



AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15823 BR

Laufzeit: 01.10.2008 - 30.09.2010

gefördert durch das BMWi aufgrund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages über die



Energieeinsparung bei der TMP-Erzeugung durch Elektronenbestrahlung der Hackschnitzel und Kombination der Bestrahlung mit weiteren, Energie einsparenden Verfahren

Schlussbericht

Januar 2011

Technische Universität Dresden

Institut für Holz- u. Papiertechnik
Professur für Papiertechnik

Prof. Dr.-Ing. H. Großmann

Institut für Pflanzen- u. Holzchemie

Prof. Dr. rer. nat. habil. S. Fischer

Institut für Holz- u. Papiertechnik
Professur für Holz- u.
Faserwerkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Professur für Papiertechnik
Technische Universität Dresden, Institut für Pflanzen- und Holzchemie
TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Professur für Holz- und
Faserwerkstofftechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **15823 BR**

**Energieeinsparung bei der TMP-Erzeugung durch Elektronenbestrahlung der
Hackschnitzel und Kombination der Bestrahlung mit weiteren, Energie einsparenden
Verfahren**

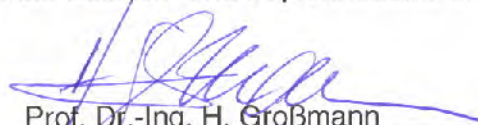
(Bewilligungszeitraum: 01.10.2008–30.09.2010)

der AiF-Forschungsvereinigung

Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.

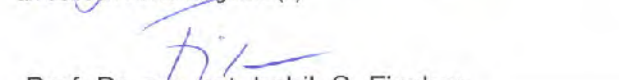
Dresden, 27.01.2011

Ort, Datum


Prof. Dr.-Ing. H. Großmann
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

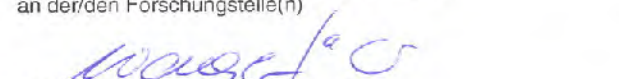
Tharandt, 27.01.2011

Ort, Datum


Prof. Dr. rer. nat. habil. S. Fischer
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Dresden, 27.01.2011

Ort, Datum


Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Beschreibung des Standes der Technik	2
2.1	Ausgangssituationen (Marktsituation)	2
2.2	Verfahren zur Mahlenergieeinsparung bei der Holzstofferzeugung	3
2.3	Imprägnierung und Elektronenbestrahlung	4
2.4	Schutzrechtssituationen	7
3	Forschungsziel und Lösungswege	8
4	Gesamtvorgehen, Probematerial und Versuchsdurchführungen	10
4.1	Gliederung des Forschungsprojektes in Arbeitspaketen	10
4.2	Projektbegleitender Ausschuss (PbA) und Vorhabenbezogene Aufwendungen der Wirtschaft (vAW).....	11
4.3	Probematerial und Versuchsdurchführungen	11
5	Ergebnisse	23
5.1	Imprägnierung der Hackschnitzel (AP 1).....	23
5.2	Variation der Schütthöhe und der Strahlendosis bei der Bestrahlung der Hackschnitzel	26
5.3	Vordämpfung, Extrudierung und veränderte Imprägnierbedingungen (AP 1)	32
5.4	Variation des Mahlspaltes beim TMP-Refiner und der Imprägnierung (AP 2 + 3)...	34
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Papierherstellung	39
5.6	Abschätzung der Kosten einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen Holzstoffherstellung in der Papierindustrie (AP 6).....	40
5.7	Einfluss der Bestrahlung auf die Zerfaserung von Holzstoffen (1. Mahlstufe) und auf die Eigenschaften der Laborblätter und der Faserwerkstoffe (AP 5).....	45
5.8	Ergebnisse der Upscalingversuche bei der Mahlung am IHD - Vergleich zwischen Batch- und kontinuierlicher Mahlung (AP 6)	48
5.9	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Faserplattenherstellung	55
5.10	Abschätzung der Kosten einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen Holzwerkstoffherstellung der Faserplattenherstellung (AP6).....	56
6	Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielen inklusiv Diskussion des Miteinsatzes für Personal und Leistungen Dritter	58
7	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsprojektes für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)	59
7.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse.....	59
7.2	Umweltrelevanz und innovativer Charakter der Forschungsergebnisse	60
8	Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Entwicklung der Industriepreise für Elektroenergie und Gas in Deutschland	2
Abbildung 2.2:	REM-Aufnahmen (Schnitt) unterschiedlich behandeltem Fichtenholz (eigene Untersuchungen)	7
Abbildung 3.1:	Modifizierter Refiner-Holzstoffprozess	9
Abbildung 3.2:	Elektronenbeschleuniger TT 300 der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH	10
Abbildung 4.1:	Versuchsablauf	12
Abbildung 4.2:	Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Strahlenintensität	14
Abbildung 4.3:	Messung der Strahlendosis	15
Abbildung 4.4:	Aufbau und Parameter der institutseigenen Laboranlage in Hainsberg	15
Abbildung 4.5:	Massebilanz an der TMP-Anlage	16
Abbildung 4.6:	Leistungsaufnahme einer Mahlstufe an der TMP-Anlage	16
Abbildung 4.7:	Vorgehensweise zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs	17
Abbildung 4.8:	Versuchsablauf mit Hackschnitzelpressung	18
Abbildung 4.9:	Hackschnitzelbestrahlung und Faserwerkstoffherstellung	21
Abbildung 4.10:	TMP-Anlage im Technikum der TUD – Batch-Betrieb	22
Abbildung 4.11:	TMP-Anlage am IHD (Quelle: IHD) – quasi kontinuierlicher Betrieb	22
Abbildung 5.1:	Flüssigkeitsaufnahme bei der Hackschnitzel-Imprägnierung	24
Abbildung 5.2:	SO ₂ -Schwingungen in Abhängigkeit von der Bisulfit-Imprägnierung	25
Abbildung 5.3:	Variation der Imprägnierbedingungen	26
Abbildung 5.4:	Entwässerungsverhalten bei steigender Strahlungsdosis, Imprägnierung und Schütthöhe konstant	27
Abbildung 5.5:	Fasereigenschaften in Abhängigkeit von der Strahlungsdosis	27
Abbildung 5.6:	Festigkeitseigenschaften bei steigender Strahlungsdosis und sinkenden CSF-Wert	28
Abbildung 5.7:	Tensile-Index und Abwasserbelastung bei steigenden Schütthöhen, Imprägnierung und Bestrahlung konstant	29
Abbildung 5.8:	Optische Eigenschaften bei steigender Strahlungsdosis	30
Abbildung 5.9:	Rauhigkeit (PPS) und Faserverteilung (McNett) in Abhängigkeit von der Hackschnitzelvorbehandlung	30
Abbildung 5.10:	Vergleich der gemessenen und der berechneten Energiewerte bei konstanten Entwässerungswiderstand	31
Abbildung 5.11:	Spezifischer Energiebedarf und Entwässerungsverhalten der extrudierten Holzstoffe im Vergleich zum konventionellen (C)TMP	32
Abbildung 5.12:	Spezifischer Energiebedarf und Festigkeitsentwicklung bei den extrudierten im Vergleich zum konventionellen (C)TMP	33
Abbildung 5.13:	Mc-Nettfraktionierung konventioneller und extrudierter Holzstoffe	34
Abbildung 5.14:	Entwicklung der optischen Eigenschaften bei extrudierten und konventionellen (C)TMP-Stoffen	34
Abbildung 5.15:	Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit vom Entwässerungsverhalten	35
Abbildung 5.16:	Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit vom Entwässerungsverhalten des Holzstoffes	36
Abbildung 5.17:	Tensile-Index in Abhängigkeit des spez. Energiebedarfs	36
Abbildung 5.18:	Weiterreißarbeit-Index in Abhängigkeit des spez. Energiebedarfs	37
Abbildung 5.19:	CSF-Wert in Abhängigkeit von der Faserlänge	37
Abbildung 5.20:	Weißgrad der Holzstoffe mit und ohne Vorbehandlung	38
Abbildung 5.21:	Weißgrad der Holzstoffe vor und nach der Nachbleiche	39
Abbildung 5.22:	Amortisationszeit vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh	42
Abbildung 5.23:	Rentabilität (ROI) vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh	43

Abbildung 5.24:	Kapitalwert vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh	44
Abbildung 5.25:	Jährliche Annuität vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh	44
Abbildung 5.26:	Mahlenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie (Energie-dosis: 30 kGy; Mahlbedingung: 140°C; 0,25 mm)	45
Abbildung 5.27:	Biegefestigkeit der MDF (750 kg/m ³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen	46
Abbildung 5.28:	Querzugfestigkeit der MDF (750 kg/m ³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen	47
Abbildung 5.29:	Dickenquellung und Wasseraufnahme der MDF (750 kg/m ³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen	47
Abbildung 5.30:	Siebennlinien der hergestellten Faserstoffe in Abhängigkeit von der Mahltemperatur und Energiedosis.....	49
Abbildung 5.31:	Entwässerungsverhalten der hergestellten Faserstoffe in Abhängigkeit von der Mahltemperatur und Energiedosis	49
Abbildung 5.32:	Mahlenergie in Abhängigkeit von Energiedosis, Mahltemperatur sowie Mahlverfahren.....	50
Abbildung 5.33:	Mahlenergie in Abhängigkeit von der Energiedosis und Lagerungsdauer (Mahlung im Batch-Betrieb, 155 °C).....	50
Abbildung 5.34:	Mahlenergie in Abhängigkeit von der Energiedosis und Lagerungsdauer (Mahlung bei 180 °C).....	51
Abbildung 5.35:	Biegefestigkeit von Dämmplatten (Dichte: 160 kg/m ³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung 180 °C)	51
Abbildung 5.36:	Biegefestigkeit von HDF (950 kg/m ³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung bei 180 °C).....	52
Abbildung 5.37:	Vergleich der Biegefestigkeit der MDF (580 kg/m ³), deren Faserstoffe in unterschiedenen Mahlverfahren hergestellt wurden.....	52
Abbildung 5.38:	Vergleich der Biegefestigkeit der MDF (800 kg/m ³), deren Faserstoffe in unterschiedenen Mahlverfahren hergestellt wurden.....	53
Abbildung 5.39:	Querzugfestigkeit der MDF (580 kg/m ³) in Abhängigkeit von der Energiedosis und Mahltemperatur.....	53
Abbildung 5.40:	Querzugfestigkeit der MDF (800 kg/m ³) in Abhängigkeit von der Energiedosis und Mahltemperatur.....	54
Abbildung 5.41:	Querzugfestigkeit der HDF (950 kg/m ³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung 180 °C).....	54
Abbildung 5.42:	hygroskopische Eigenschaften der Faserwerkstoffe in Abhängigkeit von der Energiedosis und den Mahlbedingungen (DP: 160 kg/m ³ ; MDF: 580 kg/m ³ ; HDF: 950 kg/m ³)	55
Abbildung 5.43 :	Amortisationszeit vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 7 Ct/kWh und 9 Ct/kWh	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Elektronenstrahltechnologische Effekte und ihre industriellen Anwendungen.....	5
Tabelle 4.1:	Versuchsplan Optimierung der Hackschnitzelvorbereitung	13
Tabelle 4.2:	Elektronenbeschleunigeranlagen.....	13
Tabelle 4.3:	Versuchsplan Hackschnitzelbestrahlung	14
Tabelle 4.4:	Mahlparameter der Laboranlage	16
Tabelle 4.5:	Versuchsdurchführung Hackschnitzelpressung.....	18
Tabelle 4.6:	Versuchsplan Variation Mahlsplatt und Bisulfitkonzentration	19
Tabelle 4.7:	Prüfnormen zur Untersuchung der Holzstoff- und Papiereigenschaften.....	20
Tabelle 4.8:	Zerfaserungsbedingungen im IHD und an der TUD	22
Tabelle 5.1:	Chemikalienaufnahme der Hackschnitzel bei Variation der Bisulfit-Konzentration.....	23
Tabelle 5.2:	Diffusion des Bisulfits in das Holz	24
Tabelle 5.3:	Grundannahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	40
Tabelle 5.4:	Spezifische Energie- und Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,09 €/kWh	41
Tabelle 5.5:	Zusätzliche jährliche Kosten	41
Tabelle 5.6:	Eigenschaften der Faserstoffe und MDF in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie.....	46
Tabelle 5.7:	Spezifische Energie- und Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,07 €/kWh	57
Tabelle 5.8:	Prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,09 €/kWh.....	57

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung / Begriff	Erläuterung
AP	Alkalische Peroxid-Imprägnierung
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf ist ein Maß für die Summe aller im Wasser vorhandenen, unter bestimmten Bedingungen oxidierbaren Inhaltsstoffe.
CSF	Canadian Standard Freeness; analog zum SR-Wert Messwert für die Geschwindigkeit der Entwässerung einer verdünnten Faserstoffsuspension über einer definierten Siebplatte
CTMP	(Chemithermo Mechanical Pulp), Hackschnitzel werden mit Natriumsulfit und Natronlauge vorbehandelt und dann unter Druck gemahlen.
Entwässerungswiderstand – E(SR)	Schopper-Riegler-Wert; Kennzahl welche das Entwässerungsverhalten eines Faserstoffes auf einem Sieb unter definierten Randbedingungen beschreibt.
Extr	Extruder
Fiberlab-Faseranalyse	Optisches, zunehmend automatisiertes Verfahren zur Charakterisierung von Einzelfasern (Länge, Breite, Gestalt). Im Ergebnis stehen Häufigkeitsverteilungen. Die Faseranalyse ergänzt die Aussagen des Entwässerungswiderstandes.
GS	Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH
HDF	High Density Fiberboard; hochdichte Holzfaserplatte, die aus mit Leim getränkten und unter Druck und Hitze verpressten Holzfasern besteht.
Imp.	Imprägnierung
LWC-Papier	Light Weight Coated; Sortenbezeichnung für sehr dünn gestrichene Papiere
lutro	lufttrocken
MeV	Mega Elektronen-Volt
MDF	Medium Density Fiberboard; mitteldichte Holzfaserplatte, die im Trockenverfahren hergestellt wird,
MS	Mahlspalt
otro	ofentrocken
PHC/ HC	TU Dresden, Institut für Pflanzen und Holzchemie
PMDI	Polymeres Diphenylmethandiisocyanat; ein häufig eingesetztes Bindemittel in Holzwerkstoffplatten
PT	TU Dresden, Professur für Papiertechnik
Rad / kGy	Einheit der absorbierten Strahlendosis (1 rd = 0,01 Gy = 0,01J/kg)
RAMAN-Spektroskopie	Die Raman-Spektroskopie ist eine berührungsfreie Analysenmethode zur chemischen und physikalischen Materialcharakterisierung.
Rauigkeit PPS	Rauheit nach Parker Print Surf gehört zu den Luftstrommessverfahren. Hierzu wird Luft als Hilfsmittel benutzt, die zwischen einer Referenzfläche und der Papieroberfläche unter definierten Bedingungen strömt.
REM	Rasterelektronenmikroskop; Gerät zur Abbildung von Oberflächenstrukturen mit Hilfe eines Elektronenstrahls, der die Probe zeilenweise abtastet
ROI	Return on Investment – Kapitalrendite, Verhältnis des gesamten investierten Kapitals und des Umsatzes

	zum Gewinn.
RTS-TMP	(R etention Time, T emperature, S peed), Spezielles TMP-Verfahren, Hackschnitzel werden sehr kurz vorgewärmt und anschließend bei hoher Umdrehungsgeschwindigkeit und Temperatur im Refiner behandelt.
Spezifischer Streukoeffizient	Optische Kenngröße zur Beschreibung der Lichtstreuungseigenschaften eines Papiers.
Tear- oder Weiterreißarbeit-Index	Arbeit, die nach Einriss zum Weiterreißen der Papierprobe aufgewendet werden muss bezogen auf die Flächenmasse der Papierprobe
Tensile- oder Bruchkraftindex	Maximale auf die Flächenmasse bezogene Kraft, die eine Papierprobe unter festgelegten Zugbelastungen erträgt
TMP	T hermo M echanical P ulp; Verarbeitung thermisch vorbehandelter Hackschnitzel unter Druck im Refiner
TS	T rockensubstanz der Holzhackschnitzel
UV	U ltraviolettes Licht ist für den Menschen unsichtbare elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge, die kürzer als die des für den Menschen sichtbaren Lichtes.
Vord.	Vordämpfung
% v. E.	Prozent vom Eintrag

1 Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist, den Energiebedarf bei der TMP-Erzeugung durch Kombination einer Elektronenstrahlbehandlung der Hackschnitzel mit einer Imprägnierung bei gleichbleibender oder verbesserter Faserqualität um mindestens 30 % zu reduzieren und ein entsprechendes Verfahren für die Herstellung hochwertiger Papiere und Holzfaserverwerkstoffe zu entwickeln.

Der Einsparung von Holzressourcen durch Nutzung von Hochausbeutefaserverstoffen steht jedoch sowohl der hohe Energiebedarf als auch der hohe und steigende Energiepreis entgegen. In den letzten Jahren stieg der Energiepreis teilweise um 33 % bis 50 %. Ein Ende dieser Energiepreisentwicklung ist nicht abzusehen.

Auch vor dem Hintergrund, dass wegen des Klimawandels mittelfristig mit einer Umstrukturierung des Waldes (verstärkte Aufforstung mit Mischwäldern) in Deutschland und einem daraus resultierenden verändertem Angebot an Nutzholz-Spezies zu rechnen ist, erscheint es wichtig, frühzeitig Techniken zu entwickeln, die die wirtschaftliche Gewinnung von Hochausbeutewerkstoffen aus diesen Spezies erlaubt.

Während bei Holzwerkstoffen für die Faserplattenherstellung allgemein eine Zerfaserungsstufe ausreicht, sind zur Ausbildung der erforderlichen Festigkeitseigenschaften bei Holzwerkstoffen für die Papierproduktion mehrere aufeinander folgende Zerfaserungsvorgänge notwendig.

Durch eine Vorbehandlung der Hackschnitzel mit Bisulfit-Imprägnierung und Elektronenbestrahlung sind Energieeinsparungen bei der Zerfaserung der Hackschnitzel für die Papierherstellung von mehr als 30 % möglich.

Für den Einsatz in der Papier- oder Faserplattenindustrie sind stärkere Elektronenbeschleuniger mit einer Leistung von 10 MeV erforderlich, um Schütthöhen von 10–15 cm auf den Transportbändern zu durchdringen.

Die Elektronenbestrahlung allein bewirkt sowohl eine Kettenkürzung der Cellulose als auch eine Kondensation des Lignins im Holz. Eine Imprägnierung mit Na-Bisulfitlösung soll der Kettenkürzung der Cellulose, die für den Festigkeitsverlust verantwortlich ist, und auch der Ligninkondensation, die sowohl den Weißgrad reduziert als auch die Fibrillierung des Faserverstoffes erschwert, entgegenwirken. Eine Imprägnierung mit 5 kg Bisulfit/t trockenem Holz ist ausreichend. Bei den Untersuchungen wurde eine Strahlendosis von 30 kGy als Optimum ermittelt.

Durch Bestrahlung der Hackschnitzel kann die Mahlintensität reduziert werden. Bei vorbehandelten Hackschnitzeln ist im Vergleich zu unbehandelten bei gleichen Entwässerungswiderständen ein geringerer spezifischer Energiebedarf erforderlich. Durch die Vorbehandlung der Hackschnitzel werden die Festigkeitsoptima schon früher bei niedrigerem Mahlaufwand erreicht. Durch Imprägnierung und Bestrahlung werden auch die optischen und Oberflächeneigenschaften verbessert.

Diese Ergebnisse sind im Labormaßstab erbracht worden und bedürfen der industriellen Umsetzung durch einen Großversuch in einer Holzwerkstoff erzeugenden Papierfabrik.

Für die Herstellung von Faserverwerkstoffen müssen die Hackschnitzel vor deren Bestrahlung nicht imprägniert werden. Die Imprägnierung bringt im Gegensatz zur Papierherstellung keine Vorteile, weder für den Energieverbrauch noch für die Eigenschaften der Faserverwerkstoffe.

Durch die Bestrahlung der Hackschnitzel mit 10 kGy für die Faserplattenherstellung kann der Mahlenergieverbrauch bei einer Mahltemperatur von 155 °C um bis zu 36 % im Vergleich zu einer Mahlung unbehandelter Hackschnitzel bei 180 °C reduziert werden.

Durch die Hackschnitzelbestrahlung wird die Qualität (Biegefestigkeit, Querzugfestigkeit und Dickenquellung) der daraus hergestellten Faserwerkstoffe bei niedrigeren Mahltemperaturen (145 °C, 155 °C) deutlich verbessert.

Es wird vermutet, dass bereits niedrigere Energiedosen (<10 kGy) zur Reduzierung der notwendigen Mahlarbeit in der Faserplattenindustrie und zur Verbesserung der Eigenschaften der daraus hergestellten Faserwerkstoffe führen können. Weitere Untersuchungen sollten auf die Reduzierung der Energiedosis (z. B. 5 kGy) abzielen, um die Bestahlungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die Bestrahlungsenergie zu reduzieren.

Bei einer industriellen Umsetzung kann in Abhängigkeit vom Elektroenergiepreis trotz höherer Investitionskosten mit Amortisationszeiten von ca. 2 Jahren gerechnet werden.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

Das IGF-Vorhaben (15823 BR) der Forschungsvereinigung Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2 Beschreibung des Standes der Technik

2.1 Ausgangssituationen (Marktsituation)

Laut Papierkompass des Verbandes Deutscher Papierfabriken kamen in Deutschland 2008 1,6 Mio. t Holzstoff für die Papiererzeugung zum Einsatz. 2007 wurden weltweit 37 Mio. t Holzstoff für die Papierherstellung produziert. Das entspricht ca. 10 % des Rohstoffbedarfs für die Papier- und Pappenproduktion weltweit. Ein Viertel der Weltproduktion von Holzstoffen kommen aus Kanada (2007: 10,6 Mio. t). 12,3 Mio. t Holzstoff werden von den Ländern der EU 27 erzeugt, davon über 50 % im skandinavischen Raum. Deutschland ist der drittgrößte Holzstoffherzeuger in Europa. Hier werden mehr Holzstoffe produziert als z. B. in Russland oder Japan.

Holz ist nach wie vor der wichtigste Primärrohstoff für die Papiererzeugung. Holzstoffe mit vergleichsweise hohen Festigkeiten und guten optischen Eigenschaften sind vor allem für Dünndruckpapiere wie z. B. LWC-Papiere geeignet. Diesen Vorteilen, verbunden mit der hohen Ausbeute von Holzstoffen (weit über 90 %), stehen jedoch sowohl der hohe Energiebedarf als auch die steigenden Energiepreise entgegen (Abbildung 2.1).

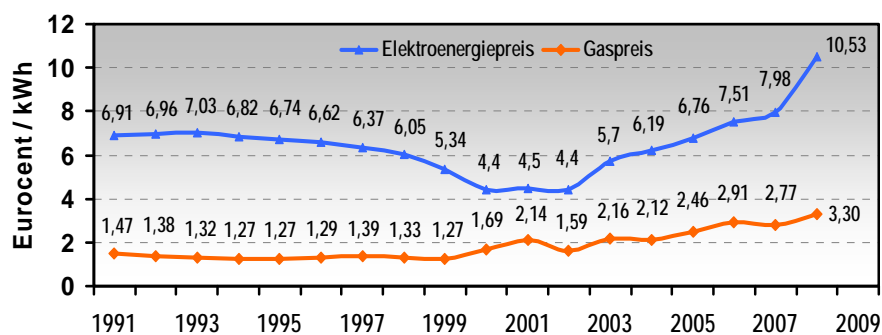


Abbildung 2.1: Entwicklung der Industriepreise für Elektroenergie und Gas in Deutschland

Unter diesem Aspekt ist es eine große Herausforderung den Energiebedarf bei der Herstellung von Refinerholzstoffen wie TMP und CTMP durch eine veränderte Verfahrensgestaltung

drastisch zu reduzieren. Ziel des Forschungsprojektes ist, durch eine kombinierte Imprägnierung und Bestrahlung von Holzhackschnitzeln 30–50 % Zerkleinerungsenergie einzusparen.

2.2 Verfahren zur Mahlenergieeinsparung bei der Holzstofferzeugung

Bei der mechanischen Holzstoffherstellung steht für die Erzeugung von Refinerholzstoffen im Vergleich zum Holzschliff ein größeres Holzpotenzial zur Verfügung. So können z. B. auch Sägewerksabfälle verarbeitet werden /FOGELHOLM 1984; GIERTZ 1976/. Allerdings liegt der spezifische Energiebedarf für die komplette Erzeugung der Refinerholzstoffe ca. 50 % über dem für Holzschliffe bei vergleichbarem Entwässerungswiderstand /BLECHSCHMIDT 1999/. Der hohe Energiebedarf wird jedoch nicht nur durch die eigentlichen Zerkleinerungsprozesse bestimmt, sondern auch durch die notwendigen peripheren Aggregate und nicht zuletzt durch die angestrebten Eigenschaften des Faserstoffes, da der spezifische Energieverbrauch mit steigendem Entwässerungswiderstand überproportional steigt.

Eine bekannte Möglichkeit zur Reduzierung des Energiebedarfs ist die Erhöhung der Drehzahl der Refiner von 1.500 min^{-1} auf 2.300 min^{-1} . Dies bewirkt eine Erhöhung der Mahlintensität und Verringerung des spezifischen Energiebedarfs /AREGGER 1999/. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes stellt das sogenannte RTS-Verfahren dar, bei welchem zusätzlich mit einer Zerkleinerungstemperatur deutlich über der Erweichungstemperatur des Lignins gearbeitet wird /MÜNSTER 1996/. FUGLEM, KURE, LØBBEN und HELLE haben die Faserstoffeigenschaften untersucht und festgestellt, dass sich bei einer Energieeinsparung von ca. 22 % die Faserlängenverteilung des RTS-TMPs nicht von der herkömmlichen TMPs unterscheidet /FUGLEM et al 2001/.

Der Einfluss einer Hackschnitzelvorbereitung unter erhöhter Temperatur und hohem Druck auf TMP (1.800 min^{-1} , 3 min Vordämpfen, 2,8 bar) und RTS-TMP (2.600 min^{-1} , 11–12 s Vordämpfen, 5,9 bar) wurde von SABOURIN untersucht /SABOURIN 2000/. Dabei wurden die Hackschnitzel in einem RT Pressafiner bei 1,52 bar während einer Verweilzeit von 8 bis 12 Sekunden auf ein Verhältnis von 5:1 verdichtet. Dafür sind 35 kWh/t bis 45 kWh/t erforderlich. Dabei konnte der spezifische Energiebedarf beim TMP von 2.167 kWh/t auf 1.991 kWh/t und beim RTS-TMP von 1.852 kWh/t auf 1.719 kWh/t gesenkt werden. Eine weitere Energieeinsparung von 63 kWh/t ist beim RTS-Verfahren durch eine Erhöhung der Drehzahl von 2.600 min^{-1} auf 2.700 min^{-1} möglich.

LAW und LANOUTTE setzten die Hackschnitzel wiederholten statischen Presszyklen aus und erreichten so eine Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs um etwa 18 % bis 25 % /LAW; LANOUTTE 2000/.

Im Thermopulp-Verfahren der Fa. Sunds wird der Faserstoff in der zweiten Refinerstufe ca. 10 s lang auf 160 °C bis 170 °C erwärmt. Damit lässt sich der spezifische Energiebedarf um 10 % bis 20 % reduzieren /TIENVIERI et al 1999; FERGUSON 2004/.

CTMP-Stoff wird mit relativ niedriger Chemikaliendosierung unter Druck erzeugt. Die chemische Prozessstufe wird als Hackschnitzel-Imprägnierung durchgeführt. Natriumbisulfit wird bevorzugt bei der Verarbeitung von Nadelholz eingesetzt. Die Sulfonierung, wie dieser Prozess auch genannt wird, verbessert die Zugänglichkeit der Holzstruktur für Wassermoleküle. Nach Atack und Heitner kann die Ligninerweichung auf einen Austausch an aliphatischen Hydroxylgruppen oder Ethergruppen zurückgeführt werden /ATAK; HEITNER 1982/.

Fazit: In Schneckenpressen können Holzhackschnitzel im Verhältnis 5:1 verdichtet und dadurch bei der anschließenden Expansion Imprägnierchemikalien besser aufgenommen werden. Danach erfolgt die Zerkleinerung in einer separaten Druckzerkleinerungsstufe bei höherer Refinerdrehzahl und Temperatur. Gegenüber dem herkömmlichen TMP-Verfahren können 20–30 % Energie eingespart werden.

Dennoch ist heute nach wie vor davon auszugehen, dass der spezifische Energieverbrauch bei der Holzstoffherzeugung für die Papierherstellung nicht unter 2.000 kWh/t liegt /BLECHSCHMIDT 2010/, da die oben beschriebenen Verbesserungen und Maßnahmen in der industriellen Praxis kaum im vollen Umfang umgesetzt werden.

Auch bei der Holzfasertplattenherstellung stellt der Energieverbrauch einen entscheidenden Kostenfaktor dar, obwohl der spezifische Energiebedarf zur Zerkleinerung der Hackschnitzel beim einstufigen Verfahren nur etwa bei 10 % im Vergleich zu den Holzstoffen für die Papierproduktion liegt. Für die Herstellung von Holzfasertplatten, wie MDF, HDF und Fasertdämmplatten werden Holzstoffe mit einem Entwässerungswiderstand von 11 bis 13 SR eingesetzt, der Aufwand an elektrischer Mahlarbeit liegt bei ca. 120 bis 200 kWh/t /DEPPE et al. 1996/ und damit bei 50 % des Gesamtenergieverbrauches für die MDF-Herstellung /BUCHHOLZ 1998/. Bei einem Produktionsvolumen von ca. 13,5 Mio m³ (2005) in Europa ergeben sich ebenfalls bedeutende Einsparpotenziale.

Die aufzuwendende Energie für die Zerkleinerung des Holzes wird von einer Reihe von Parametern beeinflusst. Insbesondere die Plastifizierungstemperatur (GORING) spielt hier eine entscheidende Rolle. So reduziert sich der Energieverbrauch im Temperaturbereich zwischen 150 °C und 170 °C von 700 kWh/t auf ca. 200 kWh/t /DEPPE et al. 1996/. Die aufgrund der erhöhten Temperatur auftretende Verringerung des Weißgrades spielt bei Holzfasertwerkstoffen eher eine untergeordnete Rolle.

Bei Untersuchungen von SCHNEIDER et al. 2000 und ROFFAEL et al. 1999 wurden der Einfluss von Plastifizierungstemperaturen bis 180 °C und die Zugabe von Chemikalien, wie Natriumsulfit und Natriumhydroxid auf die Faser- und Werkstoffeigenschaften untersucht. Ältere Arbeiten befassen sich mit dem Einfluss einer Ammoniakbehandlung auf bestimmte Eigenschaften von Faser- und Spanplatten /KALNINS et al 1967; ROFFAEL et al. 1984/. Bei KRUG et al. 2001 wurden Zerkleinerungstemperaturen bis 200 °C angewandt. Die höheren Temperaturen führten zwar zu verbesserten Quelleigenschaften der Werkstoffe, die Festigkeitseigenschaften wurden jedoch aufgrund verstärkter Hydrolyse der Holzbestandteile negativ beeinflusst. Eine Untersuchung des Verbrauchs an Mahlergie und Dampf erfolgte in den genannten Arbeiten nicht.

Bei BUCHHOLZ wird der Einsatz einer kombinierten Harnstoff-/Ammoniakbehandlung zur Vorplastifizierung und Formaldehydbindung untersucht. Bei Einsatz von 2 % eines Formaldehydfängers oder 6 % Harnstoff wurden eine Abnahme der Formaldehydabgabe und eine Verringerung der Leistungsaufnahme am Refiner um ca. 10 % erreicht. Eine Vorbehandlung mit bis zu 2 % Ammoniak führte nur zu einer Verringerung der Formaldehydemission jedoch zu keinen Veränderungen der Leistungsaufnahme am Refiner. Die Festigkeitswerte werden durch die Vorbehandlung in Abhängigkeit von der Holzart zwar verbessert, jedoch erhöhen sich generell die Quellwerte der hergestellten Werkstoffe /BUCHHOLZ 1998/.

Untersuchungen zur Vorbehandlung und Zerkleinerung von Hackschnitzeln bei der Holzwerkstoffherstellung zielten in der Vergangenheit ausschließlich auf eine Verbesserung der Werkstoffeigenschaften ab. Entwicklungen zur Energieeinsparung im Zerkleinerungsprozess erfolgten bisher kaum.

2.3 Imprägnierung und Elektronenbestrahlung

Energiereiche Strahlen (Korpuskel- und Wellenstrahlen) sind in der Lage, in bestrahlter Materie chemische Wirkungen hervorzurufen. Zur Auslösung von strahlenchemischen Reaktionen in Polymeren werden 1 bis 100 kGy (1 kGy = 1 kJ/kg) benötigt. Die energiereichen Strahlen haben Anfangsenergien im MeV-Bereich und übertreffen damit beträchtlich die chemischen Bindungsenergien und Ionisationspotenziale der Atome. Ein energiereiches

Teilchen ruft eine große Anzahl von Elementarprozessen hervor, während es durch aufeinander folgende Zusammenstöße mit den Molekülen der bestrahlten Materie allmählich seine kinetische Energie verliert. Zusätzlich kommt energiereiche Sekundärstrahlung zur Wirkung. Dabei ist die Strahlendosis unabhängig von der Strahlungsenergie. Für kompaktes Bestrahlungsgut ist die Kenntnis der Tiefenverteilung der Energiedosis von besonderer Bedeutung. Die bestrahlten Stoffe werden durch energiereiche Elektronenstrahlen nicht kontaminiert.

In Elektronenbeschleunigeranlagen erhalten die aus der Glühkatode emittierten Elektronen ihre kinetische Energie durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden des Beschleunigers.

Wichtige elektronenstrahltechnologische Effekte und ihre industrielle Anwendungen sind in der folgenden Tabelle kurz zusammengefasst /SCHILLER, S.; PANZER, S. 1983/. Die Wirkungen können durch Dosierung und Einwirkungsdauer gesteuert werden.

Tabelle 2.1: Elektronenstrahltechnologische Effekte und ihre industriellen Anwendungen

Elektronenstrahltechnologischer Aspekt	Verfahrenstechnische Anwendung
Erwärmen	Wärmebehandlung Härten Rekristallisieren in fester Phase
Schmelzen	Vakuumschmelzen Schmelzbehandlung von dünnen Oberflächenschichten Rekristallisieren in flüssiger Phase Mikroschweißen
Tiefschweißen	Schweißen/Schneiden Schmelzbehandeln von stärkeren Oberflächenbereichen
Verdampfen	Beschichten
Abtragen	Bohren Gravieren Strukturieren dünner Schichten Trennen
Ladungsübertragung	Informationsspeicherung
Strahlenphysikalische Reaktionen	Erzeugen von Kristalldefekten
Strahlenchemische Reaktionen	Polymerisieren Vernetzen Depolymerisieren Radiolyse
Strahlenbiologische Reaktionen	Sterilisieren Keimhemmung Mutationserzeugung

Bei der Anwendung strahlenchemischer Methoden in der Papierindustrie ist zu beachten, dass Cellulose durch Strahleneinfluss abgebaut wird. Schon bei Bestrahlungen mit einer Energiedosis von 50 kGy bis 70 kGy nimmt der Durchschnittspolymerisationsgrad der Cellulosemoleküle um etwa die Hälfte ab.

