



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

+
synergyhealth
our work protects your world

Synergy Health Radeberg GmbH

**Elektronenbestrahlung von Holzhackschnitzeln zur energieeffizienten Herstellung von Holzstoff
in der Papierproduktion**

**Abschlussbericht zum Vorhaben
Az: 28721-21/2 gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

von

Christian Bäurich, Toni Handke, Wolfgang Schumann, Paul-Gerhard Weber

30. Juni 2012 Dresden/Radeberg

1. Inhaltsverzeichnis

	Projektkennblatt	
I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis	II
III	Abkürzungsverzeichnis	III
IV	Formelzeichen und Indizes	IV
V	Tabellenverzeichnis	V
	Zusammenfassung	1
1	Einleitung	2
2	Hauptteil	5
2.1	Labortechnische Arbeiten mit Vorbehandlung von Holzhackschnitzeln zur Zerfaserung in der TMP-Pilotanlage	5
2.2	Planung und Durchführung des Großversuches	6
2.2.1	Imprägnierung in Schongau	6
2.2.2	Zwischentransporte von Schongau nach Radeberg und zurück	8
2.2.3	Elektronenbestrahlung in Radeberg	9
2.2.4	Zerfaserung und Papierherstellung.....	16
2.3	Ergebnisse des Großversuches in Schongau	17
2.4	Nachfolgende Untersuchungen zur Wirkung von Imprägnierung und Bestrahlung vor der Zerfaserung der Holzhackschnitzel.....	22
2.5	Grundkonzept einer kontinuierlichen Hackschnitzelbestrahlung.....	25
2.5.1	Verfahrenstechnische Aspekte.....	25
2.5.2	Bestrahlungstechnik / Anlagentyp / Transportsystem.....	26
2.5.3	Elektronenenergie	28
2.5.4	Gleichförmigkeit der Bestrahlung	28
2.5.5	Durchsatz / Strahlleistung	31
2.5.6	Energiebedarf.....	35
2.5.7	Strahlenschutz- und Umweltaspekte	36
2.5.8	Projektumsetzung	40
2.6	Ökologische und Ökonomische Betrachtung von ETMP	42
2.7	Veröffentlichungen	43
3	Fazit.....	44
	Literaturverzeichnis	45
	Anlagen	46

2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufplan des Großversuches	6
Abbildung 2: Flüssigkeitsaufnahme bei der Hackschnitzel-Imprägnierung	7
Abbildung 3: Prinzip der Elektronenbestrahlung	10
Abbildung 4: Tiefendosisverteilung von Holzhackschnitzel	11
Abbildung 5: Behälter mit Holzhackschnitzeln bei der Bestrahlung	12
Abbildung 6: Ergebnis des Dose Mapping	13
Abbildung 7: Energieflussschema der Elektronenbestrahlungsanlage	15
Abbildung 8: Probennahme in TMP-Anlage	17
Abbildung 9: Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs der TMP-Anlage im Versuchszeitraum	18
Abbildung 10: Entwicklung der Festigkeitswerte im Verlauf des Aufbereitungsprozesses	19
Abbildung 11: Faserlänge und Fibrillierung von behandelten und unbehandelten Holzstoffen	20
Abbildung 12: Faserlängenverteilung von behandelten und unbehandelten Holzstoffen	20
Abbildung 13: Weiterreißarbeit Zeitungsdruckpapier	21
Abbildung 14: Reißlänge Zeitungsdruckpapier	21
Abbildung 15: Rauigkeit Zeitungsdruckpapier	21
Abbildung 16: Luftdurchlässigkeit Zeitungsdruckpapier	22
Abbildung 17: Weißgrad (D 65) Zeitungsdruckpapier	22
Abbildung 18: Viskosität (GVZ) von TMP-Proben nach verschiedener Vorbehandlung sowie Delignifizierung	24
Abbildung 19: Potenzielle Möglichkeiten zur Eingliederung der Bestrahlung in den TMP-Aufbereitungsprozess (8)	26
Abbildung 21: Horizontales Transport- und Führungssystem für Schüttgut in der Bestrahlungszone	27
Abbildung 22: Optimale Elektronenenergie für Einseitenbestrahlung von Holzhackschnitzeln (mittlere Dichte von $0,33 \text{ g/cm}^3$)	28
Abbildung 23: Schemadarstellung für modellierte Produktmenge bei der Monte-Carlo-Simulation	30
Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Dosis auf Bereiche bei maximaler Unordnung der Hackschnitzel im rechteckigen Förderprofil	31
Abbildung 25: Mögliche Profilformen des Materialstromes der Holzhackschnitzel (schematisch)	31
Abbildung 26: Massendurchsatz einer Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel bei 3 Dosiswerten	33
Abbildung 27: Blockschema der eingebundenen Bestrahlungsanlage in der Papierfabrik	34

3. Abkürzungsverzeichnis

IHP	Institut für Holz- und Papiertechnik
otro	ofentrocken
lutro	lufttrocken
ETMP	Energy efficient Thermo Mechanical Pulp
TMP	Thermo Mechanical Pulp
CTMP	Chemo Thermo Mechanical Pulp
PGW	Pressured Ground Wood

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

4. Formelzeichen und Indizes

c	%	Konzentration
E(SR)	SR	Entwässerungswiderstand (nach) Schopper Riegler
m	g	Masse
m _A	g/m ²	flächenbezogene Masse
n	-	Anzahl
z	-	Porenanzahl
ρ	g/m ³	scheinbare Blatt- oder Stapeldichte

D	kGy	Energiedosis (kurz: Dosis)
D _{max} ; D _{min}	kGy	minimale Dosis; maximale Dosis
E	[kWs]	Energie
E _e	eV; MeV	Elektronenenergie
m	kg	Masse
l; b; h	cm; m	Weglängen, Maße
P	kW	Leistung
P _{Strahl}	kW	Strahlleistung
t	s; min; h	Zeit
t _B	s; min; h	Bestrahlungszeit
x; y; z	cm	Koordinate, Weglänge
ÜF	-	Überdosisfaktor (engl.: DUR)
η	-	Wirkungsgrad

5. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitliche Strukturierung des Forschungsprojektes	4
Tabelle 2: Mahlungparameter	5
Tabelle 3: Teilprozess Imprägnierung	6
Tabelle 4: Trockensubstanz, Kreislaufkonzentration und Bisulfitaufnahme im Holz	8
Tabelle 5: Einsatz der Routinedosimeter während des Großversuchs	14
Tabelle 6: Probenübersicht	23
Tabelle 7: Delignifizierung von TMP-Proben	24

Zusammenfassung

Das Thema **Elektronenbehandlung von Holzhackschnitzeln zur energieeffizienten Herstellung von Holzstoff in der Papierproduktion** wurde in Kooperation der Projektpartner Synergy Health Radeberg GmbH (ehem. Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH), TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Professur für Papiertechnik, sowie TU Dresden, Institut für Pflanzen- und Holzchemie bearbeitet und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Az: 28721-21/2) gefördert.

Das Projekt beweist sehr gut die Möglichkeit einer Implementierung von ETMP in eine bestehende TMP-Anlage. Mit einer Energieeinsparung von 30 % bei der TMP-Erzeugung würde die Papierindustrie einen wichtigen Schritt für die von der Politik geforderten ehrgeizigen Energieziele beitragen.

Die Eigenschaften des Holzstoffs nach dem Großversuch sind mit denen unbehandelter Stoffe vergleichbar. Das hergestellte Papier konnte ohne Einbußen in der Produktionsqualität verarbeitet und verkauft werden. Der Drucker konnte das Zeitungspapier erfolgreich bedrucken und seinerseits auf den Markt bringen.

Das bei der Elektronenbestrahlung in Radeberg durchgeführte Dose Mapping und die Routinedosimeter lieferten Resultate zur Homogenität der Dosisverteilung und zur Prozessstabilität.

Der Energieverbrauch des Prozessschrittes Elektronenbestrahlung unter den Bedingungen des Großversuchs in Radeberg mit (anlagenbedingt) relativ ineffektiver Strahlzeitausnutzung betrug im Mittel 110 kWh pro Tonne Holzhackschnitzel. Er kann mit einem kontinuierlich zuführenden Transportsystem auf ca. 60 kWh/t optimiert werden.

Die konzeptionellen Aussagen zur Gestaltung einer Industrieanlage wurden durch zusätzliche Untersuchungen vertieft, die Angaben zur Gleichförmigkeit der Bestrahlung wurden durch Monte-Carlo-Simulationen erweitert.

Für einen Durchsatz von 250 t otro Hackschnitzeln pro Tag in einer Papierfabrik und unter Einbeziehung des gesamten Prozesswirkungsgrades bei einer mittleren Dosis von 30 kGy ist eine Bestrahlungsanlage mit ca. 275 kW Strahlleistung erforderlich. Zum Aufbau einer derartig leistungsstarken Anlage wird ein modulares Konzept vorgeschlagen.

Die Energiebedarfsberechnung für eine Anlage mit kontinuierlich zuführendem Transportsystem liefert einen Gesamtleistungsbedarf von ca. 1,3 MW zur Behandlung von 250 t/d otro Hackschnitzeln.

Im Projekt wurde der großtechnische Nachweis erbracht, dass durch Einsatz des ETMP-Verfahrens 600 kWh pro Tonne Hackschnitzel (otro) eingespart werden können. Das entspricht bei einer durchschnittlichen TMP Produktionsanlage ca. 7 Mill. € im Jahr.

Bei der Einsparung von jährlich ca. 100 GWh Elektroenergie entsteht eine außerordentlich positive ökologische Gesamtbilanz. Die CO₂-Emissionen werden um jährlich ca. 51.000 Tonnen reduziert.

Es muss jetzt alles getan werden, um ETMP in die Praxis einzuführen, wir werden dafür unseren Beitrag leisten.

1. Einleitung

Bei den Primärfaserstoffen Zellstoffe und Holzstoffe ist Holz der Rohstoff. Zellstoffe werden durch chemischen Aufschluss von Holz in Kochprozessen gewonnen. Holzstoffe werden aus Holz thermomechanisch in Schleifer- oder Refineranlagen ohne (PGW, TMP) bzw. mit chemischer Vorbehandlung (CTMP, APMP) hergestellt. Während bei den Zellstoffen in Abhängigkeit vom Aufschlussverfahren die Ausbeuten nur bei 48-58 % (Gullichsen, 2000) liegen, werden bei Holzstoffen Ausbeuten von weit über 90 % (TMP zwischen 96-98 % (Tienvieri, 1999)) erreicht. Man spricht deshalb auch von Hochausbeutestoffen. Mit spezifischen Energieeinsätzen zwischen 2.000-3.500 kWh/t gehören die klassischen Prozesse der Holzstoffherzeugung jedoch zu den energieintensivsten Teilprozessen der Papierherzeugung. Wegen des hohen spezifischen Energiebedarfs stagniert die Herstellung von Holzstoffen in Europa oder ist sogar rückläufig.

Eine Energie- und Ressourcen schonende Frischfaserversorgung verbunden mit einer hohen Papierrecyclingrate ist für die europäische Papierindustrie zwingend notwendig.

Problematisch ist dabei die Situation auf dem weltweiten Holzmarkt. Die angesichts des erwarteten Klimawandels international vereinbarten Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen können in vielen Fällen kurzfristig nur durch den verstärkten Einsatz nachwachsender Energieträger, also vor allem Holz, realisiert werden. Dies spiegelt sich in dem heute zu beobachtenden drastisch verschärften Wettbewerb um diese Ressource und in der Entwicklung der Holzpreise in beeindruckender Weise wider.

Und auch die Altpapierressourcen können in vielen Ländern nicht mehr wesentlich stärker genutzt werden, als dies bereits heute der Fall ist. Deshalb wird die Papierindustrie weltweit auch mittelfristig noch mehr von Holz abhängen. Umso wichtiger ist es, diesen Rohstoff so energieeffizient wie möglich und mit möglichst hoher Ausbeute zu nutzen.

Als Folge der beschriebenen Entwicklungen haben sich die Rohstoffverfügbarkeit und die Rohstoffkosten für die Papierindustrie innerhalb nur weniger Jahre in einem bisher nicht gekannten Ausmaß verschlechtert.

Die Professur für Papiertechnik an der TU Dresden beschäftigt sich bereits seit einigen Jahren intensiv mit Fragen der Energie- und Ressourcenschonung im Bereich der Papierindustrie. Hierzu werden besonders ressourcen- bzw. energieintensive Teilprozesse der Papierherstellung detailliert analysiert. Auf der Basis der Ergebnisse solcher Analysen wird dann versucht, völlig neue, energieeffizientere Lösungsansätze zu identifizieren. Voraussetzung hierfür ist ein Verständnis der für die Erreichung der jeweiligen Prozessziele erforderlichen physikalischen, chemischen und mechanischen Vorgänge, die z. T. über den aktuellen Stand des Wissens hinausgehen.

Unter diesem Gesichtspunkt wurde der Refinerprozess in der Papierherstellung bewertet und folgender Lösungsansatz entwickelt. Die Refinerenergie ist dann signifikant zu senken, wenn es gelingt, die Faser-Faser-Bindungen im Holz stark und selektiv zu schwächen, so dass weniger Arbeit zur Vereinzelung der Fasern notwendig ist. Dies kann durch die Schwächung der hauptsächlich aus dem Polymer Lignin bestehenden Mittellamelle geschehen. Eine mögliche Methode stellt dabei die Behandlung der Holzhackschnitzel mit einer energiereichen Strahlung (Elektronenstrahl) dar. Der klassi-

sche TMP-Prozess wurde um die zwei Prozessstufen Imprägnierung und Bestrahlung der Holzhackschnitzel vor der Zerfaserung erweitert.

Diesem Forschungsansatz wurde im Rahmen von Laboruntersuchungen nachgegangen. In einer Kooperation mit der Synergy Health Radeberg GmbH (ehemals Gamma-Service Produktbestrahlung GmbH) konnten zunächst kleine Mengen von Holzhackschnitzeln bestrahlt werden. Diese wurden dann in einem halbtechnischen TMP-Prozess zerfasert und anschließend zu Papier verarbeitet. Der direkte Vergleich zu Proben aus unbestrahlten Hackschnitzeln zeigte bereits eine Energieeinsparung von mehr als 30 %.

Ziel des Projektes war, in einem industriellen Großversuch die im Labormaßstab erreichten Forschungsergebnisse nachzuweisen und somit Wege für die industrielle Nutzung zu öffnen. Hierzu sollten bei einem potenziellen Anwender der Papierindustrie dessen Produktionsanlagen mit bestrahlten Hackschnitzeln beschickt und die zur Ermittlung der Energieeinsparung relevanten Prozessparameter im Versuch aufgezeichnet werden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die zeitliche und inhaltliche Strukturierung des Projektes. Dieses war in vier Arbeitspakete untergliedert, wobei ein industrieller Großversuch das zentrale Element des Projektes bildet.

- (A) Labortechnische Arbeiten zur Imprägnierung und Bestrahlung von Holzhackschnitzeln
- (B) Entwicklung eines Gesamtkonzeptes zur kontinuierlichen Hackschnitzelbestrahlung für die Implementierung im Stoffaufbereitungsprozess typischer Papierfabriken
- (C) Großtechnischer Versuch zur Hackschnitzel Imprägnierung und Papierherstellung in einer Papierfabrik
- (D) Dokumentation und Abschlussbericht

Tabelle 1: Zeitliche Strukturierung des Forschungsprojektes

		Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Wer	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.
A.1	Labortechnische Untersuchungen zur Imprägnierung und Bestrahlung von Holz hackschnitzeln	PT															
A.2	Labor- und halbertechnische Validierung des Imprägnierungsverfahrens	HC															
A.3	Vorbereitungen zum Großversuch (Feinplanung des Handlings und Transportes der Hackschnitzel)	PT															
B.1	Konzeptionelle Studie für eine kontinuierliche Imprägnierung und Bestrahlung von Holz hackschnitzeln	GS															
C.1	Planung des Großversuches in der Papierfabrik	PT															
C.2	Bestrahlung der Hackschnitzel bei Gamma-Service GmbH	GS / PT / HC															
C.3	Großversuch in der Papierfabrik	PT / HC											Alternativtermin				
C.4	Papiertechnologische Bewertung des Großversuches	PT											Verschiebung, bei Alternativtermin				
C.5	Prozesstechnische Bewertung des Großversuches	PT															
B.2	Feinplanung eines industriellen Konzeptes zur kontinuierlichen Imprägnierung und Bestrahlung von Holz hackschnitzeln	GS															
D.1	Abschlussbericht und Dokumentation	GS / PT / HC															

2. Hauptteil

2.1 Labortechnische Arbeiten mit Vorbehandlung von Holzhackschnitzeln zur Zerfaserung in der TMP-Pilotanlage

Der innovative Aspekt der Projektidee besteht in einer dem eigentlichen Zerfaserungsprozess vorgeschaltete Elektronenbestrahlung der Hackschnitzel. In Laboruntersuchungen konnten Energieeinsparungen von 30-50 % gegenüber dem herkömmlichen Refinerverfahren nachgewiesen werden. Um dabei möglichen Faserschädigungen vorzubeugen, wurden die Holzhackschnitzel vor der Elektronenbestrahlung mittels einer Natrium-Bisulfitlösung imprägniert. Die Imprägnierung mittels Neutral-sulfiten (Na_2SO_3 bzw. NaHSO_3) ist heute das Standardverfahren bei der CTMP-Herstellung.

Für die Imprägnierung der Hackschnitzelproben wurde eine verdünnte Natriumbisulfit (NaHSO_3)- Lösung verwendet. In einem Siebtuch wurden die Holzhackschnitzel in einer Tauchwanne unter die Flüssigkeitsoberfläche der Imprägnierungslösung getaucht. Die Tauchzeit betrug ca. 10 Sekunden. Nach einer kurzen Abtropfphase im Siebtuch war die chemische Vorbehandlung des Holzes beendet. Die Imprägnierung der Holzhackschnitzel wurde als Schwefeldioxid (SO_2)-Gehalt in kg/t otro Holz gemessen.

Die imprägnierten Holzhackschnitzel wurden wie beim späteren Großversuch in der Elektronenbestrahlungsanlage GSE 80 der Synergy Health Radeberg GmbH behandelt (siehe Großversuch).

Die Zerfaserung der Hackschnitzel erfolgte in 2 bzw. 3 Stufen an unserer Pilotrefineranlage (Sprout Bauer) im Technikum Freital-Hainsberg, wobei in der 1. Mahlstufe die Holzhackschnitzel vorzerkleinert und in den nachfolgenden Mahlstufen die fertigen Holzstoffe hergestellt wurden (siehe Tabelle 2). Durch die unterschiedlichen Mahlpalte in der 2. bzw. 3. Stufe konnten verschiedene Entwässerungswiderstände realisiert werden. Damit war es möglich, Mahlkurven der unterschiedlich vorbehandelten Holzstoffe anzufertigen.

Tabelle 2: Mahlungparameter

Stufe	Mahlpalt in mm	Temperatur in °C	Förderschnecken-umdrehungen in U/min	Verdünnungswassermenge in l/h
1	0,3	140	0,15	24
2	0,10–0,02	130	0,25	20
3	0,02	130	0,25	20

Alle Messungen der Suspensions- bzw. Papiereigenschaften der Laborprüfblätter wurden in den Laboren des IHP der TU Dresden ausgeführt. Am Institut für Pflanzen- und Holzchemie der TU Dresden wurden zusätzliche Messungen an den hergestellten Holzstoffen durchgeführt.

