  $0 \text{ kWh/t}$  bis  $200 \text{ kWh/t}$  in Abstufungen von  $50 \text{ kWh/t}$  erhöht.

Es wurden die Bruchzähigkeitseigenschaften der Laborpapiere zweier europäischer (ZS4, 5), zweier skandinavischer (ZS6, 7) sowie eines nordamerikanischen (ZS8) Armierungszellstoffes untersucht. Weiterhin wurden die Zellstoff ZS4 und ZS8 auf zwei definierte Mahlgrade gemahlen und als Zellstoffkomponente ( $15 \%$ ) zur kleintechnischen Papiererzeugung eingesetzt.

### Bruchzähigkeitsentwicklung durch Zellstoffmahlung

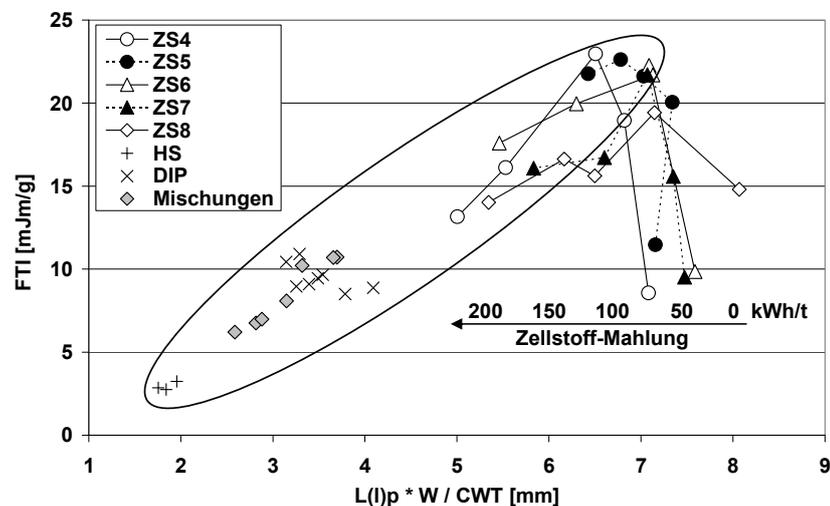


Abb. 7.1 Korrelation der fasermorphologischen Kennwerte und Bruchzähigkeitsindex gemahlener Zellstoffe (Laborpapiere  $80 \text{ g/m}^2$ )

Die Zellstoffauswahl spielte im Hinblick auf die wirtschaftliche Einstellung der Bruchzähigkeit eine entscheidende Rolle. Das erreichbare Bruchzähigkeitsmaximum war vom eingesetzten Zellstoff abhängig, es wurde bei unterschiedlichen Mahlergieeinträgen erreicht.

Mit beginnender Mahlung nahm der Bruchzähigkeitsindex rasch bis zu seinem Maximum zu. Von diesem Punkt an folgte er der Korrelation zu dem Quotienten aus „ $L(l)p * W / CWT$ “, wie sie auch für die Holz- und DIP-Stoffe sowie Faserstoffmischungen (vgl. Abb. 4.2) beobachtet wurde. Ziel der Mahlung sollte das Erreichen des Bruchzähigkeitsmaximums, unter Beachtung der Entwässerungseigenschaften, sein.

**Bruchzähigkeits-  
verbesserung  
trotz geringem  
Zellstoffanteils**

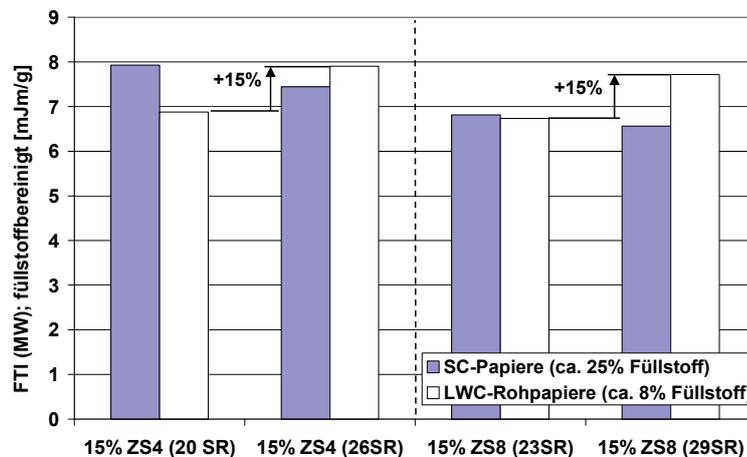


Abb. 7.2 Bruchzähigkeitssteigerung (MD/CD-Mittelwert) kleintechnischer Papiere mit 15% Zellstoffanteil in Abhängigkeit der Zellstoffsorte und des Mahlgrades

