

Modellgestützte Analyse des Treibhausgasreduktionspotenzials der deutschen Papierindustrie

**Peter Lopion^{1*}, Daniel Klüh¹, Peter Markewitz¹, Martin Robinius¹, Detlef
Stolten^{1,2}**

¹ Institute of Electrochemical Process Engineering (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH,
Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich, Germany, +49 2461 61-9743, p.lopion@fz-juelich.de

² Chair for Fuel Cells, RWTH Aachen University, c/o Institute of Electrochemical Process
Engineering (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich,
Germany

Kurzfassung: In Deutschland stellt die Papierindustrie den drittgrößten industriellen Endenergieverbraucher dar. Zur Bestimmung eines möglichen CO₂-Reduktionspotenzials und den damit verbundenen Kosten wurde die deutsche Papierindustrie mit Hilfe eines linearen (LP) Optimierungsmodells abgebildet. Das Modell berücksichtigt neben dem heutigen Stand der Technik auch effizientere Verfahren der Papierherstellung. Insbesondere werden alternative Technologien in energieintensiven Bereichen untersucht, wie der Trocken- und Pressenpartie. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Lastflexibilisierung bzw. zum Lastmanagement in der Holzstofferzeugung analysiert und bewertet. Im Rahmen der Untersuchung wurden fünf alternative Prozesstechnologien für die Pressen- und Trockenpartie der Papierherstellung identifiziert, welche über ein hohes Treibhausgasreduktionspotenzial verfügen. Zudem bietet eine flexible Betriebsweise von Refinern in der Holzstofferzeugung die Möglichkeit, auf Lastschwankungen durch volatile Erneuerbare Energien zu reagieren und somit am Regelenergiemarkt zu partizipieren.

Keywords: Energiesystemmodellierung, Papierindustrie, Energieeffizienz, Lastmanagement

1 Die Papierindustrie in Deutschland

Die Papierindustrie in Deutschland ist hinter China, USA und Japan der viertgrößte Papierproduzent der Welt. In Europa ist Deutschland der größte Papierproduzent. Mit einem Umsatz von 14,2 Mrd. € in Deutschland hat die Papierindustrie einen Anteil von 1% am gesamten Umsatz des produzierenden Gewerbes. Der Umsatz wurde in 161 Betrieben mit insgesamt knapp 40.000 Mitarbeitern erwirtschaftet. Insgesamt wurden 22,6 Mt Papier produziert. Verpackungspapiere stellen mit 50,3% den größten Anteil an der Papierproduktion dar. [1]

Nach der Metall- und der chemischen Industrie hat die Papierindustrie in Deutschland den dritthöchsten Endenergiebedarf. Ein Anteil der Energiekosten von 9% am Umsatz zeigt, wie bedeutend Energiekosten für die Wettbewerbsfähigkeit der Papierindustrie sind. Die deutsche Papierindustrie bezog 2016 ca. 18 TWh Strom und 7 TWh Fernwärme. Außerdem

wurden 47 TWh an Brennstoffen in der Eigenerzeugung von Strom und Wärme genutzt. Der Anteil der emissionshandelspflichtigen Treibhausgasemissionen der Papier- und Zellstoffindustrie an den gesamten Industrieemissionen in Deutschland beträgt 4% (14,5 Mt_{CO2}). [1, 2]

Der Brennstoffmix zur Eigenerzeugung von Strom und Wärme ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Vergleich zwischen Deutschland und Europa zeigt, dass die Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland mehr Erdgas und weniger Biomasse verbrennt. Außerdem ist in Deutschland der Anteil an Kohle deutlich höher. Die geringere Nutzung von Biomasse ist auf die kleinere Produktionskapazität von Zellstoff in Deutschland zurückzuführen, da die Schwarzlauge als Biomassebrennstoff definiert ist. [1]

89% der eingesetzten Brennstoffe wurden 2015 in der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) eingesetzt [4]. Im Allgemeinen werden die KWK-Anlagen wärmegeführt betrieben. Die KWK-Anlagen sollten eine Stromkennzahl von 0,3 bis 0,5 aufweisen (abhängig von der produzierten Papiersorte), damit die Anlage den Energiebedarf optimal decken kann [5]. Zudem fallen in der Zellstoff- und Papierindustrie unterschiedliche Reststoffe und Nebenprodukte an. Dies umfasst Schlämme bei der Abwasserbehandlung und dem Deinking sowie Biogas, welches an der anaeroben Abwasserstufe entsteht. Letzteres kann als vollwertiger Brennstoffersatz für Erdgas angesehen werden. Zusätzlich entsteht Schwarzlauge als Nebenprodukt bei der Zellstoffherstellung. Bei der Holzvorbereitung fällt Rinde und Abfallholz als Abfallprodukt an. Alle genannten Reststoffe und Nebenprodukte werden in der Regel thermisch verwertet. [1, 3, 4]

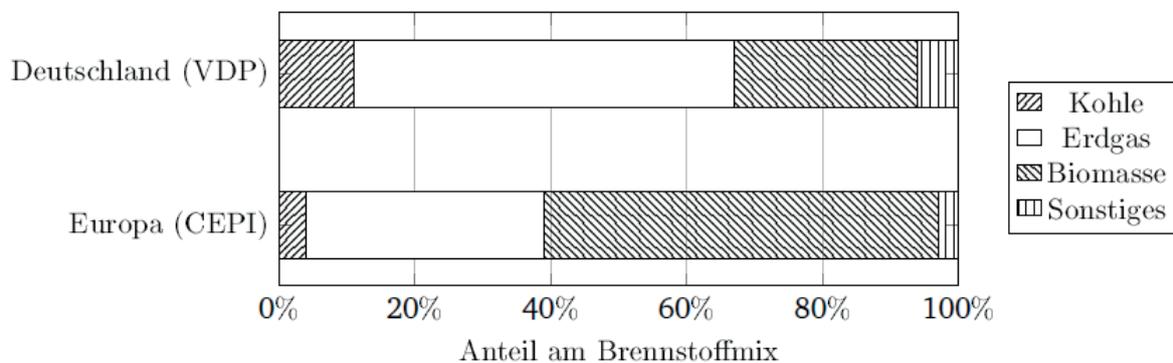


Abbildung 1: Vergleich des Brennstoffmix der deutschen und europäischen Zellstoff- und Papierindustrie (2016) [1, S.71, 3, S.26]

