

KLIMASTUDIE PAPIERINDUSTRIE

TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALITÄT



INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung.....	4
2 Vorgehen.....	5
3 Branchenportrait der Papierindustrie	6
3.1 Die deutsche Papierindustrie	6
3.1.1 Verpackungspapiere.....	8
3.1.2 Grafische Papiere	9
3.1.3 Hygienepapiere.....	10
3.1.4 Spezialpapiere	11
3.2 Die Wertschöpfungskette Papier	13
3.2.1 Rohstoffe und Hilfsstoffe	14
3.2.1.1 Frischfaser	14
3.2.1.2 Recyclingfaser	17
3.2.1.3 Mineralien und Additive.....	18
3.2.2 Die Papiermaschine	19
3.2.3 Weiterverarbeitung und Nutzung der Produkte	21
3.3 Papierindustrie im Kontext der Klimaziele.....	22
3.3.1 Treibhausgasemissionen der Papierindustrie.....	22
3.3.2 LULUCF-Beitrag.....	24
4 Technologien für die Transformation	26
4.1 Klimaneutrale Energieträger.....	26
4.1.1 Nachhaltige Festbrennstoffe	26
4.1.2 Grüne Gase	27
4.1.3 Strom	27
4.2 Klimaneutrale Dampferzeugung.....	28
4.2.1 Brennstoffkessel	29
4.2.2 Elektrische Dampfkessel	30
4.2.3 Wärmepumpe	31
4.2.4 Tiefengeothermie.....	32
4.3 Kraft-Wärme-Kopplung.....	33
4.3.1 GuD-Prozess	33
4.3.2 Kombination von Brennstoffkessel und Dampfturbine	34
4.4 Befeuerte Trocknungsprozesse	36

4.4.1 Trockenhaube	36
4.4.2 Infrarottrocknung	36
4.4.3 Schwebetrockner	37
4.5 BECCS-Potential für eine Klimasenke	37
4.6 Innovative Ansätze in der Papierfertigung	39
5 Transformation zur klimaneutralen Papierindustrie	41
5.1 Energieversorgung im deutschen Gesamtkontext	41
5.1.1 Strom	42
5.1.2 Wärme	44
5.2 Die klimaneutrale Papierproduktion	45
5.3 Energiemixszenarien für eine klimaneutrale Papierindustrie	46
6 Zusammenfassung	48
7 Quellenverweise	49
9 Impressum	52

1 EINLEITUNG

Der Klimaschutz ist eines der drängendsten Themen unserer Zeit. Die Auswirkungen des Klimawandels beeinflussen unsere Lebensgrundlage und die Anstrengungen zur Eindämmung sind mit Veränderungen in nahezu allen Lebensbereichen verbunden. Dies trifft auch auf die deutsche Papierindustrie zu. Die Auswirkungen, insbesondere auf die Rohstoff- und die Wasserversorgung, sind existenzielle Themen für die Branche. Gleichzeitig arbeitet sie kontinuierlich daran, die eigenen Emissionen zu verringern.

Der Klimawandel ist eine globale Herausforderung. Er ist durch vom Menschen verursachten Anstieg der Treibhausgasemissionen entstanden, die noch immer weltweit zunehmen. Der mit Abstand größte Faktor ist fossiles CO₂. Der Klimawandel wirkt weltweit und nur durch gemeinsame Anstrengungen der Weltgemeinschaft kann er wirksam eingedämmt werden. Diese hat sich daher das Ziel gesetzt, den Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts auf möglichst 1,5 °C und maximal 2 °C zu begrenzen. Auf Basis der internationalen Vereinbarungen leiten die Europäische Union und Deutschland jeweils klimapolitische Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen ab. Die EU hat 2021 beschlossen, bis 2050 klimaneutral werden zu wollen. Deutschland hat dieses Ziel für sich auf 2045 vorgezogen.

Damit diese Anstrengungen auch auf das globale Ziel wirken, muss die Vermeidung durch eine klimafreundliche Transformation aller Sektoren erfolgen. Dies gilt auch für die Industrie. Eine simple Verlagerung der emissionsintensiven Produktionsschritte ins Ausland würde zwar auf nationale bzw. europäische Klimaziele einzahlen. Für das übergeordnete Ziel, die Eindämmung des Klimawandels, ist sie jedoch kontraproduktiv und geht mit dem Verlust von Wertschöpfung einher. Daraus ergibt sich auch für die deutsche Papierindustrie die Notwendigkeit einer klimafreundlichen Transformation im eigenen Land. Mit einer Reduktion der Treibhausgase je Tonne Papier um 43 % gegenüber 1995 kann die Branche bereits einen beachtlichen Erfolg vorweisen. Für die Vermeidung der verbleibenden Emissionen werden in der Branche vielfältige Anstrengungen unternommen.

Um einen Überblick über die verschiedenen Transformationsmöglichkeiten der Branche zu geben, hat DIE PAPIERINDUSTRIE zusammen mit anderen Partnern diese Studie erstellt. Ziel ist es, Interessierten aus Politik und Zivilgesellschaft einen möglichst umfassenden Einblick in die Branche und ihre vielfältigen Verflechtungen beim Thema Klimaschutz zugeben. Gleichzeitig soll die Studie der Branche neue Impulse geben, vielversprechende Ansätze weiterzuverfolgen.

2 VORGEHEN

Die vorliegende Klimastudie hat das Ziel, einen möglichst umfassenden Einblick über das Thema Klimaschutz in der Papierindustrie zu geben. Dafür wurde DIE PAPIERINDUSTRIE von der Papiertechnischen Stiftung (PTS), dem Fachbereich Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) der TU Darmstadt sowie von der Modellfabrik Papier unterstützt. Darüber hinaus wurde ein Studienbegleitkreis bestehend aus Industrieexperten gegründet, der die Ausarbeitung fachlich begleitet hat.

Die Studie beginnt mit einem Branchenportrait, in dem die Papierindustrie in ihrer Vielfalt vorgestellt und entlang der Wertschöpfungskette von der Rohstoff-erzeugung bis zum Papierprodukt auf das Entstehen von Treibhausgasen untersucht wird. Es wurde gemeinsam mit der PTS erarbeitet und im Bereich Recycling um die Expertise des PMV ergänzt. Im Fokus des Branchen-portraits steht dabei das wichtigste Treibhausgas CO₂. Weitere Treibhausgase werden soweit möglich ebenfalls einbezogen. Neben direkten Emissionen wird auch der Energieeinsatz betrachtet, da dieser zumeist mit indirekten Emissionen verbunden ist. Auch vor- und nachgelagerte Ketten werden eingebunden. Die identifizierten Treibhausgasquellen werden dann für die Branche zusammengefasst und nach Schwerpunkten sortiert. Zudem wird die Papierindustrie im Kontext der Klimaziele betrachtet.

Anschließend wird untersucht, mit welchen Technologien die noch vorhandenen direkten und indirekten Treibhausgasemissionen vermieden werden können. Dafür wurde insbesondere die Expertise des Begleitkreises genutzt. Der Schwerpunkt liegt auf bereits bekannten Technologien, die schon erprobt sind. Mit Unterstützung der Modellfabrik Papier werden aber auch innovative Ansätze vorgestellt.

Um möglichen Wechselwirkungen Rechnung zu tragen, werden die untersuchten Technologien im Gesamtkontext der deutschen Klimaschutzbemühungen betrachtet. Dabei werden Synergien identifiziert und im Szenario einer klimaneutralen Papierindustrie berücksichtigt. Abschließend erfolgt eine energetische Betrachtung mit verschiedenen klimaneutralen Energiemixszenarien.

3 BRANCHEN- PORTRAIT DER PAPIERINDUSTRIE

Zu Beginn soll die Papierindustrie in einem Branchenportrait vorgestellt werden, um anschließend ihren Effekt auf das Klima bewerten zu können. Dafür sollen direkte Treibhausgasemissionen, aber auch Energieverbräuche, die indirekt zur Emission von Treibhausgasen führen können, identifiziert werden. In 3.1 erfolgt dafür zuerst eine allgemeine Vorstellung der deutschen Papierindustrie und ihrer Produkte. Anschließend wird in 3.2 die Wertschöpfungskette Papier beschrieben. Ausgehend von den eingesetzten Rohstoffen folgt die Analyse der eigentlichen Papierproduktion bis hin zur anschließenden Weiterverarbeitung und Nutzung. Abschließend werden in 3.3 die Effekte der Branche auf das Klima beschrieben.

3.1 DIE DEUTSCHE PAPIERINDUSTRIE

Mit einer Jahresproduktion von 21,6 Millionen Tonnen ist die deutsche Papierindustrie europaweit Spitzenreiter und belegt im weltweiten Produktionsranking den vierten Rang hinter den teils deutlich größeren Volkswirtschaften der USA, Chinas und Japans. Die Branche ist energie-, rohstoff- und kapitalintensiv sowie stark globalisiert und dokumentiert dies mit ihrem jährlichen Leistungsbericht [\[1\]](#), einer umfangreichen und öffentlich zugänglichen Branchenstatistik.

Im Rahmen einer von DIE PAPIERINDUSTRIE beauftragten Studie [\[2\]](#) wurde ermittelt, dass die deutsche Papierindustrie überdurchschnittlich stark im ländlichen Raum vertreten ist und dort zur Stabilisierung und zur Wertschöpfung beiträgt. Etwa 82 % der Beschäftigten haben dort ihren Arbeitsplatz (verglichen mit 56 % über alle Branchen). Diese ländliche Verankerung lässt sich aus der Historie begründen. Wasser- und Energiebedarf ließ die Papierindustrie schon sehr früh an Flüsse ziehen. Während die Wasserkraft den heutigen Energiebedarf der Fabriken bei weitem nicht mehr deckt, spielt Wasser auch heute noch eine tragende Rolle für den Produktionsprozess. Es wird in erster Linie als Prozesswassergenutzt, mit dessen Hilfe Papier produziert werden kann. Aber auch für die Energieversorgung kommt es zum Einsatz, bspw. bei der benötigten Dampferzeugung und oftmals auch für die Stromerzeugung. Von der Zunahme von Dürreperioden im Rahmen des

Klimawandels ist somit auch die deutsche Papierindustrie betroffen. Auf die sich abzeichnende Verringerung der Wasserverfügbarkeit reagiert die Branche daher mit Effizienzsteigerungen beim Wasserverbrauch, um resilienter zu werden.

Auch wirtschaftlich wird die Papierindustrie effizienter. Dies ist in den meisten Fällen nur durch Skaleneffekte in teils sehr großen und kapitalintensiven Anlagenkomplexen möglich, die rund um die Uhr laufen. In weitgehend optimierten Produktionszyklen werden in großen Werken teils über 1 Millionen Tonnen Papier und mehr pro Jahr produziert. Papierfabriken unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung. Dementsprechend ist die lokale Bindung der Unternehmen nach einer Standortentscheidung sehr hoch. Im Falle sich verschlechternder Produktionsbedingung kann jedoch eine Produktionsverlagerung auf andere Werke mit besseren Produktionsbedingungen erfolgen. Durch zusätzlich ausbleibende Investition bzw. Verlagerung der Investition kann sich diese auch längerfristig zementieren. Bedingt durch ihre internationale Struktur ist ein wettbewerbsfähiges Umfeld in Deutschland somit essenziell für den Erhalt der deutschen Papierindustrie.

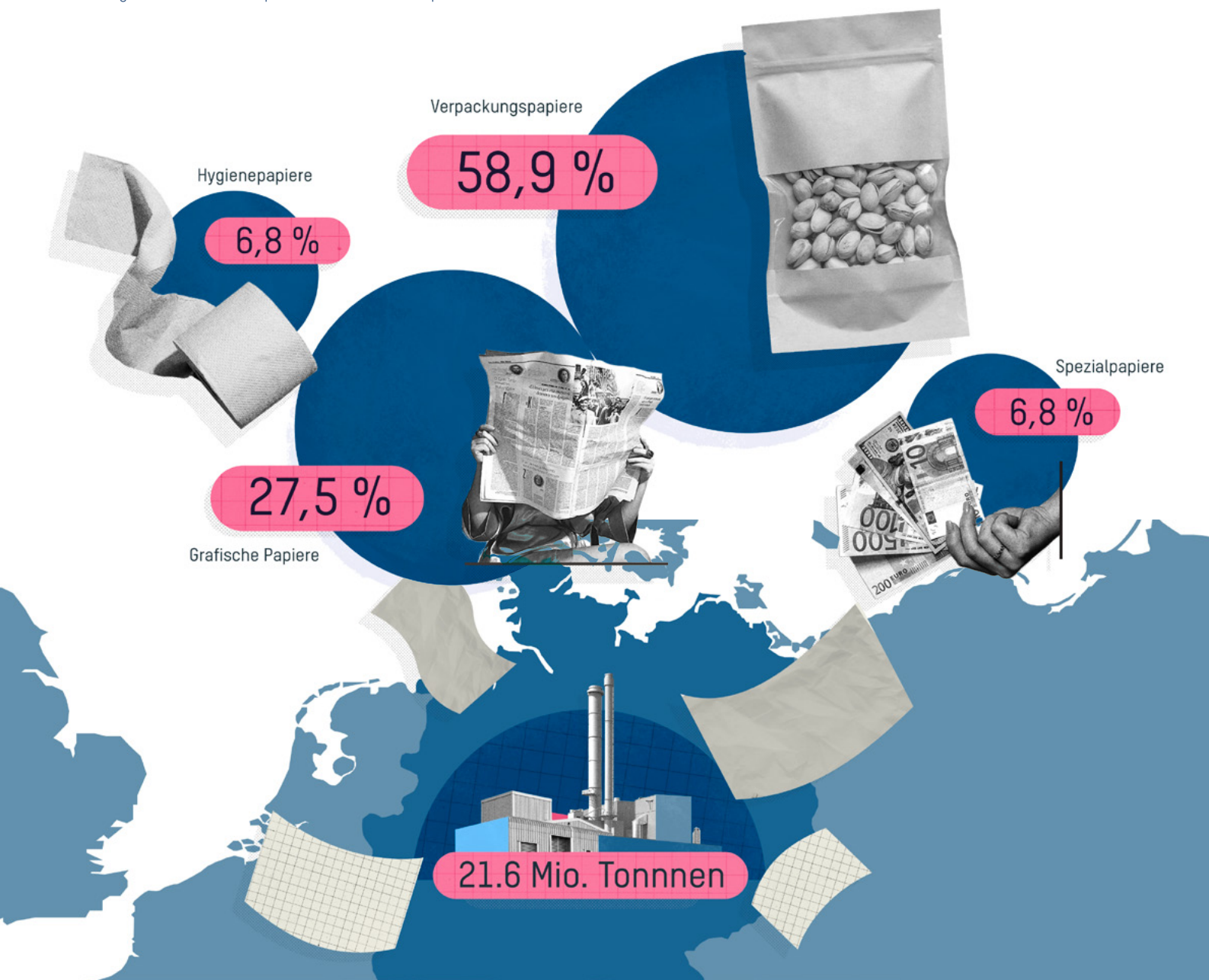
Die Branche steht vor einigen großen Herausforderungen. Die demografische Entwicklung und der damit verbundene Fachkräftemangel sowie die Digitalisierung sind zwei Megatrends von grundlegender Bedeutung. Hinzu kommt der Druck, der durch die Globalisierung auf den Produktionsstandort Deutschland ausgeübt wird. Dieser ist enorm und wird durch Unsicherheiten bei der Rohstoff- und insbesondere der Energieversorgung begründet. Die Ursachen hierfür liegen in den politischen Umbrüchen. Zum einen hat sich mit dem russischen Angriff auf die Ukraine die deutsche Energieversorgung massiv gewandelt. Die gedrosselten beziehungsweise gestoppten russischen Erdgaslieferungen via Pipeline sollen zukünftig durch LNG-Lieferungen per Schiff ersetzt werden. Deutschland und auch die deutsche Papierindustrie haben im Rahmen der Transformation zur klimafreundlichen Produktion zu einem Großteil auf Erdgas als Brückenlösung gesetzt. Dieses verteuert sich nun durch die neuen Gegebenheiten. Zum anderen wirkt sich auch die klimapolitische Entwicklung auf nationaler und europäischer Ebene zunehmend negativ auf die wirtschaftlichen Bedingungen für energieintensive Branchen aus. Im Gegensatz zu anderen Weltregionen wird in Europa und vor allem in Deutschland der Einsatz fossiler Brennstoffe verteuert, während wirtschaftliche Ausgleichsmaßnahmen zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit teilweise sogar reduziert werden. Um wirksamen Klimaschutz zu erreichen, muss die Verteuerung fossiler Brennstoffe

jedoch mit dem Erhalt wirtschaftlicher Stärkungsmaßnahmen kombiniert werden. Anderenfalls droht eine Verlagerung von Wirtschaft und Emissionen, wodurch dem Klimaschutz nicht geholfen wäre.

Die genannten Herausforderungen treffen die gesamte Branche. Auch wenn eine Vielzahl an Papiersorten produziert wird, ist der grundsätzliche Aufbau der Anlagen und das Herstellungsprinzip sehr ähnlich. Anwendungsbezogen wird in vier Hauptsortengruppen unterschieden: **Verpackungspapiere, grafische Papiere, Hygienepapiere und technische bzw. Spezialpapiere.**

Die den Hauptsorten untergeordneten Produkte zeichnen sich durch eine breite Variation an Grammaturen, eingesetzten Rohstoffen und speziellen Produktions- bzw. Veredelungsschritten aus, sodass eine vielfältige Produktpalette entsteht. Einen umfassenden Einblick erhält man über das Taschenbuch der Papiertechnik [3], einem Standardwerk für die Papierindustrie.

Abbildung 1 - Anteile der Hauptsorten an der Gesamtproduktion 2022



3.1.1 VERPACKUNGSPAPIERE

Mit 59 % gelten die Verpackungspapiere als inzwischen produktionsstärkste Hauptsortengruppe. Mit rund $\frac{3}{4}$ bilden die Wellpappenrohapiere hier die größte Fraktion. Wellpappe besteht aus Wellenpapieren (Wellenbahn) und Deckenpapieren (Liner). Die Anforderung an diese Materialien sind bestimmt durch die mechanischen Parameter Steifigkeit und Festigkeit sowie die Verklebbarkeit. Zunehmend müssen die Liner sich aber auch durch eine gute Bedruckbarkeit auszeichnen, da im Onlinehandel die Wellpappebox selbst vermehrt als Werbefläche genutzt wird.

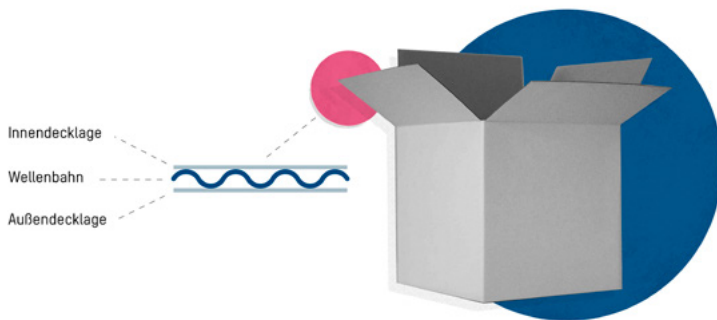


Abbildung 2 - Wellpappe

Die Qualitäten der Wellpappenrohapiere variieren je nach Anwendungsfall stark. Die Wellenpapiere liegen im Flächengewichtsbereich von 90 g/m^2 bis 400 g/m^2 und können auf Halbzellstoff- (Fluting) oder Altpapierbasis (Wellenpapier) erzeugt werden. Die Deckenpapiere bestehen aus ungebleichtem Kraft-Zellstoff (Kraftliner) oder Altpapier (Testliner) bei typischen Flächenmassen von 50 g/m^2 bis 200 g/m^2 . Die für Wellpappenrohapiere meist großformatigen Papiermaschinen laufen mit einer Produktionsgeschwindigkeit von bis zu 1600 m/min .

Die nächstgrößte Fraktion ist Karton mit einem Anteil von 19 % der Produktion an Verpackungspapieren. Kartone sind Papiere mit relativ hoher Festigkeit, die aus höheren Flächenmassen resultiert. Dabei kann aber der Flächengewichtsbereich mit dem von Papieren durchaus überlappen. Eine detaillierte Unterscheidung ist in der DIN 19303 geregelt. Wichtigstes Produkt dieser Gruppe ist Faltschachtelkarton, der als Verpackung für Lebensmittel, Pharmazeutika oder Kosmetikartikel genutzt wird. Daneben werden aber auch Kartone für Gipskartonplatten, Spielkarten, Bucheinbände und andere Produkte erzeugt. Fertige Kartonprodukte sind ein- oder häufiger auch mehrlagig aufgebaut und kombinieren so verschiedene Anforderungsprofile miteinander. Die einzelnen Lagen werden dafür ohne

Klebstoffeinsatz miteinander verpresst. Der Papiermacher bezeichnet diesen Vorgang noch heute als „Vergautschen“. Ein Begriff, der mehrere Jahrhunderte zurückreicht und das Pressen des damals noch handgeschöpften feuchten Papiers bezeichnete.