Mit der Anwendung von Elektronenstrahlen bei Holzhackschnitzeln können Veränderungen im Holz herbeigeführt werden, die erfahrungsgemäß mit einem reduzierten Energiebedarf bei der thermomechanischen Zerfaserung des Holzes verbunden sind. Die energiereiche Strahlung bewirkt Bindungsspaltungen und Radikalbildungen an allen Holzkomponenten. Bindungsspaltungen verändern die innere Festigkeit des Holzverbandes, woraus letztlich der reduzierte Energiebedarf für eine Zerfaserung resultiert.

Bereits in früheren Arbeiten /GRANFELDT et al. 1992 / konnte der positive Effekt einer Energieeinsparung bei der TMP-Erzeugung nach Bestrahlung der Hackschnitzel nachgewiesen werden, wobei gleichermaßen von einer Verschlechterung der Faserstoffeigenschaften (reduzierte Festigkeiten, erhöhte Splittigkeit) berichtet wurde. Ursache für diese negativen Wirkungen einer Holzbestrahlung vor dem TMP-Prozess ist neben der Spaltung von Celluloseketten eine bei der Bestrahlung stattfindende Ligninkondensation, die durch Radikalbildung an allen Holzbestandteilen bewirkt wird /FISCHER, K. 1976/.

Mit der Anwendung einer antioxidativ wirkenden Substanz als Radikalfänger kann dieser Prozess zurückgedrängt bzw. verhindert werden. So eine Substanz muss also während der Bestrahlung im Holz vorliegen. FISCHER et al. 1987 konnte nachweisen, dass durch eine Vorbehandlung des Holzes mit Bisulfit die Ligninkondensation bei der Bestrahlung eingeschränkt wird. Bei dem Zellstoff-Kochprozess (saures Mg-Bisulfit-Verfahren) wurde Magnesiumbisulfit verwendet.

Gleichermaßen wirksam ist auch Na-Bisulfit, welches sich beim mechanischen Holzaufschluss anbietet. Na-Bisulfit wird in anderen Industriebereichen als Antioxidationsmittel und Stabilisator angewendet. Nach der Imprägnierung der Hackschnitzel mit Na-Bisulfit ist diese Substanz im Holz über einen ausreichenden Zeitraum stabil, wenn das Holz nicht einer Trocknung unterworfen wird. Auch eine Sulfatbildung findet nicht statt /FISCHER, K. et al. 1983/.

Dass sich das Fließverhalten des Lignins der Mittellamelle durch Elektronenbestrahlung ändert, kann an elektronenmikroskopischen Aufnahmen gezeigt werden. Nach einem Schnitt weist das unbehandelte Holz eine glatte Schnittfläche auf (Abbildung 2.2a).

Demgegenüber zeigt der Schnitt des Holzes nach einer Elektronenbestrahlung im Bereich der Mittellamelle eine unebene Struktur, das Lignin ist teilweise herausgequollen (Abbildung 2.2b).

Der Schnitt einer imprägnierten und bestrahlten Probe hat gegenüber der unbehandelten Probe ebenfalls eine veränderte Struktur (Abbildung 2.2c), aber nicht so deutlich, wie die bestrahlte Probe ohne Imprägnierung.

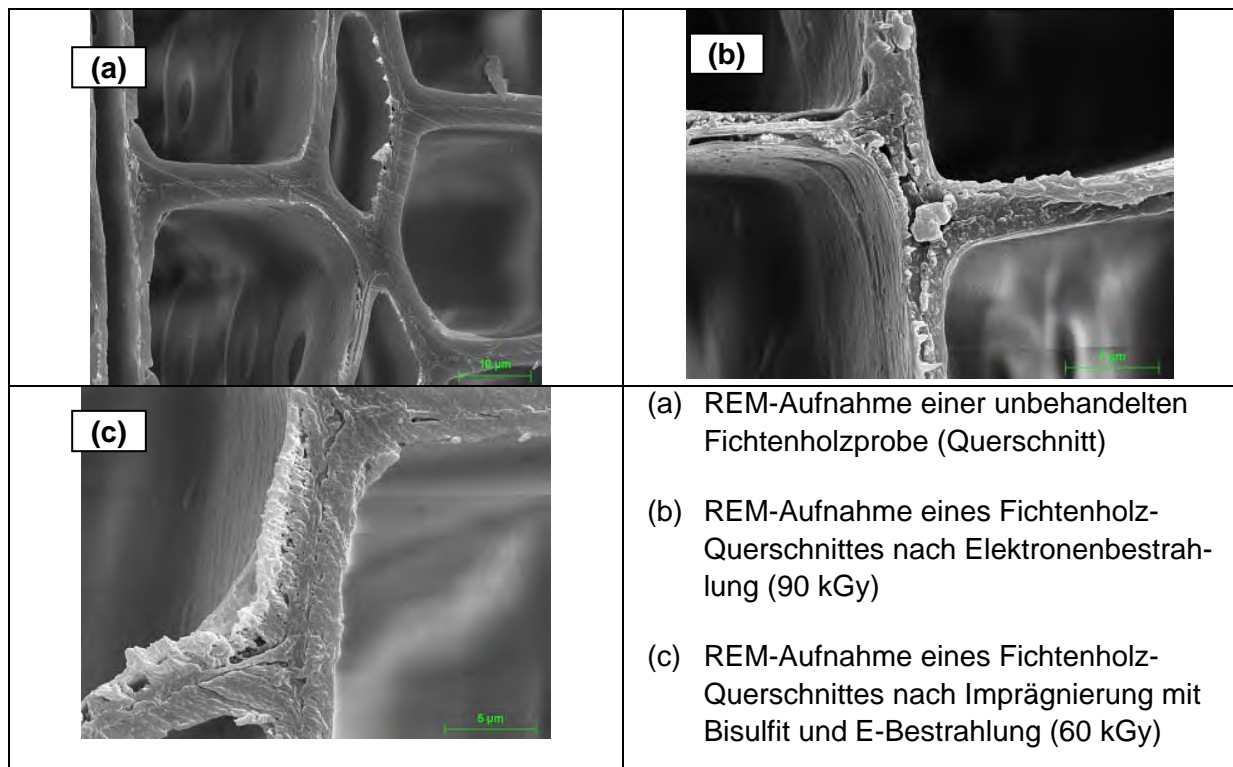


Abbildung 2.2: REM-Aufnahmen (Schnitt) unterschiedlich behandeltem Fichtenholz (eigene Untersuchungen)

2.4 Schutzrechtssituationen

Die Durchführung einer Patentrecherche zur Behandlung von Holzhackschnitteln mit Bisulfit und energiereicher Strahlung bringt folgende Ergebnisse:

In einem Verfahren nach CA 1064748A wird die Anwendung der Elektronenbestrahlung mit einer Dosis von 0,1 bis 0,5 Megarad (1 bis 5 kGy) zwischen erster und zweiter Mahlstufe beschrieben, mit dem Ziel den Mahlenergiebedarf zu senken. Die Bestrahlung der Pulpe erfolgte bei einem Trockengehalt von ca. 20 %. Dieses Patent wurde von Defibrator AB (Schweden) am 23.10.1979 veröffentlicht.

In DE 2158276A und US 3780305A werden eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Sterilisation von Holzpartikel unter Einsatz von Elektronenbestrahlung im Bereich von 0,2 bis 0,5 Megarad (2 bis 5 kGy) beschrieben, um deren Lagerfähigkeit zu verbessern. In weiteren Verfahren nach GB 1365642A und US 3801432A werden Holzhackschnittel mit Elektronenstrahlen mit einer Dosis von nicht mehr als 1 Megarad (10 kGy) bestrahlt und dann in einem chemischen oder mechanischen Pulpingprozess weiterverarbeitet. Ziel ist hier die Verbesserung der Prozess- und Stoffeigenschaften. Eine Verringerung der Mahlenergie wird nicht quantifiziert. Diese 4 Patente wurden von Radiation Development Co. Ltd (Kanada) im Zeitraum von 1972-74 veröffentlicht.

Im Patent US 20090321026A1 (Anmelder: Xyleco Inc.; veröffentlicht am 31.12.2009) werden Verfahren zur Vorbehandlung von Holzhackschnittel mit energiereicher Strahlung und nachfolgender Ultraschallbehandlung allgemein beschrieben.

Die Bisulfit-Anwendung bei Holzpartikeln erfolgte bisher mit unterschiedlichen Zielrichtungen: In EP 471154B1 wird ein kontinuierlicher chemischer Sulfitaufschluss zur Zellstoffgewinnung unter Einsatz von Bisulfit beschrieben. Der Einsatz von Bisulfit und Aluminiumsalzen in einem CTMP-Aufschluss wird in US 3929558A (Anmelder: KAMYR Inc.; veröffentlicht am 26.11.1997) beschrieben. In EP 1907178 werden Holzspäne oder -fasern unter Druck mit Bisulfit imprägniert und dann unter Einsatz von formaldehydhaltigen Bindemitteln zu Holzwerk-

stoffen weiterverarbeitet. Durch die Anwendung von Bisulfit wird eine erhebliche Reduzierung der Emission von Formaldehyd erreicht. Das Patent wurde von dem Unternehmen Kronospan am 11.06.2009 offen gelegt.

Einzig bei dem deutschen Patent DE 2405165, wo ein Verfahren zur Herstellung von Textilzellstoff beschrieben wird, erfolgt die Vorbehandlung der Hackschnitzel vor dem chemischen Aufschluss mit Bisulfit und energiereicher Strahlung in kombinierter Anwendung. Dadurch wurde beim chemischen Aufschluss eine verbesserte Herauslösung des Lignins (signifikante Reduzierung des Ligningehaltes) erreicht. Dieses Patent wurde am 10.4.1975 von der Filmfabrik Wolfen (DDR) offengelegt.

Am 27.11.2009 wurde von der Technischen Universität Dresden das deutsche Patent DE 102009057208.2-27 angemeldet, wofür auch schon ein erster sachlicher Prüfbescheid vorliegt. Das dieser Anmeldung zugrundeliegende Verfahren basiert auf einer Vorbehandlung von Holzhackschnitzeln durch eine geringfügige Imprägnierung mit 3–5 % Bisulfit, bevor diese mit energiereicher Strahlung und einer aufgetragenen Strahlendosis von 10–40 kGy bestrahlt werden, und einer daran anschließenden mechanischen Zerfaserung. Die Erfindung besteht in der Bereitstellung eines Verfahrens zur Herstellung von Hochausbeutefaserstoffen für die Papierherstellung mit reduziertem Energiebedarf von 30–50 % gegenüber herkömmlichen Refinerverfahren bei gleichen oder verbesserten Eigenschaften. Mit der Erhaltung des Lignins im Faserstoff wird gegenüber DE 2405165 ein völlig anderes Verfahrensziel verfolgt.

3 Forschungsziel und Lösungswege

Die zu Grunde liegende Idee ist durch eine innovative Verfahrenskombination die insgesamt für die Zerfaserung der Holzhackschnitzel benötigte Energie zu senken. Der innovative Gedanke dieser Projektidee besteht in einer dem Zerfaserungsprozess vorgeschalteter Elektronenbestrahlung der Hackschnitzel. Die Prozessstufe der Elektronenbestrahlung belastet dabei die Energiebilanz des Gesamtverfahrens nur scheinbar.

Die Elektronenbestrahlung bewirkt auf Polymerebene eine Lockerung des Faserverbundes der Holzhackschnitzel. Dieses ist die Voraussetzung für eine wesentlich einfachere und damit insgesamt energiesparendere Zerfaserung der Holzhackschnitzel im klassischen Refinerprozess. Um mögliche Faserschädigungen vorzubeugen, werden die Holzhackschnitzel vor der Elektronenbestrahlung mittels einer Natrium-Bisulfitlösung imprägniert.

Im oberen Teil der folgenden Abbildung 3.1 ist das konventionelle Verfahren zur Refinerholzstofferzeugung vereinfacht dargestellt. Ausgehend vom Holzstamm werden zunächst Hackschnitzel erzeugt, welche dann anschließend in einem besonders energieintensiven Refinerprozess zu Holzstoff verarbeitet werden. Dieses als „konventionell“ bezeichnetes Verfahren benötigt für die Herstellung von 1 t Refiner-Holzstoff mindestens 2.000 kWh /Blechschildt 2010/.

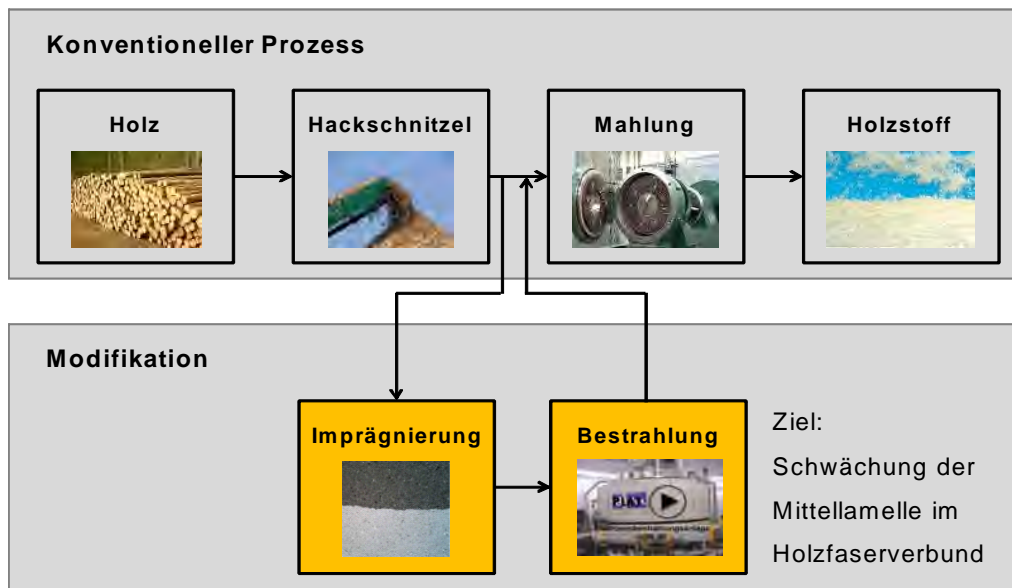


Abbildung 3.1: Modifizierter Refiner-Holzstoffprozess

Mit der Integration zweier zusätzlicher Verfahrensschritte wird das Verfahren modifiziert und der Gesamtenergiebedarf für die Produktion einer Tonne Refinerholzstoff signifikant gesenkt. Die Elektronenbestrahlung bewirkt sowohl eine Kettenkürzung der Cellulose als auch eine Kondensation des Lignins in den Hackschnitzeln. Die Imprägnierung mit Bisulfidlösung soll der Kettenkürzung der Cellulose, die für den Festigkeitsverlust verantwortlich ist, und auch der Ligninkondensation, die sowohl den Weißgrad reduziert als auch die Fibrillierung des Faserstoffes erschwert, entgegenwirken.

Bei Voruntersuchungen im Rahmen eines vom INFOR-Forschungsrat des Verbands Deutscher Papierfabriken (VDP) geförderten INFOR-Projekts Nr. 77 R wurde nachgewiesen, dass durch gezielte Vorbehandlung der Hackschnitzel der Energieverbrauch bei der TMP-Erzeugung um 15 % und darüber gesenkt werden kann. Dabei wurde deutlich, dass einem befürchteten Festigkeitsverlust durch die Vorimprägnierung der Hackschnitzel mit einer Imprägnier-Lösung entgegengewirkt werden kann. Die angestrebte Energieeinsparung wurde auch mit der relativ geringen Bestrahlungsenergie von 0,6 MeV erreicht. Die Zielstellung einer Einsparung von 15 % der Zerfaserungsenergie konnte mit einer Bestrahlungsdosis von 20 kGy erreicht werden, ohne dass Festigkeitsverluste eintraten. Mit einer Dosis von 40 kGy konnten 25 % Energieeinsparung realisiert werden, wobei Festigkeitsverluste zu verzeichnen waren, die insbesondere die Durchreißfestigkeit betrafen und etwa in der Größenordnung von 10 bis 15 % lagen.

In diesem AiF-Forschungsprojekt Nr. 15823 BR, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördert wurde, erfolgte eine Optimierung der Vorbehandlungsmethoden. Für die Bestrahlung kamen dabei 2 unterschiedliche Elektronenbeschleuniger zum Einsatz:

- Versuchs-Elektronenbeschleuniger des **Instituts für Polymerforschung Dresden** e.V. (Bestrahlungsenergie bis 1,5 MeV möglich)
- Elektronenbeschleuniger **Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH** (Bestrahlungsenergie 10 MeV)

Für die Behandlung der Hackschnitzel im kleineren Elektronenbeschleuniger mussten die Hackschnitzel vereinzelt werden, um eine Durchdringung der Hackschnitzel zu erreichen. Für einen industriellen Einsatz ist eine solche Vereinzeltung nicht praktikierbar. Eine Erhöhung der Beschleunigung bewirkt eine stärkere Durchdringung der Hackschnitzel bzw. eine Möglichkeit die Schichtdicke so zu erhöhen, dass eine normale Schütthöhe von 10-15 cm auf

Transportbändern durchdrungen werden kann. Dafür ist ein stärkerer Elektronenbeschleuniger erforderlich. Die größere der beiden Elektronenbeschleunigeranlagen soll folgend kurz vorgestellt werden.

Für die Versuche wurde der Elektronenbeschleuniger TT 300 in der Fa. Gamma Service Produktbestrahlung GmbH verwendet. Mit diesem Elektronenbeschleuniger können die Elektronen bis auf 10 MeV beschleunigt werden. Die erreichbare Dosisleistung beträgt 12.000 kGy/h. Die Hackschnitzel wurden chargenweise auf Tablarern zugeführt (5), in der Bestrahlungszone (7) bestrahlt und nach der Produktabfuhr (6) zur institutseigenen (C)TMP-Anlage überführt.

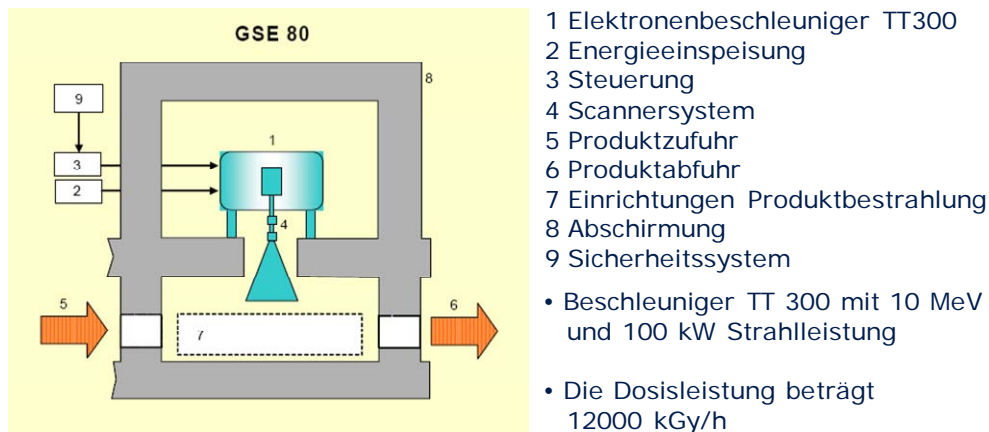


Abbildung 3.2: Elektronenbeschleuniger TT 300 der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH

Die Imprägnierung der industriell erzeugten Hackschnitzel erfolgte vor der Bestrahlung im Tauchverfahren mit der jeweils festgelegten Dosierung im Institut für Pflanzen- und Holzchemie. Die Zerkleinerung wurde in 1 (für Holzwerkstoffe ohne Imprägnierung) bis 3 Mahlstufen in der TMP-Laboranlage des Instituts für Holz- und Papiertechnik durchgeführt. Dabei wurde der elektrische Energiebedarf kontinuierlich aufgezeichnet. Als primärer Maßstab für den Zerkleinerungsenergiebedarf wurde der Entwässerungswiderstand der einzelnen Versuchspunkte herangezogen.

Ziel dieses Projektes soll neben der weiteren theoretischen Durchdringungen einzelner Teilaspekte des kombinierten Verfahrens vor allem der Nachweis seiner Übertragbarkeit auf Produktionsanlagen im industriellen Maßstab sein.

4 Gesamtvorgehen, Probematerial und Versuchsdurchführungen

4.1 Gliederung des Forschungsprojektes in Arbeitspaketen

Das Forschungsprojekt ist in folgende Schwerpunkte gegliedert:

Arbeitspaket 1: Optimierung der Hackschnitzelvorbehandlung

- Optimierung der Hackschnitzelbestrahlung und Imprägnierung
- Kombination der Bestrahlung mit einer Hackschnitzelpressung

Arbeitspaket 2: Optimierung der Hackschnitzelzerfaserung

- Herstellung von Holzstoffen in einer institutseigenen Labor-CTMP-Anlage unter Ermittlung und Auswertung des Energiebedarfs.
- Kombination der Bestrahlung mit dem Thermopulpverfahren

Arbeitspaket 3: Bleichbarkeit des Faserstoffes aus den optimierten Verfahren

- Untersuchung der Bleichbarkeit der mit Hilfe der optimierten Verfahren hergestellten Holzstoffe mittels Peroxidbleiche mit standardisiertem Laborbleichverfahren.

Arbeitspaket 4: Untersuchung der physikalischen und optischen Faserstoff- und Papiereigenschaften sowie der Abwasserqualität

- Charakterisierung der Faserstoffeigenschaften und der Abwasserqualität
- Untersuchung der physikalischen und optischen Eigenschaften, der aus den erzeugten und behandelten Faserstoffen gebildeten Laborblätter

Arbeitspaket 5: Untersuchung des Einflusses der Hackschnitzelvorbereitung auf die Eigenschaften von Holzfaserwerkstoffen

- Hackschnitzelvorbereitungsverfahren (Bestrahlung, Hackschnitzelpressung, Chemikalienbehandlung) für die Herstellung von Holzfaserwerkstoffen
- Herstellung von Holzfaserdämmplatten im Nassverfahren ohne Bindemittel
- Herstellung von Holzfaserdämmplatten, MDF und HDF im Trockenverfahren unter Einsatz verschiedener Bindemittelsysteme:
- Untersuchung der Werkstoffeigenschaften

Arbeitspaket 6: Upscaling und Ökonomisch-ökologische Bewertung der Verfahrenskombinationen

- Konzeptionelle Verfahrensplanung für die industrielle Umsetzung
- Abschätzung der Kosten einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen Holzstoffherstellung

Die Versuchsdurchführungen sind unter 4.3 beschrieben. Insgesamt wurden innerhalb der Projektlaufzeit 65 Versuchsreihen durchgeführt, untersucht und ausgewertet. Wegen des Umfangs der Versuche wurde auf Wunsch der Projektbegleiter abweichend vom Forschungsauftrag die Holzstoffherzeugung nur mit Fichtenholzhackschnitzel vorgenommen und auf die Zerkleinerung von Laubböhlzern verzichtet.

4.2 Projektbegleitender Ausschuss (PbA) und Vorhabenbezogene Aufwendungen der Wirtschaft (vAW)

Projektbegleitersitzungen:

1. PbA Termin: 19.02.2009; Ort: TUD, Professur für Papiertechnik, Dresden
2. PbA Termin: 05.11.2009; Ort: TUD, Institut für Pflanzen- und Holzchemie, Tharandt
3. PbA Termin: 11.05.2010; Ort: Gamma-Service Produktbestrahlung, Radeberg

Vorhabenbezogene Aufwendungen der Wirtschaft

Sachleistung: Für die Herstellung von Holzstoffen in der institutseigenen Labor-TMP-Anlage stellten 2 Papierunternehmen Fichtenholzhackschnitzel zur Verfügung.

Dienstleistungen: Die Bestrahlung der Holzhackschnitzel erfolgte auf der Produktionsanlage bei der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH in Radeberg. Zur Erzeugung von Holzstoff für Faserwerkstoffe konnte auch die TMP-Anlage am Institut für Holztechnologie in Dresden als Dienstleistung genutzt werden.

4.3 Probenmaterial und Versuchsdurchführungen

Probenmaterial

Die verwendeten Fichtenholz-Hackschnitzel wurden von 2 Papierfabriken geliefert. Sie haben

- eine durchschnittliche Länge von 31,5 mm,
- eine durchschnittliche Breite von 21 mm und
- eine durchschnittliche Dicke von 3,2 mm.

Diese Hackschnitzel wiesen eine durchschnittliche Trockensubstanz von 42 bis 52 % (Feuchtegehalt 48 bis 58 %) sowie eine durchschnittliche Schüttdichte von 320 bis 350 kg/m³ auf. Der Rinden- und Fremdstoffanteil war gering.

Grundsätzlicher Versuchsablauf bei allen Untersuchungen

Der Ablauf der Behandlungsstufen ist im Folgenden dargestellt.

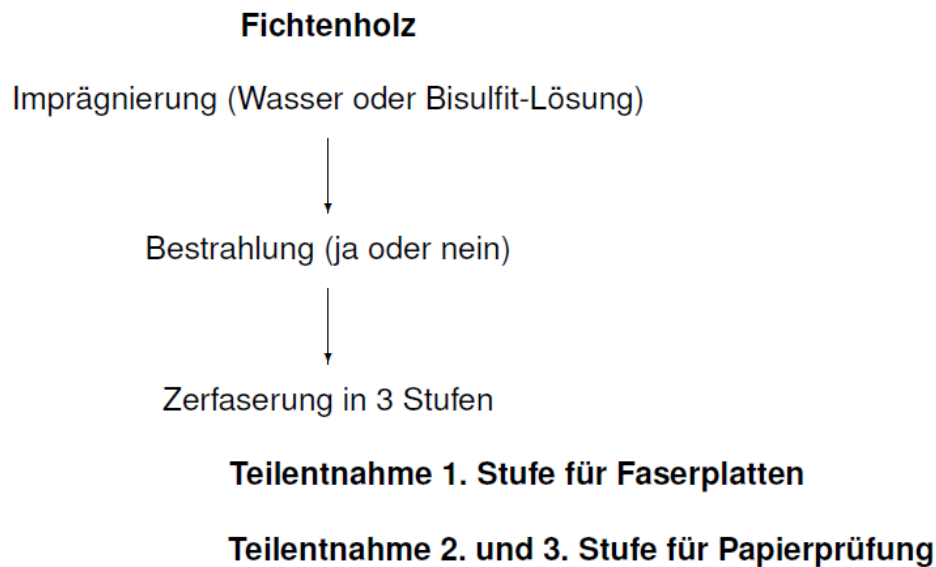


Abbildung 4.1: Versuchsablauf

Imprägnierung der Hackschnitzel (AP 1)

Bei der Imprägnierung im Labor wurden ca. 2 kg Hackschnitzel mit einem Kunststoffsieb in einen Behälter mit der verdünnten Imprägnierlösung eingetaucht (im Normalfall 10 sec). Das Abtropfen nach dem Tauchen nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch (ca. 5 min). Im Labor wurde die anhaftende Restflüssigkeit durch mehrfaches leichtes Aufstoßen des Kunststoffsiebes mit den Hackschnitzeln auf eine schräge Unterlage entfernt. Die Flüssigkeitsaufnahme kann durch Differenzwägung (vor und nach Imprägnierung) oder auch durch Trockengehaltsproben erfasst werden.

Die Chemikalien diffundieren in das Holz. Die Imprägnierung ist über längere Zeit stabil. Eine Lagerung des imprägnierten Holzes über mehrere Tage stellt kein Problem dar. Ein Austrocknen beispielsweise durch Sonnen- und Windeinfluss muss dabei verhindert werden.

Das Fichtenholz kann mit Wasser oder einer Bisulfitlösung imprägniert werden. Ein Teil der imprägnierten Hackschnitzel wird dann bestrahlt und den anderen Teil lässt man unbestrahlt. Dadurch soll nach der Auswertung die Wechselwirkung zwischen Imprägnierung und Bestrahlung gezeigt werden.

Die Zerfaserung erfolgt in 3 Stufen. Nach der 1. Stufe erfolgt die Entnahme von Faserstoff für die Bildung von Faserplatten. Nach der 2. und 3. Stufe wird jeweils eine Teilmenge für die Papierprüfung entnommen. Die Ausprüfung erfolgt dann am LPT.

Der Versuchsplan für die ersten Versuche zur Optimierung der Hackschnitzelvorbehandlung (AP 1) ist in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 4.1: Versuchsplan Optimierung der Hackschnitzelvorbehandlung

V-Nr.	Vorimprägnierung	Bestrahlung	Zerfaserung
1a	Wasser (Tauchen kurz)	keine	1. St; 2. St; 3. St
1b	Wasser (Tauchen kurz)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
2a	Bisulfit 5 kg/t (Tauchen kurz)	keine	1. St; 2. St; 3. St
2b	Bisulfit 5 kg/t (Tauchen kurz)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
3a	Bisulfit 10 kg/t (Tauchen kurz)	keine	1. St; 2. St; 3. St
3b	Bisulfit 10 kg/t (Tauchen kurz)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
3c	Bisulfit 10 kg/t (Tauchen 10 min)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
4a	Bisulfit 10 kg/t (Vakuum 10 min)	keine	1. St; 2. St; 3. St
4b	Bisulfit 10 kg/t (Vakuum 10 min)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
5a	Bisulfit 10 kg/t (Überdruck 10 min)	keine	1. St; 2. St; 3. St
5b	Bisulfit 10 kg/t (Überdruck 10 min)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St
6a	Bisulfit 10 kg/t (Extruder-Pressung)	keine	1. St; 2. St; 3. St
6b	Bisulfit 10 kg/t (Extruder-Pressung)	0,6 MeV; 30 kGy	1. St; 2. St; 3. St

Durch die Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und den Untersuchungen zu den verschiedenen Imprägnierungsvarianten können die Randparameter für folgende Untersuchungsreihen festgelegt werden. Diese sollten konstant gehalten werden, um dabei ausschließlich den Einfluss verschiedener Strahlungsintensitäten zu verifizieren:

- Bisulfiteinsatz sollte bei 5 kg/t Hackschnitzel (otro) liegen.
- Für die Imprägnierung reicht ein kurzes Eintauchen aus.
- Strahlendosis von 0–40 kGy
- Temperatur im Refiner von 130–140 °C
- Reduzierung der Mahlung auf zwei Mahlstufen bei bestrahlten Proben

Bestrahlung der Hackschnitzel (AP 1)

Für die Bestrahlung kamen bei den Versuchen 2 unterschiedliche Elektronenbeschleuniger zum Einsatz:

- Versuchs-Elektronenbeschleuniger des Instituts für Polymerforschung Dresden e.V.: Bestrahlungsenergie **0,6–1,5 MeV**. Bei die ersten 10 Versuchsreihen. Hierbei erfolgte eine einschichtige Verteilung der Hackschnitzel über die gesamte Palette.
- Elektronenbeschleuniger Gamma-Service Radeberg GmbH: Bestrahlungsenergie **10 MeV**. Hackschnitzel in Behälter mit 10–20 cm Schütthöhe. Notwendig, um Laborergebnisse für die industrielle Praxis nutzbar zu machen.

Tabelle 4.2: Elektronenbeschleunigeranlagen

Elektronenbeschleuniger	ELV-2 INP (Novosibirsk)	TT 300 (IBA)
Elektronenenergie	0,6–1,5 MeV	10 MeV
Strahlleistung	20 kW	100 kW
Dosisleistung		12.000 kGy/h
HF-System		107,5 MHz
Max. Arbeitsbreite	1.000 mm	1.200 mm
Transportsystem (Tablare)	max. 12 m/min	max. 21 m/min

Wie tief die Elektronen in einen Stoff eindringen können, hängt linear von der Stoffdichte des Stoffes ab, höhere Dichten bedeuten eine geringere Eindringtiefe. Die Strahlendosis ist im Stoff nicht homogen verteilt. In einem Strahl, in dem jedes Elektron die gleiche Energie besitzt, verändert sich die Strahlendosis in Abhängigkeit von der Eindringtiefe in das Material. Dies kann in einer Kurve dargestellt werden, die man als Tiefendosisverteilungskurve bezeichnet.

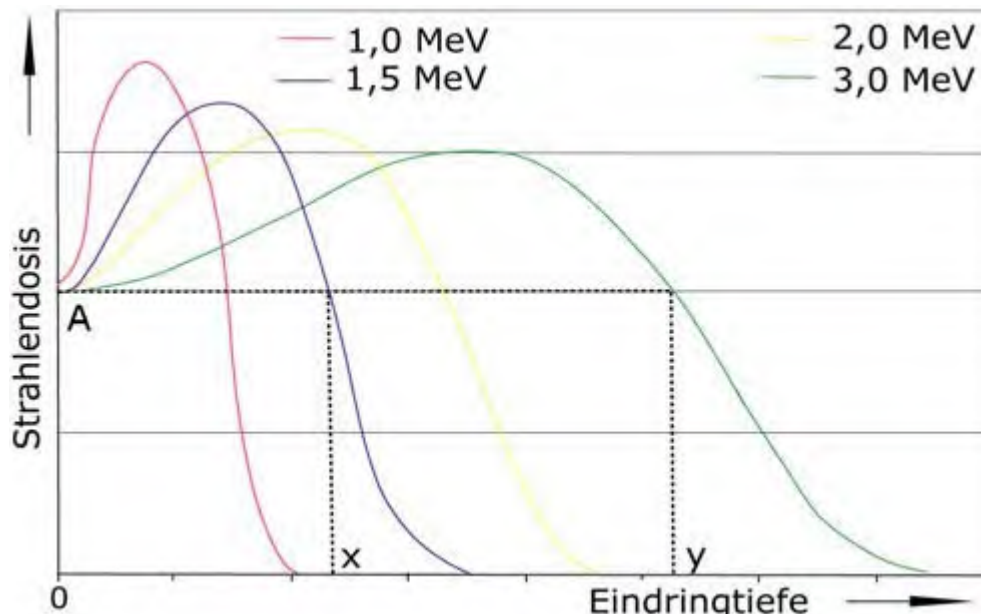


Abbildung 4.2: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Strahlenintensität

Für den Praxiseinsatz ist es erforderlich zu wissen, wie hoch die maximale Schütthöhe der Holzhackschnitzel sein kann, so dass auch unten liegende Holzhackschnitzel noch ausreichend bestrahlt werden. Je größer die Eindringtiefe der Elektronenstrahlen, desto höher ist die mögliche Durchsatzleistung an einer Bestrahlungsanlage.

Variation der Schütthöhe und der Strahlungsdosis (AP 1)

In einem weiteren Versuchsprogramm wurden an der großen Bestrahlungsanlage in Radeberg (10 MeV) die Schütthöhen und die Dosisleistung variiert.

Tabelle 4.3: Versuchsplan Hackschnitzelbestrahlung

Versnr.	Höhe in m	Strahlungsintensität in kGy	Bemerkung
1	0,05	30	
2	0,10	30	
7	0,15	30	ohne Imp.
3	0,20	30	
8	0,25	30	ohne Imp.
4	0,30	30	
5	0,40	30	
6	0,50	30	ohne Imp.
9	0,1	0	
10	0,1	10	
11	0,1	20	
12	0,1	30	
13	0,1	40	

Die Kenntnis von dem Verlauf der Strahlungsintensität ist von großer Bedeutung. Die folgende Abbildung zeigt das Verhältnis von eintreffenden Strahlen an der Oberfläche DOF zu der Strahlungsintensität, die am Boden der Probenbehälter verblieben ist. Bis zu einer Schütthöhe von 10 cm ist die am Boden gemessene Strahlungsintensität durch Streueffekte höher als

die eintreffende an der Oberfläche. Es erhalten damit alle Hackschnitzel die vorgesehene Bestrahlungsintensität. Ab einer Schütthöhe von 10 cm gelangt der Elektronenstrahl nicht mehr mit voller Strahlungsintensität auf den Behälterboden. Ist die Schütthöhe höher als 20 cm bei der gegebenen Schüttdichte, gelangen keine Strahlen mehr am Boden an. Damit haben die Versuche mit höheren Schütthöhen als 20 cm keinen Aussagewert mehr.