Der Bruchzähigkeitsindex konnte durch eine Optimierung der Zellstoffmahlung gesteigert werden, wenn der Füllstoffgehalt gering war. Durch eine Intensivierung der Mahlung wurde der Bruchzähigkeitsindex der LWC-Rohpapiere um etwa 15 % über den ursprünglichen Wert (niedrigerer Mahlgrad) gesteigert. Auch hier zeigten sich Unterschiede zwischen den Zellstoffen.

Der füllstoffbereinigte Bruchzähigkeitsindex der SC-Papiere fiel mit steigendem Mahlungszustand der beiden Zellstoffe ab, dies könnte im Zusammenhang mit einem teilweisen Lösen von Faser-Faser-Bindungen durch die Trockenkalibrierung stehen.

## 7.2 Sortierung des DIP-Stoffes und Mahlung der Langfaserfraktion

**Sortierungs-  
bedingungen**

Die Sortierung erfolgte im einstufigen Drucksortierer mit dem Ziel, die Langfaserfraktion zu separieren und damit für die Mahlung zugänglich zu machen. Es wurde eine Siebkorb mit einer Schlitzweite von 0,25 µm und einer offenen Siebfläche von 5,94 % verwendet, die Stoffdichte betrug 11,5 g/l, die massebezogene Rejektrate 58 %. Das Rejekt (Überlauf) enthielt die zu mahlende DIP-Langfaserfraktion, das Akzept (Durchlauf) die DIP-Kurzfaserfraktion.

Um nach der Sortierung die nötige Stoffdichte für den Mahlprozess zu erhalten wurde das Rejektes (DIP-Langfaserfraktion) eingedickt.

**Mahlung der DIP-Langfaserfraktion**

Die Langfaserfraktion des DIP8 wurde unter folgenden Bedingungen gemahlen:

Tab. 7.1 Bedingungen der Mahlung der Langfaserfraktion des DIP8

Parameter	Wert
Garnitur / Schnittwinkel	Scheibe / 60°
Stoffdichte	4 %
spez. Kantenbelastung (SEL)	0,4 bzw. 0,7 Ws/m
spez. Mahlergie (SRE)	40 bzw. 70 kWh/t

Es wurden sehr schonende Mahlbedingungen, also geringe spez. Mahlkantenbelastungen und geringe spez. Mahlergieeinträge gewählt, um die durch den Recyclingprozess vorgeschädigten Fasern des DIP-Stoffes nicht noch weiter zu schädigen. Ziel war eine schonende Aktivierung der Faseroberfläche.

**Rückmischung**

Nach erfolgter Mahlung wurden die gemahlene Langfaserfraktion und die ungemahlene Kurzfasern des DIP8 entsprechend der bei der Sortierung erreichten Rejektrate wieder vereinigt.

