

Titel

Entwicklung einer simulationsgestützten Prozessanalyse zur optimalen Nutzung des Festigkeitspotenzials bei der Erzeugung von Wellpappenrohropapieren auf Altpapierbasis

Hamann L., Kuntzsch. T., Meinel G. u. J. Kappen

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Abstract	4
3	Einleitung	6
4	Modul Kostenoptimierung	7
4.1	Das Festigkeitspotenzial bei der Erzeugung von Wellpappenrohropapieren	7
4.2	Grundsätzliches Konzept.....	9
4.3	Prozessanalyse	10
4.4	Charakterisierung von Stoffsuspensionen und Papierproben.....	12
4.4.1	Parameter	12
4.4.2	Präzision der Messmethoden	13
4.4.3	Schwankungsbreite der Probenahme	14
5	Bewertung des Festigkeitspotenzials	15
5.1	Möglichkeiten zur Verbesserung von Festigkeiten.....	15
5.2	Festigkeitsentwicklung anhand von Profildarstellungen.....	17
5.3	Bewertung des Festigkeitspotenzials anhand von Kennwerten	20
6	Simulationsmodelle	25
6.1	Weiterentwicklung des IDEAS-Modells	25
6.2	Kostenmodellierung	26
6.3	Simulationsrechnungen	27
7	Szenarienrechnungen	28
7.1	Festlegung der Szenarien	28
7.2	Ergebnisse grundlegender Simulations- und Optimierungsrechnungen	31
7.3	Ergebnisse zur Erreichung bestimmter Festigkeitsniveaus unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten	36
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	41
9	Literaturverzeichnis	44

1 Zusammenfassung

Zielstellung	Ziel des Projektes war es, die geforderten Festigkeiten bei der Herstellung von Wellpappenrohpa-pieren auf Altpapierbasis zielgerichtet, schnell und kosteneffizient durch optimale Nutzung vorhandener Festigkeitspotenziale zu erreichen.
Vorgehen	Ein innovatives, übergreifendes Bewertungs- und Prognoseverfahren - ein so genannter „Modul“ im Rahmen des Dienstleistungsangebotes SystemCheck der PTS – wurde entwickelt. Anhand von Prozessanalysen in zwei Papierfabriken wurden die notwendigen Tools zur Planung, Auswertung, Archivierung, Bewertung und Simulation entwickelt und einer Computer gestützten Anwendung zugänglich gemacht.
Transparente Darstellung	Zur Bewertung der Festigkeitsentwicklung in Papierfabriken wurden aussagekräftige Profildarstellungen und Kennwerte entwickelt. Damit können die wesentlichen Einflussfaktoren auf die erreichten Festigkeiten bewertet werden.
Prozess-simulation	Erstmals überhaupt konnten die an der Forschungsstelle entwickelten Berechnungsalgorithmen zur Prognose von Festigkeitseigenschaften an Labor- und Maschinenblättern in eine Prozesssimulation integriert werden.
Ableitung von Handlungsempfehlungen	Optimierungsrechnungen zur kostengünstigen Realisierung vorgegebener Produkteigenschaften wurden für die untersuchten Papierfabriken durchgeführt und daraus unter Berücksichtigung der zu erwartenden Kostenentwicklung Handlungsempfehlungen abgeleitet
Kosteneinsparung	Durch eine Optimierung des Altpapiereinsatzes können Kosten eingespart werden. Bei vermehrtem Einsatz der Altpapiersorte 1.04 sind die Gesamtkosten um maximal 3,1 €/t _{Papier} reduzierbar bei gleichen Festigkeiten. Damit könnten z.B. überdurchschnittlich steigende Stärkekosten sehr gut kompensiert werden.
Festigkeitssteigerung ohne Mehrkosten	Durch den alleinigen Einsatz von Altpapier 1.04 kann bei leicht sinkenden Kosten eine Festigkeitssteigerung um 3,4 % erreicht werden. Durch eine zusätzliche 33 %ige Teilstromflotation kann diese auf maximal 5,2 % erhöht werden. Eine Mahlung des Langfaserstoffes nach entsprechender Fraktionierung bringt bei vergleichbarem Rohstoffeinsatz einen nahezu gleich großen Effekt.
Größere Festigkeitssteigerungen	Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass bei dem derzeit üblichen Rohstoffeinsatz eine Festigkeitssteigerung um 10 % durch einen verstärkten Einsatz an Oberflächenstärke nicht erreicht werden kann. Auch eine Mahlung der Langfaserfraktion nach entsprechender Fraktionierung reicht nicht aus, den Streifenstauchwiderstand um 10 % zu erhöhen. Nur der Einsatz von Verstärkungsstoffen oder eine Wäsche bei gleichzeitig optimiertem Altpapiereinsatz ermöglichen Festigkeitssteigerungen von 10 bis 25 %.

**Nachhaltigkeit
der Empfehlungen**

Um ohne Zusatzkosten das derzeitige Festigkeitsniveau auch in Zukunft halten zu können, ist gegenwärtig nur eine Optimierung des Altpapiereinsatzes bei leicht sinkendem Stärkeinsatz zu empfehlen. Alle weiteren Verfahrensoptionen sind bei der zugrunde gelegten Kostenentwicklung in den nächsten 1 bis 5 Jahren noch nicht konkurrenzfähig.

Für Energie intensive Produktionsstufen wie Mahlung, Fraktionierung oder Flotation ist aufgrund steigender Energiepreise kein positiver Kosteneffekt gegenüber dem Ist-Zustand zu erwarten.

Sind signifikante Festigkeitssteigerungen geplant, so bringt der Einsatz von Verstärkungstoff derzeit einen Kostenvorteil. Aufgrund des hohen Reststoffanfalls und der sinkenden Entsorgungskosten könnte sich langfristig jedoch die Wäsche gegenüber dem Verstärkungstoff durchsetzen.

**Schluss-
folgerung**

Mit den erarbeiteten Forschungsergebnissen, die als Beratungsprodukt angeboten werden, können insbesondere für kleine und mittelständige Unternehmen individuelle Maßnahmen zur Kostenminimierung und zur kostengünstigsten Realisierung geforderter Produkteigenschaften erarbeitet werden. Es werden Wege aufgezeigt, wie die Produktion von Wellpappenrohpa-pieren auch in Zukunft so gestaltet werden kann, dass sie auch gegenüber den aufstrebenden ausländischen Märkten konkurrenzfähig bleibt.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Nr. IW 061079 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.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.

2 Abstract

Objective	The objective of this research project was to optimise the use of existing strength potentials so as to achieve the required strength values during testliner production in a quick and cost-effective manner and on an as-needed basis.
Approach	A comprehensive, innovative evaluation and prognosis procedure was developed – a “module” within the framework of the PTS SystemCheck range of services –. Based on process analyses conducted at two paper mills, the necessary tools for planning, evaluation, archiving, assessment and simulation were developed and made accessible to computer-based applications.
Transparency	Highly expressive profiles and characteristic values were created to evaluate strength development in paper mills. They can be used to assess the important factors that contribute to the achieved strength values.
Process simulation	For the first time ever, it was possible to integrate the calculation algorithm that had been developed by the research institute into a process simulation system to predict the strength properties of laboratory handsheets and machine sheets.
Developing recommended action	Optimisation calculations for the cost-effective implementation of predetermined product properties were carried out for the paper mills studied. Recommended action steps that took the expected cost development into account were then developed and formulated.
Cost savings	Costs can be saved by optimising the use of recovered paper. If recovered paper grade 1.04 is used to a greater extent, total costs can be reduced by a maximum of 3.1 €/t _{paper} , the strength values remaining the same. Above-average increases in starch costs, for instance, can be compensated for in this way.
Strength enhancement without additional costs	A strength enhancement of 3.4 % together with a slight decrease in costs can be achieved solely by using recovered paper 1.04. The strength value can be increased to a maximum of 5.2 % by means of 33 % partial stream flotation. Refining the long fibre pulp after appropriate fractionation achieves more or less the same effect, provided the raw materials used are comparable.
Greater strength enhancement	As a general rule and in view of the raw materials that are currently being used, it must be observed that a strength enhancement of 10 % cannot be achieved by using surface starch to reinforce the fibres. Even refining the long fibre fraction after appropriate fractionation is not sufficient to increase the short span compression strength by 10 %. Strength enhancement from 10 to 25 % can be achieved only by using reinforcement pulps or by washing whilst at the same time optimising the recovered paper used.

Sustainability of the recommendations

The only advisable recommendation that can be made for maintaining current strength levels in future without incurring additional costs is to optimise the recovered paper that is used while at the same time reducing slightly the amount of starch used. All other process options will not prove to be competitive in the next 1 to 5 years in view of the expected cost development.

Owing to rising energy prices, no positive cost effect can be expected for energy-intensive production stages such as refining, fractionation or flotation compared to the current situation.

If significant increases in strength are planned, the use of reinforcement pulps currently offers a cost advantage. In view of the large amounts of solid wastes and the falling disposal costs, however, washing could well gain general acceptance in the long term over the use of reinforcement pulps.

Conclusions

The compiled results of research that are being offered as consulting services allow individual measures for cost minimisation and for the cost-effective implementation of required product properties, in particular for small and medium-sized enterprises. Possible courses of action are presented that illustrate how linerboard production can be designed so that it remains competitive versus developing foreign markets.

Acknowledgements

The results were obtained within the scope of research project No. IW 61079 that was sponsored within the framework of 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 Länder" and funded by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) through EuroNorm GmbH as project executor. We would like to express our gratitude for this support.

We would also like to express our appreciation to the participating companies in the paper and supply industries for their support during the project.

3 Einleitung

Grundlagen	<p>In der Grundlagenforschung konnten bereits viele Zusammenhänge der Rohstoffzusammensetzung, Mahlung, Stoffmischung und des Füllstoff- bzw. Stärkegehaltes auf die Papierfestigkeiten erarbeitet werden. Diese empirischen Ergebnisse werden fortlaufend mit den Erfahrungen in den Papierfabriken erweitert und abgeglichen.</p>
Derzeitige Praxis	<p>Anhand der verfügbaren Erfahrungen sowie Labor- und Prozessuntersuchungen werden derzeit in den Papierfabriken mit Hilfe einer überwiegend empirischen Vorgehensweise die Prozesse betrieben und optimiert, um die geforderten Produkteigenschaften hinsichtlich der Festigkeitswerte zu erreichen. Dabei muss einerseits kurzfristig auf Änderung von Rahmenbedingungen (z.B. Verfügbarkeit bestimmter Altpapiersorten, Kosten für Rohstoffe, Verschleiß, Reparaturen u.a.) reagiert werden. Andererseits können die in den Rohstoffen und in der verfügbaren Verfahrenstechnik vorhandenen Potenziale nicht optimal zum Erreichen der geforderten Produkteigenschaften genutzt werden.</p>
Verfügbare Prognosetools	<p>Auf der Basis dieser Erfahrungen und anhand von Technikumsversuchen, die an Modellstoffen durchgeführt worden waren, wurden Prognosetools zur Berechnung von Festigkeitseigenschaften erarbeitet und sind verfügbar. Darüber hinaus wurde im bereits abgeschlossenen BMWA-Projekt 1108/03 ein zur Kostenminimierung bei der Produktion von Wellpappenrohpa-pieren einsetzbares Excel-basiertes Optimierungswerkzeug entwickelt [1].</p> <p>Damit wurden Grundlagen geschaffen, ein für den Industrieinsatz geeignetes Dienstleistungsprodukt zum Festigkeitspotenzial zu konzipieren und zu erproben.</p>
Ziel des Forschungsprojekts	<p>Ziel des Projektes war es, die geforderten Festigkeiten bei der Herstellung von Wellpappenrohpa-pieren auf Altpapierbasis zielgerichtet, schnell und kosteneffizient durch die optimale Nutzung vorhandener Festigkeitspotenziale zu erreichen. Dazu sollte ein innovatives, übergreifendes Bewertungs- und Prognoseverfahren entwickelt werden. Dieses ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung der bisher unabhängig voneinander betrachteten Einflussbereiche Rohstoffeintrag, Stoffaufbereitung und Papiermaschine auf das Festigkeitspotenzial mit folgenden Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none">• Transparente Darstellung der Ist-Situation in Papierfabriken mittels einer Standardsystemaufnahme• Gewichtung der wesentlichen Einflussfaktoren bezüglich Festigkeitspotenzial• Detektierung der Schwachstellen / Vergleich zu Zielwerten• Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Steigerung der relevanten Festigkeiten mit Einsatz simulationsbasierter Prognosetools

4 Modul Kostenoptimierung

4.1 Das Festigkeitspotenzial bei der Erzeugung von Wellpappenrohpapieren

Der Begriff des Festigkeitspotenzials

Unter Potenzial versteht man die grundsätzliche Fähigkeit eines Systems oder einer Person, definierte Aufgaben zu erfüllen. Ob diese Aufgaben erfüllt werden, hängt von Bedingungen ab, wie z.B. zielgerichtete Konzentration auf diese Aufgabe und Verfügbarkeit der notwendigen Werkzeuge.

Übertragen auf die Erzeugung von Wellpappenrohpapieren bedeutet dies:

- System: Altpapierstoffaufbereitung und Papiermaschine
- Aufgabe: Fertigpapier mit definierten Festigkeiten zu erzeugen
- Bedingungen: Die erzielbaren Papierfestigkeiten sind abhängig vom Rohstoffeintrag, vom Einfluss der Stoffaufbereitung und vom Einfluss der Papiermaschine.

Die Nutzung verfügbarer Optionen ist dabei stets abhängig von den anfallenden Kosten und der technischen Umsetzbarkeit. Dabei ist in der Regel ein Optimum im Sinne einer Kostenminimierungsfunktion anzustreben. Das geforderte Festigkeitsniveau kann nicht ausschließlich mit Oberflächenstärke an der Papiermaschine erreicht werden. Eine gewisse Grundfestigkeit der Papierbahn ist notwendig, damit das Papier überhaupt ohne Abriss bis zur Leimpresse gelangt. Diese Grundfestigkeit wird mit dem Rohstoff, in der Stoffaufbereitung, im Konstantteil und bei der Blattbildung in der PM erzeugt.

Einflussgrößen zum Festigkeitspotenzial

Das Festigkeitspotenzial von Wellpappenrohpapieren auf Altpapierbasis wird vom eingesetzten Rohstoff, von der Aufbereitungstechnologie in der Stoffaufbereitung und von der Papiermaschine beeinflusst (**Abb. 1**). In der Rubrik Papiermaschine sind in dieser Darstellung der Konstantteil inkl. Stoffauflauf, Siebpartie und Leimpresse zusammengefasst.

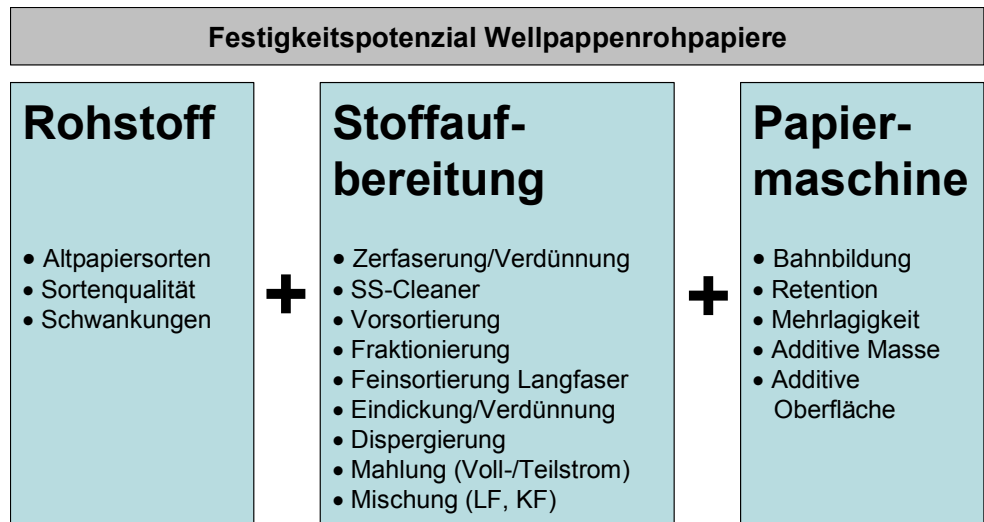


Abb. 1 Einflussgrößen auf das Festigkeitspotenzial von Wellpappenrohpapieren

Rohstoff

Wellpappenrohapiere bestehen in Deutschland zu 100% aus Altpapier. Als Rohstoff kommen in erster Linie untere Sorten sowie krafthaltige Altpapiere in Frage. Krafthaltige Altpapiere mit einem hohen Anteil an Faserlangstoff sollen helfen, das Festigkeitsniveau anzuheben. Mengenmäßig am bedeutendsten sind die Sorten 1.02 (gemischte Haushaltssammelware) und 1.04 (Kaufhausalt-papier) [2]. Diese Altpapiere sind kostengünstig und enthalten sortenspezifisch hohe Mengen an gebrauchten Wellpappenkartons und Faltschachteln. Anteile grafischer Papiere führen zu einem nicht unerheblichen Füllstoffeintrag in die Stoffaufbereitung und somit zu Festigkeitsverlusten [3, 4].