2.2 Planung und Durchführung des Großversuches

Der Ablauf des Großversuches wurde unter Berücksichtigung folgender Rahmenbedingungen geplant:

- 60 t Hackschnitzel
- Imprägnieren der Hackschnitzel bei der Hackschnitzelwäsche in Schongau
- Bestrahlung der imprägnierten Hackschnitzel in Radeberg
- TMP-Erzeugung mit behandelten und unbehandelten HS
- Papierherstellung auf der PM 7 in Schongau (25-30 % TMP)

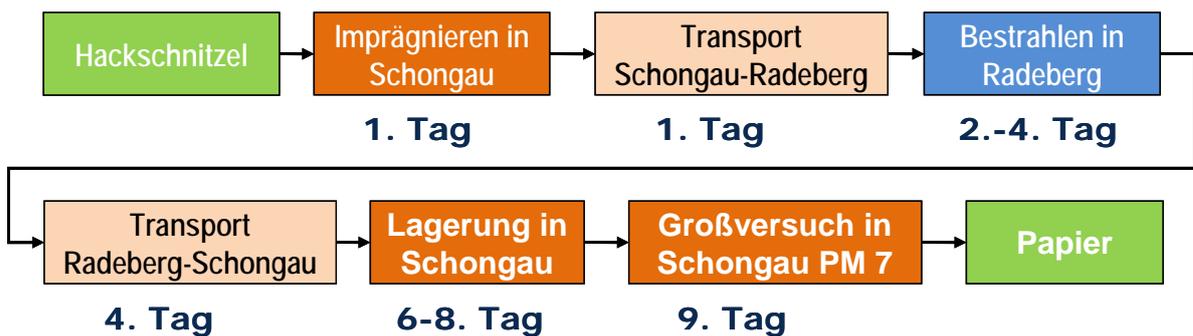


Abbildung 1: Ablaufplan des Großversuches

Der Ablauf des Großversuches wurde dann in die einzelnen Teilprozesse zerlegt. Für den Großversuch kamen Holzhackschnitzel von waldfrischen Fichtenholz mit einem Feuchtegehalt von 55-60 % (Trockensubstanz 45-40 %) zum Einsatz.

2.2.1 Imprägnierung in Schongau

Für die Imprägnierung der Holzhackschnitzel wurde die vorhandene Prozessstufe Hackschnitzelwäsche der TMP-Erzeugung in der Papierfabrik Schongau genutzt. Dazu mussten Anpassungsarbeiten zum Ausschleusen der imprägnierten Hackschnitzel nach der Hackschnitzelwäsche durchgeführt werden. Darüber hinaus mussten weitere Fragen geklärt werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Teilprozess Imprägnierung

Anpassungsarbeiten zum Ausschleusen der imprägnierten Hackschnitzel
Welche Anpassungsarbeiten sind mit welchem Kostenaufwand zur Ausschleusung erforderlich?
Hackschnitzelwäsche (Wasserkreislauf; Wasservolumen)
Ausschleusung der Hackschnitzel und Füllung der bereitgestellten Container
Bisulfit
Lieferart
Lieferung Wann/Wohin
Mitarbeiterinformationen zum Teilversuch Imprägnierung
Eintragung in den Wasserkreislauf
Konzentrationsänderung in der Bisulfitlösung durch Imprägnierung der Hackschnitzel

Imprägnierung bei der Hackschnitzelwäsche
Messung Feuchtegehalt der Hackschnitzel vor und nach der Wäsche
Flüssigkeitsaufnahme der Holz hackschnitzel bei der Wäsche (Imprägnierung)
Konzentrationsüberwachung im Wasserkreislauf
Einfluss einer Bisulfit-Imprägnierung bei der TMP-Herstellung auf eine nachfolgende Peroxidbleiche

Die Ausschleusung der imprägnierten Holz hackschnitzel erfolgte über Förderbänder und Rutsche direkt in die bereitgestellten Abrollcontainer.

Die Natrium-Bisulfit-Lösung wurde in einer Konzentration von 38-40 % in 1-m³-Containern angeliefert. Der Eintrag des Bisulfits erfolgte im nicht vollständig geschlossenen Wasserkreislauf der Hackschnitzelwäsche. Das Wasservolumen (ca. 70 m³) wurde mit Bisulfit angereichert, bis im Kreislauf eine Konzentration von ca. 10 -14 g/l SO₂ gemessen wurde.

Vorversuche („Tauchverfahren“) hatten ergeben, dass bei waldfischem Holz (42-43 % TS) die Tauchdauer praktisch keinen Einfluss auf die Flüssigkeitsaufnahme hat. Nach der Imprägnierung stellte sich ein TS von etwa 37-39 % ein. Damit ist die **Bisulfitaufnahme** allein von der **Konzentration in der Imprägnierlösung** abhängig.

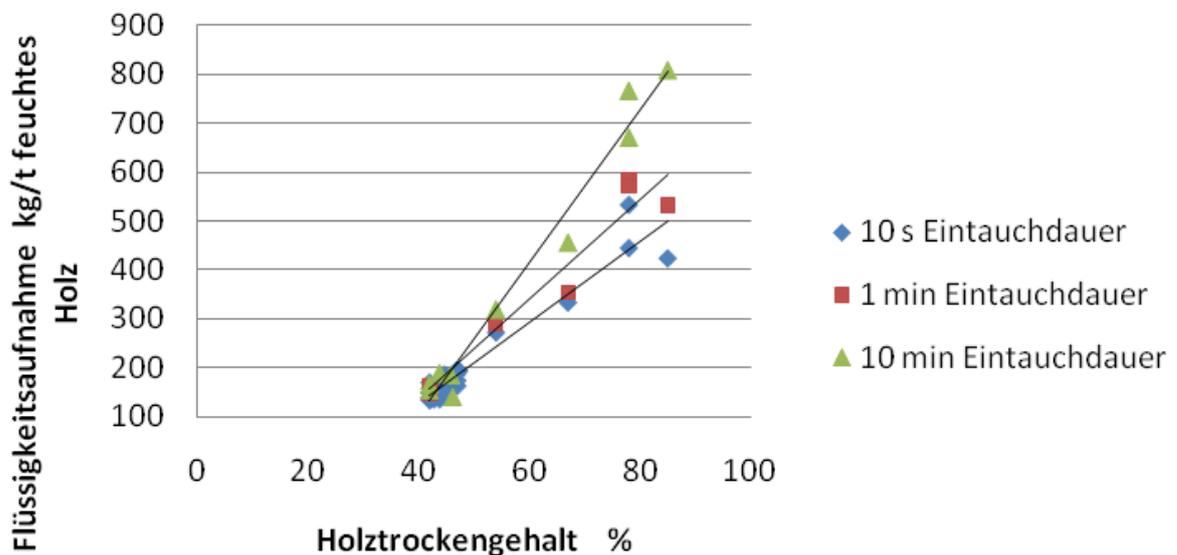


Abbildung 2: Flüssigkeitsaufnahme bei der Hackschnitzel-Imprägnierung

Nur bei höheren Trockengehalten des Holzes hat die Eintauchdauer in die Imprägnierlösung einen gewissen Einfluss (siehe Abbildung 2). Weiterhin kann festgehalten werden, dass die Konzentration der Imprägnierlösung durch das wiederholte Eintauchen von Holz hackschnitzeln im fortlaufenden Prozess kaum verändert wird. Somit muss bei vollständig geschlossenem Wasserkreislauf nur die Flüssigkeitsdifferenz in der notwendigen Konzentration ergänzt werden, also die Flüssigkeitsmenge, die mit dem Holz aus der Wäsche ausgetragen wird.

Um die Frage nach der Wirksamkeitsdauer der Imprägnierung der Holzhackschnitzel zu klären, wurde in einem Vorversuch imprägnierte Holzhackschnitzel nach unterschiedlicher Lagerdauer bei Raumtemperatur in eine definierte Wassermenge eingetragen und anschließend die vom Holz aufgenommene Bisulfitmenge durch Titration bestimmt. Es zeigte sich, dass nach 2 h etwa die Hälfte des Bisulfits in die Holzhackschnitzel eingedrungen und von außen mit Wasser nicht mehr auswaschbar war. Das Bisulfit ist somit im Holz gebunden und über längere Zeit stabil, wenn keine Austrocknung des Holzes stattfindet.

Der Teilprozess Imprägnierung im Rahmen des Großversuche fand während eines geplanten Stillstandes der TMP-Anlage statt und dauerte ca. 5 Stunden. Der Prozess verzögerte sich, weil der Ausstrag der imprägnierten Hackschnitzel aus dem Vorwärmbehälter 2 über die für den Versuch provisorisch installierten Förderbänder einen Engpass darstellte. Der nicht geschlossene Wasserkreislauf bei der Hackschnitzelwäsche erforderte 2 Nachdosierungen, und am Ende des Versuches kam es wegen fehlendem Bisulfit zu einem Rückgang der Konzentration der Imprägnierlösung (siehe Tabelle 4). Die Zielkonzentration von 5 kg/t konnte nicht erreicht werden. Die tatsächliche Konzentration lag am Ende der Imprägnierung bei nur ca. 2 kg/t. Dieser bezüglich der Erreichung der Energieeinsparung zunächst als problematisch betrachtete Effekt erwies sich bei der Auswertung der Laboruntersuchungen als weitgehend irrelevant. Tatsächlich wirkte sich die Imprägnierung sogar negativ auf den spezifischen Energiebedarf bei der Zerfaserung aus. Auch die Festigkeitseigenschaften zeigen keine positive Reaktion auf die Behandlung.

Tabelle 4: Trockensubstanz, Kreislaufkonzentration und Bisulfitaufnahme im Holz

Probennahme	TS Holz	Holz enthält Wasser		Flüssigkeitsaufn. bei Imprägnierung		Konz. im Kreislauf	Aufnahme im Holz
		%	Einwaage feucht	l/t otro	l/t otro		
1	ohne Imp.	47,3	1116	527	--		
2	nach Imp.	39,1	1559	609	442		
3	Container 2	39,5	1535	605	418	8,8	3,68
4	Container 3	42,0	1380	579	263	7,7	2,03
5	Container 4	39,8	1514	602	398	7,0	2,79
6	Ende Impr.	41,1	1435	589	319	5,8	1,85
7	Imp.+ Bestr.	42,9					

2.2.2 Zwischentransporte von Schongau nach Radeberg

Mittels Förderbänder wurden in der Papierfabrik Schongau 5 Abrollcontainer mit imprägnierten Holzhackschnitzeln beladen. 3 LKW-Züge mit jeweils 2 Abrollcontainern (davon der erste Container als Wechselcontainer ohne Ladung) brachten die imprägnierten Holzhackschnitzel zur Bestrahlung nach Radeberg.

Die Elektronenbestrahlung der imprägnierten Holzhackschnitzel begann in Radeberg am folgenden Tag in der Frühschicht. Insgesamt wurden für die Bestrahlung der Hackschnitzel 4 Schichten (Früh- und Spätschicht) in 2 Tagen benötigt. In einer Schicht wurde zu diesem Zweck etwas mehr als 1 Container umgeladen.

Nach der Bestrahlung der Holzhackschnitzel wurden alle 5+1 Container wieder nach Schongau zurücktransportiert und dort bis zur Weiterverarbeitung im Rahmen des Großversuches zwischengelagert.

2.2.3 Elektronenbestrahlung in Radeberg

Für das Umladen der Holzhackschnitzel und den innerbetrieblichen Transport vom Werkshof zur Elektronenbestrahlungsanlage wurden 10 zusätzliche Arbeitskräfte pro Schicht benötigt. In jeder Schicht wurden aus einem Container ca. 13 t Holzhackschnitzel von Hand in 50 kg Paketen portioniert und mit einem Transferwagen zum Transportsystem der Bestrahlungsanlage gefahren. Nach der Bestrahlung wurden die Pakete mit den Holzhackschnitzeln wieder vom Transportsystem entnommen und zu einem Radlader transportiert, mit dem ein anderer Abrollcontainers wieder beladen wurde.

Für die Bestrahlung wurde der Elektronenbeschleuniger TT 300 der Fa. Synergy Health Radeberg GmbH verwendet. Mit diesem Elektronenbeschleuniger können Elektronen bis auf max. 10 MeV beschleunigt werden. Die Hackschnitzel wurden chargenweise auf Tablaren zugeführt und in der Bestrahlungszone bestrahlt (siehe Abbildung 3).

Bei Elektronenbestrahlungsanlagen tritt der Elektronenstrahl aus dem Beschleuniger nach einer Strahlaufweitung in einem Scanner durch ein dünnes Austrittsfenster in die Luft aus, so dass die Bestrahlung der Hackschnitzel in normaler Umgebungsluft stattfinden kann. Das Bestrahlungsgut wird mit einer vorgegebenen, konstanten Geschwindigkeit durch das Strahlenfeld hindurchbewegt, wobei sich die Energiedosis (z.B. 30 kGy = 30 kWs/kg) zur Geschwindigkeit umgekehrt proportional verhält.

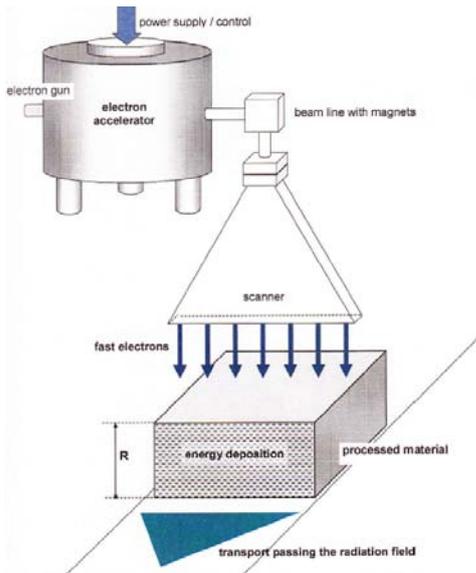


Abbildung 3: Prinzip der Elektronenbestrahlung

Ionisierende Strahlung mit genügend hoher Quantenenergie (kinetische Energie der Elektronen) kann eingesetzt werden, um gewünschte Energiemengen für chemische Veränderungen direkt in das Material einzubringen. Dabei geben die energiereichen Strahlen ihre Energie an das bestrahlte Material ab. Die in Bestrahlungsanlagen benutzten Quantenenergien (z. B. 10 MeV) liegen deutlich über den chemischen Bindungsenergien und Ionisationspotenzialen von Molekülen. Die dabei gewünschten strahlenchemischen Reaktionen finden nur in der Atomhülle und nicht in den Atomkernen statt. Damit wird gewährleistet, dass keine Kernumwandlungen auftreten können. Eine Entstehung von radioaktiven Stoffen im bestrahlten Material ist deshalb ausgeschlossen. Elektronenbeschleuniger-Anlagen weisen gegenüber den Gammabestrahlungsanlagen den Vorteil auf, dass sie als Strahlenquelle an- und abschaltbar sind. In Elektronenbeschleunigern werden keine radioaktiven Nuklide eingesetzt und es entsteht kein radioaktiver Abfall.

Die Elektronenenergie und die Reichweiten der Elektronen im bestrahlten Material korrelieren miteinander (ASTM, 2005). Je größer die benutzte Elektronenenergie ist, desto größer ist auch die Eindringtiefe der Elektronen ins Material (A1 auf Seite 46). Die Reichweiten der Elektronen hängen aber auch von der Dichte des bestrahlten Materials ab. Mit den genannten Parametern lässt sich die optimale Schichtdicke der geschütteten Holzhackschnitzel bestimmen. Die Schichtdicke und die damit gegebene Dosisverteilung im bestrahlten Material sind bei der benutzten Elektronenenergie dann als optimal zu bezeichnen, wenn die Oberflächendosis gleich der Unterseitendosis ist.

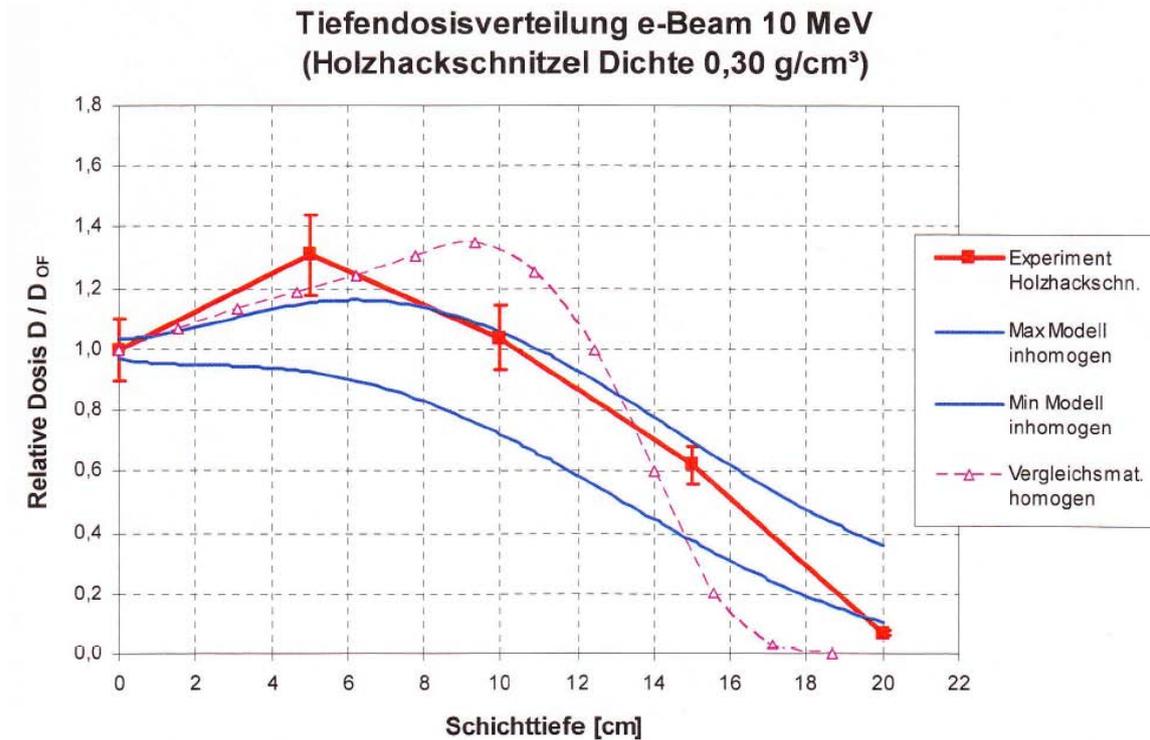


Abbildung 4: Tiefendosisverteilung der Holzhackschnitzel bei 10 MeV

Die Bestimmung der Tiefendosisverteilung in der Schüttung von Holzhackschnitzeln der Höhe 10 -12 cm wurde in einem Vorversuch experimentell ermittelt. Als Behälter für die Hackschnitzel fanden oben offene Wellpappkisten Verwendung, die die Tablare (Trays) des Transportsystems vollständig ausfüllten und eine Grundfläche von 118 cm x 123 cm aufwiesen. Unter Berücksichtigung der mittleren Dichte von 0,33 g/cm³ haben die Behälter eine Füllmasse von 52 kg.

Handelt es sich bei dem Bestrahlungsgut um inhomogenes Material wie die Holzhackschnitzel, so liegen im Volumen des Schüttgutes zusätzliche Grenzflächen vor. Bedingt durch die unregelmäßige Geometrie der Hackschnitzel und ihre unregelmäßige Anordnung im Volumen ergeben sich Raumbereiche mit geringerer und mit höherer mittlerer Dichte. Um die statistischen Dosischwankungen im Material besser beurteilen zu können, wurde ein gesondertes Experiment (Dose Mapping) durchgeführt, bei dem ein mit Hackschnitzeln gefüllter Behälter in mehreren Ebenen mit Dosimetern entsprechend einem Raumgitter bestückt wurde.