**Bruchzähigkeitsentwicklung durch DIP-LF-Mahlung**

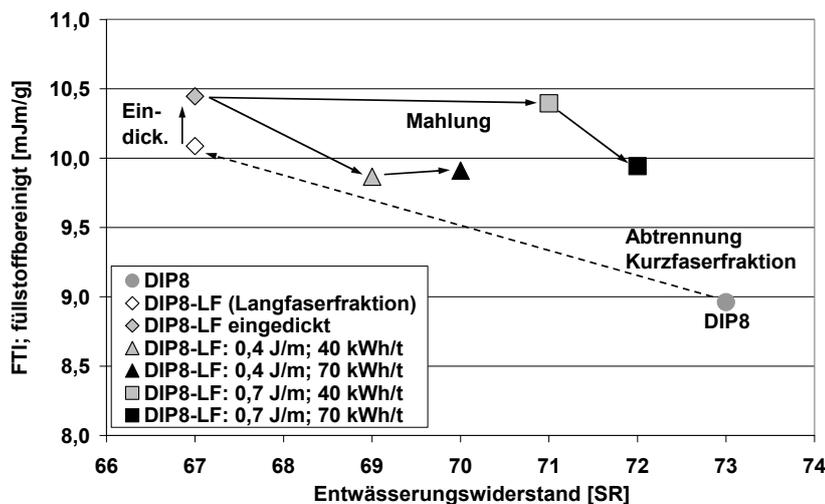


Abb. 7.3 Mahlbedingte Bruchzähigkeits- und Entwässerungsveränderung der Langfaserfraktion des DIP8 (Laborpapiere 80 g/m<sup>2</sup>)

Ausgehend von dem eingedickten Langfaserstoff war durch Mahlung nur bei geringen Mahlkantenbelastungen eine Erhöhung des Bruchzähigkeitsindex erreichbar. Das durch die Mahlung erschließbare Faserstoffpotential dieses DIP-Stoffes war aber bereits weitgehend ausgeschöpft. Ein signifikanter, durch selektive Mahlung von Altpapier geringeren Mahlgrades erreichter Festigkeitsanstieg [17] war bei dieser DIP-Langfaserfraktion nur noch eingeschränkt realisierbar.

**FTI  
kleintechnisch  
erzeugter Papiere**

Die Abb. 7.4 zeigt den Bruchzähigkeitsindex der kleintechnisch erzeugten SC-Papiere und der LWC-Rohpapiere, welche 50 % des DIP8 mit dem gemahlenem Langfaseranteil enthielten.

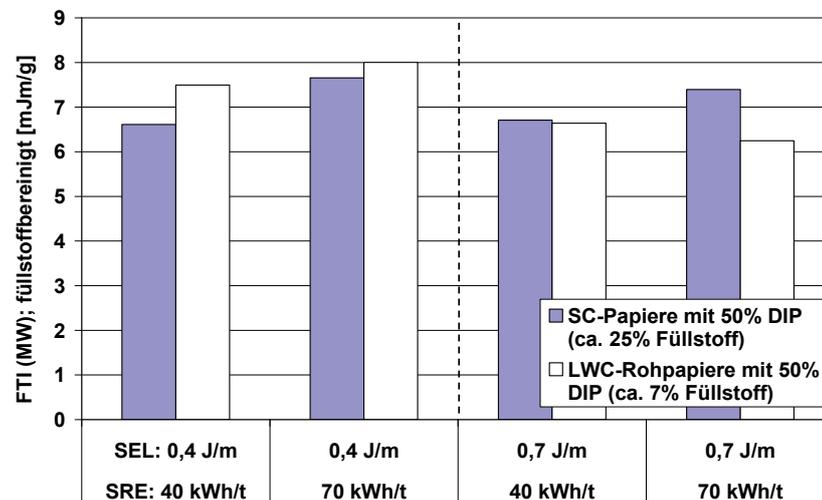


Abb. 7.4 Bruchzähigkeitsindex der SC- und LWC-Papiere mit 50 % DIP-Anteil

Bei geringer Mahlkantenbelastung (SEL = 0,4 J/m) erfolgte sowohl für die SC- als auch für die LWC-Modellpapiere ein merklicher Anstieg des Bruchzähigkeitsindex. Der beobachtete Effekt war deutlich stärker als der an den Laborblätter beobachtete. Möglicherweise fungierte der gemahlene DIP-Stoff als Lieferant von primärem, bindungsaktiven Feinstoff und verstärkte so das Fasernetzwerk der zell-, holz- und DIP-Stoff-haltigen Rezeptur. Wohingegen er, als reiner DIP-Stoff eingesetzt, nicht den für eine gute Armierung benötigten Mindestanteil langer Fasern aufbringen konnte.

Eine möglichst geringe spez. Mahlkantenbelastung war für die DIP-Mahlung gefordert. Mit steigender Kantenlast sank der Bruchzähigkeitsindex.