**Stoffaufberei-
tung**

In der Stoffaufbereitung wird das Festigkeitspotenzial auf zwei Wegen beeinflusst: die Sortierung/Reinigung/Eindickung und die Reaktivierung in der Mahlung/Dispergierung.

In der Sortierung und Reinigung sollen vor allem papierfremde Partikel wie Sand, Kunststoffe und Metalle abgetrennt werden [5]. Dabei gilt der Grundsatz: Je vollständiger die Abtrennung unerwünschter Stoffe, desto größer ist auch der Verlust an Festigkeit bildenden Papierfasern. Auf der anderen Seite gelangt eine stärkere Füll- und Feinstoffabtrennung in der Eindickung in den Fokus des Papiermachers. Zusätzlich kann eine ungenügende Zerfaserung im Pulper zu einem hohen Stippengehalt führen, sodass im Pulperrejekt und den nach geschalteten Sortierstufen wertvolle Faserstoffe verloren gehen.

In der Mahlung/Dispergierung wird die Faseroberfläche mechanisch behandelt, um das Bindungsvermögen der Fasern als Basis für das Festigkeitspotenzial zu aktivieren [6].

Papiermaschine

Die dritte Möglichkeit zur Erhöhung der Festigkeiten im Fertigpapier ist der Einsatz von Festigkeit steigernden Additiven (z.B. Stärke) im Konstantteil (Masse) oder direkt an der Papiermaschine (Oberflächen- oder Sprühauftrag) [7, 8]. Durch den Oberflächenauftrag von Stärke auf das bereits trockene Papier kann eine deutliche Festigkeitserhöhung erzielt werden. Mittels Sprühauftrag kann die Lagenhaftung bei mehrlagigen Papieren verbessert werden. Vorteil von beiden Verfahren ist hier die vollständige Retention der Stärke im Papierblatt, nachteilig ist der deutliche Mehrbedarf an Trocknungskapazität.

Ein Einsatz von Stärke in der Masse ist aufgrund der unvollständigen Stärkere-tention nicht einfach. Problematisch sind hier die bei der Erzeugung von Well-pappenrohapiere weitgehend geschlossenen und damit hoch mit Störstoffen belasteten Wasserkreisläufe. Bei der Masseleimung ist keine zusätzliche Trock-nungskapazität an der PM notwendig.

Festigkeitsanforderungen

Folgende Festigkeitseigenschaften werden vorrangig zur Qualitätsbewertung und zum Vergleich von Wellpappenrohpa-pieren herangezogen [9]:

Liner: SCT, Berstfestigkeit

Fluting: SCT, CMT

Alle aufgeführten Festigkeiten sind abhängig von der flächenbezogenen Masse der Papiere. Typische Festigkeitswerte von Wellpappenrohpa-pieren auf Altpa-pierbasis wurden in einer VDW-Studie (Verband der Wellpappenindustrie) veröffentlicht (**Tab. 1**) [10]. Die Produktspezifikationen von Wellpappenrohpa-pierherstellern orientieren sich an diesen Werten.

Tab. 1 Festigkeitsanforderungen an Wellpappenrohpa-piere

mA [g/m ²]	Testliner II			Testliner III		
	Berstfestigkeit [kPa]	SCT längs [kN/m]	SCT quer [kN/m]	Berstfestigkeit [kPa]	SCT längs [kN/m]	SCT quer [kN/m]
125	320	4,2	2,4	300	3,9	2,4
140	380	4,8	2,7	330	4,3	2,5
170	460	5,7	3,3	390	5,2	3,1
190	500	6,2	3,4	430	5,5	3,4

mA [g/m ²]	Fluting			Halbzellstoff		
	CMT [N]	SCT längs [kN/m]	SCT quer [kN/m]	CMT [N]	SCT längs [kN/m]	SCT quer [kN/m]
110	200	3,6	2,1			
115	210	3,8	2,2			
120	220	4,0	2,3			
140	260	4,4	2,5	370	5,9	3,3

4.2 Grundsätzliches Konzept

Einleitung

Die Entwicklung eines übergreifenden Bewertungs- und Prognoseverfahrens zur optimalen Nutzung vorhandener Festigkeitspotenziale erfolgte anhand von Prozessanalysen in zwei Papierfabriken, die Wellpappenrohpa-piere herstellen.

Auf der Basis vorhandener Entwicklungen [11, 12] wurden diese Prozessanaly-sen nach einem einheitlichen Schema durchgeführt, das im Laufe des Projekts sukzessiv erarbeitet und optimiert wurde. Dabei wurden in einer Papierfabrik alle grundlegenden Elemente hinsichtlich der Prozessaufnahme und -bewertung sowie der Festigkeits- und Kostenmodellierung entwickelt. In einer zweiten Papierfabrik wurde nach geringfügigen Optimierungen die Anwendbar-keit überprüft.

Konzept Modul Kostenoptimierung	<p>Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen wurde die endgültige Konzeption für das standardisierte Modul Kostenoptimierung festgelegt. Diese umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none">• Auswertung R+I-Fließbilder und der Daten der Papierfabrik• Konzeption der Datenaufnahme und der Vor-Ort-Untersuchungen (minimal notwendige Probenahmestellen, Untersuchungsparameter, benötigte Rohstoff- und Prozessdaten)• Probenahme• Analysen (Vor-Ort, Labors der PTS)• Erfassung der Betriebsdaten• Datenarchivierung• Konkrete Zielwerte für Festigkeiten und mögliche Potenziale• Kennwerte für die Festigkeitsentwicklung• Prognosetools (Suspensions-/Festigkeitseigenschaften, Kosten)• Ergebnisdarstellungen
--	---

4.3 Prozessanalyse

Organisation und Planung	<p>Zur standardisierten und systematischen Organisation und Planung einer Prozessanalyse wurden vorhandene Tools so weiterentwickelt, dass sie für das Modul Kostenoptimierung effektiv eingesetzt werden können.</p> <p>In einem Kick-Off-Meeting mit der Papierfabrik werden Projektziele und Rahmenbedingungen abgeklärt. Die für die Untersuchungen notwendigen Unterlagen werden in Form von Fließbildern, Plänen, Schaltbildern, Berichten, Dokumentation, Datenlisten und PLS Ausdrucken von den beteiligten Papierfabriken zur Verfügung gestellt. Eine Begehung der Anlage und persönliche Befragungen ergänzen die Informationen, um den aktuellsten Stand zu erfassen.</p> <p>Zur Visualisierung wird bei der Projektplanung ein sogenanntes Prozessschrittbild erstellt. Hier sind alle für das Projekt notwendigen Prozessstufen, Aggregate sowie Stoff-, Rejekt- und Wasserströme übersichtlich abgebildet. Außerdem sind alle Stellen eingezeichnet, an denen Probenahmen geplant sind und an denen Daten über den Prozess benötigt werden (siehe auch [11, 13]).</p> <p>Anhand der Prozessschrittbilder und der verfügbaren Informationen werden die für die Prozessbewertung und –simulation notwendigen Probenahmestellen festgelegt und Analysenparameter zugewiesen. In einem Analytikplan werden die Dauer der vorgesehenen Messung, die Anzahl der durchzuführenden Messungen, die benötigte Probenmenge, die erwartete Stoffdichte an der Probenahmestelle, der Messort und der Bearbeiter vorgegeben.</p>
-------------------------------------	---

**Datenaufnahme
in den Papierfabriken**

Die Datenaufnahmen in den einzelnen Papierfabriken werden anhand der Planungs-Tools und weiterer Archivierungs-Tools durchgeführt. Die wesentlichen Schritte sind:

Papierfabrik	Vorbesprechung mit allen Beteiligten
	Aufbau der notwendigen Analytik
	Kennzeichnung der Probenahmestellen
	Probenahmen
	Vor-Ort-Untersuchungen
	Datenerfassung
	Laborbestimmungen
	Versuchsabbau
	Schlussbesprechung
	PTS
Weitergehende Datenerfassung	
Datenarchivierung	

Probenahme

Mit Hilfe des Analytikplans wird die Beprobung an den ausgewählten Messstellen durchgeführt. Im Zeitraum der Probenahme dürfen Rohstoffeintrag und Produktion nicht geändert werden und sind konstant zu halten. Außerdem ist darauf zu achten, dass nach einem Sortenwechsel die Probenahme erst nach Erreichen eines neuen Gleichgewichts und einer konstanten Fahrweise erfolgt. Um Schwankungen innerhalb der Anlage bei der Probenahme auszugleichen, werden in der Regel Mischproben aus drei Rundgängen entnommen.

**Durchführung
der Messungen**

Zeitkritische Parameter, deren Messgrößen zeitlichen Veränderungen unterliegen, werden in der Regel in der Papierfabrik bestimmt. Dies betrifft vor allem die Bestimmung des Entwässerungswiderstandes (SR-Wert). Darüber hinaus zählen hierzu auch die Messung der Temperatur, des pH-Wertes, des CSB-Wertes, der Wasserqualitäten und der optischen Eigenschaften. Alternativ können die Proben so schnell wie möglich in das PTS-Labor gebracht und dort vermessen werden.

Die Proben werden nach Abschluss der Messungen in der Papierfabrik mit einem geeigneten Konservierungsmittel behandelt und in die entsprechenden Labors der PTS transportiert [13, 14].

4.4 Charakterisierung von Stoffsuspensionen und Papierproben

4.4.1 Parameter

Stoffsuspensionen

Zur Charakterisierung der Stoffsuspensionen werden die in **Tab. 2** genannten Standardverfahren durchgeführt. Eine Altpapiercharakteristik erfolgt nach einer Auflösung im Pulper. Die Rohdaten der Fiberlab Bestimmung werden mit Hilfe des an der PTS entwickelten EM Algorithmus so aufbereitet, dass die Faserstofffraktion in Langfasern, Kurzfasern und Feinstoff unterteilt werden kann [15].

Tab. 2 Charakterisierung von Faserstoffproben

	Methode	Stoff	Altpapier
Temperatur	DIN 38 404 T.4	x	
pH-Wert	DIN 38 404 T.5	x	
Elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888	x	
Stoffdichte	DIN EN ISO 4119	x	
Asche	DIN 54730	x	x
SR	DIN ISO 5267-1	x	x
WRV	ZM IV/33/57	x	x
Fiberlab	PTS Methode	x	x

Papierproben

Von der gesamten Bahnbreite werden repräsentative Proben entnommen und hinsichtlich der Papiereigenschaften analysiert. Randbereiche der Papierbahn werden dabei nicht berücksichtigt.

Tab. 3 Charakterisierung von Papier- und RK-Laborblatt-Proben

	Methode	Papierproben	RK-Laborblatt-Proben
Asche	DIN 54730	x	
Dicke	DIN EN 20534	x	x
Scheinbare Blattdichte	ISO 534	x	x
Berstfestigkeit	DIN 53 141	x	x
SCT	DIN 54518	x	x
CMT	DIN EN ISO 7263	x	x
Spaltfestigkeit	DIN 54 516	x	x
Bruchkraft	EN ISO 1924-2	x	x
Reißlänge	EN ISO 1924-2	x	x
Bruchdehnung	EN ISO 1924-2	x	x

4.4.2 Präzision der Messmethoden

Durchführung der Untersuchungen

Um die Schwankungsbreite der Probenahme oder weiterer wesentlicher Einflussgrößen bewerten zu können, ist ein Überblick über die Präzision^I der eingesetzten Messmethoden notwendig. Dazu wurden an ausgewählten Stoffproben statistisch abgesicherte Mehrfachmessungen durchgeführt und mit Literaturwerten verglichen.

Zur Beurteilung der Wiederholpräzision^{II} von Messmethoden eignet sich der Variationskoeffizient, der bei den durchgeführten Untersuchungen aus 6 - 20 Messwerten bei 2 bis 3 unterschiedlichen Proben ermittelt wurde. Die Messwerte wurden zwei Ausreißerbetrachtungen unterzogen. Die Mittelwertbildung und die statistische Auswertung (Standardabweichung, Variationskoeffizient) erfolgten ohne hoch signifikante Ausreißer. Im Vergleich zu Literaturwerten [16] und Prüfnormen wurden bei den Untersuchungen vergleichbare Präzisionen erzielt.

Tabellarischer Vergleich

Tab. 4 Minimale und maximale Variationskoeffizienten von Wiederholbarkeitsprüfungen ausgewählter Standard-Prüfmethode, Vergleich Forschungsprojekt (PTS) und Prüfnormen

		Wiederholpräzision in %	
		PTS	Prüfnorm
Stoffdichte		2,6 – 4,9	
Aschegehalt	ISO 2144 / 1977	1 – 1,3	0,5 – 0,7
Langfasern	Tappi 271 om-02 / 2002	3,2 – 4,8	1,3 – 4,7
Kurzfasern	Tappi 271 om-02 / 2002	1,5 – 2,3	1,3 – 4,7
Feinstoffe	Tappi 271 om-02 / 2002	5,4 – 7,6	1,3 – 4,7
SR-Wert		2,4 – 3,2	
Dicke	ISO 534 / 1988	1,7 – 3,1	1,1 – 2,6
SCT	ISO 9895 / 1989	2,6 – 5,9	<= 3,0
CMT	EN ISO 7263 / 1995		4,5
Berstfestigkeit	ISO 2758 / 1986		3,6 – 13,2
Bruchkraft	ISO 1924	2,1 – 3,9	3,8 – 5,8
Bruchdehnung	ISO 1924	6,1 – 9,9	4,5 – 9,0

Ergebnis

Wie den tabellarischen Ergebnissen zu entnehmen ist, können Stoffeigenschaften mit einem Fehler von zum Teil deutlich weniger als 5 % ermittelt werden. Festigkeitsmessungen unterliegen in der Regel einem vergleichbaren Fehler, nur Berstfestigkeit und Bruchdehnung können aufgrund der Messtechnik größeren Schwankungen unterliegen.

^I Präzision: Zufällige Streuung der Messwerte

^{II} Wiederholpräzision: Die Wiederholpräzision, in der älteren Literatur auch Wiederholbarkeit genannt, ist das Ausmaß der Übereinstimmung zwischen Ergebnissen unabhängiger Messungen desselben Analyten, die unter folgenden Bedingungen durchgeführt wurden: dasselbe Messverfahren, derselbe Bearbeiter, dasselbe Instrument, derselbe Ort, dieselben Versuchsbedingungen, Wiederholung der Messungen innerhalb kurzer Zeitintervalle

4.4.3 Schwankungsbreite der Probenahme

Durchführung der Untersuchungen

Zur Überprüfung der Schwankungsbreite der Probenahme und des Altpapier-eintrags wurden nach der Grobsortierung in unterschiedlichen Zeitabständen 19 Proben entnommen und die in 4.4.2 aufgelisteten Parameter analysiert. Die Zeitabstände richteten sich nach den Zyklen innerhalb der Papierfabrik:

- 0,5 h: Vollständiger Austausch des Pulpers
- 1,5 h: Stofffluss vom Pulper bis zum Fertigpapier
- 4 h: Vollständiger Austausch des Kreislaufwassers

Nach Erfahrungen des Betreibers waren im Rohstoffeintrag (je 1/3 1.02 (B12), 1.04 (B19) und 1.05 (B19) einer Großhandelskette) keine jahreszeitlichen und Lieferanten bedingten Schwankungen feststellbar. Die Probenahme erfolgte nach der Grobsortierung (Schwermuttabtrennung und Lochsortierung), um Einflüsse durch Stippen und grobe Verunreinigungen weitestgehend auszuschließen.

Ergebnis

Bei der Bestimmung der Stoffeigenschaften (Stoffdichte, Asche, Fiberlab, SR) ist die Schwankungsbreite der Probenahme größer als die Wiederholpräzision, d.h. die Schwankungsbreite der Messmethode. Daraus kann geschlossen werden, dass die beobachtbaren Schwankungen der Stoffeigenschaften dem Prozess und dessen Rohstoffeintrag zuzuordnen ist.

Die Festigkeitseigenschaften unterliegen vergleichbaren Schwankungen. Damit führen signifikante Schwankungen in den Suspensionsproben zu entsprechenden Schwankungen in den Blatteigenschaften.