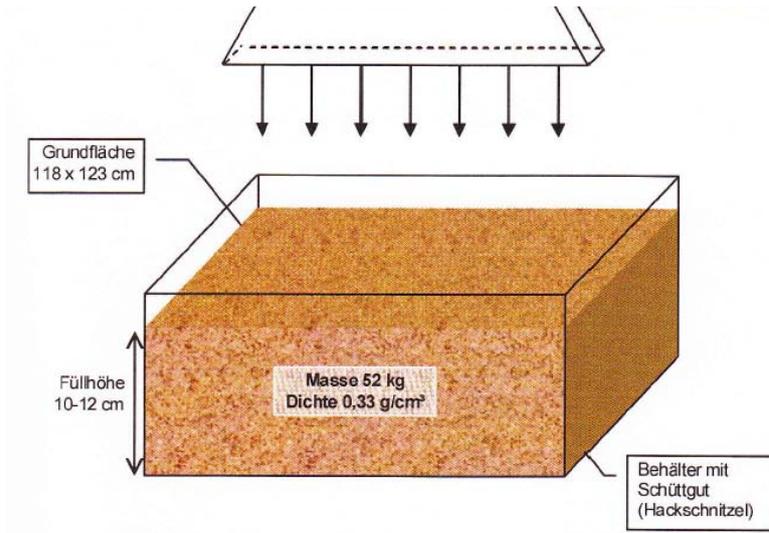


Abbildung 5: Behälter mit Holz hackschnitzeln bei der Bestrahlung

Die Auswertung der räumlichen Dosisverteilungen zeigte, dass in der Eintrittsebene (an der Oberfläche der Hackschnitzelschüttung) nur geringe Dosisunterschiede festgestellt werden konnten. In der mittleren Ebene waren sowohl absolut höhere Dosiswerte (entsprechend der Tiefendosisverteilung) als auch zunehmende Dosisunterschiede (infolge ungleichförmiger Streuung der Elektronen im inhomogenen Bestrahlungsgut) zu verzeichnen. Schließlich traten in der Bodenebene die größten Dosisunterschiede und gleichzeitig auch sehr geringe Dosiswerte auf. Die Lage des Dosismaximums in der mittleren Ebene konnte ebenso wie die Lage des Dosisminimums in der Bodenebene durch die nicht absolut konstant zu haltende Füllhöhe sowie die zufällige, unregelmäßige Verteilung der Hackschnitzel im Volumen und die dadurch verursachten Schwankungen der mittleren Dichte in einzelnen Raumbereichen erklärt werden. In Randbereichen kam es durch Streuung der Elektronen in die Umgebungsluft zu einer zusätzlichen Dosisreduzierung. Der in den Bestrahlungseinheiten auftretende Überdosisfaktor $D_{\text{Max}} / D_{\text{Min}}$ wurde beim Dose Mapping experimentell zu 2,36 bestimmt.

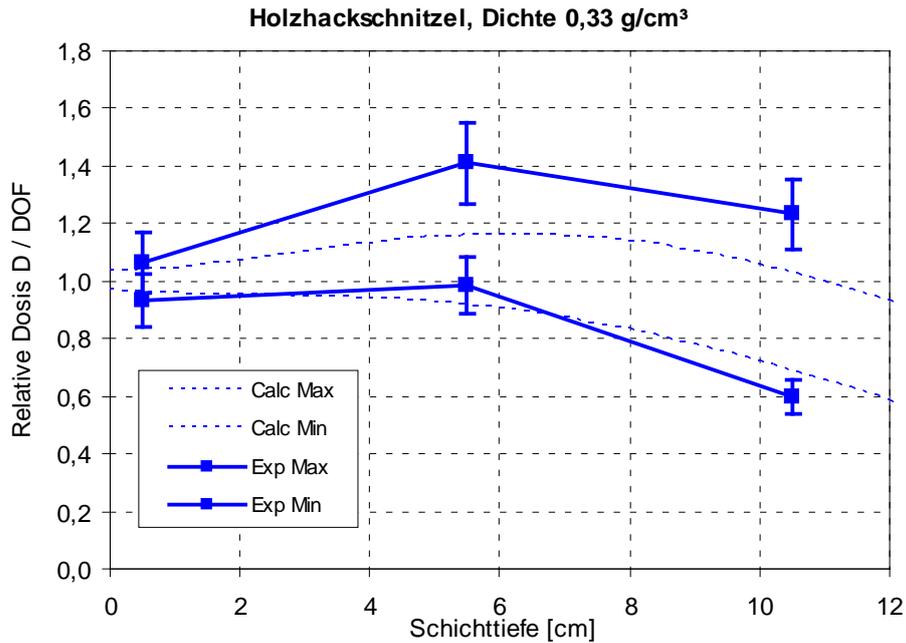


Abbildung 6: Ergebnis des Dose Mapping

Zum Nachweis der Prozessstabilität wurden Routinedosimeter eingesetzt, die in zeitlicher Folge an einzelnen Bestrahlungsbehältern an einer Referenzposition befestigt wurden. Während der über mehr als 16 Stunden laufenden Bestrahlung, bei der insgesamt 1.034 Behälter (Trays) mit Holz hackschnitzeln bestrahlt wurden, kamen 47 Routinedosimeter zum Einsatz. Im Mittel wurde jeder 22. Behälter mit einem Dosimeter ausgestattet (siehe Tabelle 5).

Unter Verwendung der beim Dose Mapping ermittelten Koeffizienten D_R/D_{min} und D_R/D_{max} werden die maximale und die minimale Dosis im Produkt (Holz hackschnitzel über alle 1.034 Trays) ermittelt:

- mittlere Dosis D_{mw} : 31,43 kGy
- maximale Dosis D_{max} : 44,66 kGy (incl. Fehler)
- minimale Dosis D_{min} : 16,68 kGy (incl. Fehler)

Tabelle 5: Einsatz der Routinedosimeter während des Großversuchs

Datum	Prozess-Phase	Start	Ende	Strahlzeit	Masse	Anzahl Trays	Durchsatz Masse pro Std.	Anzahl Routine-dosimeter
		Uhr	Uhr	h:min	kg	Stck.	t/h	Stck.
03.05.2011	Bestrahlung 1	06:30	10:00	03:30	11.819	223	3,4	25
	Bestrahlung 2	14:20	17:40	03:20	11.660	220	3,5	
	Bestrahlung 3	18:10	19:30	01:20	3.975	75	3,0	
04.05.2011	Bestrahlung 4	08:30	10:00	01:30	5.406	102	3,6	9
	Bestrahlung 5	12:30	17:30	05:00	16.324	308	3,3	13
	Bestrahlung 6	18:30	20:00	01:30	5.618	106	3,7	
Gesamt	Bestrahlung, ges.			16:10	54.802	1.034	3,4	47

Für alle Prozessabschnitte (1 - 6) wurden die Maschinenparameter der Bestrahlungsanlage (Elektronenenergie, Strahlstrom, Scanweite, Transportgeschwindigkeit) aufgezeichnet. Damit konnte nachgewiesen werden, dass bei allen 1.034 Bestrahlungseinheiten, die geforderten Prozessbedingungen konstant vorlagen. Es traten keine Prozessabweichungen auf.

Während des Großversuches in Radeberg wurde der Energieverbrauch erfasst. Dabei wurden berücksichtigt:

- Energieverbrauch des Elektronenbeschleunigers TT 300 einschließlich seiner direkten Subsysteme (Magnete, Vakuumpumpen, HF-System)
- Verbrauch aller weiteren Subsysteme der gesamten Anlage (Kühlung, Druckluftherzeugung; Lüftung, Transportsystem, Steuerung, Beleuchtung)

Das Energieflussschema der Elektronenbestrahlungsanlage ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Darin enthaltene Prozentangaben beziehen sich auf die insgesamt eingesetzte elektrische Energie.

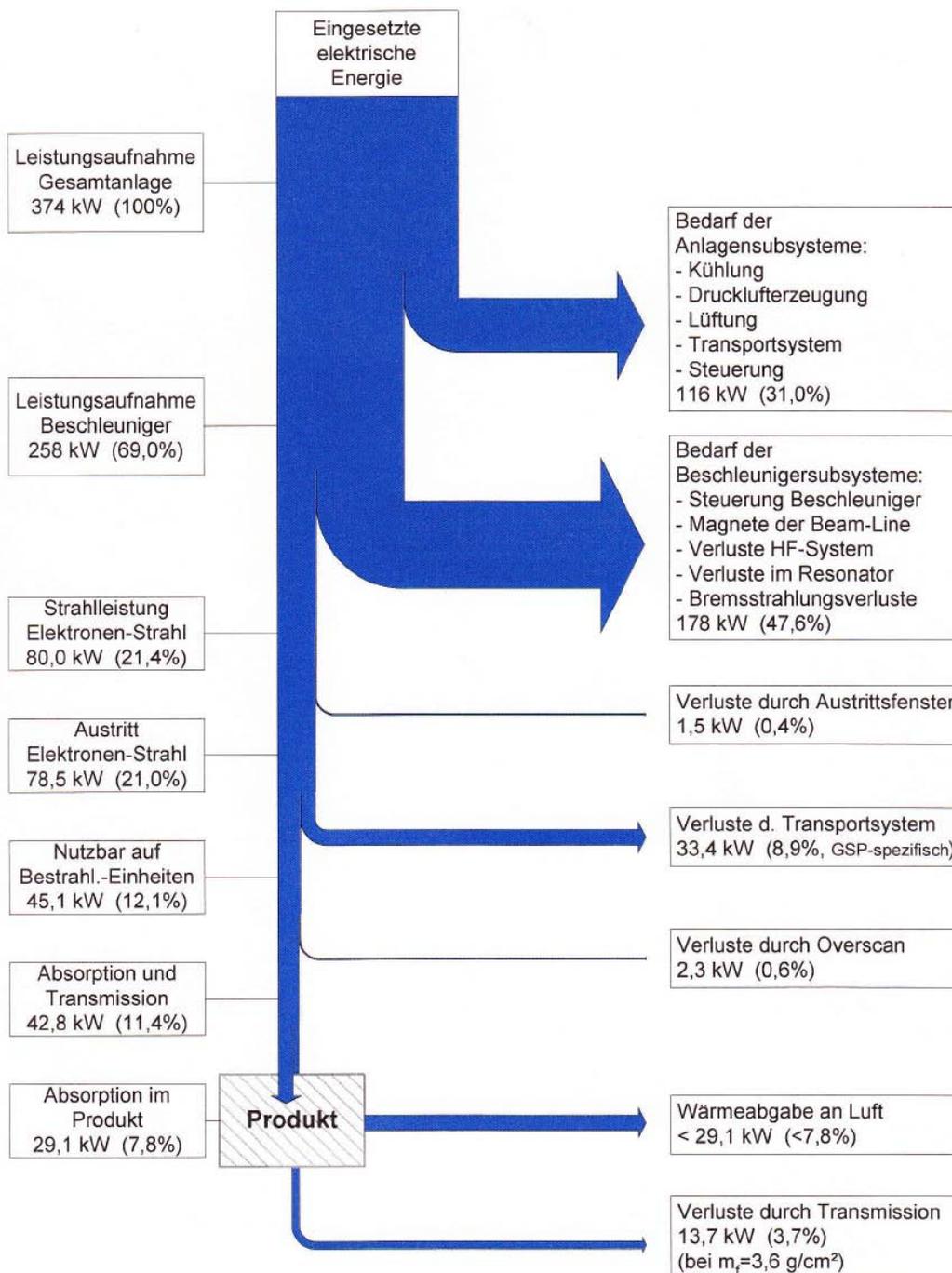


Abbildung 7: Energieflussschema der Elektronenbestrahlungsanlage

Während der Gesamtenergieverbrauch der Anlage und des Elektronenbeschleunigers während des Großversuches durch Zählerablesungen dokumentiert und die Strahlleistungsparameter direkt gemessen wurden, konnten die weiteren Angaben aus der Anlagenkonfiguration ermittelt werden. Dabei kann festgestellt werden, dass von 80 kW Strahlleistung immerhin 29,1 kW von den Holzhack-schnitzeln absorbiert wurden (siehe Abbildung 7). Der Wirkungsgrad der Strahlleistungsausnutzung liegt somit bei **36,4 %**.

Ein nicht unwesentlicher Teil der Strahlleistung (33,4 kW) steht beim Handling des Schüttgutes auf dem nicht für kontinuierlichen Produktstrom ausgelegten Transportsystem der Bestrahlungsanlage in Radeberg als Verlust an (Zwischenräume zwischen den Behältern auf dem Transportsystem). Die dadurch verursachte effektive Strahlzeitausnutzung lag im Großversuch nur bei 57,4 %, was einen spezifischen Energiebedarf von **110 kWh/t** Holzhackschnitzel bewirkte. Bei 100 % Strahlzeitauslastung durch ein optimiertes Transportsystem mit kontinuierlichem Produktstrom würde der spezifische Energiebedarf für die Bestrahlung bei **ca. 60 kWh/t** Holzhackschnitzel liegen.

Mit den Prozessdaten

- Leistung, mit der die Energie im Produkt absorbiert wurde (= 29,1 kW)
- Bestrahlungszeit im Großversuch (= 16:10 h) und
- bestrahlte Gesamtmasse der Holzhackschnitzel (= 54.802 kg)

kann die mittlere applizierte Energiedosis berechnet werden. Sie beträgt 30,9 kGy. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem tatsächlich gemessenen mittleren Dosiswert der Holzhackschnitzel von 31,4 kGy überein. Die Abweichung liegt bei < 2% und bestätigt damit die Richtigkeit der Energiebedarfsberechnung.

2.2.4 Zerfaserung und Papierherstellung

Die Zerfaserung der bestrahlten Holzhackschnitzel erfolgte in der TMP-Anlage in Schongau. Die TMP-Anlage ist für eine maximale Tagesleistung von 360 t otro Holzstoff ausgelegt. Die TMP-Erzeugung beinhaltet die Prozessstufen Hackschnitzelwäsche, Hauptmahlung (1. und 2. Mahlstufe), Rejektmahlung, Sortierung (Primär-, Sekundär- und Rejekt-sortierstufe), Eindickung und Lagerung. Es erfolgt meistens noch eine Bleiche, bevor der fertig aufbereitete Holzstoff nach Bedarf den 3 Papiermaschinen-Linien zudosiert werden kann.

Der Großversuch mit dem zuvor imprägnierten und bestrahlten Holzstoff fand am 11.05.2011 statt. 06:00 Uhr wurde der Durchsatz in der TMP-Anlage von 360 t otro/d auf 320 t otro/d reduziert und die Behälter mit den unbehandelten Hackschnitzeln der Normalproduktion leer gefahren. Während des Großversuches erfolgte keine Holzstoffbleiche.

Der Großversuch mit den behandelten Hackschnitzeln begann um 08:00 Uhr. In den folgenden 20 Minuten wurde die Leistungsaufnahme des Refiners 1 um 40 % reduziert. Durch Unterbeaufschlagung und Leistungsreduzierung des Refiners 1 sank aber auch der Trockengehalt von 47 % auf 41 % ab, was zu Leistungsschwankungen führte. Deshalb musste die Leistungsaufnahme im Refiner 1 in der Folgezeit wieder etwas angehoben werden. Dafür wurde im Refiner 2 die Leistung weiter abgesenkt. Nach einer Stunde Versuchszeit wurde ab 09:15 Uhr das niedrigste Niveau des Gesamtenergieeinsatzes in der TMP-Anlage bei 30 % (von 2050 kWh/t auf 1450 kWh/t) erreicht. 09:45 Uhr war der Großversuch beendet und alle behandelten Hackschnitzel durch die TMP-Anlage gefahren.

Der große Stapelturm zur Zwischenlagerung des aufbereiteten Holzstoffes hat ein Volumen von 2.500 m³. Das Niveau der Vorratsbütte wurde vor dem Großversuch abgesenkt aber wegen eines

kontinuierlichen Produktionsüberganges nicht leer gefahren. Da bestand das Problem, den Übergang vom unbehandelten Holzstoff (TMP-Normalproduktion; Versuchsvorlauf) zum behandelten Holzstoff (ETMP) genau zu erfassen, bevor dieser zur Papiermaschine weitergefördert wurde. Zur Markierung des Übergangs wurde 08:45 Uhr am Scheibenfilter 250 kg Streusalz zugegeben, was zu einem kurzzeitigen Anstieg der Leitfähigkeit im Holzstoff führen sollte. Die Leitfähigkeit musste fortlaufend kontrolliert werden. 11:15 Uhr wurde am Auslauf des Stapelturms ein Anstieg der Leitfähigkeit von 1.200 auf 1.800 μS registriert.

Beim Großversuch wurden an festgelegten Stellen jeweils Mischproben über 30 min. für Stoffuntersuchungen und zur Laborblattbildung entnommen (Abbildung 8):

	Versuchsnummer	Probe	Entnahmezeit (Start)	Desintegration	StD %	CSF ml	Fiberlab	RK-Blatt + Nutschenfilter	
Normalfahrweise	0	Momentanprobe	R 1	08:10	80 °C, 10 min	2	2	2	
		R 2	2		2	2			
Hauptversuch	1	Momentanprobe	R 1	08:30	80 °C, 10 min	2	2	2	
		R 2	2		2	2			
		Mischprobe 1 (2-3 Einzelproben)	Zuleuf DS 1	08:30	-	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 1		-	2	2	2	6 + 1
			Zuleuf R 3		50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 3		-	2	2	2	6 + 1
	MK - Fertigstoff	09:00	50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1		
	2	Momentanprobe	R 1	09:00	80 °C, 10 min	2	2	2	6 + 1
		R 2	2		2	2	6 + 1		
		Mischprobe 2	Zuleuf DS 1	09:00	-	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 1		-	2	2	2	6 + 1
			Zuleuf R 3		50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 3		-	2	2	2	6 + 1
	MK - Fertigstoff	09:30	50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1		
	3	Momentanprobe	R 1	09:30	80 °C, 10 min	2	2	2	
		R 2	2		2	2			
		Mischprobe 3	Zuleuf DS 1	09:30	-	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 1		-	2	2	2	6 + 1
Zuleuf R 3			50 °C, 3 min		2	2	2	6 + 1	
Gutstoff DS 3			-		2	2	2	6 + 1	
MK - Fertigstoff	10:00	50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1			
50% Red.	4	Momentanprobe	R 1	09:50	80 °C, 10 min	2	2	2	
R 2	2	2	2						
Versuchsnachlauf	5	Momentanprobe	R 1	11:00	80 °C, 10 min	2	2	2	
		R 2	2		2	2			
		Mischprobe 4	Zuleuf DS 1	11:00	-	2	2	2	6 + 1
			Gutstoff DS 1		-	2	2	2	6 + 1
			MK - Fertigstoff		50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1
			Zuleuf R 3		-	2	2	2	6 + 1
Gutstoff DS 3	50 °C, 3 min	2	2	2	6 + 1				

Abbildung 8: Probennahme in der TMP-Anlage

Gegen 12:00 Uhr gelangte der behandelte Holzstoff ETMP auf die Papiermaschine und 12:35 Uhr wurde der erste Tambour der Papiersorte UPM-News 45 g/m² mit 30 % ETMP 70 % DIP herausgefahren. Insgesamt wurden bis 13:45 Uhr 3 Tamboure mit behandeltem Holzstoff erzeugt.