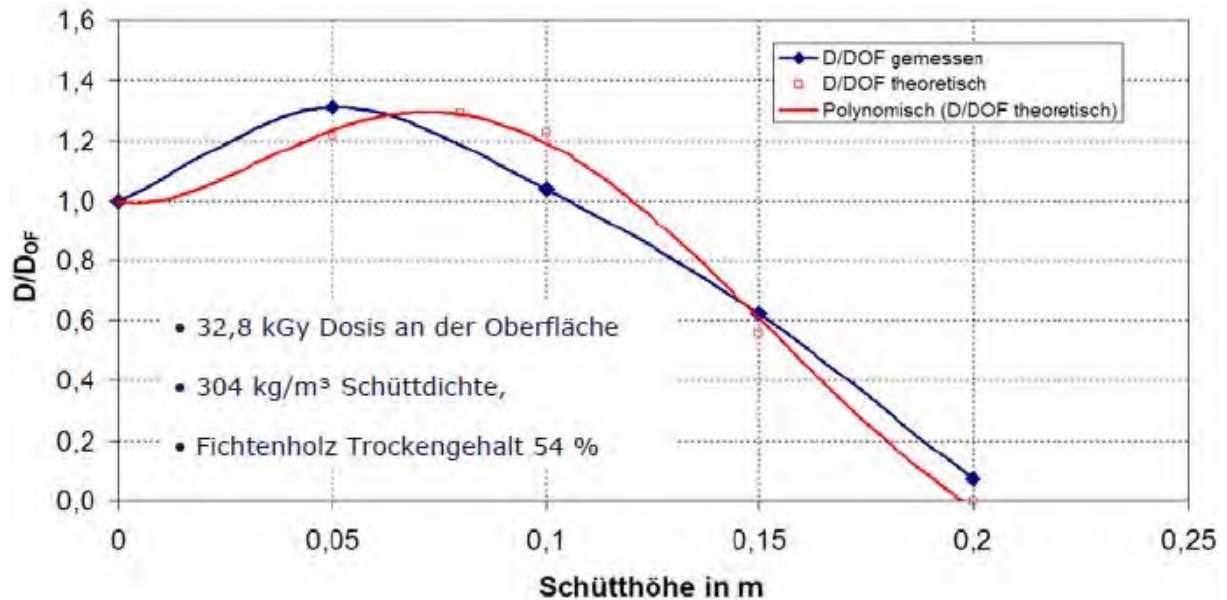


Abbildung 4.3: Messung der Strahlendosis

Zerfaserung der Hackschnitzel (AP 2)

Die Entwässerungswiderstände der bestrahlten Hackschnitzelproben waren nach der 2. Zerfaserungsstufe schon ausreichend hoch und brachten nach der 3. Stufe keine Verbesserung der Stoffeigenschaften. Deshalb wurde die TMP-Erzeugung auf 2 Stufen reduziert, was auch energetisch von Vorteil war.

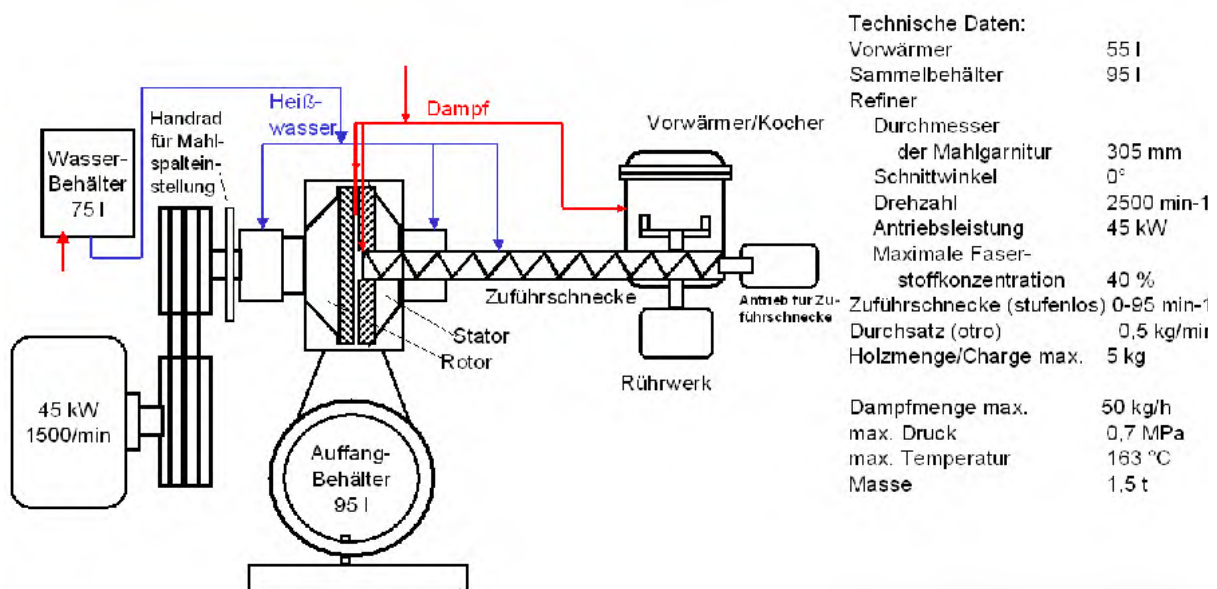


Abbildung 4.4: Aufbau und Parameter der institutseigenen Laboranlage in Hainsberg

Nach Optimierung der Einstellung der TMP-Anlage (Abb. 4.4; Tabelle 4.4) wurden die folgenden Mahlparameter festgelegt:

Tabelle 4.4: Mahlparameter der Laboranlage

Stufe	Mahlpalt in mm	Zuführschnecke U/min	Verdünnungswasser in l/h
1. Stufe	0,3	10	40
2. Stufe	0,04	20	10

Berechnung des spezifischen Energiebedarfs

Zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs ist die Erstellung einer Massenbilanz notwendig (siehe Abbildung 4.5). Die Labormahlanlage verfügt über eine elektronische Datenaufzeichnung, die die Erfassung der aufgenommenen Leistung über die Zeit am Refiner ermöglicht. Anhand der Bestimmung der zerfaserten Faserstoffmenge pro Stufe kann der spezifische Energieverbrauch berechnet werden.

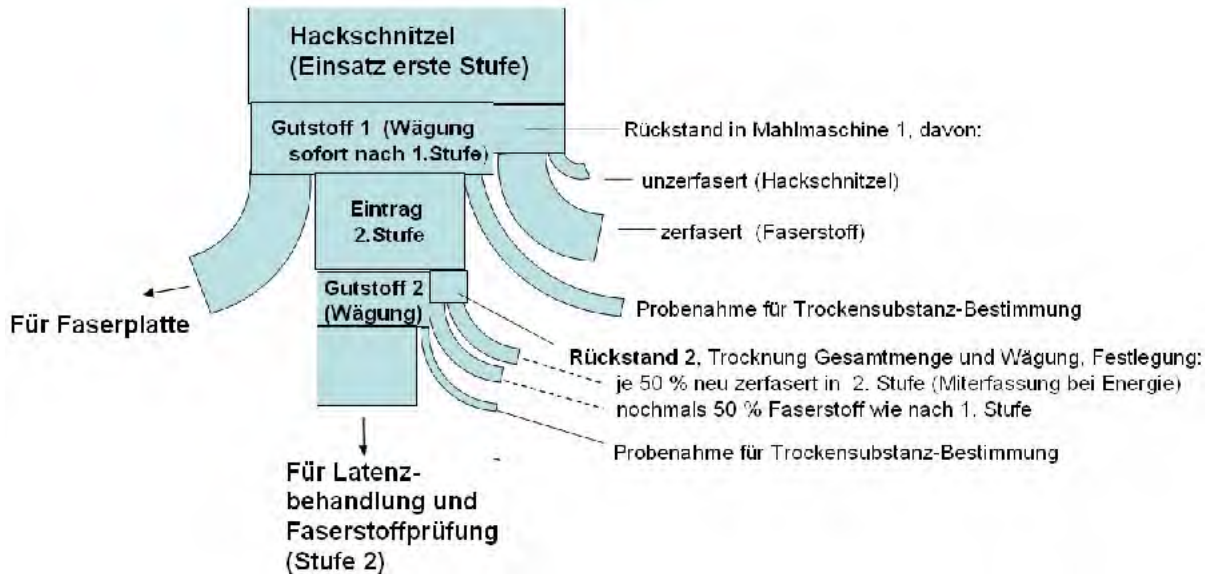


Abbildung 4.5: Massebilanz an der TMP-Anlage

Die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs beruht auf den erfassten Refinerdaten (Anzahl der Messungen, Dauer der Mahlung und aufgenommene Leistung) und der Massebilanz des zerfaserten Faserstoffs.

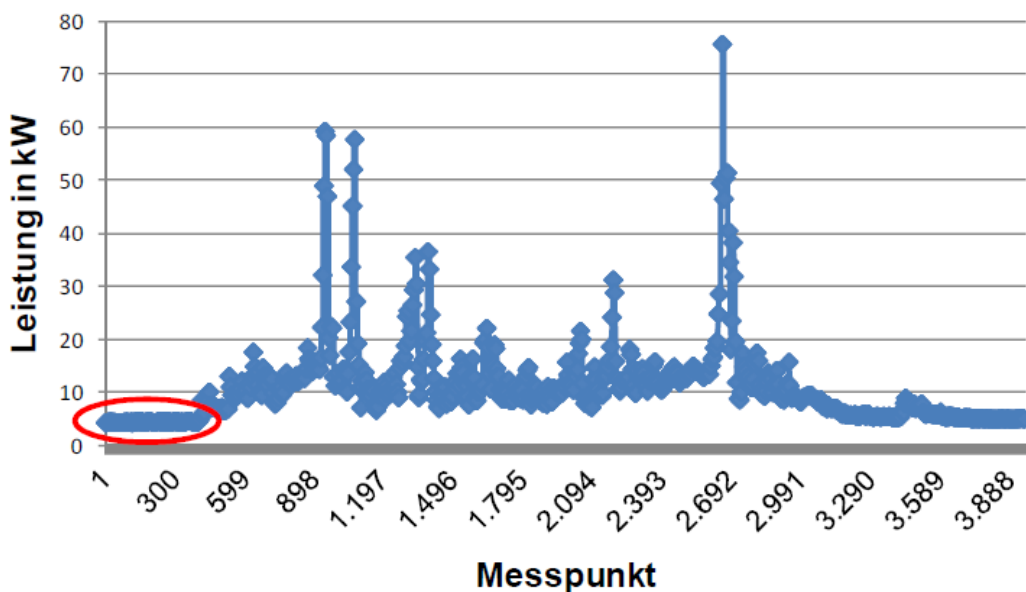


Abbildung 4.6: Leistungsaufnahme einer Mahlstufe an der TMP-Anlage

Am Ende berechnet sich der spezifische Energieverbrauch durch die Integration der aufgezeichneten Leistung über die Zeit abzüglich der Leerlaufleistung bezogen auf die zerfaserte Faserstoffmenge und kann wie folgt beschrieben werden:

- Überführung der aufgezeichneten Leistung (in kW) und die dazugehörige Zeiterfassung (Zeitformat: hh:mm:ss) in eine Excel-Tabelle (s. Abbildung 4.7)
- Bestimmung der Leerlaufleistung (Mittelwertbildung)
- Berechnung der aufgewendeten Mahlergie pro Messpunkt = aufgenommene Leistung abzüglich der Leerlaufleistung pro Messpunkt (1.)
- Bildung der Summe der aufgewendeten Mahlergie (2.)
- Berechnung der Anzahl der Messungen pro Sekunde = Summe der Messungen dividiert durch die Gesamtdauer der Messungen (3.)
- Berechnung des Energieverbrauches = Summe der aufgewendeten Mahlergie dividiert durch die Anzahl der Messungen pro Sekunde (4.)
- Berechnung des spezifischen Energieverbrauches = Energieverbrauch dividiert durch die zerfaserte Faserstoffmenge (Gutstoff + 50 % Reststoff)

05.08.2009 10:07:10	4,89	0,54	
05.08.2009 10:07:11	4,89	0,54	
05.08.2009 10:07:11	4,89	0,54	→ 1.
05.08.2009 10:07:11	4,89	0,54	
05.08.2009 10:07:11	4,89	0,54	
Summe		26221,47	→ 2.
Anzahl d. Messungen		3952	
Dauer in s		261	
	Mess/s	15,1417625	→ 3.
	kWs	1731,7317	
	kWh	0,481	→ 4.

Abbildung 4.7: Vorgehensweise zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs

Vordämpfung, Extrudierung und veränderte Imprägnierbedingungen

In den folgenden Versuchsreihen wurden weitere Vorbehandlungsbedingungen untersucht:

- Hackschnitzelpressung (Extrudierung) statt 1. Refinerstufe
- Vordämpfung der Hackschnitzel im Autoklav (100 °C) oder im Refiner (130–150 °C)
- Imprägnierung mit Alkali-Peroxidlösung

Dabei stand die Zielstellung, eine energieaufwendige Refinerstufe durch Hackschnitzelpressung in einem Extruder zu ersetzen. Eine Destrukturierung der Holzhackschnitzel durch Pressung in Verbindung mit einer chemischen Imprägnierung analog des von Andritz für den Laubholzaufschluss entwickelten **Pre-conditioning Refiner Chemical Alkaline Peroxide Mechanical Pulping** Verfahrens (P-RC APMP) ermöglicht weitere Energieeinsparungen. Für die Imprägnierung der Hackschnitzel wurde dabei eine Alkali-Peroxid-Lösung eingesetzt.

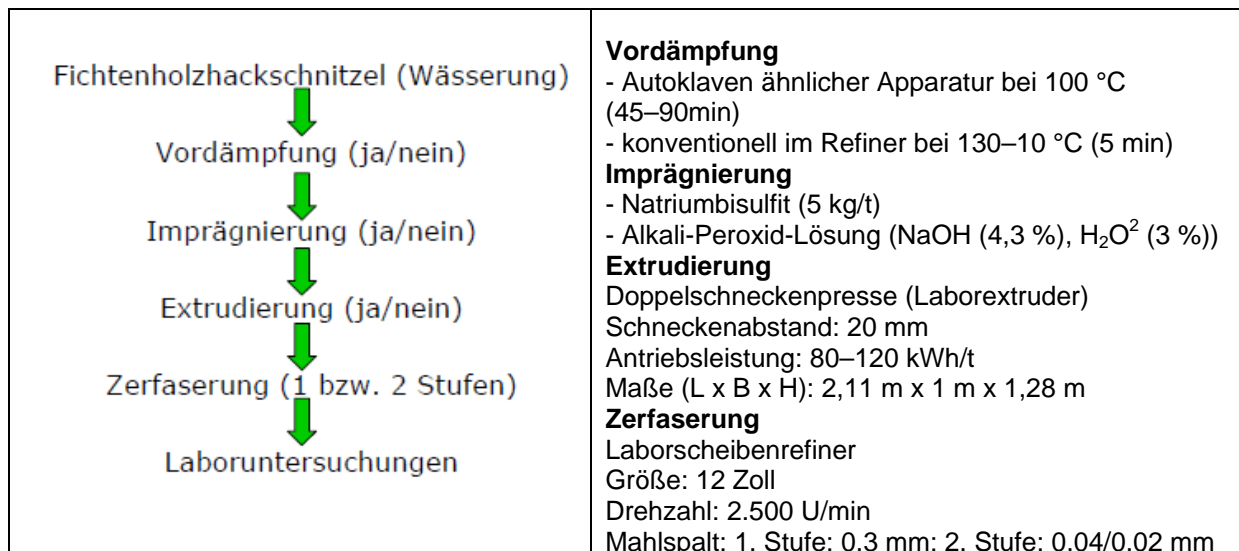


Abbildung 4.8: Versuchsablauf mit Hackschnitzelpressung

Es wurden die folgenden 2 Versuchsreihen durchgeführt. Um den Festigkeitsverlust durch die Extrudierung in der ersten Versuchsreihe zu minimieren, wurden die Hackschnitzel durch eine Vordämpfung im Autoklaven bei 100 °C 90 min vorbehandelt. Bei der 2. Versuchsreihe erfolgte die Vordämpfung konventionell 2-stufig in der TMP-Anlage bei 130–150 °C. Mit der Hackschnitzelpressung in der 1. Stufe wurde die Vordämpfungszeit im Autoklaven auf 45 min verkürzt. Zusätzlich kam bei der 2. Versuchsreihe die Alkali-Peroxid- Imprägnierung zur Anwendung.

Tabelle 4.5: Versuchsdurchführung Hackschnitzelpressung

Vers. -Nr.	Vordämpfung (100°C/90min)	Imprägnierung Na-Bisulfit 5 kg/t	Extruder- behandlung	Zerfaserung	
				0,3 mm	0,04 mm
V6c1, Ref		10 s		X	X
V6c2		10 min	X		X
V6c3	X		X		X
V6c4	X	10 min	X		X

Vers. -Nr.	Vordämpf. Refiner (5 min)	Vordämpf. Autoklaven (100°C/45min)	Imprägnie- rung (100°C/5min)	Extruder	Zerfaserung	
					0,3 mm	0,02 mm
V6d1	130 °C				X	X
V6d2	140 °C				X	X
V6d3	150 °C				X	X
V6d4	140 °C		Na-Bisulfit		X	X
V6d5	140 °C		NaOH+H ₂ O ₂		X	X
V6d6		X	Na-Bisulfit	X		X
V6d7		X	NaOH+H ₂ O ₂	X		X

Variation: Mahlpalt im Refiner und der Bisulfitkonzentration bei der Imprägnierung (AP 2 und 3)

In weiteren Versuchsreihen wurde der Mahlpalt im TMP-Refiner variiert. Dieses erfolgte sowohl bei den Hackschnitzelproben mit (Imprägnierung und Bestrahlung) als auch ohne

Vorbehandlung. Damit sollte eine gesicherte Aussage über den Mahlkurvenverlauf mit und ohne Vorbehandlung der Hackschnitzel gewonnen werden. Außerdem erfolgte bei zusätzlichen Versuchen eine Variation der Konzentration der Bisulfittlösung (in folgender Tabelle NaHSO₃-Lösung als SO₂ gerechnet). Es wurde dabei auch untersucht, welche Auswirkungen eine Vorbehandlung der Hackschnitzel auf die Nachbleiche des Holzstoffes hat. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu dieser Versuchsreihe.

Tabelle 4.6: Versuchsplan Variation Mahlpalt und Bisulfitkonzentration

Versuchsvariation	NaHSO ₃ -Lösung	Strahlendosis in kGy	Mahlpalt in mm	Schnecke in U/min	Temperatur in °C	Nachbleiche
Variation des Mahlpaltes, ohne Imprägnierung, ohne Bestrahlung						
1a	0	0	0,3/0,10	0,15/0,25	140/130	
1b	0	0	0,3/0,06	0,15/0,25	140/130	x
1c	0	0	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	x
1d	0	0	0,3/0,02	0,15/0,25	140/130	
Variation des Mahlpaltes, mit Imprägnierung, mit Bestrahlung						
2a	5	20	0,3/0,10	0,15/0,25	140/130	
2b	5	20	0,3/0,06	0,15/0,25	140/130	x
2c	5	20	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	x
2d	5	20	0,3/0,02	0,15/0,25	140/130	
3a	5	30	0,3/0,10	0,15/0,25	140/130	
3b	5	30	0,3/0,06	0,15/0,25	140/130	x
3c	5	30	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	x
3d	5	30	0,3/0,02	0,15/0,25	140/130	
Variation der Imprägnierung, mit Bestrahlung						
4a	0	30	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	
4b	3	30	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	x
4c	10	30	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	
4d	20	30	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	
4e	5	0	0,3/0,04	0,15/0,25	140/130	x

Eigenschaften der Holzstoffe und der davon hergestellten Laborprüfblätter (AP 4)

In der folgenden Tabelle sind die zur Auswertung verwendeten Normen aufgelistet.

Beim Nassaufschlagen wurde von der DIN ISO (E) 5 263 abgewichen und eine höhere Stoffdichte im Desintegrator verwendet.

Optische Werte wurden nur von der Sieboberseite gemessen, ebenso bei der Rauheitsmessung nach Parker Print Surf. Diese Messeinschränkung musste aufgrund von uneinheitlicher Ablösung des Probelattes vom Sieb vorgenommen werden.

Tabelle 4.7: Prüfnormen zur Untersuchung der Holzstoff- und Papiereigenschaften

Bezeichnung	Stand	Beschreibung
DIN 53 115	12/77	Weiterreißarbeit nach Brecht Imset
DIN 53 121	12/96	Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode
DIN 53 140	07/92	Farbmessung der Papiere, Farbortbestimmung
DIN 53145-1	03/00	Reflexionsfaktor (R457) an nicht fluoreszier. Proben
DIN 53145-2	03/00	Reflexionsfaktor (R457) an fluoreszier. Proben
DIN 53146	04/00	Opazität
DIN 53147	01/93	Transparenz
DIN 54 500	04/04	dichtebezogener Lichtstreuoeffizient
DIN EN 20 187	11/93	Probenvorbehandlung, Normklima
DIN EN 20 287	09/94	Feuchtigkeitsgehalt
DIN EN 20 534	10/93	Dicke, scheinbare Blattdichte
DIN EN ISO 186	08/02	Probennahme
DIN EN ISO 1924-2	04/95	Bruchkraft, Bruchdehnung, E-Modul
DIN EN ISO 5269/2	2004	Rapid Köthen Verfahren
DIN EN ISO 536	08/96	Flächenbezogene Masse
DIN ISO (E) 5 263	2004	Nassaufschlagen im Laboratorium
DIN ISO 5 267/1	10/00	Schopper Riegler Verfahren
DIN ISO 5 267/2	10/00	Canadian-Standard-Freeness-Verfahren
DIN ISO 8791-4	07/96	Rauheit Parker Print Surf
ZM IV/33/57		Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens
ZM V/1.2/86		Fraktionierverfahren mit Haindl und McNett

Faserplattenherstellung im Labormaßstab und deren Prüfung (AP 5 und 6)

Zur Untersuchung der Wirkung der Hackschnitzelbestrahlung auf die Eigenschaften der Faserwerkstoffe, wurden Faserplatten (MDF und HDF) im Labormaßstab im Holztechnikum der TU-Dresden hergestellt. Die Abbildung 4.9 zeigt den Herstellungsablauf für diese Werkstoffe. Herstellungsparameter:

- Plattenformat: 400 mm * 400 mm * Dicke (MDF: 10 mm; HDF: 5 mm)
- Zielrohichte: 750 bis 800 kg/m³ für MDF und 950 kg/m³ für HDF
- Presstemperatur: 180 °C
- Presszeit: 120 s

- Leim: 3 % PMDI

Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Rohdichte nach EN 323
- Biegefestigkeit nach EN 310
- Querkzugfestigkeit nach EN 319
- Wasseraufnahme und Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung

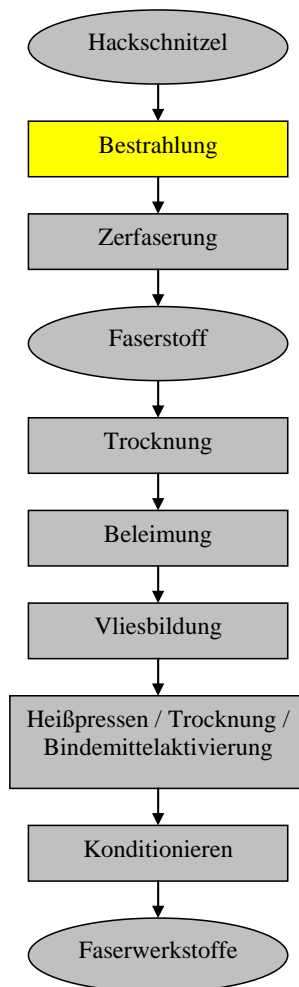


Abbildung 4.9: Hackschnitzelbestrahlung und Faserwerkstoffherstellung

Die Ergebnisse der Mahlung der bestrahlten Hackschnitzel im Batch-Betrieb mit der TMP-Anlage der TUD sollten in einem quasi kontinuierlichen Betrieb bei höherer Mahltemperatur überprüft werden.

Dazu wurden zwei Upscaling-Versuchsreihen zur Hackschnitzelbestrahlung bei der Fa. Gammaservice Radeberg und zur Faserstoffherstellung aus bestrahlten und unbestrahlten Hackschnitzel am Institut für Holztechnologie Dresden durchgeführt. Die Hackschnitzel-Zerfaserung der zweiten Versuchsreihe wurde sowohl am IHD als auch im Technikum der TUD durchgeführt. Die Zerfaserungsbedingungen sind in folgender Tabelle beschrieben:

Tabelle 4.8: Zerfaserungsbedingungen im IHD und an der TUD

Zerfaserungsbedingungen	TMP-Anlage IHD	TMP-Anlage TUD
Hackschnitzelmenge	40 kg	3 kg
Mahltemperatur	180 °C	155 °C
Verweildauer im Kocher	4 min	5 min
Mahlspalt	0,14 mm	0,15 mm



Abbildung 4.10: TMP-Anlage im Technikum der TUD – Batch-Betrieb



Abbildung 4.11: TMP-Anlage am IHD (Quelle: IHD) – quasi kontinuierlicher Betrieb

Mit den hergestellten Faserstoffen wurden Faserplatten verschiedener Kategorien hergestellt:

- Leichte MDF (580 kg/m³), MDF (750...800 kg/m³)
- HDF (950 kg/m³)
- Dämmplatten (160 kg/m³).

Herstellungsparameter:

- Plattenformat: 400 mm * 400 mm * Dicke (MDF: 10 mm; HDF: 5 mm)
- Presstemperatur: 180 °C
- Presszeit: 120 s
- Leim: 3 % PMDI

An den Faserwerkstoffen wurden folgende Eigenschaften bestimmt:

- Rohdichte nach EN 323
- Biegefestigkeiten (BF) nach EN 310
- Druckfestigkeiten (DF) nach EN 826 (nur bei Dämmplatten)
- Querkzugfestigkeiten (QF) nach EN 319
- Wasseraufnahme und Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung

5 Ergebnisse

5.1 Imprägnierung der Hackschnitzel (AP 1)

Entsprechend des ersten Versuchsplans wurden Imprägnierbedingungen variiert. Einfluss auf die Chemikalien-Aufnahme bei der Imprägnierung haben die Konzentration der Imprägnierlösung und die Vorgehensweise bei der Imprägnierung. Eine Imprägnierung unter Vakuumbedingungen verbessert die Chemikalienaufnahme. Aufgrund der verbesserten Handhabbarkeit wurde bei späteren Versuchen Na-Bisulfit anstelle von Mg-Bisulfit eingesetzt. Der Holzrockengehalt als weitere Einflussgröße war bei den Versuchen weitestgehend konstant.

Eine Verlängerung der Eintauchzeit von 10 s auf 10 min erhöht die Flüssigkeits- und Chemikalienaufnahme nur unwesentlich. Beim Eintauchen ist die Aufnahme an Chemikalien durch das Holz insbesondere vom Holzrockengehalt und von der Chemikalienkonzentration in der Lösung zu beeinflussen.

Die Konzentration der handelsüblichen Bisulfit-Lösung wurde durch Titration bestimmt. Zum Beispiel wurden bei einem 5 l hü Bisulfit-Kanister folgende Werte ermittelt:

- 331 g/l SO₂ und 537,5 g/l NaHSO₃ (Na-Bisulfit)

Bei Konzentrationsverdünnung der Imprägnierlösung kann über die Flüssigkeitsaufnahme der Hackschnitzel der Chemikaliengehalt errechnet werden. Bei Versuchen mit Holzhackschnitzeln (44,7 % Trockensubstanz) wurden durch gezielte Konzentrationsverdünnung der Imprägnierlösung bei einer Tauchdauer von 10 sec folgende Chemikalienmengen aufgenommen:

Tabelle 5.1: Chemikalienaufnahme der Hackschnitzel bei Variation der Bisulfit-Konzentration

Zielgröße: Aufnahme kg SO ₂ /t otro	Imprägnierlösung l hü Bisulfit auf l Wasser	Flüssigkeitsaufnahme in ml bezogen auf feuchte HS otro		Ist SO ₂ in kg/t otro	Ist Bisulfit in kg/t otro
0	nur Wasser	166,6	372,7	0	0
3	0,24 l / 9 l	166,4	372,3	3,3	5,3
5	0,8 l / 18 l	170,4	381,2	5,6	9,1
10	1,6 l / 18 l	152,6	341,4	10,0	16,3

Bei feuchtem Holz (ca. 42 % Trockensubstanz) und 10 s Tauchdauer wurden bei allen Versuchen eine durchschnittliche Flüssigkeitsaufnahme von etwa 130...140 l/t (entsprechend etwa 320...335 l/otro Holz) gemessen. Steigt der Trockengehalt an, führt das zu höherer Flüssigkeitsaufnahme bei der Imprägnierung.

Um den Einfluss von Holzrockengehalt und Eintauchdauer bei der Imprägnierung zu ermitteln, wurden Versuche durchgeführt, bei denen diese Parameter gezielt variiert worden sind. Hier zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Flüssigkeitsaufnahme vom Holzrockengehalt, was auch einleuchtend ist. Trotz einer gewissen Schwankungsbreite zeigt sich auch, dass mit zunehmendem Trockengehalt die Eintauchdauer der Hackschnitzel die Flüssigkeitsaufnahme stärker beeinflusst.

Bei feuchtem bzw. waldfrischem Holz ist dieser Einfluss eher gering. Das Holz ist schon weitgehend mit Wasser gesättigt und zeigt damit eine begrenzte Aufnahmefähigkeit. Deshalb ist es bei der Imprägnierung größerer Hackschnitzelmengen nicht unbedingt notwendig, die Tauchdauer (z. B. 10 s) einzuhalten.

Wie aus der folgenden Abbildung ersichtlich ist, ergibt sich der Vorteil, dass bei waldfrischem Holz, wie es für die TMP-Erzeugung vorzugsweise eingesetzt wird, die Eintauchdauer bei der Imprägnierung im Bereich von 10 s bis 10 min variieren kann, ohne dass sehr große Unterschiede bei der Flüssigkeitsaufnahme eintreten. Damit kann über die Konzentration der Lösung ausreichend genau die Chemikalienaufnahme im Holz bestimmt werden.

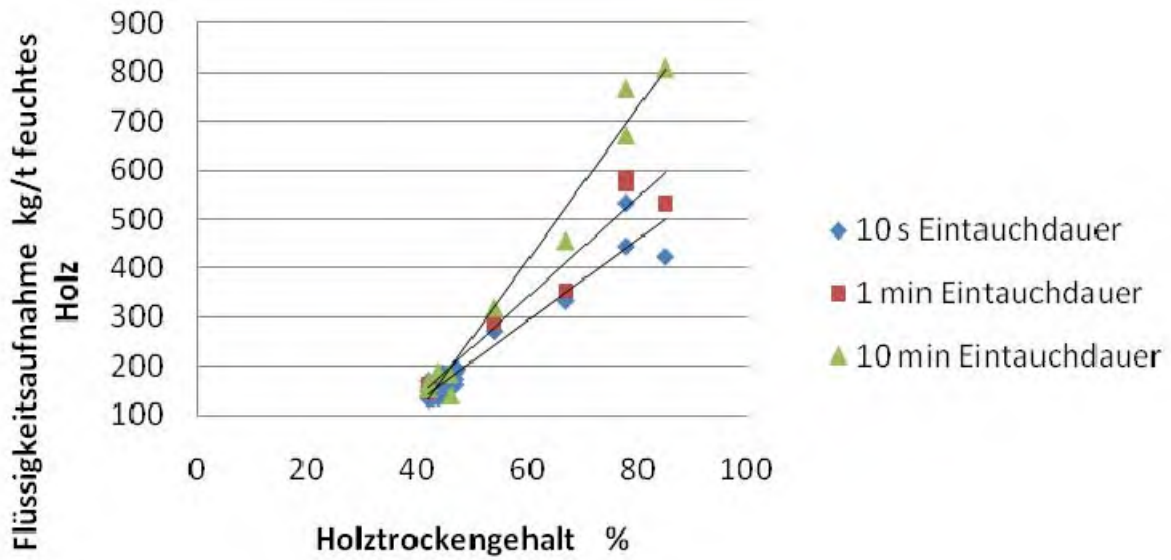


Abbildung 5.1: Flüssigkeitsaufnahme bei der Hackschnitzel-Imprägnierung

Das vom Holz aufgenommene Bisulfit befindet sich anfänglich in der Außenschicht des Hackschnitzels und diffundiert mit fortschreitender Zeit ins Holz hinein. Dieser Vorgang wird durch den nachfolgend beschriebenen Test verdeutlicht.

Imprägniertes Holz wurde nach unterschiedlicher Lagerdauer bei Raumtemperatur in eine definierte Wassermenge eingetragen und anschließend die aus dem Holz herausgelöste Bisulfitmenge durch Titration bestimmt. Bei hohen Werten kann man davon ausgehen, dass ein hoher Anteil des Bisulfits noch in der Außenschicht der Hackschnitzel lokalisiert ist. Sinkt der Wert ab, dann ist ein zunehmender Anteil des Bisulfits in das Holz eingedrungen und nicht mehr auswaschbar.

Holz mit 43,32 % TS wurde mit Bisulfit (14,7 g/l SO₂) imprägniert. 300 g Holz haben 30 ml Lösung aufgenommen. Je 55 g des imprägnierten Holzes wurden nach 0 h; 2 h; 4 h mit Wasser auf 1 l aufgefüllt. Nach 5 min Wässerung wurde das Wasser abfiltriert und der Bisulfit-Gehalt (SO₂-Gehalt) im Wasser gemessen. Nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5.2: Diffusion des Bisulfits in das Holz

Lagerdauer h	SO ₂ g/l	% v. E.
0	0,07	95
2	0,037	50,3
4	0,018	25,03

Nach 2 h ist etwa die Hälfte des Bisulfit in die Hackschnitzel eingedrungen, so dass es in kurzer Zeit (5 min) von außen mit Wasser nicht mehr auswaschbar ist. Das Bisulfit ist dann

im Holz gebunden und über längere Zeit stabil. Voraussetzung ist, dass keine Austrocknung des Holzes stattfindet.

Zur Messung der Eindringtiefe wurde auch das Raman-Spektroskop verwendet. Ein 3 mm starkes Holzstück wurde 10 s mit Natriumbisulfit imprägniert und getrocknet, dadurch sollte die Diffusion eingeschränkt werden. Bei der Messung im Raman-Spektroskop wurde in einem Messbereich von 100 μm das Holzstück mit der Faser senkrecht zum Laser eingespannt.