Das Temperaturniveau der benötigten Prozesswärme in der Zellstoff- und Papierindustrie ist niedrig im Vergleich zu anderen Industriezweigen. Die Auswertung verfügbarer Literaturwerte zeigt, dass das Temperaturniveau in der Zellstoff- und Papierindustrie in der Regel unter 200°C liegt [6-13]. Dennoch gehen einige Studien von Temperaturen über 200°C aus [14, 15]. Solche können bei speziellen Trocknungsverfahren wie zum Beispiel der gasgefeuerten oder Infrarot-Trocknung auftreten. Die erzeugte Prozesswärme wird insbesondere für die Trockenpartien in der Papierherstellung benötigt. Diese stellt bei der Produktion aller Papiersorten einen der größten Wärmeverbraucher dar. Beispielsweise bei der Produktion von gestrichenem holzstofffreiem Papier liegt der Anteil der Trockenpartie bei über 75% des Gesamtwärmeverbrauchs [16, S.617]. Den größten elektrischen Energiebedarf weist die Holzstoffherstellung bzw. die Faserstoffmahlung auf [17].

Die einhergehenden energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen der Zellstoff- und Papierindustrie lagen in Deutschland im Jahr 2015 bei 5,47 Mt CO_{2(eq)} [2, S.58]. Obwohl die Zellstoff- und Papierindustrie zu den energieintensiven Branchen zählt, ist die Treibhausgasintensität im Vergleich zu anderen energieintensiven Branchen gering [18, S.30]. Diese Tatsache ist auf den hohen Anteil der Biomasse als Energieträger zurückzuführen.

In Deutschland sind die energiebedingten Treibhausgasemissionen höher als der prozessbedingten. Im Bereich der prozessbedingten Emissionen ist insbesondere der Kalkbrennofen bei der Herstellung von Sulfatzellstoff zu nennen. Hierbei wird für das Chemikalienrecycling ein Kalkbrennofen benötigt, um Ca(OH)₂ für die Kaustifizierung bereitzustellen. Im Kalkbrennofen wird Calciumcarbonat unter Zuführung von Wärme zu Calciumoxid und Kohlenstoffdioxid umgesetzt [19]. Im Gegensatz hierzu, lassen sich die energiebedingten Treibhausgasemissionen zusätzlich in direkte und indirekte Emissionen unterscheiden. Direkte Emissionen fallen im jeweils betrachteten Papierunternehmen an. Indirekte Emissionen entstehen bei Energieversorgern und Lieferanten. Die größte Quelle von indirekten Emissionen ist zugekaufte Energie in Form von Strom und Wärme. [1, 3]

Zur Einhaltung gesetzter Klimaziele bieten sich unterschiedliche Optionen sowohl auf der Seite der Strom- und Wärmeerzeugung als auch auf Seite des Papierherstellungsprozesses an. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese mit Hilfe eines Energiesystemmodells hinsichtlich ihres Potenzials zur Reduktion von Treibhausgasemissionen untersucht. Hierfür wird zunächst der verwendete Modellansatz beschrieben. Nachfolgend werden alternative Herstellungsprozesse aufgezeigt und bewertet sowie ein möglicher Beitrag der Papierindustrie zur Flexibilisierung der Stromnachfrage erläutert. Abschließend erfolgt die Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.

2 Alternative Prozesstechnologien und Treibhausgasreduktionspotenziale

Dieses Kapitel bietet eine Einführung in die alternativen Technologien und Konzepte, welche im nachfolgend beschriebenen Modell implementiert sind. Die Auswahl der Prozesse beruht auf der Verfügbarkeit von Literaturwerten und auf der Umsetzbarkeit in der Modellierung. Die hier dargestellten Verfahren beschränken sich auf die Pressen- und Trockenpartie, da diese den höchsten Energiebedarf und das höchste Einsparpotential besitzen. Für die Zellstoff- und Holzstoffherstellung werden fünf alternative Prozesse vorgestellt.

2.1 Modellierungsansatz

Zur Analyse und Bewertung des Treibhausgasreduktionspotenzials der deutschen Papierindustrie wird im Folgenden der zugrundeliegende Modellierungsansatz beschrieben. Um alle relevanten Energie- und Stoffströme in der Papierindustrie vollständig zu erfassen, werden die wichtigsten Komponenten der Papierherstellung sowie potenzielle Kraftwerkstechnologien zur Strom- und Wärmeversorgung in einem linearen Optimierungsmodell (LP) abgebildet. Dieses basiert auf einem eigens entwickelten Modell-Generator.

Unter Berücksichtigung von Investitions- und Betriebskosten sowie technischer Parameter und Strukturen wird die Papierherstellung vereinfacht dargestellt (siehe Abbildung 2). Jede der abgebildeten Komponenten ist mit einem individuellen Strom-, Wärme- und Rohstoffbedarf belegt sowie resultierenden, ausgehenden Stoffströmen. Angetrieben wird das Modell durch eine Papiernachfrage. Zur Versorgung der Systemkomponenten stehen verschiedene Rohstoffquellen sowie unterschiedliche Kraftwerkstechnologien zur Verfügung. Durch die weitere Implementierung alternativer Prozesspfade, wie beispielsweise innovativer Trocknungsverfahren, stehen dem Modell diverse Optionen zur Sättigung der Papiernachfrage zur Verfügung. Anhand einer Kostenminimierung des Gesamtsystems kann die optimale Systemkonfiguration ermittelt werden. Mit der Erfassung von CO₂-Emissionen sowie der Integration einer CO₂-Limitierung als Nebenbedingung des Optimierungsproblems lässt sich zudem die kostengünstigste Strategie zur Reduktion von Treibhausgasemissionen evaluieren.