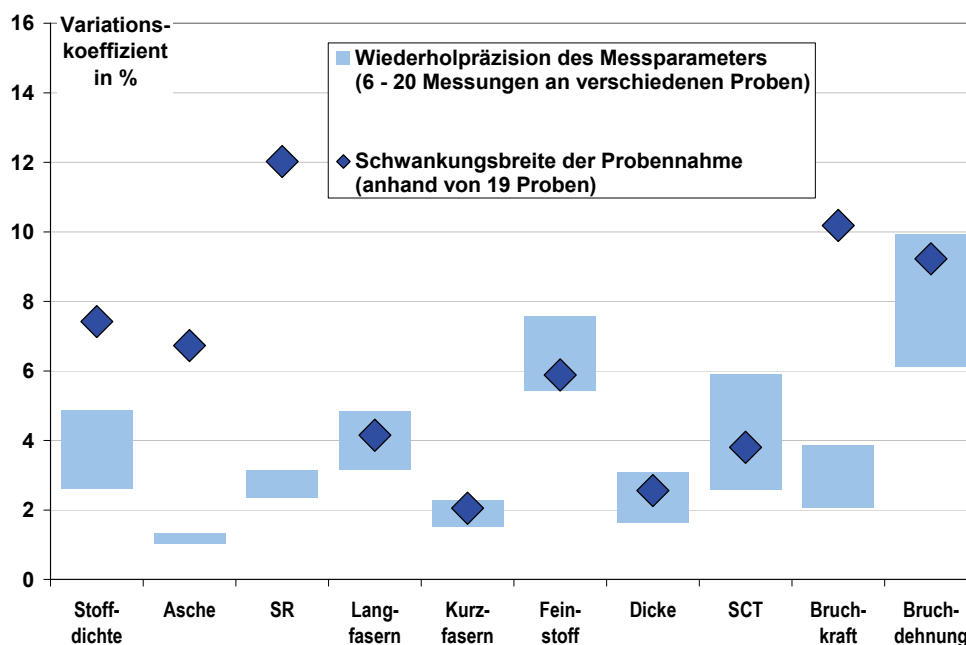


Abb. 2 Variationskoeffizienten der Schwankungsbreite einer Probe im Vergleich zur Wiederholpräzision

5 Bewertung des Festigkeitspotenzials

5.1 Möglichkeiten zur Verbesserung von Festigkeiten

Einleitung Um das Festigkeitspotenzial einer Stoffsuspension zu entwickeln und Festigkeiten am Endprodukt zu erreichen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die bei einer Bewertung des Festigkeitspotenzials berücksichtigt werden müssen. Die Tabelle **Tab. 6** zeigt eine strukturierte Übersicht über verfügbare Optionen. Da die Papierindustrie ständig bestrebt ist, weitere Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung zu entwickeln, erhebt die Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Bewertung Eine Bewertung dieser Möglichkeiten erfolgt anhand der Festigkeit steigernden Wirkung, der Umsetzbarkeit (unterteilt in wirtschaftliche und technische Aspekte) und des Aufwands, der mit Kosten verbunden ist.

Tab. 5 Bewertung der technologischen Verfahren zur Festigkeitssteigerung

	Festigkeit steigernde Wirkung	Umsetzbarkeit	Aufwand / Kosten
+++	Hoch		
++	Mittel		Sehr gering
+	Gering	Leicht realisierbar	Gering
0		Bedingt möglich	Mittel
-		Noch nicht erprobt	Hoch
?	unbekannt		

Wesentliche Verfahren und Möglichkeiten zur Verbesserung der Festigkeiten

Sowohl bei einer Bewertung des Festigkeitspotenzials als auch bei Simulationsrechnungen zum Erreichen vorgegebener Festigkeitseigenschaften sollten deshalb folgende Verfahren und Möglichkeiten berücksichtigt werden:

- Altpapiereinsatz
- Einsatz von Verstärkungstoffen
- Abtrennung von Asche und Feinstoff durch Flotation oder Wäsche
- Fraktionierung
- Mahlung
- Einsatz von Stärke
- Maschinenblattbildung

Obwohl der Einsatz von mikrofibrillierter Cellulose eine hohe Festigkeit steigernde Wirkung verspricht, wurde er aufgrund derzeit noch zu geringer Umsetzung in Papierfabriken und Datenbasis bei diesem Forschungsprojekt noch nicht berücksichtigt.

Tabellarische
Übersicht

Tab. 6 Technologischen Verfahren zur Festigkeitssteigerung

	Verfahren	Festigkeit steigernde Wirkung	Umsetzbarkeit		Aufwand / Kosten
			betriebs- wirtsch.	technisch	
Faserrohstoffe	Wareneingangskontrolle	+	+	+	+
	Auswahl geeigneter Altpapiersorten (1.02, 1.04, 1.05)	++	0	+	0
	Direktverträge zur Lieferung von besseren AP- Qualitäten (->1.05, 4.01)	+++	+	+	+
	Vorsortierung von AP-Qualitäten	++	+	0	-
	Einsatz von Verstärkungsstoffen (unge- bleichter Sulfatzellstoff, krafthaltige Altpa- papiersorten, Eukalyptuszellstoffe (Kurzfasern))	+++	+	+	-
Einsatz von Hilfsmitteln (etwas aufbringen bzw. zusetzen)	Stärke auf Oberfläche aufbringen	+++	0	+	0
	Pigmentierte Stärke CaCO ₃ zugeben	++	0	+	
	Kationische Stärke	++	0	+	
	granuläre Stärke	++	0	+	
	Stärke mit polymeren Additiven	++	0	+	
	Synthetische Verfestiger		0		
	Fasern durch Enzyme verbessern	+	-	-	-
	MFC Einsatz	+++	-	-	-
	CMC Einsatz	+++	-	-	-
	Leimung (auch einzelner Fraktionen)	++			
	Fraktionen mit Additiven versetzen	+	-	-	-
	Faseroberfläche chemisch verbessern	+	-	-	-
	Faserverbunde	+			
	Einsatz von Metallen oder Kunststoffen, um den Faserverbund zu verstärken	?			
Entfernung von Stoffkomponenten	Ascheaustrag	++	+	0	0
	Abtrennung von Störstoffen	+	+	+	0
	Antrennung Feinstoff	++			
	Abtrennung Mehlstoff	+	0	0	-
Beeinflussung des Maschinenblatts	Formation (Sollbruchstellen)				
	Faseranordnung (längs / quer)	+	0	+	0
	Pressen	+	0	+	0
	Trocknung (Temperatur, Dehnung, Vorspannung) Kalandrieren (Glättwerk)	0	0	+	0
Zusammensetzung des Fertigpapiers (anders aufbauen)	Erhöhung der Lagen (mehrere Stoffaufläufe, getrennte Stränge in der Stoffaufbereitung)	+	-	0	-
	Auftrag Sprühstärke/Schaum zwischen den Lagen				
Betrieb einer Fraktionierung	Nutzung geeigneterer Aggregate (Trennkriterium, Schlitzweite u.a.)	+	+	+	+
	Zweistufige Durchführung	+	+	0	+
Verbesserte Nutzung des Festigkeits- potenzials	Mahlung (Einstellgrößen: Stoffdichte, Fraktion, Mahlenergie, Rotor, 1-/2-stufig, Geräteauswahl)	++	0	+	-
	Elektrostatische Aufladung zur Verbesserung der Faser-Faser-Bindung / Nutzung von US	+			-

5.2 Festigkeitsentwicklung anhand von Profildarstellungen

Suspensionseigenschaften

Zur Bewertung der Festigkeitsentwicklung können im ersten Schritt die Suspensionseigenschaften über den gesamten Prozess dargestellt werden. Die folgende Abbildung zeigt die SR-Werte einer Papierfabrik.

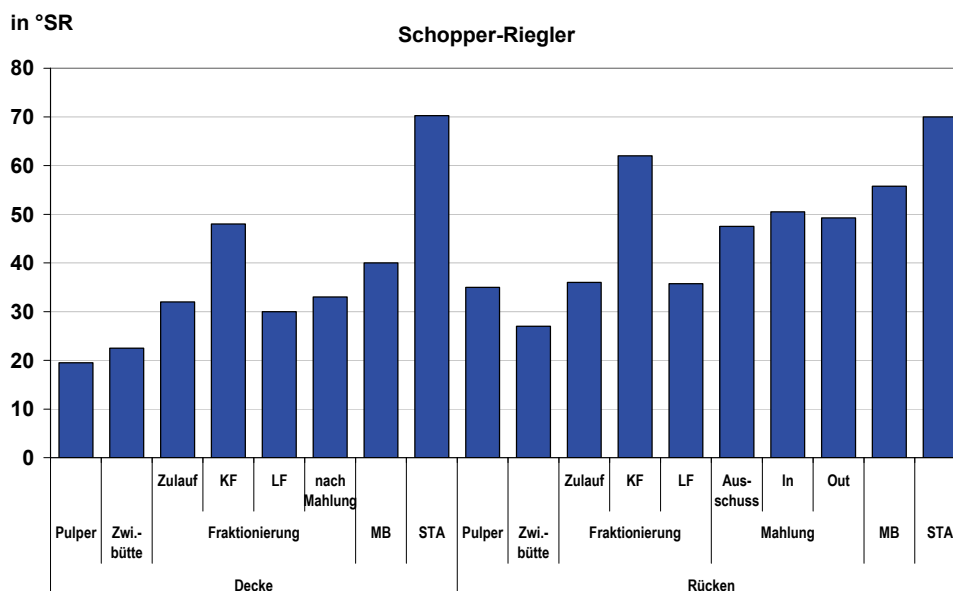


Abb. 3 Profil des SR-Wertes

Suspensionseigenschaften im Vergleich zu anderen Papierfabriken

Da die Konzepte zur Stoffaufbereitung in den Papierfabriken sehr unterschiedlich sein können, kann nach entsprechender Normierung und Vereinfachung ein Vergleich an folgenden Prozessschritten durchgeführt werden:

- Pulper (Ableerbütte)
- Grobreinigung, Ausgang
- Maschinenbütte
- Stoffauflauf

Dabei können einerseits die einzelnen Lagen und andererseits Mittelwerte, gebildet aus den einzelnen Lagen, miteinander verglichen werden. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich von 3 Papierfabriken:

Der Vergleich zeigt, dass die Papierfabriken 2 und 3 unterschiedliche Altpapiersorten in Decke und Rücken einsetzen. Im Mittel ergibt sich ein Aschegehalt, der auch in Papierfabrik 1 zu verzeichnen ist.

Darüber hinaus fällt auf, dass in Papierfabrik 3 aschereicherer Siebwasser im Loop der Papiermaschine gefahren wird. Dies führt zu einem höheren Aschegehalt im Stoffauflauf. Papierfabrik 2 weist ebenfalls ein höheres Ascheniveau im Siebwasser auf.

Da die Ascheretention in Papierfabrik 2 niedriger als in Papierfabrik 1 ist, werden in beiden Papierfabriken die gleichen Aschegehalte im Papier erreicht. Bei Papierfabrik 3 hingegeben wird aufgrund des hohen Aschehaushaltes in der Papiermaschine ein höherer Aschegehalt im Papier erreicht.

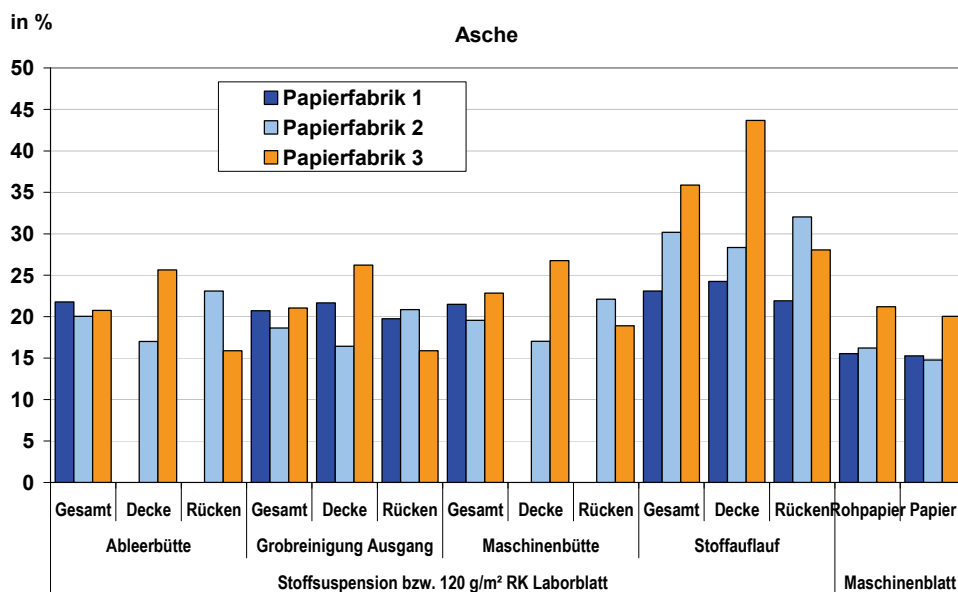


Abb. 4 Aschegehalte in 3 Papierfabriken

Festigkeitseigenschaften

Die an den Labor- und Maschinenblättern gemessenen Festigkeiten zeigen sehr gut, wie die Entwicklung der Festigkeitseigenschaften über den gesamten Prozess erfolgt. Aufgrund der unterschiedlichen Flächengewichte bietet sich zu Vergleichszwecken eine indizierte Darstellung an.

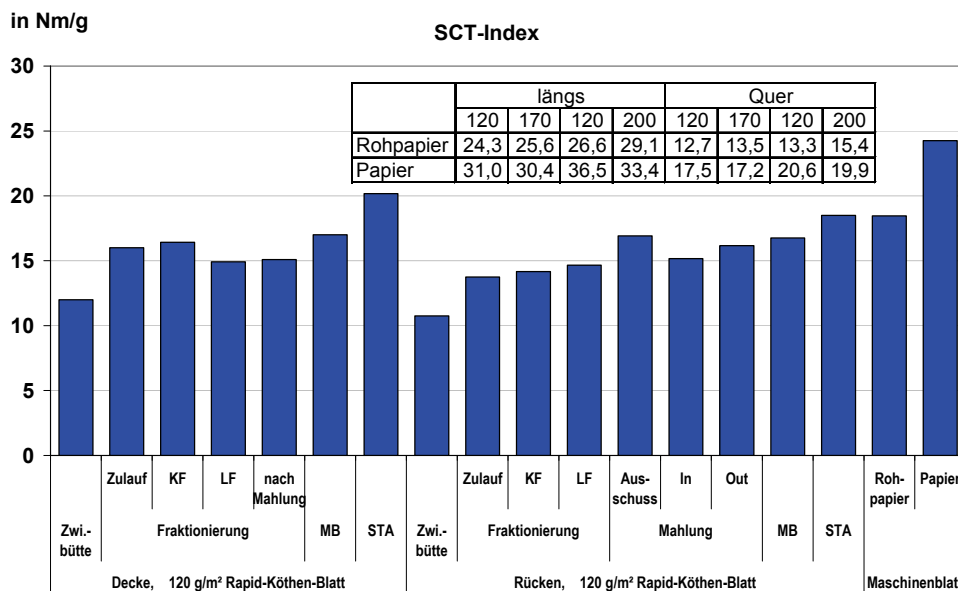


Abb. 5 Profil des SCT-Index in einer Papierfabrik

Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu anderen Papierfabriken

Analog zu den Suspensionseigenschaften können die Festigkeiten zwischen unterschiedlichen Papierfabriken verglichen werden:

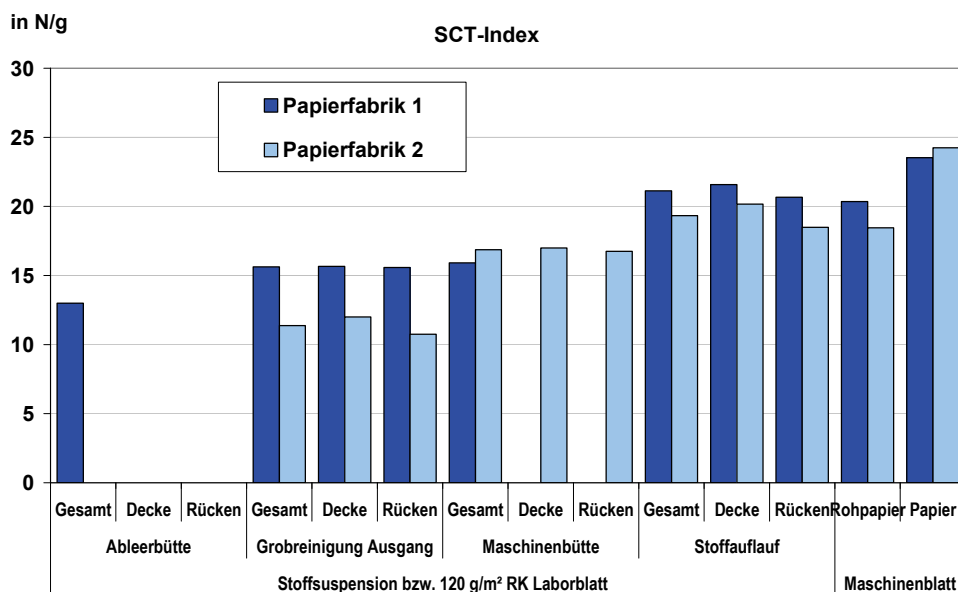


Abb. 6 SCT-Index in 2 Papierfabriken

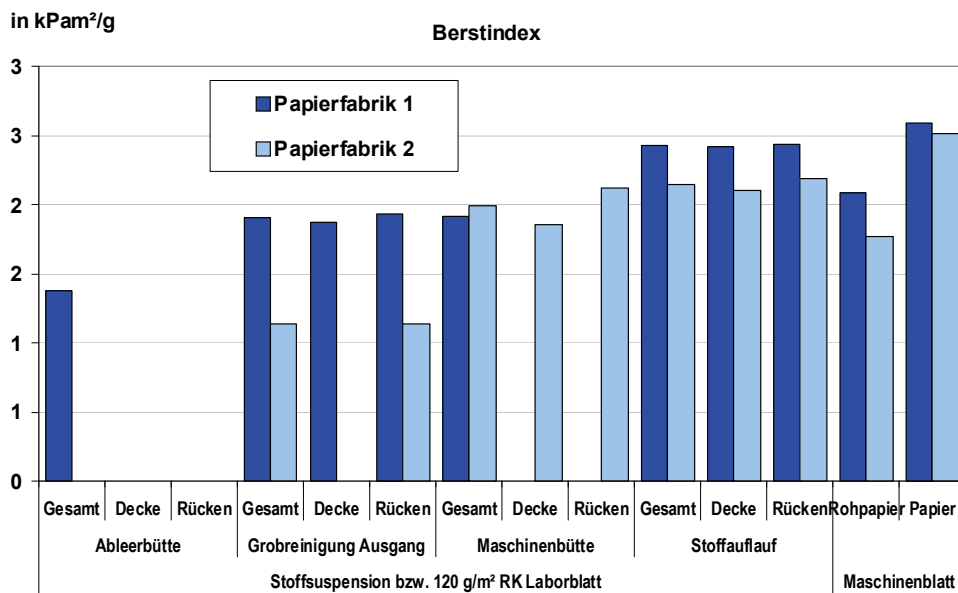


Abb. 7 Berstindex in 2 Papierfabriken

Das eingesetzte Altpapier in Papierfabrik 2 weist ein geringeres Festigkeitsniveau hinsichtlich des SCT-Wertes als bei Papierfabrik 1 auf. Durch eine Mahlung des Langfaseranteils im Decken- und im Rückenstrang kann in der Maschinenbütte ein vergleichbares Festigkeitsniveau erreicht werden.

Aufgrund des höheren Aschehaushalts sind im Stoffauflauf und im Rohpapier der Papierfabrik 2 die SCT-Werte geringer als in Papierfabrik 1. Durch einen erhöhten Stärkeauftrag sind dann in Papierfabrik 2 vergleichbare Festigkeitswerte zu Papierfabrik 1 erreichbar.

5.3 Bewertung des Festigkeitspotenzials anhand von Kennwerten

Einleitung

Wie im vorangehenden Kapitel dargestellt, eignet sich eine Profildarstellung sehr gut, um die Entwicklung von Stoff- und Festigkeitseigenschaften innerhalb eines Betriebs aufzuzeigen. Um darüber hinaus vergleichende Bewertungen innerhalb einer Papierfabrik und zwischen verschiedenen Papierfabriken durchführen zu können, ist eine Normierung und Auswahl der Daten notwendig.

Auswahl von Festigkeitseigenschaften für die vergleichende Bewertung

Zur vergleichenden Bewertung können nur Festigkeiten herangezogen werden, die aufgrund der Messmethodik und des Aussagecharakters eine Vergleichbarkeit zulassen. Die folgende Abbildung zeigt die Festigkeiten, die im Rahmen des Forschungsprojekts gemessen worden sind:

Tab. 7 Wesentliche Charakteristika der verschiedenen Festigkeitsbestimmungen

	Berstfestigkeit	Spaltfestigkeit	SCT	CMT	Bruchkraft	Bruchdehnung	Reißlänge
Messung längs / quer	Keine Bedeutung	Getrennt	Getrennt	Nur längs	Getrennt		
Mittelung längs / quer möglich	+	+	+	0	+	+	+
Indizierung möglich (Bezug auf Flächengewicht bzw. Umrechnung auf andere Flächengewichte)	+	--	0	-	+	--	+
Eignung für Bewertung der Festigkeitsentwicklung	+	-	+	0	+	-	+

Bemerkung: Bruchkraft und Reißlänge führen zu vergleichbaren Ergebnissen

Um eine Festigkeitsentwicklung über den gesamten Prozess bewerten zu können, sollte einerseits die getrennte Messung der Festigkeiten in Längs- und Querrichtung möglich sein und andererseits der gemessene Festigkeitswert eine Indizierung erlauben. Unter diesen Gesichtspunkten sind zur vergleichenden Bewertung folgende Festigkeiten geeignet:

- Berstfestigkeit
- SCT
- Bruchkraft

Die Reißlänge wäre wie die Bruchkraft ebenfalls geeignet. Sie wird allerdings rechnerisch aus der Bruchkraft abgeleitet und bringt keine zusätzlichen Erkenntnisse.

Zur Normierung und Bewertung des Festigkeitspotenzials wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zahlreiche Kennwerte entwickelt. Im Folgenden werden die wesentlichen dargestellt.

Soll-Ist-Vergleich Anhand eines Soll-Ist-Vergleichs kann gezeigt werden, wie gut die geforderten Festigkeiten erreicht werden können.

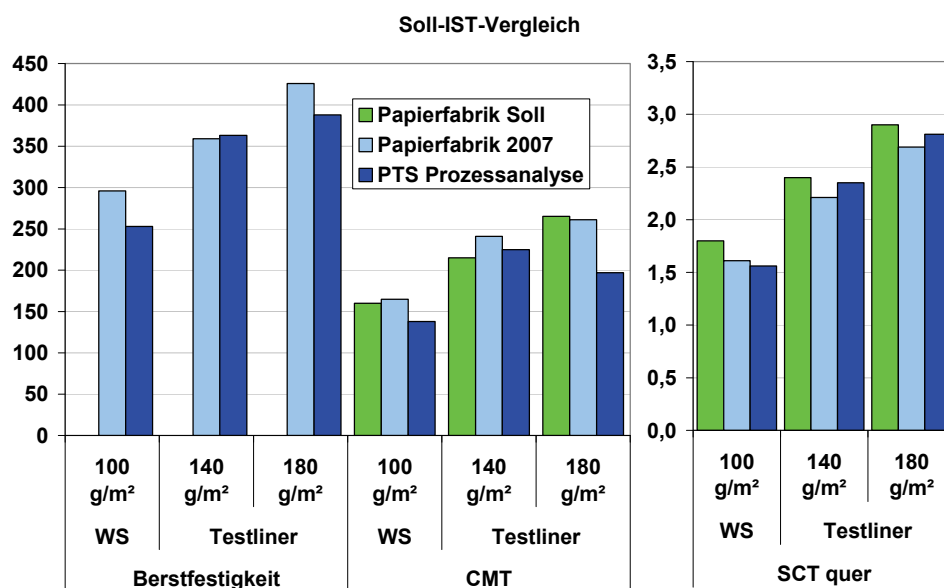


Abb. 8 Soll-Ist-Vergleich in einer Papierfabrik

Wie dem Vergleich zu entnehmen ist, konnten in der dargestellten Papierfabrik im Untersuchungszeitraum der PTS Prozessanalyse die geforderten Festigkeiten nicht erreicht werden.

Festigkeitsanteile Mit Festigkeitsanteil wird der prozentuale Festigkeitsanstieg berechnet, der mit Hilfe einer Prozessstufe erreicht werden kann. Als Bezugsgröße, die 100 % beträgt, wird für das RK-Laborblatt die Festigkeit an der Maschinenbütte festgelegt. Bei Maschinenblättern wird als Bezugsgröße, die 100 % beträgt, die Festigkeit vom Fertigpapier am Poperoller festgelegt.

Relative Festigkeitsentwicklung am RK-Laborblatt Die relative Festigkeitsentwicklung am RK-Laborblatt zeigt den prozentualen Anteil der Festigkeit, bezogen auf die Festigkeit am Ende der Stoffaufbereitung (Maschinenbütte). Dabei werden die Festigkeitswerte am RK-Laborblatt bestimmt und in einem sogenannten Stapeldiagramm zusammengefasst.

Bei dieser Darstellung ist sehr gut erkennbar, welchen Anteil die wesentlichen Prozessstufen Rohstoffeintrag, Mahlung und Sortierung an der Festigkeit nach der Stoffaufbereitung in der Maschinenbütte haben. An der Maschinenbütte wird auf 100 % normiert.

Durch die Rückführung des Siebwassers und die Zugabe der Wet-End Chemikalien wird der Stoff in der Regel so verändert, dass am Stoffauflauf eine weitere Festigkeitssteigerung gegenüber der Maschinenbütte festzustellen ist. Dies wird durch den gelben Balken dargestellt

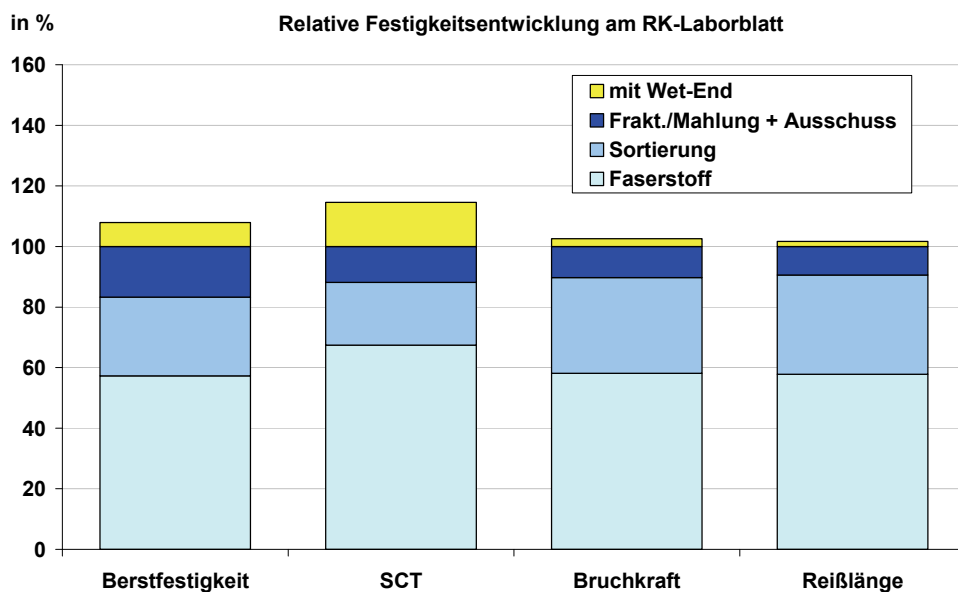


Abb. 9 Relative Festigkeitsentwicklung am RK-Laborblatt

Relative Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt

Die relative Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt zeigt den prozentualen Anteil der Festigkeit bezogen auf die Festigkeit des Fertigpapiers (Poperoller). Dabei werden die Festigkeitswerte am Maschinenblatt bestimmt und in einem sogenannten Stapeldiagramm zusammengefasst.

Bei der dargestellten Papierfabrik ist sehr gut zu erkennen, dass mit steigendem Flächengewicht die Festigkeitssteigerung durch den Stärkeinsatz immer geringer wird.

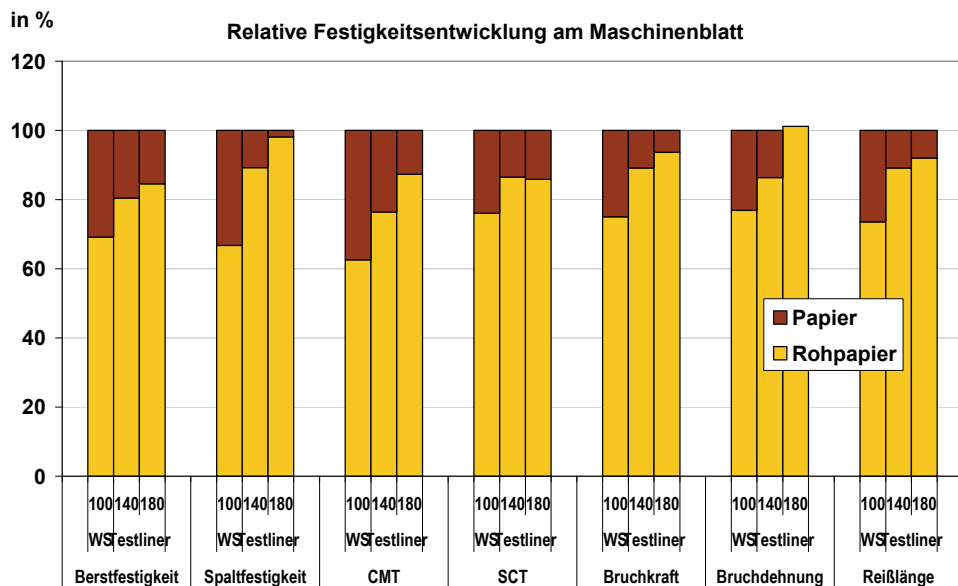


Abb. 10 Relative Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt

Eine Auswertung anhand indizierter Festigkeitswerte ergibt die gleichen Ergebnisse, da bei einer Darstellung anhand der prozentuellen Aufteilung das Flächengewicht keine Rolle spielt, d.h. das Flächengewicht kürzt sich heraus.

Absolute Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt

Die absolute Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt zeigt die Festigkeiten am Rohpapier und am Fertigpapier in Form eines Stapeldiagramms. Aufgrund des unterschiedlichen Flächengewichts ist eine Vergleichbarkeit nur bedingt gegeben.

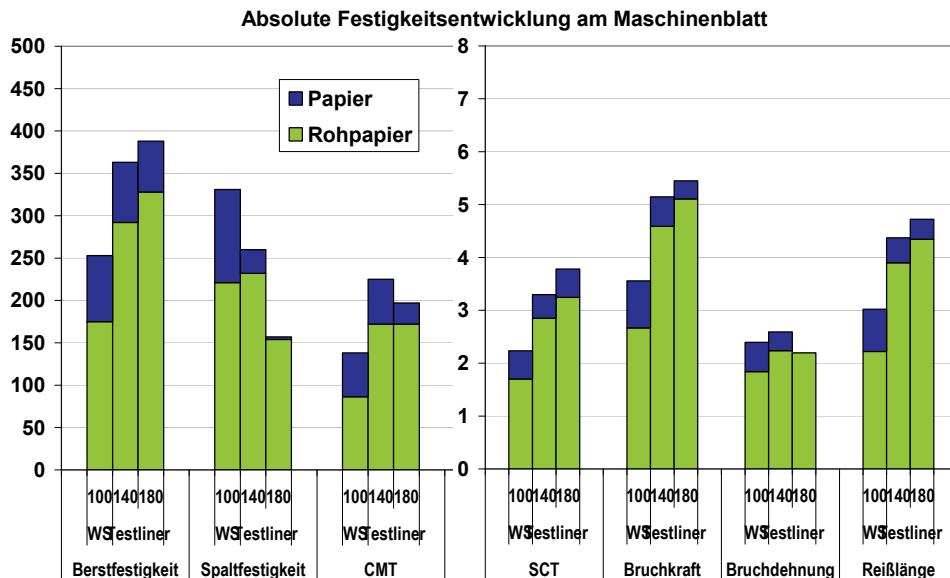


Abb. 11 Absolute Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt

Absolute Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt anhand indizierter Festigkeitswerte

Durch die indizierte Darstellung ist ein Vergleich der Festigkeiten möglich.