In der folgenden Abbildung sind die gemessenen Spektren dargestellt. Der bei einer Wellenzahl $1/\lambda$ dargestellte Peak zeigt eine Bindungsschwingung des SO_2 , die im unimprägnierten Holz nicht vorhanden ist. Die Intensität dieser Bindungsschwingung des SO_2 verändert sich über den Holzquerschnitt. Es zeigt sich, dass mit der RAMAN-Spektroskopie in Verbindung mit geeigneten Probenpräparationstechniken eine Möglichkeit gegeben ist, die Imprägnierung von Holz zu analysieren.

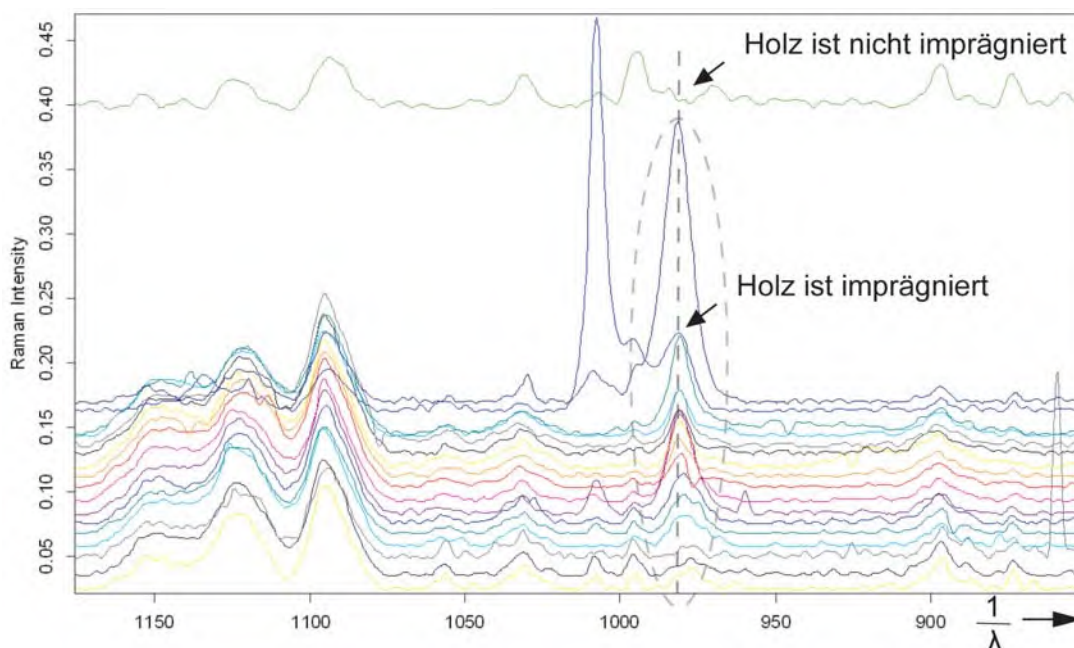


Abbildung 5.2: SO_2 -Schwingungen in Abhängigkeit von der Bisulfit-Imprägnierung

Interessant ist die Auswirkung der aufgenommenen Menge Bisulfit auf die spätere Elektronenbestrahlung. Ein Vergleich der Festigkeitseigenschaften bei verschiedenen Imprägnierungsvarianten ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Es werden die Ergebnisse nach der 2. Mahlstufe verglichen.

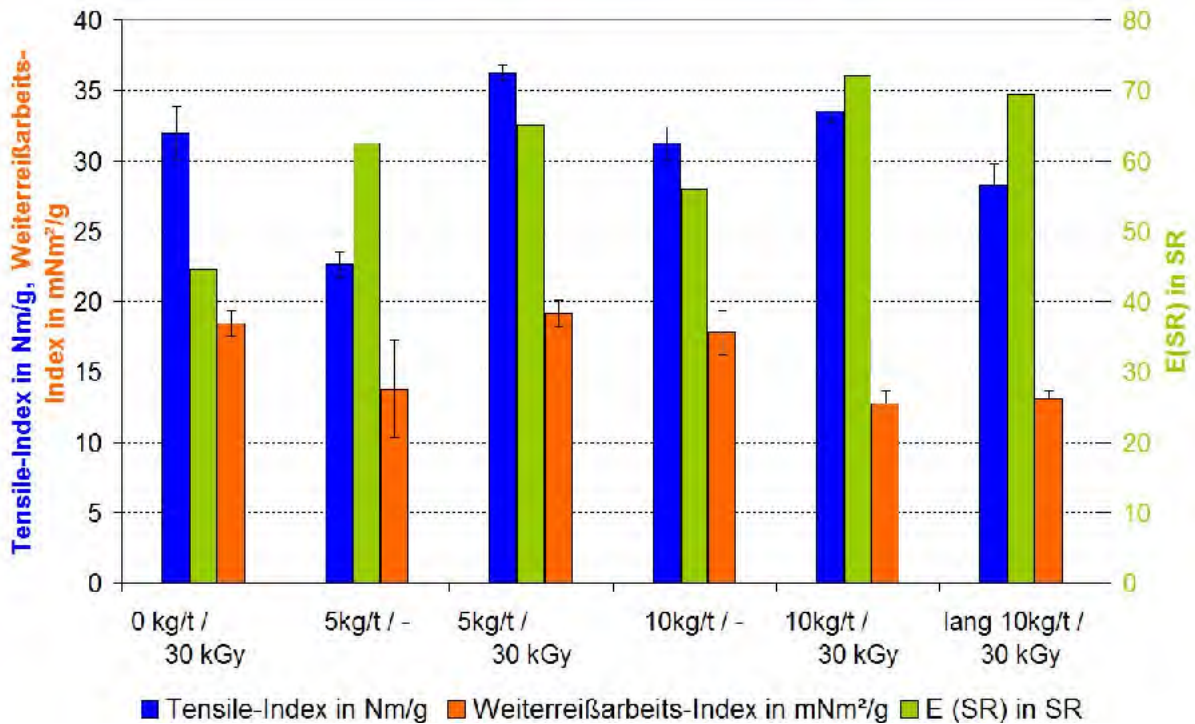


Abbildung 5.3: Variation der Imprägnierbedingungen

Der höchste Tensile-Index und Weiterreißarbeits-Index wurden bei einer Imprägnierung von 5 kg/t und einer Strahlungsintensität von 30 kGy gemessen. Auch der Entwässerungswiderstand ist für die Holzstoffverarbeitung mit 64 SR akzeptabel. Bei einer Erhöhung der Imprägnierung können noch akzeptable Tensile-Indizes erreicht werden, jedoch fällt der Weiterreißarbeits-Index aufgrund des höheren Entwässerungswiderstands ab. Erhöht man die Imprägnierungszeit auf 10 min, verringert sich auch der Tensile-Index. Für die weiteren Untersuchungen wurde deshalb die Imprägnierung mit 5 kg/t und eine kurze Imprägnierungszeit beim Eintauchen genutzt.

5.2 Variation der Schütthöhe und der Strahlendosis bei der Bestrahlung der Hackschnitzel

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Strahlendosis und der Schütthöhe bei der Bestrahlung der Hackschnitzel auf die Eigenschaften der Holzstoffe und die der daraus hergestellten Papierprüfblätter dargestellt.

Abbildung 5.4 zeigt die Abhängigkeit des Entwässerungsverhaltens von der Bestrahlungsintensität. Die einzelnen Versuchspunkte sind alle identisch imprägniert und unterscheiden sich nur in der unterschiedlichen Bestrahlungsintensität. Es zeigt sich, dass mit höherer Bestrahlungsintensität der Entwässerungswiderstand ansteigt. Dies deutet auf eine Auflockerung des Fasergefüges im Hackschnitzel mit Steigerung der Bestrahlungsintensität hin, welches bei konstanter Mahlung zu höheren Entwässerungswiderständen führt, da die Fasern leichter herausgelöst werden können und stärker fibrilliert werden.

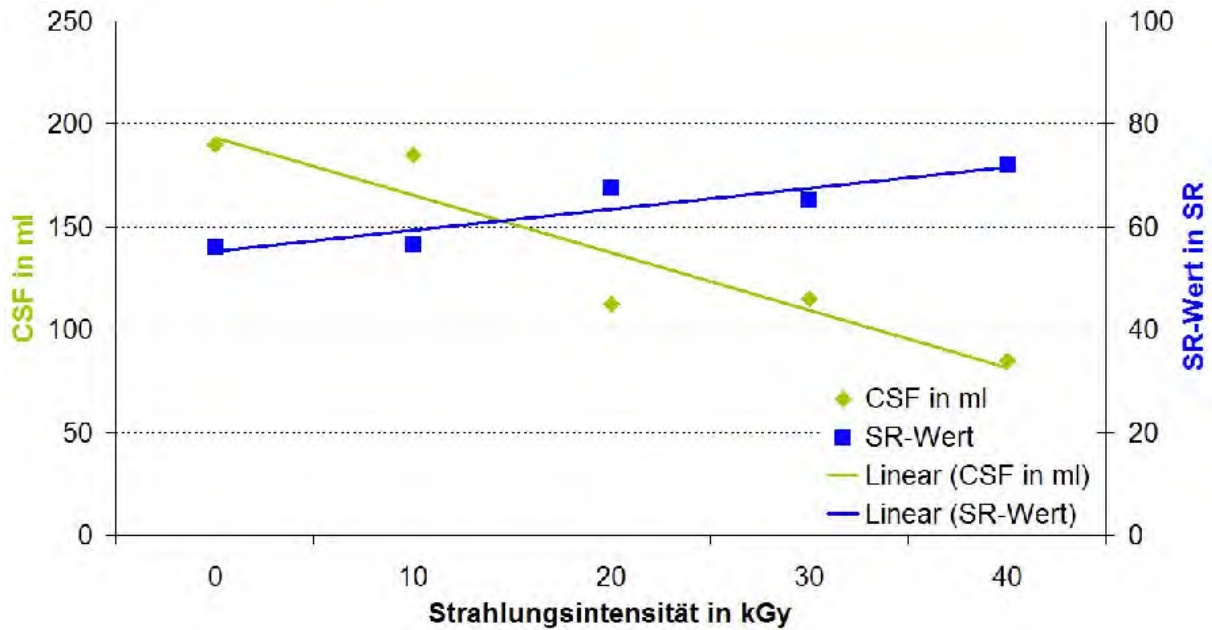


Abbildung 5.4: Entwässerungsverhalten bei steigender Strahlungsintensität, Imprägnierung und Schütthöhe konstant

Mit dem Kajaani Fiberlab wurden die Veränderungen der Fasereigenschaften untersucht. Durch die Untersuchung der Fasereigenschaften bei unterschiedlicher Vorbehandlung können Aussagen und Erklärungen für die Eigenschaftsveränderungen im fertigen Papier getroffen werden.

Durch die Abbildung 5.5 wird die Aussage über eine Faserkürzung bei steigender Strahlungsintensität bestätigt. Die konturenbezogene und projizierte längenbezogene Faserlänge nimmt mit steigender Strahlungsintensität um bis zu 26 % ab. Gleichzeitig steigt die Fibrillierung der Fasern um 20 % von 7,52 % auf 8,89 %.

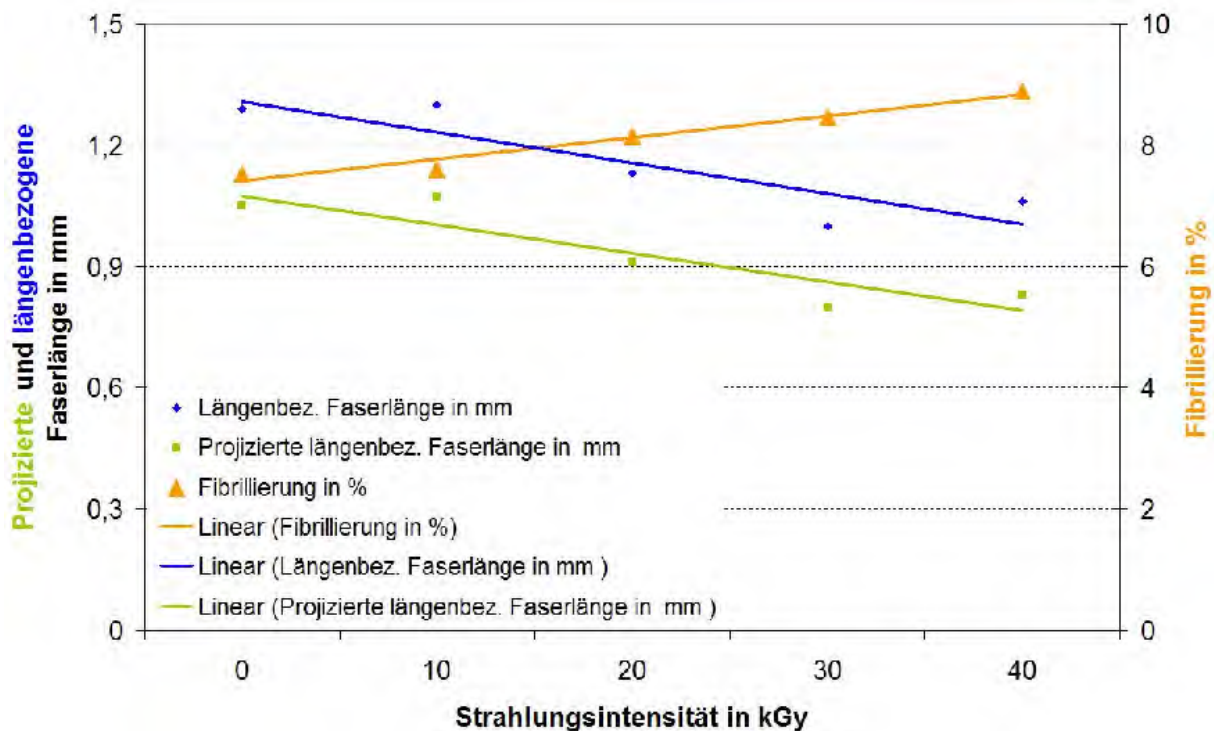


Abbildung 5.5: Fasereigenschaften in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität

In dieser Arbeit wurde eine Messreihe Variation der Strahlendosis von 0–40 kGy aufgenommen, um eine genauere Aussage über den Verlauf von Festigkeitsverlusten zu bekommen. Gleichzeitig wurde versucht, die Verluste präventiv durch eine optimierte Imprägnierung und Mahlung zu reduzieren. Die Abbildung 5.6 zeigt die gemessenen Ergebnisse einiger ausgewählter Parameter in Gegenüberstellung zum Entwässerungswiderstand.

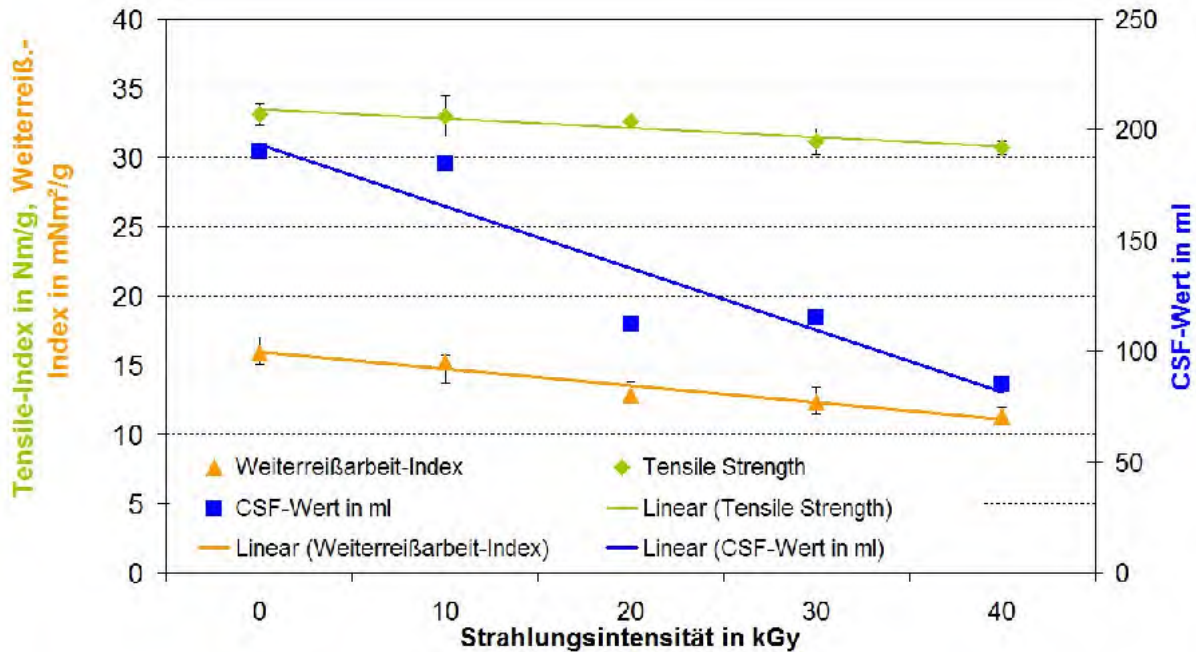


Abbildung 5.6: Festigkeitseigenschaften bei steigender Strahlungsintensität und sinkendem CSF-Wert

Die Tensile-Index verringert sich um 9 % von 0–40 kGy, der Weiterreißarbeits-Index im gleichen Bereich um 29 %. Die Verringerung des Weiterreißarbeits-Index ist aber nicht ausschließlich von der Bestrahlungsintensität abhängig, sondern verringert sich in diesem Mahlbereich hauptsächlich durch die Steigerung des Entwässerungswiderstands. Die fortschreitende Kürzung der Fasern verursacht die starke Reduzierung der Weiterreißarbeit bei steigender Strahlungsintensität. Zum Teil kann dies auch beim Tensile-Index zur Reduzierung führen, obwohl hier die zunehmende Fibrillierung zu mehr Faserbindungen führt und der Reduzierung entgegenwirkt.

Es ist bekannt, dass die Festigkeitskennwerte sehr stark vom Mahlzustand abhängig sind. Daher muss bei den Ergebnissen beachtet werden, dass sich der Entwässerungswiderstand bei konstantem Mahlspalt mit Steigerung der Strahlungsintensität auf die Hackschnitzel erhöht. Dadurch werden die Festigkeitswerte beeinflusst. Eine wirkliche Aussage über das Verhalten der Festigkeitskennwerte wäre deshalb nur bei konstantem Entwässerungswiderstand zu treffen. Dies könnte bei steigender Strahlungsintensität durch Öffnung des Mahlspalts bei der Mahlung erreicht werden. Dieses Vorgehen beinhaltet weitere energiesparende Potenziale und wäre für weiterführende Arbeiten anzuwenden.

In Abbildung 5.7 sind die Ergebnisse des Tensil-Index und des CSB-Index mit steigenden Schütthöhen bei einer Imprägnierung von 5 kg Natriumbisulfit und einer Strahlendosis von 30 kGy dargestellt.

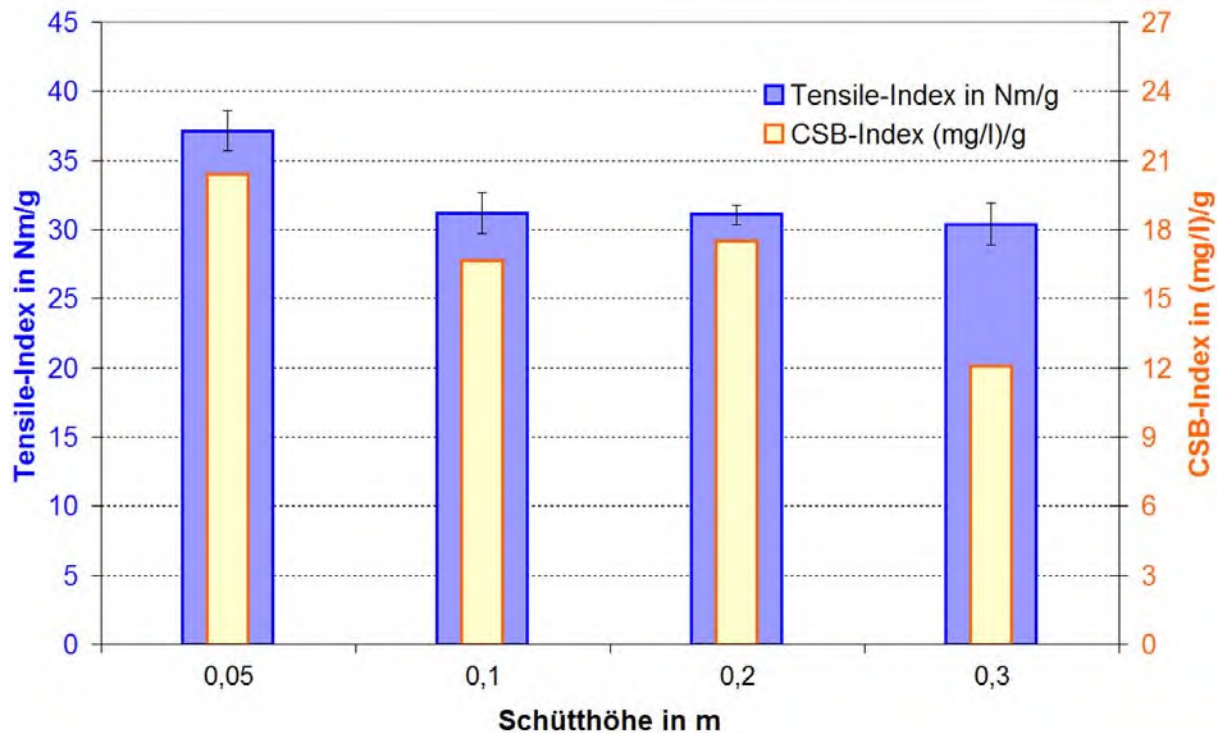


Abbildung 5.7: Tensile-Index und Abwasserbelastung bei steigenden Schütthöhen, Imprägnierung und Bestrahlung konstant

Bei einer Schütthöhe von 5 cm erhalten wir eine höhere Strahlendosis als die eingestellten 30 kGy, da hier das Maximum der Strahlendosis im bestrahlten Gut erreicht wird. Trotz konstanter Einstellung wurden die Hackschnitzel hier bis zu 42 kGy bestrahlt. Der maximale Tensile-Index ist bei einer Schütthöhe von 5 cm erreicht und fällt schon bei einer Schütthöhe von 10 cm signifikant um 14 % ab. Tendenziell fällt der Tensile-Index bei Erhöhung der Schüttdichte weiter ab, dieser Abfall ist jedoch nicht signifikant und müsste mit höheren Schüttdichten weiter untersucht werden.

Der CSB-Index fällt linear mit der Erhöhung der Schütthöhe ab. Es werden weniger Stoffe aus dem Holz herausgelöst. Die Abwasserwerte verbessern sich. Der Grund dafür liegt in der Eindringtiefe des Elektronenstrahls. Wenn die Elektronen nicht im zu behandelten Medium ankommen, können auch keine Veränderungen stattfinden. Homogen bestrahlte Hackschnitzel sind daher von Vorteil, für den Prozess aber nicht zwingend erforderlich. So könnte in der Praxis auch ein Teil unbehandelter Hackschnitzel gemahlen werden, es werden dadurch die positiven Veränderungen durch die Bestrahlung reduziert, es ist aber z. B. ein höherer Durchsatz durch die Bestrahlungsanlage möglich, um kurzfristigen Produktionsengpässen entgegenzuwirken.

Abbildung 5.8 zeigt das Verhalten einiger ausgewählter optischer Eigenschaften. Die Opazität ist auf konstant hohem Niveau und wird nicht messbar durch die Strahlungsintensität beeinflusst. Der Lichtstreuungskoeffizient steigt an, dies ist auf den Entwässerungswiderstand zurückzuführen.

Der Weißgrad steigt um 4 Punkte an. Dieses Ergebnis ist überraschend und bedarf weiterer Untersuchungen, um die Steigerung zu verifizieren.

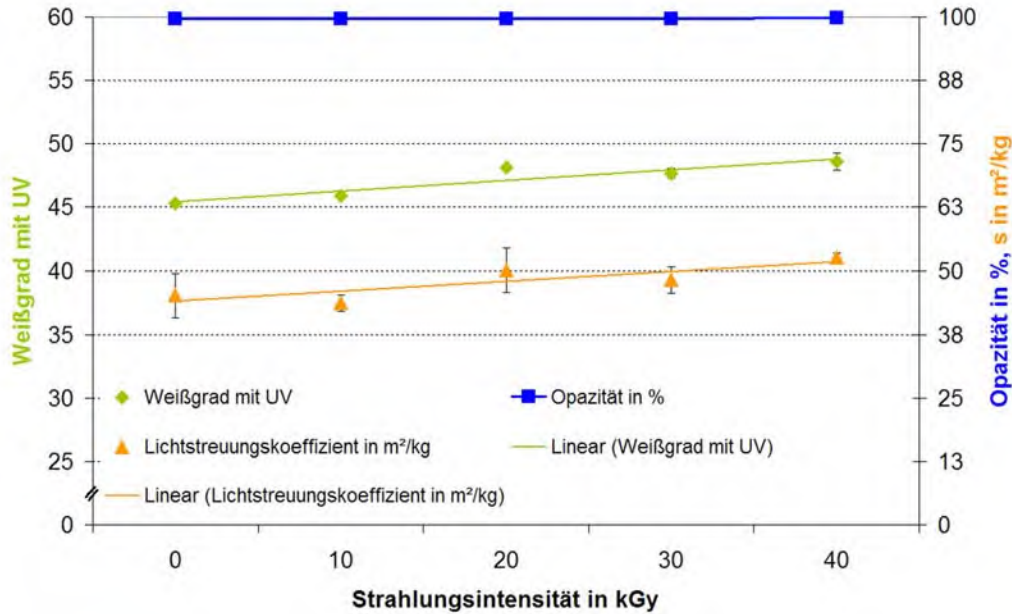


Abbildung 5.8: Optische Eigenschaften bei steigender Strahlungs dosis

In Abbildung 5.9 ist die Rauigkeit nach Parker Print Surf dargestellt. Die Rauigkeit ist von der Imprägnierung und der Strahlungsintensität abhängig. Anhand der Faserverteilungen nach Mc-Nett kann man den Grund für die Veränderung erkennen. Die lange Faserfraktion reduziert sich mit Erhöhung der Strahlungsintensität, Kurzfasern und Feinstoffanteil nehmen zu. Am deutlichsten zeigt sich der Zusammenhang zwischen Kurzfasern und der Rauigkeit. Kurze Fasern bilden bei der Blattbildung eine homogenere Oberfläche, deshalb sinkt die Rauigkeit bei Zunahme des Kurzfasernanteils. Für die nicht imprägnierten Proben, stellt sich eine hohe Rauigkeit im Vergleich zur imprägnierten ein. Bei der Rauigkeit muss der Entwässerungswiderstand bei der Bewertung der Ergebnisse beachtet werden. Dadurch kann man die Senkung der Rauigkeit nicht abschließend auf die Vorbehandlung zurückführen.

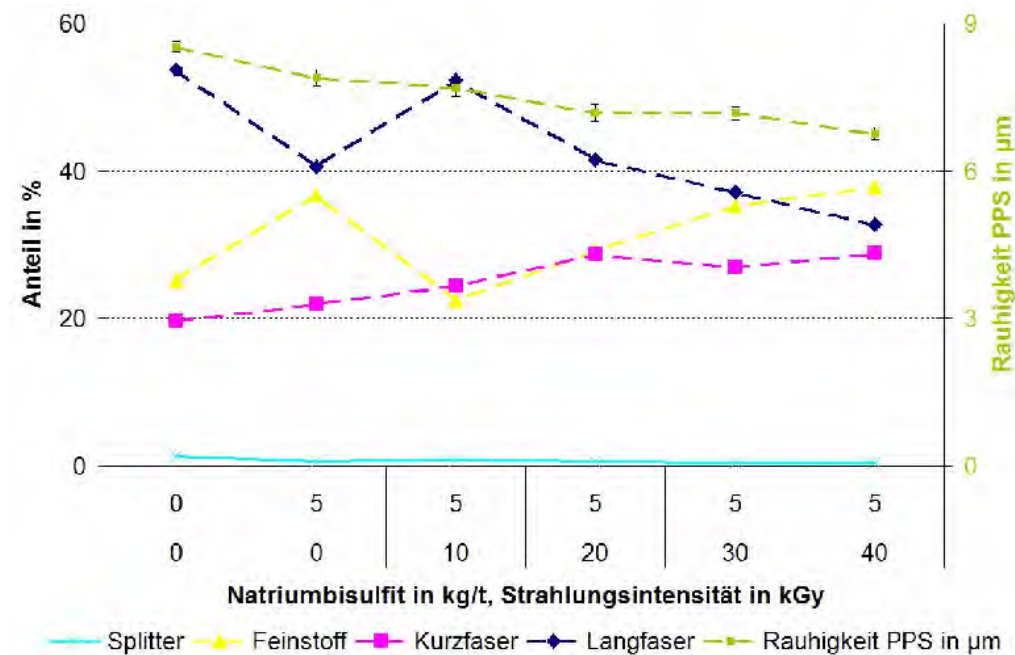


Abbildung 5.9: Rauigkeit (PPS) und Faserverteilung (McNett) in Abhängigkeit von der Hackschnitzelvorbehandlung

Abbildung 5.10 zeigt den Verlauf der gemessenen Energieverbräuche bei unterschiedlichen Entwässerungswerten. Positiv kann man an diesem Verlauf (orange Linie) erkennen, dass der Energieverbrauch bei steigendem Entwässerungswiderstand stagniert oder sogar kleiner wird. Jedoch sind diese Energiewerte nicht vergleichbar, weil steigende Entwässerungswiderstände normalerweise durch eine Intensivierung der Mahlung entstehen. Eine intensivere Mahlung bedeutet einen höheren spezifischen Energiebedarf bei der Herstellung des Rohstoffes. Diese Steigerung wird durch die Elektronenbestrahlung kompensiert, so dass die Werte stagnieren oder sinken. Um die Energieverbräuche vergleichbar zu machen, ist ein konstanter Entwässerungswiderstand nötig. Dieser Zusammenhang kann hier nur berechnet werden. Hierfür wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Entwässerungswiderstand angenommen.

Für jeden Versuchspunkt wurde die benötigte Energiemenge für 1 SR berechnet und dann auf konstante 56 SR (entspricht dem $E(SR)$ bei 5 kg/t Natriumbisulfit und keiner Strahlung) bezogen. Diese Werte werden durch die blaue Kurve dargestellt (Abb. 5.10). Man erkennt, dass die unbehandelte Probe deutlich mehr Energie für die Zerkleinerung benötigt als die bestrahlte. Die Energieeinsparung bei der ausschließlich imprägnierten Probe gegenüber der unbehandelten ist auch erkennbar, fällt jedoch kleiner aus. Dies ist ein Indiz für das größere Energieeinsparpotenzial bei der Bestrahlung. Mit steigender Strahlungsintensität fällt der Energieverbrauch weiter ab. Es stellt sich ein fast linearer Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Strahlungsintensität und der Reduzierung des Energieverbrauchs ein. Dieser klare Zusammenhang war bei den gemessenen Werten mit unterschiedlichen Entwässerungswiderständen nicht zu erkennen.

Wenn die in Abbildung 5.10 interpolierten Werte das wirkliche Verhalten des Energieverbrauchs bei konstantem Entwässerungswiderstand zeigen, kann man von weitaus höheren Einsparpotenzialen bei der Bestrahlung ausgehen (eher 50 % Einsparung anstatt 30 %).

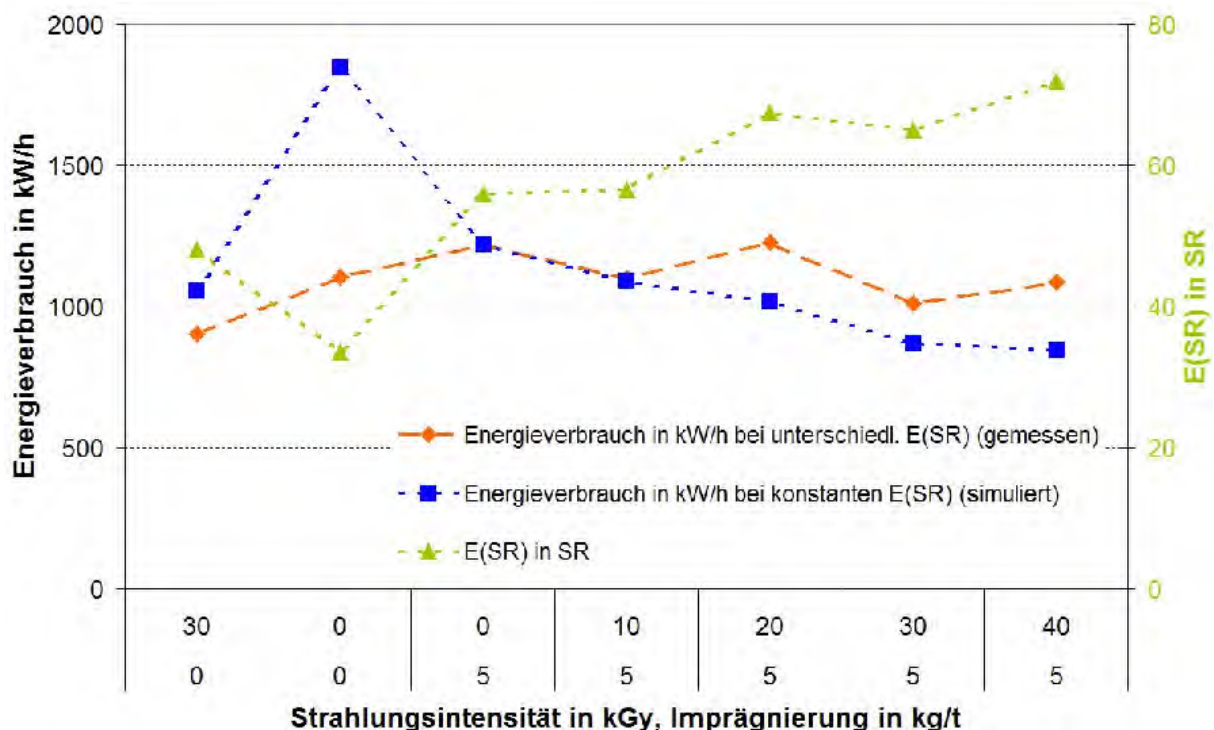


Abbildung 5.10: Vergleich der gemessenen und der berechneten Energiewerte bei konstanten Entwässerungswiderstand

Ein weiterer positiver Effekt wäre das Verhalten der Festigkeitseigenschaften, zumindest die dynamischen Festigkeiten könnten sich bei gleichen Entwässerungswiderständen konstant halten und würden nicht durch die ungewollte Kürzung bei höheren Entwässerungswider-

ständen reduziert. Ein Ansatzpunkt für spätere Arbeiten wäre das Verhalten von Faserstoff bei Erhöhung der Strahlungsintensität bei konstantem Entwässerungswiderstand heraus zu arbeiten.

Um dies zu erreichen, muss die Mahlung angepasst werden. Bei der Erhöhung der Strahlungsintensität muss der spezifische Energiebedarf bei der Zerfaserung gesenkt werden. Dies kann durch Öffnung des Mahlpaltes erreicht werden. In der Praxis könnte der Entwässerungswiderstand durch eine Online SR-Wertregelung konstant gehalten werden.