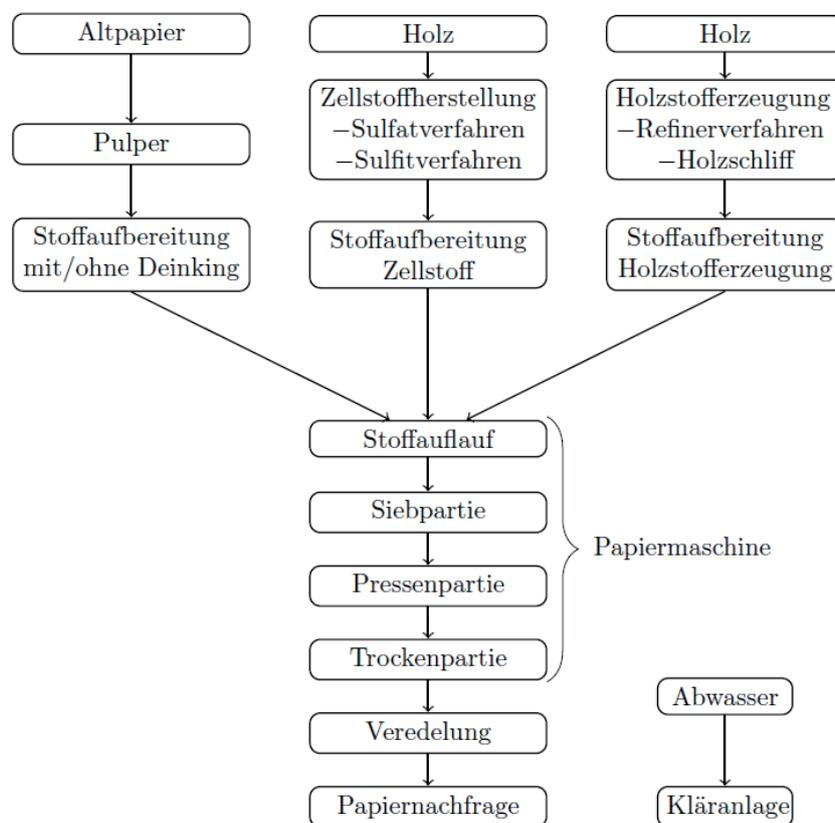


Abbildung 2: Abbildung der konventionellen Papierindustrie im Modell

Die resultierenden CO₂-Vermeidungskosten bieten anschließend eine Vergleichsgrundlage, um die Papierindustrie mit anderen Industriezweigen sowie anderen Energiesektoren vergleichen zu können. Dies soll es ermöglichen, die Papierindustrie im Kontext nationaler Klimaschutzstrategien bewerten zu können. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der betrachteten alternativen Prozesstechnologien sind im aktuellen Modell noch keine Kostenparameter für diese implementiert. Das Modell ermöglicht jedoch die Bestimmung der anlegbaren Investitionskosten für die individuellen Technologien. Diese basieren auf der äquivalenten Kostenersparnis durch die Reduzierung des Strom- und Wärmebedarfs bei der Papierherstellung. Ihr liegen aktuelle Brennstoff- sowie Investitions- und Betriebskosten der auf dem deutschen Markt eingesetzten Kraftwerkstypen zugrunde. Zum Vergleich

unterschiedlicher Anlagengrößen, werden die anlegbaren Investitionskosten pro Tonne jährlich in der Anlage produziertem Papier angegeben.

2.2 Dampfpralltrocknung

Bei der konventionellen Zylindertrocknung wird die Verdampfungsenergie über dampfbeheizte Walzen bereitgestellt. Die Abluft hat einen hohen Gehalt an latenter Wärme, welche nur bedingt genutzt werden kann. Bei der Pralltrocknung mit überhitztem Dampf kommt die Papierbahn in direkten Kontakt mit dem Dampf. Dabei kommt es zu konvektiver Wärmeübertragung. Die Papierbahn läuft über einen großen Zylinder [20]. Der Zylinder ist von einer Haube umschlossen, welche mit überhitztem Dampf (300-350°C) beaufschlagt wird [20, 21]. Nach Verlassen der Trocknungshaube hat der Dampf Umgebungsdruck und eine Temperatur von ca. 230-250°C [21]. Der Einfluss der Dampfpralltrocknung auf die Papierqualität wurde für 4 Papiersorten getestet und die Dampftemperatur als relevantester Faktor identifiziert [21].

Um eine Energieeinsparung zu erzielen, muss zudem für den ausgehenden Niederdruckdampf eine geeignete Wärmesenke zur Verfügung stehen. Als Wärmesenke eignen sich weitere Trockenzylinder. Bei der Kombination von Dampfpralltrocknung und dampfbeheizten Zylindern wird ein Anteil der Dampfpralltrocknung von bis zu 50% angestrebt. Bei einem höheren Anteil der Dampfpralltrocknung kann die überschüssige Wärmeenergie nicht mehr vollständig in den Prozess integriert werden. Bei einem Anteil von 50% Dampfpralltrocknung ergibt sich ein Wärmeeinsparpotenzial von 1,5 GJ/t_{Papier} bei einem Standardwärmeverbrauch von 3,6 GJ/t_{Papier} [21]. Nach Lemaitre (2004) ergibt sich bei einem Dampfpralltrocknungsanteil von 25% eine Ersparnis von 0,63 GJ/t_{Papier} bei einem Standardwärmeverbrauch von 5 GJ/t_{Papier} [20]. Für unterschiedliche Konzepte ergeben sich Wärmeeinsparpotenziale von 5-20% [20]. Nach Bajpai (2016) sind 10-15% Wärmeeinsparungen bei einem Standardwärmeverbrauch von 4,5 GJ/t_{Papier} möglich, sowie eine Stromeinsparung von 5-10% [18]. Bezogen auf die deutsche Papierindustrie entspricht dies einer gemittelten Einsparung von 3,9 TWh/a thermischer und 0,9 TWh/a elektrischer Energie. Unter Berücksichtigung des heutigen Brennstoffeinsatzes könnten somit 2,3 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die kalkulierten anlegbaren Investitionskosten für die Technologie liegen bei bis zu 577 €/t_{Papier}.