### 7.3 DIP-Bleiche

**Durchgeführte Untersuchungen** Die alkalische Peroxidbleiche eines DIP-Stoffes erfolgte drucklos als sog. Beutelbleiche (100 g otro Stoff) bei einer Stoffdichte von 12 % und einer Alkalisilikatkonzentration (Wasserglas) von 2 %. Folgende Prozessgrößen wurden systematisch, nach den Gesichtspunkten der statistischen Versuchsplanung variiert:

Tab. 7.2 Variable Parameter der DIP-Bleiche

Parameter	Variationsbereich
Temperatur	50°C – 90°C
Zeit	30 min – 120 min
Konzentration Wasserstoffperoxid (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; 100%-ig, bezogen auf otro Faserstoff)	1 % - 3 %
Konzentration Natriumhydroxid (NaOH; 100%-ig, bezogen auf otro Faserstoff)	0,5 % - 2 %

Nach erfolgter Bleiche wurde der Faserstoff heiß und anschließend kalt gewaschen, mit verdünnter Schwefelsäure auf pH 5,5 eingestellt und eingedickt. Die Bestimmung der Festigkeitskennwerte erfolgte an Laborblättern.

#### Auswertung der Bleichversuche

Die Auswertung der Versuche erfolgte durch Aufstellung eines Modells zur Vorhersage der erwarteten Bruchzähigkeit in Abhängigkeit der Prozessparameter der Bleiche. Hierfür kam die Software für die statistische Versuchsplanung und -auswertung „Modde 7.0“ zur Anwendung. Die Abb. 7.5 zeigt als ein Ergebnis der Auswertung die Gegenüberstellung der gemessenen und der mit Hilfe des erstellten Modells berechneten Bruchzähigkeitsindizes.

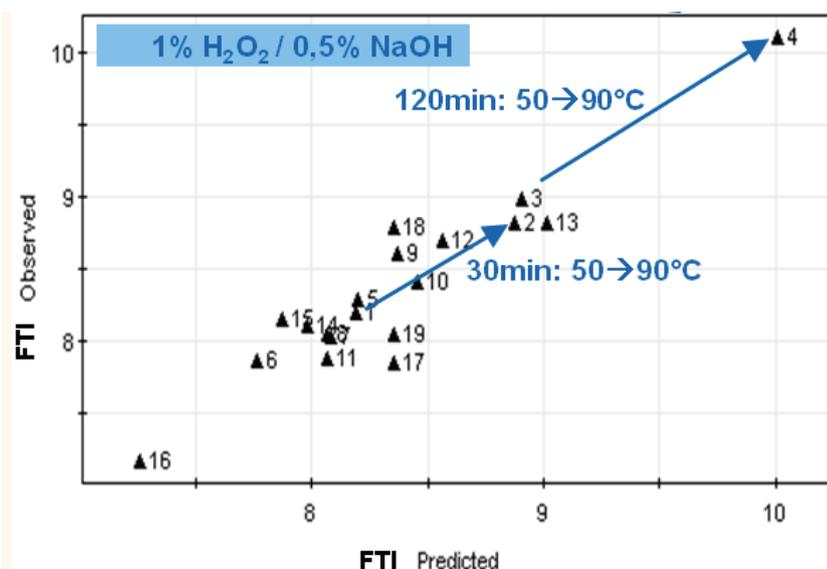


Abb. 7.5 Gegenüberstellung von vorhergesagten (predicted) und gemessenen (observed) Bruchzähigkeitsindizes [mJm/g]

### Bruchzähigkeitssteigerung bei geringem Chemikalieneinsatz

Der Korrelationskoeffizient dieses Modells betrug  $r^2 = 0,879$ , der vorhergesagte Bruchzähigkeitsindex korrelierte also stark mit dem beobachteten. Es ist ersichtlich, dass mit Bruchzähigkeitswerten zwischen 8,5 und 9,0 mJm/g bereits der obere Festigkeitsbereich üblicher, in SC- und LWC-Papieren verwendeter DIP-Stoffe (vgl. Abb. 4.1) erreicht war.