5.3 Vordämpfung, Extrudierung und veränderte Imprägnierbedingungen (AP 1)

Durch die Extrudierung der Hackschnitzel (bei atmosphärischem Druck) wurde eine Destrukturierung des Holzes erreicht, das zu einer Energieeinsparung in der anschließenden Fertigmahlung im Laborrefiner führte (siehe Abb. 5.11 Versuchspunkte Vierecke). Hierbei betrug die höchste Energiereduzierung für die Hackschnitzelzerfaserung 32 %. Die auftretenden Festigkeitsverluste (Abb. 5.12) aufgrund der verwendeten Doppelschneckenpresse durch Brechen der Fasern (Faserkürzung) konnten nur in geringem Maße durch die Kombination aus Vordämpfung und Imprägnierung der Hackschnitzel abgefangen werden. Die Verschlechterung der Faserstoffeigenschaften ist zugunsten der Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs nicht akzeptabel.

Neben der Extrudervorbehandlung von Hackschnitzeln wurde zusätzlich der Einfluss der Erhöhung der Temperatur im Refinerkocher (130 °C – 150 °C; dreieckige Versuchspunkte) bei der konventionellen zweistufigen Zerfaserung in der TMP-Anlage untersucht. Durch eine sukzessive Erhöhung der Temperatur von 130 °C auf 150 °C ist eine Reduzierung des Energiebedarfs von 30 % eingetreten.

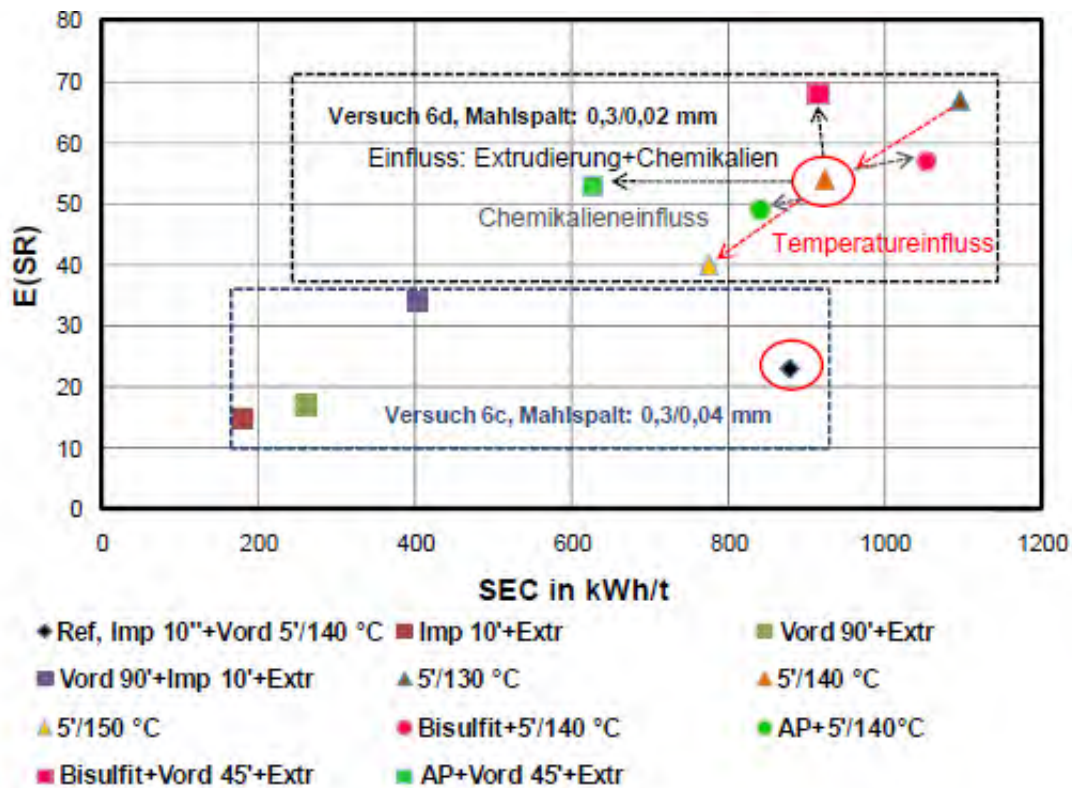


Abbildung 5.11: Spezifischer Energiebedarf und Entwässerungsverhalten der extrudierten Holzstoffe im Vergleich zum konventionellen (C)TMP

Die höhere Temperatur im Refinerkocher führt aber zu einem Weißgradabfall (Abb. 5.14) und zu einem Festigkeitsverlust (Abb. 5.12) trotz höheren Langfaseranteils (Abb. 5.13).

Durch Temperaturerhöhung wird, wie aus Abb. 5.11 ersichtlich, auch das Quellverhalten des Holzstoffes verschlechtert.

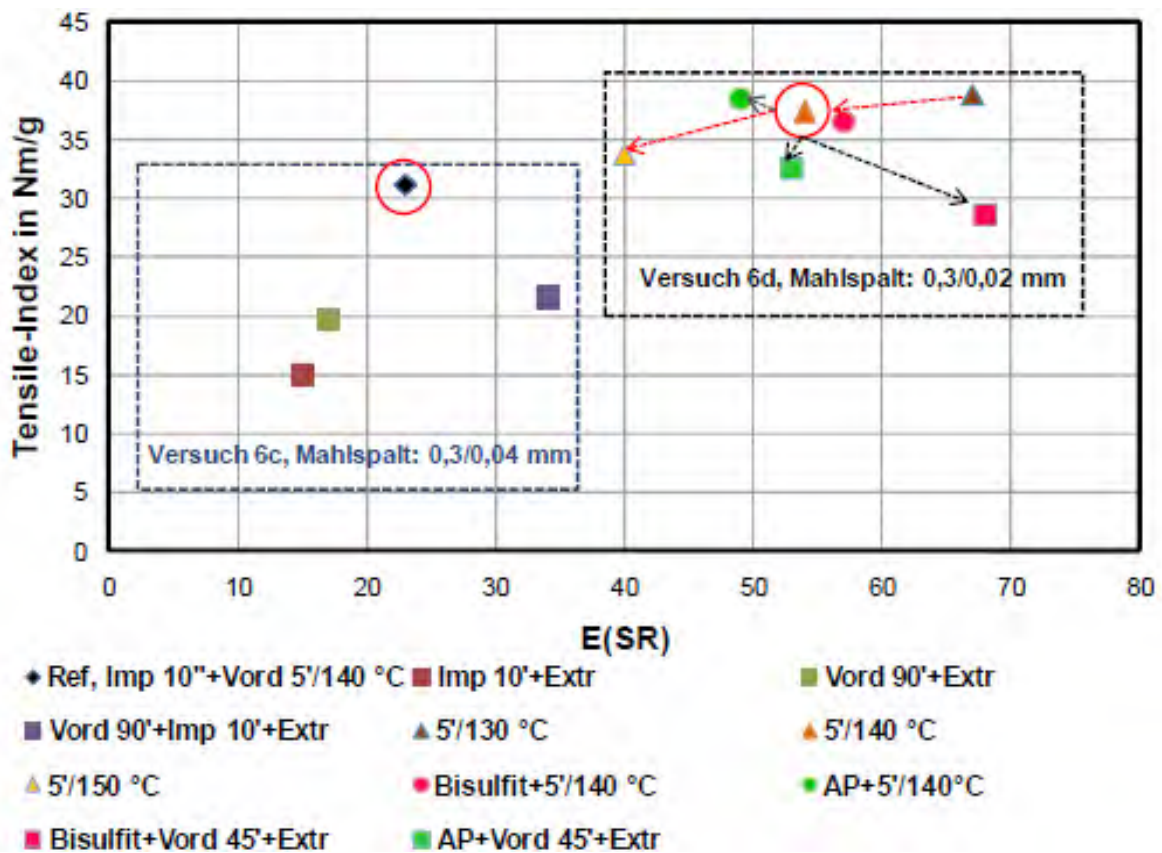


Abbildung 5.12: Spezifischer Energiebedarf und Festigkeitsentwicklung bei den extrudierten im Vergleich zum konventionellen (C)TMP

Der Vergleich der verwendeten Imprägnierlösungen zeigt, dass verbesserte Faserstoffeigenschaften und eine Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs bei der Zerfaserung durch eine Imprägnierung der Holzhackschnitzel mit einer Alkali-Peroxid-Lösung erzielt werden (Abb. 5.11 grüne Punkte) Sowohl bei der Extrudierung mit anschließender einstufiger Mahlung, als auch bei der zweistufigen Zerfaserung ist ein Anstieg der statischen und dynamischen Faserstofffestigkeiten der hergestellten Refinerstoffe aufgrund der alkalischen Vorbehandlung der Hackschnitzel zu beobachten (Abb. 5.12 grüne Punkte). Gegenüber der Na-Bisulfit-Imprägnierung führt die Extrudierung bzw. Zerfaserung von alkalisch behandelten Hackschnitzeln zu verminderten Abwasserbelastungen aufgrund des geringeren Feinstoffgehaltes (Abb. 5.13 und der weniger gelösten organischen Stoffe aus dem Holz. Dennoch sorgt die vergilbende Wirkung der Natronlauge durch den eintretenden Weißgradabfall zu einem negativen Aspekt der Imprägnierung mit Alkali-Peroxid (Abb. 5.14), dem aber durch eine Anpassung der Peroxidzugabemenge entgegengewirkt werden kann.

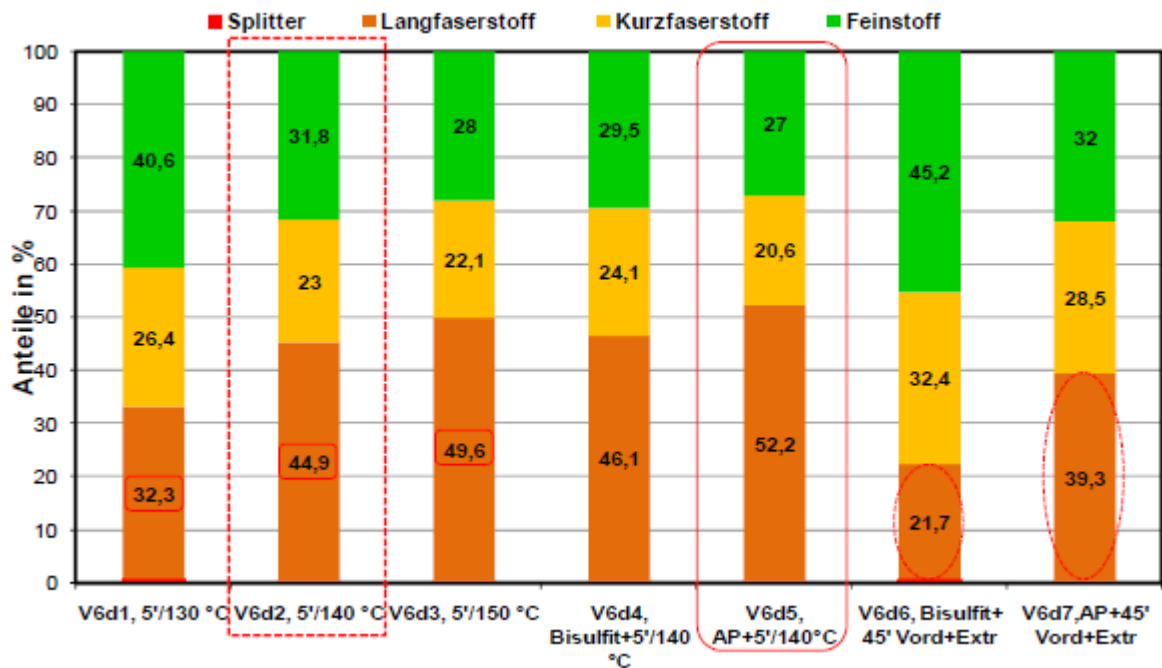


Abbildung 5.13: Mc-Nettfractionierung konventioneller und extrudierter Holzstoffe

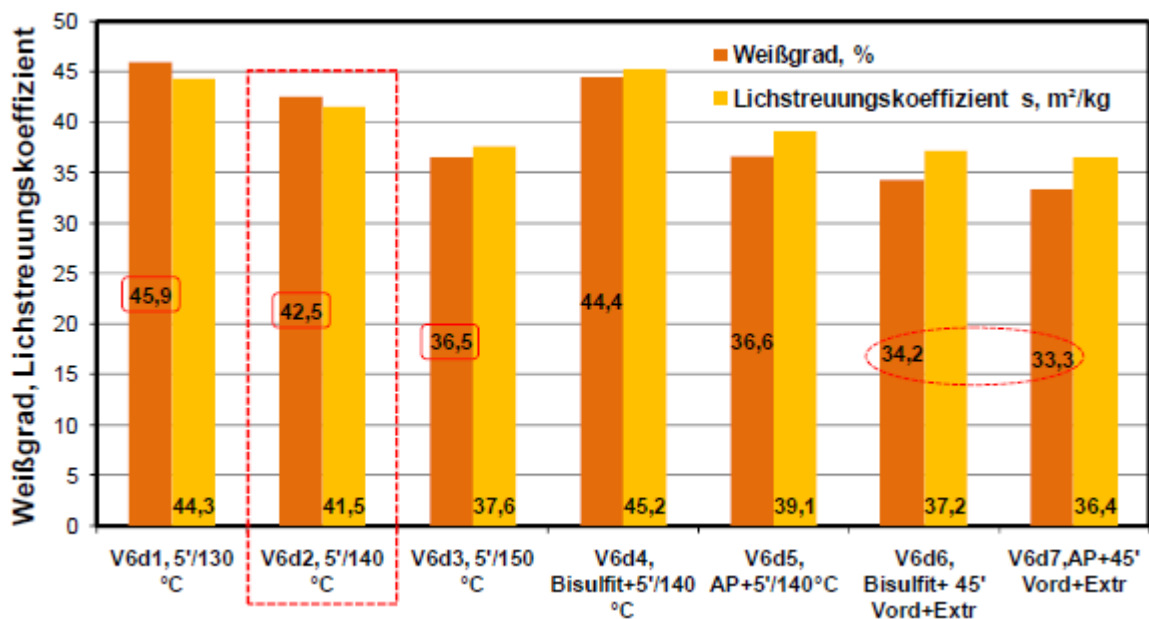


Abbildung 5.14: Entwicklung der optischen Eigenschaften bei extrudierten und konventionellen (C)TMP-Stoffen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Extruderbehandlung unter den vorgegebenen Bedingungen (zu niedrige Temperaturen bei der Extrudierung) die Fasern unkontrolliert brechen und gekürzt werden. Eine Temperaturerhöhung bringt eine schonendere Zerfaserung mit Energieeinsparung aber auch verschlechterten Quelleigenschaften des Holzstoffes. Eine Alkaliimprägnierung bringt die besten Festigkeitseigenschaften. Dabei muss allerdings der Alkalivergilbung entgegengewirkt werden.

5.4 Variation des Mahlspaltes beim TMP-Refiner und der Imprägnierung (AP 2 + 3)

Bei den Versuchen mit Variation des Mahlspaltes wurden die bisherigen Ergebnisse bestätigt. Durch eine Vorbehandlung der Hackschnitzel mit Bisulfit-Imprägnierung und Elektronenbestrahlung sind Energieeinsparungen bei der Zerfaserung der Hackschnitzel von mehr als 30 % möglich.

Durch Imprägnierung und Bestrahlung finden in den Hackschnitzeln strahlen-chemische Reaktionen statt, welche Radikale bilden, die auch zu Polymerkettenkürzungen führen, worauf der reduzierte Energiebedarf bei der Zerfaserung begründet ist. Wie aus Abbildung 5.15 zu sehen ist, sind bei bestrahlten Hackschnitzeln im Vergleich zu unbehandelten bei der Zerfaserung bei gleichen Entwässerungswiderständen ein geringerer Energieaufwand notwendig.

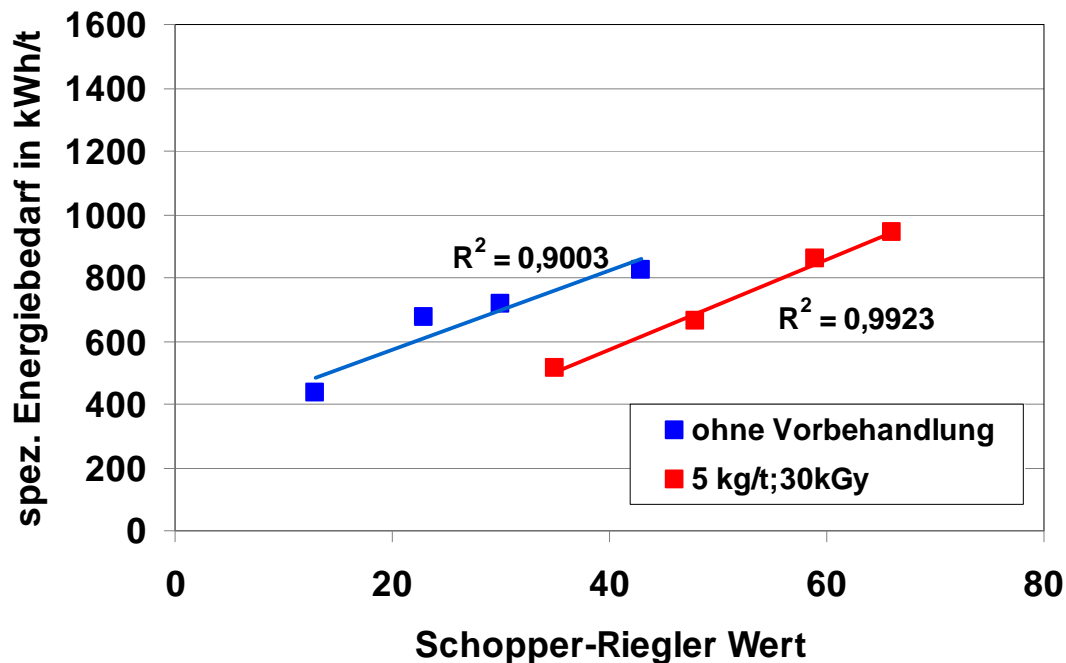


Abbildung 5.15: Spezifischer Energiebedarf in Abhängigkeit vom Entwässerungsverhalten

Bei allen Versuchen mit Vorbehandlung der Holzhackschnitzel wurden an der TMP-Laboranlage die gleichen Prozessparameter (Temperatur, Mahlspalt, Schneckendrehzahl) wie beim unbehandelten Rohstoff eingestellt. Eine sanftere Behandlung während des Zerfaserungsprozesses wirkt auch weniger faserschädigend. Die Faserstoffe mit gleichem Entwässerungswiderstand sind nicht mehr gleich. Der bestrahlte Faserstoff liegt bei gleichen Einstellungen der TMP-Anlage um ca. 20 SR-Werte höher als der unbestrahlte Faserstoff. Für die unbestrahlten Hackschnitzel wäre noch ein 3. Mahldurchgang notwendig gewesen, um SR-Werte größer 60 zu erhalten.

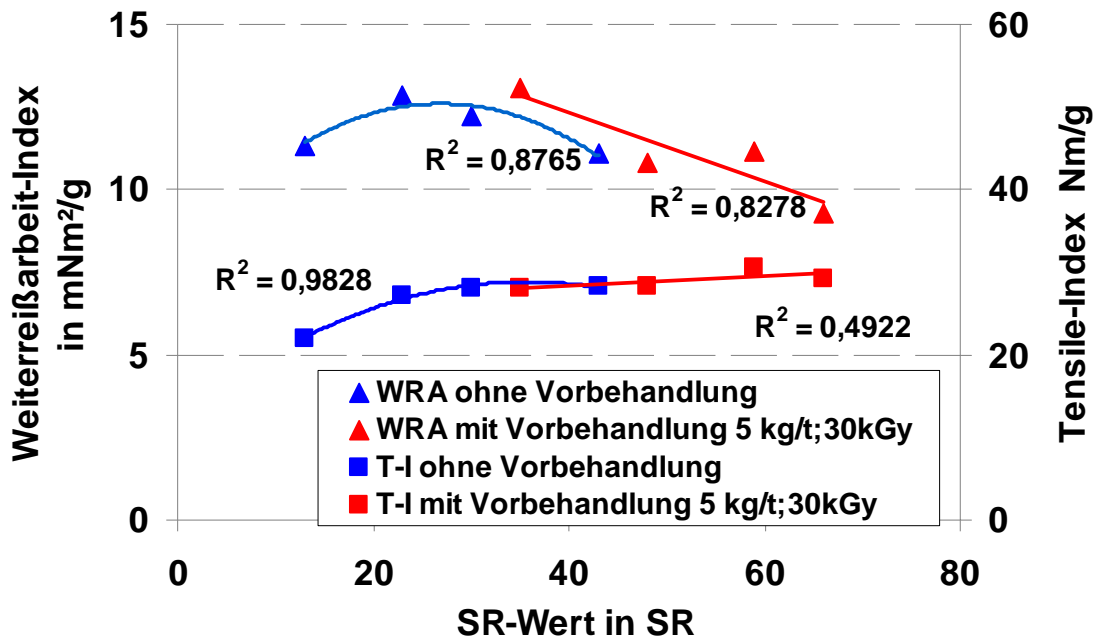


Abbildung 5.16: Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit vom Entwässerungsverhalten des Holzstoffes

Durch die Bestrahlung werden die Trendlinien verschoben und die Festigkeitsoptima schon früher bei niedrigerem Mahlaufwand erreicht (Abb. 5.16). Bei den Untersuchungen lagen der Weiterreiß- und der Tensile-Index der bestrahlten Proben gleich bzw. über den unbehandelten. Während das beim Tensile-Index erwartet wurde, war das beim Weiterreißarbeit-Index überraschend. Der Weiterreißarbeit-Index sinkt mit jeder Mahlbehandlung. Eine Reduzierung des Mahlaufwands führt zu verbesserten Weiterreißfestigkeiten. Durch die Bestrahlung der Hackschnitzel kann der Mahlaufwand reduziert werden.

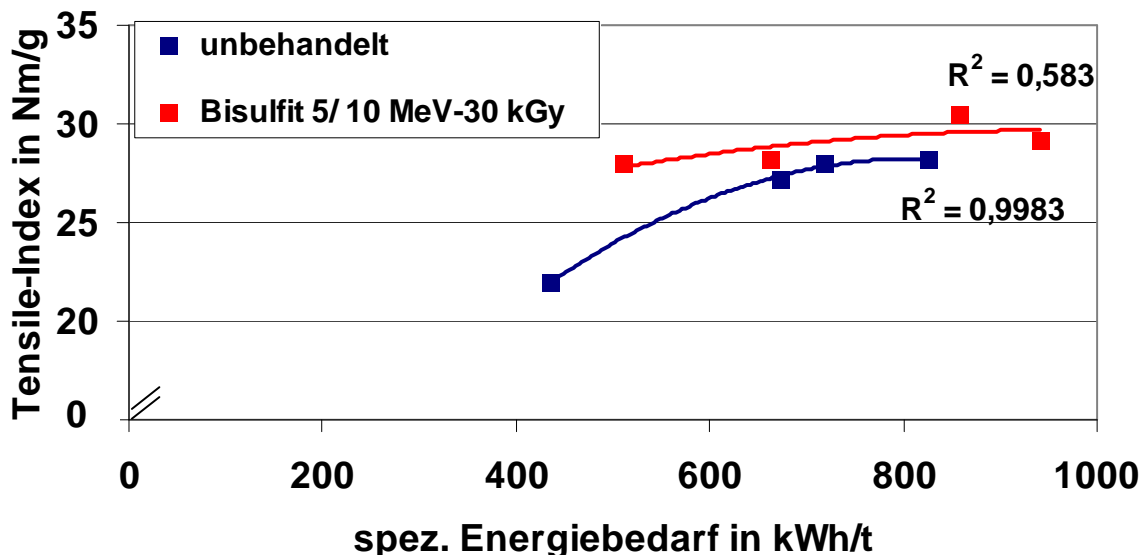


Abbildung 5.17: Tensile-Index in Abhängigkeit des spez. Energiebedarfs

Beim Tensile- oder Bruchkraft-Index der untersuchten Versuchspunkte ist eine Tendenz zu leicht höheren Festigkeiten der bestrahlten Proben bei gleichem Energieeinsatz (inklusive Bestrahlungsenergie) zu erkennen. Aufgrund der Streuung der Messwerte ist dies jedoch noch nicht signifikant (Abb. 5.17).

Der Weiterreißarbeit-Index sinkt mit jeder Mahlbehandlung. Eine Reduzierung des Mahlaufwands führt zu verbesserten Weiterreißfestigkeiten. Durch die Bestrahlung der Hackschnitzel kann der Mahlaufwand reduziert werden (Abb. 5.18).

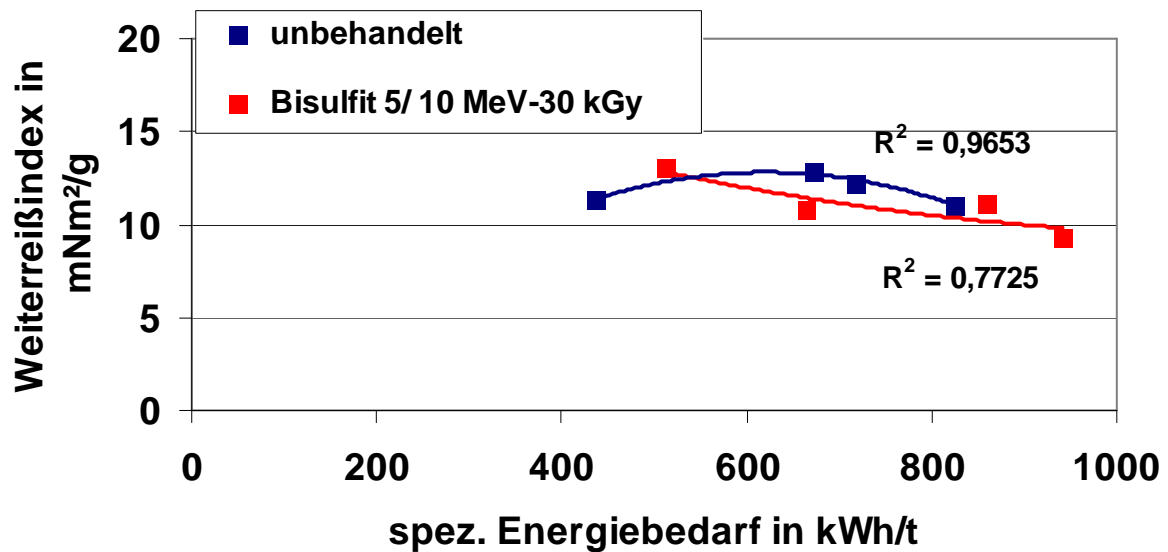


Abbildung 5.18: Weiterreißarbeit-Index in Abhängigkeit des spez. Energiebedarfs

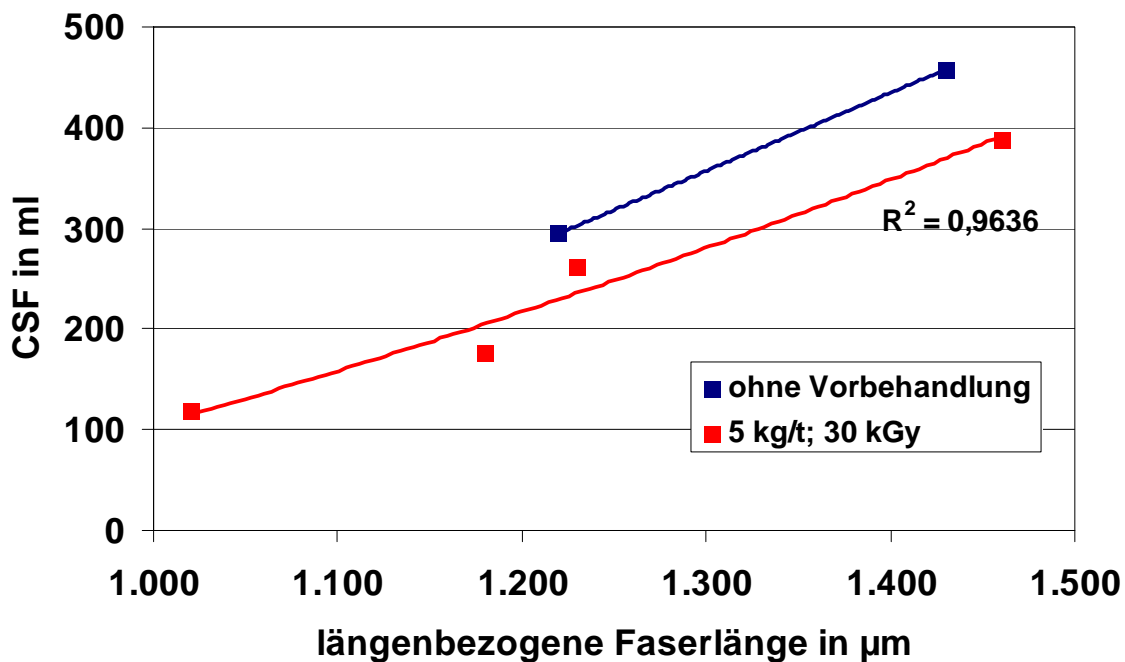


Abbildung 5.19: CSF-Wert in Abhängigkeit von der Faserlänge

Eine mögliche Erklärung dafür ist auch, dass die Zerfaserung der bestrahlten Hackschnitzel größere Faserlängen bei gleichen CSF-Werten erbrachte (Abb. 5.19).

Für die Herstellung von Druckpapieren ist die Beeinflussung der Rauheit durch den Faserstoff interessant. Die Oberfläche der Prüflätter der bestrahlten Proben wies eine geringere Rauheit als die der unbestrahlten Proben auf.

Während die Opazität durch die Bestrahlung praktisch nicht beeinflusst wird, ist eine Erhöhung des Weißgrades der bestrahlten Proben zu erkennen (Abb. 5.20). Der Weißgrad der bestrahlten Hackschnitzel liegt nach der Zerfaserung um 2,5 Weißgrad-Punkte über den des

unbehandelten Faserstoffes. Bei der Bestrahlung der Holzhackschnitzel kommt es innerhalb des Bestrahlungsraumes zu einer Ozonbildung, die vermutlich zu einem zusätzlichen Bleich-effekt führen könnte. Auch die Bisulfit-Imprägnierung, die bei der Bestrahlung den Cellulosekettenabbau verhindern soll, trägt zu einer Weißgradsteigerung bei. Der Bisulfit-Einsatz sollte aber nicht über 3 – 5 kg/t liegen.

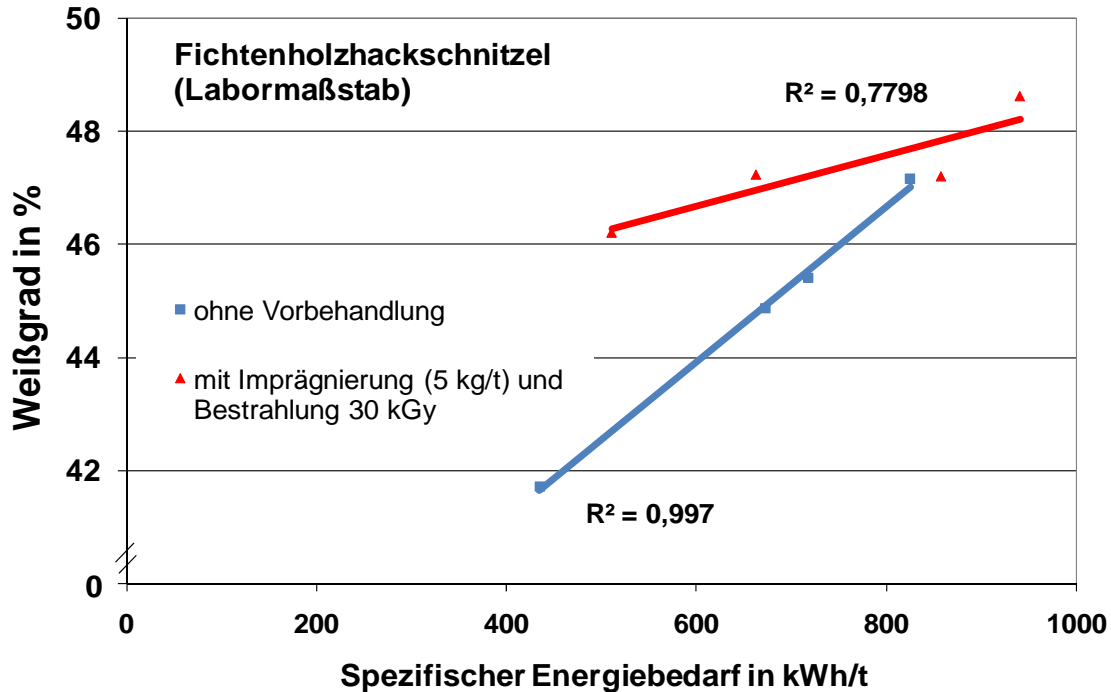


Abbildung 5.20: Weißgrad der Holzstoffe mit und ohne Vorbehandlung

Durch diese Nebeneffekte ist eine Senkung des Aufwandes für die nachfolgende Bleiche zur Erreichung des gleichen Weißgrades zu erwarten. Bereits ohne Bleiche sind deutlich höhere spezifische Streukoeffizienten der bestrahlten Proben zu erkennen.

Und wie aus Abbildung 5.21 ersichtlich, setzt sich der Prozess auch nach einer H_2O_2 -Bleichbehandlung fort. Der TMP mit Vorbehandlung liegt 3 Weißgradpunkte über dem unbehandelten.