2.3 Displacement Pressing

Die Displacement-Pressen besteht, wie in Abbildung 3 zu sehen, aus zwei großen (2 und 4) und zwei kleinen Walzen (1 und 3). Die achsenparallel angeordneten Walzen bilden einen Hohlraum in ihrer Mitte. Der eingeschlossene Raum ist hermetisch abgedichtet. Die Papierbahn wird eingeschlossen von einer Membran auf der einen Seite und einem feuchtigkeitsspeichernden Filz auf der anderen Seite über eine der großen Rollen in die druckbeaufschlagte Kammer geführt. Die Membran wird durch den Druck in der Kammer auf das Papier gepresst. Das herausgepresste Wasser wird vom Filz aufgenommen. Das Displacement Pressing wirkt sich ebenfalls auf die Eigenschaften des produzierten Papiers aus. Der Einfluss wird basierend auf den Ergebnissen einer Pilotanlage jedoch als positiv beschrieben [22]. [23]

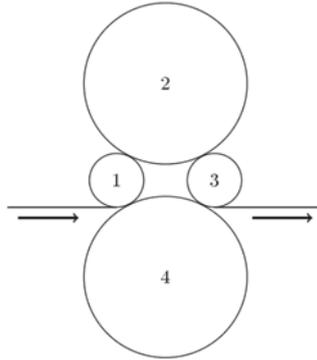


Abbildung 3: Anordnung der Walzen beim Displacement Pressing: Druckdichter Raum zwischen den Walzen 1,2,3 und 4 (in Anlehnung an [23])

Durch den Druck im Pressspalt wird in der Pressenpartie der Feststoffgehalt der Papierbahn auf 50-55% angehoben [22]. Das theoretische Limit der mechanischen Entwässerung liegt bei 80% Feststoffgehalt [22]. Mit Displacement Pressing kann der Feststoffgehalt auf ca. 60% angehoben werden [22]. Ein höherer Feststoffgehalt führt zu einer anschließenden Wärmeeinsparungen in der Trockenpartie. Außerdem reduziert sich die Länge der Trockenpartie, wodurch geringere Kosten anfallen. Der Wärmeverbrauch in der Trockenpartie kann damit um ca. 30% reduziert werden [18]. Bezogen auf die deutsche Papierindustrie entspricht dies einer gemittelten Einsparung von 7,8 TWh/a thermischer Energie. Unter Berücksichtigung des heutigen Brennstoffeinsatzes könnten somit 3,5 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die kalkulierten anlegbaren Investitionskosten für die Technologie liegen bei bis zu 1.054 €/t_{Papier}.

2.4 Impulstrocknung

Bei der Impulstrocknung handelt es sich um eine Trocknungs- bzw. Pressentechnologie, die Wärmezufuhr und mechanischen Druck in einem Prozessschritt vereint. Ziel ist es, den Feststoffgehalt zu erhöhen, um den Wärmebedarf in der Trockenpartie zu reduzieren. Die Papierbahn wird hierfür aus der Pressenpartie zur Impulstrocknung geleitet. Der Impulstrockner besteht aus einer Schuhpresse mit einer beheizten Walze bei Temperaturen von 200-350°C betrieben wird [24, S.92]. Die Papierbahn ist dabei von einem Filz umschlossen [22]. Der Wärmeimpuls führt zum Verdampfen von Wasser in der Papierbahn, wobei der Wasserdampf zusätzlich flüssiges Wasser aus dem Inneren der Papierbahn extrahiert [22]. Das gleichzeitige Einwirken von Wärme und Druck hat dabei einen positiven Einfluss auf Papiereigenschaften, wie Festigkeit und Glätte [22].

Mit der Impulstrocknung lassen sich Feststoffgehalte im Bereich von 55-65 % erreichen [22]. Folglich reduziert sich der Wärmebedarf der Trockenpartie. Die Einsparungen belaufen sich auf 0,44-0,90 GJ/t_{Papier} [22]. Nach Bajpai (2016) können somit 0,59 MWh_{Dampf}/t_{Papier} eingespart werden [18, S.193]. Darüber hinaus senken sich die Investitionskosten für die Trockenpartie. Jedoch ist anzumerken, dass die Technologie mit einem höheren Strombedarf von 5-10% einhergeht [18, S.193]. Bezogen auf die deutsche Papierindustrie entspricht dies einer gemittelten Einsparung von 8,7 TWh/a thermischer Energie bei einer Erhöhung des Elektrizitätsbedarfs um 1,2 TWh/a. Unter Berücksichtigung des vorliegenden Brennstoffeinsatzes könnten somit 3,2 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die kalkulierten anlegbaren Investitionskosten für die Technologie liegen bei bis zu 788 €/t_{Papier}.