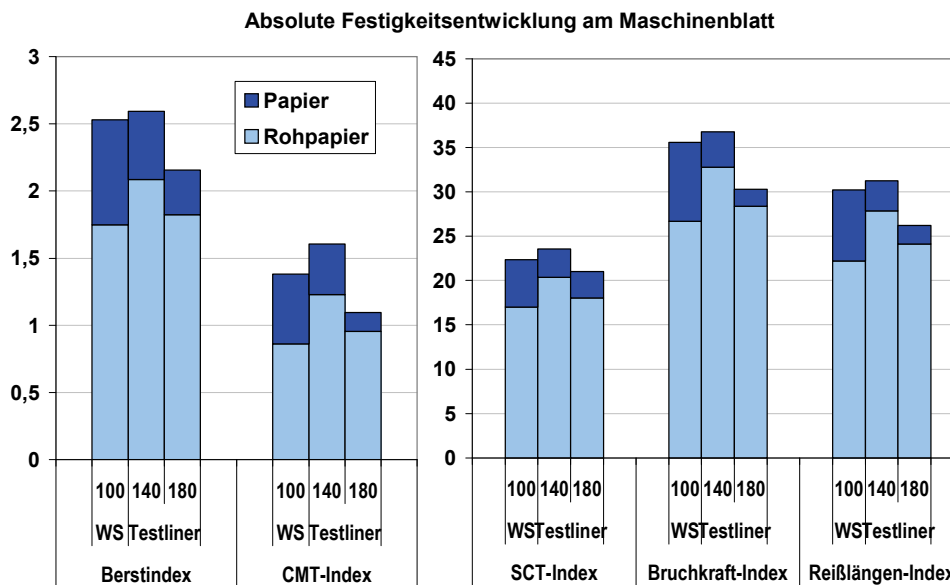


Abb. 12 Absolute Festigkeitsentwicklung am Maschinenblatt anhand indizierter Festigkeitswerte

Ranking der Einflussgrößen in der Stoffaufbereitung

Anhand der Auswertung zur Entwicklung des Festigkeitspotenzials kann grundsätzlich festgestellt werden, dass der Rohstoffeinsatz den mit Abstand größten Einfluss auf die Endfestigkeit hat. Dabei ist die Endfestigkeit nach der Stoffaufbereitung an der Maschinenbütte gemeint. Je nach Papierfabrik und Papiersorte kann dieser Anteil 60 – 99 % betragen.

Eine leistungsfähige Sortierung kann zu ca. 20 % an der Endfestigkeit beitragen. Dies wird vor allem durch die Entstippung und in geringerem Maße durch die Entfernung grober Verunreinigungen erreicht.

Eine Mahlung trägt in den untersuchten Fällen zu einer maximal 20 %igen Festigkeitssteigerung bei. Fehler bei der Rohstoffauswahl können hier nur in geringem Maße wieder ausgeglichen werden.

Ranking der Einflussgrößen in der Papiermaschine

Je nach Papiersorte und Festigkeitsparameter kann der Festigkeitsgewinn durch den Auftrag von Stärke an der Oberfläche 0 – 40 % betragen. Mit steigendem Flächengewicht wird entsprechend unseren Untersuchungen der Einfluss der Stärke geringer. So kann bei einem Flächengewicht von 100 g/m² der Festigkeitsgewinn durch die Stärke noch 40 % betragen (CMT bei Papierfabrik 1), bei 180 g/m² nur noch 10 %.

6 Simulationsmodelle

6.1 Weiterentwicklung des IDEAS-Modells

Einleitung	<p>Zur Implementierung der CAPD-Algorithmen musste das an der PTS verfügbare IDEAS-Modell um folgende wesentliche Schritte weiterentwickelt werden:</p> <ul style="list-style-type: none">• Standardisierte Definition der Parameter• Modellierung von frei wählbaren und modifizierbaren Eigenschaften im IDEAS Modell• Implementierung der Berechnung von Festigkeitseigenschaften• Weiterentwicklung und Ergänzung von fünf IDEAS Blöcken
Modellierung von frei wählbaren und modifizierbaren Eigenschaften im IDEAS Modell	<p>Zur Berechnung von Festigkeitseigenschaften werden neben den bilanzierbaren Stoffkomponenten (Asche, Langfasern, Kurzfasern und Feinstoff) auch Stoffeigenschaften herangezogen, die nicht bilanzierbar sind. Da im bislang verfügbaren IDEAS Modell derartige Eigenschaften noch nicht frei wählbar und modifizierbar waren, wurden an der PTS unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung der notwendigen Funktionalität getestet.</p> <p>Hinsichtlich Aufwand, Funktionalität und Nutzerfreundlichkeit hat sich die Realisierung als sogenannte Verhältniszahl durchgesetzt. Diese Lösung wurde für die Parameter Faserfestigkeit, Bindungsfestigkeit, SSA und WRV in den modifizierten Modellen umgesetzt.</p>
Implementierung der Berechnung von Festigkeitseigenschaften	<p>Wie in [1] und [17] dargestellt können die Festigkeitseigenschaften an einem RK-Laborblatt berechnet werden. Diese Berechnung von Festigkeiten wurde im IDEAS Block Display umgesetzt. Damit können für jede Stoffsuspension in der Computersimulation die Festigkeitseigenschaften am RK-Laborblatt prognostiziert werden.</p>
Weiterentwicklung und Ergänzung von IDEAS Standard Blöcken	<p>Das Konzept zur Erstellung von IDEAS Modellen basiert auf der Computer gestützten Modellierung von grundsätzlichen Funktionalitäten. Dabei werden alle Aggregate mit einer Trennfunktion (z.B. Sortierer, Cleaner, Filter, Flotation, Fraktionierung u.a.) in einem sogenannten IDEAS Block Sorter zusammengefasst [18, 19]. Aggregate, die eine Veränderung von Eigenschaften bewirken (z.B. Mahlung, Disperger u.a.) werden mit Hilfe eines IDEAS Block Converter abgebildet.</p> <p>Zur vollständigen Implementierung der Festigkeitseigenschaften ins IDEAS Modell mussten IDEAS Blöcke Converter und Define Constants neu konzipiert und programmiert werden. Die IDEAS Blöcke Source, Display und Sorter wurden um wesentliche Funktionalitäten erweitert [20, 21].</p>

6.2 Kostenmodellierung

Kostenbasis Für die Kostenmodellierung wurden im ersten Schritt aktuelle Daten für die einzelnen Kostenarten recherchiert. Aus den recherchierten Ergebnissen wurden marktübliche Werte für alle wesentlichen Kostenfaktoren abgeleitet. Die Tabelle zeigt die in den Kostenrechnungen genutzten Daten.

Tab. 8 Kostenbasis

		Einheit	Kosten	Quelle
Rohstoffe	AP 1.02 (B12)	€/t	90	Infoblatt Altpapier 11.03.2008
	AP 1.04 (B19)	€/t	100	
	AP 4.01 (W41)	€/t	110	
	AP 4.02	€/t	120	
	Verstärkungstoff	€/t	300	
Chemikalien (Additive)	Stärke	€/t	420	Betreiber- informa- tionen und PTS (typische Werte)
	Synthetischer Verfestiger	€/t	7000	
	Retentionsmittel	€/t	3100	
	Fixiermittel	€/t	2700	
	Nanopartikel	€/t	1000	
	Mikrobiozid	€/t	11500	
	Sonstige	€/t	350	
Entsorgung	Grobrejekte, Zöpfe	€/t _{utro}	100	PTS
	Metallhaltige Rejekte	€/t _{utro}	40	
	Feinrejekte	€/t _{utro}	80	
	Flotat	€/t _{utro}	80	
Energie	Strom	€/kWh	0,1	VOP
Investitionen	DAF	€/t _{Papier}	0,12	VOITH und PTS
	Mahlung (Verstärkungstoff)	€/t _{Papier}	0,16	
	Mahlung (Langfasern)	€/t _{Papier}	0,31	
	Flotation	€/t _{Papier}	0,94	
	Wäsche	€/t _{Papier}	1,2	
Sonstige	Frischwasser	€/m ³	0,01	PTS
	Abwasser	€/m ³	0,17	

Bei den Investitionskosten wurden eine Abschreibung auf 5 Jahre und ein erzielbarer Zinssatz von 10 % zu Grunde gelegt.

Kostentrends

Neben der Kostenbasis für das Jahr 2008 wurden anhand der Preisentwicklung in den letzten 10 Jahren und ausgewählter Befragungen folgende Kostenentwicklungen abgeleitet [22, 23]:

	2009	2013
Rohstoffe	+ 30 %	+ 50 %
Stärke	+ 100 %	+ 200%
Strom	+ 10 %	+ 45 %
Entsorgung	- 10 %	- 25 %

Kostenrechnung Die Kostenrechnungen selbst wurden in Excel realisiert. Dazu wurden die dazu notwendigen Stoffströme aus IDEAS nach Excel dynamisch übergeben. Da die Kostenbasis grundsätzlich bezogen auf Rohstoffeintrag bzw. Papierproduktion erstellt wurde, sind die Kostenfaktoren mit den Stoffströmen zu multiplizieren. Außerdem sind dann händisch noch die Kosten für die Investitionen und den Energieverbrauch für die einzelnen Verfahrensoptionen zur berücksichtigen. Für jedes Szenario werden Gesamtkosten und folgende Einzelkosten getrennt ausgewiesen:

- Rohstoffe
- Chemikalien
- Entsorgung
- Energie
- Investitionen

Bei der vergleichenden Ergebnisdarstellung wird grundsätzlich der Differenzbeitrag zu den Kosten des Ist-Zustands ausgewiesen.

6.3 Simulationsrechnungen

Modelleinstellung Die Einstellung des Modells auf den Ist-Zustand bzw. auf die einzelnen Szenarien wurde durch ein sogenanntes Monitorblatt in Excel realisiert. Alle wesentlichen Eingangsgrößen werden hier definiert und dynamisch an das IDEAS-Simulationsmodell übergeben. Außerdem werden hier alle Outputgrößen vom IDEAS-Simulationsmodell (z.B. Volumenströme, Stoffdichten, Faserfraktionen, ermittelten Festigkeiten u.a.) nach Excel zurückgegeben. Damit stehen in Excel alle Input- und Output-Daten der Szenarien zur Verfügung.

Modellgüte Durch entsprechende Kalibrierung der Simulationsmodelle konnte erreicht werden, dass an folgenden Prozessstufen für alle berücksichtigten Festigkeiten die modellierten Ergebnisse < 5 % von den tatsächlichen Messwerten abweichen:

- Ableerbütte
- Maschinenbütte
- Rohpapier
- Fertigpapier

7 Szenarienrechnungen

7.1 Festlegung der Szenarien

Einleitung Für die Durchführung von Simulations- und Optimierungsrechnungen wurde eine strukturierte und aufbauende Vorgehensweise entwickelt. Diese sah eine Definition und Auswahl modifizierter und neuer Verfahrenskonzepte vor (siehe auch Optionen in 5.1). Dabei wurden für die einzelnen Verfahrenskonzepte Szenarien mit unterschiedlichen Einstellungen gerechnet.

Szenarien

Ist-Zustand

Im Referenzprozess wurde der aktuelle Ist-Zustand einer Papierfabrik abgebildet. Als Rohstoff wird eine Mischung der Sorten 1.02, 1.04 und 4.01 eingesetzt. Der von Stippen und Verunreinigungen gereinigte Stoff wird ohne weitere Aufbereitungsstufen an die Papiermaschine gegeben. Dort erfolgt ein Stärkeauftrag mit einer Leimpresse.

Rohstoffe

Um den grundsätzlichen Einfluss des Rohstoffeinsatzes bewerten zu können, wurden Szenarien gerechnet, bei denen nur jeweils eine Altpapiersorte eingesetzt wurde. In einem weiteren Szenario wurde der normalen Rohstoffmischung ein nennenswerter Anteil an hochwertigem Altpapier der Sorte 4.02 zugemischt.

Kreislaufwasserreinigung mit DAF

Ein mögliches Verfahrenskonzept ist die Reinigung des Kreislaufwassers mit Hilfe einer DAF (dissolved air flotation), um einen Teil der Asche und der Feinstoffe austragen zu können.

Verstärkungstoff

Ein wesentliches Szenarienkonzent war der Einsatz von Verstärkungstoffen. Diese bestehen aus krafthaltigem, ungebleichtem Zellstoff. Die Szenarien betrachteten zwei unterschiedliche Zugabemengen, wobei die Verstärkungstoffe mit spez. Mahlenergien von 50 bzw. 100 KWh/t_F behandelt wurden.

Fraktionierung und Mahlung des Langfaseranteils

Der Einsatz einer zusätzlichen Mahlung wurde für spezifische Mahlenergien von 25 KWh/t_F bzw. 50 KWh/t_F bei zwei verschiedenen Fraktionierungsraten simuliert und bewertet.

Flotation

Dieses Szenario beinhaltete eine Flotation des Hauptstoffstroms. Die Flotation war bei den Simulationsrechnungen so ausgelegt, dass sie zur Reduzierung der Stoffverluste zweistufig ausgeführt war. Im Gesamtergebnis wurden dabei die Feinstoffe und die Asche um jeweils 19 % reduziert. Die Gesamtrejektrate betrug 4 %, die Kurz- und Langfaserverluste jeweils 3 %.

Wäsche

Ein weiteres Szenarienkonzent war die Wäsche des Hauptstoffstroms (Vollstrom und 60 % Teilstrom). Hierbei wurden Feinstoffe zu 44 % und Asche zu

79 % ausgetragen. Da das Waschwasser mit Hilfe einer DAF gereinigt wurde und die Flotate ausgetragen wurden, verursachte die Wäsche einen Stoffverlust von 32 % (Verlust an Kurzfasern: 13%).

Szenariengruppen

Auf der Basis dieser Szenarien wurden Simulations- und Optimierungsrechnungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Zur Gliederung wurden sogenannte Szenariengruppen definiert. Die Tabelle zeigt eine Übersicht.

Tab. 9 Szenariengruppen

Szenariengruppe (SZG)	Zielstellungen
I	Simulationsrechnungen an einer Auswahl unterschiedlicher Szenarien (ca. 20) für folgenden Szenarienkonzepte: <ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffe • Zuschaltung DAF für Kreislaufwasser • Einsatz von Verstärkungstoffen • Betrieb einer Mahlung im Langfaserstrom nach entsprechender Fraktionierung • Zuschaltung einer Flotation im Vollstrom • Zuschaltung einer Wäsche im Teil- und Vollstrom mit Stoffaustrag nach Reinigung des Waschwassers (DAF)
I opt	Optimierungsrechnungen für ausgewählte Szenarien zur Reduzierung der Gesamtkosten bzw. Erhöhung der Festigkeit
II	Die in SZG I definierten Szenarien werden mit Oberflächenstärke auf eine definierte Festigkeit (SCT) eingestellt.
II Zukunft	Kostenrechnungen für die Jahre 2008, 2009 und 2013 auf der Basis der in SZG II definierten Szenarien
II SCT+10%	Simulations- und Optimierungsrechnungen für ausgewählte Szenarien zur Erhöhung der Festigkeit SCT um 10 %
III	Optimierung der Festigkeit bei gleich bleibenden Kosten
IV	Optimierung Kosten und Festigkeit (SCT)

Optimierungsrechnungen

Anhand der Simulationsergebnisse wurde eine erste Bewertung der Szenarienrechnungen durchgeführt. Darauf aufbauend wurden Szenarien ausgewählt, bei denen mit Hilfe eines einfachen Solvers Optimierungsrechnungen durchgeführt.

Tab. 10 Optimierungsrechnungen

Szenario	SCT	Einstellungen
S1opt	± 0 %	Optimierung Altpapiereinsatz
S3opt	+ 10 %	Optimierung Altpapier- und Verstärkungstoffeinsatz
S4opt	+ 5 %	Optimierung Altpapier + Fraktionierung + Mahlung
S6opt	+ 10 %	Optimierung Altpapiereinsatz + Wäsche
S-B1	± 0 %	Kostenminimum durch Optimierung Altpapiereinsatz
S-B2	+ ca. 5 %	Maximale Festigkeitserhöhung bei gleich bleibenden Kosten durch Teilstromflotation und Optimierung Altpapiereinsatz

Szenariendefinition

Für die verschiedenen Verfahrenskonzepte wurden Szenarien mit folgenden Einstellungen ausgewählt:

Tab. 11 Szenariendefinition

Szenarienkonzzept	Nr.	Einstellungen und Szenariendefinition
IST-Zustand	S0	Referenzprozess
Rohstoff	S1.1	Einsatz 100 % Altpapiersorte 1.02
	S1.2	Einsatz 100 % Altpapiersorte 1.04
	S1.3	Einsatz 100 % Altpapiersorte 4.01
	S1.4	AP-Mix: 40% AP 4.02, jeweils 20% AP 1.02, AP 1.04 und AP 4.01
	S1opt	Optimierung des Rohstoffeinsatzes (Solver)
DAF	S2.1	Kreislaufwasserreinigung mit DAF zu 50%
	S2.2	Kreislaufwasserreinigung mit DAF zu 100%
Verstärkungsstoff	S3.1.1	Anteil Verstärkungsstoff 10%; spez. Mahlenergie: 50 kWh/t _F
	S3.1.2	Anteil Verstärkungsstoff 10%; spez. Mahlenergie: 100 kWh/t _F
	S3.2.1	Anteil Verstärkungsstoff 30%; spez. Mahlenergie: 50 kWh/t _F
	S3.2.2	Anteil Verstärkungsstoff 30%; spez. Mahlenergie: 100 kWh/t _F
	S3opt	Optimierung Einsatz Verstärkungsstoff (Solver)
Fraktionierung	S4.1.1	Mahlanteil 30% des Stoffstroms; spez. Mahlenergie: 25 kWh/t _F
	S4.1.2	Mahlanteil 30% des Stoffstroms; spez. Mahlenergie: 50 kWh/t _F
	S4.2.1	Mahlanteil 55% des Stoffstroms; spez. Mahlenergie: 25 kWh/t _F
	S4.2.2	Mahlanteil 55% des Stoffstroms; spez. Mahlenergie: 50 kWh/t _F
	S4opt	Optimierung Fraktionierung und Mahlung (Solver)
Flotation	S5	Flotation des Vollstoffstroms
Wäsche	S6.1	Wäsche des Vollstoffstroms
	S6.2	Wäsche des Teilstoffstrom
	S6opt	Optimierung Wäsche (Solver)
Optimum	S-B1	Optimum (Solver) bei SCT konstant
	S-B2	Optimum (Solver) bei SCT +5%

Variantenbaum

Die folgende Abbildung zeigt die ausgewählten Szenarien als Variantenbaum.