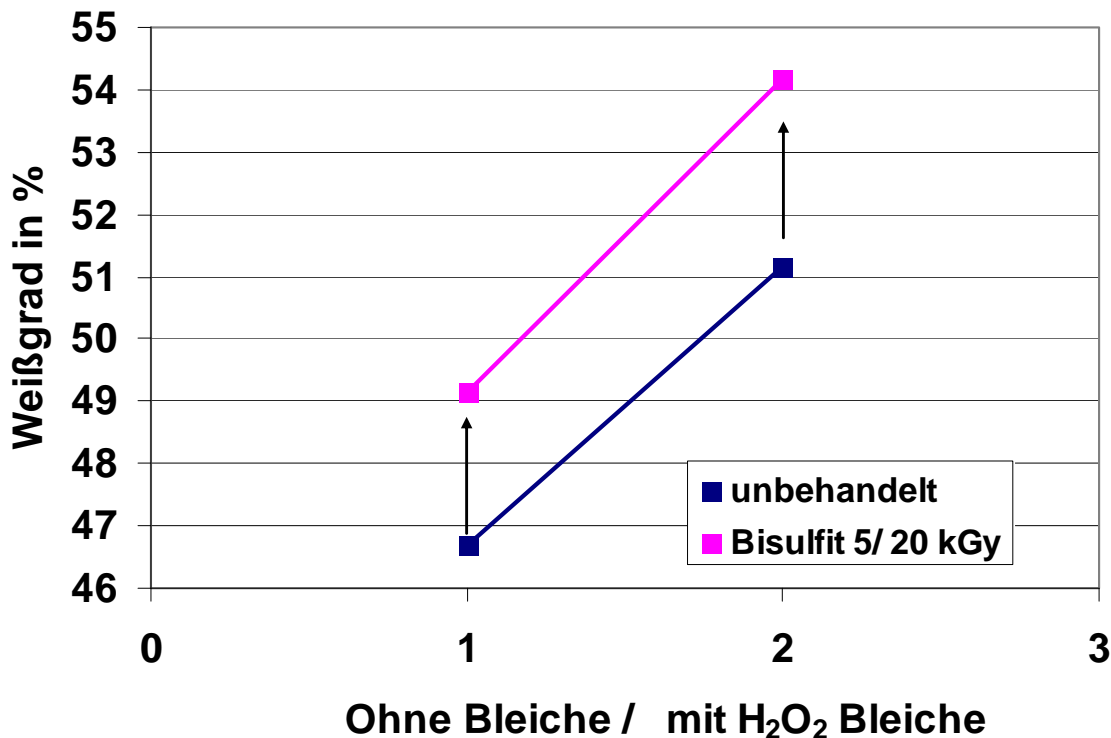


Abbildung 5.21: Weißgrad der Holzstoffe vor und nach der Nachbleiche

Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass das Abwasser durch die Imprägnierung stärker als durch die Bestrahlung belastet wird. Dieses sollte allerdings bei einem Bisulfit-Einsatz von 3–5 kg/t zu keinen Problemen führen.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Papierherstellung

Die Ergebnisse einer Vorbehandlung von Hackschnitzeln für die Holzstoffherstellung in der Papierindustrie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Durch eine Vorbehandlung der Hackschnitzel mit Bisulfit-Imprägnierung und Elektronenbestrahlung sind Energieeinsparungen bei der Zerkleinerung der Hackschnitzel von mehr als 30 % möglich.
- Die Elektronenbestrahlung allein bewirkt eine Kettenkürzung der Cellulose als auch eine Kondensation des Lignins im Holz. Eine Imprägnierung mit Na-Bisulfitlösung soll der Kettenkürzung der Cellulose, die für den Festigkeitsverlust verantwortlich ist, und auch der Ligninkondensation, die sowohl den Weißgrad reduziert als auch die Fibrillierung des Faserstoffes erschwert, entgegenwirken.
- Für die Imprägnierung sind der Holztrockengehalt, die Konzentration der Bisulfitlösung und die Einwirkungszeit die wichtigsten Einflussgrößen. Eine Imprägnierung mit 5 kg Bisulfit/t ortro Holz ist ausreichend. Je feuchter das Holz ist, umso niedriger ist die Flüssigkeitsaufnahme. Das vom Holz aufgenommene Bisulfit diffundiert mit fortschreitender Zeit von außen in das Holz hinein. Deshalb ist zwischen der Imprägnierung und der nachfolgenden Bestrahlung noch eine Verweilzeit von mindestens 1 h notwendig.
- Für die Anwendung der Elektronenbestrahlung in der Papierindustrie sind Elektronenbeschleuniger mit einer Strahlungsleistung von 10 MeV zur Durchdringung von Hackschnitzel-Schütthöhen auf den Förderbändern von 10–15 cm notwendig.
- Mit steigender Strahlungsintensität von 0–40 kGy fällt der spezifische Energiebedarf bei der Zerkleinerung und erhöht sich der Entwässerungswiderstand des Holzstoffes. Bei den Untersuchungen wurde eine Strahlendosis von 30 kGy als Optimum ermittelt.

- Durch Bestrahlung der Hackschnitzel kann die Mahlintensität reduziert werden. Bei vorbehandelten Hackschnitzeln sind im Vergleich zu unbehandelten bei gleichen Entwässerungswiderständen ein geringerer spezifischer Energiebedarf notwendig.
- Eine schonendere Behandlung während des Zerfaserungsprozesses wirkt weniger faserschädigend. Durch die Vorbehandlung der Hackschnitzel werden Trendlinien verschoben und die Festigkeitsoptima schon früher bei niedrigerem Mahlaufwand erreicht.
- Durch Imprägnierung und Bestrahlung werden auch die optischen Eigenschaften verbessert. Der Weißgrad der vorbehandelten Hackschnitzel liegt um 3 Punkte über dem unbehandelten Holzstoff. Dieser positive Effekt setzt sich auch bei der Nachbleiche fort, sodass mit Einsparungen bei Bleichchemikalien gerechnet werden kann.
- Auch eine Verbesserung der Oberflächeneigenschaften ist bei vorbehandelten Holzstoffen zu erwarten.
- Diese Ergebnisse sind im Labormaßstab erbracht worden und bedürfen der industriellen Umsetzung durch einen Großversuch in einer Holzstoff erzeugenden Papierfabrik.

5.6 Abschätzung der Kosten einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen Holzstoffherstellung in der Papierindustrie (AP 6)

Mit Hilfe der Elektronenstrahlbehandlung sind beträchtliche Energieeinsparungen in der Papierindustrie möglich. Dabei darf jedoch nicht unberücksichtigt bleiben, dass mit der Installation eines Elektronenbeschleunigers nicht unbedeutende Investitionen inklusive der Sicherheitstechnik einschließlich umfangreicher Baumaßnahmen notwendig sind.

Für den praktischen Einsatz sind insbesondere aufgrund der notwendigen Investitionen nicht nur die technologischen Erkenntnisse interessant sondern auch eine Abschätzung der damit verbundenen Kosten bzw. Amortisationszeiten von Bedeutung. Da alle folgenden Berechnungen auf den Ergebnissen der Laborversuche beruhen und die Kosten aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht firmenspezifisch dargestellt werden können, sollten die folgenden Berechnungen nur einen Anhaltspunkt geben.

Die Berechnungen erfolgen am Beispiel einer TMP-Linie mit einer Produktionskapazität von 500 t/d und einer jährlichen Betriebszeit von 8.000 h/a. Die weiteren Grundannahmen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Tabelle 5.3). **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Tabelle 5.3: Grundannahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Jährliche Betriebszeit	8.000 h/a
Strompreis	0,06 €/kWh; 0,07 €/kWh; 0,08 €/kWh; 0,09 €/kWh
Produktionsmenge	500 t/d
Rohstoffpreis	190 €/t (lutro)
Kalkulationszinssatz	3,5 %

Auf der Basis der durchgeführten Versuche sind Energieeinsparungen von 20 % bis 50 % möglich. Mit den bisher getroffenen Annahmen ergeben sich daraus folgende Energieeinsparungen (Tabelle 5.4). Bei der Berechnung der Energieeinsparung wurde der gesamte für den Betrieb des Elektronenbeschleunigers notwendige Energiebedarf in der Berechnung berücksichtigt und um diesen Betrag reduziert. Dabei wurde für die TMP-Anlage von einem Energiebedarf von 2000 kWh/t ausgegangen.

Tabelle 5.4: Spezifische Energie- und Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,09 €/kWh

%	kWh/t	€/t	kWh/a	€/a
20	257	23,14	42.857.143	3.857.143
30	457	41,14	76.190.476	6.857.143
40	657	59,14	109.523.810	9.857.143
50	857	77,14	142.857.143	12.857.143

Den Einsparungen stehen Investitionskosten, Betriebskosten, Chemikalienkosten und evtl. Verluste gegenüber. Auf der Basis von /N.N.2; N.N.3/ wurden Investitionskosten von 15 Mio. EUR für zwei Strahler, inklusive Montagekosten und Engineering angenommen, die für den vorgesehenen Durchsatz von 500 t/d notwendig sind. Diese Kosten können bei der Installation eines größeren Strahlers anstatt der zwei Strahler deutlich geringer ausfallen.

In der Tabelle 5.5 sind die zugrunde gelegten jährlichen Kosten zusammengefasst. Die Chemikalienkosten basieren auf einer Dosierung von 5 kg/t. Als worst case wurde zusätzlich mit einem Ausbeuteverlust von 316.667 €/a gerechnet, was einem Prozent Stoffverlust entspricht.

Tabelle 5.5: Zusätzliche jährliche Kosten

Chemikalienkosten für die Imprägnierung	1.083.333 €/a
Personalkosten für den Sicherheitsbeauftragten	70.000 €/a
Wartungskosten	200.000 €/a
Ausbeuteverlust	316.667 €/a
Pflichtversicherung für Strahlenanlagen	5.000 €/a

Positiv für die Kalkulation könnten sich zusätzliche Synergieeffekte durch Bleichkosteneinsparung (Peroxid) in der nachfolgenden Bleiche, Einsparungen, die sich durch einen niedrigeren SR-Wert ergeben und zusätzliche Einsparungen durch Wärmerückgewinnung aus dem Kühlkreislauf des Elektronenbeschleunigers ergeben. Da diese zusätzlichen Einsparungen schlecht abschätzbar sind, wurden sie in die vorliegende Berechnung nicht einbezogen. Als Nutzungsdauer wurde die für alle Anlagen in der Papierindustrie vorgegebene Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Damit ergibt sich ein AfA-Satz von 10 %.

Da die Entwicklung des Elektroenergiepreises nicht absehbar ist, langfristig jedoch mit einer Preissteigerung (Ressourcenverknappung, EEG, etc.) zu rechnen ist, wurden die Berechnungen innerhalb einer Preisspanne von 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh durchgeführt und zusammengefasst. Für die Bewertung der Investition wurden die Rentabilität (ROI), der Kapitalwert, die Amortisationszeit und die Annuität herangezogen /ARENTZEN; WALTHER/.

Für eine Investitionsentscheidung ist die Kenntnis der Amortisationszeit, also des Zeitraumes in dem das eingesetzte Kapital über Erlöse oder Einsparungen wieder in das Unternehmen zurückfließt eine der wichtigsten Entscheidungsgrößen. Die Amortisationszeit wurde hier nach der Durchschnittsmethode ermittelt. Die Amortisationszeit liefert in erster Linie eine Aussage über die Kapitalbindungsdauer und damit die Liquidität des Unternehmens. Allerdings ist eine Entscheidung allein auf Basis dieser Kenngröße fehlerbehaftet, da jedes Unternehmen seine Soll-Amortisationsdauer individuell festlegt und diese Rechnung keine Aussage über die Rentabilität einer Investition zulässt, d. h. auch Investitionen mit sehr hoher Rentabilität werden unter Umständen abgelehnt.

In Abbildung 5.22 sind die Kurvenverläufe der Amortisationszeit für Energiepreise zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh dargestellt. Deutlich wird, dass ab einer Energieeinsparung von ca. 30 % die Investition kaum noch risikobehaftet ist, da in diesem Fall die Amortisationsdauer deutlich unter der angenommenen Nutzungsdauer liegt.

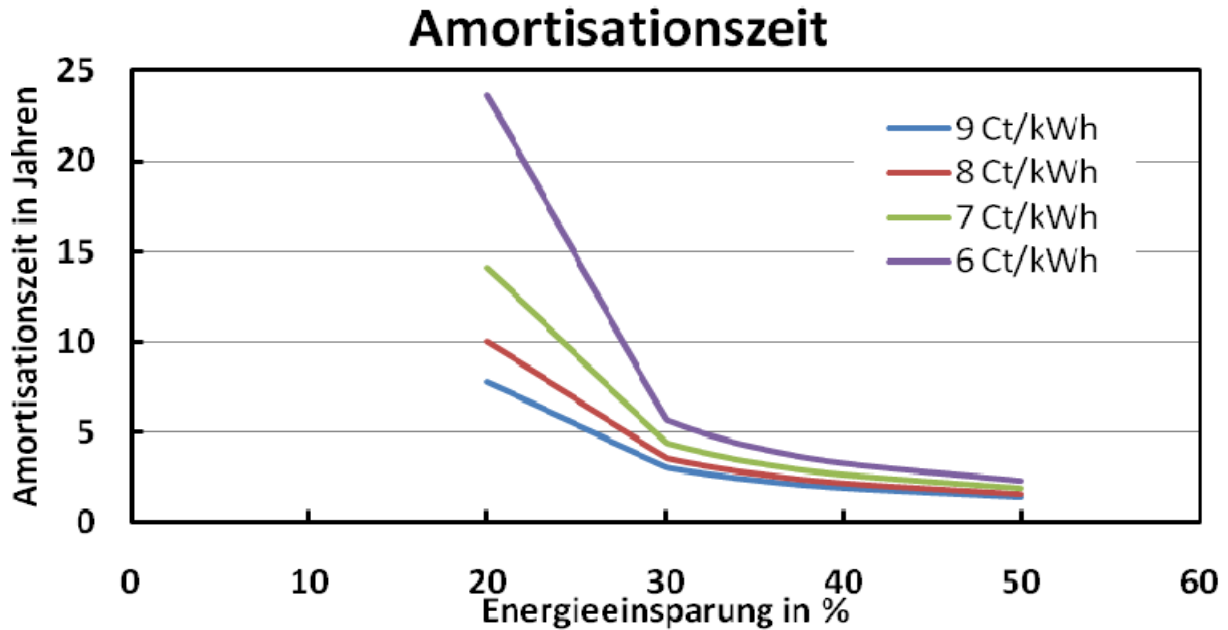


Abbildung 5.22: Amortisationszeit vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh

Da die Amortisationszeit nur in Verbindung mit anderen Investitionsrechenverfahren eingesetzt werden sollte, wurde zunächst ein weiteres statisches Verfahren – die Rentabilitätsrechnung (Return on Investment) angewandt. Dieses Verfahren setzt den durchschnittlichen Jahresgewinn einer Investition ins Verhältnis zum durchschnittlich gebundenen Kapital.

Dieses Verfahren ist in der Praxis zwar weit verbreitet, jedoch werden weder die zeitlichen Unterschiede im Anfall von Kosten, Erlösen und Gewinnen betrachtet, noch bei Alternativen mit unterschiedlichem Kapitaleinsatz die Verzinsung des Differenzbetrages berücksichtigt.

Generell gilt die Entscheidungsregel: Liegt der ROI über der geforderten Mindestverzinsung, so ist die Investition durchzuführen. Betrachtet man die grafische Darstellung in der Abbildung 5.23, so ist auch bei einem niedrigen Energiepreis von 6 Ct/kWh bei einer Energieeinsparung von 30 % eine Rentabilität von knapp 20 % erreicht.

Rentabilität (ROI)

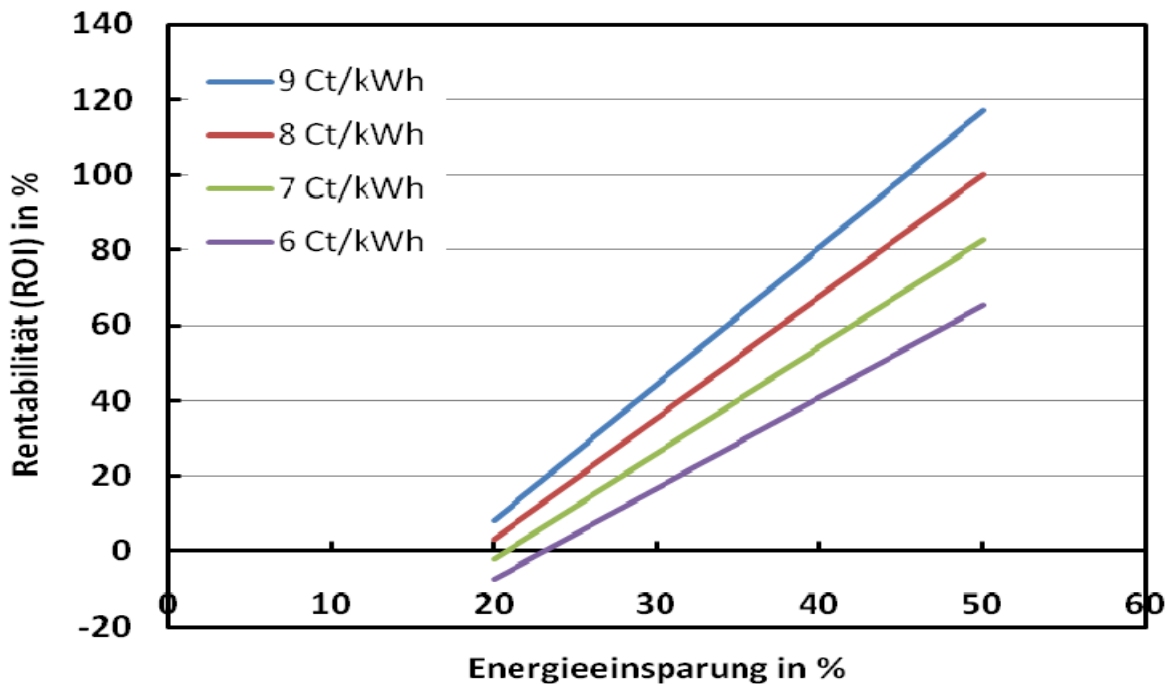


Abbildung 5.23: Rentabilität (ROI) vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh

Um die Nachteile der beiden statischen Investitionsrechenverfahren zu minimieren wurden die dynamischen Verfahren der Annuitätsrechnung und Kapitalwertmethode angewandt.

Die Kapitalwertmethode wurde vereinfacht mit Hilfe des Rentenbarwertfaktors ermittelt, da bei gleicher Produktion und gleichen Kosten die Einsparungen jährlich identisch sind. Tatsächlich schwanken zwar die Energie- und Rohstoffpreise, eine Abschätzung wie sich die Preise jedoch zu welchem Zeitpunkt in den nächsten 10 Jahren entwickeln werden, ist nicht möglich, weshalb diese Vereinfachung vorgenommen und konstante Preise angenommen wurden.

Die Kapitalwert wird durch Abzinsung aller Ein- und Auszahlungen auf den Bezugszeitpunkt $t=0$ ermittelt. Der zugrunde liegende Kalkulationszinssatz entspricht der gewünschten Mindestverzinsung des Kapitals und gleichzeitig der Zinssatz zu dem der Investor Kapital beschaffen kann. Ist der Kapitalwert $=0$, so entspricht die Verzinsung der Investition dem Kalkulationszinsfuß.

Die Entscheidungsregel besagt, dass bei einem positiven Kapitalwert die Investitionsentscheidung durchzuführen ist, dann ist die Verzinsung der Investition höher als die Kapitalanlage, es wird ein Zahlungsüberschuss erwirtschaftet. Bereits bei 25 % Energieeinsparung wird bei allen betrachteten Energiepreisen ein solcher Zahlungsüberschuss erwirtschaftet.

Kritisch ist hier die Annahme des vollkommenen Kapitalmarktes und des einheitlichen Kalkulationszinsfußes zu sehen, dieser ist nicht exakt bestimmbar, sondern wird geschätzt. Aufgrund der momentan niedrigen Zinssätze wurde lediglich 3,5 % als Kalkulationszinsfuß angesetzt.

Aus der Kapitalwertmethode lässt sich die Annuitätenmethode ableiten, die grundsätzlich die gleichen Kritikpunkte aufweist. Häufig wird jedoch in jährlichen Zahlungen gedacht, dem kommt die Annuitätenmethode entgegen, indem sie den Kapitalwert in äquivalente, äquidistante und uniforme jährliche Zahlungen über die Nutzungsdauer umrechnet.

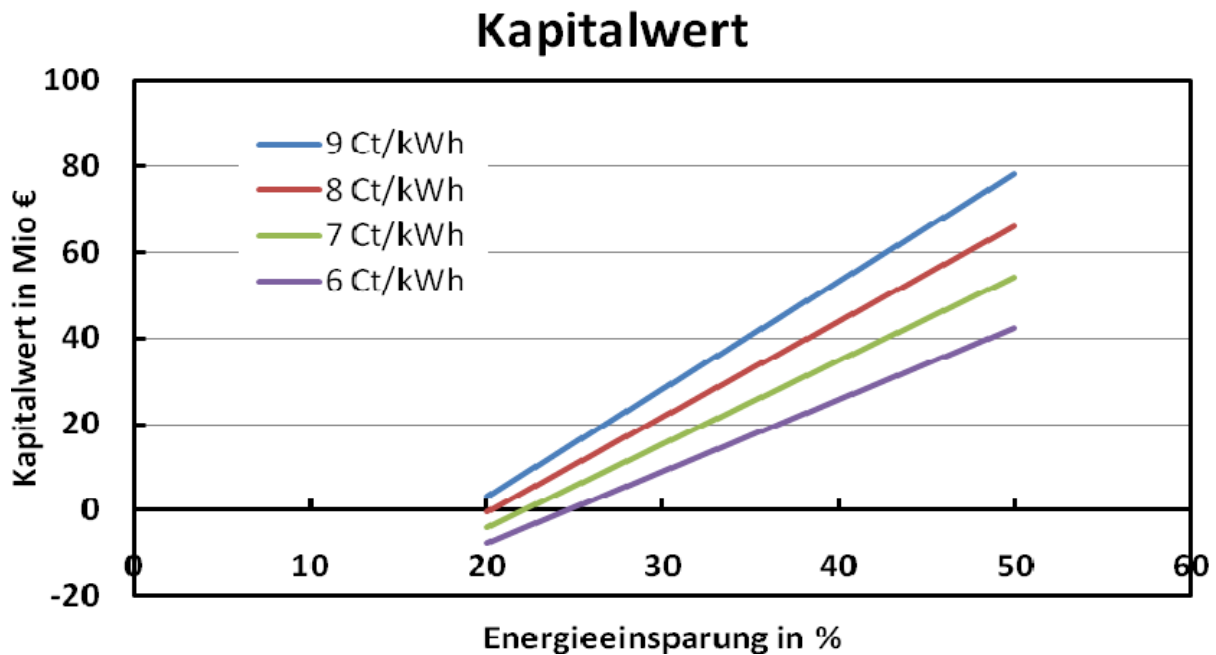


Abbildung 5.24: Kapitalwert vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh

Während der Kapitalwert den Totalerfolg von Investitionen darstellt, zeigt die Annuitätenmethode den Periodenerfolg. Eine Investition ist daher durchzuführen, wenn die Annuität größer 0 ist. Dies ist wie aus Abb.5.25 ersichtlich auch beim geringsten angenommenen Energiepreis ab 25 % Energieeinsparung der Fall.

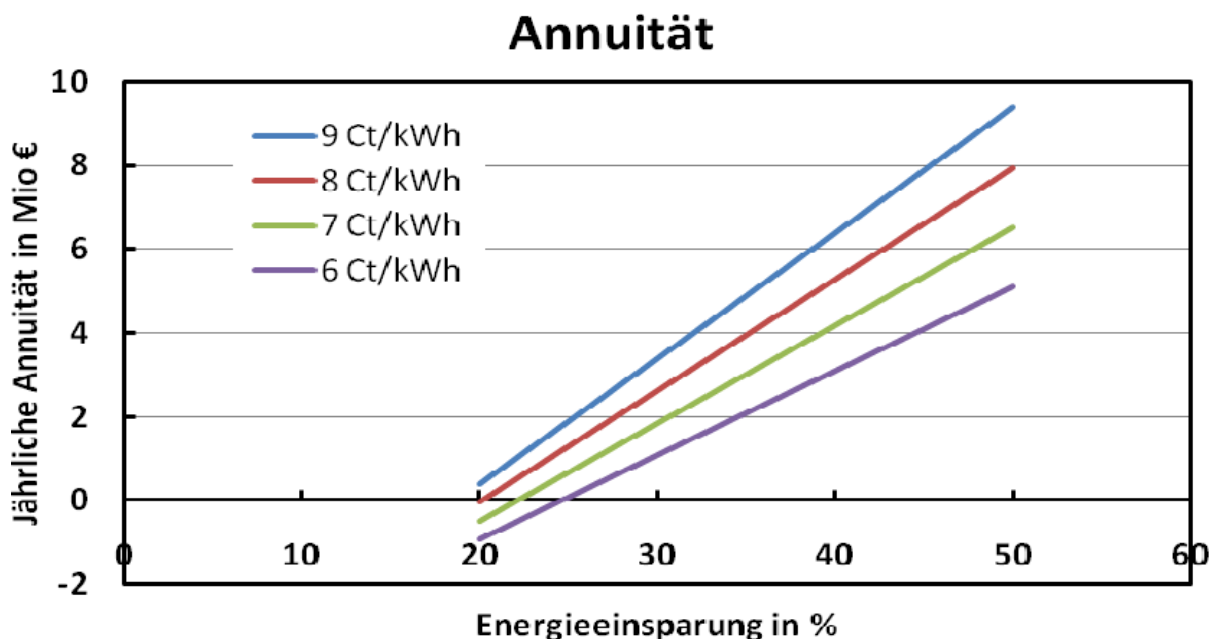


Abbildung 5.25: Jährliche Annuität vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 6 Ct/kWh und 9 Ct/kWh

Fazit: Unabhängig von der Energiepreisentwicklung ist ab einer Energieeinsparung von ca. 25 % eine Investition in das Verfahren vorteilhaft. Im Labormaßstab konnten Energieeinsparungen bis zu 50 % realisiert werden. Sollten sich die Ergebnisse im Großversuch bestätigen, so ist eine Investitionsentscheidung auf jeden Fall konkret zu prüfen.

5.7 Einfluss der Bestrahlung auf die Zerfaserung von Holzstoffen (1. Mahlstufe) und auf die Eigenschaften der Laborblätter und der Faserwerkstoffe (AP 5)

Um dickere Hackschnitzelschicht von ca.10 cm bestrahlen zu können, musste ein stärkerer Elektronenbeschleuniger eingesetzt werden. Für die weiteren Untersuchungen wurde daher ein 10 MeV Elektronenbeschleuniger der Firma Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH, Radeberg eingesetzt. Die Bewertung der Energieaufnahme während der Mahlung bestätigt die obengenannte Vermutung. Aus der Abbildung 5.26 geht es hervor, dass die Energieeinsparung mit steigender Strahlungsenergie bei gleicher Energiedosis zunimmt.

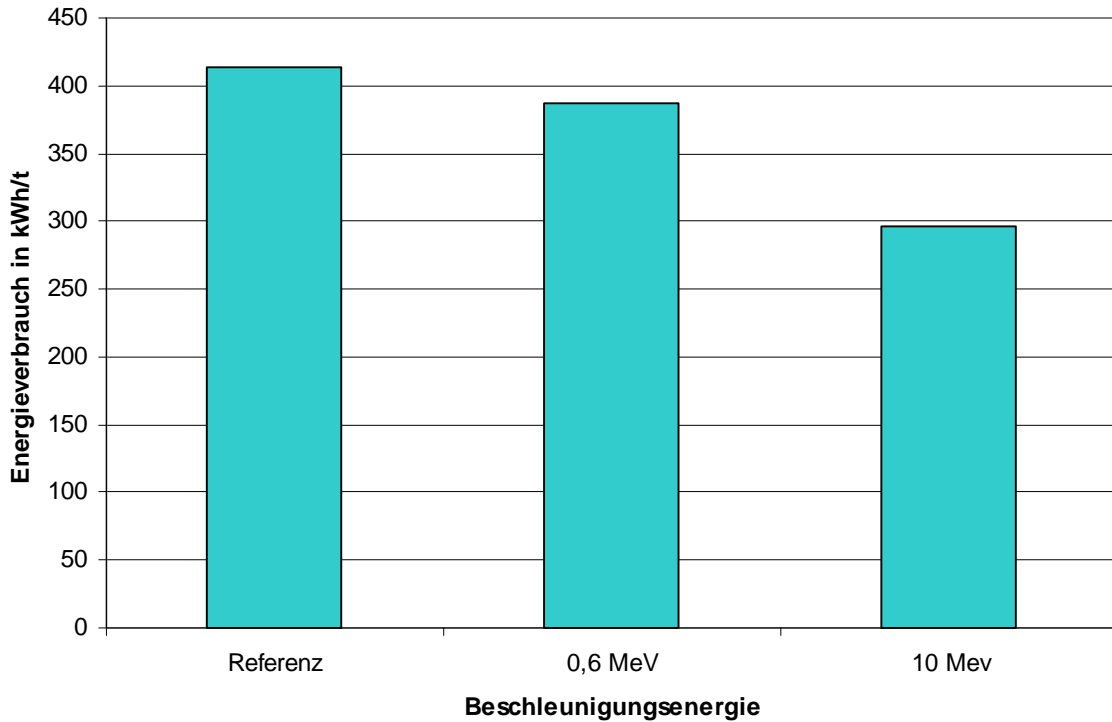


Abbildung 5.26: Mahlenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie (Energie-dosis: 30 kGy; Mahlbedingung: 140°C; 0,25 mm)

Ob eine höhere Beschleunigungsenergie auf die Eigenschaften von den Faserstoffen und Werkstoffen beeinflusst, wurde in nachfolgenden Untersuchungen analysiert. Dabei wurden Hackschnitzeln mit Elektronenbeschleunigern unterschiedlicher Beschleunigungsenergien (0,6 MeV und 10 MeV) bei gleicher Energiedosis (30 kGy) bestrahlt und unter gleichen Bedingungen (140 °C; 0,20 mm MS) zerfasert und zu Werkstoffen weiterverarbeitet.

Die Ergebnisse (Tabelle 5.6) zeigen, dass weder die Faserstoffe noch die Faserwerkstoffe entscheidend von der Strahlungsenergie beeinflusst werden.

Tabelle 5.6: Eigenschaften der Faserstoffe und MDF in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie

	Beschleunigungsenergie	
	0,6 MeV	10 MeV
Entwässerungswiderstand der Faserstoffe (°SR)	13	13
Reißlänge der Laborblätter (m)	1120	1135
Rohdichte der MDF (kg/m ³)	756	746
Biegefestigkeit der MDF (%)	47,6	46,8
Dickenquellung der MDF (%)	14,7	14,5

Die Kombination von Hackschnitzelbestrahlung und TMP-Herstellung führt allerdings zu interessanten Effekten: (Abbildungen 5.27 bis 5.29).

- Eine Erhöhung des Mahlspaltes bei der Mahlung führt bei MDF zu geringeren Biegefestigkeiten. Bei einer Hackschnitzelbestrahlung tritt das Gegenteil ein, d. h. es wird eine Verbesserung gegenüber der Referenzvariante erreicht. Bei höheren Mahltemperaturen (155 °C) beträgt diese Verbesserung ca. 12 % (Abbildung 5.27).
- Die Querkzugfestigkeit verbessert sich mit steigender Mahltemperatur, der Mahlspalt hat hier keinen Einfluss. Eine Hackschnitzelbestrahlung führt bei allen Varianten zu einer Verbesserung von ca. 20 % (Abbildung 5.28).
- Die Werte der Dickenquellung und Wasseraufnahme der MDF verringern sich mit zunehmender Mahltemperatur und Mahlspalt leicht. Eine Hackschnitzelbestrahlung führt zu einer sehr viel deutlicheren Verringerung, insbesondere bei der Wasseraufnahme (Abbildung 5.29).

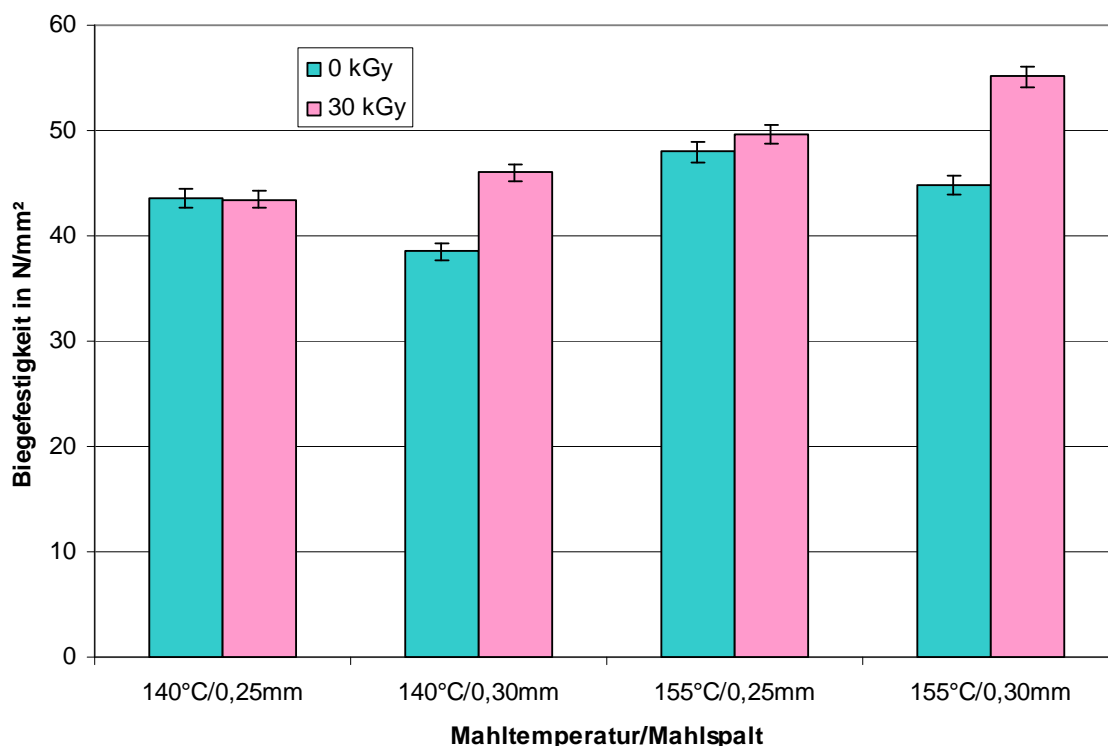


Abbildung 5.27: Biegefestigkeit der MDF (750 kg/m³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen

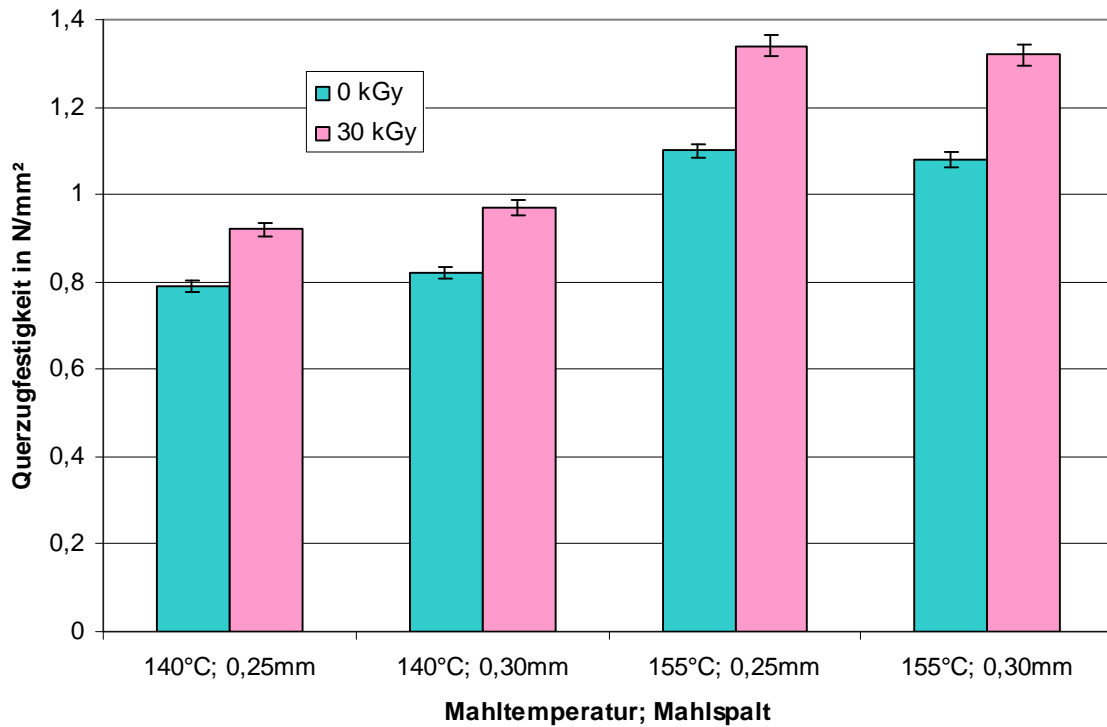


Abbildung 5.28: Querzugfestigkeit der MDF (750 kg/m³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen

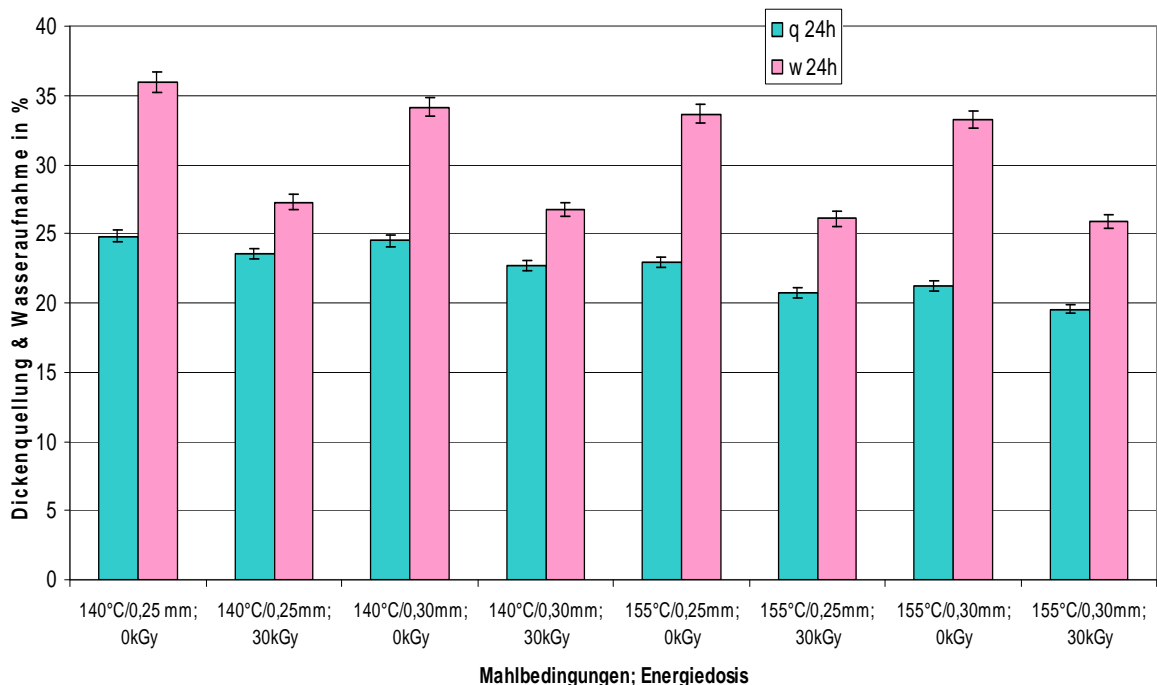


Abbildung 5.29: Dickenquellung und Wasseraufnahme der MDF (750 kg/m³) in Abhängigkeit von den Mahlbedingungen

Bei einer gemeinsamen Betrachtung des Mahlenergieverbrauches und der Werkstoffeigenschaften, wird deutlich, dass die Hackschnitzelbestrahlung positive Effekte einer Erhöhung von Mahlspalt und Mahltemperatur auf Mahlenergieverbrauch und Platteneigenschaften ver-

stärken und negative Einflüsse einer Mahlspalterhöhung auf die Biegefestigkeit kompensiert werden. Eine Kombination der genannten Maßnahmen führt somit zu Synergieeffekten, die eine Mahlenergieeinsparung von bis zu 45 % bei einer Verbesserung der Biegefestigkeit um 10 %, der Querszugfestigkeit und Dickenquellung um bis zu 20 % und der Wasseraufnahme bis zu 25 % ergibt (Mahltemperatur 155 °C, Mahlspalterhöhung von 0,25 auf 0,3 mm). Da bereits die Werkstoffkennwerte der Referenzplatten die Anforderungen der DIN EN 622 T5 erfüllen, ergeben sich Potenziale für eine weitere Verringerung des Mahlenergieverbrauches entweder durch eine weitere Vergrößerung des Mahlspaltes oder durch Einsparung von Material bei einer Verringerung der Plattendichte oder der Bindemitteldosierung. Des Weiteren ist eine Verringerung von Strahlendosis und/oder Bestrahlungsleistung und damit der Investitions- und Betriebskosten möglich.