2.5 Gasbefeuerte Trocknung

Erdgasbefeuerte Zylinder können einige der dampfbeheizten Walzen in der Trockenpartie ersetzen. Eine gasbefeuerte Walze besteht aus einem inneren und äußeren Zylinder. Der äußere Zylinder hat direkten Kontakt zur Papierbahn. Zwischen dem inneren und äußeren Zylinder brennt eine offene Flamme. Die gasbefeierten Zylinder haben eine vier- bis fünfmal höhere Trocknungsgeschwindigkeit im Vergleich zu dampfbeheizten Zylindern, wobei die Trocknungsgeschwindigkeit von der produzierten Papiersorte abhängt. In einer Pilotanlage konnten keine signifikanten Einflüsse der gasbefeierten Zylinder auf die Papierqualität festgestellt werden. [25]

Die Effizienz der Trocknung kann mit gasbefeierten Zylindern deutlich gesteigert werden. Dampfbeheizte Zylinder haben eine Trocknungseffizienz von 60-65% [18, S.189]. Die Effizienz von gasbefeierten Zylindern liegt hingegen bei 75-80% [18, S.189]. Um eine Temperatur von 120°C auf der Zylinderoberfläche zu erreichen, benötigt der gasbefeuerte Zylinder 30% weniger Energie [25]. Eine gesamte Reduktion der Trocknungsenergie liegt im Bereich von 10-20% [18, S.189]. Bezogen auf die deutsche Papierindustrie entspricht dies einer gemittelten Einsparung von 3,9 TWh/a thermischer Energie. Unter Berücksichtigung des vorliegenden Brennstoffeinsatzes könnten somit 1,7 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die kalkulierten anlegbaren Investitionskosten für die Technologie liegen bei bis zu 323 €/t_{Papier}.

2.6 Condebelt-Trocknung

Die Condebelt-Trocknung läuft in einer Trocknungskammer ab und ersetzt die dampfbeheizten Zylinder der Trockenpartie vollständig [26]. Der obere Teil der Trocknungskammer ist mit Dampf beaufschlagt und der untere Teil ist mit Wasser befüllt [22]. In der Trocknungskammer wird die Papierbahn, umschlossen von zwei Metallbändern, transportiert. Auf der Unterseite der Papierbahn befindet sich zwischen Papier und Metallband zudem feines sowie ein grobes Vlies [22]. Die Trocknungskammer ist mit einem Druck von 10 bar beaufschlagt [18, S.165]. Das obere Metallband ist dampfbeheizt und erreicht Temperaturen von 110-160°C [22]. Durch zirkulierendes Wasser wird das untere Band auf ca. 80°C gekühlt [22]. Dies führt zur Kondensation des verdampften Wassers auf dem unteren Metallband [22]. Diese unsymmetrische Trocknung kann bei Papiersorten mit niedrigen Flächengewichten problematisch sein, weshalb die Technologie besonders für Pappen geeignet ist [18, S.164].

Bei Einsatz der Condebelt-Trocknung ist eine Dampfmengeneinsparung von 10-20% möglich [26, S.32]. Der Stromverbrauch reduziert sich um 20 kWh/t_{Papier} [26, S.32]. Die Investitionskosten liegen bei 141 €/t_{Papier} für einen Neubau und bei 36 €/t_{Papier} für die Nachrüstung [26, S.32]. Darüber hinaus lässt sich die Wärme des Kühlwassers (80°C) nutzen [18, S.165]. Die Condebelt-Trocknung hat zudem einen positiven Einfluss auf die Papiereigenschaften. Beispielsweise steigt die Festigkeit an, wodurch das Flächengewicht bei gleichbleibender Produktqualität gesenkt werden kann [18, S.165]. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Faserstoff mit niedrigerer Qualität [18, S.165]. Die Condebelt-Trocknung wurde 1996 und 1999 zum ersten Mal in einer Papiermaschine verbaut und getestet [18, S.166]. Bezogen auf die deutsche Papierindustrie entspricht dies einer gemittelten Einsparung von 3,9 TWh/a thermischer und 0,5 TWh/a elektrischer

Energie. Unter Berücksichtigung des vorliegenden Brennstoffeinsatzes könnten somit 2,0 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die kalkulierten anlegbaren Investitionskosten für die Technologie liegen bei bis zu 572 €/t_{Papier}.

3 Flexibilisierung und Lastmanagement in der Holzstofferzeugung

Zusätzlich zur Energieeinsparung bietet die Papierindustrie ein Potenzial für Demand Side Management (DSM). Insbesondere die Holzstofferzeugung ist ein sehr energieintensiver Prozess, welcher zusätzlich über flexibilisierbare Lasten verfügt und somit eine Option für DSM darstellt. In Deutschland gibt es insgesamt sechs Anlagen zur Holzstofferzeugung mit einer Gesamtproduktion von 873 kt Holzstoff im Jahr 2016 [3, S.61]. Die hierbei in Deutschland eingesetzten Refiner haben ein dynamisches Laständerungsverhalten und ermöglichen positives sowie negatives Lastmanagement von bis zu 250 MW (positiv) bzw. 62 MW (negativ) [27]. Die nachgeschalteten Speicher sind groß genug, um Holzstoff für bis 1,5 h zu speichern [27].

Nachfolgend wird der Einsatz dieser Option für Demand Side Management mit Hilfe eines Simulationsmodells untersucht. Hierfür wird die Teilnahme einer Referenzanlage am Regenergiemarkt in Deutschland für das Jahr 2017 simuliert [3]

3.1 Modellierungsansatz

Eine wichtige Voraussetzung für die Teilnahme am Regenergiemarkt ist, dass der Refiner-Prozess die Anforderungen für die Präqualifikation zur Marktteilnahme erfüllt. Damit einher geht die Voraussetzung, dass die flexible Betriebsweise der Refiner bei gleichbleibender Produktqualität technisch möglich ist und die vorgegebenen Lastabwürfe bzw. -erhöhungen innerhalb von 15 Minuten erreicht werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Regenergiemärkte ist Robinius (2015) zu entnehmen [28]. Das eingesetzte Modell arbeitet entsprechend den Marktvorgaben mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten bzw. 35.040 Intervallen im Jahr 2017. In Abbildung 4 ist das Blockdiagramm des Lastmanagementmodells um den Refiner zu sehen.