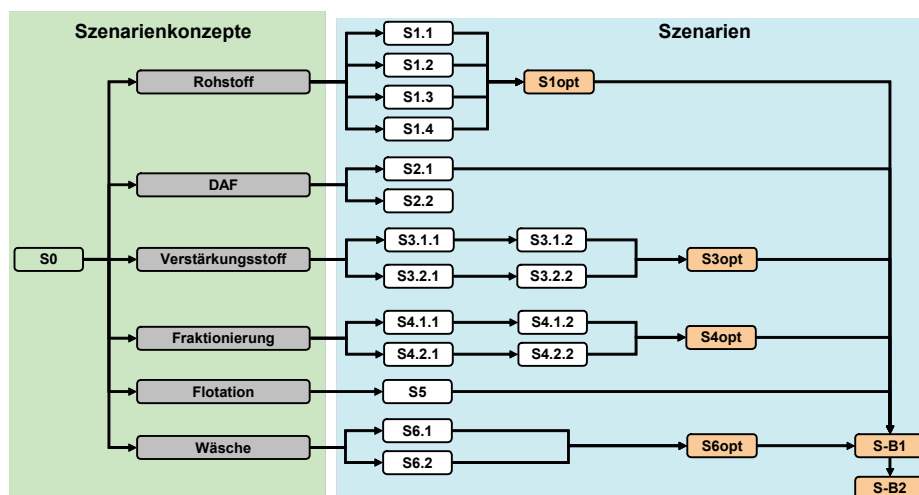


Abb. 13 Variantenbaum

7.2 Ergebnisse grundlegender Simulations- und Optimierungsrechnungen

Festigkeitsentwicklungen

Analog zu den Auswertungen in Kapitel 5.3 werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen als Festigkeitsentwicklung am RK-Blatt und am Maschinenblatt im Vergleich dargestellt.

Beim Einsatz von Verstärkungsstoffen sowie beim zusätzlichen Betrieb einer Flotation bzw. Wäsche können minderwertigere Rohstoffe eingesetzt werden. Wie bei allen anderen Verfahrenskonzepten tragen die Rohstoffe größtenteils zur Endfestigkeit bei. Der Anteil der Stoffaufbereitung wird jedoch größer.

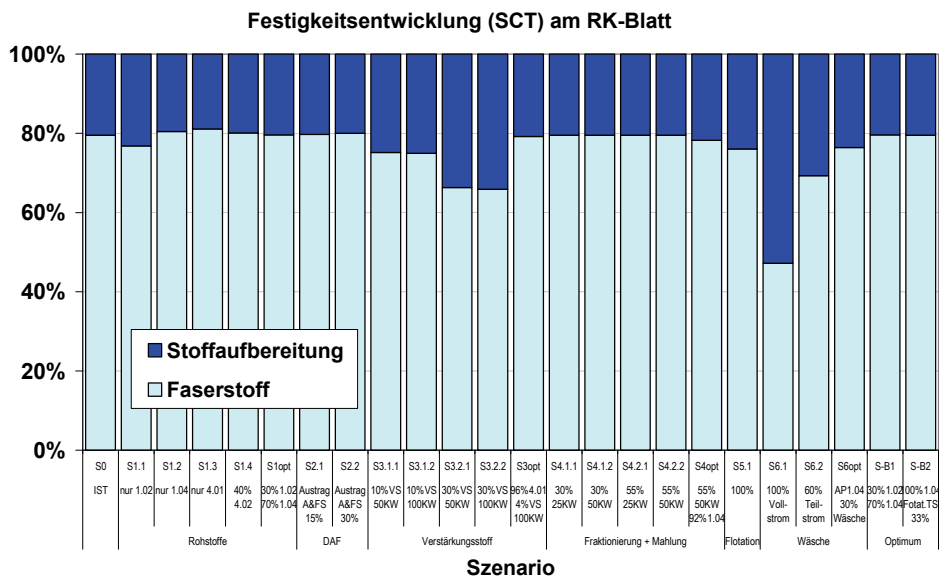


Abb. 14 Festigkeitsentwicklung am RK-Blatt für Szenariengruppe I

Durch den einheitlichen Stärkeauftrag können am Maschinenblatt folgende Festigkeiten erreicht werden:

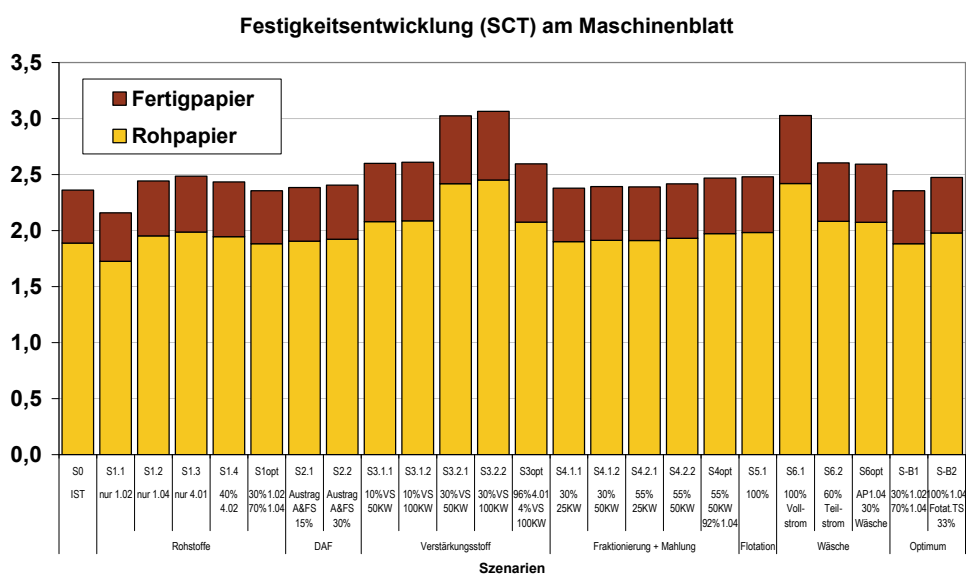


Abb. 15 Festigkeitsentwicklung für Szenariengruppe I

Anhand dieser konkreten Szenarienberechnungen können im Hinblick auf die Festigkeitsveränderungen folgende grundsätzlichen Aussagen zu den einzelnen Verfahrensoptionen gemacht werden:

Tab. 12 Erreichbare Festigkeitsveränderungen

Vergleich zum Ist-Zustand	Szenarien
- 10 %	Einsatz von Altpapier 1.02
+ 0...5 %	Bessere AP-Sorten, Mahlung, Flotation
+ 10 %	10 % Verstärkungsstoff, 30 - 60 % Wäsche
+ 25 %	30 % Verstärkungsstoff, 100 % Wäsche

Kosten

Mit der in 6.2 dargestellten Kostenbasis können folgende Kostenänderungen zum Ist-Zustand ausgewiesen werden:

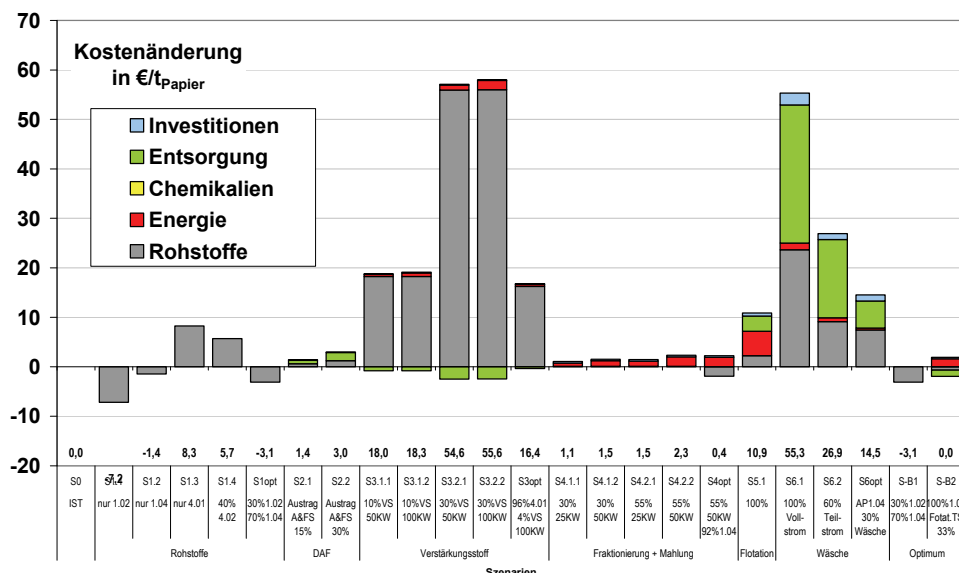


Abb. 16 Kostenänderungen für Szenariengruppe I

Die Rohstoffkosten stellen in jedem Fall den dominieren Anteil bei den Kostenänderungen dar. Bei Verfahrenskonzepten mit einem großen zusätzlichen Reststoffaustrag fällt die Entsorgung besonders ins Gewicht. Unter Berücksichtigung der Abschreibungen und der Zinskosten haben Investitionskosten auf die Kostenbilanz keinen großen Einfluss. Auch die Energiekosten spielen eine eher untergeordnete Rolle im Vergleich zu Rohstoff- und Entsorgungskosten.

Bewertung der Szenarien

Zur Bewertung der Szenarien wurde die Darstellung in **Abb. 17** entwickelt, bei der die Kostenänderung dem Festigkeitsgewinn gegenüber gestellt wurde. Dabei ist in der Regel eine Kostenänderung mit einer entsprechenden Änderung der Festigkeiten verbunden. So bringen sehr teure Technologieoptionen auch hohe Festigkeitsgewinne, während der Einsatz von preisgünstigem Altpapier mit einem entsprechenden Festigkeitsverlust verbunden ist. Einige wenige Szenarien hingegen zeichnen sich durch positive Kostenentwicklung bei entsprechendem Festigkeitsgewinn aus. Diese Szenarien wurden mit einem grünen Punkt gekennzeichnet.

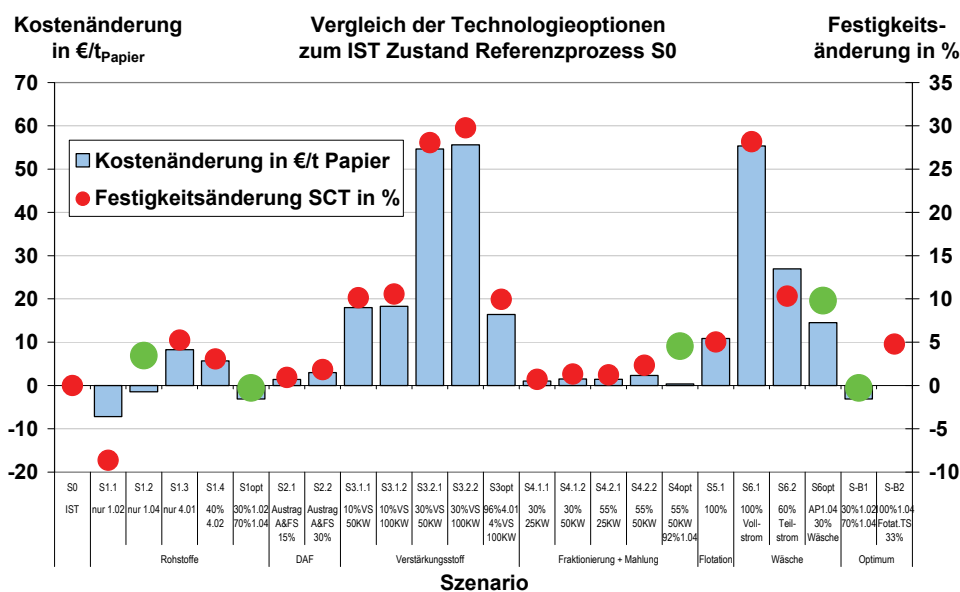


Abb. 17 Vergleich der Technologieoptionen für Szenariengruppe I Rohstoffe

Die Wahl des Rohstoffes hat signifikante Auswirkungen auf den Streifenstauchwiderstand (SCT). Durch den ausschließlichen Einsatz von Altpapier der Sorte 1.02 sinkt der SCT-Wert um ca. 9% gegenüber dem Ursprungsszenario. Dies ist mit einem Kostenvorteil von ca. 9 €/t_{Papier} verbunden. Wird hingegen nur Altpapier 1.04 eingesetzt, so kann eine Festigkeitssteigerung um 3,4% bei einer Kostensenkung um 1,4 €/t_{Papier} erzielt werden.

Eine Optimierungsrechnung mit Hilfe eines einfachen Solvers führte dazu, dass mit einer Mischung 30% Altpapier der Sorte 1.02 und 70% Altpapier der Sorte 1.04 die gleiche Referenzfestigkeit wie beim Ist-Zustand erreicht und die Kosten um 3,1 €/t_{Papier} gesenkt werden können (Szenario S1opt). Um die Referenzfestigkeit zu erreichen, sind keine weiteren Kosteneinsparungen möglich.

Kreislaufwasserreinigung mit DAF

Der Einsatz einer Kreislaufwasserreinigung mit anschließendem Flotataustrag führte durch die Abtrennung von Asche und Feinstoffen zu einer Festigkeitssteigerung von 1 bis 2%. Da dies mit einem zusätzlichen Bedarf an Altpapierrohstoffen und einer Erhöhung der Entsorgungskosten verbunden ist, führt diese Technologieoption zu keinen signifikanten Vorteilen.

Verstärkungsmittel

Durch den Einsatz von Verstärkungsmitteln sind enorme Festigkeitssteigerungen zu erreichen. Dies ist jedoch mit hohen Kosten verbunden. Optimierungsrechnungen zeigten, dass mit Hilfe von Verstärkungsmitteln kein Kostenvorteil durch den Einsatz minderwertiger Altpapiersorten oder durch den Einsatz zusätzlicher Aufbereitungsschritte erreicht werden kann. Verstärkungsmittel führen in jedem Fall zu einem Festigkeitsgewinn.

Aus diesem Grunde wurde eine Optimierungsrechnung mit dem Ziel durchgeführt, durch den Einsatz von Verstärkungsmitteln die Festigkeit um 10% bei geringsten Kosten zu erhöhen. Dies konnte mit folgenden Einstellungen erreicht

werden (Szenario 3opt):

- 4% Verstärkungstoff
- 96% Altpapier 4.01
- Mahlung des Verstärkungstoffes bei 100 KWh/t_F

Der Festigkeitsgewinn um 10% konnte mit einem minimalen Mehraufwand von ca. 16 €/t_{Papier} erzielt werden.

Fraktionierung und Mahlung des Langfaseranteils

Mit einer Mahlung des Langfaseranteils nach einer Fraktionierung sind nur geringe Festigkeitsgewinne bei leicht steigenden Kosten zu erreichen.

Durch eine weitere Optimierungsrechnung konnte die Festigkeit um 5 % bei nahezu gleich bleibendem Kostenniveau gesteigert werden. Wie den Einstellungen von Szenario 4opt zu entnehmen ist, muss dazu auch der Rohstoffeinsatz angepasst werden:

- 8% Altpapier 1.02
- 92% Altpapier 1.04
- Fraktionierung mit 55% Langfaseranteil
- Mahlung des Langfaseranteils bei 50 KWh/t_F

Flotation

Durch die Flotation des Gesamtstroms ist ein Anstieg des Streifenstauchwiderstands um 5% möglich. Aufgrund der Rejektrate von 4% führen steigende Rohstoff- und Rejektmengen zu Mehrkosten von 10,9 €/t_{Papier}.