2.3 Ergebnisse des Großversuches in Schongau

Die im Labor bezüglich der Energieeinsparung gefundenen positiven Ergebnisse konnten bei dem Großversuch in vollem Umfang bestätigt werden. Tatsächlich erscheint das durch weitere

Optimierungen erreichbare Einsparpotenzial noch größer zu sein, als das in Laborversuchen und im Großversuch bestätigte Potenzial von 30 % (siehe Abbildung 9). Diese Vermutung resultiert aus dem Umstand, dass im Großversuch trotz der starken Reduktion des spezifischen Gesamtenergiebedarfs der den Zerkleinerungszustand beschreibende CSF-Wert noch immer niedriger war als bei der konventionellen Fahrweise der TMP-Anlage. Eine weitere Absenkung des Gesamtenergiebedarfes der TMP-Anlage, konnte jedoch aus regelungstechnischen Gründen während des Großversuches nicht realisiert werden.

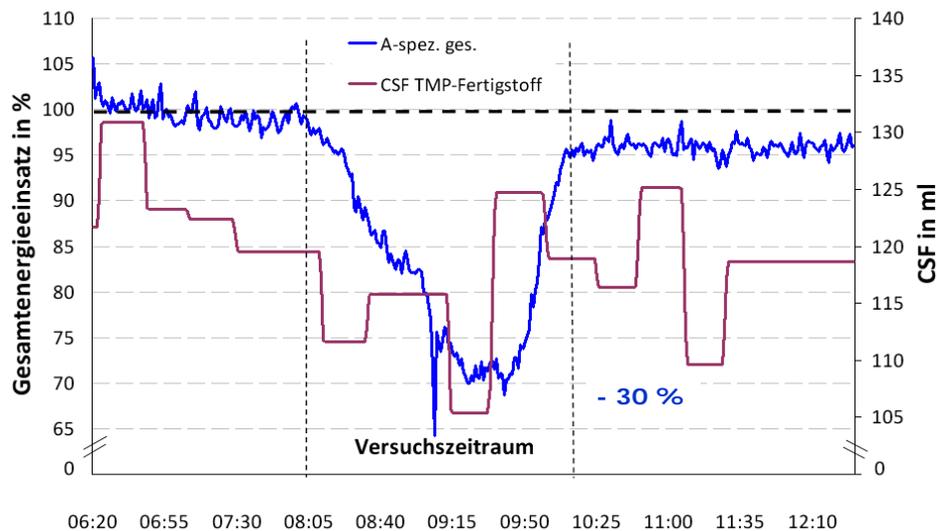


Abbildung 9: Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs der TMP-Anlage im Versuchszeitraum

Eine erste Qualitätsbeurteilung des unbehandelten (TMP) und des behandelten Holzstoffes (ETMP) liefern die Mischproben über 30 min im Ablauf des Aufbereitungsprozesses am Zulauf des Drucksortierers DS1, Gutstoff DS1, Zulauf Rejektsortierer 3, Gutstoff DS 3 und der Fertigstoff aus dem Mischkasten vor dem Stapelturm (siehe Abbildung 10). Dabei ist schnell eine Fehlinterpretation mit der Aussage - Festigkeitsverluste durch Faserkürzung - möglich. Am Zulauf DS1 weist der behandelte Holzstoff ETMP (blau) noch größere Festigkeitsunterschiede zum unbehandelten Holzstoff TMP (rot) auf, da beim ETMP mit vermindertem Energieeinsatz schonender zerkleinert wurde. Eine Erhöhung des Festigkeitspotenzials ist im fortlaufenden Aufbereitungsprozess noch möglich. Die folgende Abbildung zeigt, dass die beiden Kurven (behandelt und unbehandelt) sich nach der Sortierung beim Fertigstoff weitestgehend angeglichen haben.

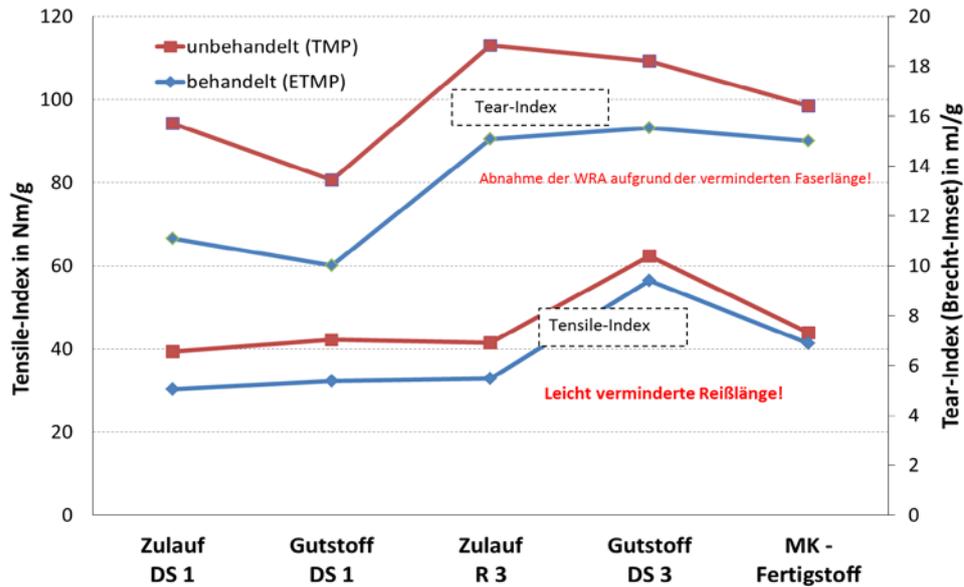


Abbildung 10: Entwicklung der Festigkeitswerte im Verlauf des Aufbereitungsprozesses

Um die Frage, ob die durch Elektronenbestrahlung der Holzhackschnitzel eine Faserlängenverkürzung zu Folge hat, zu klären, wurden Laboruntersuchungen mit elektronenbestrahlten, imprägnierten und unbehandelten Hackschnitzeln durchgeführt. Hackschnitzel können durch Kochung in Eisessig und Wasserstoffperoxid so aufgeschlossen und zerfasert werden, dass per Faseranalyse oder RK-Blattbildung weitere Untersuchungen mit dem Holzstoff durchgeführt werden können. Bei der Behandlung Hackschnitzel mit dem Lösemittel wird das Lignin, das konzentriert in der Mittellamelle zwischen den Holzfasern vorliegt und diese miteinander verbindet, langsam aus dem Hackschnitzel herausgelöst. Die Mazerierungslösung verfärbt sich gelb. Mit dem mazerierten, ausgewaschenen und mit einem Stabmixer zerfaserten Holzstoff erfolgt im Anschluss daran eine FiberLab-Analyse.

Wie in der folgenden Abbildung 11 zu sehen ist, zeigen nach einer Mazerierung weder die behandelten (elektronenbestrahlt, imprägniert) noch die unbehandelten Holzstoffe Faserlängenverkürzungen auf (blaue Kurve). Vom unbehandelten über den imprägnierten zum elektronenbestrahlten Holzstoff nimmt aber die Fibrillierung (rote Kurve) zu.

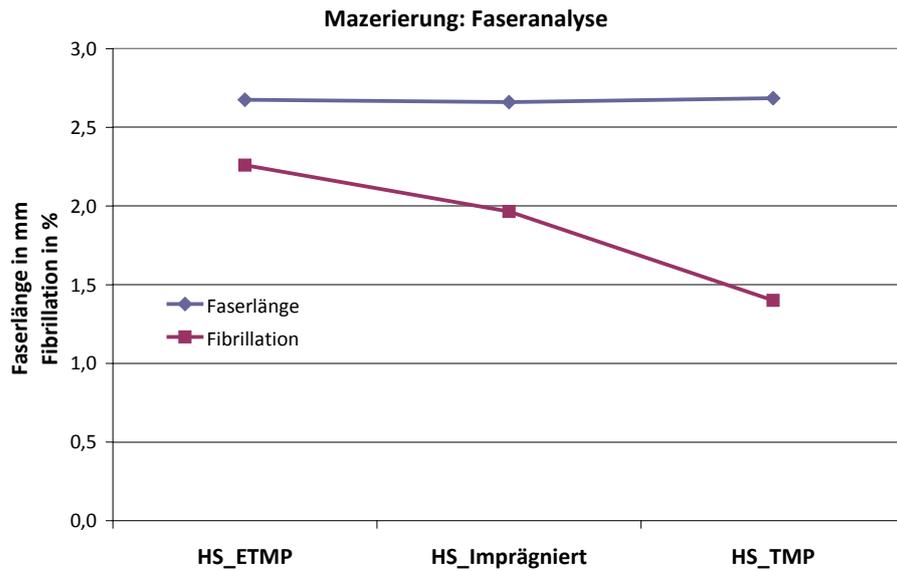


Abbildung 11: Faserlänge und Fibrillierung von behandelten und unbehandelten Holzstoffen

Die Faserlängenverteilung nach einer Mazerierung zeigt wenig Unterschiede. Beim behandelten Holzstoff sind anteilig mehr Feinstoffe vorhanden als beim unbehandelten Holzstoff, was auch die Zunahme der Fibrillierung bei den behandelten Holzstoffen erklären würde (Abbildung 12).

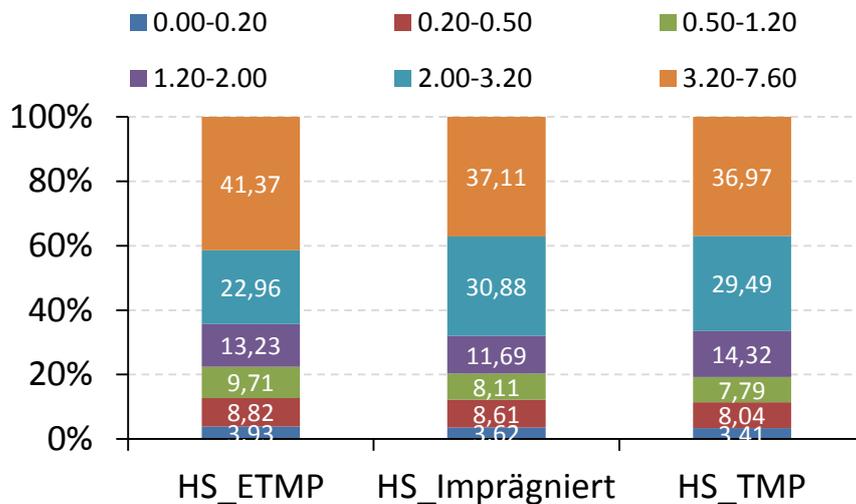


Abbildung 12: Faserlängenverteilung von behandelten und unbehandelten Holzstoffen

Bezüglich der Produktqualität des aus dem Holzstoff ETMP und DIP gefertigten Zeitungsdruckpapiers konnte beim Großversuch keine über den Bereich der Messgenauigkeit hinausgehende positive oder negative Änderung festgestellt werden. Dieses Papier wurde in einer Zeitungsdruckerei ohne Probleme verarbeitet. Bei den folgenden Abbildungen sind ausgewählte Papiereigenschaften des Zeitungsdruckpapiers aus dem Großversuch einschließlich des Vor- und Nachlaufes den Monatsmittelwerten des letzten Halbjahres gegenübergestellt (siehe Abbildung 13-Abbildung 17).

Die Darstellungen beweisen, dass das produzierte Papier im oberen Schwankungsbereich der Normalproduktion liegen.

Hauptteil

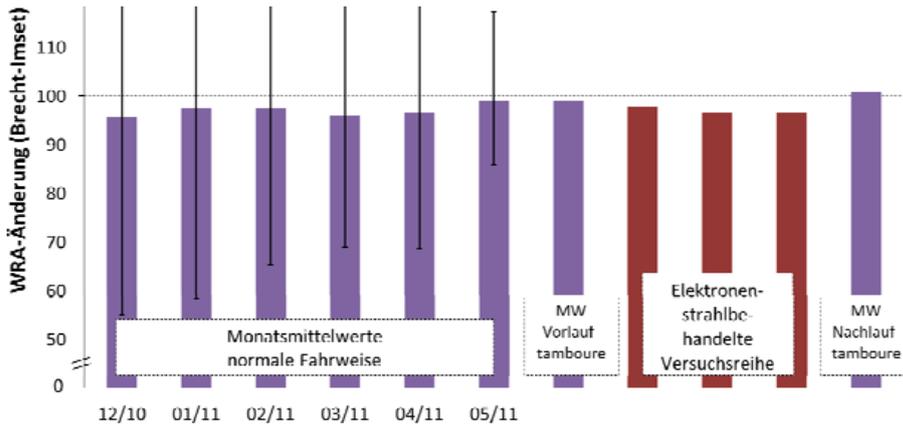


Abbildung 13: Weiterreißarbeit Zeitungsdrukpapier

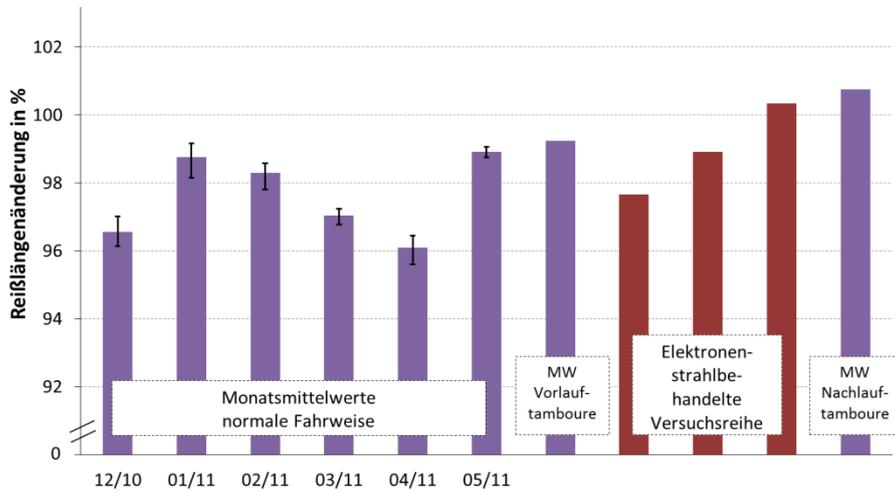


Abbildung 14: Reißlänge Zeitungsdrukpapier

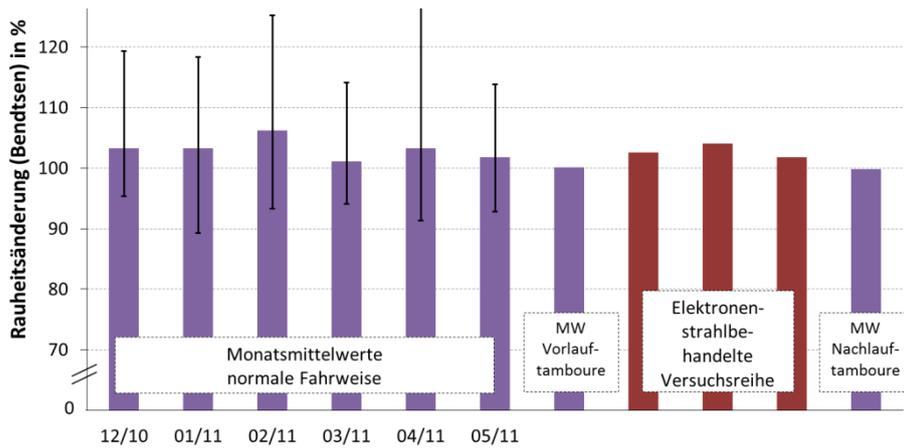


Abbildung 15: Rauigkeit Zeitungsdrukpapier

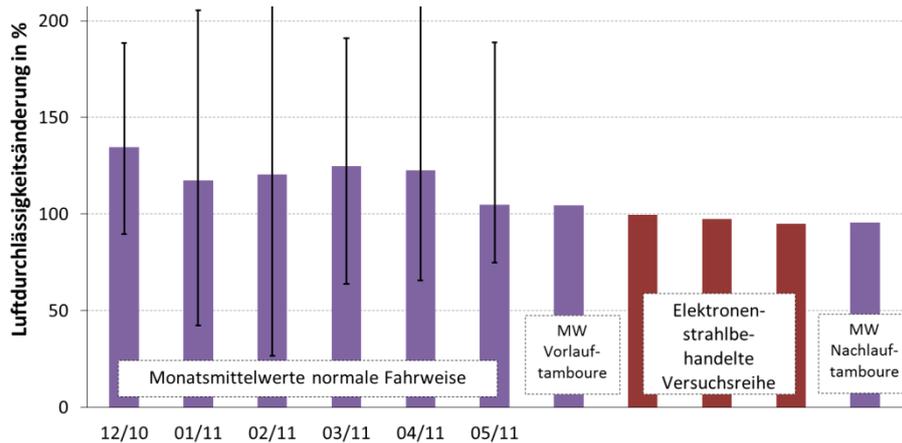


Abbildung 16: Luftdurchlässigkeit Zeitungsdruckpapier

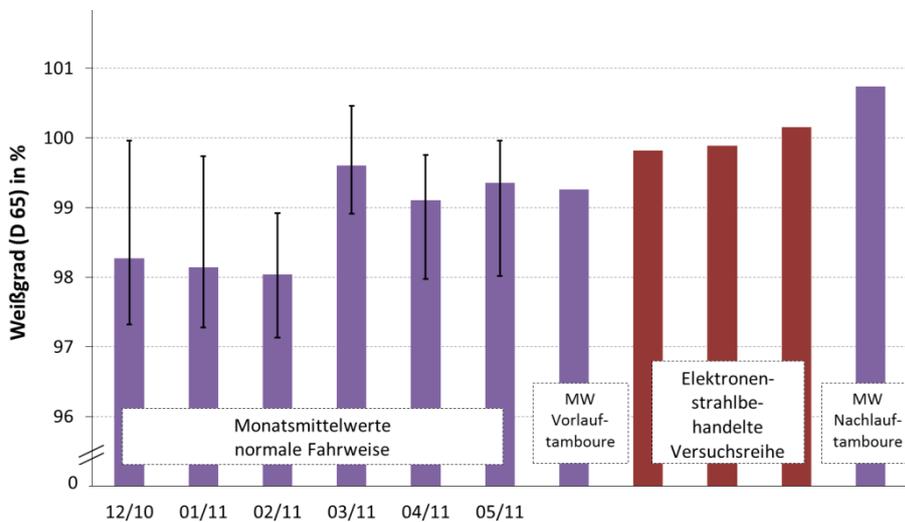


Abbildung 17: Weißgrad (D 65) Zeitungsdruckpapier

Die Bestrahlung bei der ETMP-Herstellung bewirkt eine Reduzierung des spez. Energiebedarfes bei der Zerfaserung um 30 %. Eine Natriumbisulfit-Imprägnierung der Holzhackschnitzel vor der Bestrahlung reduziert dieses Einsparungspotenzial. Es ist also möglich, Papier mit gleichbleibender Qualität herzustellen aber mit erheblich niedrigerem Energieeinsatz.

2.4 Nachfolgende Untersuchungen zur Wirkung von Imprägnierung und Bestrahlung

Beim Großversuch blieb die Frage unbeantwortet, ob vor der Bestrahlung der Holzhackschnitzel noch eine Imprägnierung als Vorbehandlung notwendig ist. Vor und nach dem Großversuch erfolgten dazu ergänzende Laboruntersuchungen mit Variationen der Strahlendosis bei der Bestrahlung bzw. des SO₂-Gehaltes bei der Imprägnierung der Holzhackschnitzel. Diese Untersuchungen sollten die Einflüsse der unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden auf das Lignin und die Kohlenhydrate aufzeigen.