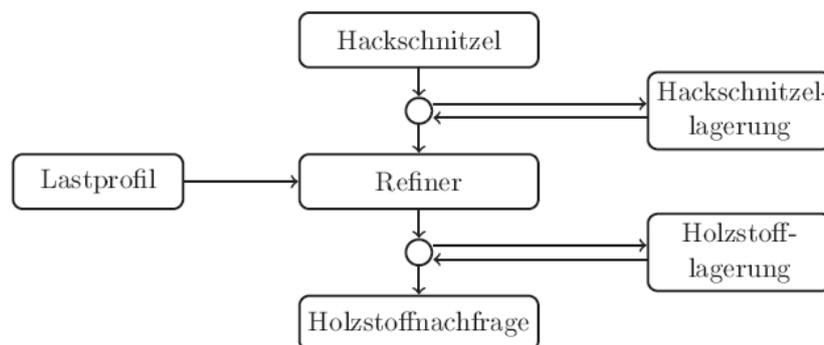


Abbildung 4: Schematisches Blockdiagramm der Holzstoffherstellung mit Lastmanagement

Die Holzstoffnachfrage wird im Modell als konstant über das Jahr angenommen, da im Normalfall eine Papierfabrik direkt an die Holzstofferzeugung angeschlossen ist. Bei einer angenommenen Volllaststundenzahl von 8000 h/a und einer Jahresproduktionsmenge von

140 kt Holzstoff (Mittelwert der 6 Anlagen in Deutschland) ergibt sich eine Holzstoffnachfrage von 17,5 t/h. Weiterhin wird die Hackschnitzelzufuhr ebenfalls als konstant angenommen.

Der Refiner ist das zentrale Element für das Lastmanagement. Die Flexibilisierung des Refiners kann bei als konstant angenommener Rohstoffzufuhr und Produktnachfrage nur mittels zweier Speicher gelöst werden. Die Speicher befinden sich vor und nach dem Refiner. Die Speichergröße ist nicht vorgegeben und wird im Rahmen der Simulation optimiert. Der Refiner hat einen spezifischen Stromverbrauch von 2,5 MWh/t_{Holzstoff} [29]. Bei einer angenommenen, maximalen Leistung des Refiners von 50 MW und der genannten Produktionsmenge ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 43,75 MW. Die Anlage jedoch innerhalb von 15 Minuten flexibel im Bereich von 0-50 MW betrieben werden.

Dem Refiner wird im Rahmen der Simulation das Nachfrageprofil für Minutenregelleistung in Verbindung mit den jeweiligen Zuschlägen für Arbeits- und Leistungspreise der Regelzone von Amprion in Deutschland (2017) vorgegeben. Zur Analyse der potenziellen Marktteilnahme werden die abgegebenen Gebote für Arbeits- und Leistungspreis im Modell variiert. Erhält das abgegebene Gebot zu einem Zeitpunkt den Zuschlag, reagieren Refiner und Speicher auf die entsprechende Lastanforderung. Die Dimensionierung der Speicher erfolgt über einen Perfect-Foresight-Ansatz über das Jahr. Zusätzlich ist anzumerken, dass die am Regelenergiemarkt gebotenen Preise in jedem Simulationslauf über das Jahr hin konstant sind. Auf diese Weise lässt sich retrospektiv die optimale Betriebsstrategie für das Jahr 2017 ermitteln. In Folge lassen sich Handlungsempfehlungen, Wirtschaftlichkeitsprognosen sowie Speicherdimensionierungen für zukünftige Jahre ableiten.

3.2 Ergebnisse für die Minutenregelleistung

Durch die Variation des Leistungspreises ergibt sich für 2017 eine maximale Vergütung bei einem positiven bzw. negativen Leistungspreis von 30 bzw. 10 €/MW. Der Anteil des Arbeitspreises bei der Vergütung ist in diesem Fall jedoch vernachlässigbar. Bei einem angebotenen Arbeitspreis von 25 €/MWh und mehr würde 2017 keine Leistung abgerufen werden. Selbst bei einem Arbeitspreis von 0 €/MWh wäre der Einfluss auf den Betrieb der Anlage gering. Hierbei würde keine positive Regelleistung abgerufen, da in den bezuschlagten Vierstundenblöcken kein Regelleistungsbedarf bestand. Dennoch ist in 10 Vierstundenblöcken der Zuschlag zur Bereithaltung erteilt worden. Der Zuschlag für die negative Minutenregelleistung wird für 266 Vierstundenblöcke erteilt. Die geleistete Arbeit beläuft sich dabei auf 15,25 MWh/MW (vergleiche Abbildung 5).

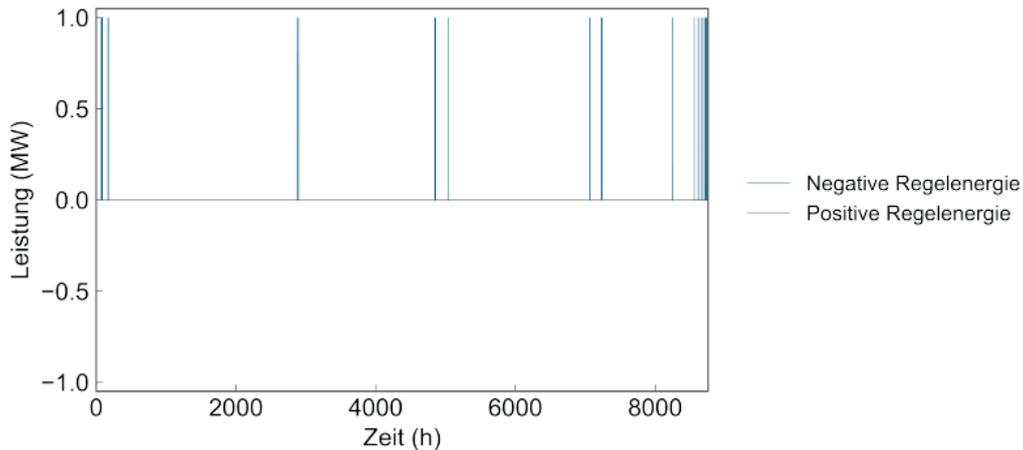


Abbildung 5: Abgerufenes Minutenregelleistungsprofil pro MW angebotene Leistung für das Beispieljahr 2017