Die äußeren Lagen des gegautschten Kartons sind für die Festigkeit und das Erscheinungsbild (Haptik, Bedruckbarkeit) verantwortlich, während mittlere Lagen durch einen hochvolumigen Aufbau für die Steifigkeit des Materialverbundes sorgen.

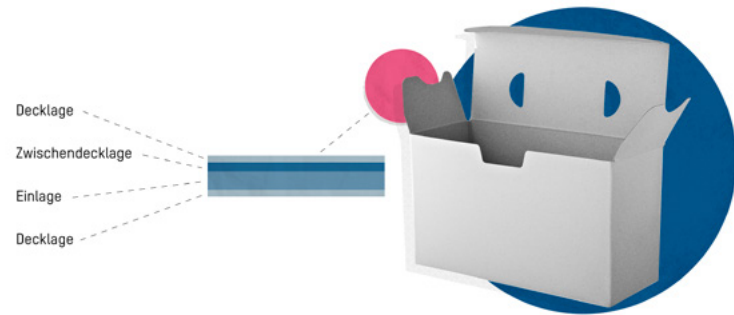


Abbildung 3 - Karton

Oft werden für die Außenlage gestrichene Kartons eingesetzt, die eine spätere hochwertige Bedruckung ermöglichen. Da sowohl gebleichte wie ungebleichte Zell- und Holzstoffe sowie Altpapier eingesetzt werden, die Lagen unterschiedlich kombinierbar sind und durch eine ergänzende Kunststoff-, Wachs- oder mineralische Oberflächenbeschichtung (sog. Strich) ergänzt werden können, ist die Produktvielfalt sehr groß. Sie wird durch einen Kennzeichnungsschlüssel definiert, auf den an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Die Produktgruppe weist eine hohe Flächenmasse im Bereich von 160 g/m^2 bis hin zu 600 g/m^2 auf und wird auf Kartonmaschinen erzeugt, die bis zu einer Geschwindigkeitsgrenze von etwa 1000 m/min arbeiten. Aufgrund des hohen Flächengewichts und der damit einhergehenden großen Wassermenge ist die Anforderung an die Trocknung sehr hoch, sodass die Trockenpartie (vgl. 3.2.2) entsprechend mit einer stärker dimensionierten Beheizung ausgerüstet ist.

Weiterhin werden mit Wickelpappe, flexiblen Verpackungspapieren, Etikettenpapieren und vielem mehr noch zahlreiche andere Verpackungspapierprodukte in kleinerer Menge am Markt angeboten. Dabei liegen insbesondere die flexiblen Verpackungspapiere derzeit im Fokus, da diesen ein hohes Potential bei der Substitution von Kunststoffverpackungen eingeräumt wird. Klassische Beispiele sind Wrappings und vermehrt auch Beutel. Hier ist neben der Flexibilität des Materials

meist eine Barrierefunktion notwendig, so dass diese Papiere daher Gegenstand intensiver Forschung sind. Um das Anforderungsprofil der Lebensmittelverpackungen hinsichtlich Wasserdampf-, Fett- und Gasbarriere zu erfüllen, wird reines Papier zumeist mit einer zusätzlichen Polymerbeschichtung versehen. Diese muss eine Barrierefunktion erfüllen und darf die Rezyklierfähigkeit des Verpackungspapieres nicht negativ beeinflussen. Für die Herstellung einer Tonne altpapierhaltiger Verpackungspapiere beträgt der spezifische Strombedarf 300 bis 700 kWh und der spezifische Wärmebedarf 1100 bis 1800 kWh.

Zukünftig dürften die Verpackungspapiere ihre Branchendominanz weiter ausbauen. Ein verändertes Konsumentenverhalten hin zu mehr E-Commerce und der damit verbundene Versand der Waren hat vor allem die Wellpappe als Material nachfrageseitig in den Fokus gerückt. Es ist hier auch zukünftig mit einer unverminderten Nachfrage zu rechnen. Das Wachstum wird aber auch in den anderen Sortenbereichen durch den Bedarf an nachhaltigeren, d.h. umweltfreundlicheren und recycelbaren Verpackungslösungen sowie durch die steigende Popularität von E-Commerce Verpackungen angetrieben.

PAPIER, KARTON UND PAPPE FÜR VERPACKUNGSZWECKE

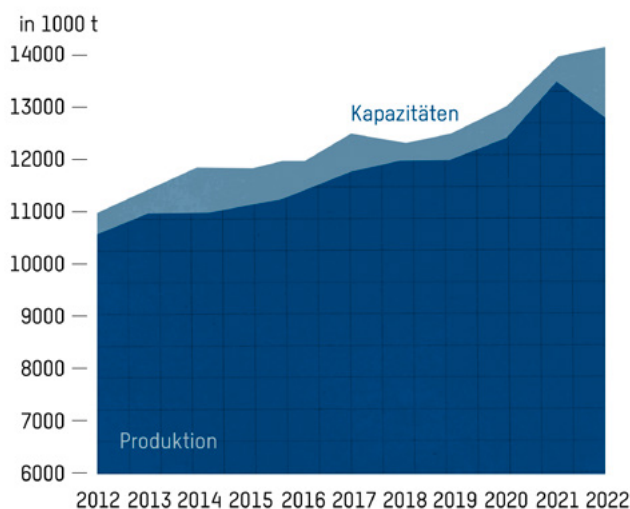


Abbildung 4 - Produktion und Kapazität von Verpackungspapieren

3.1.2 GRAFISCHE PAPIERE

Grafische Papiere als Informationsträger und Medium zur Informationsweitergabe waren über Jahrhunderte das wichtigste Papiermedium und spielen auch heute noch mit einem Anteil von etwa 28 % als zweitgrößte Hauptsortengruppe eine wichtige Rolle in der deutschen Papierproduktion.

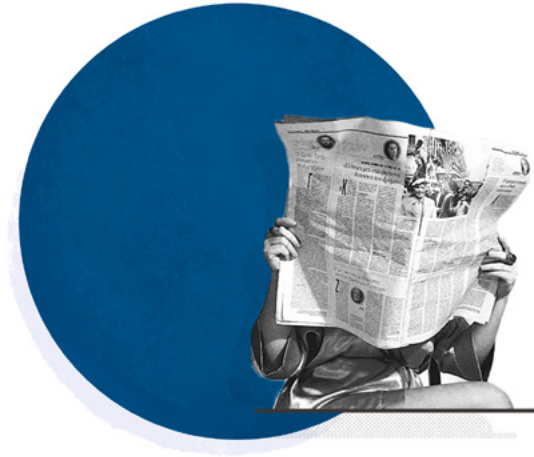


Abbildung 5 - Grafische Papiere

Presse- und Katalogpapiere bilden mit 61 % Produktionsvolumen die größte Gruppe der grafischen Papiere. Diese holzstoff- (vgl. 3.2.1) und altpapierhaltigen Papierqualitäten („holzhaltig“) werden für Zeitungen, Zeitschriften, Kataloge oder Zeitschriftenbeilagen eingesetzt und erfordern eine hohe Festigkeit, geringe Transparenz und hohe Glätte, um eine gute Bedruckbarkeit sicherzustellen. Die Bandbreite im Flächengewicht reicht von etwa 45 g/m² für z.B. Beipackzettel bis hin zu einigen Hundert g/m² in speziellen Druckanwendungen, in der Regel aber um 100 g/m². Die Maschinen können Geschwindigkeiten von mehr als 2000 m/min erreichen und benötigen rund 1200 bis 2100 kWh/t Strom sowie 1000 bis 1800 kWh/t Wärme.

Auf der anderen Seite finden sich mit 39 % Anteil Büro- und Administrationspapiere, die keinen Holzstoff enthalten, sondern aus Zellstoff und Altpapierstoff hergestellt werden („holzfrei“). Hierunter fallen Kopierpapier, Streichrohpapier, aber auch Künstlerpapiere. Der spezifische Energiebedarf für diese Produktgruppe beträgt 600 bis 1000 kWh/t Strom und 1200 bis 2100 kWh/t Wärme.

Die schnelle Verbreitung des Internets als Massenmedium führt dazu, dass vor allem schnelllebiges Informationsmedium digital konsumiert werden und der Absatz von Zeitungsdruckpapieren mit sinkenden Auflagen kontinuierlich zurück ging. Neben Zeitungen sind vor allem auch Kataloge nicht mehr nachgefragt, da Online-Shops ihre Angebote ebenfalls digital präsentieren.

Auch die Digitalisierung der Büros lässt den Papierbedarf schrumpfen. Ausdrucke im Office-Bereich sind durch Nutzung digitaler Bürokommunikation mehr und mehr zurück gegangen, was durch die Covid-Pandemie zusätzlich beschleunigt wurde.

Beständige Medien wie Bücher, klassisches Schreib- und Druckpapier oder Bilderdruckpapiere werden demgegenüber auch künftig aufgrund ihres dauerhaften Wertes Bestand haben und ein neues Grundniveau im Absatz grafischer Produkte konsolidieren. Die Branche passt sich an die insgesamt rückläufige Nachfrage in diesem Segment an, sodass etliche grafische Papierfabriken auf die Produktion von Verpackungspapieren umgerüstet haben.

GRAFISCHE PAPIERE

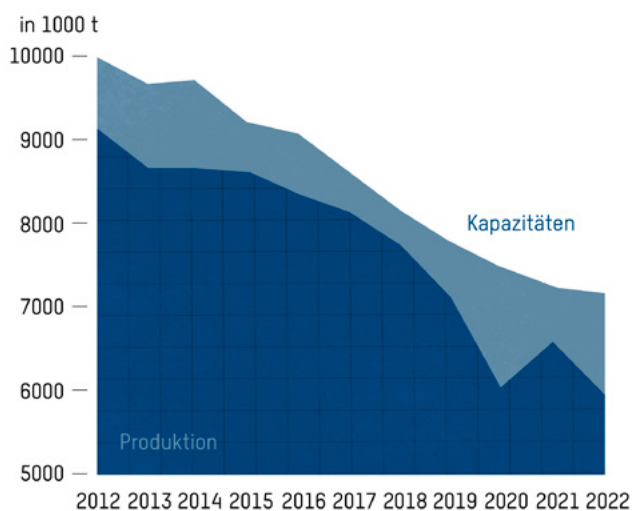


Abbildung 6 - Produktion und Kapazität von grafischen Papieren

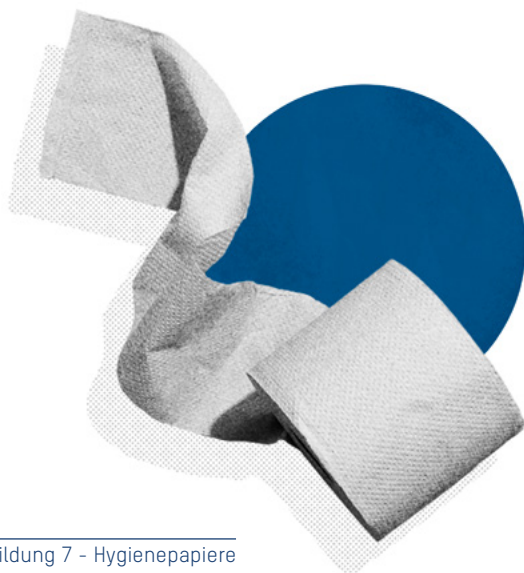


Abbildung 7 - Hygienepapiere

3.1.3 HYGIENEPAPIERE

Die Gruppe der Hygienepapiere (auch Tissuepapiere) macht etwa 7 % an der Gesamtproduktion aus. Diese Papiere bilden die Grundlage für Toilettenpapier, Küchenrollen, Handtücher, Taschentücher, Servietten und andere wichtige Hygieneprodukte.

Für Hygienepapiere kommen gebleichte Zellstoffe und/oder unterschiedlich hochwertige Altpapiersorten zum Einsatz - mit entsprechenden Einflüssen auf Weiße und Weichheit. Getrieben vom Konsumentenverhalten und der Verfügbarkeit hochwertiger Altpapiersorten ging die Altpapiereinsatzquote entgegen dem allgemeinen Trend in den letzten 20 Jahren in diesem Segment von 75 % auf etwa 50 % zurück. Gleichzeitig werden vermehrt alternative Frischfasern wie Stroh oder Gras eingesetzt. Hygienepapiere zeichnen sich durch geringste Flächengewichte zwischen 5 und 35 g/m² aus. Sie werden während der Produktion meist gekreppt und kommen überwiegend mehrlagig zum Einsatz, wodurch die gewünschte hohe Weichheit erreicht wird. Der Energieverbrauch liegt bei 800 bis 2000 kWh/t Strom und 1900 bis 2800 kWh/t Wärme.

Durch ihre Bedeutung für die Hygiene kommt den Tissuepapieren eine wichtige gesellschaftliche Rolle zu. Nicht zuletzt die Panikkäufe zu Beginn der COVID-19-Pandemie vergegenwärtigten die Bedeutung des Produkts in der Bevölkerung. Der Verbrauch innerhalb Deutschlands wird sich künftig wohl nur geringfügig verändern, da bereits heute eine Verbreitung innerhalb weiter Teile der Bevölkerung gegeben ist.

HYGIENEPAPIERE

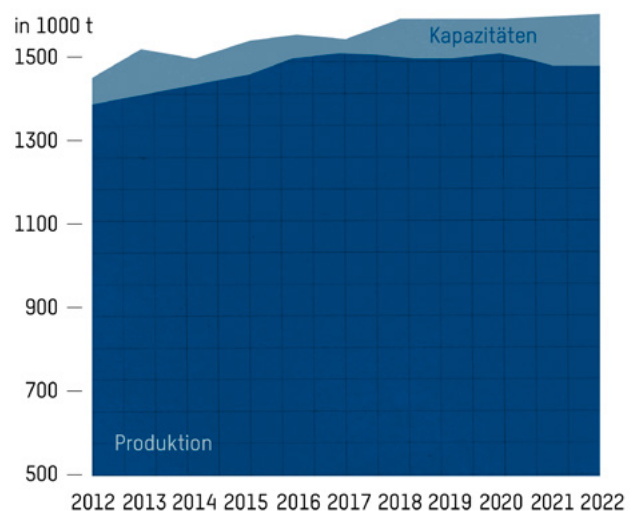


Abbildung 8 - Produktion und Kapazität von Hygienepapieren

3.1.4 SPEZIALPAPIERE

Papiersorten, die sich nicht in die oben genannten Bereiche einsortieren lassen, werden unter dem Begriff „Spezialpapiere“ zusammengefasst. Die Bandbreite ist äußerst hoch. Obwohl der Anteil an der Jahresproduktion mit 7 % vergleichsweise gering ist, handelt es sich um ein interessantes Marktsegment mit Produkten höchster Wertschöpfung. Bekannte Vertreter sind Fotopapiere, Dekorpapiere für Laminat, Banknotenpapiere, Filterpapiere wie Teebeutel- oder Kaffeefilterpapiere, Durchschreibepapiere, Zigarettenpapiere, Elektroisolierpapiere, Etikettenpapiere und Tapetenroh-papiere.



Abbildung 9 - Spezialpapiere

Oft stehen bei den einzelnen Papieren spezielle Eigenschaften im Fokus, denen durch eine entsprechende Herstellung und den Einsatz bestimmter Rohstoffe Rechnung getragen wird. So sind besondere optische

Qualitäten, Festigkeit, Porosität oder Glätte direkt einstellbar. Oft werden die Papiere durch einen teilweise mehrlagigen Oberflächenstrich weiter veredelt. Der Flächenmassenbereich reicht von 12 g/m² bei besonders leichten Teebeutelpapieren bis hin zu 300 g/m² bei einigen Fotorohpapieren. Vielfach ist eine nassfeste Ausrüstung erforderlich oder es kommen spezielle Fasern wie Baumwollfasern oder verschiedene Endlosfasern zum Einsatz.

Die Vielfalt der Spezialpapiere wird auch künftig erhalten bleiben. Einzelne Bedarfe werden sich jedoch erwartbar verschieben. Wurden früher Fotopapiere von jedermann zur Archivierung der Aufnahmen genutzt, erfolgt die Sammlung heute digital und nur besondere Bilder werden, dann jedoch auf hochwertigen und großformatigen Fotos, verewigt. Ebenso ist die Abkehr vom Bargeld in einigen Ländern weit fortgeschritten und wird sich in den nächsten Jahren weiter fortsetzen. Ausweise und Passdokumente zeigen ebenfalls den Trend hin zu Kreditkartenformaten. Hersteller von Sicherheitspapieren können aktuell ihre Kompetenzen nutzen, um Papiere beispielsweise für neue technische Anwendungen (gedruckte Elektronik, leitfähige Papiere) zu entwickeln.

Papier als flächiger und bahnweise verarbeitbarer Werkstoff eröffnet viele Möglichkeiten, wie zum Beispiel in Anwendungen der Energiespeicherung und der Wasserstofftechnologie. Die Rolle von Papier im Kontext der grünen Wasserstoffwirtschaft zeigt eindrucksvoll die Paper4Power-Initiative der Papiertechnischen Stiftung (PTS).

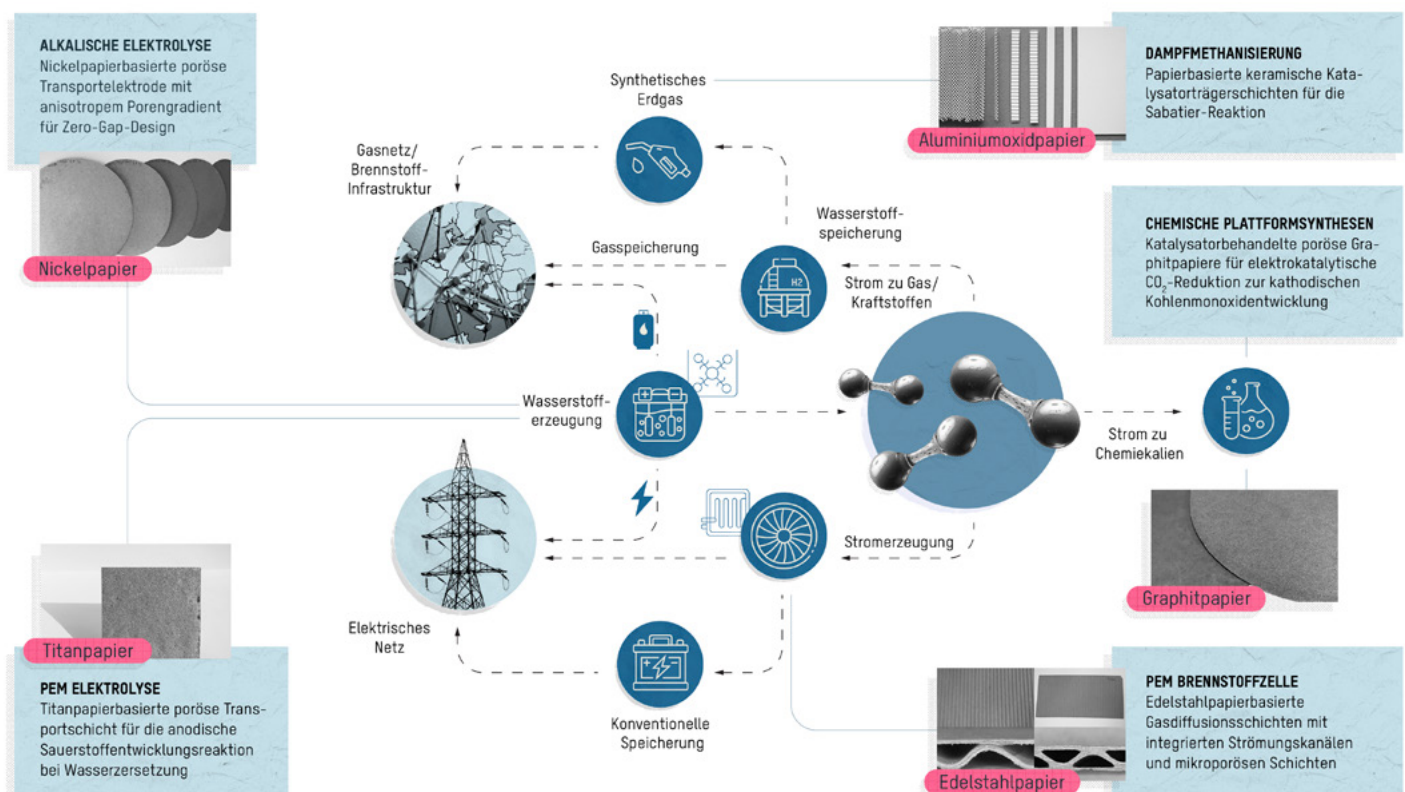


Abbildung 10 - PTS Paper4Power-Initiative [4]

Durch die Funktionalisierung von Papierstrukturen mit neuartigen Füllstoffen wie Graphit, Metallen oder Keramik-Precursoren und durch geeignete Oberflächenbeschichtungen sind Komponenten von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren herstellbar. Beispielsweise lassen sich nach thermischer Sinterung elektrisch leitfähige und gleichzeitige poröse Edelstahlstrukturen als Gasdiffusionsschichten erzeugen oder ein keramisches Papier als Katalysatorträger für die Dampfmethanisierung generieren. Diese Materialien befinden sich derzeit im Forschungsstadium. Aber auch als elektrische Isolationsschichten sind Papiere – hier in weitgehend klassischer Form – gut geeignet und werden bereits industriell eingesetzt.