Von den Versuchsproben, die nach unterschiedlicher Vorbehandlung der Hackschnitzel aus Fichtenholz hergestellt worden waren, sollte die Viskosität bestimmt werden (siehe Tabelle 6. Die Viskosität von Faserstoff-Proben korreliert zu deren mittleren molekularen Masse bzw. zum Polymerisationsgrad DP (Levlin, et al., 199). Somit ist die Abnahme der Viskosität eines Faserstoffes ein Nachweis für den Abbau der Cellulose bei einem technologischen Prozess, wie z.B. Aufschluss und Bleiche. Es wurde angenommen, dass aus den dabei erzielten Ergebnissen Rückschlüsse gezogen werden können, inwieweit die Vorbehandlung der Hackschnitzel vor der TMP-Erzeugung zu einer Schädigung der Cellulose führt. Folgende Proben standen für die Untersuchungen zur Verfügung (Schmieder, 2011):

Tabelle 6: Probenübersicht

V1	Referenz (ohne Vorbehandlung)
V2a	Imprägnierung (2 kg/t); Bestrahlung (30 kGy)
V2b	Imprägnierung (5 kg/t); Bestrahlung (30 kGy)
V2c	Imprägnierung (10 kg/t); Bestrahlung (30 kGy)
V3	Bestrahlung (30 kGy)
V4	Imprägnierung (5 kg/t)

(Imprägnierung jeweils mit Bisulfit-Lösung in kg SO₂/t trockenem Holz; Bestrahlung: Elektronenbeschleuniger 10 MeV)

Die Proben wurden einer schonenden Delignifizierung mit Natriumchlorit unterzogen. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Grenzviskositätszahl nach ISO 5351/1 (ISO 5351/1, 1981).

Die Delignifizierung erfolgte mit Natriumchlorit-Lösung (80 mg Natriumchlorit pro 1 g Faserstoff; pH-Wert 4,0, 40 h im Schüttelbad bei 40°C) (Klauditz, 1957). Diese Delignifizierung wurde für jeden Faserstoff 3-fach durchgeführt. Nach jedem Arbeitsschritt erfolgte eine Zwischenwäsche, so dass für den jeweils nächsten Delignifizierungsschritt die Chemikaliendosierung erneut vorgenommen wurde. Die so delignifizierten Proben enthielten noch Restlignin, waren aber bei der Viskositätsbestimmung gut in Cuen löslich.

Parallel zur Viskositätsbestimmung erfolgte eine Analyse des Restligningehaltes mit dem RAMAN-Spektrometer (Feldner, 2011). Die Proben wurden in trockenem Zustand durch Mahlung homogenisiert und anschließend vermessen. Als Maß für den Ligningehalt der Proben diente das Verhältnis der Raman-Peak-Intensitäten bei verschiedenen Wellenzahlen in Relation zu einer Eichkurve aus Proben mit definiertem Ligningehalt.

Es stand die Vermutung, dass aufgrund des noch relativ hohen Ligningehaltes (ca. 13 %) nach der ersten 3-fachen Delignifizierung der Lösungszustand bei der Viskositätsbestimmung noch nicht optimal war (siehe Abbildung 18). Deshalb wurden die Proben weiter delignifiziert (6-fach bzw. 9-fach). Danach wurden wiederum die GVZ und der Ligningehalt ermittelt. Der Ligningehalt des Fichtenholzstoff-

fes wurde durch 9-fache Delignifizierung von ca. 30 % im Ausgangsstoff auf ca. 5 % gesenkt (siehe Tabelle 7). Mit zunehmender Delignifizierung verbessert sich der Lösungszustand entscheidend und die gemessenen Viskositätswerte der unbehandelten bzw. nur imprägnierten Faserstoffproben erreichen eine Größenordnung, die fast dem Bereich von Zellstoffen entspricht. Demgegenüber ist der Anstieg mit zunehmender Delignifizierung bei den bestrahlten Proben nur moderat. Eine 6-fache Delignifizierung erscheint ausreichend. Danach ändern sich die Viskositätswerte kaum noch. Die ausreichend delignifizierten Proben sind gut miteinander vergleichbar.

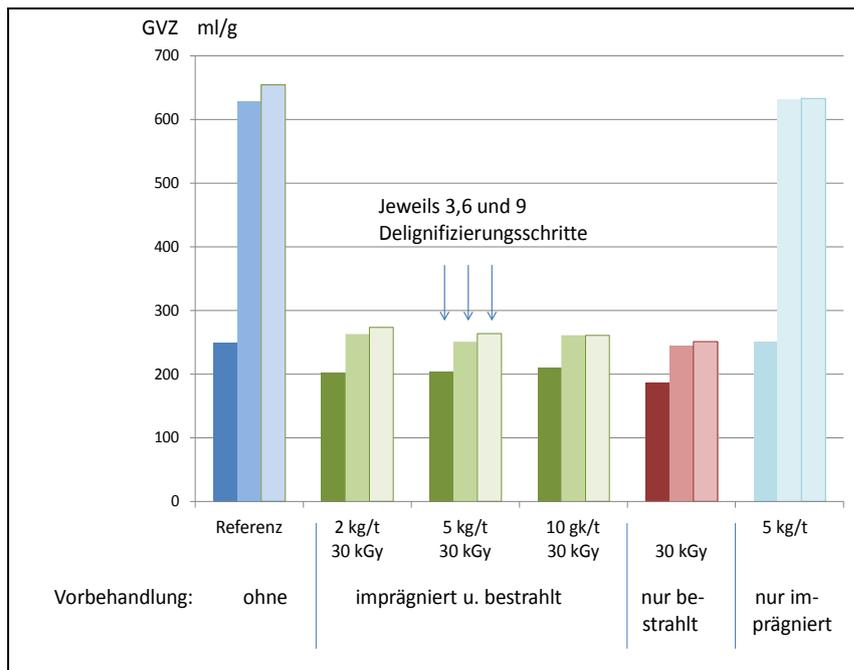


Abbildung 18: Viskosität (GVZ) von TMP-Proben nach verschiedener Vorbehandlung sowie Delignifizierung

Die Bestrahlung von Hackschnitzeln senkt die Viskositätswerte und damit den Cellulose-DP von daraus hergestelltem ETMP sehr stark ab. Eine Bisulfitbehandlung vor der Bestrahlung verhindert das nur in begrenztem Maße. Dabei ist aber zu beachten, dass ein Abbau des Polymerisationsgrades nicht unbedingt mit einer Faserkürzung gleichzusetzen ist.

Tabelle 7: Delignifizierung von TMP-Proben

Probe	Ligningehalt					
	3-fach delignifiziert		6-fach delignifiziert		9-fach delignifiziert	
	Mittelwert %	Schwankung +/-	Mittelwert %	Schwankung +/-	Mittelwert %	Schwankung +/-
V1	13,8	0,8	7,3	0,7	5,74	0,9
V2a	13,3	2,2	7,4	0,8	5,38	0,19
V2b	12,6	0,7	6,9	0,3	5,52	0,39
V2c	13,8	1,3	7,1	0,3	5,26	0,44
V3	13,9	1,4	7,45	0,6	5,65	0,82
V4	13,4	0,9	7,4	0,3	5,34	0,08

Die beiden Vorbehandlungsstufen der Holzhackschnitzel vor der Zerkleinerung zeigen gegensätzliche Wirkungen hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs, des Entwässerungsverhaltens aber auch der Festigkeits-, Oberflächen-, und optischen Eigenschaften des Holzstoffes. So liegt der spezifische Energiebedarf für die Zerkleinerung imprägnierter und bestrahlter Holzhackschnitzel um ca. 30 % niedriger als der von unbehandelten Hackschnitzeln. Durch eine Imprägnierung der Holzhackschnitzel vor der Bestrahlung wird dieses Energieeinsparpotenzial wieder reduziert.

Die Holzhackschnitzel werden durch die Bestrahlung strukturell geschwächt (Versprödung) wodurch ihr Widerstand gegenüber den thermomechanischen Einwirkungen bei der Zerkleinerung signifikant sinkt. Demgegenüber erhöht eine Imprägnierung die Resistenz gegenüber mechanischen Kräften durch eine Flexibilisierung der Fasern (Sulfonierungs- und Hydrolyse-Reaktionen des Lignins).

Durch die Optimierung des Zerkleinerungsprozesses (schonendere Mahlung) sind bei ETMP ohne Vorimprägnierung weitere Energieeinsparpotenziale zu erwarten. Dieser Holzstoff lässt sich auch besser entwässern, was eine Produktivitätssteigerung an Papiermaschinen ermöglichen könnte.

Durch eine chemische Nachbehandlung (nach der Zerkleinerung) könnten weitere Verbesserungen der Holzstoffeigenschaften erreicht werden.

2.5 Grundkonzept einer kontinuierlichen Hackschnitzelbestrahlung

2.5.1 Verfahrenstechnische Aspekte

Aus verfahrenstechnischer Sicht würde die Integration der Bestrahlung keine großen Anpassungen bestehender Stoffaufbereitungsanlagen erfordern. Wichtig ist jedoch die Stelle optimale Anordnung der Bestrahlungseinheit im Prozessablauf. Hierfür bieten sich drei Alternativen an:

1. direkt am Lagerplatz der Holzhackschnitzel,
2. in der Förderstrecke zwischen Pile und Hackschnitzelwäsche oder
3. nach der Hackschnitzelwäsche aber vor der Dampfbehandlung.

Die Positionen sind in der nachfolgenden Abbildung 19 markiert.

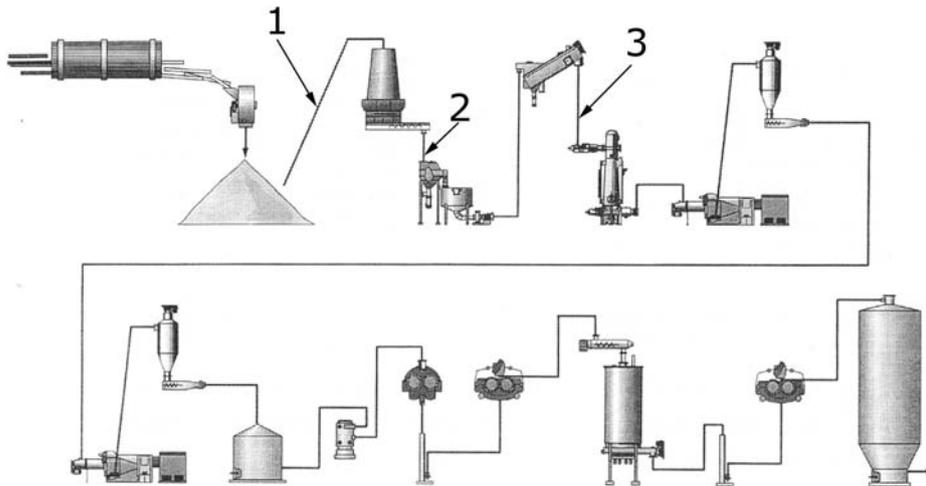


Abbildung 19: Potenzielle Möglichkeiten zur Eingliederung der Bestrahlung in den TMP-Aufbereitungsprozess, Quelle modifiziert nach (Johan Gullichsen, 1999)

Wir würden den Standpunkt 1 empfehlen, da hier üblicherweise genügend Platz zur Verfügung steht und die Hackschnitzel an dieser Stelle den geringsten Feuchtegehalt besitzen. Dies ist für den Durchsatz außerordentlich wichtig, weil im Vergleich zu den anderen Stellen geringere Feuchten in den Holzhackschnitzeln größere Schütthöhe auf dem Förderband zulassen.

Anpassungen müssen allerdings innerhalb des Bestrahlers durchgeführt werden, maßgeblich muss der Durchsatz und die Beschaffenheit des Förderbands für die Bestrahlung ausgelegt werden.

2.5.2 Bestrahlungstechnik / Anlagentyp / Transportsystem

Die für die Papierindustrie zu behandelnden großen Mengen von Holzhackschnitzeln schließen eine OFF-Line-Bestrahlung bei einem (Bestrahlungs-) Dienstleistungsunternehmen aus. Die zu behandelnden Mengen können nur ON-Line in einer Industrieanlage behandelt werden, die auf diesen einen Einsatzzweck zugeschnitten ist.

Der Produktstrom von Holzhackschnitzeln muss mit konstanter Transportgeschwindigkeit und in konstanter Form durch die Bestrahlungszone geführt werden. Das kann entweder

- mit einem horizontalen Transportsystem erfolgen oder
- durch vertikalen Transport, z.B. freien Fall aus konstanter Höhe.

In der Bestrahlungszone kann das horizontale Transportsystem im einfachsten Fall ein Fließband sein, auf dem die Holzhackschnitzel so geführt sind, dass sie ein definiertes und konstantes Querschnittsprofil aufweisen (Abbildung 20). Diese Anordnung stimmt weitgehend mit der erprobten Anordnung im Großversuch überein. Das Transportsystem verfügt dann jedoch nicht über einzelne Behälter. Es ist so gestaltet, dass ein ununterbrochener Produktstrom entsteht. Der Vorteil dieser Transportvariante liegt in der hohen, möglichen Strahlleistungsausnutzung, da hier die höchste effektive Dichte des Schüttgutes praktikabel erreicht wird.

Weil dieses spezielle Förderband ständig mit intensiver Strahlung beaufschlagt wird, muss es aus strahlenbeständigem, also nicht aus organischem Material gefertigt sein. Außerdem muss die Aufheizung durch die Strahlung berücksichtigt werden, die von der spezifischen Wärmekapazität des Materials abhängt.

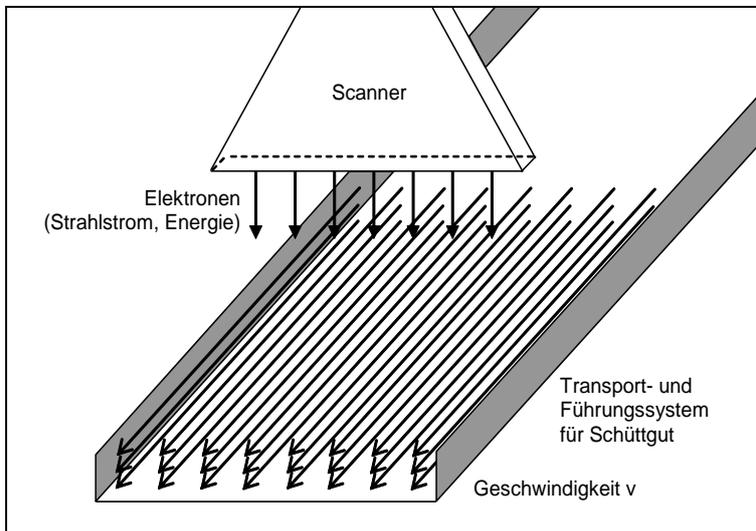


Abbildung 20: Horizontales Transport- und Führungssystem für Schüttgut in der Bestrahlungszone

Die Problematik des strahlenbeständigen Fließbandmaterials kann umgangen werden, wenn man den vertikalen Transport durch die Strahlzone im freien Fall wählt. Fällt das Schüttgut aus konstanter Höhe aus einem geeigneten Führungssystem, so stellt sich eine der Höhe entsprechende konstante Fallgeschwindigkeit ein, die als Transportgeschwindigkeit zu berücksichtigen ist. Diese Technologie wird bei der industriellen Bestrahlung von Saatgut zur Entkeimung angewandt (Schumann, 2012).

Die technische Problematik besteht hier wohl eher darin, einen möglichst massereichen, ununterbrochenen Produktstrom zu erzielen. D.h. der Abstand zwischen den im freien Fall befindlichen Elementen der Holz hackschnitzelmasse darf nicht wesentlich größer sein als der Abstand der Teilchen in der Schüttmasse. Je geringer die effektive, mittlere Dichte des Produktstromes wird, umso schlechter wird die Strahlleistungsausnutzung, d.h. der energetische Wirkungsgrad sinkt. Da aber gerade die Energieeinsparung das wesentliche Ziel des Projektes ist, wäre zu prüfen, ob durch geeignete technologische Hilfseinrichtungen ein massereicher Hackschnitzelstrom zu erreichen ist.

Aus Strahlenschutzgründen muss das Transportsystem für die Produktzufuhr zum Bestrahlungsraum und für die Produktabfuhr aus dem Bestrahlungsraum in Form eines Labyrinthes gestaltet werden. Durch die Produktwege darf kein direkter Strahlenpass in Bereiche entstehen, in denen sich Personal aufhält. Deshalb muss das Transportsystem / Förderband mehrmals um Ecken geführt werden, die sowohl horizontal als auch vertikal angeordnet sein können. Dieses Labyrinth muss für Wartungsarbeiten auch den Zugang von Personal erlauben. Der Zugang für Personal muss sicherheitstechnisch verriegelt sein. Das gleiche Erfordernis besteht für den Zugang zum Beschleunigerraum.

2.5.3 Elektronenenergie

Grundsätzlich kommen bei der Wahl der Leistungsparameter eines Elektronenbeschleunigers für eine Holzhackschnitzel-Bestrahlungsanlage sowohl hohe Elektronenenergien (5 - 10 MeV) als auch mittlere Elektronenenergien (2,5 - 5 MeV) infrage. Entscheidend dafür ist die max. Elementgröße der Holzhackschnitzel, die zu durchdringen ist, und, wie sich der Materialstrom der Holzhackschnitzel in der Bestrahlungszone gestalten lässt, insbesondere seine Schichtdicke.

Industrielle Bestrahlungsanlagen können nach (StrlSchV, 2001) bis max. 10 MeV genehmigt werden. Für die zu behandelnden Holzhackschnitzel mit einer mittleren Dichte von $0,33 \text{ g/cm}^3$ kann bei vorgegebener Schichtdicke die dafür erforderliche Mindest-Elektronenenergie abgeschätzt werden. Unter obiger Bedingung (max. 10 MeV zulässig) sind also Schichtdicken von max. 12 cm möglich (Abbildung 21).

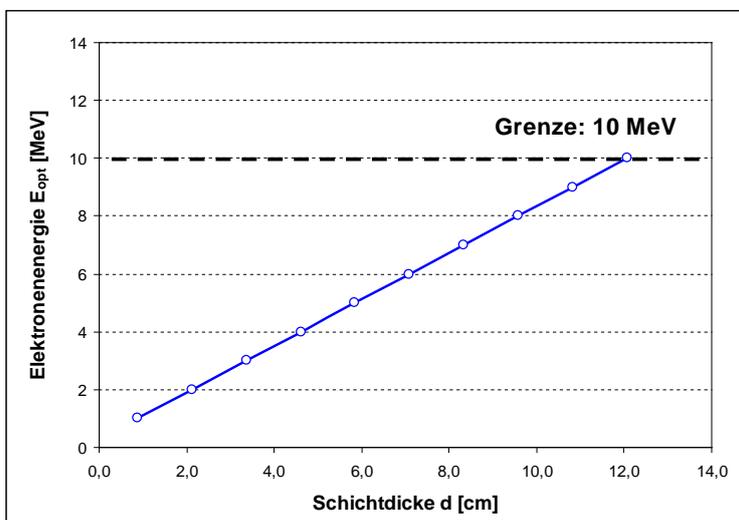


Abbildung 21: Optimale Elektronenenergie für Einseitenbestrahlung von Holzhackschnitzeln (mittlere Dichte von $0,33 \text{ g/cm}^3$)

Die minimale Energie, die bei einer Einseitenbestrahlung erforderlich ist, ergibt sich durch die Optimierung der flächenbezogenen Masse auf das Optimum des Überdosisfaktors (Dosis an der Unterseite gleich der Dosis an der Oberseite).