5.8 Ergebnisse der Upscalingversuche bei der Mahlung am IHD - Vergleich zwischen Batch- und kontinuierlicher Mahlung (AP 6)

Die positiven Ergebnisse der Hackschnitzelbestrahlung auf den Mahlenergieverbrauch und auf die Eigenschaften der daraus hergestellten Faserwerkstoffe wurden in vergrößertem Maßstab untersucht. Mit der TMP-Anlage im Technikum der Technischen Universität Dresden kann die Mahlung nur in Batch-Betrieb und bei niedrigeren als in der Holzwerkstoffindustrie üblichen Temperaturen (höchstens 160 °C) zerkleinert werden. Die TMP-Anlage am Institut für Holztechnologie Dresden IHD kann im quasi kontinuierlichen Betrieb und bei höheren Temperaturen (ähnlich wie in der Industrie) arbeiten.

Es wurden zweimal drei Versuche durchgeführt. Pro Versuch wurden ca. 40 kg atro Hackschnitzel zerkleinert.

Zuerst wurden Fichten-Hackschnitzel mit einem Elektronenbeschleuniger (10 MeV) in Radeberg mit 10 und 30 kGy bestrahlt. Das unbestrahlte Referenzmaterial und die bestrahlten Hackschnitzel wurden sowohl am IHD als auch am Technikum in Hainsberg zerkleinert (siehe Abb. 4.10 und 4.11)

Es wurde festgestellt, dass die Faserstoffqualität nur gering von der Betriebsweise der TMP-Anlage abhängt. So zeigte der Vergleich von Faserstoffen, die an beiden Anlagen erzeugt wurden, ähnliche Siebkennlinien (Abbildung 5.30). Auch die Anteile der Faserfeinstoffe liegen auf einem ähnlichen Niveau. Das Entwässerungsverhalten ist bei den Faserstoffen ähnlich.

Die Energiedosis übt aber gewissen Einfluss auf die Faserstoffqualität aus. So steigt die Feinfaseranteil mit steigender Dosis an. Obwohl die Faserstoffe Unterschiede in den Dimensionen aufweisen, liegt ihr Entwässerungswiderstand aber sehr nah beieinander (Abbildung 5.31).

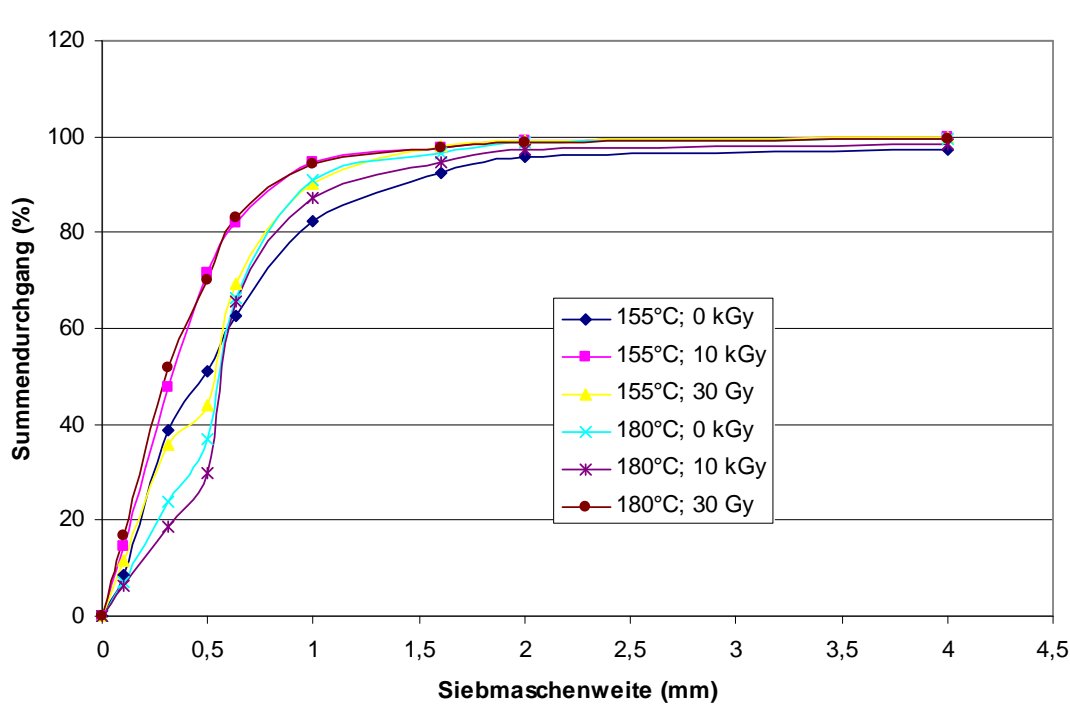


Abbildung 5.30: Siebkennlinien der hergestellten Faserstoffe in Abhängigkeit von der Mahltemperatur und Energiedosis

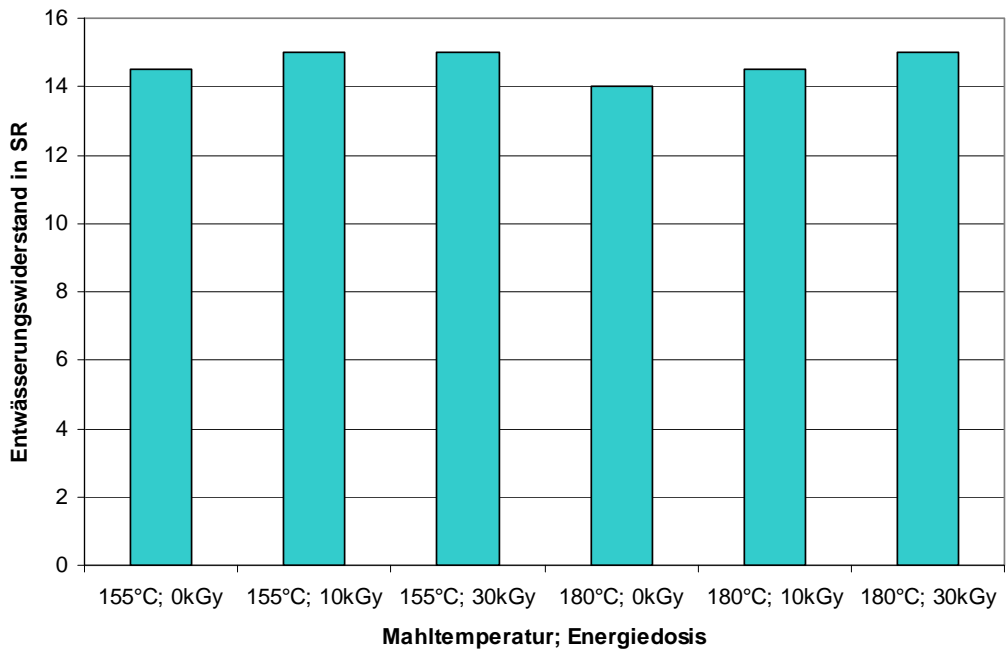


Abbildung 5.31: Entwässerungsverhalten der hergestellten Faserstoffe in Abhängigkeit von der Mahltemperatur und Energiedosis

Die folgend Abbildung zeigt, dass eine Energieeinsparung während der Mahlung nur bei niedrigerer Mahltemperatur (155°C) erreicht wird. Bei höherer Mahltemperatur (180 °C) ist ein Einsparungseffekt nicht nachweisbar (Abbildungen 5.32 und 5.33). Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich darin, dass thermische Veränderungen des Mittellamellenlignins die Auswirkung der Bestrahlung überlagern, so dass die Bestrahlung keine Wirkung mehr hinsichtlich der Energieeinsparung zeigt. Bei einer Energiedosis von 30 kGy ist die Mahlenergie

bei 155 °C und 180 °C nahezu identisch. Die Hackschnitzelbestrahlung zeigt zwar kaum Einfluss auf den Energieverbrauch, wenn die Mahltemperaturen sehr hoch sind (180 °C). Sie hat aber ähnliche positive Wirkungen auf die Eigenschaften der daraus hergestellten Faserwerkstoffe, wie bei der Mahlung mit niedrigerer Mahltemperatur (155 °C).

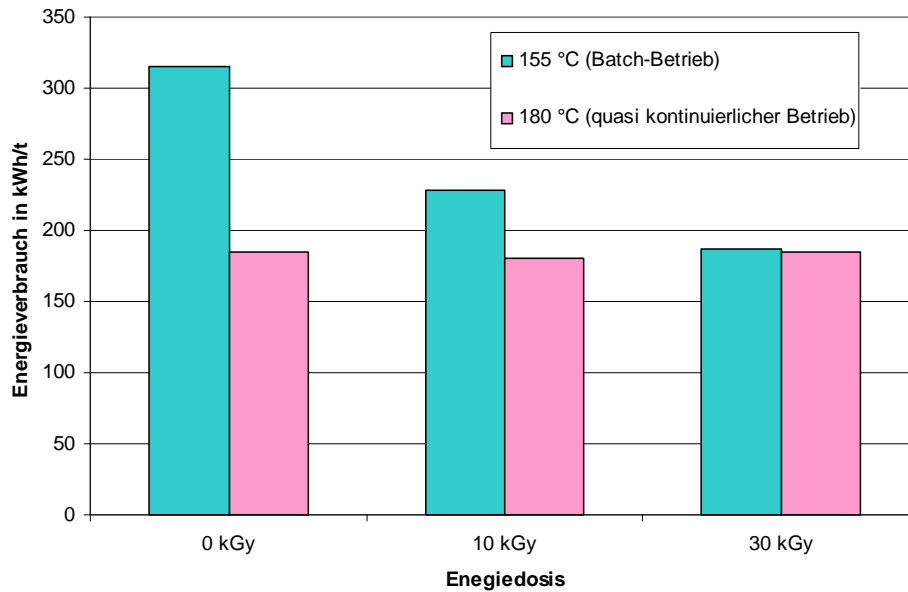


Abbildung 5.32: Mahlenergie in Abhängigkeit von Energiedosis, Mahltemperatur sowie Mahlverfahren

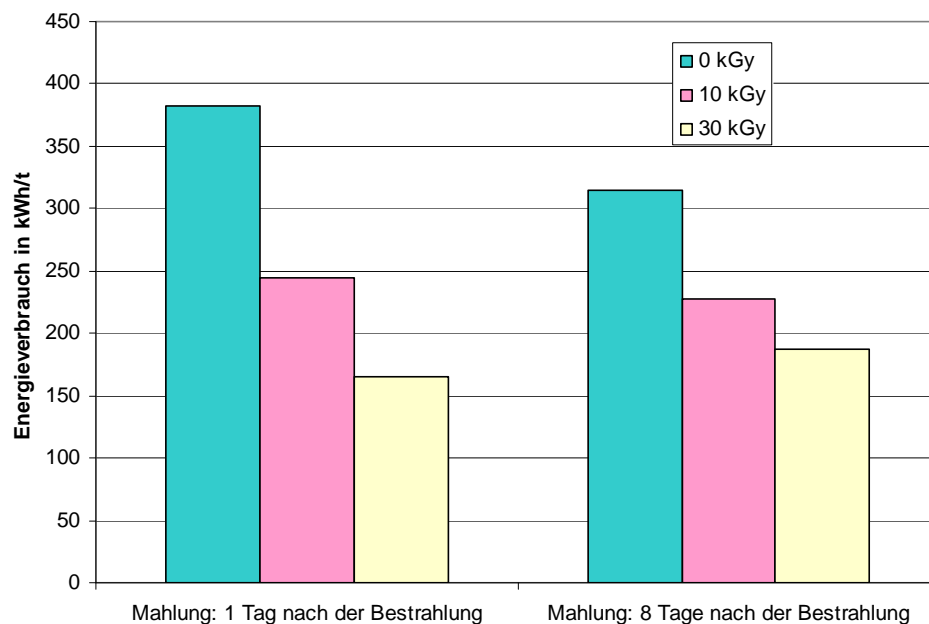


Abbildung 5.33: Mahlenergie in Abhängigkeit von der Energiedosis und Lagerungsdauer (Mahlung im Batch-Betrieb, 155 °C)

Der Einspareffekt der Hackschnitzelbestrahlung bleibt auch nach einer Zwischenlagerung von 5 bis 8 Tagen erhalten, d. h. die Bestrahlung kann auch räumlich und zeitlich getrennt von der Mahlung erfolgen (Abbildungen 5.34).

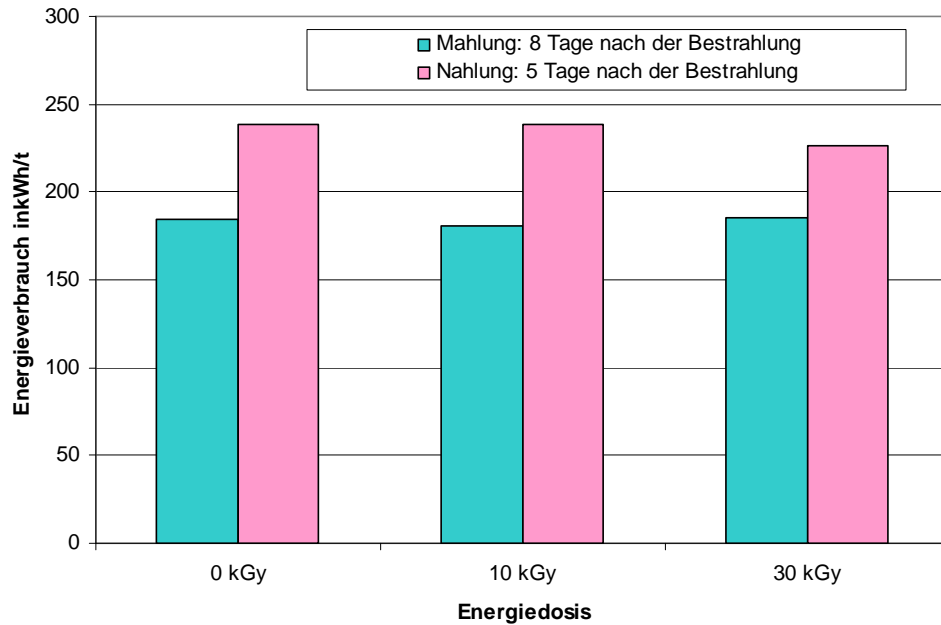


Abbildung 5.34: Mahlenergie in Abhängigkeit von der Energiedosis und Lagerungsdauer (Mahlung bei 180 °C)

Die Abbildungen 5.35 bis 5.36 zeigen, dass die Biegefestigkeit von Dämmplatten und MDF aus Faserstoff der bei 180 °C gemahlen wurde, durch eine Hackschnitzelbestrahlung verbessert wird. Mit abnehmender Werkstoffdichte nimmt dieser Effekt zu. Es wird deutlich, dass die Energiedosis von 10 kGy die beste Wirkungen zeigt (Abbildungen 5.35 und 5.36).

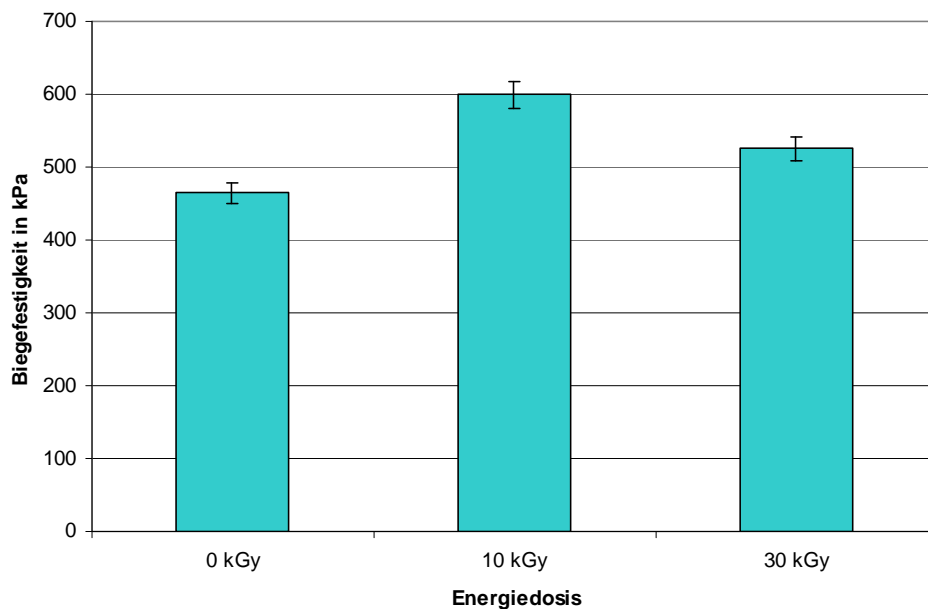


Abbildung 5.35: Biegefestigkeit von Dämmplatten (Dichte: 160 kg/m³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung 180 °C)

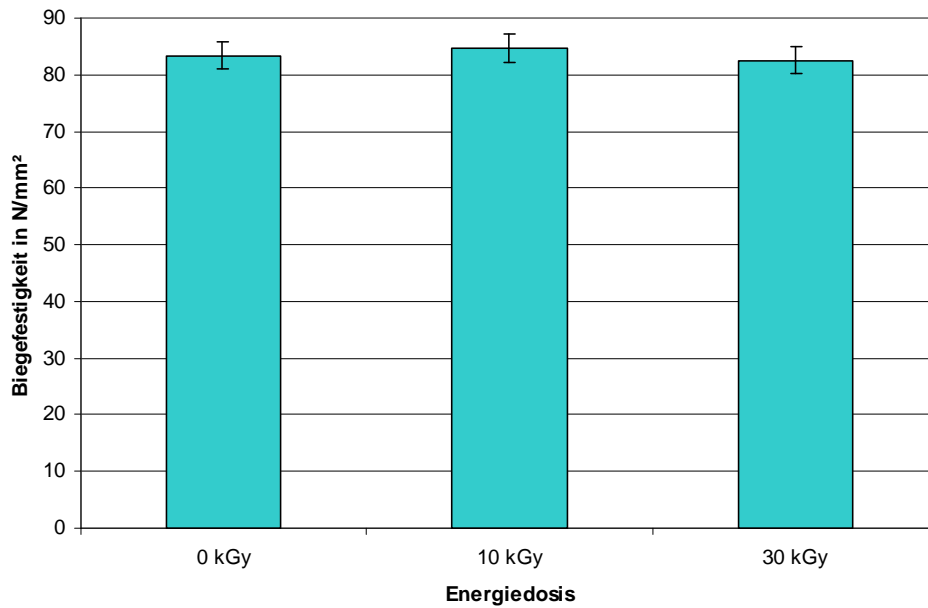


Abbildung 5.36: Biegefestigkeit von HDF (950 kg/m³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung bei 180 °C)

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Mahlverfahren zeigt, dass die Biegefestigkeit bei Platten aus dem Batch-Mahlbetrieb mit niedrigerer Mahltemperatur bei gleicher Rohdichte höher liegt (Abbildungen 5.37, 5.38).

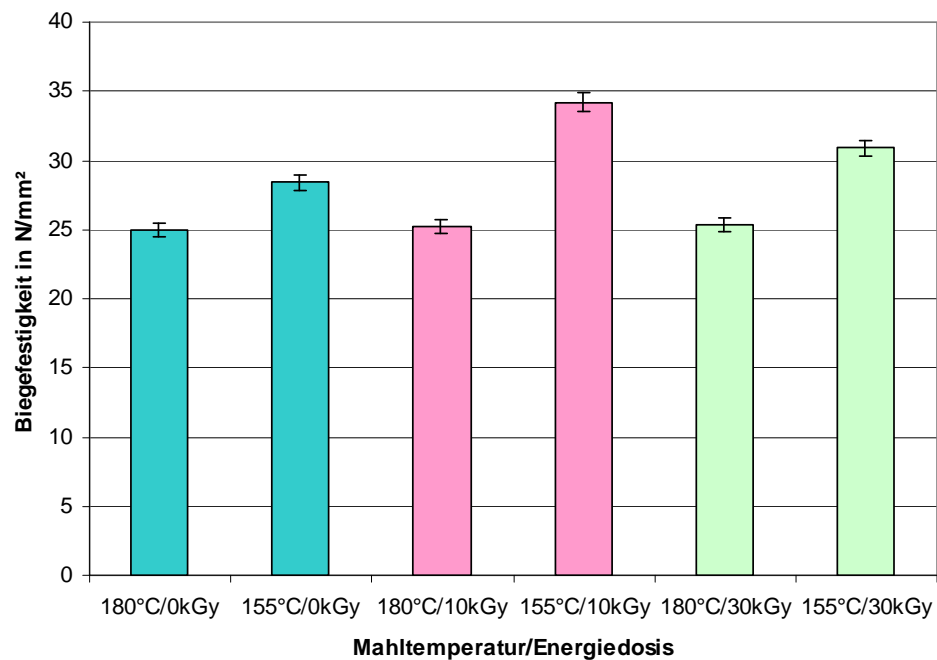


Abbildung 5.37: Vergleich der Biegefestigkeit der MDF (580 kg/m³), deren Faserstoffe in unterschiedenen Mahlverfahren hergestellt wurden

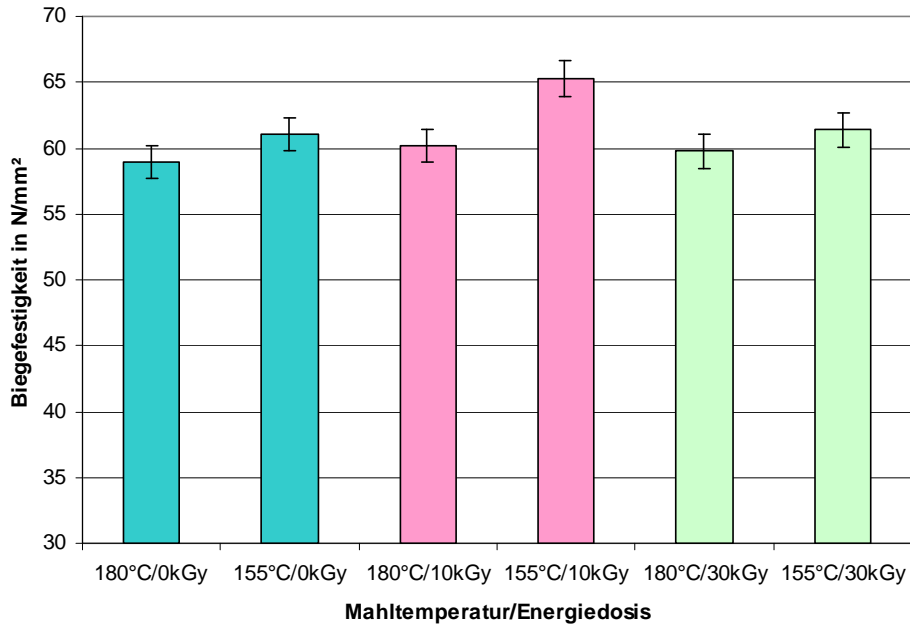


Abbildung 5.38: Vergleich der Biegefestigkeit der MDF (800 kg/m³), deren Faserstoffe in unterschiedenen Mahlverfahren hergestellt wurden

Die positive Wirkung der Hackschnitzelbestrahlung zeigt sich auch bei den Querkzugfestigkeiten (Abbildungen 5.39 bis 5.41). So kann insbesondere bei MDF mit einer sehr geringen Dichte eine 50%-ige Erhöhung der Querkzugfestigkeit erreicht werden, so dass die Normwerte nahezu eingehalten werden können. Bemerkenswert sind die hohen Querkzugfestigkeiten bei einer Kombination von Bestrahlung und Mahlung bei 155 °C. Hier werden bei leichten MDF mit einer Dichte von 580 kg/m³ normgerechte Querkzugfestigkeiten erreicht. Nimmt man den Wert der unbestrahlten Hackschnitzel bei industriüblicher Mahlung von 180 °C, so ergeben sich Steigerungen von 74 %. Bei einer Plattendichte von 800 kg/m³ liegt diese Steigerung bei 35 %.

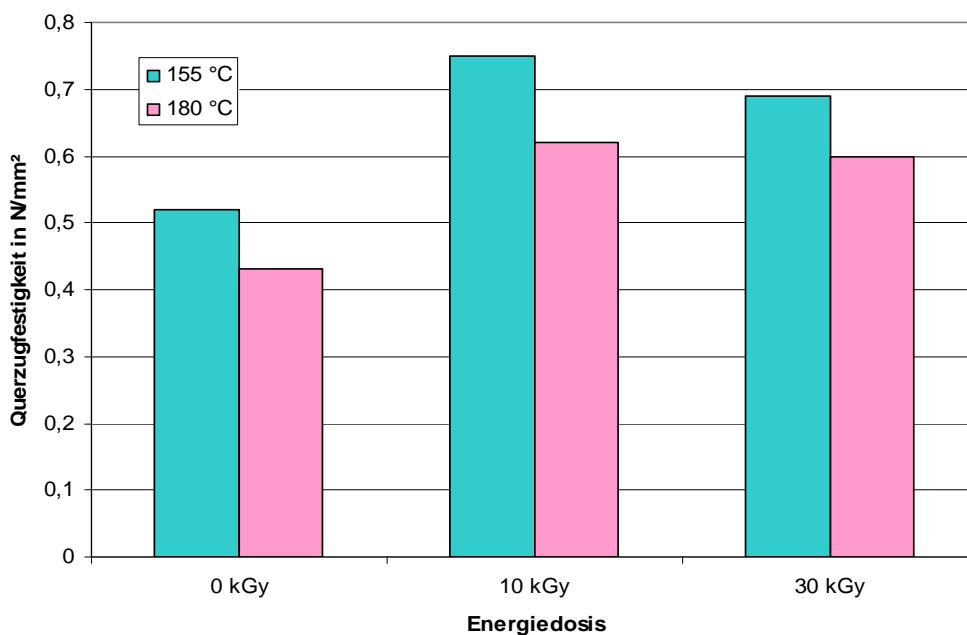


Abbildung 5.39: Querkzugfestigkeit der MDF (580 kg/m³) in Abhängigkeit von der Energiedosis und Mahltemperatur

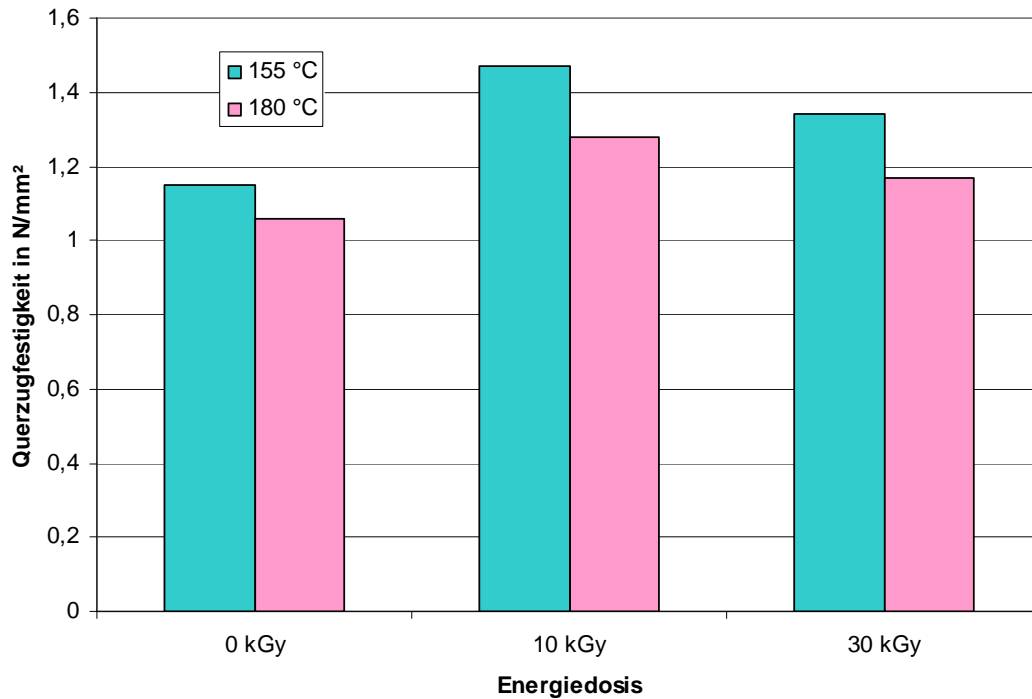


Abbildung 5.40: Querzugfestigkeit der MDF (800 kg/m³) in Abhängigkeit von der Energiedosis und Mahltemperatur

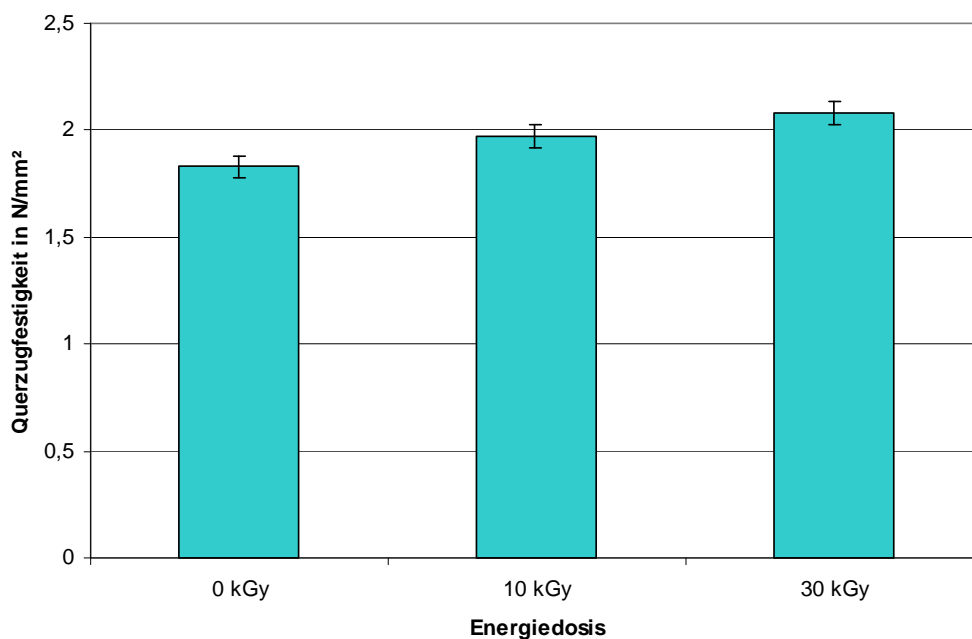


Abbildung 5.41: Querzugfestigkeit der HDF (950 kg/m³) in Abhängigkeit von der Energiedosis (Mahlung 180 °C)

Besonders positiven Einfluss übt die Hackschnitzelbestrahlung auf die hygroskopischen Eigenschaften der Werkstoffe aus (Abbildung 5.42). So bewirkt eine Hackschnitzelbestrahlung eine Verringerung der Dickenquellung von MDF und HDF von ca. 12 %. Bei Dämmplatten werden ca. 30 % erreicht.