TECHNISCHE UND SPEZIALPAPIERE

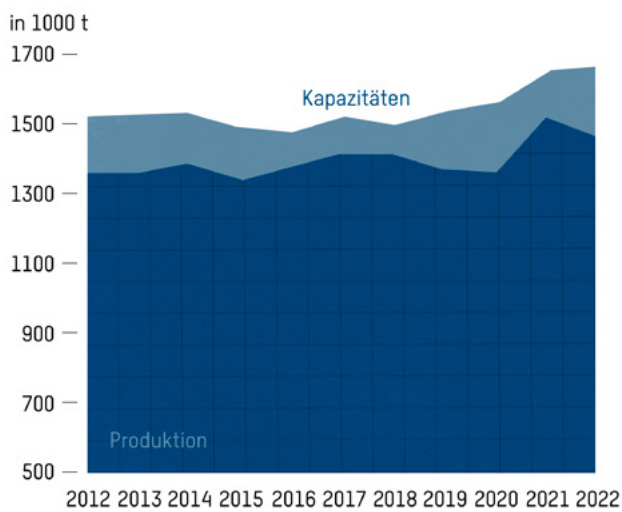


Abbildung 11 - Produktion und Kapazität von Spezialpapieren

3.2 DIE WERTSCHÖPFUNGSKETTE PAPIER

Papier ist ein flächiger Werkstoff, der aus miteinander vernetzten pflanzlichen Fasern besteht. Dementsprechend beginnt die Wertschöpfungskette von Papier bereits im Wald. Wichtigste Rohstoffquelle ist aber das Altpapier. Die Fasern aus beiden Quellen (Frisch- und Recyclingfaser) werden in unterschiedlichen Verhältnissen eingesetzt. Je nach gewünschter Eigenschaft kommen weitere Hilfsstoffe hinzu. Die Kernschritte der Papiererzeugung sind dabei immer gleich. Die Fasern werden, ggf. zusammen mit Hilfsstoffen, in einer Suspension vorbereitet. Die Suspension wird dann auf ein Sieb aufgebracht, auf dem sich die Papierfasern gleichmäßig ablegen.

Anschließend erfolgt die Entwässerung in mehreren Stufen. Zunächst läuft das Wasser bereits durch das Sieb hindurch ab, anschließend wird es mechanisch aus der Papierbahn gepresst und thermisch getrocknet, wodurch sich Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern ausbilden. Hierdurch erhält das Papier seine Festigkeit. Abschließend wird die Papierbahn auf dem „Tambour“ zu einer großen Rolle aufgewickelt.

Je nach Papier können durch zusätzliche Aggregate noch auf der Papierbahn Veredelungsschritte wie Streichen und Glätten erfolgen. Nachgelagert schließt sich dann das breite Feld der Papierverarbeitung an, welches die unterschiedlichen Papiersorten durch Zuschnitt, Kaschierung, Verformung, Verklebung etc. in die zugedachten Produkte überführt.

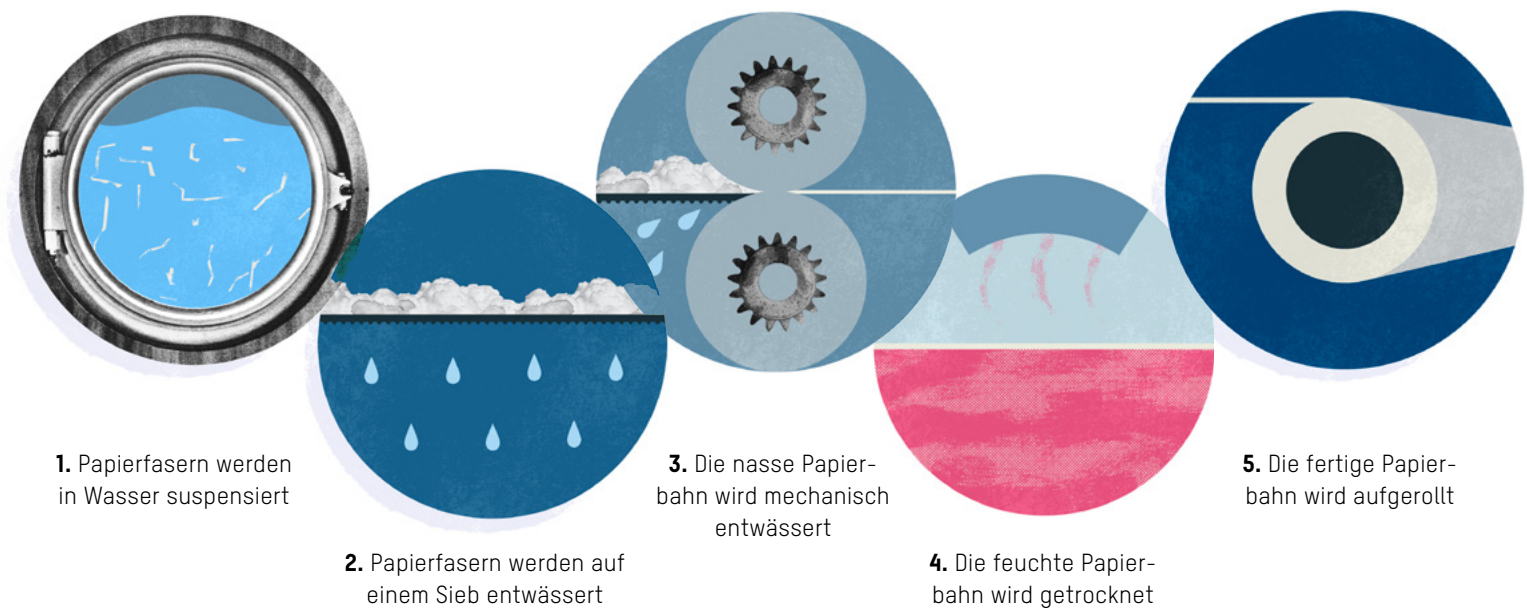


Abbildung 12 - Arbeitsschritte der Papiererzeugung

3.2.1 ROHSTOFFE UND HILFSSTOFFE

Der mit Abstand wichtigster Rohstoff für die deutsche Papierindustrie ist das Altpapier mit einem Anteil von 67,8 %. Da sich die aus dem Altpapier wiedergewonnenen Fasern aber nicht für alle Anwendungen eignen und der Rohstoffkreislauf aufrechterhalten werden muss, wird auch ein gewisser Teil an „neuen“ Frischfasern benötigt. Diese werden größtenteils aus Holzresten der Forst- und Holzwirtschaft gewonnen und in Form von Zellstoff (15,7 %) oder Holzstoff (3,3 %) eingesetzt. Auch eine Vielfalt anderer Fasern kommt zum Einsatz, die mengenmäßig mit 0,3 % jedoch kaum ins Gewicht fallen. Neben den Fasern kommen auch 12,9 % Mineralien und Additive zum Einsatz.

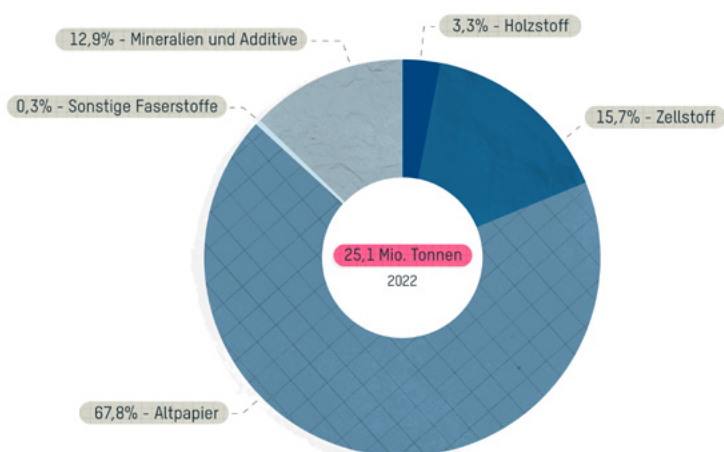


Abbildung 13 – Rohstoffeinsatz in der deutschen Papiererzeugung 2022

3.2.1.1 FRISCHFASER

Ausgangspunkt des Papierfaserkreislaufs ist die Frischfaser. Grundsätzlich eignet sich eine Vielfalt an Pflanzenfasern für die Papierproduktion. Wirtschaftlich durchgesetzt hat sich aber Holz, was seit Mitte des 19. Jahrhunderts durch die Erfindung von mechanischen und chemischen Ausschussverfahren möglich geworden ist. Die Holzmatrix besteht im Wesentlichen aus cellulosischen Pflanzenzellen (die späteren Fasern), die durch Lignin fixiert sind. Die Frischfasererzeugung dient dazu, über verschiedene Methoden diese Fasern für die Papierindustrie nutzbar zu machen. Zum einen durch das chemische Herauslösen der Fasern (Zellstoff) und zum anderen durch die mechanische Trennung (Holzstoff), bei der noch ein Teil des Lignins an der Holzfasern verbleibt.

In Deutschland werden für die Frischfasererzeugung rund 9,3 Millionen Festmeter (fm) Faserholz ohne Rinde (o.R.) eingesetzt. Der „Festmeter“ ist eine für Förster

HOLZSTRUKTUR

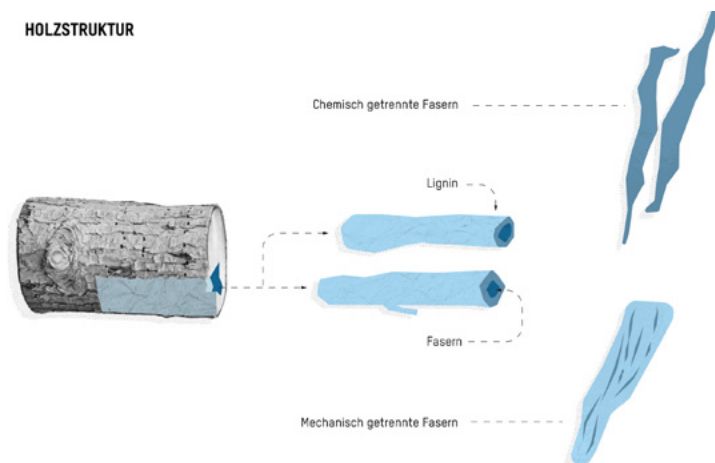


Abbildung 14 – Holzstruktur

Dabei entspricht 1 fm einem Kubikmeter fester Holzmasse.

Der Vorteil der Papierindustrie ist, dass sie auch weniger wertvolle Holzsorten, bis hin zu Nebenprodukten anderer holzbasierter Industrien (z.B. Sägewerke), nutzen kann. Etwa 40 % des in der Papierindustrie eingesetzten Holzes sind Sägenebenprodukte. Die restlichen 60 % sind Rundholz, das überwiegend als Schadholz oder Durchforstungsholz in der Forstwirtschaft anfällt. Die Branche trägt somit dazu bei, einen möglichst hohen Anteil des Holzes stofflich zu nutzen. Dieser Effizienzgedanke lässt sich in der sogenannten Kaskadennutzung zusammenfassen:

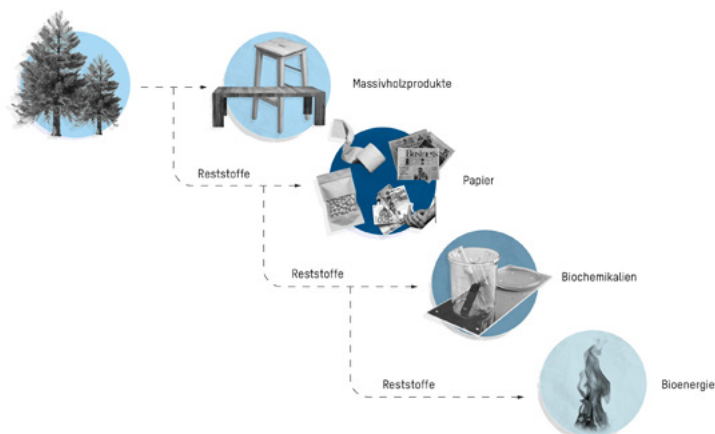


Abbildung 15 – Die Holznutzungskaskade

Rund 4 Millionen Tonnen Zellstoff kommen in der deutschen Papierindustrie jährlich zum Einsatz. Diese Fasern stammen aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern und sind entsprechend zertifiziert. Rund 1,5 Millionen Tonnen werden in Deutschland produziert, so dass ein Nettoimport von nochmal 2,5 Millionen Tonnen hinzukommt. Wichtigste Importländer sind Brasilien, Finnland und Schweden, die zusammen etwa 2 Millionen Tonnen ausmachen.

Zellstoff wird hauptsächlich mithilfe von zwei chemischen Prozessen aus Holz gewonnen: Dem Sulfat- und dem Sulfitverfahren. Beide Prozesse bauen auf demselben Grundprinzip auf: Die Holzhackschnitzel werden zunächst bei hohen Temperaturen und hohen Drücken zusammen mit je nach Verfahren unterschiedlichen Chemikalien gekocht. Dabei werden die Fasern aus der Holzmatrix freigesetzt, um das Lignin weitgehend in der Kochlauge zu lösen und aus dem Prozess auszuschleusen (Delignifizierung). Im Anschluss daran erfolgen mehrere Bleichvorgänge, um Restlignin zu entfernen. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Prozessen liegt in der Chemie des Kochprozesses. Durch die Verbrennung der Lauge lassen sich Chemikalien nahezu vollständig rezyklieren. Gleichzeitig kann auch der Energieeinsatz für den gesamten Zellstoffherstellungsprozess abgedeckt und häufig sogar überkompensiert werden, bspw. zur Stromproduktion für andere Prozesse oder das öffentliche Netz. Das Sulfatverfahren geht dabei mit einem spezifischen Energieeinsatz von 3.056 kWh/t einher, während im Sulfitverfahren 4.167 kWh/t notwendig sind.

Der herausgekochte Zellstoff wird anschließend in Plattenform getrocknet und in dieser Form als Marktzellstoff in die Papierfabriken geliefert. In integrierten Anlagen - d.h. Zellstoffwerk und Papierfabrik befinden sich nebeneinander - ist eine Trocknung nicht notwendig, da der feuchte Zellstoff direkt in die Papierfabrik gepumpt werden kann. Bei nichtintegrierten Anlagen werden ca. 50 % des Brennstoffverbrauchs durch die Trocknung und Entwässerung bzw. Eindickung des Zellstoffes verursacht und 15 % des eingesetzten Brennstoffes dienen dem Kochen.

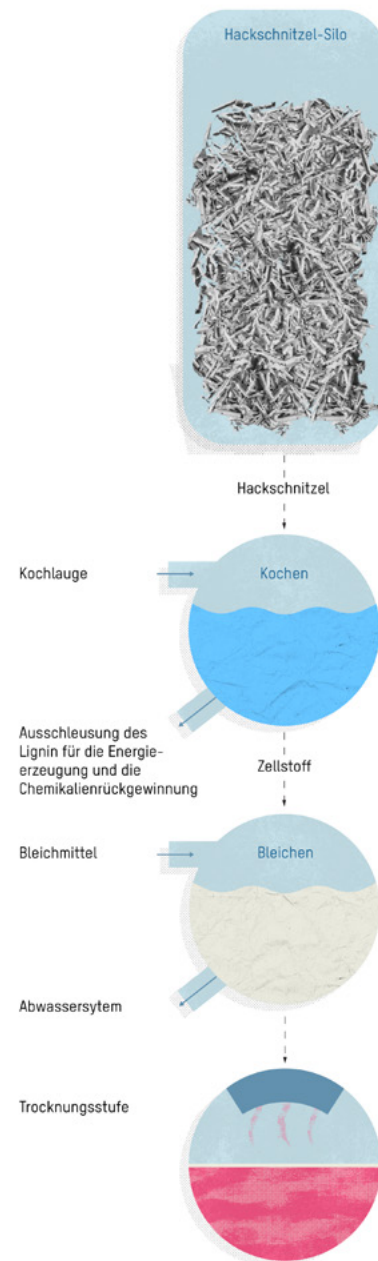


Abbildung 16 - Die Zellstoffherstellung

Damit sich die Zellstoff- bzw. Papierfasern in der späteren Papierherstellung gut miteinander verbinden, ist eine Fibrillierung der Fasern durch die Mahlung notwendig. Dabei wird durch mechanischen Energieeintrag (je nach Faserstoff zwischen 20 kWh/t und 200 kWh/t) die Faserwand flexibilisiert und aufgerieben. Je nach gewünschten Eigenschaften stehen verschiedene Mahlaggregate (Refiner) zur Verfügung. Die Mahlung ist abgestimmt auf das jeweilige Papier und findet daher erst in den Papierfabriken statt. Im Fokus stehen Festigkeits- und Entwässerungseigenschaften. Gleichzeitig darf die Faser auch nicht zu sehr beansprucht werden, da durch die Mahlung auch eine Kürzung der Fasern stattfindet.

Bei der **Holzstoffherstellung** werden Holzfasern durch mechanische Energie, die auf die Holzmatrix einwirkt,

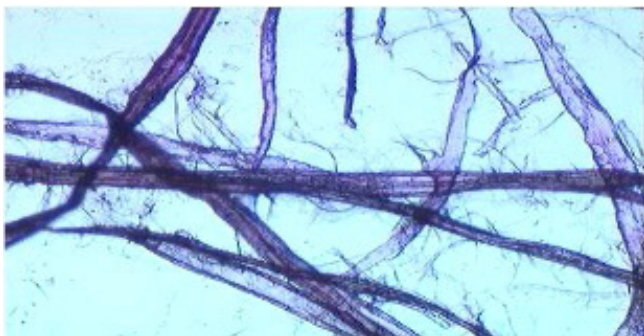


Abbildung 17 - Fibrillierung der Fasern

voneinander getrennt. In Deutschland werden zwei Holzstoffarten erzeugt: Holzschliff (SGW-Verfahren, d. h. Stone Groundwood) und thermomechanischer Holzstoff (TMP, Thermomechanical Pulp). Die Gesamtproduktion beträgt rund 0,7 Mt.

Beim SGW-Aufschluss werden Stämme unter Zugabe von Wasser gegen einen rotierenden Mahlstein gepresst. Nach der Entrindung und dem eigentlichen Schleifprozess folgen Siebung, Reinigung, Entwässerung und ggf. eine Bleiche. Neben dem ggf. eingesetzten Bleichmittel sind verschiedene chemische Zusätze für eine effiziente Prozessführung und das Verhindern von Verschmutzungen im Produktionswasser nötig. Der Strombedarf liegt bei etwa 2000 kWh/t und geht fast ausschließlich auf den Schleifprozess zurück. Die dabei erzeugte Wärme kann durch integrierte Prozessführung für andere Prozesse genutzt werden.

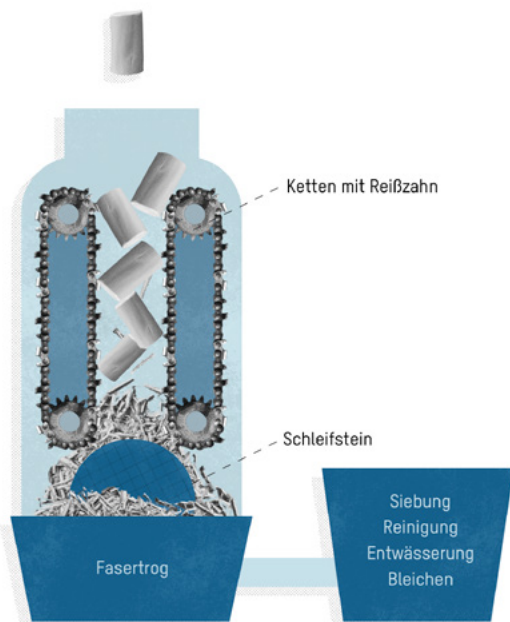


Abbildung 18 - Holzstoffherstellung (Stone Groundwood – SGW)

TMP-Holzstoff wird nach Vorquellung mit Wasserdampf durch Defibrierung (Zerfaserung) von Hackschnitzeln zwischen rotierenden Metallscheiben hergestellt und kann nachgelagert gebleicht werden. Für die Vorquellung werden Temperaturen zwischen 120 °C und 135 °C benötigt. Ein Großteil der im Refiner eingesetzten elektrischen Energie wird in Wärme umgewandelt und setzt den Prozess durch Dampf, der aus Holzfeuchtigkeit und Verdünnungswasser in den Refinern erzeugt wird, unter Druck. Aufgrund der Bedingungen (Druck von bis zu 6 bar) kann eine signifikant hohe Energiemenge für andere Prozessschritte, wie die Papier- oder Zellstofftrocknung, zurückgewonnen werden. So werden zwar rund 2700 kWh Strom pro Tonne Produkt verbraucht, durch eine Wärmerückgewinnung jedoch 1100 kWh/t

Abwärme für die Dampferzeugung in anderen Prozessen genutzt.