Eine Bruchzähigkeitssteigerung war bei einer niedrigen Chemikalienkonzentration - wie durch die Pfeile dargestellt - durch eine Erhöhung der Temperatur oder der Verweilzeit erreichbar. Bei hoher Chemikalienkonzentration hingegen (nicht dargestellt) erfolgte durch hohe Temperaturen oder lange Verweilzeiten ein Bruchzähigkeitsverlust aufgrund von Abbaureaktionen an der Faser.

Für eine starke Bruchzähigkeitserhöhung (z.B. Versuchs-Nr. 2, 3, 4, 13) mussten entweder ein gesteigerter Chemikalieneinsatz oder eine höhere Temperatur bei längerer Verweilzeit, aber niedriger Chemikalienkonzentration, in Kauf genommen werden. Die sehr starke Bruchzähigkeitssteigerung des Versuches Nr. 4 war mit einer starken Weißgradreversion verbunden.

### Bruchzähigkeit kleintechnischer Papiere

Mit Hilfe des erstellten Modells wurde die alkalische Peroxidbehandlung im Hinblick auf eine kostengünstige Bruchzähigkeitssteigerung optimiert. Der DIP-Stoff wurde nach folgenden Bedingungen („optimal“) gebleicht:  $T = 75^\circ\text{C}$ ,  $t = 30 \text{ min}$ ,  $c(\text{H}_2\text{O}_2) = 1 \%$ ,  $c(\text{NaOH}) = 1 \%$ . Unter diesen Bedingungen erfolgte keine Weißgradveränderung.

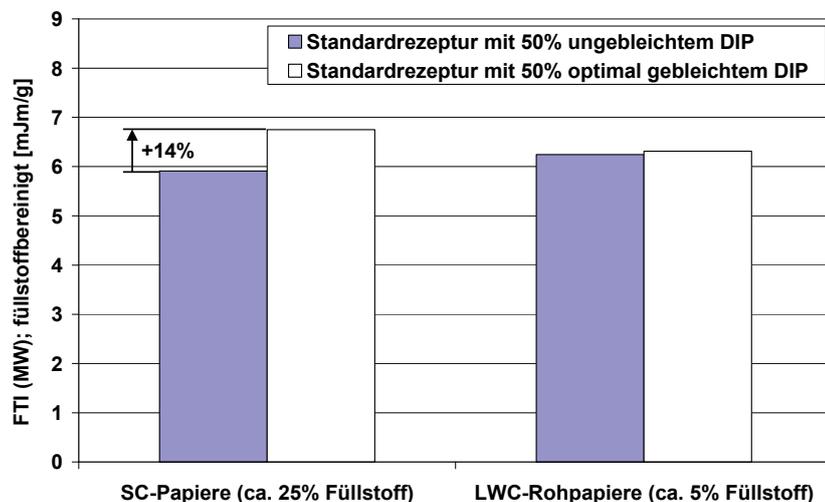


Abb. 7.6 Auswirkung der „optimalen“, alkalischen Peroxidbehandlung auf die Bruchzähigkeit kleintechnischer Versuchspapiere mit 50% DIP

Durch die Optimierung der alkalischen Peroxidbleiche von DIP-Stoff wurde der Bruchzähigkeitsindex der kleintechnischen SC-Papiere mit 50 % DIP-Anteil, gegenüber den Papieren mit nicht zusätzlich gebleichtem DIP, um 14 % gesteigert. Für LWC-Rohpapiere wurde keine signifikante Steigerung erreicht.

## 8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### Möglichkeiten zur Kostenreduktion

Kosteneinsparungen oder Mehrerlöse bei SC- und LWC-Papieren sind prinzipiell durch

- die Substitution teurer Faserstoffmischungen durch preiswertere (Abb. 4.1),
- die zur Flächengewichtssenkung führenden Faserstoffaufbereitung oder
- die Verbesserung von Runnability und Printability

möglich.

### Kostenreduktion durch Faserstoffeinsparung

Die Tab. 8.1 zeigt mögliche Faserstoffkosteneinsparungen eines hypothetischen LWC-Produzenten mit einem Faserstoffverbrauch von 130.000 t/a, entsprechend einer Jahresproduktion von 200.000 t Papier mit Pigmentgehalt 35 %. Es wurde davon ausgegangen, dass die durch geeignete Aufbereitungsmaßnahmen 10 % des Faserstoffes eingespart werden konnten. Er wurde zur Gewährleistung der optischen Eigenschaften durch Füllstoff ersetzt. Das Flächengewicht und die Festigkeitseigenschaften blieben hierbei konstant.