Wäsche

Setzt man eine Wäsche zur Aufbereitung der Stoffsuspension ein, so kann der Streifenstauchwiderstands um 28% gesteigert werden. Aufgrund der enormen Rejektrate von 32% müssen bei der Wäsche die Verluste durch einen erhöhten Einsatz von Primär- oder Sekundärfasern kompensiert werden. Selbst bei einer Rohstoffrezeptur, die bei den Szenarienrechnungen auf den ausschließlichen Einsatz von Altpapier der Sorte 1.02 optimiert wurde, bedeutet dies Mehrkosten von ca. 55 €/t_{Papier}.

Durch eine Teilstromwäsche von 60 % konnte der SCT um ca. 10% bei einem Kostenanstieg um ca. 26 €/t_{Papier} erhöht werden. Um den gleichen Festigkeitsanstieg zu erreichen, zeigten weitere Optimierungsrechnungen, dass durch eine bessere Rohstoffauswahl (100 % Altpapier der Sorte 1.04) die Teilstromwäsche auf 30 % und die Mehrkosten auf 14,5 €/t_{Papier} reduziert werden können. Andere Technologieoptionen führten zu keinen geringeren Zusatzkosten, um die Festigkeit um 10 % zu erhöhen.

Optimum S-B1:

Durch die Optimierungsrechnung B1 wurde versucht, durch Nutzung aller zur Verfügung stehenden Verfahrensoptionen ein Kostenminimum bei gleich bleibendem Festigkeitsniveau zu erreichen. Dies konnte nur mit einer Optimierung des Rohstoffeinsatzes erreicht werden. Andere Maßnahmen, wie z.B. eine Flotation oder eine Mahlung führten aufgrund der hohen Energiepreise zu keinen zusätzlichen Kosteneinsparungen. Damit konnte die Referenzfestigkeit mit einem Kostenvorteil von maximal 3,1 €/t_{Papier} erreicht werden. Das Optimum S-B1 entspricht dem Szenario S1opt.

Optimum S-B2:

Diese Optimierungsrechnung basiert auf dem Szenario S1.2, bei dem ausschließlich der Altpapierrohstoff 1.04 verwendet wurde. Zusätzlich wurde ein Teilstoffstrom (40%) in einer Flotation aufbereitet. Mit diesem Verfahrenskonzept kann bei gleich bleibenden Kosten der SCT um maximal 5,1% gesteigert werden.

Ranking in Szenariengruppe I

Anhand der in Szenariengruppe I erzielten Simulations- und Optimierungsrechnungen lassen sich die Szenarien getrennt nach Kosten- und Festigkeitseffekt ranken.

Die größte Kosteneinsparung von 3,1 €/t erreicht man durch Optimierung des Rohstoffeinsatzes bei gleich bleibenden Festigkeiten.

Bei gleich bleibenden Kosten können die Festigkeiten um maximal 5,2 % mit Hilfe einer Flotation im Teilstrom erhöht werden.

Bei den nachfolgenden Auswertungen können weitere interessante Optionen zur Festigkeitssteigerung bzw. Kostenoptimierung aufgezeigt werden.

Tab. 13 Ranking Kosten in Szenariengruppe I

Pos.	Szenario	Kosten- effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S-B1	- 3,1	± 0	Optimierung Rohstoffe
	S1opt	- 3,1	± 0	Optimierung Rohstoffe
2	S1.2	- 1,43	+ 3,4	nur AP 1.04
3	S4opt	+ 0,36	+ 4,6	Fraktionierung + Mahlung bei 8% AP 1.02 und 92% AP 1.04

Tab. 14 Ranking Festigkeiten in Szenariengruppe I

Pos.	Szenario	Kosten- effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S-B2	± 0	+ 5,2	nur AP 1.04 + 33 % Teilstromflotation
2	S4opt	+ 0,36	+ 4,6	Fraktionierung + Mahlung bei 8% AP 1.02 und 92% AP 1.04
3	S1.2	- 1,43	+ 3,4	nur AP 1.04

7.3 Ergebnisse zur Erreichung bestimmter Festigkeitsniveaus unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Festigkeitsentwicklung

In Szenariengruppe II wurde für jedes Szenario aus Gruppe I noch soviel Stärke in der Oberfläche zugegeben, dass ein einheitlicher, vordefinierter Festigkeitswert von 2,4 erreicht wurde. Damit kann am RK-Blatt die gleiche Festigkeitsentwicklung wie bei Szenariengruppe I verzeichnet werden (siehe 7.2). Die folgende Abbildung zeigt, wie durch den unterschiedlichen Stärkeauftrag am Maschinenblatt die einheitliche Festigkeit im Fertigpapier erreicht wird.

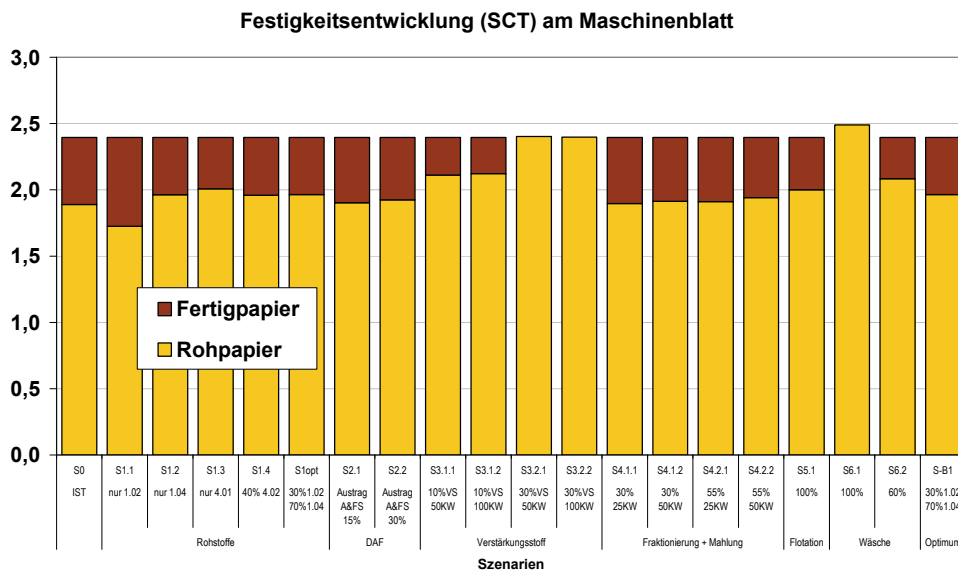


Abb. 18 Festigkeitsentwicklung für Szenariengruppe II

Kosten

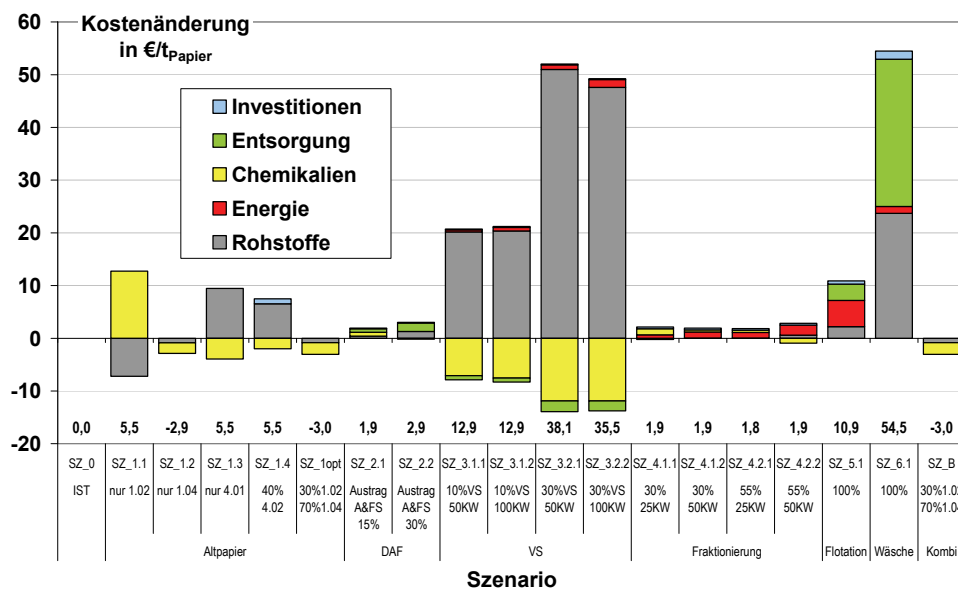


Abb. 19 Kostenänderungen für Szenariengruppe II

Der unterschiedliche Stärkeinsatz bei der Szenariengruppe II führt zu den in Abb. 19 dargestellten Kostenänderungen gegenüber dem Ist-Zustand. So

können beim Szenario S1.1 durch den günstigeren Rohstoff zwar ca. 8 €/t an Kosten eingespart werden. Durch den erhöhten Stärkeauftrag ergeben sich im Gesamtergebnis jedoch Mehrkosten von 5,5 €/t_{Papier}.

Bewertung der Szenarien

Anhand der in Szenariengruppe II erzielten Simulations- und Optimierungsrechnungen lassen sich die Szenarien hinsichtlich des Kosteneffekts bei möglichst gleich bleibenden Festigkeiten ranken.

Wie bei Szenariengruppe I wird die größte Kosteneinsparung durch Optimierung des Rohstoffeinsatzes bei gleich bleibenden Festigkeiten erreicht.

Tab. 15 Ranking Kosten bei gleich bleibender Festigkeit SCT

Pos.	Szenario	Kosten- effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S-B1	- 3	± 0	Optimierung Rohstoffe
	S1opt	- 3	± 0	Optimierung Rohstoffe
2	S1.2	- 2,9	± 0	nur AP 1.04
3	S4.2.1	+ 1,8	± 0	Fraktionierung mit 55 % Langfasern + Mahlung bei 25 KWh/t _F

Bewertung der Kostenentwicklung

Anhand der in Abschnitt 6.2 dargestellten Kostentrends kann in folgender Abbildung gezeigt werden, dass bei jeder Verfahrensoption, auch beim Ist-Zustand, die absoluten Gesamtkosten aufgrund der steigenden Rohstoff- (Altpapier, Stärke) und Energiekosten stark ansteigen.

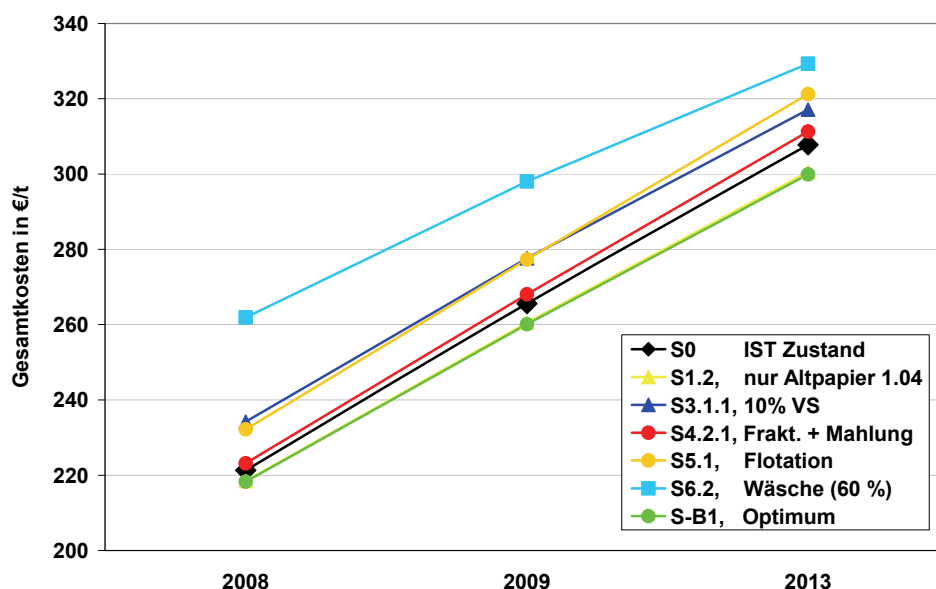


Abb. 20 Entwicklung der Gesamtkosten bei gleich bleibendem Festigkeitsniveau

Um die zukünftigen Kostentrends besser zu veranschaulichen, werden die

Kosten ins Verhältnis zum Ist-Zustand gesetzt:

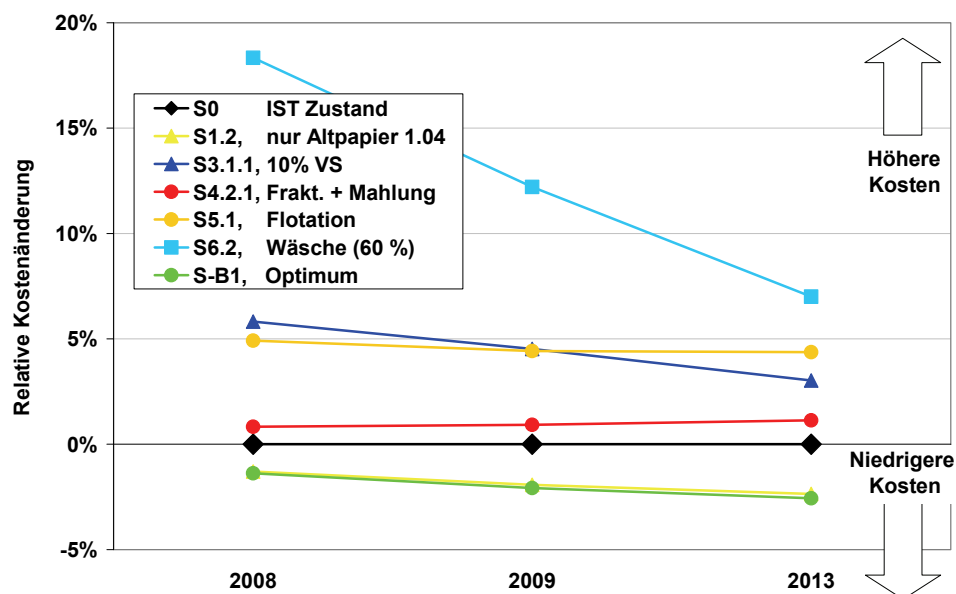


Abb. 21 Entwicklung der relativen Kostenänderung bei gleich bleibendem Festigkeitsniveau

Hier ist deutlich zu sehen, dass nur der Einsatz von Altpapier 1.04 oder die optimale Altpapiermischung in Szenario S-B1 eine günstigere Kostenentwicklung als der derzeitige Ist-Zustand aufweisen. Da bei diesen Szenarien der Stärkeinsatz verringert werden kann, können durch den Einsatz qualitativ hochwertiger Rohstoffe die derzeit überproportional steigenden Stärkekosten kompensiert werden. Alle anderen Verfahrensoptionen werden in den nächsten 5 Jahren höhere Kosten als der Ist-Zustand verursachen. Falls die Entsorgungskosten auch langfristig weiter fallen sollten, so können sich in Zukunft auch Verfahrensoptionen wie z.B. der Einsatz von Verstärkungsstoffen oder der Betrieb einer Teilstromwäsche gegenüber dem Ist-Zustand rechnen.

Trotz fallender Entsorgungskosten kann bei Energie intensiven Produktionsstufen, wie Mahlung, Fraktionierung oder Flotation, aufgrund steigender Energiepreise kein positiver Kosteneffekt gegenüber dem Ist-Zustand ausgewiesen werden.

Steigerung der Festigkeit um 10 % (Szenariengruppe II SCT+10%)

Die bereits dargestellten Szenarien und weitere Optimierungsrechnungen zeigten, dass mit dem derzeitigen Rohstoffeinsatz (S0) das Festigkeitsniveau nicht um 10 % erhöht werden kann. Auch mit einem verstärkten Einsatz an Oberflächenstärke oder mit einer Mahlung des Langfaseranteils ist es nicht möglich, den SCT um 10 % zu steigern.

Eine Festigkeitssteigerung von 10 % ist nach den Simulations- und Optimierungsrechnungen nur mit dem Einsatz von Verstärkungstoffen oder dem Betrieb einer Wäsche möglich. Die folgende Tabelle zeigt ein Ranking hinsichtlich der dazu notwendigen Kosten:

Tab. 16 Ranking Kosten bei SCT + 10 %

Pos.	Szenario	Kosteneffekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S6opt	+ 14,5	± 10	nur AP 1.04 + 30 % Wäsche
2	S3opt	+ 16,4	± 10	96% AP 4.01 + 4% Verstärkungstoff (Mahlung bei 100 KWh/t _F)
3	S3.1.1	+ 18,0	± 10	10 % Verstärkungstoff (Mahlung bei 50 KWh/t _F) mit Standard AP

Die folgende Darstellung der relativen Kostenentwicklung zeigt dabei sehr deutlich, dass bei Verfahrensoptionen mit einem hohen Reststoffaufkommen, z.B. Wäsche, die steigenden Rohstoff- und Energiekosten durch die fallenden Entsorgungskosten sehr gut kompensiert werden können. Eine Festigkeitserhöhung von 10 % kann damit auch längerfristig mit 6,5 % höheren Kosten erreicht werden.