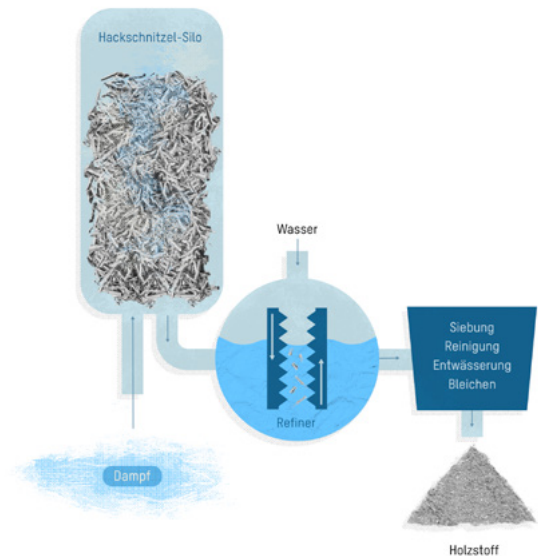


Abbildung 19 - Holzstoffherstellung (Thermomechanical Pulp – TMP)

Anders als beim Zellstoff verbleibt ein erheblicher Teil des Lignins im Holzstoff, wodurch eine signifikant höhere Materialausbeute generierbar ist. Allerdings neigen Holzstoffe dadurch zur Verfärbung und haben eine geringere Alterungsbeständigkeit. Holzstoff wird in der Regel integriert verarbeitet, wodurch keine Trocknung zu Transportzwecken wie beim Zellstoff notwendig ist. Auch eine gesonderte Mahlung entfällt, da diese bereits beim Schleifprozess stattfindet. Ein großer energetischer Vorteil der Holzstoffherzeugung ist, dass sie den Stromverbrauch sehr flexibel gestalten kann. Sind genügend Speicherkapazitäten für den Holzstoff vorhanden, kann in Zeiten niedriger Stromkosten auf Vorrat produziert werden.

Zu einem geringen Teil werden auch sonstige Fasern eingesetzt, die nicht aus Holz stammen. Hier kommt eine breite Vielfalt an pflanzlichen Fasern zum Einsatz, häufig für spezielle Einsatzzwecke. Zur Gewinnung der Fasern stehen prinzipiell vergleichbare Verfahrensklassen wie für Holzfasern zur Verfügung, die unter Berücksichtigung des gewünschten Anforderungsprofils und -szenarios konkret ausgewählt werden und somit zu mechanisch, thermisch und/oder chemisch aufgeschlossenen Faserrohstoffen führen. Auch Kunstfasern aus natürlichen Rohstoffen (z.B. Viskose), fossilen Polymeren (Polyester, PE, PP), biogenen Polymeren (PLA, PHAs) oder anorganischen Materialien (Glas, Basalt, Carbon) kommen in geringen Mengen zum Einsatz. Sie werden überwiegend im Spezialpapierbereich eingesetzt, um besondere Funktionen zu erfüllen. So können mit ihnen beispielsweise Verstärkungswirkungen im Verbundwerkstoffbereich, Feuerfestigkeit

im Leichtbausektor oder Heißsiegelfähigkeit erzielt werden.

3.2.1.2 RECYCLINGFASER

Papier ist schon immer ein Recycling-Produkt. Schon vor 2000 Jahren wurde Papier überwiegend aus gebrauchten Textilien hergestellt. Auch Altpapier wird seit den Anfängen der Papierherstellung als Rohstoff verwendet, wobei bis Mitte des 20. Jahrhunderts aus Altpapier hauptsächlich Produkte mit geringeren Anforderungen, wie zum Beispiel Verpackungspapiere und Karton, hergestellt wurden. In den 1950er Jahren hat die Altpapieraufbereitung einen Schub erhalten und ist durch diverse technische Innovationen immer weiterentwickelt worden. Zeitgleich sind auch die Recyclingraten, also der Anteil der Recyclingfaser am gesamten Fasereinsatz, weltweit stetig gestiegen. Deutschland belegt mit einer Quote von mittlerweile rund 80 % einen weltweiten Spitzenplatz.

Der Recyclingprozess startet bereits bei der Sammlung des Altpapiers. Für ein hochwertiges Recycling von Altpapier hat es sich als sehr wichtig erwiesen, dass Altpapier getrennt von anderen Sekundärrohstoffen gesammelt und aufbereitet wird. Nur so können die Kontamination und Verschmutzung auf einem niedrigen Maß und der Aufwand für die weitere Aufbereitung in einem angemessenen Rahmen gehalten werden. In Deutschland wird das Altpapier bei Industrie und Gewerbe direkt eingesammelt. Im öffentlichen Raum erfolgt die Sammlung über Papiercontainer sowie Papier-Sammelbehälter und bei Privathaushalten kommt überwiegend die bekannte „blaue Tonne“ zum Einsatz.

Nach der Sammlung wird das Papier zunächst von der Entsorgungswirtschaft aufbereitet. Bei dieser trockenen Sortierung des gesammelten Altpapiers können auch größere Verunreinigungen (zum Beispiel Kunststoffe, Metalle) abgetrennt werden. Zum Einsatz kommen hier Siebtechnologien, automatische Sortierer und auch die manuelle Sortierung. Ein vorrangiges Ziel dabei ist es, braune und weiße Papiersorten zu trennen, da für die Herstellung grafischer Papierprodukte aus Altpapier sortenreine, weiße Altpapierrohstoffe sinnvoll sind. Hintergrund ist, dass es heute nicht wirtschaftlich möglich ist, ungebleichte (braune) Fasern aus dem Altpapier zu bleichen. Gebleichte weiße Altpapiere können verwendet werden, um braune Papierprodukte herzustellen, gehen dann allerdings für den weißen Papierkreislauf verloren. Braune Fasern aus Altpapier sind bei der Herstellung von weißen Papierprodukten nur bis zu einem sehr niedrigen Anteil tolerierbar. Letztlich werden daher unterschiedliche Altpapiersorten

gemäß der europäischen Spezifikation EN 643 erzeugt.

Diese Altpapiersorten gelangen dann als Sekundärrohstoff in die Papierfabriken, da die Altpapieraufbereitung integriert erfolgt. Das trocken angelieferte Altpapier wird in einem ersten Schritt mit Wasser gemischt. Die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern lösen sich auf und es entsteht eine Fasersuspension. Nach der Zerkleinerung folgen weitere Aufbereitungsprozesse, die alle der Abtrennung der im Altpapier enthaltenen Verunreinigungen dienen.

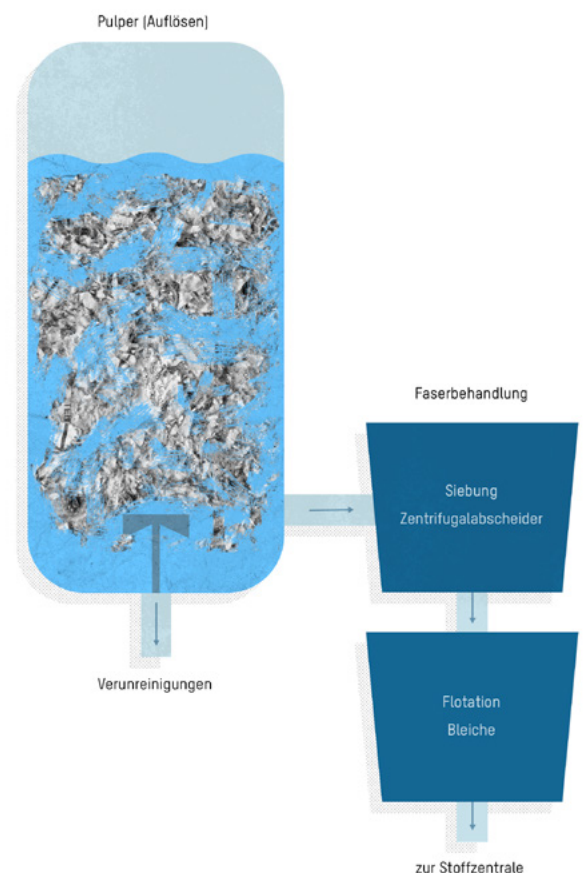


Abbildung 20 - Altpapieraufbereitung

• Siebprozesse (Sortierung):

Siebprozesse nutzen Siebe mit immer kleiner werdenden Öffnungen, bei denen alles abgetrennt wird, was größer als diese Öffnungen ist. Die größten Sieböffnungen sind Löcher mit einem Durchmesser von etwa 8-12 mm. Die feinsten Öffnungen sind Schlitze mit einer Breite von 150 µm, durch die die Fasern mit einem Durchmesser von ca. 20 bis 50 µm gerade noch hindurchpassen.

- **Zentrifugalabscheider (Hydrozyklone oder Cleaner):**

Zentrifugalabscheider versetzen die Fasersuspensionen in Rotation, erzeugen Fliehkräfte vom etwa 5 bis 500-fachen der Erdbeschleunigung und können so Partikel abtrennen, die spezifisch schwerer sind als Wasser (Sand, Glas, anorganische Partikel, Metalle, teilweise auch Druckfarben und Kunststoffe). Partikel, die kleiner sind als etwa 10 bis 50 µm, lassen sich mit Zentrifugalabscheidern allerdings kaum abtrennen.

- **Flotation:**

In einem Flotationsprozess werden Partikel nach ihren Oberflächeneigenschaften getrennt. Bei der sogenannten Deinking-Flotation in der Altpapieraufbereitung können hydrophobe Partikel (Druckfarben, Klebstoffe und Ähnliches) von hydrophilen Partikeln (Fasern und Faserbruchstücke) getrennt werden. Dabei werden oft Calcium-Seifen als oberflächenaktive Substanz und Schaumbildner eingesetzt und die Suspension wird mit einer großen Menge an feinen Luftblasen vermischt. Die hydrophoben Partikel lagern sich dann an die Luftblasen an, steigen in einem Trennbehälter aufgrund der Dichtedifferenz nach oben und können als Schaum abgetrennt werden. Auch ein großer Teil der in vielen Papieren eingesetzten Füllstoffe (Calciumcarbonat, Kaolin und andere) kann so abgetrennt werden.

- **Bleiche:**

Falls die Helligkeit oder andere optische Kennwerte des Sekundärfaserstoffes für die Herstellung von grafischem Recyclingpapier nicht ausreichen, kann die Fasersuspension gebleicht werden. Dazu wird meist Wasserstoffperoxid oder Sauerstoff in verschiedener Form eingesetzt.

Alle der genannten Trennprozesse werden in einer Stoffaufbereitung mehrfach eingesetzt, um den gewünschten Reinheitsgrad zu erreichen. Kein technischer Trennprozess ist perfekt und so werden mit jeder Trennung neben den abzuscheidenden Störstoffen auch wertvolle Fasern ausgeschleust. Die Verluste an noch brauchbaren Fasern durch die Trennprozesse sind umso größer, je höher die Qualitätsansprüche an

das Recyclingpapier sind. Bei einfachen Verpackungspapieren liegen die Faserverluste in der Größenordnung von 3 bis 5 %, bei grafischen Papieren von 15 bis 25 % und bei Hygienepapieren noch höher.

Die Verwendung von Altpapier als Rohstoff für die Papierherstellung hat mehrere Vorteile. Zum einen kann so der Bedarf an Primärfasern reduziert werden. Zum anderen benötigt die Herstellung von Papier aus Sekundärfasern wesentlich weniger Energie als die Produktion aus Frischfasern. Auch die zur Herstellung benötigte Menge an Wasser als Produktionshilfsmittel ist bei Recyclingpapier deutlich geringer als bei Frischfaserpapier.

3.2.1.3 MINERALIEN UND ADDITIVE

Prinzipiell kann Papier ausschließlich auf Basis von Fasern und ohne weitere Zusätze hergestellt werden. In der industriellen Praxis kommt jedoch eine größere Bandbreite an Mineralien und chemischen Additiven mit zusammen etwa rund 3,3 Mt bzw. 13 % des Gesamtstoffeinsatzes zur Anwendung. Sie dienen dazu verschiedenste Produkteigenschaften zu steuern, die Prozesssicherheit zu gewährleisten und die enorme Produktvielfalt zu erreichen.

Mengenmäßig sind die **Mineralien** der dominanter Teil. Sie werden vor allem als Füllstoffe (ca. 4 %) oder als Pigmente im Strich (ca. 6 %) eingesetzt. Mineralien werden bergmännisch abgebaut und müssen dabei auf die entsprechende Größe gemahlen werden. Diese energieintensiven Prozesse finden außerhalb der Papierindustrie statt, sodass der Energieaufwand bzw. entstehende Treibhausgase nur schwer zu quantifizieren sind. Im Falle des häufig eingesetzten Minerals Calciumcarbonat verwendet das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in seinem „Informationsblatt CO₂-Faktoren“ [5] ein Äquivalent von 0,006 tCO₂ je Tonne Produkt (Calciumcarbonat allgemein). Das ebenfalls in der Papierindustrie eingesetzte Kaolin wird vom BAFA mit 0,21 tCO₂ je Tonne bewertet. Schon die Spannbreite zeigt, dass die Zahlen maximal für eine Abschätzung herangezogen werden können. Zudem ist nicht eindeutig erkennbar, wie die Bilanzgrenzen gezogen wurden.

Das Feld an **chemischen Additiven** ist nochmal ungleich größer. Sie kommen als Funktionschemikalien (Leimungsmittel, Farbstoffe und optische Aufheller, Trocken- bzw. Nassfestmittel zur Erhöhung der Festigkeit, ...) oder Prozesschemikalien (Reinigungsmittel, Entschäumer, Entwässerungshilfsmittel, ...) zum Einsatz. Das wichtigste und mengenmäßig bedeutendste chemische Additiv ist die Stärke (biogenes Polysaccharid) mit einem Anteil von 2 % am gesamten Rohstoffeinsatz. Sie wird in der Lebensmittelindustrie

bzw. Landwirtschaft als Nebenprodukt gewonnen. Dabei wird die Stärke aus dem Zellgewebe des zuvor zerkleinerten Rohstoffs (Mais, Kartoffel, ...) ausgewaschen. Das BAFA bewertet Stärke mit einem CO₂-Faktor von 1,09 t pro Tonne Stärke. Neben den CO₂-Emissionen spielen dabei auch Lachgasemissionen (N₂O) eine Rolle.

3.2.2 DIE PAPIERMASCHINE

Das Herz der gesamten Produktionskette ist die Papiermaschine. Sie produziert aus den angelieferten bzw. vor Ort aufbereiteten Fasern das Papier. Dafür werden die Fasern (und ggf. Hilfsstoffe) in Mischbütten angerührt, sodass in der Stoffzentrale eine möglichst homogene Suspension mit einem Wassergehalt von 99 % entsteht. Diese wird dann Richtung Papiermaschine gepumpt. Die Fasersuspension wird zunächst über den Stoffauflauf möglichst gleichmäßig auf das Sieb der Siebpartie aufgebracht, wo sich die feuchte Papierbahn bildet. Der Großteil des Wassers aus der Suspension wird durch das Sieb hindurch entfernt und zurück in den Kreislauf überführt.

Anschließend wird der Papierbahn in der Pressenpartie das Wasser mechanisch ausgepresst. Dafür wird die Papierbahn durch speziell aufeinander abgestimmte Walzenpaare geführt und gelangt mit einem Trockengehalt von etwa 50 bis 55 % in die Trockenpartie. Mit rund 60 bis 70 % des Energiebedarfs der Papiermaschine ist sie der energieintensivste Part. Dort wird das Papier getrocknet, was größtenteils über eine Kaskade dampf-beheizter Zylinder bei 120 bis 150 °C erfolgt. Die Aufnahme von Wärme durch die Papierbahn ist begrenzt, was

insbesondere bei höheren Grammaturen zu beachten ist. Die Kontaktfläche und damit auch Trocknungszeit werden durch eine Aneinanderreihung von zahlreichen beheizten Zylindern maximiert. Die Temperatur steigt dafür entlang der Laufrichtung an. Das gesamte Trocknungssystem wird für die Wärmerückgewinnung eingehüllt und von der Hallenluft entkoppelt.

Je nach Papiersorte können auch andere Trocknungsaggregate Anwendung finden. Insbesondere für dünne Papiere kommt häufig eine Kombination aus einem großen Dampfzylinder (Yankee-Zylinder) mit einer gasbefeuchten Trockenhaube zum Einsatz. Die Temperatur des benötigten Dampfes kann dabei bis zu 200 °C betragen. Die Befeuerung in der Trockenhaube ist wiederum notwendig, um Temperaturen von bis zu 600 °C zu erreichen. Auch kleinere gasbeheizte Heißlufttrockner (Schwebetrockner) und Infrarotstrahler (mit Gas- oder Strom betrieben) kommen für spezielle Einsatzzwecke zur Anwendung.

Nach der Trocknung können optional noch weitere Verarbeitungsschritte erfolgen. Üblich sind beispielsweise der Einsatz einer Streichmaschine, an die sich eine erneute kurze Trocknung anschließt, oder das Glätten. Letzteres ist ebenfalls wärmeintensiv und erfolgt mit beheizten Zylindern in einem Temperaturbereich von 140 bis 250 °C. Am Ende des Produktionsprozesses stehen die sensorunterstützte Qualitätskontrolle und die Aufrollung.

Die Papiererzeugung ist energieintensiv. Sie benötigt mechanische Energie, die elektrisch bereitgestellt wird. Zudem benötigt sie für die Trocknung Dampf und teilweise auch gasförmige Brennstoffe für befeuerte

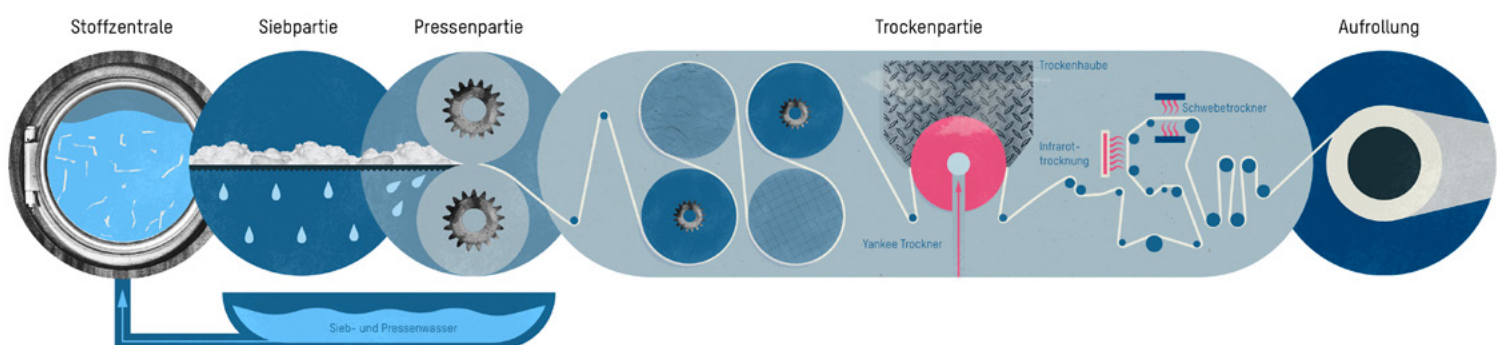


Abbildung 21 - Die Papiermaschine

PROZESSSCHRITT	ENERGIEVERBRAUCH		
	MECHANISCH/ELEKTRISCH	DAMPF	BRENNSTOFFBEDARF
Anmischen	gering	gering	
Mahlung	hoch	gering	
Konstantteil	gering	gering	
Stoffauflauf	hoch	gering	
Entwässern	moderat	gering	
Mechanische Entwässerung	sehr hoch	gering	
Thermische Trocknung	gering	sehr hoch	Ggf. hoch
Beschichten / Streichen	moderat	gering	
Strichtrocknen	hoch	moderat	Ggf. hoch

Abbildung 22 - Energiebedarf in den einzelnen Abschnitten der Papiermaschine

Trocknungsprozesse. Die Energieintensität nimmt dabei entlang des Produktionsprozesses bis zur Trockenpartie zu, wo sich dann der größte Teil des Energieverbrauchs konzentriert. Während beim Strom- und Dampfbezug die Emissionen indirekt entstehen, fallen sie bei der befeuerten Trocknung durch den Verbrennungsprozess direkt an der Papiermaschine an. Eine Übersicht zur Aufschlüsselung des Energiebedarfs ist in Abbildung 22 dargestellt.