Tab. 8.1 Kostenreduktion durch Faserstoffeinsparung

Posten	Kosten
Kosten Faserstoffmischung / Kosten Füllstoff	350 €/t / 80 €/t
Kosten (90 % Faserstoff, 10% Füllstoff)	323 €/t
Einsparung bei Ersatz von 10 % der Fasern durch Füllstoff	<b>27 €/t Faserstoff</b>

Es ergaben sich Kosteneinsparungen in Höhe von 27 €/t Faserstoff. Die dem gegenüberstehenden Mehraufwendungen werden im Folgenden an zwei Fallbeispielen dargestellt.

Es wurde von vorhandenen Aufbereitungsaggregaten ausgegangen, daher wurden keine Anlagenkosten, sondern nur die variablen Kosten für Rohstoffe, Hilfsstoffe und Energie betrachtet.

**Kosten der  
Aufbereitung**

Tab. 8.2 Fallbeispiel A – Festigkeitssteigerung durch angepasste DIP-Stoff-Bleiche

Posten	Kosten / Einsparung
Chemikalieneinsatz 1 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (= 6 €/t DIP), 1 % NaOH (= 3 €/t DIP)	9 €/t DIP
Bleiche bei 75°C, Energiekosten für die Erwärmung (20°C → 75°C, 12 % SD)	20 €/t DIP
die eingesetzte Faserstoffmischung besteht zu 70 % aus DIP-Stoff	Faktor: 0,7
Mehrkosten gesamt	20 €/t
Einsparung (Tab. 8.3)	27 €/t
<b>Gesamteffekt (bei 130.000 t Faserstoff/a)</b>	<b>7 €/t eingesetztem Faserstoff (910.000 t/€)</b>

Tab. 8.4 Fallbeispiel B – Festigkeitssteigerung durch DIP-Sortierung und  
Mahlung der DIP-Longfaserfraktion

Posten	Kosten / Einsparung
Energiekosten für die Sortierung (20 kWh/t; 0,05 €/kWh) und Rückmischung	1 €/t DIP
Mahlung der Longfaserfraktion des DIP (50 Masse-%) mit 70 kWh/t	1,80 €/t DIP
die eingesetzte Faserstoffmischung besteht zu 70 % aus DIP-Stoff	Faktor: 0,7
Mehrkosten gesamt	2 €/t
Einsparung (Tab. 8.5)	27 €/t
<b>Gesamteffekt (bei 130.000 t Faserstoff/a)</b>	<b>25 €/t eingesetztem Faserstoff (3,25 M€/a)</b>

Mit den Forschungsergebnissen wurden Spielräume für die wirtschaftlich vertretbare Steigerung des DIP-Anteils in SC- und LWC-Papieren aufgezeigt.

**Ansprechpartner / contact:**

Dipl.-Ing. (FH) Jens Kretzschmar  
Tel. 03529 / 551-632  
[jens.kretzschmar@ptspaper.de](mailto:jens.kretzschmar@ptspaper.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau  
Tel. 03529 / 551-60  
Fax 03529 / 551-899  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

B	Bleiche (in Versuchsbezeichnungen)	
c	Konzentration	%
DIP	De-inked pulp	
F(n,l,p) p./c.	Faserlänge (anzahlgewichtet, längengewichtet, massegewichtet) Projektionslänge / Konturlänge	
FTI	Fracture toughness index (Bruchzähigkeits-Index)	mJm/g
FS	Füllstoff	
HS	Holzstoff	
KF	Kurzfaser	
LF	Langfaser	
LWC	Light weight coated (geringe flächenbezogene Masse, gestrichen)	
MW	Mittelwert (aus Längs- und Querrichtung)	
NBSK	Northern bleached softwood kraft pulp (nördlicher, gebleichter Langfaser-Sulfatzellstoff)	
R	Rezeptur	
RP	Rohpapier	
RI	Reinforcement-Index (Armierungsindex)	
SC	Super calendered (satiniert; super-kalandriert)	
SEL	Specific edge load (spezifische Mahlkantenbelastung)	J/m
SR	Schopper-Riegler	
SRE	Specific refining energy (spezifische Mahlenergie)	kWh/t
t	Zeit, Verweilzeit	
TEI	Tensile-Index	
T, Temp.	Temperatur	°C
TRI	Tear-Index	
TRI (TEI <sub>70</sub> )	Tear-Index am Tensile-Index von 70 Nm/g	mN*m <sup>2</sup> /g
ZDP	Zeitungsdruckpapier	
ZS	Zellstoff	