Bei den mittleren Elektronenenergien (2,5 - 5 MeV) ist das Verhältnis von zulässiger Schichtdicke zur Elementgröße der Holzhackschnitzel schon deutlich vermindert, was zu einer relativ ungleichmäßigeren Belegung des Transportsystems und damit zu größeren Dosisinhomogenitäten führt. Daher wären möglichst hohe Elektronenenergien (5 - 10 MeV) für eine industrielle Holzhackschnitzel-Bestrahlungsanlage zu bevorzugen.

2.5.4 Gleichförmigkeit der Bestrahlung

Neben der Elektronenenergie gibt es weitere Einflussgrößen auf die Gleichförmigkeit der Bestrahlung (Überdosisfaktor):

- Gleichförmigkeit der Transportgeschwindigkeit
- Gleichförmigkeit der Eigenschaften des Produktstromes (mittlere Dichte, Feuchtigkeitsgehalt)

- Geometrie des Strahlenfeldes und des Materialstroms am Randbereich der Fördereinheit
Die Gleichförmigkeit der Transportgeschwindigkeit und der Eigenschaften des Produktstromes soll hier nicht diskutiert werden, da diese Größen direkt mit der Technologie der Hackschnitzelproduktion zusammenhängen und nicht spezifisch bestrahlungstechnologisch sind.

Die Rolle der Geometrie des Strahlenfeldes und des Materialstroms am Randbereich der Fördereinheit werden nachfolgend betrachtet.

Geometrie des Strahlenfeldes / Overscan

Beim Betrieb der Anlage muss gewährleistet sein, dass auch am Randbereich der Fördereinheit, also dort, wo auch das gescannte Strahlenbündel in seiner Breite begrenzt ist, die Streuung der Elektronen zu keinen zusätzlichen Dosisabsenkungen im Produkt führt. Das wird üblicherweise dadurch erreicht, dass die Strahlbreite um den sog. Overscan (x_{osc}) größer eingestellt wird, als die maximale Breite des Produktes, die durch die Breite des Behälters mit dem Schüttgut vorgegeben ist und mit der Nutzbreite x_N übereinstimmen soll. Auf diese Weise wird im Bereich der mit dem Produkt belegten Breite des Transportsystems (Tablarbreite = Nutzbreite) eine Homogenität der Dosisleistung an der Produktoberfläche erreicht, bei der die Dosisabweichungen vom Mittelwert kleiner als z.B. < 5 % sind (Wert an der Anlage GSE 80 von in Radeberg).

Ohne den Overscan wären Dosisabweichungen bis zu 100 % möglich; mit Overscan ergeben sich Strahlleistungsverluste in der Größenordnung von 3 %.

Geometrie des Materialstroms / Monte-Carlo-Simulation

Die Grenzfläche des Schüttgutes in Scanrichtung (x) ist trotz des Overscan besonderen Streubedingungen der Elektronenstrahlung ausgesetzt, die dazu führen, dass im Volumen des Schüttgutes eine unvermeidliche Dosisabsenkung gegenüber der zentralen Zone auftritt. Dieses ist im Dose Mapping nur andeutungsweise zu erkennen. Das liegt daran, dass bei der experimentellen Bestimmung der Dosisverteilung der Randbereich der Schüttung von Holz hackschnitzeln nur unzureichend mit Dosimetern bestückt werden kann.

Hier ist eine Monte-Carlo-Simulation der Elektronenbestrahlung des entsprechenden Bereiches eine geeignete Methode, um zu Aussagen über die Gesamt-Dosisverteilung, insbesondere diese Randzone zu gelangen.

Die Methode der Monte-Carlo-Simulation gehört bei der Modellierung von Bestrahlungsprozessen zum Stand der Technik. Bei SHR wird das Programm EGS-Ray eingesetzt [Schumann 2012]. Mit dieser Methode kann die räumliche Dosisverteilung im gesamten Volumen des Bestrahlungsgutes detaillierter dargestellt werden. Es sollte eine Untersuchung mit den beim Großversuch eingesetzten 10 MeV-Elektronen stattfinden.

Für diesen Produktstrom genügt dann die Bestimmung der Dosisverteilung in der Ebene X-Z entsprechend der Darstellung in Abbildung 22. Bei der Monte-Carlo-Simulation des Produktes muss in der Y-Richtung nur ein schmaler Volumenbereich analysiert werden. Die Grenzfläche in der Transportrichtung am Anfang bzw. Ende eines langen Bestrahlungszyklus kann dabei außer Acht gelassen werden. Die dargestellte und analysierte Teilmenge ist dadurch für den gesamten Produktstrom repräsentativ.

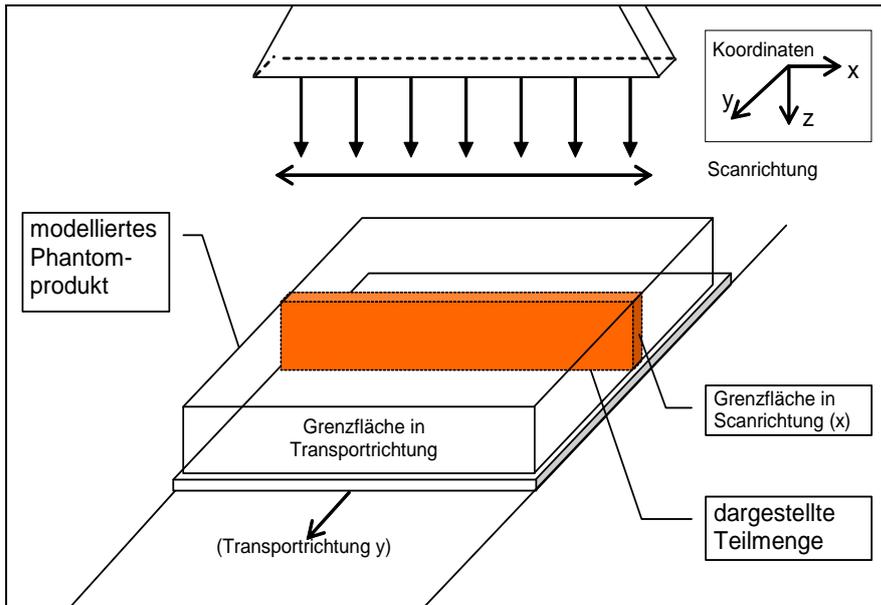


Abbildung 22: Schemadarstellung für modellierte Produktmenge bei der Monte-Carlo-Simulation

Für die Modellierung des inhomogenen Materials Holzhackschnitzel muss ein Verfahren angewandt werden, das wir als Schichtenmodell bezeichnen. Die Modellierung der Holzhackschnitzel erfolgt dabei durch ein Phantomprodukt gleicher mittlerer Dichte ρ_{eff} , bestehend aus Schichten eines geeigneten Materialäquivalents.

Mit mehreren gesonderten MC-Simulationen kann der Übergang vom homogenen Produkt zum Schüttgut mit zufälliger Verteilung seiner Elemente und die Auswirkungen auf die Dosisverteilung aufgezeigt werden [Schumann 2012].

Dabei wird deutlich, dass sich bei der maximal möglichen Unordnung der Hackschnitzelverteilung auch im zentralen Bereich des Förderprofils lokale Dosisreduzierungen in der gleichen Größenordnung wie im Randbereich ergeben, da die Streuwirkungen das gleiche Ausmaß annehmen. Die Dosis nimmt Werte zwischen 15 und 45 kGy an, wenn der Mittelwert bei 30 kGy liegt, der Überdosisfaktor erreicht einen Wert von 3,08, die Standardabweichung ist 15,5 %. Die Dosisverteilung in Dosisklassen ist in Abbildung 23 dargestellt.

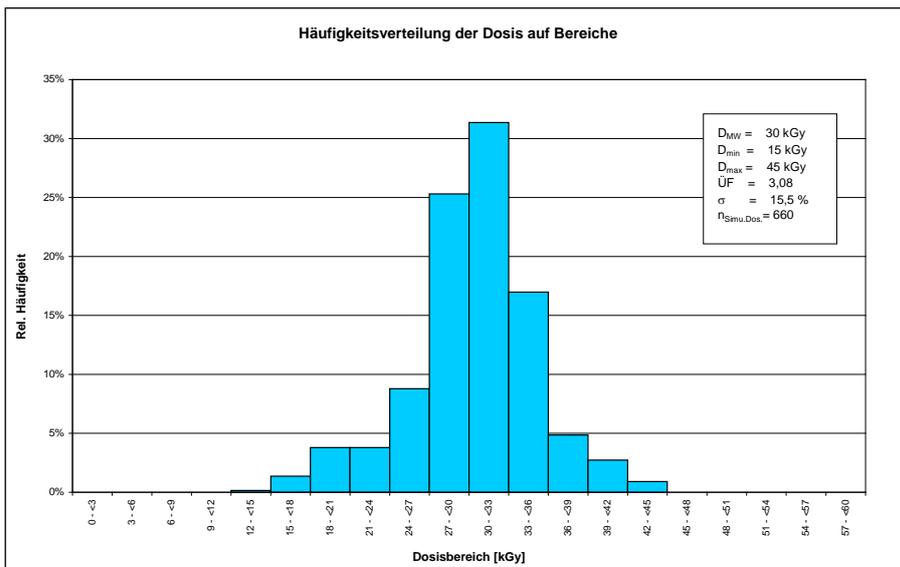


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Dosis auf Bereiche bei maximaler Unordnung der Hackschnitzel im rechteckigen Förderprofil

Ist das Profil des Materialstroms anders geformt, als in der obigen Untersuchung, sollten weitere Messungen und/oder Simulationen durchgeführt werden. Bei den Profilformen nach Abbildung 24 b und c sind sogar Verbesserungen in der Gleichförmigkeit der Bestrahlung zu erwarten.

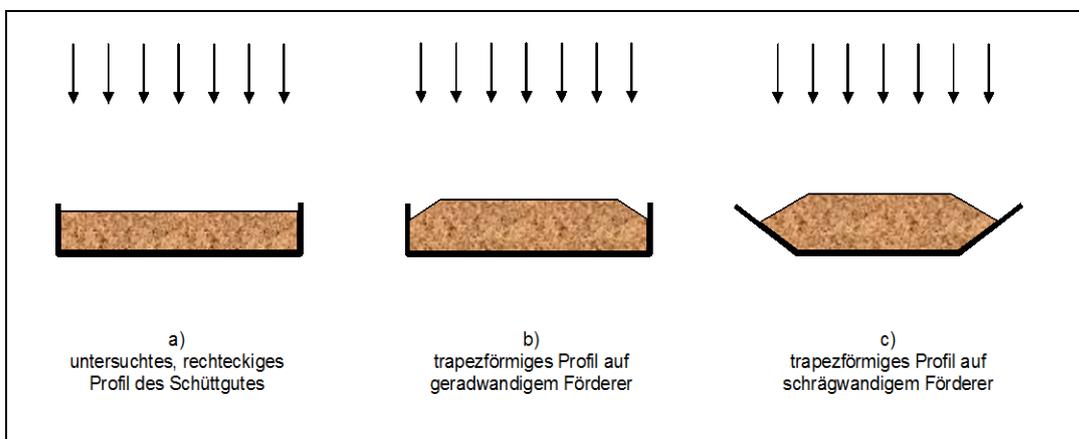


Abbildung 24: Mögliche Profilformen des Materialstromes der Holzackschnitzel (schematisch)

2.5.5 Durchsatz / Strahlleistung

Aus der Definition der Dosis $D = E / m$ und mit Einsetzen der Leistung bzw. Strahlleistung P gemäß

$$E = P \times t \tag{1}$$

ergibt sich

$$D = P \times t / m \tag{2}$$

Durch Umstellung erhält man den Massendurchsatz der Bestrahlungsanlage, der praktisch durch die bereits genannten drei Wirkungsgrade \square reduziert wird:

$$\frac{m}{t} = \frac{P}{D} \times \eta_{SA} \times \eta_{Zeit} \times \eta_{xy} \times \eta_{TD} \tag{3}$$

Hauptteil

wobei:	D	Dosis	[1kGy = 1kWs/kg]
	E	absorbierte Strahlungsenergie	[kWs]
	m	Masse des Produkts	[kg]
	P	Strahlleistung	[kW]
	t	Zeit	[s]
	η_{SA}	Wirkungsgrad beim Strahlaustritt	
	η_{Zeit}	Strahlzeit-Ausnutzungsgrad	
	η_{xy}	xy-Feld-Ausnutzungsgrad	
	η_{TD}	Tiefendosis-Ausnutzungsgrad	

Andererseits kann die für einen gewünschten Massendurchsatz bei vorgegebener Dosis erforderliche Strahlleistung der Anlage bestimmt werden:

$$P = D \times m / (t \times \eta_{SA} \times \eta_{Zeit} \times \eta_{xy} \times \eta_{TD}) \quad (4)$$

Der gewünschte Massendurchsatz der Bestrahlungsanlage wird durch die Erfordernisse einer Papierfabrik bestimmt und hier mit einem Wert von 500 t in 24 h angesetzt.

Als mittlere Dosis D sollen in der Anlage 30 kGy appliziert werden.

Für die Wirkungsgrade werden die folgenden Werte verwendet:

η_{SA}	= 98,1 %	= 0,981	(Strahlaustrittsfenster wie im Großversuch)
η_{Zeit}	= 100 %	= 1,000	(Ziel: kontinuierlicher, ununterbrochener Transport).
η_{xy}	= 94,9 %	= 0,949	(bei Overscan wie im Großversuch)
η_{TD}	= 68,0 %	= 0,680	(bei optimaler Schichtdicke wie im Großversuch)

Durch Einsetzen der Daten erhält man die erforderliche Strahlleistung der Gesamt-Anlage:

$$P_{Strahl} = 274,2 \text{ kW.}$$

Eine industrielle, online betriebene Bestrahlungsanlage in einer Papierfabrik mit 500 t Durchsatz in 24 Stunden muss mindestens die Strahlleistung von ca. 275 kW aufweisen.

Die Verfügbarkeit der Anlage soll 345 Tage / a betragen (94,3%). Industrielle Elektronenbeschleuniger weisen eine derartige Verfügbarkeit auf.

Der Beschleuniger des Typs Rhodotron TT 300, der an der Bestrahlungsanlage GSE 80 von Synergy Health Radeberg GmbH mit der Elektronenenergie von 10 MeV und max. 100 kW eingesetzt ist, wird vom Hersteller IBA inzwischen mit einer maximalen Strahlleistung von 190 kW angeboten. Die Kapazität einer Anlage mit einem Beschleuniger TT 300 und der Strahlungsleistung 190 kW beträgt 346 t pro 24 h. Mit zwei Beschleunigern des Typs erhöht sich der Durchsatz auf 693 t pro 24 h. D.h., mit einem Beschleuniger dieses Typs wäre die für den prognostizierten Massendurchsatz erforderliche Strahlleistung zunächst um mehr als 30 % unterschritten. Eine derartige Unterdimensionierung ist nicht akzeptabel.

Außerdem gibt es keinen Handlungsspielraum bei folgenden Situationen:

- Ungleichmäßiger Anfall der zu bestrahlenden Masse,
- Störungs- und Instandsetzungszeiten sowie Wartungszeiten an Fördersystem oder Beschleuniger,
- Technologische Änderungen mit erhöhter Dosisanforderung.

Unter diesen Gesichtspunkten ist eine Überdimensionierung der Anlage bezüglich der Strahlleistung auch über den kalkulierten Wert von 275 kW hinaus angeraten. Wie hoch die erforderliche Reserve anzusetzen ist, kann nur nach Festlegung detaillierter Angaben zur Prozessführung in einem Entwicklungs-Projekt entschieden werden. Mit zwei Beschleunigern vom Typ TT300 (je 190 kW) ergibt sich eine Reserve von ca. 38 %.

Die Ausstattung der industriellen Bestrahlungsanlage in einer Papierfabrik mit zwei, drei oder mehr Elektronenbeschleunigern entsprechend deren einzelnen Strahlleistung bewirkt eine Erhöhung der Systemsicherheit und größere Flexibilität. Weiterhin ist auf diesem Weg ein modularer Aufbau der Kapazitäten möglich. Gegebenenfalls kann durch die größere Flexibilität auf eine Zwischenbunkerung größerer Mengen vor und nach der Bestrahlung verzichtet werden. Eine solche Bunkerung wäre sonst bei schwankendem Anfall der zu bestrahlenden Masse erforderlich, auch in Abhängigkeit von der Stabilität des Massenstromes der vor- und nachgelagerten Prozesse. Abbildung 25 zeigt den Massendurchsatz einer industriellen Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel in Abhängigkeit von der installierten Strahlleistung und der Dosis als Parameter.

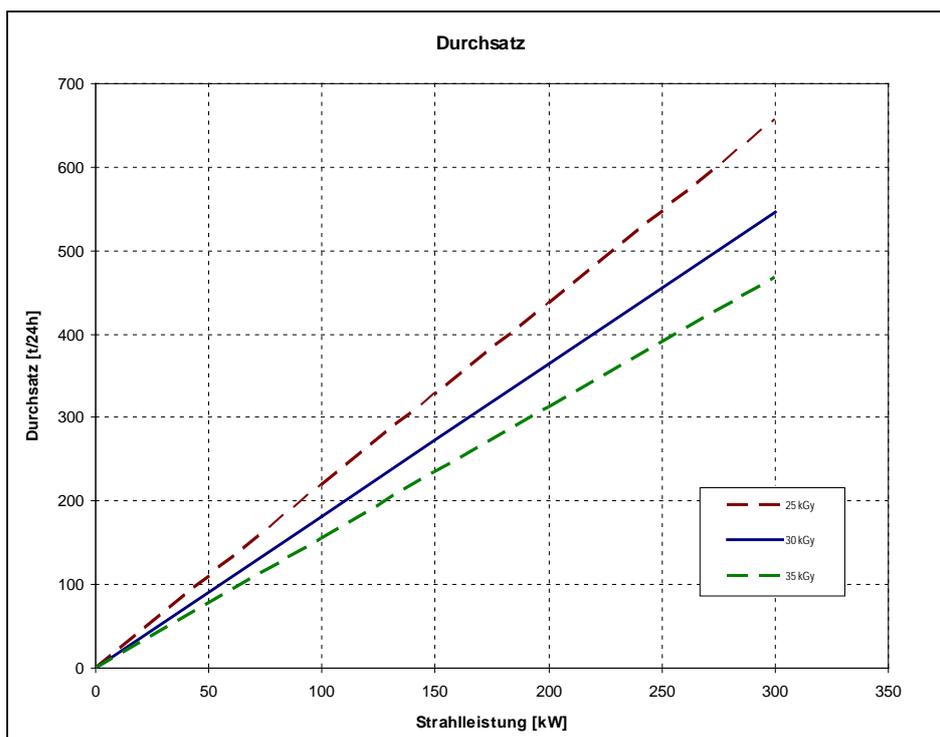


Abbildung 25: Massendurchsatz einer Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel bei 3 Dosiswerten

Unter der Annahme des Einsatzes von zwei Beschleunigern des Typs Rhodotron TT 300 (mit je 190 kW), mit denen der komplette Massenstrom (einschl. einer Reserve von 38 %) behandelt werden könnte, ergibt sich das nachfolgende, modulare Blockschema (Abbildung 26). Eine Optimierung der Gesamtleistung mit Reserve, Anzahl der Module und deren Einzelleistung sollte erst nach einer Marktrecherche erfolgen. Die Einbindung der optionalen Imprägnierung ist nur beispielhaft auf die Bestrahlungswege erfolgt, könnte aber auch vor der ebenfalls optionalen Zwischenbunkerung erfolgen.