Jede Papiermaschine ist individuell, was auch bei der Hebung von Effizienzpotentialen berücksichtigt werden muss. Sie ist auf das zu produzierende Papier und die gewünschten Produkteigenschaften abgestimmt. Eine Optimierung von Einzelprozessen, beispielsweise eine etwas stärkere mechanische Entwässerung, um Trocknungsenergie zu sparen, kann den gewünschten Produkteigenschaften wie Volumen und Festigkeit des Papiers entgegenstehen. Auch die Wahl der Trocknungstechnik (Dampfbeheizter Zylinder/Befeuerte Trocknung) muss auf das produzierte Papier abgestimmt sein.

Durch den hohen Einfluss der Energiekosten arbeiten die Unternehmen kontinuierlich an ihrer Energieeffizienz. Potential liegt vor allem in der Nutzung von Abwärme aus der Trockenpartie. Dabei wird schon heute die heiße Abluft bzw. das Kondensat der Dampfzylinder über Wärmerückgewinnungssysteme genutzt. Mit Hilfe

von Analysemethoden wie der Pinchanalyse werden Wärmebedarfe und anfallende Abwärmepotentiale untersucht und, wo technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll, zusammengebracht. Limitierender Faktor ist dabei aber die Temperaturdifferenz zwischen Wärmebedarf und Abwärme. Ist die Abwärme deutlich kühler als der Wärmebedarf, kann sie nicht genutzt werden. Es kann daher sinnvoll sein, externe Wärmebedarfe (mit niedrigerem Temperaturniveau) einer Kommune oder eines anderen Betriebs mit der Abwärme der Papierfabrik im Rahmen von Nah- bzw. Fernwärmenetzen zu kombinieren, was teilweise auch schon praktiziert wird.

Energiekosten werden zunehmend zeitvariabler, sodass auch die Flexibilität des Energiebezugs eine wachsende Rolle spielt. Der Produktionsprozess selbst läuft kontinuierlich ab und ist auf eine hohe Produktivität und damit eine hohe Geschwindigkeit der Papierbahn ausgelegt. Eine Flexibilisierung des Energiebezugs der laufenden Papiermaschine ist daher nur sehr eingeschränkt möglich. Allerdings kann sich Flexibilitätspotential durch eine angepasste Produktionsplanung ergeben. Insbesondere unvermeidbare Stillstände können, soweit planbar, vorrangig in Zeiten gelegt werden, in denen mit höheren Stromkosten zu rechnen ist.

3.2.3 WEITERVERARBEITUNG UND NUTZUNG DER PRODUKTE

Je nach Einsatzzweck sind nach der Papierproduktion noch verschiedene Formen der Weiterverarbeitung notwendig, die auch aufeinanderfolgend Anwendung finden können. Unterschieden wird dabei in umformende Verfahren (Prägen, Rillen, Wellenformen), trennende Verfahren (Schneiden, Stanzen), verbindende Verfahren (Kleben, Prägen, Rändeln), Verfahren zur Kombination von Materialien (Beschichten, Imprägnieren, Laminieren), Verfahren zum Transport in Maschinen (Auf-/Abwickeln) und Druckverfahren.

Energieintensiv sind dabei solche Verfahren, die mit Wärmeeinsatz arbeiten. Ein Beispiel dafür ist die Wellpappe, bei der die Energie zur Wellenbildung, Trocknung, Verklebung und Bedruckung benötigt wird. Die benötigte Wärme wird überwiegend in Form von Dampf zur Verfügung gestellt. Elektrische Energie kommt hingegen für Antriebe, Transportsysteme oder Zuschnitt zum Einsatz. Der spezifische Energiebedarf in diesem Bereich liegt damit zwischen 120 und 247 kWh pro 1000 m² Bruttomaschinenerzeugnis, was umgerechnet auf das Gewicht nur einem Bruchteil der für die Papierproduktion aufgewendeten Energie entspricht.

Die fertigen Papierprodukte werden anschließend entsprechend ihrer Vielfalt sehr unterschiedlich genutzt. Auch die Nutzungsdauer variiert sehr stark. Die Lebensdauer einer Verpackung bspw. hängt vom verpackten Gut ab. Im B2B-Bereich werden Transportverpackungen zudem teilweise wiederverwendet, bevor sie über die gängigen Altpapiererfassungssysteme zurück in den Kreislauf gelangen. Bei grafischen Papieren ist die Sorte entscheidend. Während Zeitungen kurzlebiger sind, haben Bücher eine sehr lange Lebensdauer. Hygienepapiere wiederum sind ausschließlich für kurze Lebenszyklen ausgelegt. Sofern sie als Altpapier zurück in die Produktion gelangen, geschieht dies zudem nicht über die allgemeine Altpapiererfassung. Für Papierhandtücher aus dem gewerblichen Nutzungsbereich existieren bspw. eigene Kreislaufsysteme.

3.3 PAPIERINDUSTRIE IM KONTEXT DER KLIMAZIELE

Die Internationale Gemeinschaft erfasst den Gesamtausstoß an fossilem CO₂, an weiteren Treibhausgasen (bspw. Methan und Lachgas) und auch den Austausch von Treibhausgasen zwischen der Erdatmosphäre und der Erdoberfläche (LULUCF-Sektor). Im Folgenden wird daher der Treibhausgasausstoß der Papierindustrie (3.3.1) untersucht sowie eine Einordnung in den LULUCF-Sektor (3.3.2) vorgenommen.

3.3.1 TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER PAPIERINDUSTRIE

Entlang der Wertschöpfungskette der Papierindustrie ist fossiles CO₂ das einzig identifizierte relevante Treibhausgas, das zum Klimawandel beiträgt. Es entsteht größtenteils indirekt bei der Erzeugung von Strom und Dampf aus Erdgas sowie weiteren fossilen Brennstoffen. Nur ein kleiner Teil entsteht direkt bei der Papierproduktion. Diese Emissionen fallen bei

direktbefeuchten Trocknungsverfahren auf Basis von Erdgas in der Trockenpartie (Trockenhaube, gasbeheizte Infrarottrocknung oder Schwebetrockner) an (vgl. 3.2.2). DIE PAPIERINDUSTRIE erhebt jährlich den Energiemix der Branche und veröffentlicht diesen in ihrem Leistungsbericht. Auch der damit verbundene Treibhausgasausstoß wird ermittelt und beträgt im Schnitt ca. 12 Mt CO₂ pro Jahr, was etwa 1,5 % der gesamten deutschen Emissionen entspricht. 6 Mt CO₂ davon entfallen auf den direkten Einsatz fossiler Energieträger. Indirekt entstehen etwa 4 Mt CO₂ durch den Strombezug und 2 Mt CO₂ durch den Bezug von Fremdwärme. Neben der bezogenen Energie wird auch der selbst erzeugte Strom im Leistungsbericht veröffentlicht. Im Rahmen der Umfrage wird zudem auch erhoben, dass ca. 3 bis 4 TWh Erdgas in direkten Befeuerungsprozessen eingesetzt werden. Auch die in den Papierfabriken eingesetzte Strommenge von jährlich etwa 16 TWh wird im Leistungsbericht veröffentlicht. Schätzt man für die gesamte Strom- und Dampferzeugung einen Wirkungsgrad von etwa 80 %, so ergibt sich auf Basis des Energiemixes ein geschätzter Dampfbedarf von rund 30 TWh (Abbildung 23).

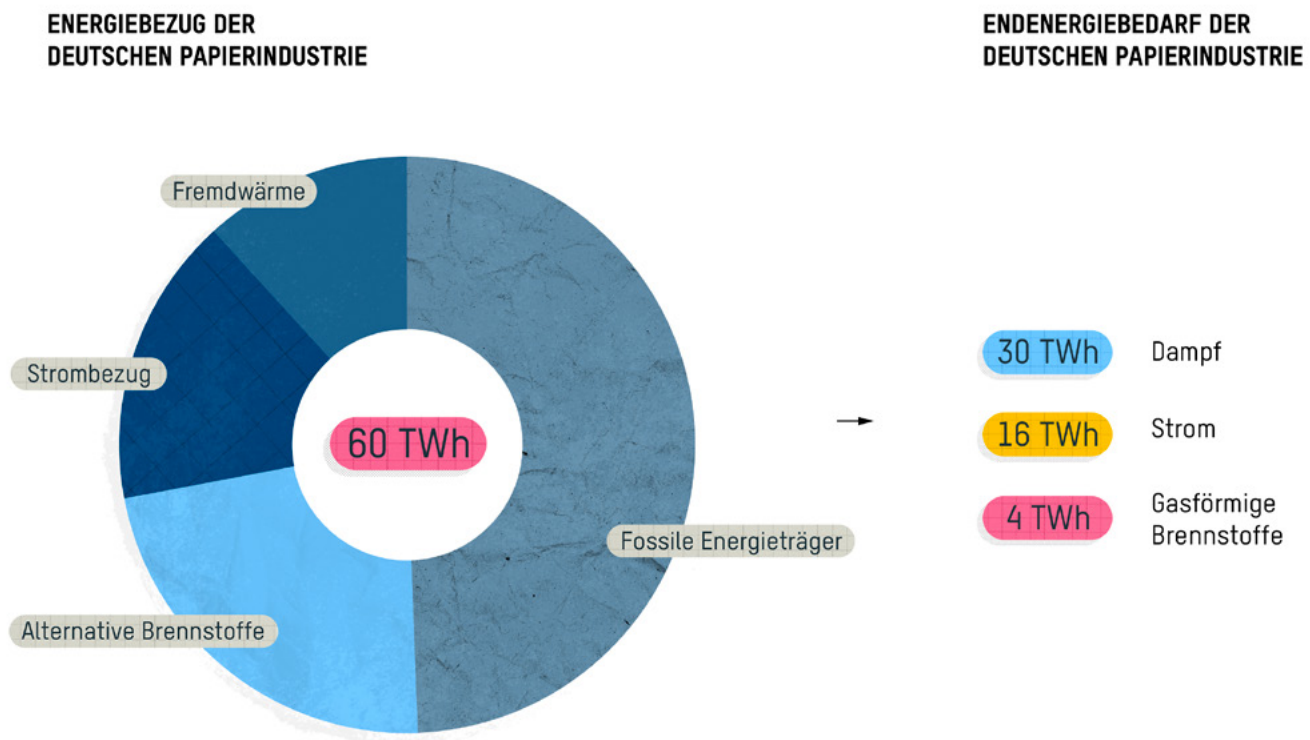


Abbildung 23 - Bedarf an Dampf, Strom für mechanische Energie sowie gasförmige Brennstoffe für die befeuerte Trocknung

Es gilt zu beachten, dass dies nur ein Branchendurchschnitt ist. Sowohl beim Energiemix als auch beim Verbrauch sind die einzelnen Standorte sehr unterschiedlich aufgestellt. Während Unternehmen mit einer Trockenhaube einen deutlich höheren Anteil an eingesetztem Gas haben, nutzen Unternehmen ohne Befeuerungsprozesse ausschließlich Dampf und Strom. Aus technischer Sicht ist für die Treibhausgasreduktion somit weniger die Papierproduktion selbst die Herausforderung, sondern vielmehr die Bereitstellung von klimaneutralem Dampf und Strom. Der Übergang zur Energiewirtschaft ist hier fließend. Auf der einen Seite speisen viele Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) der Branche Überschussstrom aus und tragen so mit grundlastfähiger Kapazität zur Sicherung der Energieversorgung bei. Auf der anderen Seite existieren auch viele Partnerschaften mit Energieversorgern, sodass neue Anlagen als KWK-Kraftwerke mit Papierfabriken zusammen konzipiert werden, um das volle Synergiepotential auszuschöpfen. Doch auch an vielen Papiermaschinen entsteht noch fossiles CO₂. Die dafür verantwortlichen befeuerten Trocknungsprozesse basieren heute fast ausschließlich auf Erdgas und gehen daher mit einem CO₂-Ausstoß von etwa 0,8 Mt CO₂ einher. Im Rahmen der Transformation ist auch hier eine Umstellung auf klimaneutrale „grüne Gase“ wie Biomethan oder Wasserstoff notwendig.

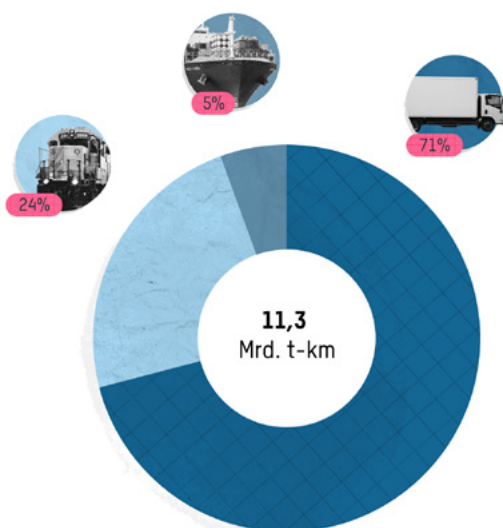
Neben der Papierproduktion hat auch die Logistik einen Anteil an den Emissionen, der bisher noch nicht berücksichtigt worden ist. Als einheitliche Ausgangsgröße dient im Transportsektor die Beförderungsleistung, die als Produkt der Transportmenge und der Beförderungsreichweite in Tonnenkilometer (t-km) angegeben wird.

Wird diese wiederum mit dem spezifischen Emissionsfaktor (in gCO₂/t-km) des jeweiligen Verkehrsträgers (Straße, Schiene, Schiff) multipliziert, erhält man die Emissionen der Logistik.

Branchenspezifische Daten zur Beförderungsleistung existieren nicht. Die Transportmenge lässt sich jedoch auf Basis des Rohstoffeinsatzes (ca. 27 Millionen Tonnen) und der Produktionsmenge (ca. 22 Millionen Tonnen) zu rund 50 Millionen Tonnen jährlich abschätzen. Zur durchschnittlichen Beförderungsreichweite je Tonne liegen ebenfalls keine Daten spezifisch für die Papierindustrie vor. Sie soll daher im Folgenden auf Basis von Destatis Erhebungen zur Beförderungsleistung und Transportmenge für den weiter gefassten Bereich „Holz, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse“ abgeleitet werden [6]. Für das Jahr 2022 ergeben sich so durchschnittliche Beförderungsweiten von ca. 186 km im Bereich Straßengüterverkehr, 524 km für den Schienengüterverkehr sowie 245 km für den Transport über die Binnenschifffahrt, jeweils bezogen auf Deutschland. Gemäß internen Umfragen von DIE PAPIERINDUSTRIE wird die Transportmenge zu etwa 85 % über Lkw (40 t) transportiert. Der Rest teilt sich zu grob 10 % auf die Schiene und 5 % auf die Schifffahrt auf.

Für den letzten Baustein, die spezifischen Emissionen, soll auf eine Veröffentlichung des Deutschen Speditions- und Logistikverbandes e.V. zurückgegriffen werden [7]. Für einen Last-/Sattelzug 24-40t (Durchschnittsgut) werden 68 gCO₂/t-km angegeben. Für einen Zug (elektrisch) 18 gCO₂/t-km und für ein Binnenschiff 34 gCO₂/tkm. Damit lassen sich, wie in Abbildung 24 dargestellt, die Beförderungsleistung und die Logistikemissionen abschätzen.

BEFÖRDERUNGSLEISTUNG NACH VERKEHRSTRÄGER
in Mrd. t-km



EMMISSIONEN NACH VERKEHRSTRÄGER
in Mio. t_{CO2}

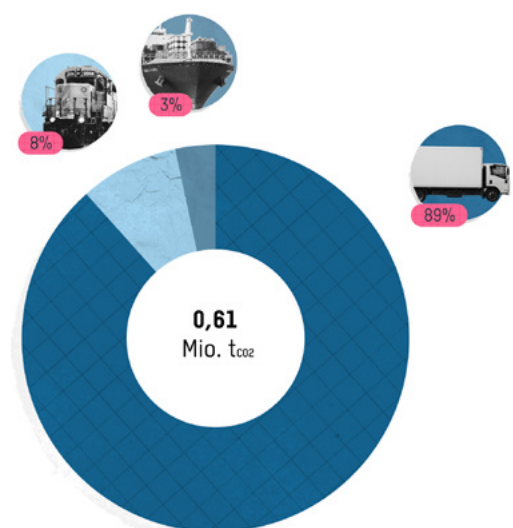


Abbildung 24 - Anteile der Verkehrsträger an Beförderungsleistung und Emissionen

In Summe entsprechen die Logistikemissionen etwa 5 % der Treibhausgasmenge aus der Papierproduktion. Konkrete Strategien zur Erfassung und Vermeidung von aus der Logistik bedingten CO₂-Emissionen werden in der Papierindustrie individuell in den einzelnen Unternehmen entwickelt. Der Arbeitskreis Verkehr des Verbandes hat sich ausführlich mit der Thematik beschäftigt und u.a. verschiedenste Ansätze zum Reporting von CO₂-Emissionen diskutiert. Maßnahmen zur Vermeidung von CO₂-Emissionen in der Papierlogistik sind insbesondere die Verlagerung von Transporten auf die Schiene, die Verwendung alternativer Antriebe und Kraftstoffe sowie die effizientere Nutzung der vorhandenen Transportkapazitäten auf der Straße (Lang-Lkw, „44-Tonnen-Forderung“).

Auf die mit dem Einsatz von Hilfsstoffen verbundenen Emissionen wurde in 3.2.1.3 eingegangen. Trotz der Komplexität soll eine grobe Abschätzung der damit verbundenen Emissionen erfolgen. Setzt man für die rund 2,6 Mt Füllstoffe und Streichpigmente den BAFA-Faktor für Kaolin, für die 0,5 Mt Stärke den entsprechenden Faktor des BAFA und für die restlichen 0,4 Mt einen mengengewichteten Mix an, so ergibt sich ein CO₂-Äquivalent von etwa 1,2 Mt. Dies entspricht Emissionen in Höhe von etwa 10 % im Vergleich zu den energiebedingten Emissionen der Produktion.

3.3.2 LULUCF-BEITRAG

Der Treibhauseffekt, und damit der Klimawandel, verstärkt sich durch die Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Neben der Vermeidung von zusätzlich emittierten Treibhausgasen wirkt somit auch die Entnahme von CO₂ dämpfend auf den Treibhauseffekt. Die Entnahme von Treibhausgasen wird als Klimasenke bezeichnet. Durch natürliche Vegetation über Photosynthese ergibt sich eine natürliche Senke, insbesondere in Wäldern. Das so entzogene CO₂ wird durch Aufbau von Biomasse als Kohlenstoff in den Pflanzen sowie im Boden gespeichert. Dieser natürlichen Senke steht wiederum die natürliche Freisetzung von CO₂ entgegen. Der gebundene Kohlenstoff wird beispielsweise durch den organischen Zerfall von Pflanzen, Mineralisierungsprozesse im Boden sowie (nicht menschengemachte) Waldbrände wieder frei.

Je nach Form der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft beeinflusst der Mensch diesen natürlichen Kohlenstoffkreislauf, positiv wie negativ. Da dieser Kohlenstoffaustausch zwischen Atmosphäre und verschiedenen Senken auf der Erdoberfläche einen erheblichen Einfluss auf den Treibhauseffekt hat, wird er in einem eigenen Sektor bilanziert. Abgeleitet von der englischen Bezeichnung „Land Use, Land Use

Change and Forestry“ wird der Bereich als LULUCF-Sektor bezeichnet. Er wurde im Rahmen internationaler Klimaschutzpolitik mit dem sogenannten Kyoto-Protokoll eingeführt und findet auch auf europäischer (LULUCF-Verordnung) und deutscher (Bundes-Klimaschutzgesetz) Ebene Anwendung. In der aktuellen politischen Debatte steht eine Erweiterung des LULUCF-Sektors um den Agrar-Sektor zur Diskussion. Die Kombination aus beiden Sektoren wird als AFOLU-Sektor (Agriculture, Forestry and Other Land Use) bezeichnet.