## 9 Literaturverzeichnis

- 1 N.N.  
In Book XX: Paper Grades, Chapter 1 – Printing and Writing Papers  
Gullichsen J. und H. Paulapuro (Hrsg.), Finnland 1999
- 2 ENGERT P. u. H. WURSTER  
Herstellung von AP-haltigen SC-Papieren im neutralen Bereich  
Wochenblatt für Papierfabrikation 124; 288 – 293 (1996); Nr. 7
- 3 EICHHORN R.  
Softkalandrierte Tiefdruck- und Offsetpapiere mit hohem Anteil an Recyclingstoff  
Wochenblatt für Papierfabrikation 122; 58 -61 (1994), Nr. 2
- 4 MOKRY M. A. u. K. WINKELS  
Alsip PM 1 – Umrüsten von Zeitungsdruck auf LWC.  
Together - Magazin für Papiertechnik, 54 – 57 (2003), Nr. 15
- 5 RODDEN G.  
LEIPA steps up  
Pulp and Paper International 46; 45 – 48 (2004), Nr. 5
- 6 RODDEN G.  
Reaching for the top  
Pulp and Paper International 46; 35 -38 (2004), Nr. 4
- 7 LIPPERT G.V., BIZA P. u. P. KAISER  
Entwicklung einer Deinkingstoff-Qualität für gestrichene Papiere  
Wochenblatt für Papierfabrikation 124; 284 -287 (1996), Nr. 7
- 8 TILLER A.  
Perlen Papier AG – PM 4 „Pionier“ – Produktionserfahrungen  
Wochenblatt für Papierfabrikation 131; 1467 – 1472 (2003) Nr. 23/24
- 9 GREGERSEN Ø.  
The kraft fibre –treatment and influence on the runnability of printing paper  
Fibre in Focus II – Choice, Treatment and Control, Symposium Bürgenstock Sept. 2003
- 10 ORTNER H., FISCHER S. u. G.VEH  
Deinkstoff-Faserstoffkomponente für hochwertige Druckpapiere  
Wochenblatt für Papierfabrikation 121, 7 – 15(1993), Nr. 1
- 11 LINCK E. u. H. SELDER  
Sekundärfasern für SC- und LWC-Papiere  
Das Papier 48, V121 – 128 (1994), Nr. 10 A
- 12 EILAND W. W.  
VOITH PAPER präsentiert sich der internationalen Fachpresse  
Wochenblatt für Papierfabrikation 128, 1646 – 1651(2000), Nr. 23/24
- 13 HOHEISEL K. A., LIPPONEN J. u. J. HEIMONEN  
DIP-Linienkonzepte für unterschiedliche Anwendungen  
Wochenblatt für Papierfabrikation 129, 1398 – 1404 (2001), Nr. 21
- 14 FELLERS C.  
Bruchzähigkeit – eine neue Papiereigenschaft  
Lorentzen & Wettre Handbuch 1994
- 15 N.N.  
L&W Tensile Tester with fracture toughness  
Lorentzen & Wettre Handbuch 2004
- 16 HERMANS, L. und B. EVANS

Trends in modern SC paper changing conventional production technology  
Vortrag beim PTS-Symposium "Chemische Technologie der Papiererzeugung", München,  
12.-15.09.2006

- 17 SEPKE, P. W. und O.SCHNEIDER  
Neue Erkenntnisse aus dem Versuch über die Mahlung von Altpapierstoff für Verpackungen  
Wochenblatt für Papierfabrikation 133, 20 – 24 (2005), Nr. 1-2