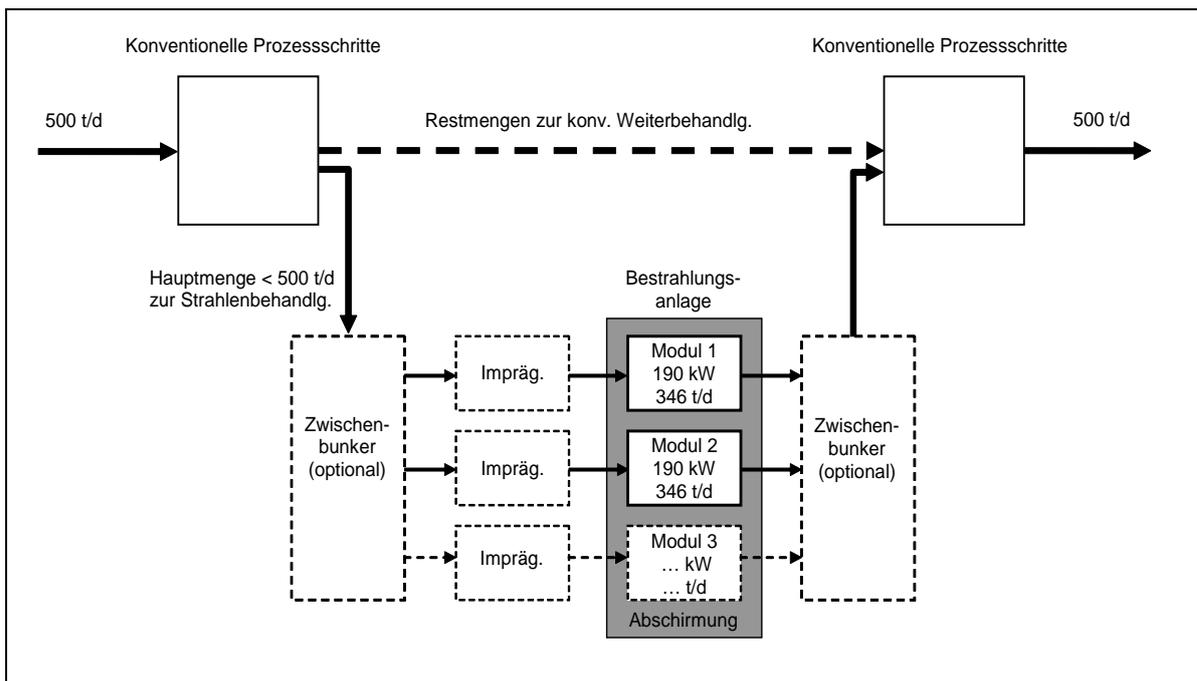


Abbildung 26: Blockschema der eingebundenen Bestrahlungsanlage in der Papierfabrik

Die abgeleitete erforderliche Strahlleistung ist weitgehend unabhängig von der eingesetzten Elektronenenergie, solange die Wirkungsgrade (Strahlzeit-Ausnutzungsgrad, Wirkungsgrad beim Strahlaustritt, Feld-Ausnutzungsgrad und Tiefendosis-Ausnutzungsgrad) konstant gehalten werden.

Zur Abschätzung der erforderlichen Fördergeschwindigkeit in der Bestrahlungszone, die (neben dem Strahlstrom) direkt zur Steuerung der Dosis eingesetzt werden kann, sind folgende Angaben erforderlich:

- Dosis,
- Leistung der Beschleuniger der Bestrahlungsanlage (jedes einzelnen Beschleunigers, bestimmt die Teil-Massenströme),
- Elektronenenergie (bestimmt die zulässige Schichtdicke),
- Breite des Transportbandes (bestimmt die Scanweite),
- Mittlere Dichte des Schüttgutes

Der Wert der Transportgeschwindigkeit v wird berechnet, indem in Gl. (3) die Masse m eingesetzt wird:

$$m = l \times b_T \times h \times \rho \tag{5}$$

- wobei:
- | | | |
|--------|---|----------------------|
| l | Weglänge des in der Zeit t bewegten Massestroms | [cm] |
| b_T | Breite des Massenstromes (Transportband) | [cm] |
| h | Höhe des Massenstromes (Schichtdicke) | [cm] |
| ρ | Mittlere Dichte des Schüttgutes | [g/cm ³] |

Der Wirkungsgrad der Strahlzeitausnutzung (als Maß für die Belegung des Transportsystems mit Produkt) hat auf die tatsächliche Dosis und somit auf die dafür erforderliche Transportgeschwindigkeit keinen Einfluss und entfällt hier als Parameter.

Hauptteil

$$\frac{l \times b_T \times h \times \rho}{t} = \frac{P}{D} \times \eta_{SA} \times \eta_{xy} \times \eta_{TD} \quad (6)$$

Nach weiterem Einsetzen der Flächenmasse m_f für $h \times \square$ und Umstellung der Gl(6) erhält man für die Transportgeschwindigkeit v die zugeschnittene Größengleichung:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{1}{m_f \times b_T} \times \frac{P}{D} \times \eta_{SA} \times \eta_{xy} \times \eta_{TD} \times C \quad (7)$$

mit: m_A flächenbezogene Masse des bewegten Massestroms [g/cm²]

Die Konstante $C = 600$ ist erforderlich, um für die Geschwindigkeit die Maßeinheit [m/min] zu erhalten.

Mit einem Rhodotron TT 300 und den nachfolgenden Bedingungen für ein Modul

$D = 30$ kGy	(Mittelwert, nur bei optimaler Schichtdicke)
$E = 10$ MeV	(TT300)
$P = 190$ kW	(max. Strahlleistung eines TT300)
$\rho = 0,33$ g/cm ³	(wie im Großversuch)
$m_A = 3,6$ g/cm ²	(in Abhängigkeit von E und \square optimal)
$b_T = 120$ cm	(Breite des Transportsystems gleich maximaler Scanweite des TT 300)
$\eta_{SA} = 0,981$	(bei Strahlaustrittsfenster wie im Großversuch)
$\eta_{xy} = 0,949$	(bei Overscan wie im Großversuch)
$\eta_{TD} = 0,680$	(bei der optimalen Schichtdicke wie im Großversuch)

ergibt sich eine Transportgeschwindigkeit $v = 5,57$ m/min im Strahlenfeld dieses Moduls.

Bei geringerer Transportbandbreite muss die Scanweite im gleichen Maß vermindert werden (beim TT 300: kleinster zulässiger Wert 36 cm) wodurch bei gleicher Strahlleistung und gleichem Massenstrom auch die Transportgeschwindigkeit erhöht werden muss.

Ein nur 60 cm breites Fördersystem würde dann eine Geschwindigkeit von 11,14 m/min erfordern.

2.5.6 Energiebedarf

Um die für einen Massenstrom von 250 t/d (trocken) erforderliche Strahlleistung von 275 kW zur Verfügung stellen und in die Masse eintragen zu können ist ein Energieeinsatz an elektrischer Energie nötig, der folgende Bedarfsmengen der dazu erforderlichen Haupt- und Subsysteme beinhaltet:

Bedarf der Systeme der Gesamtanlage (insg. 31 %):

- Kühlung
- Druckluftherzeugung
- Lüftung
- Transportsystem
- Steuerung

Bedarf der Beschleuniger und ihrer Subsysteme (insg. 69 % = 47,6 % Verluste + 21,4 % Strahlleistung):

- Steuerung Beschleuniger

Magnete der Beam-Line
Verluste HF-System
Verluste im Resonator
Bremsstrahlungsverluste
Strahlleistung des E-Beam

Die prozentualen Zahlenwerte wurden im Großversuch bestimmt. Sie lassen sich in erster Näherung auf eine Industrieanlage übertragen.

Da die Strahlleistung 21,4 % der einzusetzenden Gesamtleistung ist, bestimmt sich der Wert der Gesamtleistung der Anlage zu **1.282 kW**.

Dieser Anschlusswert von ca. 1,3 MW berücksichtigt nicht die für eine evtl. Imprägnierung erforderliche Leistung. Das prognostizierte Energieflussschema der industriellen Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel mit 275 kW Strahlleistung ist in A2 auf Seite 47 dargestellt.

Bei Über- oder Unterdimensionierung der Anlage ändert sich der Anschlusswert entsprechend.

Durch die Nutzung von Ressourcen, die bereits in den bestehenden Einrichtungen einer Papierfabrik vorhanden sind, ergeben sich möglicherweise Optimierungs- und Einsparungspotentiale. Sie sind in einem Entwicklungsprojekt zu beurteilen.

Der spezifische Energieeinsatz des Prozessschrittes *Bestrahlung der Holzhackschnitzel* pro Tonne Material bei der mittleren Dosis von 30 kGy ergibt sich aus dem Gesamtenergieeinsatz und dem Durchsatz zu 61,5 kW/t.

Dieser Wert für den spezifischen Energiebedarf stimmt gut mit dem nach dem Großversuch veranschlagten Wert von **ca. 60 kWh** pro Tonne Holzhackschnitzel überein.

2.5.7 Strahlenschutz- und Umweltaspekte

Zu den weiteren Anlagenparametern, die im Projektstadium zu berücksichtigen sind, gehören die mit den Strahlenschutzaspekten zusammenhängenden Angaben und Anforderungen.

Administrative Anforderungen

Grundlage aller regulativen Anforderungen, die an eine Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel gestellt werden, ist die Strahlenschutzverordnung [StrlSchV].

Nach § 11 (1) StrlSchV ist die Errichtung einer Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlen (mit einer Elektronenenergie bis 10 MeV) nicht genehmigungsbedürftig. Jedoch ist für den Betrieb dieser Elektronenbeschleunigeranlagen nach § 11 (2) eine Genehmigung der zuständigen atomrechtlichen Behörde erforderlich. Ebenfalls bedarf es der Genehmigung, wenn später der Anlagenbetrieb wesentlich verändert werden soll.

Die Genehmigungsvoraussetzungen für den Betrieb der Elektronenbeschleunigeranlage enthält der § 14 StrlSchV. Dazu gehört vor allem, dass:

1. keine Tatsachen vorliegen, aus denen sich Bedenken gegen die Zuverlässigkeit des Antragstellers, seines gesetzlichen Vertreters oder, bei juristischen Personen oder nicht rechtsfähigen Personenvereinigungen, der nach Gesetz, Satzung oder Gesellschaftsvertrag zur Vertre-

- tung oder Geschäftsführung Berechtigten ergeben und, falls ein Strahlenschutzbeauftragter nicht notwendig ist, der Antragsteller die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz besitzt,
2. keine Tatsachen vorliegen, aus denen sich Bedenken gegen die Zuverlässigkeit der Strahlenschutzbeauftragten ergeben, und sie die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz besitzen,
 3. die für eine sichere Ausführung des Betriebs notwendige Anzahl von Strahlenschutzbeauftragten vorhanden ist und ihnen die für die Erfüllung ihrer Aufgaben erforderlichen Befugnisse eingeräumt sind,
 4. gewährleistet ist, dass die bei dem Betrieb sonst tätigen Personen die notwendigen Kenntnisse über die mögliche Strahlengefährdung und die anzuwendenden Schutzmaßnahmen besitzen,
 5. gewährleistet ist, dass bei dem Betrieb die Ausrüstungen vorhanden und die Maßnahmen getroffen sind, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlich sind, damit die Schutzvorschriften eingehalten werden,
 6. keine Tatsachen vorliegen, aus denen sich Bedenken ergeben, dass das für eine sichere Ausführung des Betriebes notwendige Personal nicht vorhanden ist,
 7. die erforderliche Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen getroffen ist,
 8. n.a.,
 9. überwiegende öffentliche Interessen, insbesondere im Hinblick auf die Umweltauswirkungen, dem beabsichtigten Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen
 10. n.a.

Die Antragsunterlagen zu Genehmigungen von Beschleunigeranlagen für den Einsatz in der Papierindustrie müssen gemäß § 14 (4) StrlSchV und nach Anlage II Teil B folgendes umfassen:

1. einen Sicherheitsbericht, der die Anlage und ihren Betrieb beschreibt und mit Hilfe von Lageplänen und Übersichtszeichnungen darstellt, sowie die mit der Anlage und dem Betrieb verbundenen Auswirkungen und Gefahren beschreibt und die nach § 14 Abs. 1 Nr. 5 vorzusehenden Ausrüstungen und Maßnahmen darlegt,
2. ergänzende Pläne, Zeichnungen und Beschreibungen der Anlage und ihrer Teile,
3. Angaben, die es ermöglichen zu prüfen, ob die Voraussetzungen des § 14 Abs. 1 Nr. 3, 8 und 9 erfüllt sind,
4. Angaben, die es ermöglichen, die Zuverlässigkeit und die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz der Strahlenschutzverantwortlichen und der Strahlenschutzbeauftragten zu prüfen,
5. Nachweis über die Vorsorge für die Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen,
6. - 8. n.a.

Die für den Sicherheitsbericht erforderlichen, umfangreichen Angaben sind in der Regel erst in einem fortgeschrittenen Projektstadium verfügbar.

Das Bundesumweltministerium hat als oberste atomrechtliche Behörde festgelegt, welche Angaben mit dem Sicherheitsbericht beizubringen sind und diese als Merkposten in einem Rundschreiben veröffentlicht (Merkpo, 2003). Die Angaben zu den Merkposten sind wie folgt zu gliedern:

1. Allgemeine Angaben

2. Angaben über ökologische Verhältnisse am Standort
3. Zweck der Anlage
4. Aufbau der Anlage
5. Betrieb der Anlage
6. Strahlenexposition
7. Sicherheitsrelevante Vorkehrungen, Sicherung
8. Sicherheitsbetrachtungen
9. Stilllegung der Anlage oder von Anlageteilen
10. Deckungsvorsorge

Organisatorische Anforderungen

Die betriebliche Organisation des Strahlenschutzes beruht auf den Bestimmungen der §§ 31 - 35 StrlSchV. Träger der Organisationsstruktur sind der Strahlenschutzverantwortliche (SSV), der Strahlenschutzbevollmächtigte (SSBV) und die Strahlenschutzbeauftragten (SSB). Die Stellung und die Pflichten des SSV und der SSB sind durch die §§ 31 - 33 StrlSchV geregelt. Strahlenschutzbeauftragte müssen in ausreichender Zahl ausgebildet und berufen werden, um während des Anlagenbetriebs stets im Strahlenschutz qualifiziertes Personal zur Verfügung zu haben. Die Aufgaben, Tätigkeiten und turnusmäßigen Maßnahmen müssen dokumentiert sein.

Eine langfristige Vorbereitung von Personal, um die Fachkunde der Strahlenschutzverantwortlichen und der Strahlenschutzbeauftragten im Strahlenschutz (für Beschleunigeranlagen) zu gewährleisten, wird empfohlen.

Der § 30 StrlSchV regelt dazu, dass die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz ... in der Regel durch eine für den jeweiligen Anwendungsbereich (Beschleunigeranlagen) geeignete Ausbildung, praktische Erfahrung und die erfolgreiche Teilnahme an von der zuständigen Stelle anerkannten Kursen (unter Beachtung der unterschiedlichen Fachkundegruppen) erworben wird. Die Ausbildung ist durch Zeugnisse, die praktische Erfahrung durch Nachweise und die erfolgreiche Kursteilnahme durch eine Bescheinigung zu belegen. Der Erwerb der Fachkunde wird von der zuständigen Stelle geprüft und bescheinigt. Die Kursteilnahme darf nicht länger als fünf Jahre zurückliegen.

Die zu treffenden betrieblichen Regelungen für das Betreiben der Anlagen müssen gemäß § 34 StrlSchV in einer Strahlenschutzanweisung (SSA) verankert werden. Gemäß § 36 StrlSchV werden Strahlenschutzbereiche eingerichtet, die je nach Höhe der möglichen Strahlenexposition des Personals zwischen Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen unterschieden werden.

Der Schutz des Personals beruht auf den Bestimmungen der §§ 36 - 45 und der §§ 54 - 59 StrlSchV. Personen, die in den Kontrollbereichen tätig sein müssen, werden als beruflich strahlenexponiert eingestuft (Kategorie A: Personen, deren Tätigkeit im Normal- oder Störfallbetrieb mit Personendosen oberhalb 6 mSv verbunden sein kann; Kategorie B: alle übrigen Personen).

Grundlage der Sicherheits- und Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung und die Umwelt sind die in den §§ 46 - 48 StrlSchV enthaltenen Regelungen.

Zur Notfallvorsorge und Gefahrenabwehr muss sichergestellt werden, dass

- Maßnahmen zur Gefahrenbeschränkung bei radiologischen Störfällen und Unfällen getroffen sind (§ 51 StrlSchV),

- Maßnahmen zur Brandbekämpfung getroffen sind (§ 52 StrlSchV),
- Maßnahmen zur Schadensbekämpfung bei sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereignissen getroffen und abgestimmt sind (§ 53 StrlSchV).

Kontroll-, Überwachungs- und Mitteilungspflichten (gegenüber der Behörde) beim Anlagenbetrieb werden hier nicht dargestellt.

Bauliche und technische Anforderungen

Für die Auswahl des Beschleunigers und die Anlagengestaltung spielt auch die erforderliche bauliche Strahlenschutzabschirmung eine Rolle, da die notwendigen Betonwandstärken von Strahlleistung, Elektronenenergie und dem Bremsstrahlungsspektrum abhängen (Vogt, 2007).

Aus den mehrjährigen Erfahrungen mit der Bestrahlungsanlage GSE 80 von Synergy Health Radeberg GmbH (10 MeV; 100 kW) ist ableitbar, dass sich eine solche Anlage strahlenschutztechnisch sicher betreiben lässt. Die Wandstärken der Betonabschirmungen haben maximale Dicken von 4,00 m (Normalbeton). Sind mehrere Beschleuniger erforderlich, um die gesamte Strahlleistung aufzubringen, sind auch zwischen den einzelnen Bestrahlungsmodulen Abschirmungen in dieser Größenordnung vorzusehen, um unabhängige Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten zu ermöglichen. Die Dimensionierung des baulichen Strahlenschutzes wird in der Regel als gesonderte Ingenieurleistung abgewickelt. Abschirmungen sind dabei zweckmäßigerweise so auszulegen, dass in jedem Überwachungsbereich ein Wert der Ortsdosisleistung von 3,0 $\mu\text{Sv/h}$ (entsprechend 6 mSv / 2000 Arbeitsstunden) nicht überschritten wird. Mehrfache Verwinkelungen des Personenzugangs- und des Materiallabyrinthes sind dazu erforderlich, dass am Übergang vom eigentlichen Bestrahlungsraum (Sperrbereich) zur Produktionshalle (Überwachungsbereich) diese Werte eingehalten werden. Die Ausführung der ortsfesten und mobilen Abschirmungen wird Bestandteil der Genehmigung zum Betrieb der Bestrahlungsanlage.

Zu den technischen Anforderungen gehört die Wartung und die jährliche Überprüfung der Bestrahlungsanlage auf sicherheitstechnische Funktion, Sicherheit und Strahlenschutz gemäß § 66 StrlSchV.