Durch entsprechende Verhaltensweisen kann der Mensch dafür sorgen, dass der LULUCF-Sektor insgesamt zu einer Klimasenke wird. Für die Papierindustrie ist dabei insbesondere der Bereich der Forstwirtschaft von Bedeutung. Während sich im unbewirtschafteten Wald ein Kreislauf einstellt, in dem sich die CO₂-Freisetzung durch Verrottung mit der Aufnahme durch den wachsenden Wald die Waage hält, kann durch eine nachhaltige Forstwirtschaft der Kohlenstoffspeicher durch Holzprodukte ausgeweitet werden. Zusätzlich können Reststoffe und Holzprodukte entlang der Holznutzungskaskade (siehe Abbildung 15), die nicht mehr recycelt werden können, am Ende ihrer Lebensdauer energetisch verwertet werden.

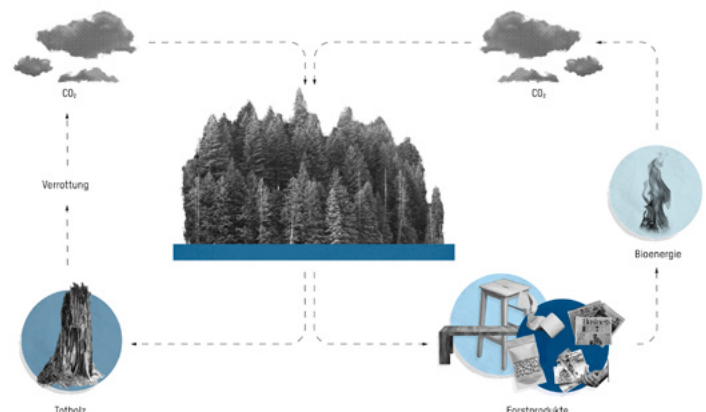


Abbildung 25 - CO₂-Speicherung in Forstprodukten

Während der LULUCF-Sektor weltweit noch eine CO₂-Quelle darstellt, ist er in Europa eine Senke, was ausschließlich auf den Forstsektor zurückzuführen ist. Während der Forstbereich insgesamt eine Senke in Höhe von etwa 300 bis 400 Mt CO₂ bzw. dem Äquivalent dazu darstellt, sind die übrigen Landnutzungsarten (bspw. Moore, Feuchtgebiete, ...) Treibhausgasquellen [8]. Insgesamt ist der LULUCF-Sektor in Europa sehr volatil und gemäß der europäischen Umweltbehörde noch eine Senke in Höhe von 230 Mt CO₂, was etwa 7 % der Gesamtemission entspricht. Für 2021 wird der Effekt von der Behörde auf 212 Mt geschätzt, Tendenz sinkend.

Dieser Trend soll umgekehrt und auf -310 Mt im Jahr 2030 ausgeweitet werden [9]. Für die Zeit danach ist

eine Zusammenlegung des Sektors mit der Landwirtschaft vorgesehen. Bei der Stärkung der Senkenfunktion spielt der Forstsektor eine entscheidende Rolle. Die CEPI (Confederation of European Paper Industries) hat als europäischer Dachverband der Papierindustrie zudem noch weitergehende Effekte untersucht [10]. Rechnet man neben der LULUCF-Senkenleistung den Effekt hinzu, dass fossile Produkte durch Forstprodukte substituiert werden, beträgt der Gesamteinsparungs- bzw. Vermeidungseffekt ein Äquivalent von über 800 Mt CO₂/a.

Auch in Deutschland stellt der LULUCF-Sektor eine Senke dar. Gemäß Umweltbundesamt, das im Rahmen des Klimaschutzgesetzes über die Emissionen der einzelnen Sektoren berichtet, lag die Senkenfunktion diese für 2020 und 2021 bei etwa 11 Mt CO₂, ebenfalls mit einer abnehmenden Tendenz. Im Bundes-Klimaschutzgesetz ist für 2030 eine Senkenfunktion von 25 Mt und für 2045 von 40 Mt vorgesehen [11].

Als Teil der Forstwirtschaft trägt auch die Papierindustrie zu dieser Senkenfunktion bei. Sie verwendet vorrangig Holzreste entlang der Holznutzungskaskade, die ansonsten direkt thermisch genutzt würden. Die Cellulose im Papier enthält rund 44 % biogenen Kohlenstoff. Die in Deutschland erzeugte Frischfaser bindet somit ein jährliches CO₂-Äquivalent von rund 3,5 Mt. Über das Papierrecycling wird zudem ein CO₂-Äquivalent von 27,4 Mt im Kreislauf gehalten.

Damit die Senkenfunktion der Forstwirtschaft auch in Zukunft erhalten bzw. ausgebaut werden kann, ist eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unerlässlich. Durch das Leitprinzip der Holznutzungskaskade mit dem Vorrang der stofflichen Nutzung kann das volle ökonomische und klimapolitische Potential gehoben werden. Durch nachgelagertes Recycling verstärken sich zudem beide Effekte.

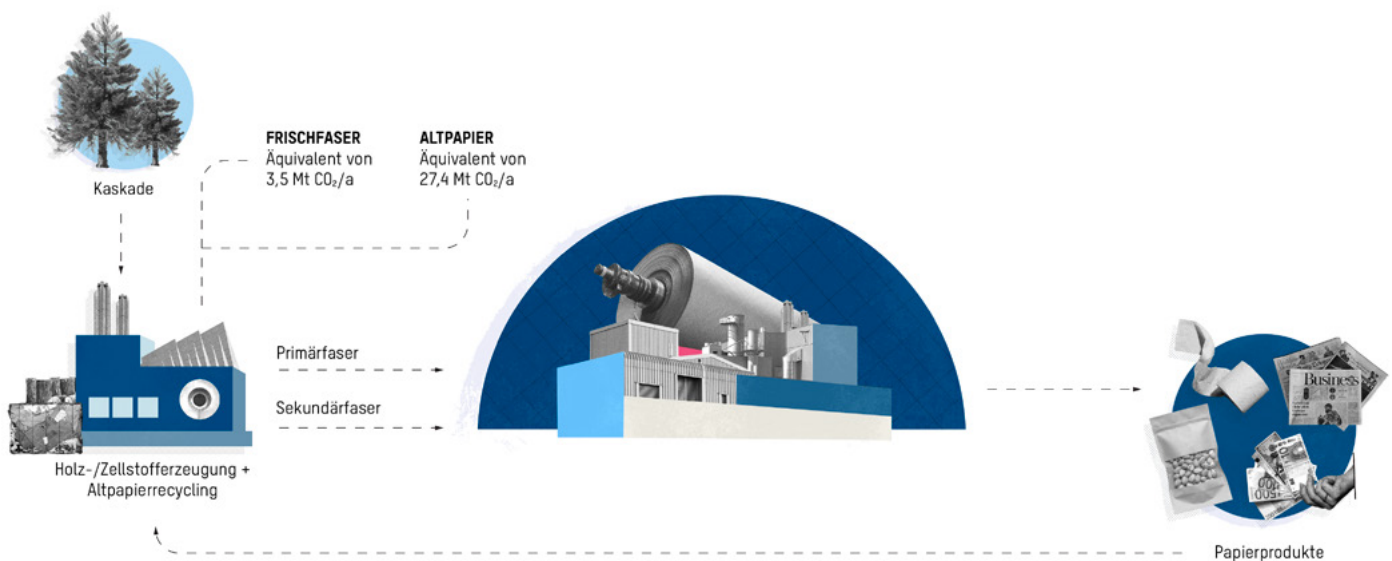


Abbildung 26 - CO₂-Bindung durch Papier

4 TECHNOLOGIEN FÜR DIE TRANSFORMATION

Im Branchenportrait hat sich gezeigt, dass die Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie energiebedingt sind. Die Papierproduktion hat einen hohen Bedarf an Dampf, grundlastfähigem Strom zur Bereitstellung mechanischer Energie und an gasförmigen Brennstoffen für spezielle befeuerte Trocknungsverfahren. Strom und Dampf können auf verschiedene Weise erzeugt werden. Aktuell wird der größere Teil aber noch durch fossile Brennstoffe bereitgestellt, wodurch fossiles CO₂ freigesetzt wird. Für eine klimafreundliche Transformation muss der fossile Energieeinsatz reduziert und perspektivisch komplett ersetzt werden. Der Energiemix aus klimafreundlichen Brennstoffen und Strom bzw. weiteren erneuerbaren Quellen wird sich für jede Papierfabrik individuell gestalten. Je nach Region, Lage und Produktportfolio des Unternehmens wiegen die Herausforderungen für verschiedene Technologien unterschiedlich schwer. Zunächst soll in diesem Kapitel daher auf mögliche klimaneutrale Energiequellen eingegangen werden. Anschließend werden die Technologien vorgestellt, mit denen klimaneutraler Dampf und grundlastfähiger klimaneutraler Strom für die Papierproduktion bereitgestellt werden können. Auch klimaneutrale Lösungen für die befeuerten Trocknungsprozesse werden aufgezeigt. Weiterhin wird auf die Möglichkeiten zur Schaffung einer technischen CO₂-Senke eingegangen, die durch die Abscheidung und Speicherung biogener CO₂-Emissionen entstehen kann, was auch als Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS) bezeichnet wird. Zum Schluss werden innovative Ansätze für die Papierfertigung vorgestellt, die den Energiebedarf perspektivisch deutlich reduzieren könnten.

4.1 KLIMANEUTRALE ENERGietRÄGER

Der direkte Brennstoffeinsatz in der Papierindustrie besteht bereits zu etwa 30 % aus alternativen Brennstoffen, die fast ausschließlich biogen sind. Auch erneuerbarer Strom wird entsprechend dem deutschen Strommix eingesetzt und Fremdwärme in Form von Dampf wird ebenfalls mit einem individuellen Energiemix aus erneuerbaren und fossilen Brennstoffen erzeugt. Ziel der Transformation ist es, auch den indirekten Einsatz fossiler Energien zu vermeiden. Stattdessen gilt es, den Einsatz von nachhaltigen Festbrennstoffen, grünen Gasen und klimaneutralem Strom zu fördern. Auch neue Ansätze, wie die Nutzung von Geothermie, gilt es zu untersuchen.

Der Umstieg von fossilen Energieträgern auf klimafreundliche Alternativen ist dabei mit unterschiedlichen Herausforderungen verbunden, die im Folgenden detaillierter beschrieben werden.

4.1.1 NACHHALTIGE FESTBRENNSTOFFE

Nachhaltige Festbrennstoffe wie Rückstände und Reststoffe aus Produktion oder dem Abfallrecycling (Ersatzbrennstoffe) sowie nachhaltige Biomassebrennstoffe sind nur eingeschränkt verfügbar. Zudem darf die energetische Verwertung die stoffliche Nutzung nicht beeinträchtigen. Auch für die Papierindustrie dient Biomasse in Form von Holz bzw. Resten aus der Holzverarbeitung in erster Linie als Rohstoff. Allerdings gibt es bei der Verfügbarkeit von Biomasse noch Ausbaupotential. Dabei muss auch eine noch konsequentere Ausrichtung auf die Kaskadennutzung umgesetzt werden. Diese muss weitergedacht und auch bei der energetischen Nutzung am Ende der stofflichen Nutzung nach Effizienz priorisieren. Wie auf der Rohstoffseite ist vor allem ein gesichertes und ausreichendes Angebot

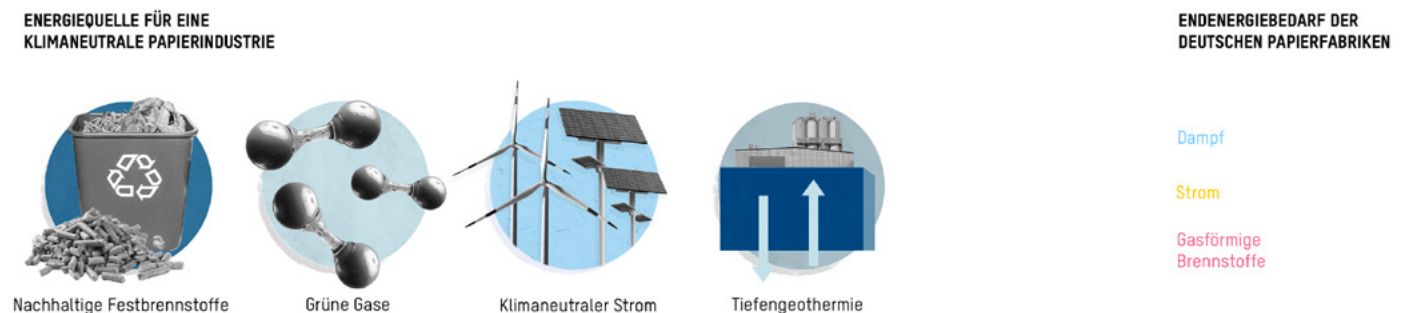


Abbildung 27 - Energiequellen zur Bereitstellung von Dampf, Strom und Brennstoffen für die befeuerte Trocknung

notwendig. Dieses kann über eine entsprechende Waldbewirtschaftung sichergestellt werden. Begrenzt wird das Potential jedoch von der Flächenverfügbarkeit, so dass auch biogene Reststoffe voraussichtlich an Wert zunehmen werden.

Anders als Biomasse fallen Ersatzbrennstoffe über das Abfallrecycling an. Aufgrund eines erwartbar stärkeren Fokus auf die Kreislaufwirtschaft und einer weiteren Verbesserung der Ressourceneffizienz wird die Menge anfallender Rückstände aus dem allgemeinen Abfallrecycling zurückgehen. Die Verfügbarkeit von Ersatzbrennstoffen wird abhängig von der Qualität der Aufbereitung daher perspektivisch stagnieren bzw. abnehmen.

Sowohl Ersatzbrennstoffe als auch Biomasse werden vornehmlich regional gehandelt und eingesetzt. Ihr Einsatz kommt somit nur für solche Papierfabriken in Frage, in deren Region ausreichend Biomasse- und Ersatzbrennstoffe anfallen.

4.1.2 GRÜNE GASE

Auch grüne Gase wie Wasserstoff, Wasserstoffderivate oder biogene Gase spielen bei der Transformation eine wichtige Rolle. Sie stellen das Pendant zum fossilen Erdgas dar, das heute noch über 50 % des Brennstoffeinsatzes der Papierindustrie ausmacht.

Wasserstoff und Wasserstoffderivate haben das Potential, als grüne Gase auch in der Papierindustrie eingesetzt zu werden. Diese bleiben vorerst eine teure und nur begrenzt verfügbare Alternative. Durch den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung soll die Verfügbarkeit in Verbindung mit dem Aufbau von Elektrolysekapazitäten aber perspektivisch stark erweitert und durch zusätzliche Importkapazitäten für Wasserstoff ergänzt werden. Die Kosten der Wasserstoffproduktion sind stark vom Strompreis abhängig. Dies muss insbesondere in solchen Fällen berücksichtigt werden, in denen Strom und Wasserstoff als technische Lösungen in Frage kommen. Ein nennenswerter großtechnischer Einsatz von Wasserstoff findet in der Branche noch nicht statt. Im Rahmen von Pilotverfahren wird dieser aber bereits getestet und vorbereitet.

Im Gegensatz zu Wasserstoff wird Biogas bereits eingesetzt (ca. 1 % des Brennstoffeinsatzes). Wie bei den nachhaltigen Festbrennstoffen bleibt auch hier die Verfügbarkeit perspektivisch begrenzt. Dies hängt auch damit zusammen, dass Biogas und biogene Reststoffe miteinander in Zusammenhang stehen. So könnte beispielsweise Holzgas durch eine Holzvergasung gewonnen werden, welches dann jedoch nicht mehr

als Festbrennstoff zur Verfügung stünde. Das heute eingesetzte Biogas stammt jedoch vor allem aus der Wiederaufbereitung von Produktionswasser, welches zur Papierherstellung benötigt wird. In der Papierindustrie wird das Produktionswasser im Sinne der Nachhaltigkeit bereits verstärkt im Kreislauf gefahren. Auch die mit dem Klimawandel sinkende Wasserverfügbarkeit spielt dabei eine Rolle. Dafür muss das Produktionswasser regelmäßig gereinigt bzw. wiederaufbereitet werden. Dieser Reinigungsprozess läuft in der Regel in zwei Stufen ab und erfolgt kontinuierlich und parallel zur Produktion.

Das Biogaspotential in einer Papierfabrik beträgt für neue und optimierte Anlagen schätzungsweise 5 bis 10 % des Wärmebedarfs, wobei es beim Frischfasereinsatz im Vergleich zur Recyclingnutzung geringer ausfällt. Hochgerechnet ergibt sich somit ein theoretisches Gesamtpotential von ca. 2 bis 3 TWh, verglichen mit einem bisherigen Einsatz von nur etwa 0,5 TWh. Zu beachten ist jedoch, dass eine gesteigerte Biogasproduktion auch einen erhöhten Rohstoffeinsatz (Papierfasern) mit sich bringt. Das ideale Biogaspotential kann somit nur unter Berücksichtigung aller Faktoren entlang des gesamten Produktionsprozesses ermittelt werden.

Das Biogasgemisch kann direkt vor Ort in robusteren Anlagen eingesetzt werden. Alternativ kann es zu reinem Biomethan aufbereitet und in technisch sensibleren Anlagen (bspw. Gasturbine, befeuerte Trocknung) eingesetzt oder in das Erdgasnetz eingespeist werden. Für Letzteres muss das Biomethan von den übrigen Gasen in entsprechenden Aufbereitungsanlagen getrennt werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen sollten solche Anlagen jedoch je nach Marktlage eine Mindestmenge von 20 bis 50 GWh pro Jahr aufbereiten.

4.1.3 STROM

Strom wird in der Papierindustrie auch weiterhin eine wichtige Rolle einnehmen. In erster Linie wird er in grundlastfähiger Form (rund um die Uhr verfügbar) für den mechanischen Energiebedarf von Aggregaten wie Pumpen, Walzen etc. benötigt. Da die Papierindustrie Strom zu einem großen Teil auch selbst erzeugt, ist zwischen Strombezug bzw. Netzbezug und Stromeinsatz zu unterscheiden. Durch die enge Verflechtung mit der Stromwirtschaft ist eine klare Trennung zudem oft nicht möglich. Volatiler erneuerbarer Strom muss nicht am Standort selbst erzeugt werden, sondern kann an entsprechend geeigneten Standorten in ganz Deutschland aufgebaut werden. Er ist somit im Netzbezug enthalten und baut seinen Anteil im Rahmen der Energiewende stetig aus. Auch grundlastfähige thermische Kraftwerke müssen nicht in räumlicher Nähe zur Papierfabrik stehen.

Für eine besonders effiziente Nutzung im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung ist hingegen eine räumliche Nähe zur Papierfabrik notwendig und muss bei der Transformation mitgedacht werden. KWK-Anlagen sind daher der Eigenerzeugung zuzurechnen.

Durch die Transformation des Stromsystems ergeben sich neue Einsatzmöglichkeiten. Mit dem weiteren Zubau von volatilen Erneuerbaren wie Windenergie und Photovoltaik wird der Strompreis noch stärker als heute von der zeitlichen Komponente abhängen. In Zeitfenstern mit einem günstigen Strompreis kann daher eine verstärkte Elektrifizierung sinnvoll sein, um andere Energieträger zu sparen. Umgekehrt muss sich die Branche aber auch auf Knappheitssignale einstellen. Während der Strompreis in der Vergangenheit von Kohle- und Atomstrom dominiert wurde, die für günstige Marktpreise gesorgt haben, werden diese Energieträger zukünftig nicht mehr zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer Umweltbelastung werden diese Technologien politisch ausgeschlossen. Dies führt dazu, dass sich teurere Alternativen durchsetzen werden, die dafür mit einer geringeren Umweltbelastung einhergehen. Dies wird voraussichtlich ein Mix aus volatilen erneuerbaren Energien und grundlastfähigen thermischen Kraftwerken, größtenteils auf Basis von Wasserstoff, sein.

4.2 KLIMANEUTRALE DAMPFERZEUGUNG

Der größte Anteil des Energieverbrauchs der Branche entfällt auf die Wärmebereitstellung in Form von Dampf. Dieser wird in den verschiedensten Bereichen der Papierindustrie benötigt. Der mit Abstand größte Teil entfällt jedoch auf die Trocknung der Papierbahn über dampfbeheizte Trocknungszyylinder. Die Vorteile von Dampf bspw. ggü. einer direkten Beheizung der Zylinder bestehen in dem deutlich einfacheren Handling. Durch die zentrale Dampferzeugung sind keine einzelnen Befeuerungs- bzw. Beheizungssysteme für jeden einzelnen Zylinder notwendig. Darüber hinaus besitzt Wasser bzw. Wasserdampf den physikalischen Vorteil, dass beim Kondensieren (Übergang vom gasförmigen zum flüssigen Zustand) die Temperatur nicht abfällt und über den gesamten Zylinder relativ konstant bleibt. Dies ist wichtig, damit die Papiereigenschaften über den gesamten Querschnitt der Papierbahn vergleichbar bleiben und sich nicht durch unterschiedliches Trocknungsverhalten ändern.