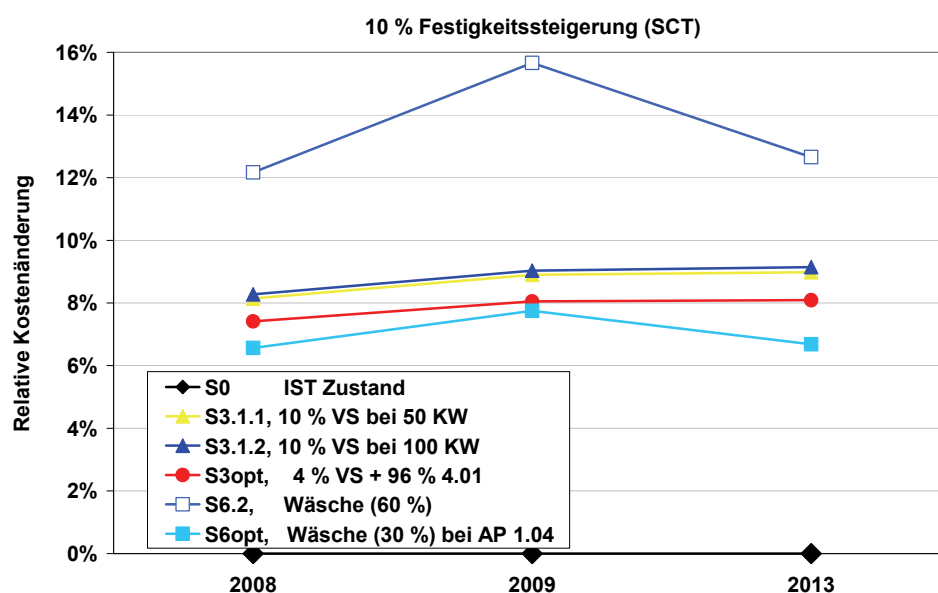


Abb. 22 Entwicklung der relativen Kostenänderung bei Erhöhung der Festigkeit um 10 % (SCT)

Steigerung der Festigkeit um 25 % (Szenariengruppe II SCT+25%)

Eine Festigkeitssteigerung um 25 % ist mit diesen beiden Technologieoptionen ebenfalls möglich. Dabei sind dann entweder 30 % Verstärkungsstoffe oder eine 100 %ige Wäsche einzusetzen. Die Kostensteigerung beträgt in jedem Fall mehr als 50 €/t_{Papier}.

Unter Berücksichtigung der Kostentrends (Rohstoffkosten steigen, Entsorgungskosten fallen) ist die Wäsche dem Einsatz von Verstärkungsstoffen vorzuziehen.

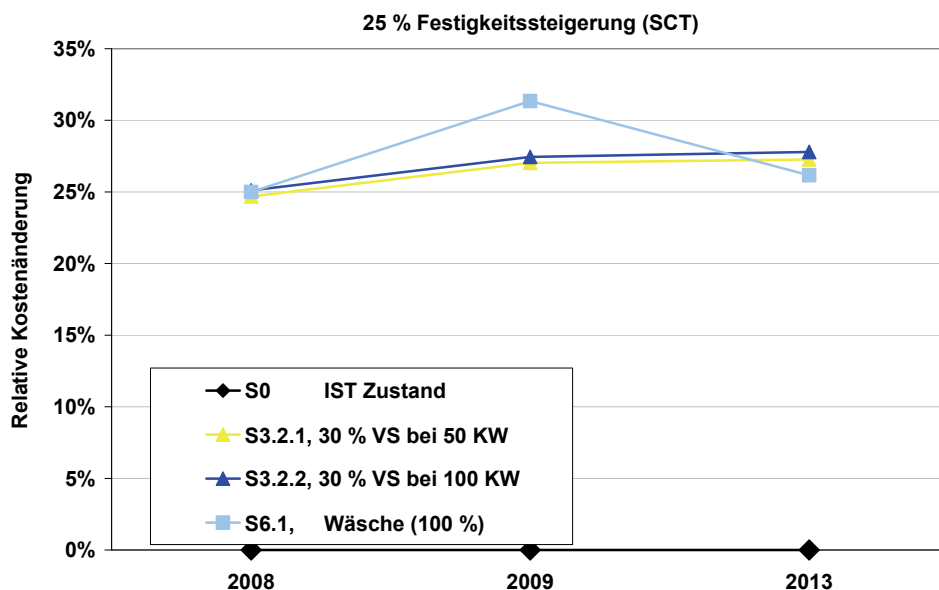


Abb. 23 Entwicklung der relativen Kostenänderung bei Erhöhung der Festigkeit um 25 % (SCT)

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Einleitung

Anhand der Untersuchungen, Bewertungen, Simulations- und Kostenrechnungen können unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten Handlungsempfehlungen zu folgenden Gesichtspunkten zusammengefasst werden:

- Kostenoptimierung bei gleich bleibenden Festigkeiten (SCT \pm 0 %)
- Maximal mögliche Festigkeiten bei gleich bleibenden Kosten
- Kostenoptimierung bei SCT + 10 %
- Kostenoptimierung bei SCT + 25 %
- Zukünftige Kostenentwicklung bei gleich bleibenden Festigkeiten

Kostenoptimierung bei SCT \pm 0 %

Um das derzeitige Qualitätsniveau hinsichtlich der Festigkeiten zu sichern, sollte die Rezeptur des Altpapierstoffeinsatzes optimiert werden. Dabei können durch den vermehrten Einsatz der Altpapiersorte 1.04 Kosten von maximal 3,1 €/t_{Papier} eingespart werden. Dadurch können die überdurchschnittlich steigenden Stärkekosten am besten kompensiert werden.

Tab. 17 Ranking Kosten bei gleich bleibender Festigkeit SCT

Pos.	Szenario	Kosten-effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S-B1	- 3,1	\pm 0	30 % AP 1.02, 70 % AP 1.04
	S1opt	- 3,1	\pm 0	30 % AP 1.02, 70 % AP 1.04
2	S1.2	- 2,9	\pm 0	100 % AP 1.04
3	S4.2.1	+ 1,8	\pm 0	Fraktionierung mit 55 % Langfasern + Mahlung bei 25 kWh/t _F

Festigkeit bei Kosten \pm 0 %

Durch den ausschließlichen Einsatz von Altpapier 1.04 ist bei leicht sinkenden Kosten eine Festigkeitssteigerung um 3,4 % möglich. Durch eine zusätzliche 33 %ige Teilstromflotation kann diese auf maximal 5,2 % erhöht werden. Eine Mahlung des Langfaserstoffes nach entsprechender Fraktionierung bringt bei vergleichbarem Rohstoffeinsatz einen nahezu gleichen Effekt.

Tab. 18 Ranking Festigkeiten bei nahezu gleich bleibenden Kosten

Pos.	Szenario	Kosten-effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S-B2	\pm 0	+ 5,2	100 % AP 1.04 + 33 % Teilstromflotation
2	S4opt	+ 0,36	+ 4,6	Fraktionierung + Mahlung bei 8% AP 1.02 und 92% AP 1.04
3	S1.2	- 1,43	+ 3,4	100 % AP 1.04

Kostenoptimierung bei SCT ± 10 %

Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass bei dem derzeitigen Rohstoffeinsatz (Szenario Ist-Zustand) eine Festigkeitssteigerung um 10 % auch durch einen verstärkten Einsatz an Oberflächenstärke nicht erreicht werden kann.

Auch eine Mahlung der Langfaserfraktion nach entsprechender Fraktionierung reicht nicht aus, den Streifenstauchwiderstand um 10 % zu erhöhen.

Nur der Einsatz von geringen Mengen an Verstärkungstoff (ca. 4 bis 10 % des Gesamtrohstoffs) oder eine Teilstromwäsche bei optimiertem Altpapiereinsatz ermöglichen derartige Festigkeitssteigerungen.

Tab. 19 Ranking Kosten bei SCT + 10 %

Pos.	Szenario	Kosten- effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S6opt	+ 14,5	± 10	nur AP 1.04 + 30 % Wäsche
2	S3opt	+ 16,4	± 10	96% AP 4.01 + 4% Verstärkungstoff (Mahlung bei 100 KWh/t _F)
3	S3.1.1	+ 18,0	± 10	10 % Verstärkungstoff (Mahlung bei 50 KWh/t _F) mit Standard AP

Kostenoptimierung bei SCT ± 25 %

Sehr hohe Festigkeitssteigerungen können nur durch kostenintensive Maßnahmen erreicht werden. Hier sind abermals der Einsatz von Verstärkungstoffen und der Betrieb einer Wäsche zu nennen. Allerdings ist die Menge an Verstärkungstoff auf 30 % zu erhöhen, um die Festigkeit um 25 % steigern zu können. Alternativ kann auch ein etwas minderwertiger Rohstoff zu 100 % gewaschen werden, um den gleichen Festigkeitsgewinn zu erreichen.

Tab. 20 Ranking Kosten bei SCT + 25 %

Pos.	Szenario	Kosten- effekt	Effekt SCT	Kommentar/Stellgrößen
		In €/t	In %	
1	S3.2.1	+ 54,6	± 28	30 % Verstärkungstoff (Mahlung bei 50 KWh/t _F) mit Standard AP
2	S3opt	+ 55,3	± 28,2	100 % Wäsche mit 100% AP 1.02
3	S3.2.2	+ 55,6	± 29,8	30 % Verstärkungstoff (Mahlung bei 100 KWh/t _F) mit Standard AP

Zukünftige Kostenentwicklung

Um das derzeitige Festigkeitsniveau bei gleich bleibenden Kosten halten zu können, kommt nur eine Optimierung des Altpapiereinsatzes bei leicht sinkendem Stärkeinsatz in Frage. Alle weiteren Verfahrensoptionen sind in den nächsten 1 bis 5 Jahren hinsichtlich der Kostenentwicklung noch nicht konkurrenzfähig.

Falls die Entsorgungskosten jedoch langfristig weiter fallen sollten, so können sich in Zukunft auch Verfahrensoptionen wie z.B. der Einsatz von Verstärkungstoffen oder der Betrieb einer Teilstromwäsche gegenüber dem Ist-Zustand rechnen.

Trotz fallender Entsorgungskosten kann bei Energie intensiven Produktionsstufen, wie Mahlung, Fraktionierung oder Flotation, aufgrund steigender Energiepreise kein positiver Kosteneffekt gegenüber dem IST- Zustand ausgewiesen werden.

Sind jedoch signifikante Festigkeitssteigerungen geplant, so bringt der Einsatz von Verstärkungstoff kurzfristig einen Kostenvorteil. Aufgrund des hohen Reststoffanfalls und der sinkenden Entsorgungskosten kann sich langfristig jedoch die Wäsche gegenüber dem Verstärkungstoff durchsetzen.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dipl.-Ing. Lutz Hamann
Tel. 03529 / 551-657
Lutz.hamann@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau
Tel. 03529 / 551-657
Fax 03529 / 551-899

9 Literaturverzeichnis

- 1 KLEIN M., STRUNZ A.-M. und MEINL G.
Rechnergestützte Minimierung der Herstellungskosten für Wellpappenroh papier
PTS-Forschungsbericht BMWA 1108/03
- 2 N.N.
EN 643
European List of Standard Grades of Recovered Paper and Board
- 3 BORSCHKE D.
Rohstoffpotenziale von Verpackungspapieren und deren Auswirkungen auf das Anlagendesign
und die Produktqualität
Wochenblatt Für Papierfabrikation, Nr. 7 (2000), S. 419ff
- 4 VOGT M.
Trends in packaging grades and how machine concepts are to respond
IPE/PTS-Symposium Internacional,
Nuevos Desarrollos Tecnicos en el Reciclado del Papel, Conference Book, Valencia, 2003
- 5 RHODIUS D.
Beeinflussung von Festigkeiten durch die Altpapierqualität am Beispiel von Wellpappenpapier
Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 4 (1996), S. 136ff
- 6 SEPKE P.-W. und SCHNEIDER O.
Neue Erkenntnisse aus dem Versuch über die Mahlung von Altpapierstoff für Verpackungen
Wochenblatt Für Papierfabrikation, Nr. 1/2 (2005), S. 20ff
- 7 WOLF M.
Oberflächenstärkeinsatz bei Wellpappenroh papieren
Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 13 (2001), S. 888ff
- 8 BAIER I.
Der Einfluss von Stärke auf die Produktion von Wellpappenpapieren
PTS-Seminar Stärkeinsatz, Tagungsband, PTS-München, 1996
- 9 NAHRATH G.
Trends in der Herstellung von Wellpappe und Anforderungen an die Wellpappenroh papiere
Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 1/2 (2004), S. 18ff
- 10 N.N.
Wie fest sind Wellpappenroh papiere?
Allgemeine Papierrundschau, Nr. 18 (2001), S. 448
- 11 HAMANN L. und J. KAPPEN
Systematische, vollständige und effektive Optimierung von Stoffaufbereitungsanlagen in
Wellpappenroh papier und Karton herstellenden Papierfabriken
Heidenau: Papiertechnische Stiftung (PTS) 2006
PTS-Abschlussbericht BMWi 1207-03
- 12 KAPPEN, J. u. L.. HAMANN
Entwicklung einer Systemanalyse zur Kontrolle der Schmutzpartikel bei der Erzeugung von
Papieren aus Deinkstoff
Heidenau/München: PTS 2007, Forschungsbericht IW 50282
<http://www.ptspaper.de>

- 13 MOSTHOF T.
Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Datenaufnahme und Bewertung von Stoffaufbereitungsverfahren zur Herstellung von Verpackungspapier
München: TU München, Diplomarbeit 2005
- 14 BIENERT CH.
Dynamische Prozesssimulation als Mittel zur Optimierung der Deinkingtechnologie bei der Herstellung von Zeitungsdruckpapier in Altpapier verarbeitenden Papierfabriken
München: Papiertechnische Stiftung (PTS) 2002
PTS-Abschlussbericht AiF 12169
- 15 KUNTZSCH T.
Effektive Bewertung von Trennprozessen in der Stoffaufbereitung durch moderne fasermorphologische Messverfahren.
PTS-Forschungsbericht 10/07 IW 050280; <http://www.ptspaper.de>
- 16 PUTZ H.-J., STRAUß J.
Einfluss der Lagerung von Altpapierstoffproben auf physikalische und chemische Eigenschaften
ipw -, 87 - 97 (2008) Nr. 6
- 17 MEINL G.
Senkung der Rohstoffeinstandskosten durch angepasste Mischung von Faserstoffen ohne nachteilige Einflüsse auf Erzeugungsprozess und Produktqualität
Heidenau: PTS 2008, Forschungsbericht PTS-FB 01/08
- 18 BIENERT CH.
Reduzierung von Faserverlusten und Einsparungen von Entsorgungskosten durch Optimierung der Aufbereitung von Altpapier für die Erzeugung von graphischen Papieren mittels Prozesssimulation
München: Papiertechnische Stiftung (PTS) 2004, PTS-Abschlussbericht AiF 13355
- 19 NELSON G.L.:
The screening quotient: a better index for screening performance,
TAPPI Journal Vol.64, Nr. 5 S.133-134, 1981
- 20 MEYER S.
Innovative Weiterentwicklung der Prozesssimulation als Mittel zur Optimierung der Stoffaufbereitung und des Altpapiereinsatzes,
München/Bielefeld: Fachhochschule Bielefeld, Diplomarbeit 2007
- 21 ZHU X.
Weiterentwicklung der Prozesssimulation als Mittel zur Optimierung der Altpapieraufbereitung und zur Berechnung von Festigkeiten
München/Köthen: Hochschule Anhalt (FH), Diplomarbeit 2007
- 22 KAPPEN J., BIENERT CH., HAMANN L., MANOIU A., MEINL G., MEYER S., OFENBÖCK W., STRUNZ A., WISCHEROPP TH.
A holistic approach to cost optimisation in packaging paper production – development and application examples
Grenoble: CTP-PTS Packaging Symposium, März 2008
- 23 KAPPEN J., BIENERT CH., HAMANN L., MANOIU A., MEINL G., MEYER S., OFENBÖCK W., WISCHEROPP TH.
Integrated cost, product and process modelling in paper production
Madrid: COST Action E36, Mai 2008