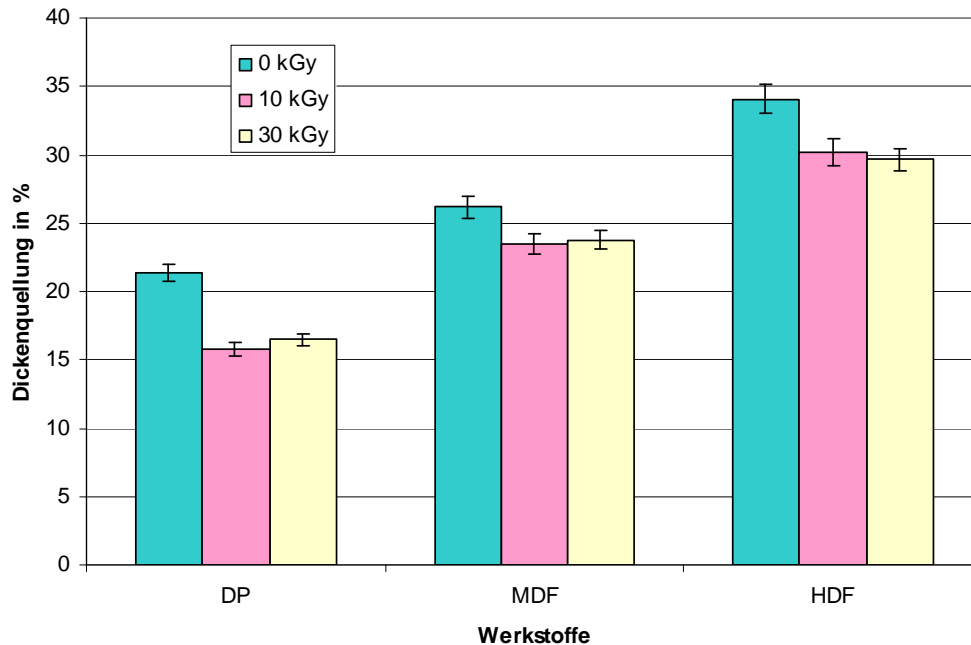


Abbildung 5.42: hygroscopische Eigenschaften der Faserwerkstoffe in Abhängigkeit von der Energiedosis und den Mahlbedingungen (DP: 160 kg/m³; MDF: 580 kg/m³; HDF: 950 kg/m³)

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass eine Hackschnitzelbestrahlung bei Mahltemperaturen von 180 °C aufgrund der hydrothermischen Plastifizierung des Mittelamellenlignin keine Mahlenergieeinsparung bewirkt, d. h. die Schwächung der Holzstruktur ist bei einer Mahlung bei 180 °C vergleichbar mit einer Bestrahlung mit 10 kGy und einer Mahlung bei 155 °C, da in beiden Verfahren ähnliche Mahlenergieverbräuche erreicht werden.

Die verbesserten mechanischen und hygroscopischen Kennwerte bei MDF aus Faserstoff mit niedrigerer Mahltemperatur deuten jedoch auf ein schonenderes Mahlverfahren hin. In der Plattenindustrie ist gegenwärtig der Trend zu leichteren Plattenwerkstoffen zur Reduzierung des Rohstoffeinsatzes zu verzeichnen. Eine Reduzierung der Plattenrohichte ist jedoch bisher nur in begrenztem Maße möglich, da hier eine proportionale Abnahme der mechanischen Kennwerte zu verzeichnen ist. Insbesondere die Querkzugfestigkeit und die Dickenquellung stellen kritische Werte dar. Eine Hackschnitzelbestrahlung kombiniert mit niedrigen Mahltemperaturen kann dabei zu einer deutlichen Verbesserung führen und die Herstellung von leichteren MDF, LDF und Dämmplatten mit normgerechten Eigenschaften ermöglichen.

5.9 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Faserplattenherstellung

Aus den erreichten Ergebnissen der Hackschnitzelbestrahlung zur Herstellung von Faserwerkstoffen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Um Hackschnitzel für die Herstellung von Faserplatten zu bestrahlen, ist ein Elektronenbeschleuniger von 10 MeV für Schichtdicken bis 20 cm (optimal 10 bis 12 cm) sehr gut geeignet.
- Für die Herstellung von Faserwerkstoffen müssen die Hackschnitzel vor deren Bestrahlung nicht imprägniert werden. Die Imprägnierung bringt im Gegensatz zur Papierherstellung keine Vorteile, weder für den Energieverbrauch noch für die Eigenschaften der Faserwerkstoffe.

- Durch die Bestrahlung der Hackschnitzel mit 10 kGy kann der Mahlenergieverbrauch bei einer Mahltemperatur von 155 °C um bis zu 36 % im Vergleich zu einer Mahlung unbehandelter Hackschnitzel bei 180 °C reduziert werden.
- Der Einsparungseffekt ist abhängig von der Energiedosis und den Mahlbedingungen:
 - Der Energieverbrauch nimmt mit steigender Energiedosis ab. Aber im Bereich von 10 bis 30 kGy ist der Unterschied nicht besonders groß.
 - Die Bestrahlungswirkung ist bei geringeren Mahltemperaturen am größten.
 - Andererseits sinkt der Energieverbrauch mit steigender Mahltemperatur und größerem Mahlsplatt.
 - Die Zerfaserung von bestrahlten Hackschnitzeln bei 180 °C ist aus energetischen und qualitativen Gründen nicht sinnvoll.
- Durch die Hackschnitzelbestrahlung wird die Qualität der daraus hergestellten Faserstoffe und Faserwerkstoffe bei niedrigen (145 °C, 155 °C) Mahltemperaturen deutlich verbessert:
 - Die Biegefestigkeit von Dämmplatten und MDF wird durch eine Hackschnitzelbestrahlung um ca. 30 % verbessert. Bei MDF wird bei niedrigeren Mahltemperaturen eine Verbesserung um 20 % erreicht. Bei HDF zeigt sich kein Effekt.
 - Die Querkzugfestigkeit verbessert sich bei MDF (800 kg/m³) bis zu 35 % und bei leichten MDF (580 kg/m³) sogar bis zu 74 % und erreicht hier Normwerte.
 - Die Dickenquellung sinkt durch die Bestrahlung bei allen Plattenarten deutlich.
 - Die Bestrahlungswirkung ist bei geringeren Mahltemperaturen und geringeren Werkstoffdichten am größten.
- Bei einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen MDF-Herstellung kann sich eine Investition von 6 Mio. Euro innerhalb von ca. 1,2 Jahren amortisieren.

Es wird vermutet, dass bereits niedrigere Energiedosen (<10 kGy) zur Reduzierung des Mahlenergieverbrauchs und zur Verbesserung der Eigenschaften der daraus hergestellten Faserwerkstoffe führen kann. Weitere Arbeiten sollten auf die Reduzierung der Energiedosis (z. B. 5 kGy) abzielen, um die Bestrahlungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die Bestrahlungsenergie zu reduzieren.

5.10 Abschätzung der Kosten einer Integration des Verfahrens in bestehende Prozessketten der industriellen Holzwerkstoffherstellung der Faserplattenherstellung (AP6)

Den Anschaffungskosten und Betriebskosten stehen die Reduzierung des Energiebedarfs und die Verbesserung der Platteneigenschaften gegenüber. Bei der TMP-Herstellung kann man von einem Energiebedarf von 120 bis 160 kWh/t für die Holzstoffproduktion ausgehen. Eine Kilowattstunde kostet ca. 0,07 Euro.

Bei einem MDF-Werk mit einer Jahreskapazität von 300.000 m³ wird bei einer Strahlendosis von 10 kGy ein Elektronenstrahler mit einer Leistung von 190 KW benötigt. Die Investitionskosten inklusive Montage liegen bei ca. 6 Mio Euro.

Mit diesen Daten wurde zunächst die Kostenersparnis durch die Energieeinsparung betrachtet (Tabelle 5.7)

Tabelle 5.7: Spezifische Energie- und Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,07 €/kWh

Einsparung in %	Netto-Einsparung in kWh/t*	Netto-Einsparung in €/t*	Netto-Einsparung in €/a*
30	29	2,03	439.419
35	36	2,52	536.334
40	42	2,94	633.249
45	49	3,43	730.164

(Energiebedarf TMP-Anlage 130 kWh/t, Tagesproduktion: 600 t otro, Jahresauslastung 95% Bedarf Elektronenbeschleuniger 6,7 kWh/t; der Energieverbrauch des Strahlers wurde abgezogen).

Eine Amortisation nur über die Energieeinsparung ist aufgrund der Berechnungen in Tabelle 5.7 erst nach ca. 14 Jahren gegeben. Bei steigenden Energiepreisen auf 9 Cent/kWh verkürzt sich diese Zeit auf unter 10 Jahre. Gleiches gilt bei erhöhtem Mahlenergieverbrauch von 160 kWh/t.

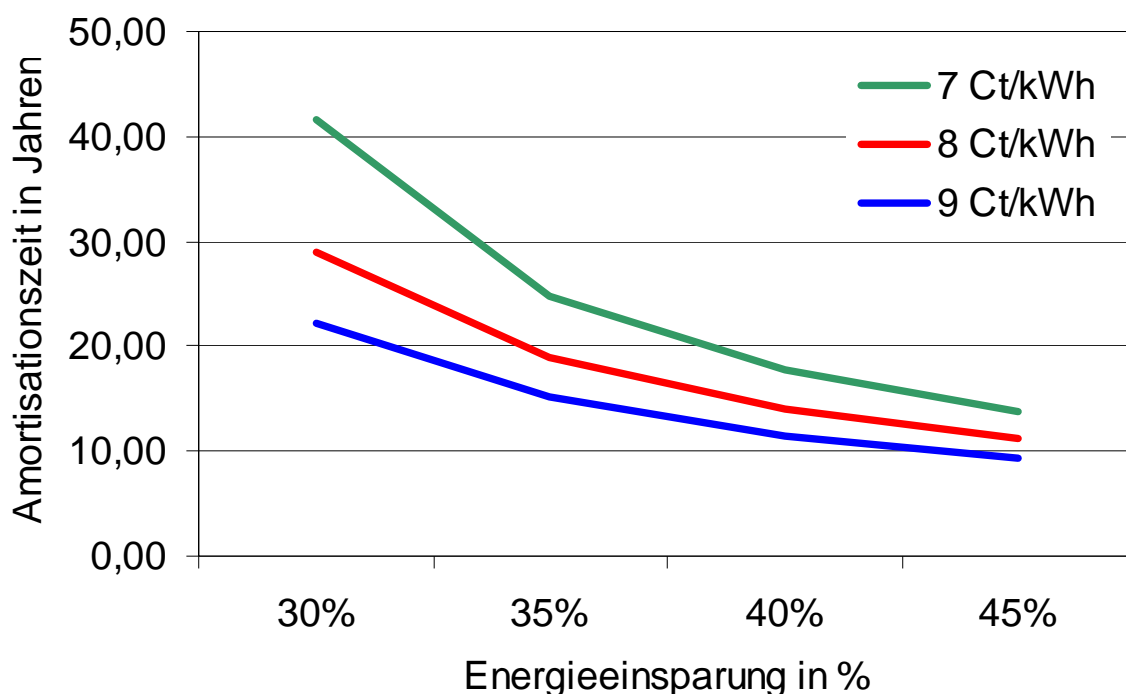


Abbildung 5.43 : Amortisationszeit vs. Energieeinsparung bei Elektroenergiepreisen zwischen 7 Ct/kWh und 9 Ct/kWh

Bei der Plattenherstellung wurde eine deutliche Verbesserung der Platteneigenschaften durch eine Bestrahlung der Hackschnitzel erreicht. Eine Reduzierung der Plattendichte bei MDF um 15 % bei gleichbleibenden normgerechten Eigenschaften erscheint daher realistisch. Wird die Einsparung an Holz und Bindemittel in die Kalkulation einbezogen liegt die Kosteneinsparung mit ca. 5 Mio. Euro pro Jahr wesentlich höher (Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8: Prozentualen Einsparung bei einem Energiepreis von 0,09 €/kWh

Einsparung in %	Einsparung in Mio €/a	Amortisationszeit a
30	4,98	1,23
35	5,07	1,20
40	5,17	1,18
45	5,27	1,16

Mit einer Investition von ca. 6 Mio. Euro und zusätzlichen Betriebskosten von 190 T Euro pro Jahr ist eine Amortisationszeit von ca. 1,2 Jahren realisierbar. Die Wartungen des Elektronenbeschleunigers könnte in den Stillstandszeiten der Produktionsanlage durchgeführt werden. Die Kapazitäten der üblichen Transporteinrichtungen sind ausreichend, auch deren Abmessungen und die erreichbaren Schütthöhen sind praxistauglich. Es findet lediglich eine Änderungen in dem Teil der Anlage statt, welcher neu gebaut werden muss.

Der Einsatz des Elektronenbeschleunigers erscheint daher in der Praxis möglich. Im Investitionsfall muss diese Kalkulation an die vor Ort gegebenen Bedingungen angepasst werden.

6 Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielen inklusiv Diskussion des Mitteleinsatzes für Personal und Leistungen Dritter

Das Ziel des Forschungsprojektes war, den Energiebedarf bei der TMP-Erzeugung durch Kombination einer Elektronenstrahlbehandlung der Hackschnitzel mit einer Imprägnierung bei gleichbleibender oder verbesserter Faserqualität um mindestens 30 % zu reduzieren und ein entsprechendes Verfahren für die Herstellung hochwertiger Papiere und Holzfaserverwerkstoffe zu entwickeln. Dabei wurden die Versuchsbedingungen der industriellen Praxis angepasst.

Während des Bewilligungszeitraumes wurden im November 2009 von der Technischen Universität Dresden 2 deutsche Patente DE 102009057208.2 „Verfahren zur Herstellung von lignozellulosen Papierfaserstoffen sowie daraus gewonnener Papiere, Kartone und Pappen“ und „Lignozelluloser Faserwerkstoff, naturfaserverstärkter Kunststoff und Verfahren zur Herstellung“ angemeldet. Dafür liegen erste Prüfbescheide vor. Als nächster Schritt erfolgen europäische Patentanmeldungen.

Das Projektziel wurde erreicht.

Das Personal wurde wie geplant in den unten beschriebenen Arbeitspaketen eingesetzt. Für die durchgeführten Recherchen und Untersuchungen wurden mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter in Teilzeit beschäftigt. Die geleistete Arbeit entspricht im vollen Umfang dem bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Wegen des Umfangs der Versuche wurde auf Wunsch der Projektbegleiter die Holzstoffherzeugung nur mit Fichtenholzhackschnitzeln vorgenommen und auf die Zerkleinerung von Laubhölzern verzichtet. Die in den einzelnen Arbeitspaketen geplanten Aufgaben zur Erreichung des Projektziels wurden erledigt. Die Arbeiten in den einzelnen AP wurden wie geplant erfolgreich durchgeführt:

AP 1: Optimierung der Hackschnitzelvorbehandlung

Die benötigten Fichtenholz-Hackschnitzel wurden uns von den projektbegleitenden Unternehmen Norske Skog Walsum und UPM Schongau zur Verfügung gestellt.

Die Imprägnierung der Hackschnitzel wurde nach verschiedenen Methoden im Labormaßstab variiert. Eine Imprägnierung mit 5 kg Na-Bisulfit/t otro Holz brachte die besten Ergebnisse.

Die Bestrahlung der Hackschnitzel erfolgte anfänglich im Institut für Polymerforschung. Wegen der Anwendbarkeit der Ergebnisse in der industriellen Praxis (Durchdringung größerer Schütthöhen) wurden die späteren Bestrahlungsversuche mit einem größeren Elektronenbeschleuniger (Strahlleistung 10 MeV) bei der Gamma Service Produktbestrahlung GmbH in Radeberg durchgeführt. Die besten Ergebnisse für den Einsatz in der Papierindustrie wurden bei 30 kGy und für die Holzfaserverwerkstoffherstellung mit 10 kGy erzielt.

AP 2: Optimierung der Hackschnitzelzerfaserung

Die Hackschnitzelzerfaserung wurde im Labormaßstab an der institutseigenen TMP-Anlage für die Faserplattenherstellung einstufig und für die Papierherstellung 2-3 stufig durchgeführt. Die Reduzierung der Mahlarbeit wurde durch Mahlpaltvariation an der Refineranlage erreicht. Bei den bestrahlten Hackschnitzeln kann im Vergleich zu den unbehandelten Hackschnitzeln bei gleichen Entwässerungsverhalten der Energiebedarf um 30 bis 40 % gesenkt werden.

Zusätzlich erfolgten zur Faserplattenherstellung im Labor 2 Upscaling-Versuchsreihen mit bestrahlten und unbestrahlten Hackschnitzeln in einer halbtechnischen TMP-Anlage mit höherer Durchsatzleistung im Institut für Holztechnologie Dresden.

AP 3: Bleichbarkeit des Holzstoffes aus den optimierten Verfahren

Der Weißgrad des Holzstoffes der imprägnierten und bestrahlten Hackschnitzel liegt um 2-3 Punkte höher als der des unbehandelten Holzstoffes. Dadurch ist eine Senkung des Aufwandes für die nachfolgende Bleiche zur Erreichung des gleichen Weißgrades zu erwarten. Bereits ohne Bleiche sind deutlich höhere spezifische Streukoeffizienten der bestrahlten Proben zu erkennen. Bei einer Nachbleiche mit Peroxid bei gleichen Dosierungsbedingungen im Labormaßstab lag der TMP mit Vorbehandlung 3 Weißgradpunkte über dem unbehandelten Holzstoff.

AP 4 und 5: Untersuchung der Holzstoff- und der Papiereigenschaften sowie der Eigenschaften von Holzfaserwerkstoffen

Bei der Holzstoffherstellung wird eine zusätzliche Abwasserbelastung lediglich durch die Imprägnierung verursacht. Diese sollte aber bei 5 kg Bisulfit/t otro Holz bei der industriellen Abwasseraufbereitung zu keinen Problemen führen.

Bei den Untersuchungen der Eigenschaften kamen Standardmessverfahren aber auch spezielle wenig in der industriellen Praxis verbreitete Verfahren zum Einsatz.

Als wichtigstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass eine schonendere Mahlbehandlung während des Zerfaserungsprozesses infolge der Bestrahlung weniger faserschädigend wirkt. Durch die Vorbehandlung der Hackschnitzel werden Trendlinien verschoben und die Festigkeitsoptima schon früher bei niedrigerem Mahlaufwand erreicht.

AP 6: Ökonomisch-ökologische Bewertung der Verfahrenskombination

Die Berechnungen erfolgten am Beispiel einer TMP-Linie mit einer Produktionskapazität von 500 t/d und einer jährlichen Betriebszeit von 8.000 h/a. Bei der Berechnung der Energieeinsparung wurde der gesamte für den Betrieb des Elektronenbeschleunigers notwendige Energiebedarf in der Berechnung berücksichtigt und um diesen Betrag reduziert. Dabei wurde für die TMP-Anlage von einem Energiebedarf von 2000 kWh/t ausgegangen.

Unabhängig von der Energiepreisentwicklung ist ab einer Energieeinsparung von ca. 25 % eine Investition in das Verfahren vorteilhaft. Im Labormaßstab konnten Energieeinsparungen bis zu 50 % realisiert werden. Sollten sich die Ergebnisse in einem Großversuch bestätigen, so ist ein Transfer der Forschungsergebnisse unbedingt zu empfehlen und eine Investitionsentscheidung auf jeden Fall konkret zu prüfen.

7 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsprojektes für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

7.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Sowohl in der Zulieferung (Anlagenherstellung, Wartung, Engineering) sowie in der Weiterverarbeitung von Holzprodukten sind viele kleine und mittelständische Unternehmen invol-

viert. Der Nutzerkreis der Ergebnisse beschränkt sich deshalb nicht nur auf die Hersteller der Papier- und Holzstoffherstellerbranche, sondern umfasst viele verschiedene Zweige der Wirtschaft, die überwiegend mittelständisch geprägt sind. Nutznießer sind also auch die Maschinenbauer und Lieferanten von Bestrahlungs-, Mahl- und Refineranlagen.

Die bisher ausschließlich im Labormaßstab erzielten Ergebnisse der Energieeinsparung von 30–50 % durch eine Elektronenbestrahlung von Holzhackschnitzeln in Kombination mit einer Bisulfitimprägnierung bei der Herstellung von Refinerholzstoff müssen unter industriellen Bedingungen nachgewiesen werden.

Der innovative Beitrag des Projektes besteht in der Beseitigung der aus früheren Untersuchungen bekannten Nachteile der Elektronenbestrahlung durch eine Kombination der Elektronenstrahlbehandlung der Hackschnitzel mit einer vorhergehenden Imprägnierung. Durch die Optimierung des Verfahrens soll ein völlig neuartiges Verfahren zur Energiereduktion bei der Herstellung von Hochausbeutefaserstoffen für die Papierindustrie bereitgestellt werden.

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf Pilotversuchen. Die Umsetzung in Praxiszerfaserungsanlagen müssen im Rahmen eines Großversuches getestet werden. Dazu gibt es bereits ein Folgeprojekt, welches von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 28721-21/2 vom 22.11.2010 gefördert wird.

Das Folgeprojekt hat das Ziel, die Forschungsergebnisse, die bisher nur im Labormaßstab verifiziert wurden, innerhalb eines industriellen Großversuches in einer Papierfabrik nachzuweisen und somit den Weg für die industrielle Nutzung der Verfahrenskombination zu öffnen. Hierzu sollen bei einem potentiellen Anwender der Papierindustrie dessen Produktionsanlagen mit bestrahlten Hackschnitzeln beschickt und die zur Ermittlung der Energieeinsparung relevanten Prozessparameter im Versuch aufgezeichnet werden. Der geplante Großversuch soll im Frühjahr 2011 im UPM-Werk Schongau stattfinden.

Parallel hierzu soll die industrielle Umsetzung der Hackschnitzelbestrahlung konzipiert werden, so dass die Versuchsergebnisse und der konzeptionelle Anlagenentwurf eine vermarktungsfähige Produktidee darstellen.

Das Forschungsprojekt grenzt sich klar und deutlich vom gegenwärtigen Stand der Forschung und Technik im internationalen Maßstab ab. Es können die Vorteile der Einsparung von Holzressourcen durch Herstellung von Hochausbeutefaserstoffen verstärkt genutzt werden. Damit wird ein Beitrag zur weiteren Verbesserung der Nachhaltigkeit der Papierproduktion geleistet.

Der Nutzen für die Faserplattenindustrie besteht vor allem in der Verbesserung der Eigenschaften durch die Bestrahlung der Holzhackschnitzel. Dabei kann die Zerfaserungstemperatur von 180 °C auf 150 °C sowie der Holz- und Bindemittleinsatz gesenkt werden.

7.2 Umweltrelevanz und innovativer Charakter der Forschungsergebnisse

Zur Papierherstellung wird Energie in Form von Strom und Dampf benötigt. In den meisten Papierfabriken sind Kraftwerke integriert, die nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten. Mit Dampf wird die feuchte Papierbahn in der Papiermaschine getrocknet, während Elektroenergie für die Aufbereitung der Faserstoffe und zum Antrieb der Papiermaschine benötigt wird.

Mit dem beantragten Vorhaben sollen 30–50 % des Elektroenergiebedarfes bei der Zerfaserung der Holzhackschnitzel eingespart werden. Dieses trägt zur Verbesserung des CO₂-Footprints des erzeugten Druckpapiers bei. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, mehr TMP bei der Papierproduktion einzusetzen und damit nachwachsenden Rohstoff mit hoher Aus-

beute zu nutzen. Die Papierfabrik, in der der Großversuch durchgeführt werden soll, gehört zu einem weltweit führenden Papierunternehmen, bei dem ein geschlossener Produktkreislauf die unabdingbare Grundvoraussetzung für ökologisch verantwortungsvolles Wirtschaften ist.

Mehr als 50 % der bei der Holzstoffherzeugung in der TMP-Anlage in Form von Strom eingesetzten Energie wird zurückgewonnen. Der bei der Holzstoffaufbereitung entstehende Dampf wird mittels Wärmetauscher zur Erzeugung von frischem Prozessdampf genutzt, der dann bei der Papierherstellung eingesetzt wird.

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Bisulfit nicht im Faserstoff gebunden bleibt, sondern in gelöster Form ins Abwasser gelangt. Dort wird es entsprechend der betrieblichen Wasserführung im Kreislauf geführt. Eine Abtrennung aus dem Abwasserstrom ist aufgrund der geringen Konzentration nicht angezeigt. Aus den bisherigen Untersuchungen ist bekannt, in welcher Größenordnung sich der Anteil anorganische Salze im Abwasser erhöht. Bei Beachtung einer sinnvollen Einsatzmenge kann maximal mit einer zusätzlichen spezifischen Abwasserlast von etwa 5 kg/t (anorganische Last) gerechnet werden.

Das Abwasser wird in einer Entspannungs-Flotationsanlage zuerst chemisch-mechanisch und anschließend in einer mehrstufigen Kläranlage biologisch gereinigt. Dadurch werden dem Wasser 99 % der biologisch abbaubaren Inhaltsstoffe entzogen. Die Abwassermenge liegt unter 8 l/kg Papier.

In der Holzwerkstoffindustrie kann durch die Einsparung von Energie, Holz und Bindemitteln die Schonung natürlicher Ressourcen und eine Verringerung der Produktionskosten erreicht werden.

8 Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse erweitern die bisher bekannten theoretischen Zusammenhänge der Laboruntersuchungen aus den Vorgängerprojekten um deren praktische Umsetzbarkeit. Sie sollen in jedem Fall im Rahmen von Fachvorträgen im Bereich der Papiertechnik und der Bestrahlungstechnik veröffentlicht werden (Zellcheming-Konferenz, Papierfachtagung). Darüber hinaus sind Beiträge in Form von Fachartikeln in entsprechenden Fachzeitschriften geplant (Wochenblatt für Papierfabrikation, etc.). Kurzinformationen sind bereits in den jährlich erscheinenden Tätigkeitsberichten des Institutes für Holz- und Papiertechnik zu finden, die es sowohl in gedruckter Form als auch elektronisch auf der Homepage des Institutes (<http://tu-dresden.de/ihp>) oder direkt in der aktuellen Fassung vorliegen: http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/news/tb2010

Im Falle eines positiven Ergebnisses des Großversuches ist es das Ziel, das Bestrahlungsverfahren so bald als möglich in einer Papierfabrik zu implementieren. Die technische Umsetzung kann dann wie folgt geschehen: Ein Maschinen- und Anlagenbauer, welcher im Bereich des Papiermaschinenbaus Kompetenz besitzt, übernimmt gemeinsam mit der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH die Projektleitung zur technischen Umsetzung und verfahrenstechnischen Implementierung der Bestrahlungsanlage in einer bestehenden Papierfabrik. Der Auftragnehmer ist in diesem Fall die Papierfabrik oder die übergeordnete Konzernstruktur.

Als ein möglicher Maschinen- und Anlagenbauer hat die PAMA Papiermaschinen GmbH (Freiberg in Sachsen) ihre Bereitschaft zur Umsetzung eines solchen Projektes signalisiert. Die PAMA Papiermaschinen GmbH arbeitet seit vielen Jahren international und erfolgreich im Bereich des Um- und Neubaus von Papiermaschinen und ist Teil der Kresta-Group, einem österreichischen Unternehmen für Anlagenbau und Komplettlieferant für Industrieanlagen.

Die strahlentechnische Kompetenz im Projektteam übernimmt die Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH, der Elektronenstrahler stellt eine Zukaufkomponente dar. Hierdurch öffnet sich der Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH ein für sie völlig neuer Geschäftsbereich und Markt in der Papier- und Holzindustrie.

Die schon während der Projektlaufzeit bestehenden und vertieften Kontakte zu Firmen der Papier-, und Holzwerkstoffindustrie sowie Prüf- und Forschungseinrichtungen aus diesem Bereich werden weitergeführt. Einige Unternehmen, die als beteiligte Institutionen in das Projekt integriert waren sind an einer Evaluierung der Projektergebnisse interessiert.

Zur weiteren Verbreitung der Ergebnisse sind außerdem Veröffentlichungen in fachspezifischen Zeitschriften geplant, wie im

- Wochenblatt für Papierfabrikation,
- Holzzentralblatt,
- Holztechnologie
- Holz als Roh- und Werkstoff

Präsentationen auf Fachmessen sind ebenso vorgesehen wie Vorträge auf relevanten Fachsymposien wie z. B. dem in zweijährigem Rhythmus stattfindenden PTS-Faserstoff- Symposium, der LIGNA in Hannover, der APV-Jahrestagung, dem Zellcheming-Kongress und der ÖZEPA-Tagung in Graz.

Die entwickelten Verfahrenslösungen des Forschungsvorhabens dienen als Vorbereitung für eine praxisrelevante Umsetzbarkeit. Dazu sind Kontakte zu Interessenten aus der Industrie vorhanden.

Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Holz- und Papiertechnik
Professur für Papiertechnik
01062 Dresden
Leiter der FS 1: Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann

Forschungsstelle 2:

Technische Universität Dresden
Fakultät Forst-, Geo und Hydrowissenschaften
Institut für Holz- und Pflanzenchemie
Piener Straße 19
01737 Tharandt
Leiter der FS 2: Prof. Dr. rer. nat. habil. Steffen Fischer

Forschungsstelle 3:

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Holz- und Papiertechnik
Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik
01062 Dresden
Leiter der FS 3: Prof. Dr.-Ing. Andre Wagenführ

Literaturverzeichnis

- Aregger, H. J.: Betriebserfahrungen mit der RTS-TMP-Anlage in Perlen: Wochenblatt für Papierfabrikation 127 (1999), Nr. 19, S. 1217–1220
- Arentzen, U.; Winter, E. (Hrsg.) – Gabler-Wirtschaftslexikon, 14. Auflage, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden 1997
- Atack, D.; Heitner, C.: State of the Art of Chemimechanical Wood Pulping Processes for Printing Paper. Das Papier 36 (1982) 10A, V114-V127
- Bäurich, C.; Bäuker, E.: Elektronenmikroskopische Untersuchung des Einflusses von Imprägnierung und Bestrahlung Unveröffentlichte Arbeit 2010
- Blechschmidt, J.: Papierlexikon: in: Götsching, L; Katz, C. (Hrsg.): Band 2 G-Q, Gernsbach: Deutscher Betriebswirte-Verlag GmbH 1999, S. 97
- Blechschmidt, J.: Taschenbuch der Papiertechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2010
- Buchholz, P.: Einfluß der chemischen Hackschnitzelbehandlung bei der MDF- Herstellung (1), WKI-Mitteilung 708/1998, Holzzentralblatt Nr. 7, S. 90, 93, 94
- Buchholz, P.: Einfluß der chemischen Hackschnitzelbehandlung bei der MDF- Herstellung (2), WKI-Mitteilung 710/1998, Holzzentralblatt Nr. 19, 292-293
- Deppe, H.J.; Ernst, K.: MDF-Mitteldichte Faserplatten. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag, 1996
- Ferguson, K. (Hrsg.): TMP Technologies Focus on Reducing Energy Use:
http://www.paperloop.com/db_area/archieve/p_p_mag/1997/9706/focus2.htm,
21.10.2004
- Fischer, K.; Erfahrungen aus der Buchenholz-Hackschnitzel-Freilagerung nach Bisulfit- Imprägnierung, persönliche Mitteilung
- Fischer, K.; Goldberg, W.; Schmidt, I.: Changes in Lignin and Cellulose by Irradiation: Makromol. Chem.; Macromol. Symp. 12 (1987), S. 303-322
- Fischer, K.; Schmidt, I.; Changes on beech chips Trough Irradiation: Cel. Chem. Technol. 17 (1983), S. 477-486
- Fischer, K.; Schmidt, I.: Ekman Days, Stockholm 1981
- Fischer, K.; Wilke, M.: Strahlenvorbehandlung von Buchenholz für die Textilzellstoffherstellung: Zellstoff und Papier 25 (1976) Nr. 4, S. 117-120
- Fischer, K.; Großmann, H.; Bäurich, Chr. und Zelm, R.: Energieeinsparung bei der Erzeugung von TMP durch gezielte Hackschnitzelvorbehandlung: Abschlussbericht des INFOR-Projektes 64R, Dresden 2005
- Fogelholm, C.-J.: Strom- und Wärmekosten für TMP, Druckschliff und Holzschliff: Wochenblatt für Papierfabrikation 112 (1984), Nr. 19, S. 687–694
- Fuglem, G., Kure, K.-A., Løbber, O. P. und Helle, P.: Full scale comparison of TMP fibre properties: RTS and conventional conditions: Pulp & Paper Canada 102 (2001), Nr. 8, S. 31–34
- Giertz, H. W.: Die verschiedenen Qualitäten des Holzschliffes, des Refinerholzstoffes und des thermomechanischen Holzstoffes: Wochenblatt für Papierfabrikation 104 (1976), Nr. 19, S. 736–737
- Granfeldt, T.; Iverson, S.L.; Chuaqui, C.A.; Jackson, M.; Free, D.: The effects of electron beam pretreatment of wood chips on energy consumption in high yield pulping: Tappi Journal 75 (1992) Nr. 6, S. 175-182
- Großmann H.; Weber, P.-G.; Jurtz, S.: Festigkeitseigenschaften bei der TMP-Erzeugung
- Großmann H.; Weber, P.-G.; Sayah, T.: Energieeinsparung bei der TMP-Erzeugung durch eine Hackschnitzelextrudierung in Kombination mit einer Vordämpfung und Imprägnierung, Unveröffentlichte Arbeit 2009
- Handke, T.: Energieeinsparung bei der TMP-Herstellung durch Elektronenbestrahlung. VDM-Verlag 2010, ISBN 978-3-639-31079-5
- Kalnins, A.J., Darzins, T.A., Jukna, A.D., Berzins, G.W.: Physikalisch-mechanische Eigenschaften des mit Ammoniak chemisch plastifizierten Holzes, Holztechnologie 8/1967, 22-28

- Law, K.-N., Lanouette, R.: Effect of mechanical conditioning of chips on the quality of soft-wood TMP: Pulp & Paper Canada 101 (2000), Nr. 7, S. 31–35, 14./15. 1999 FAL Braunschweig
mit Elektronenbestrahlung als Vorbehandlungsmethode, Unveröffentlichte Arbeit 2010
- Münster, H.: Das RTS-Verfahren: Papier aus Österreich (1996), Nr. 6, S. 46–49
- N.N.1: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.did=180914.html>
- N.N.2: Elektronenbeschleuniger (Betastrahlung).
<http://www.bgs.de/betastrahlung.html>. 17.05.2010
- N.N.3: BGS erweitert für zweiten Elektronenbeschleuniger.
<http://www.mittelbayerische.de/index.cfm?pid=10063&pk=281158&p=1>. 17.05.2010
- Roffael, E., Parameswaren, N.: Kenntnisstand und Untersuchungsergebnisse zur Wirkung von Ammoniak auf Holzspäne, Holz als Roh- und Werkstoff 42/1984, 327-333
- Roffael, E., Marutzky, R. Dix, B.: Untersuchungen über den Einfluß von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faser Trocknung auf die physikalisch- technologischen Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten, DGFH- aktuell 75-12/1999
- Sabourin, M. J.: Evaluation of a compressive pretreatment process in TMP properties and energy requirements: Pulp & Paper Canada 101 (2000), Nr. 2, S. 50–56
- Schiller, S., Panzer, S.: „Elektronenstrahlverfahren“ in Conrad, H., Krampitz, R.: „Elektrotechnologie“. VEB Verlag Technik. Berlin 1983
- Schneider, T., Roffael, E., Dix, B.: Einfluß von Holzaufschlussverfahren (TMP-, CTMP-Verfahren) und Aufschlußbedingungen auf die physikalisch-technologischen Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten, Holz als Roh- und Werkstoff 58, 2000, S. 277, Springer-Verlag
- Tienvieri, T., Huusari, E., Sundholm, J. Vuorio, P, Kortelainen, J. Nystedt, H. und Artamo A.: in: Sundholm, J. (Hrsg.): Papermaking Science and Technology: Book 5: Mechanical Pulping: Helsinki, FAPET Oy, 1999, S. 205
- Walther, A.: Investitionsrechnung, 1. Auflage, WRW-Verlag, Köln 1999