Anhand des Abrufprofils ergibt sich die resultierende Speichernutzung (vergleiche Abbildung 6). Der gezeigte Graph stellt den Füllstand für den Holzstoff- und Hackschnitzelspeicher dar. Die maximale Speichergröße ist identisch aufgrund einer angenommenen Umwandlungseffizienz des Refiners von 1. Die resultierende, erforderliche Speicherkapazität beträgt 4,5 t Holzstoff bzw. Hackschnitzel pro MW angebotene Leistung. Aufgrund des Perfect-Foresight-Ansatzes ist der Speicherfüllstand am Anfang und Ende des Jahres identisch und entspricht ca. 2 t Holzstoff bzw. 2,5 t Hackschnitzel. Die Sprünge im Verlauf des Speicherfüllstands sind auf den Abruf von negativer Regelleistung zurückzuführen, da zu diesen Zeitpunkten die gesteigerte Produktionsmenge des Refiners eingespeichert werden muss.

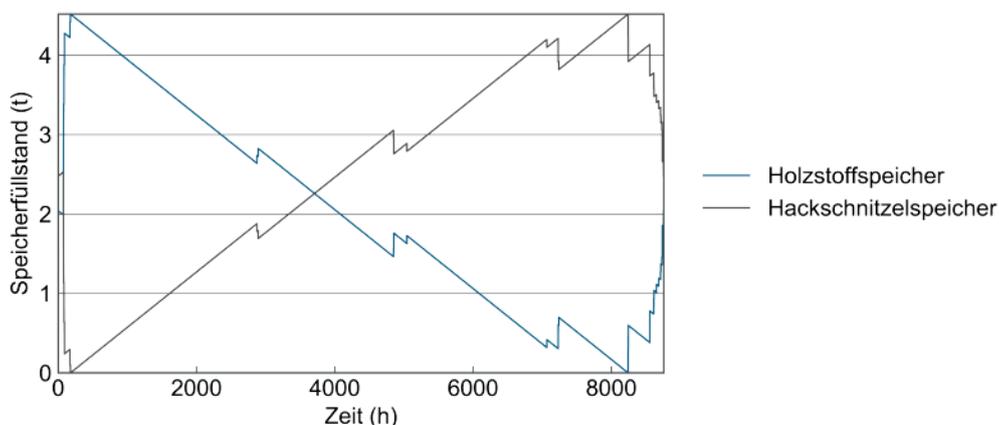


Abbildung 6: Verlauf des Holzstoff- und Hackschnitzelspeicherfüllstands pro MW angebotene Leistung für das Beispieljahr 2017

Die Gesamtvergütung läge im Idealfall demnach bei 2.960 € pro angebotenen MW. Der Anteil der negativen Regelleistung an der Vergütung besitzt dabei einen Anteil von etwa 90% an der Gesamtvergütung. Bezogen auf die maximal anbietbare Regelleistung in Höhe von 6 MW (negativ) und 43 MW (positiv) könnten im Jahr 2017 durch die Teilnahme am Minutenregelenergiemarkt somit 28.860 € eingenommen werden. Der daraus resultierende Zwischenspeicherbedarf wäre gemäß den Ausführungen von Paulus und Borggrefe (2011) im Rahmen der üblicherweise bereits vorliegenden Speicherdimensionierungen in der Holzstofferzeugung und müsste folglich nicht erweitert werden [27].

4 Schlussfolgerungen und Diskussion

Obwohl die Papierindustrie in Deutschland wie auch weltweit zu den energieintensivsten Industriezweigen gehört, kann sie bereits heute durch einen hohen Anteil biogener Brennstoffe ihre Treibhausgasemissionen reduzieren. Jedoch handelt es sich bei zweidrittel der eingesetzten Brennstoffe noch immer um fossile Rohstoffe. Des Weiteren bieten sich verschiedene alternative Press- und Trocknungsverfahren an, den anfallenden Energiebedarf zu reduzieren und somit Treibhausgasemissionen zu senken.

Das entwickelte Modell bietet sowohl Entscheidungsträgern in der Politik als auch Unternehmern in der Papierindustrie ein geeignetes Werkzeug zur Aufstellung einer Treibhausgasminderungsstrategie. Mit Hilfe der technischen sowie wirtschaftlichen Daten neuer Prozesstechnologien kann das Modell bei zukünftigen Investitionsentscheidungen unterstützen. Wie die Ergebnisse der vorgestellten Prozessalternativen zeigen, können in Deutschland je nach Technologie bis zu 8,7 TWh thermische bzw. 0,9 TWh elektrische Energie sowie 3,5 Mt_{CO2} pro Jahr eingespart werden. Die anlegbaren Investitionskosten der untersuchten Technologien liegt im Bereich von 323 bis 1.054 €/t_{Papier}. In Kombination mit Erneuerbaren Energien zur Energieversorgung können diese Werte noch weiter gesteigert werden. Zur Ermittlung der tatsächlichen CO₂-Vermeidungskosten in der Papierindustrie, muss eine kombinierte Systemoptimierung unter Berücksichtigung alternativer Energiebereitstellungs- und Prozesstechnologien durchgeführt werden. Die dargestellten Ergebnisse bieten jedoch einen Anhaltspunkt, bis zu welchem Investitionsrahmen der Einsatz der untersuchten Technologien wirtschaftlich sinnvoll sein kann.