Gemäß § 67 StrlSchV sind zur Messung der Personendosis, der Ortsdosis, der Ortsdosisleistung, ... geeignete Strahlungsmessgeräte zu verwenden. Es ist dafür zu sorgen, dass die Strahlungsmessgeräte

1. den Anforderungen des Messzwecks genügen,
2. in ausreichender Zahl vorhanden sind und
3. regelmäßig auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft und gewartet werden.

Umweltaspekte

In Elektronenbestrahlungsanlagen werden keine radioaktiven Nuklide eingesetzt; demzufolge entsteht auch kein radioaktiver Abfall. Eine Aktivierung der behandelten Holzhackschnitzel ist ebenfalls ausgeschlossen.

Der zu beachtende wesentliche Umweltaspekt ist der Einsatz von elektrischer Energie. Im Zusammenhang mit den dominierenden Energieeinsparungen in den wegfallenden oder reduzierten konventionellen Prozessschritten entsteht für die bei der Erzeugung der Elektroenergie anfallenden Emissionen und Reststoffe eine insgesamt positive Gesamtbilanz. Für die Ermittlung der CO₂-Einsparung bei der Erzeugung des reduzierten Elektroenergiebedarfs wird ein CO₂-Emissionsfaktor von 494 g/kWh (Energiemix Deutschland) zugrunde gelegt.

An einer Elektronenbestrahlungsanlage entsteht im Strahlbereich des Elektronenstrahls unter dem Scanner durch Radiolyse der Luft der Schadstoff Ozon. Für die Anlage von SHR wurde abgeschätzt, dass die Ozonabgabe aus dem Bestrahlungsraum etwa 500 g/h beträgt. Die ozonhaltige Abluft aus dem Bestrahlungsraum wird mit einer Abluftrate von mehr als 1200 m³/h abgesaugt und über Schornstein abgeblasen. Über Kurzzeit- und Langzeitausbreitungsrechnungen konnte nachgewiesen werden, dass die Ozonkonzentrationen in der Umgebung der Bestrahlungsanlage in keinem Fall die gesetzlich zulässigen Werte überschreitet, was durch Messungen bestätigt wurde.

Inwieweit das hier zunächst ungewollt anfallende Ozon für andere Prozesse in der Papierfabrik genutzt werden kann, sollte ggf. gesondert untersucht werden.

2.5.8 Projektumsetzung

Im Rahmen der Zielstellung für den Modifizierungsprozess von Holzhackschnitzeln ist zu entscheiden, welcher Dosisbereich (und damit welcher Überdosisfaktor) bei der Bestrahlung im Routineprozess zugelassen werden darf. Das wiederum hängt vom Toleranzbereich der gewünschten Eigenschaftsänderung ab (Responsekurve: Eigenschaftsänderung als Funktion der Dosis). Das gleiche gilt sowohl für die gewünschten Eigenschaftsänderungen, als auch für die ungewünschten Eigenschaftsänderungen.

Als weitere Eingangsgröße der Zielstellung des Projekts ist die gewünschte Durchsatzmenge an Holzhackschnitzeln festzulegen, ggf. im Zusammenhang mit einem modularen Ausbau der Kapazität der Bestrahlungsanlage.

Die Wahl des/der Beschleuniger sollte nach einer Marktrecherche erfolgen und folgendes berücksichtigen:

- Elektronenenergie im Zusammenhang mit der Schichtdicke,
- Strahlleistung im Zusammenhang mit dem Durchsatz (ggf. modulare Einheiten).

Das Anlagenkonzept und die Wahl des Transportsystems muss folgendes berücksichtigen:

- Integrierbarkeit in die vorhandene Prozesskette,
- Platzbedarf, -verfügbarkeit,
- Strahlenschutzdimensionierung (Abschirmungen, Labyrinth) im Zusammenhang mit der Elektronenenergie und Strahlleistung,
- Service und Wartung.

Die Organisation eines Projektes zur Implementierung einer Holzhackschnitzelbestrahlungsanlage erfordert folgendes zu berücksichtigen:

Hauptteil

- Genehmigungsbedürftigkeit des Betriebs und Erstellung der Genehmigungsunterlagen (zeitlicher Vorlauf),
- Personalqualifikation (zeitlicher Vorlauf),
- Vergabe von ingenieurtechnischen Leistungen: Bau, Technologie, Strahlenschutz.

Bereits im Projektstadium kann entschieden werden, welches Betreiberkonzept für die Bestrahlungsanlage angewandt werden sollte:

- Betrieb durch eigenes Personal,
- Betrieb durch externen Dienstleister oder
- Betrieb durch separate Unternehmenseinheit.

2.6 Ökologische und Ökonomische Betrachtung von ETMP

Annahmen für die Bewertung:

- Energieaufwand für die TMP-Zerfaserung nach dem Stand der Technik ist 2200 kWh/t.
- Die Energieeinsparung mit Elektronenbestrahlung liegt bei 30 % (im Labor und in der Praxis bestätigt) oder ca. 660 kWh/t (immer auf trockenes Holz bezogen)
- Der Aufwand für die Bestrahlung war bei der Bestrahlung in Radeberg 110 kWh/t; für ein optimiertes Transportsystem ergibt sich rechnerisch ein spezifischer Energiebedarf von ca. 60 kWh/t.
- Es ergibt sich also eine Nettoenergieeinsparung von ca. 600 kWh/t.
- In einer Fabrik werden durchaus 500 t trockenes Holz (1000 t feucht) an einem Tag verarbeitet
- Bei einem Energiepreis von 0,07 €/kWh (Tendenz steigend) ergibt sich eine Einsparung für nur eine Anlage von 7,2 Millionen € pro Jahr oder einer Energieeinsparung von 104 GWh (Auslastung der Anlage 95 %)
- Die eingesparte Energiemenge entspricht dem aktuellen Energieverbrauch von ca. 30.000 Haushalten.
- Kosten für den Bau eines Elektronenbestrahlers mit allen notwendigen Aufwendungen für Abschirmung und Transport ca. 10 Mill. €.

Unter Berücksichtigung der gegenüber dem klassischen TMP-Prozess hinzu kommenden Energie für die Elektronenbestrahlung ergibt sich für eine Anlage mit einer Kapazität von 500 t/d bei einem Preis für elektrische Energie von 0,07 €/kWh, bezogen auf den Energieeinsatz von 2.200 kWh/t, ein Netto-Einsparpotenzial von 7 Mio €/a. Die payback time für eine solche Anlage beträgt demnach ca. 17 Monate. In Deutschland befinden sich 3 potenzielle Kunden für eine solche Installation, weltweit gibt es 181 TMP-Fabrikanten, europaweit sind es 61.

2.7 Veröffentlichungen

Die Verbreitung der Ergebnisse wurde sehr stark forciert unter anderem wurde das Projekt auf der Zellcheming 2011 in Wiesbaden, der wichtigsten Papierfachmesse in Deutschland vorgestellt. Weitere wichtige Veröffentlichungen und Artikel im In- und Ausland sind weiter unten aufgeführt. Nicht aufgeführt sind In-House Präsentationen für einzelne Interessenten. Die Resonanz war überwältigend, wir wurden bisher von den 5 größten Papierkonzernen der Welt wegen „ETMP“ angeschrieben und kommunizieren über das weitere Vorgehen.

Artikel/Veröffentlichungen:

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, H. Großmann, R. Zelm, P.-G. Weber: Energy savings through ETMP technology, Juni 11,06/2011, S. 41-44, ipW

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, P.-G. Weber, S. Runte, S. Fischer, H. Grossmann: ETMP - A new approach to mechanical pulp production, November 11. 2011, Proceedings Conference Proceedings PTS Pulp Symposium

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, P.-G. Weber, S. Runte, S. Fischer, H. Grossmann: ETMP - 30% Energy savings in TMP production in an industrial large scale trial, November 23. 2012, Proceedings Conference Proceedings PTS Environment Symposium

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, P.-G. Weber, S. Runte, S. Fischer, H. Grossmann: ETMP – a new approach in mechanical pulp manufacture, Dezember 11, 11-12/2011, 24-28, Magazin, ipw

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, P.-G. Weber, S. Runte, S. Fischer, H. Grossmann: ETMP - A New Approach in Mechanical Pulp Manufacture, Januar 12, Proceedings PAPTAC, Montreal

T. Handke, T. Gailat, Ch. Bäurich, P.-G. Weber, S. Runte, S. Fischer, H. Grossmann: ETMP – Energy savings in mechanical pulp manufacture, April 12, Proceedings TAPPI PaperCon 2012, New Orleans

Präsentationen:

T. Handke: ETMP - 30% Energy savings in TMP production in an industrial large scale trial, November 11. 2011, PTS Environment Symposium, München

T. Handke: ETMP - A new approach to mechanical pulp production, November 23. 2011, PTS Pulp Symposium, Dresden

T. Handke: ETMP - A New Approach in Mechanical Pulp Manufacture, Januar 12. 2012, PAPTAC, Montreal

T. Handke: ETMP – Energy savings in mechanical pulp manufacture, April 12. 2012, TAPPI PaperCon 2012, New Orleans

3. Fazit

Die Voruntersuchungen zum ETMP haben ein Einsparpotenzial von 30-50 % signalisiert, wodurch die Frage aufkam, ob dieses enorme Einsparpotenzial auch in der Praxis Bestand hat.

Die Ergebnisse des Projektes sind eindeutig, die Laborergebnisse konnten überführt werden. Eine Einsparung von 30 % in der Praxis wurde online beim Großversuch gemessen.

In nachfolgenden Untersuchungen wurde außerdem die Notwendigkeit der Imprägnierung weiter untersucht und es zeigte sich, dass diese nur optional eingesetzt werden sollte.

Die bestrahlungstechnischen Aspekte des Konzeptes für die industrielle Bestrahlung von Holzhackschnitzeln wurden während und nach dem Großversuch analysiert.

Der Energieverbrauch des Prozessschrittes Elektronenbestrahlung konnte unter den Bedingungen des Großversuchs bestimmt und durch weitere Untersuchungen für eine Anlage mit kontinuierlich zuführendem Transportsystem auf 60 kWh/t präzisiert werden.

Die konzeptionellen Aussagen zur Gestaltung einer Industrieanlage wurden durch zusätzliche Untersuchungen verfeinert. Dabei wurde die optimale erforderliche Elektronenenergie in Abhängigkeit von den zu behandelnden Schichtdicken der Schüttung von Holzhackschnitzeln bestimmt. Die Aussagen zur Gleichförmigkeit der Bestrahlung wurden durch zusätzliche Monte-Carlo-Simulationen erweitert. Aus den Angaben zum Durchsatz von 250 t/d wurde die Strahlleistung einer dafür erforderlichen Bestrahlungsanlage mit ca. 275 kW abgeleitet. Zum Aufbau einer leistungsstarken, industriellen Anlage wird ein modulares Konzept vorgeschlagen.

Durch den Einsatz des Verfahrens mit dem um ca. 100 GWh geringeren Energiebedarf in einer Papierfabrik werden die Emissionen von CO₂, das als Treibhausgas zur Erderwärmung beiträgt, um jährlich ca. 51.000 Tonnen reduziert. Der Betreiber einer TMP-Anlage erhält mit dem Bau eines Bestrahlers die Möglichkeit bei einer durchschnittlichen TMP-Anlage ca. 7 Mill. €/a an Betriebskosten zu sparen. Bei einer Investition von 10 Mill. € für den Bau einer solchen Anlage ergibt sich ein sehr günstige Investitionsgrundlage.

Weitere Einsparungen sind darüber hinaus bei der Bleiche möglich, da während der Bestrahlung Ozon produziert wird, welches ein hervorragendes Bleichmittel darstellt und auch die Abwärme aus dem Kühlkreislauf des Bestrahlers kann zur Aufheizung des Prozesskreislaufes einer Papierfabrik genutzt werden. Die Bezifferung solcher weiteren Einsparungen ist allerdings erst in weiteren Langzeitversuchen möglich, die wir anstreben.

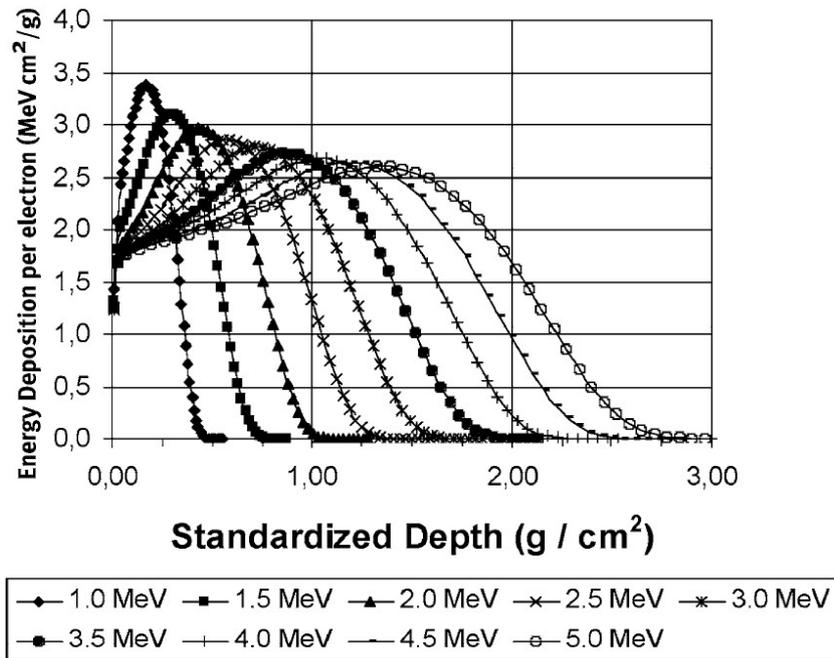
Das Ziel ist jetzt ETMP in die Praxis einzuführen und dafür werden Mut und Investitionen seitens der Industrie dringend benötigt. Erste Verhandlungen verlaufen positiv, es fehlt aber noch ein großer Schritt zur Realisierung einer ersten Demonstratoranlage direkt in der Papierindustrie.

4. Literaturverzeichnis

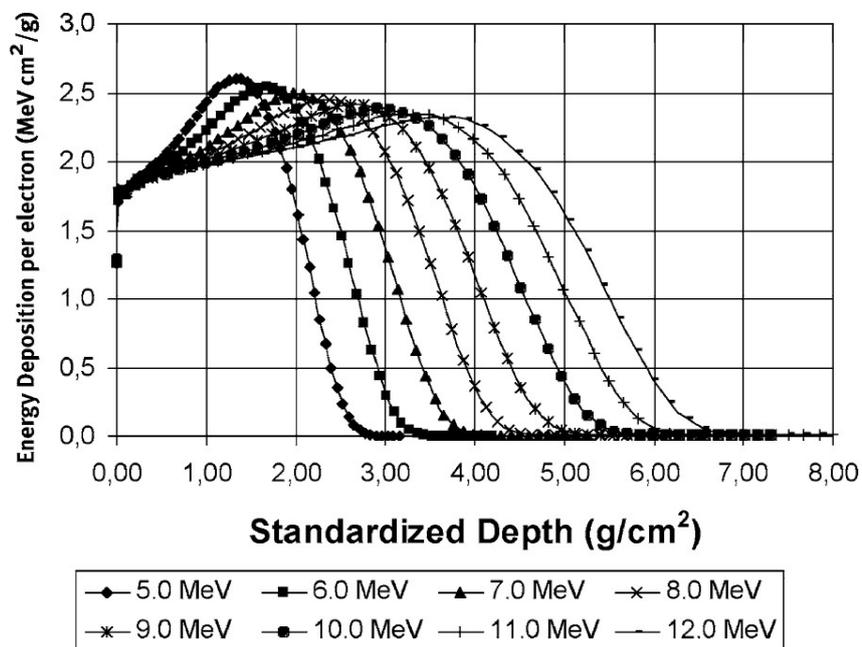
- 5351/1, ISO. 1981.** ISO 5351/1 Cellulose in dilute solutions - Determination of limiting viscosity number - Part 1: Method in cupri-ethylene-diamine (CED) solution. 1981.
- ASTM. 2005.** ASTM 51649: Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV. s.l. : ISO ASTM, 2005.
- Feldner, Alexander. 2011.** Spectroscopic measurements on bleached electron irradiated wood flours. 21. 12 2011. interner Bericht.
- Gullichsen, Johan. 2000.** Fiber line operations. [Buchverf.] Carl-Johan Fogelholm Johan Gullichsen. *Chemical Pulping*. Helsinki : Fapet Oy, 2000, S. A 102.
- Handke, et al. 2011.** Energy savings through ETMP technology. *ipw*. 2011, 6, S. 41-44.
- Handke, T., et al. 2011.** ETMP – a new approach in mechanical pulp manufacture. *ipw*. 2011, 11-12, S. 24-27.
- Handke, Toni. 2010.** *Energieeinsparung bei der TMP-Herstellung durch Elektronenbestrahlung*. s.l. : VDM-Verlag, 2010. ISBN 978-3-639-31079-5.
- Johan Gullichsen, Hannu Paulapuro. 1999.** Papermaking Science and Technology. [Buchverf.] Jan Sundholm. *Mechanical Pulping*. Helsinki : Fapet Oy, 1999.
- Klauditz, W. 1957.** Zur biologisch-mechanischen Wirkung der Cellulose und Hemicellulose im Festigungsgewebe der Laubhölzer. *Holzforschung*. 1957, Bd. 4, 11, S. 110-116.
- Levlin, J.-E. und Söderhjelm, L. 199.** Pulp and Paper Testing. [Buchverf.] Gullichsen. *Papermaking, Science and technology Book 17*. s.l. : Fapet Oy, 199, S. 317.
- Merkpo. 2003.** Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen. 2003. nach § 11 Abs. 1 und 2 StrlSchV; - RdSchr. d. BMU v. 12.11.2003 zur Durchführung der Strahlenschutzverordnung - RS II 3 - 17004/3, S. GVBl. Nr. 1 vom 14.01.2004 S.9.
- Schmieder, Stephan. 2011.** *Großer Beleg 90: Untersuchung der Imprägnierdosis bei der Elektronenbestrahlung*. Dresden : Professur für Papiertechnik TU Dresden, 2011.
- Schumann, Wolfgang. 2012.** *Industrielle Elektronenbestrahlung von Holzhackschnitzeln*. Radeberg : Synergy Health Radeberg GmbH, 2012. Interner Bericht. BER 3.6-01/12.
- StrlSchV. 2001.** Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV). 20. Juli 2001. S. (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)). zuletzt geändert durch Artikel der Verordnung v. 04.10.2011 (BGBl. I S. 2000).
- Tienvieri, Taisto et al. 1999.** Thermomechanical pulping. [Buchverf.] Jan Sundholm. *Mechanical Pulping*. Helsinki : Fapet Oy, 1999.
- Vogt, H.-G., u. a. 2007.** *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*. München/Wien : Carl Hanser Verlag, 2007.

5. Anlagen

A1: Tiefendosisverteilungen für unterschiedliche Elektronenenergien nach ASTM 51649



Berechnete Tiefendosisverteilungen in Kunststoff und äquivalentem Material für 1,0 bis 5,0 MeV (nach ASTM 51649)



Berechnete Tiefendosisverteilungen in Kunststoff und äquivalentem Material für 5,0 bis 12,0 MeV (nach ASTM 51649)

Anmerkung: In beiden Kurven ist ein Flächenmassenanteil von 0,036 g/cm² (entsprechend 40 µm Titan und 15 cm Luftschicht) enthalten. Erst der jeweils dritte Kurvenpunkt entspricht der Oberflächendosis eines Produkts.

A2: Energieflussschema einer Industrie-Bestrahlungsanlage für Holzhackschnitzel mit 275 kW Strahlleistung