Die Dampferzeugung ist auf verschiedene Weisen möglich. Die Technologien dafür können auch kombiniert werden, indem beispielsweise mehrere Kessel parallel betrieben werden und der Dampf auf Sammelschienen

zusammengeführt wird. Wo es sinnvoll ist, kann der Dampf auch in verschiedenen Stufen erzeugt werden. Papiermaschinen benötigen den Dampf größtenteils in einem Temperaturbereich von ca. 120 bis 150 °C, in speziellen Fällen jedoch auch bei über 200 °C.

Grundsätzlich ist der Dampfbedarf einer Papierfabrik sehr konstant und orientiert sich an der Papierbahn. Ausnahmen hiervon sind unerwartete Produktionsstopps (Abrisse) oder das geplante Abstellen einzelner Papiermaschinen zu Wartungszwecken. Unabhängig vom konstanten Bedarf kann die Nutzung von Flexibilisierungspotentialen in der Dampferzeugung von Vorteil sein. Beispielsweise können mehrere Dampferzeugungseinheiten auf Basis unterschiedlicher Energieträger installiert sein und abwechselnd je nach Marktlage zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden der Brennstoffkessel, der Elektrokessel sowie die Wärmepumpe und die Tiefengeothermie vorgestellt.

4.2.1 BRENNSTOFFKESSEL

Brennstoffkessel zur direkten Dampferzeugung kommen in verschiedenen Formen in fast jeder Papierfabrik zum Einsatz. Für feste Brennstoffe wie Ersatzbrennstoffe und Biomasse ist er zwingend erforderlich, aber auch gasförmige Brennstoffe wie Erdgas und biogene Gase sowie perspektivisch auch Wasserstoff können genutzt werden. Aus Effizienzgründen werden Brennstoffkessel häufig in Kraft-Wärme-Kopplung (siehe 4.3) betrieben. Für kleinere Leistungsklassen bzw. als Redundanzoption kann aber auch die reine Dampferzeugung wirtschaftlich sinnvoll sein.

Brennstoffkessel sind industrieller Standard und unterliegen keiner technisch relevanten Leistungsbeschränkung. Für Biomasse und Ersatzbrennstoffe (Reststoffe aus dem Abfallrecycling) ist die größte Hürde die begrenzte Verfügbarkeit. Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen basiert in der Regel auf den anfallenden Rückständen aus der Altpapieraufbereitung und der Papierproduktion (bspw. Deinking- und Faserrückstände) und wird ggf. durch zusätzliche Mengen aus der

Umgebung erweitert. Da Transportkosten eine wesentliche Rolle spielen, sind die Märkte sowohl für Biomasse als auch Ersatzbrennstoffe sehr regional geprägt. Darüber hinaus stellen hohe Genehmigungshürden und lokale Akzeptanz weitere Herausforderungen dar.

Für gasbefeuerte Kessel ist die Verfügbarkeit von klimaneutralen Brennstoffen nochmal schlechter, sodass derzeit fast ausschließlich Erdgas eingesetzt wird. Mit einer potenziell steigenden Verfügbarkeit von klimaneutralen Gasen ist auch hier eine Umrüstung denkbar.

Das Flexibilisierungspotential von Brennstoffkesseln hängt stark vom jeweiligen Brennstoff ab. Festbrennstoffkessel können ihre Leistung in gewissen Grenzen anpassen, was sich jedoch wiederum negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt. Gaskessel können auch kurzzeitig bei einer anhaltend hohen Effizienz von etwa 95 % die Leistung variieren.

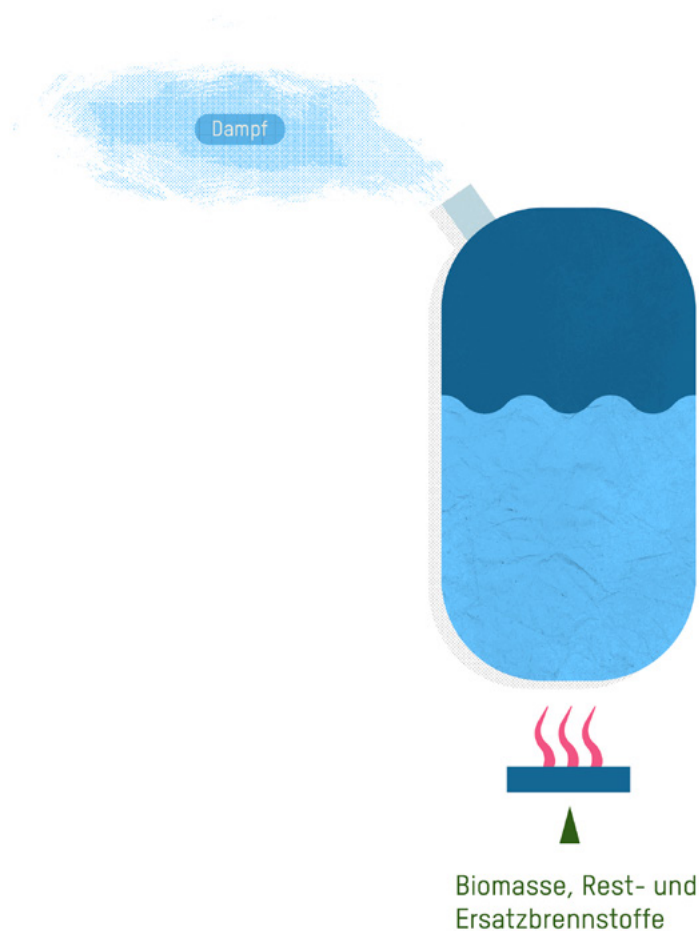


Abbildung 28 - Dampferzeugung auf Basis von Festbrennstoffen

4.2.2 ELEKTRISCHE DAMPFKESSEL

Zum Brennstoffkessel existiert auch ein elektrisches Pendant. Je nach technischer Ausführung erfolgt die Dampferzeugung über ein Thermoelement (Prinzip eines Wasserkochers) oder bei größeren Leistungsklassen als Elektrodenkessel. Bei diesem wird Strom über Elektroden durch das Wasser geleitet, welches sich dadurch erhitzt und verdampft. In der Regel wird das Wasser mittels drei Elektroden in einer separaten Wanne verdampft, der kontinuierlich neues Wasser zugeführt wird. Das Prinzip ist in Abbildung 29 dargestellt.

Elektrische Dampfkessel sind technisch ausgereift und in einem breiten Leistungsspektrum verfügbar. Während Elektrodenkessel ab etwa 2 bis 5 MW erhältlich sind, eignen sich Thermoelemente eher für kleinere Leistungsklassen. Elektrodenkessel und Anlagen mit Thermoelementen sind zwar mit vergleichsweise niedrigen Anlageninvestitionskosten verbunden. Allerdings stellt der benötigte Netzanschluss einen enormen zusätzlichen Investitionskostenfaktor dar. Hinzu kommt, dass sich die laufenden Kosten über den Strompreis bestimmen. Dieser ist sehr volatil, in der Regel aber deutlich höher als die Brennstoffkosten für alternative Dampferzeugungsanlagen. Selbst bei

niedrigen bis negativen Börsenstrompreisen wird der Abnahmepreis durch Steuern, Abgaben und Umlagen künstlich erhöht, was diese Form der elektrischen Dampferzeugung in den meisten Stunden im Jahr derzeit noch wirtschaftlich unattraktiv macht. Elektrische Dampfkessel kommen in der deutschen Papierindustrie daher noch kaum zur Anwendung. Allerdings stellt sich die Branche mit fortschreitender Energiewende durch zusätzliche installierte Leistung bereits auf die neuen Gegebenheiten ein.

Ein großer Vorteil elektrischer Dampfkessel ist die hohe Flexibilität. Ein Elektrodenkessel kann in unter einer Minute von der Mindestlast (wenige Prozent) in den Vollastbetrieb wechseln. Bezogen auf Strom als eingesetztem Energieträger arbeiten diese zudem mit Wirkungsgraden von bis zu 98 % sehr effizient. Auch eine Dampferzeugung auf Basis von Thermoelementen erreicht vergleichbar hohe Werte. Elektrische Dampfkessel müssen letztlich aber im Kontext der Stromerzeugung gesehen werden, wodurch sich ein deutlich differenzierteres Bild gibt. Während die Nutzung von überschüssigem Wind- oder Solarstrom besonders sinnvoll ist, ist eine Nutzung von Strom auf Basis von Brennstoffen über die gesamte Kette ineffizienter als die direkte Dampferzeugung über einen Brennstoffkessel.

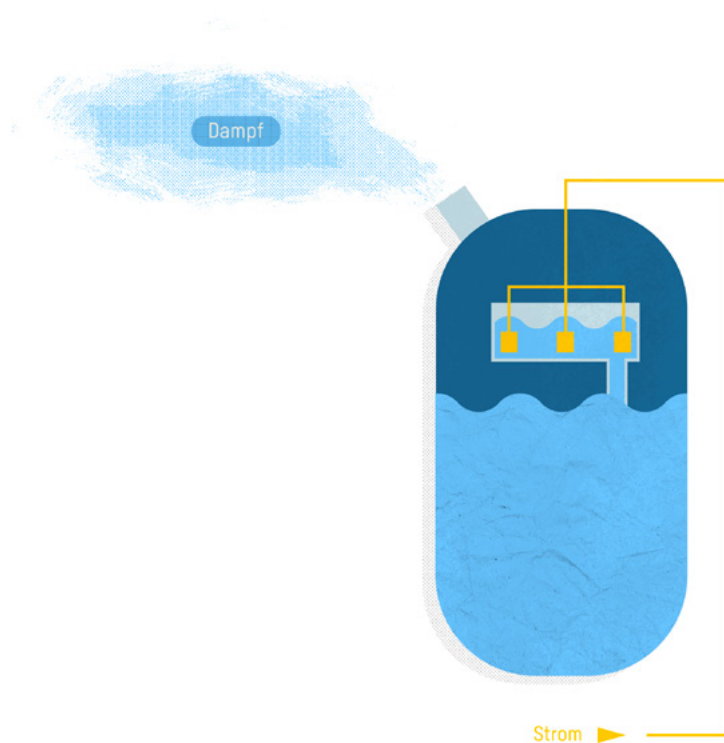


Abbildung 29 - Elektrodenkessel

4.2.3 WÄRMEPUMPE

Eine weitere Option, auf Basis vom Strom Dampf zu erzeugen, ist die Wärmepumpe. Neben Strom benötigt die Wärmepumpe zusätzlich eine Wärmequelle auf einem nicht mehr anderweitig nutzbaren Temperaturniveau, bspw. Niedertemperaturabwärme oder Umgebungswärme.

Der Wärmequelle wird mit Hilfe eines Arbeitsmittels Wärme entzogen. Die Wärmequelle kühlt dabei ab und erwärmt das Arbeitsmittel so weit, bis dieses verdampft. Anschließend wird das gasförmige Arbeitsmittel durch einen elektrisch angetriebenen Verdichter komprimiert. An der zu heizenden Stelle (Wärmesenke) wird dann die Wärme durch Kondensation des Arbeitsgases abgegeben, und zwar auf einem höheren Temperaturniveau als es bei der Wärmequelle der Fall war. Der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmesenke wird dabei als Temperaturhub bezeichnet. Danach wird das Arbeitsmittel entspannt und landet wieder an der Wärmequelle.

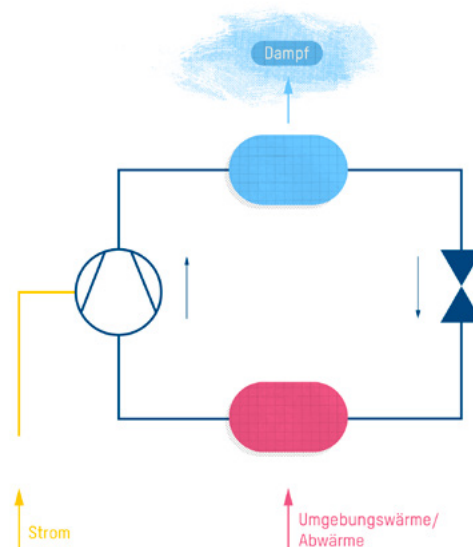
Wärmepumpen sind im Alltag bereits lange verbreitet, etwa als Kernkomponente des Kühlschranks, bei dem der Fokus auf dem Kühl- und nicht dem Heizungsprozess liegt, oder als Wärmepumpe für Gebäudeheizungen. In der Papierindustrie kommen Wärmepumpen jedoch nicht in großem Umfang zum Einsatz. Da für die Trocknungsprozesse Temperaturen um mindestens 120 °C benötigt werden, ist der Temperaturhub im Gegensatz zu alltäglichen Anwendungen besonders hoch, was mit einer sinkenden Effizienz einhergeht.

Wärmepumpen sind zudem mit hohen Kapitalkosten verbunden, da es sich häufig noch um Sonderanfertigungen handelt, auch wenn erste Baukastensysteme bereits angeboten werden. Hinzu kommt, dass für eine optimale Auslegung feste Rahmenbedingungen angenommen

werden müssen, die in der betrieblichen Realität aber oft nicht dauerhaft Bestand haben. So muss es sich bei der Wärmequelle beispielsweise zweifelsfrei um nicht anderweitig nutzbare Wärme handeln. Wenn sich hingegen eine neue Möglichkeit der Abwärmenutzung auftut oder die Abwärme durch Effizienzsteigerung vermieden werden kann, führt das auch zu einer energetisch notwendigen Neubewertung der Wärmepumpe.

Wärmepumpen für industrielle Zwecke sind kapitalintensiv und werden möglichst für den Dauerbetrieb ausgelegt. Da der dafür benötigte Grundlaststrom teuer wird, werden Effizienzvorteile so teilweise wieder ausgehebelt. Wenn notwendig können Wärmepumpen zwar in einem gewissen Bereich flexibel gefahren werden. Die Flexibilität geht aber mit Effizienzverlusten einher, was die operativen Kosten weiter erhöht.

Da die Wärmepumpe bei technologischer Reife, Investitionskosten und Flexibilitätspotential schlechter abschneidet als der E-Kessel, muss sie über die Effizienz - und damit über die operativen Kosten - alle übrigen Nachteile aufwiegen. Da klassische Energieeffizienz kein geeignetes Kriterium für die Wärmepumpe darstellt, wird stattdessen die Leistungszahl (engl. Coefficient of Performance – COP) gebildet. Der COP besagt, wie viel Wärme im Verhältnis zum eingesetzten Strom erzeugt wird. Letztlich gibt der COP vereinfacht gesagt an, welches Vielfache die Wärmepumpe an Wärme im Vergleich zum Elektrodenkessel bei gleichem Stromeinsatz erzeugt. Die bezogene Wärme aus der Wärmequelle spielt bei diesem Wert keine Rolle, da sie anderweitig nicht mehr nutzbar ist. Weniger Abwärme zu verbrauchen hätte keinen Mehrwert, sodass sie beim COP vernachlässigt werden kann. Damit sich Wärmepumpen im direkten Vergleich zu Elektrodenkesseln perspektivisch durchsetzen können, müssen diese zukünftig ausreichend hohe COPs von über 2,5 und/oder deutlich niedrigere Investitionskosten erreichen.



4.2.4 TIEFENGEOthermie

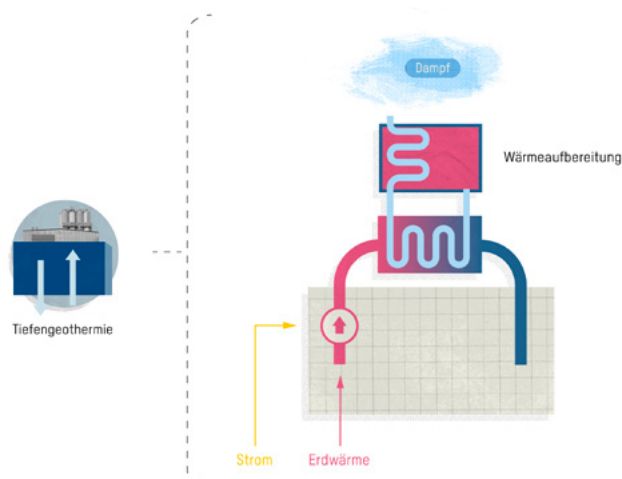
Die Nutzung von Tiefengeothermie ist eine besondere Form der Wärmeerzeugung und unterscheidet sich in den meisten Aspekten deutlich von den zuvor genannten Technologien. Bei der Tiefengeothermie wird Erdwärme genutzt, die sich i.d.R. ein paar Kilometer unter der Erdoberfläche befindet. Dafür wird entsprechend tief in die Erde gebohrt und das dort befindliche Thermalwasser mit Temperaturen um die 100 bis über 200 °C zutage gefördert.

An der Oberfläche wird das Thermalwasser dann über Wärmetauscher an einen nutzbaren Wasserkreislauf abgegeben. Wenn die Temperatur noch nicht ausreicht, kann ggf. eine zusätzliche Beheizung notwendig werden.

Für den Erfolg von Tiefengeothermie-Projekten sind eine möglichst hohe tiefengeothermale Temperatur sowie eine hohe Förderrate ausschlaggebend, was wiederum von den geologischen Gegebenheiten (Kluftigkeit) abhängt, die in Deutschland sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Die Kombination aus beidem wird als Fündigkeit bezeichnet.

Erfolgversprechende Regionen mit hohen erreichbaren Temperaturen sind das Molassebecken im Süden Bayerns, der Oberrheingraben – ausgehend vom Dreiländereck Deutschland, Frankreich und Schweiz entlang des Rheins bis nach Mainz – sowie das Norddeutsche Becken, welches sich von den Niederlanden über alle Norddeutschen Bundesländer nach Polen erstreckt.

Tiefengeothermie kommt in Deutschland bereits in einigen Gegenden zur Anwendung, ist aber bisher eher eine Nischentechnologie. Die meisten Anlagen befinden sich in den zuvor genannten Regionen. In der deutschen Papierindustrie kommt die Tiefengeothermie bisher noch nicht zum Einsatz, allerdings gibt es erste Unternehmen, die eine mögliche Nutzung zur Prozessdampferzeugung untersuchen.



Tiefengeothermieprojekte sind äußerst kapital- und zeitintensiv und darüber hinaus mit hohen finanziellen Risiken verbunden. Bereits am Anfang sind umfangreiche Voruntersuchungen der Gesteinsformationen (2D- oder 3D-Seismik) notwendig, um das Potential abzuschätzen. Und auch wenn im Rahmen der Voruntersuchungen ein hohes Potential vorhergesagt werden kann, ist die gewünschte Fündigkeit bei der Bohrung ungewiss. Für Tiefengeothermieprojekte werden daher in der Regel sogenannte Fündigkeitsversicherungen abgeschlossen.

Zuerst erfolgt die Bohrung für die Wasserentnahme, die auch als Abteufung bezeichnet wird. Ist diese erfolgreich durchgeführt und über Pumpversuche eine hohe Fündigkeit bestätigt, gilt es das Erdwärmepotential vollumfänglich auszuschöpfen. Hierzu wird dann eine zweite Bohrung vorgenommen, um das entnommene geothermale Wasser dem Untergrund wieder zurückzuführen. Dabei müssen Entnahme- und Rückführung in der gleichen Wasserschicht und zur Vermeidung eines „thermalen Kurzschlusses“ weit voneinander entfernt (ca. 1 bis 1,5 km) liegen. Sobald der Wasserkreislauf angelaufen ist, kann die verfügbare Wärmemenge exakt ermittelt werden.

Da eine möglichst hohe Wärmemenge gefördert werden soll, eignet sich die Tiefengeothermie nur für solche Verbraucher oder Verbrauchergruppen, die einen entsprechenden Wärmebedarf von mindestens 50 bis 100 GWh/a haben. Dieser muss jedoch nicht ausschließlich von der Papierfabrik kommen, sondern kann auch weitere regionale Bedarfe einschließen.

Tiefengeothermie wird kontinuierlich betrieben, um den Thermalwasserkreislauf dauerhaft in Gang zu halten. Hinzu kommt, dass die operativen Kosten durch eine hohe Effizienz gering sind. Dadurch eignet sich Tiefengeothermie im Besonderen für eine ganzjährige Grundlastwärmeversorgung, wie sie für die Papierproduktion benötigt wird. Wie bei der Wärmepumpe ist es auch bei der Tiefengeothermie ausreichend, den Stromeinsatz für die Förderpumpe (sowie ggf. notwendige Energie zur Zusatzbeheizung oder Verdichtung etc.) zur erzeugten Wärme ins Verhältnis zu setzen. Bei guter Fündigkeit und ohne Notwendigkeit einer zusätzlichen Wärmeaufbereitung kann im Vergleich zum Stromeinsatz realistischerweise das 20-Fache an Wärme bereitgestellt werden.