In Bezug auf die Lastflexibilisierung in der Papierindustrie zeigt sich, dass in der Holzstofferzeugung ein großes Potenzial für Demand Side Management liegt, welches teilweise bereits heute am Regelenergiemarkt genutzt wird. Wie die Analyse zur Teilnahme am Regelenergiemarkt für Minutenregelleistung zeigt, wären die potenziellen Einnahmen aus dem Jahr 2017 nur gering. Jedoch können auch diese weiter gesteigert werden, beispielsweise durch die Präqualifikation und Teilnahme am Sekundärregelenergiemarkt. Die untersuchten Refiner eignen sich aufgrund ihrer Auslegung und Betriebsweise grundsätzlich ebenso für diese Art der Regelleistung. Die Auswertung der Minutenregelleistung kann somit in Zukunft auf weitere Regelenergieprodukte ausgeweitet werden. Ebenfalls bietet sich in diesen Kontext die Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) in Deutschland an.

5 Literatur

- [1] Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken; 2017.
- [2] Treibhausgasemissionen 2016 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2016). Berlin: Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt; 2017.
- [3] Key Statistics 2016 - European Pulp&Paper Industry. CEPI; 2017.
- [4] Bundesamt S. Produzierendes Gewerbe-Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4 Reihe 64. Wiesbaden; 2016.
- [5] Hutter F. Strategie der Energieversorgung in der Papierindustrie. Wochenblatt für Papierfabrikation; 2007.
- [6] Pardo N, Vatopoulos K, Riekkola AK, Perez A. Methodology to estimate the energy flows of the European Union heating and cooling market. Energy. 2013;52:339-52.
- [7] Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables) In: WP3_DataAnnex_FinalEnergy_ForPuplication_201607 RAI, editor. <http://ec.europa.eu/energy/en/studies/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment>: EU Kommission; 2016.
- [8] Kessler A, Blesl M. Energieeffizienz in der Industrie. Berlin: Springer Vieweg; 2013.
- [9] Werner Lutsch F-GW. PERSPEKTIVEN DER FERNWÄRME UND DER KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG: Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie „PLURALISTISCHE WÄRMEVERSORGUNG“ Frankfurt am Main; 2005.
- [10] Dr. Andreas Kemmler SS, Friedrich Seefeldt, Natalia Anders, Dr. Clemens Rohde, Dr. Tobias Fleiter, Ali Aydemir, Heinrich Kleeberger, Lukas Hardi, Dr. Bernd Geiger. Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005-2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt; 2017.
- [11] Naegler T, Simon S, Klein M, Gils HC. Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. International Journal of Energy Research. 2015;39:2019-30.
- [12] Marco Wunsch BE, Eberhard Jochem, Markus Gailfuß. Potenzial-und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014. 2014.
- [13] Rehfeldt M, Fleiter T, Rohde C, Toro F, Reitze F. A bottom-up estimation of heating and cooling demand in the European industry. European Council for an Energy-Efficient Economy (ECEEE Industrial Summer Study). Berlin; 2016.
- [14] Manninen J, Puumalainen T, Talja R, Pettersson H. Energy aspects in paper mills utilising future technology. Applied Thermal Engineering. 2002;22:929-37.
- [15] AB Å-E. Energy consumption in the pulp and paper industry - Model mills 2010: Integrated fine paper mill. Market Area Forest Industry; 2011.
- [16] Taschenbuch der Papiertechnik : mit 94 Tabellen. 2., aktualisierte Aufl. ed. München: Carl Hanser Verlag München; 2013.
- [17] Dipl.-Ing. Monika Vogt OB, Achim Hutter, Holger Jung , Benjamin Meyer, Stefan Kirschbaum, Astrid Schubert, Jörg Meyer. Branchenleitfaden für die Papierindustrie Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier; 2008.
- [18] Bajpai P. Pulp and paper industry : energy conservation. Amsterdam; 2016.
- [19] Dietzsch B. Taschenbuch der Verfahrenstechnik : mit 49 Tabellen: Schwister Karl; 2010.
- [20] Lemaitre A. Superheated Steam Drying Technology. Paper Technology. 2004.

- [21] Kiiskinen HT, Edelman KE. Superheated Steam Drying of Paper Web. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*. 2002;10:349-65.
- [22] Kong L, Hasanbeigi A, Price L. Assessment of emerging energy-efficiency technologies for the pulp and paper industry: a technical review. *Journal of Cleaner Production*. 2016;122:5-28.
- [23] Beck D. *Development of A Continuous Process for Displacement Dewatering*. 2006.
- [24] Luiten EEM. *Beyond energy efficiency - Actors, networks and government intervention in the development of industrial process technologies [Doctoral Thesis]: Universität Utrecht*; 2001.
- [25] Chudnovsky Y, Kozlov A. Advanced High-Efficiency and Low-Emission Gas-Fired Drum-Drying Technology. In: Syred N, Khalatov A, editors. *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies: Environmental Protection and Pollution Reductions*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2007. p. 285-98.
- [26] Martin N, Anglani N, Einstein D, Khrushch M, Worrell E, Price LK. Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the U.S. pulp and paper industry. 2000.
- [27] Paulus M, Borggreffe F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy*. 2011;88:432-41.
- [28] Robinius M. *Strom- und Gasmärkte zur Versorgung des deutschen Strassenverkehrs mit Wasserstoff*. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek; 2015.
- [29] Michael Suhr GK, Ioanna Kourti, Miguel Rodrigo Gonzalo, Germán Giner Santonja, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: European Commission; 2015.