4.3 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

Eine Doppellösung für den prozessbedingt hohen Dampf- und Strombedarf stellt die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) dar. Mit ihr wird die Strom- und Dampfproduktion effizient kombiniert, die zudem noch grundlastfähig ist. KWK-Kraftwerke können somit dazu beitragen, eine stark volatile Stromerzeugung bspw. aus Photovoltaik und Windkraft zu ergänzen bzw. auszugleichen. Neben fossilen Brennstoffen können sie auch mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden und sind somit für die Transformation zur Klimaneutralität geeignet.

Thermische Kraftwerke können die beim Verbrennungsprozess freigewordene Wärme thermodynamisch bedingt nur anteilig in Strom umwandeln. Die restliche Wärme kann in Kraftwerken, die nur auf die Stromproduktion ausgelegt sind, kaum oder gar nicht genutzt werden. Wenn die Stromerzeugung jedoch von vorneherein mit einem entsprechenden Wärmebedarf zusammen gedacht und gekoppelt wird, kann ein besonders hoher Wirkungsgrad erreicht werden.

Mit ihrem gleichermaßen hohen Strom- und Dampfbedarf eignet sich die Papierindustrie besonders für die Kraft-Wärme-Kopplung. Papierfabriken betreiben ihre betriebsinternen Kraftwerke deshalb weit überwiegend nach dem KWK-Prinzip. Im Rahmen der Transformation müssen diese auf nachhaltige Festbrennstoffe wie Biomasse, Ersatzbrennstoffe und perspektivisch auch auf grüne Gase wie Wasserstoff umgestellt werden. Da diese Brennstoffe nur begrenzt verfügbar sein werden, wird deren effizienter Einsatz umso wichtiger. Somit wird auch KWK-Anlagen eine noch höhere Bedeutung zukommen. Im Folgenden werden daher verschiedene für die Papierindustrie relevante KWK-Technologien vorgestellt.

4.3.1 GUD-PROZESS

Eine bereits heute in der Branche weitverbreitete KWK-Technologie ist die Kopplung von Gas- und Dampfturbinen (GuD-Prozess). Dabei wird das eingesetzte Gas in der Gasturbine zur Stromerzeugung verbrannt. Die Abgase der Gasturbine wiederum beheizen einen Dampfkessel (auch Abhitzeessel genannt), ab dem der klassische thermische Kraftwerksprozess stattfindet. Im Kessel wird überhitzter Dampf erzeugt, welcher über eine oder mehrere Dampfturbinen zur erneuten Stromerzeugung entspannt wird. Der entspannte Dampf liegt dann als Prozessdampf auf einem für die Papierindustrie nutzbaren Druck- und Temperaturniveau vor und kann bspw. in den Zylindern der Trockenpartie genutzt werden. Dabei kondensiert der Dampf in den Zylindern und wird anschließend wieder in den Dampfkessel zur Dampferzeugung zurückgeführt.

Konventionelle GuD-Anlagen kommen ab ca. 10 MW elektrischer Leistung großflächig zum Einsatz. Auch kleinere Leistungsklassen bis hin zu Mikrogasturbinen existieren, sind aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit aber kaum verbreitet. Die in Deutschland eingesetzten GuD-Anlagen werden mit Erdgas betrieben, ggf. unter einer Beimischung von Biogas, welches jedoch entsprechend qualitativ aufbereitet werden muss. Perspektivisch wird auch Wasserstoff als Brennstoff nutzbar sein. Altanlagen sind schon heute in der Lage, ein Wasserstoff-Erdgas-Gemisch mit einem kleinen Wasserstoffanteil zu verbrennen. Allerdings muss beachtet werden, dass im Vergleich zu Erdgas bei der Wasserstoffverbrennung höhere Temperaturen entstehen und Wasserstoff bezogen auf sein Volumen weniger Energie besitzt. Herkömmliche, für den reinen Erdgasbetrieb ausgelegte Brenner, müssen daher durch eigens konstruierte Gasbrenner für den Mischbetrieb

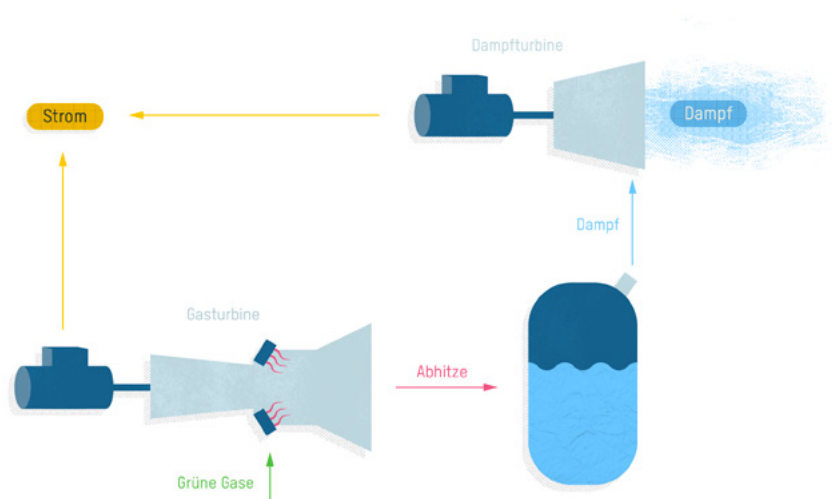


Abbildung 32 - GuD-Prozess

bzw. für den Einsatz von bis zu 100 % Wasserstoff ersetzt werden. Da Gasbrenner Verschleißteile sind, die etwa alle 5 Jahre ausgetauscht werden, kann der Wasserstoffeinsatz in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit schrittweise erhöht werden. Allerdings muss auch die Gasturbine selbst so konstruiert sein, dass sich die H₂-Brenner zukünftig einbauen lassen. Die Gasturbinenhersteller befinden sich hier in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Vorreiter geben jedoch an, bereits heute Turbinen liefern zu können, die (mit Nachrüstung) bis zu 75 oder gar 100 % Wasserstoff einsetzen könnten. Eine großflächige Wasserstofffähigkeit von 100 % scheint daher nur eine Frage der Zeit zu sein. Er ist nicht zuletzt auch für den Immissionsschutz von großer Bedeutung, da im Mischbetrieb (Erdgas/Wasserstoff) vermehrt Stickoxide entstehen können. Ein wichtiges Forschungsprojekt zur Wasserstoff-KWK ist Hyflexpower in Frankreich [12]. In diesem wird der Einsatz von bis zu 100 % Wasserstoff in einer GuD-Anlage untersucht, die wiederum eine Papierfabrik mit Dampf und Strom versorgt und zusätzlich noch Strom ins öffentliche Netz einspeist.

Für eine geplante Umstellung auf Wasserstoff muss auch die Infrastruktur mitbedacht werden. Ein wichtiger Faktor dabei ist der zukünftige Zugang zu Wasserstoffpipelines. Auch im Genehmigungsbereich bestehen noch viele Herausforderungen. Die durch Wasserstoff bedingten höheren Betriebstemperaturen beeinflussen auch den Schadstoffausstoß und der Einsatz geht mit veränderten Anforderungen an die betriebliche Sicherheit einher. Erste Prüf- und Zertifizierungssysteme befinden sich hierfür gerade im Aufbau.

GuD-Anlagen können so ausgelegt werden, dass sie zwischen einer minimalen und einer maximalen Last flexibel sind und dabei gleichzeitig sehr effizient betrieben werden. Daher eignen sie sich besonders, um Lastspitzen zu bedienen. Aufgrund der derzeitigen Regulierungssituation sind heutige GuD-Anlagen stromseitig oft darauf ausgelegt, den Strombedarf der Papierfabrik genau bedienen zu können und darüber hinaus Strom auszuspeisen, wenn es wirtschaftlich rentabel ist. Bei entsprechender Anpassung der Regulatorik ist es jedoch sinnvoll, dass GuD-Anlagen zukünftig in Zeiten eines Überangebotes an Erneuerbaren Energien noch weiter reduzieren und die Papierfabrik den benötigten Strom aus dem Netz bezieht. Neben dem Bezug des fehlenden Stroms ist dann jedoch auch eine ausreichende Dampfversorgung zu gewährleisten.

Bei optimaler Kombination von Strom- und Wärmebedarf erreicht der GuD-Prozess Gesamtwirkungsgrade von 80 bis 90 %. Ohne die Abwärmenutzung würde der Wirkungsgrad bei ca. 40 bis 60 % liegen.

4.3.2 KOMBINATION VON BRENNSTOFFKESEL UND DAMPFTURBINE

Auch feste Brennstoffe können für die KWK-Technologie genutzt werden. Die Dampfkessel werden dabei direkt über den Festbrennstoff beheizt und erzeugen überhitzten Dampf auf deutlich höherem Temperaturniveau als bei der reinen Dampferzeugung. Wie in einer GuD-Anlage wird der überhitzte Dampf über eine oder mehrere Dampfturbinen zur Stromerzeugung entspannt. Anschließend liegt der Dampf auf einem für die Papierindustrie nutzbaren Niveau. Dabei kondensiert der Dampf zu Wasser und wird anschließend im Krauslauf wieder in der Dampferzeugungsanlage erhitzt. Der Prozess ist auch mit flüssigen und gasförmigen Brennstoffen möglich, für diese gibt es jedoch in der Regel bessere Alternativverwendungen (bspw. im GuD-Prozess). Aus Flexibilitätsgründen kann aber eine entsprechende Zusatzfeuerung mit Gas sinnvoll sein.

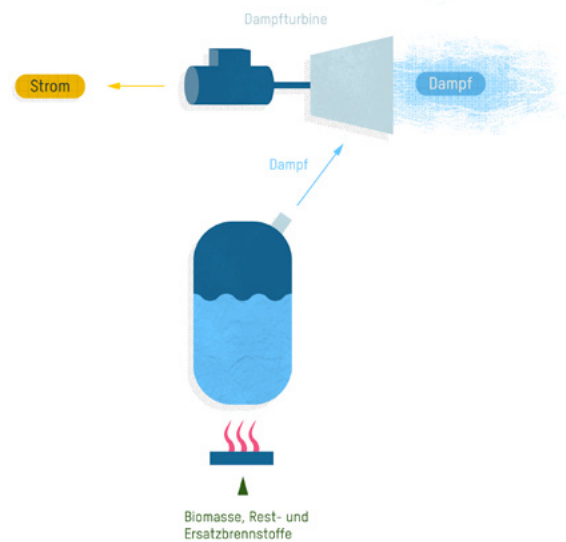


Abbildung 33 - Festbrennstoff KWK

In der Papierindustrie werden derzeit sowohl Kohle als auch Biomasse und Ersatzbrennstoffe (EBS) nach dem KWK-Prinzip verstromt. Der Kohleeinsatz der Papierindustrie ist in den vergangenen Jahren stark gesunken und hat sich allein zwischen 2010 und 2020 um ca. 44 % reduziert. Grund dafür sind u.a. die gestiegenen CO₂-Kosten im europäischen Emissionshandel. Durch den Kohleausstieg ist auch perspektivisch mit einem Rückgang zu rechnen. Biomasse- und Ersatzbrennstoffkraftwerke sind im gleichen Zeitraum um ca. 10 % auf rund 15 TWh angestiegen. Hier schwankt der jährliche Einsatz jedoch in Abhängigkeit von Brennstoffkosten bzw. Brennstoffverfügbarkeit.

Die größten KWK-Anlagen auf Basis biogener Reststoffe sind die Zellstoffwerke, die bereits große Mengen an Holz

und Sägenebenprodukten nach dem Kaskadenprinzip stofflich verwerten und das bei der Zellstoffproduktion anfallende Lignin thermisch zur Strom- und Dampferzeugung nutzen. Aber auch Papierfabriken ohne Primärfasererzeugung nutzen Biomasse-KWK, wenn die regionale Verfügbarkeit dies erlaubt. Die Rückstände aus der eigenen Altpapieraufbereitung bzw. Produktion reichen in der Regel nicht aus, um die notwendige thermische Leistung für eine EBS-KWK-Anlage zu erreichen. Ob eine solche Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt daher ebenfalls vom regionalen Potential an Ersatzbrennstoffen ab.

Die Flexibilität der Festbrennstoff-KWK hängt vor allem vom Brennstoffkessel ab. Die Anlagen erzeugen überhitzten Dampf bei deutlich höheren Temperaturen als reine Dampfkessel. Entsprechend länger dauern die Aufheiz- und Abkühlungsphasen. Auch Festbrennstoff-KWK-Anlagen können ihre Leistung in gewissen Grenzen variieren.

4.4 BEFEUERTE TROCKNUNGSPROZESSE

Neben der Kontakttrocknung mit dampfbeheizten Zylindern kommen in der Papiererzeugung auch noch weitere Trocknungstechnologien zum Einsatz. Dazu zählt die Konvektionstrocknung mit heißer Luft durch die Trockenhaube oder durch Schwebetrockner. Auch Infrarottrockner kommen zum Einsatz, die die Papierbahn mit Wärmestrahlung trocknen. Diese Systeme sind in der Regel erdgasbefeuert. Für eine klimafreundliche Produktion wird daher auch für diese Trocknungsformen eine Transformationslösung benötigt. Im Folgenden soll der Einsatzzweck dieser Technologien erläutert und eine Transformationsoption aufgezeigt werden.

4.4.1 TROCKENHAUBE

Eine Trocknungsmethode in der Papierindustrie ist die Kombination einer Heißlufttrocknung über eine Trockenhaube mit einem großen dampfbeheizten Zylinder, dem Yankee-Zylinder. Dabei werden Temperaturniveaus von bis zu 200° C in den Dampfzylindern und 500° C bis 600° C in der Haube erreicht. Diese hohen Temperaturen erfordern eine direkte Befuerung der Trockenhaube, die konventionell noch mit Erdgas erfolgt.

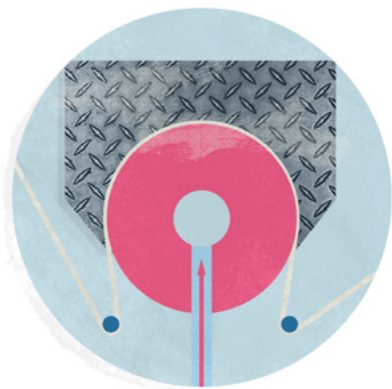


Abbildung 34 - Trockenhaube und Yankee-Zylinder

Die Trockenhaube kommt vor allem für dünnere Papiere mit niedrigeren Flächengewichten zum Einsatz. Mit der Technologie lassen sich größere Maschinengeschwindigkeiten realisieren, was zu einer höheren Produktivität führt. Zudem werden Trockenhauben auch benötigt, um bestimmte Eigenschaften wie eine gute Saugfähigkeit zu erzeugen. Insbesondere im Tissue-Bereich ist ihr Einsatz daher weit verbreitet.

Die notwendige Energiedichte und die hohen Temperaturen werden durch Gasbrenner erreicht. Für eine klimafreundliche Transformation ist jedoch ein Brennstoffwechsel auf grüne Gase nötig, bspw. auf Biomethan oder Wasserstoff. Während sich der Einsatz von Biomethan gegenüber Erdgas technisch nicht unterscheidet, sind für den Wasserstoffeinsatz eigene Brenner notwendig. Da es sich bei diesen um Verschleißteile handelt, ist der Umtausch mit einem geringen Investitionsaufwand verbunden. Daneben ist jedoch auch der Aufbau einer Werksinfrastruktur für Wasserstoff notwendig. In Pilotversuchen wurde der Einsatz einer wasserstoffbefeuerten Trockenhaube bereits erfolgreich getestet.

4.4.2 INFRAROTTROCKNUNG

Eine besonders hohe Energiedichte wird mittels Infrarottrocknung (IR-Trocknung) erreicht. Die IR-Trocknung ist zudem kontaktlos. Sie ist daher vor allem bei der Trocknung von Beschichtungen notwendig, da diese in der Regel keine mechanische Beeinträchtigung tolerieren und in kurzer Zeit trocknen müssen. Infrarotstrahler sind in der Lage „von innen heraus“ zu trocknen. Die Eindringtiefe beträgt etwa 1 Millimeter. Oftmals wird die IR-Strahlung mit Schwebetrocknern (vgl. 4.4.3) kombiniert. Die Erzeugung der IR-Strahlung kann sowohl elektrisch als auch durch direkte Befuerung mit Gas geschehen. Strahler sind z.B. Metalle oder keramische Verbindungen, die bei bestimmten Temperaturen Strahlung im relevanten Wellenlängenbereich emittieren. Je nach Strahlertyp können Wellenlängen von 5 µm bis 1,7 µm emittiert und Temperaturen bis 1450 °C erreicht werden. Der für die Trocknung wichtigste Teil liegt bei der Hauptabsorptionsbande von Wasser bei etwa 3 µm.

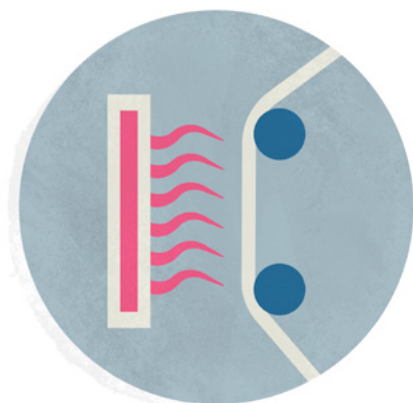


Abbildung 35 - Infrarottrocknung

Besonders hohe Strahlungsleistung kann mit einer direkten Gasbefuerung erzielt werden, wobei die

Flamme direkt auf den Strahlungskörper trifft oder gar in Poren der Struktur zur Emission der IR-Strahlung anregt. Je nach Anwendung beeinflusst der IR-Strahler auch die Beschaffenheit des Papiers bzw. des Strichs. Dies gilt es auch bei einer klimafreundlichen Transformation zu beachten. Können alle Anforderungen mit einem elektrischen IR-Strahler erfüllt werden, ist eine einfache Elektrifizierung denkbar. Sind die Eigenschaften eines gasbefeuchten IR-Trockners notwendig, ist ein Brennstoffwechsel in Betracht zu ziehen. Neben Biomethan ist auch der Einsatz von Wasserstoff denkbar. Letzteres ist in der Papierindustrie jedoch noch nicht getestet worden. Auch hybride Systeme könnten zukünftig zum Einsatz kommen. Diese würden bei volatilem Stromangebot vor allem Flexibilität ermöglichen. Es wäre andererseits aber auch mit deutlich höheren Kapitalkosten verbunden.

4.4.3 SCHWEBETROCKNER

Eine weitere kontaktlose Trocknungsmöglichkeit sind die Schwebetrockner. Diese sind Heißlufttrockner, die die Papierbahn beidseitig mit Heißluft bis etwa 300 °C anströmen. Dabei bewegt sich die Bahn quasi sinusförmig durch den Trockner.

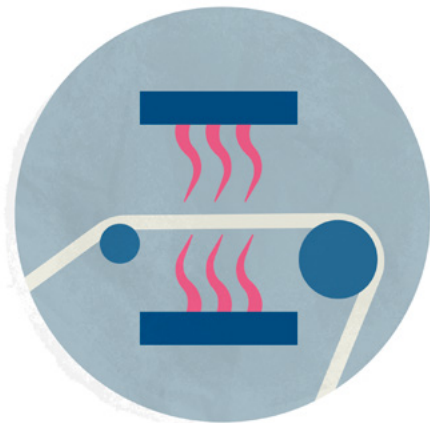


Abbildung 36 - Schwebetrockner

Da die Temperaturen in Schwebetrocknern niedriger sind als bspw. in der Trockenhaube, kommt eine Elektrifizierung in Betracht. Je niedriger die benötigte Temperatur bzw. benötigte Trocknungsleistung, desto sinnvoller ist eine elektrische Beheizung. Andersherum empfiehlt sich bei einer größeren Trocknungsleistung eine befeuerte Heißluftherzeugung. Letztlich kommt es auf die individuellen Gegebenheiten der Papiermaschine an. Eine Elektrifizierung benötigt mehr Platz, sodass allein dieser Grund den Einsatz grüner Gase notwendig machen kann. Auch bei Schwebetrocknern ist zur Steigerung der Flexibilität eine Hybridlösung nicht ausgeschlossen.

4.5 BECCS-POTENTIAL FÜR EINE KLIMASENKE

Neben der Vermeidung von Treibhausgasemissionen ist auch der umgekehrte Weg, die Entnahme aus der Erdatmosphäre, ein wichtiger Baustein für den weltweiten Klimaschutz. Eine solche Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre wird auch als Klimasenke und die entnommenen Treibhausgase als Negativemissionen bezeichnet. Diese sind bspw. notwendig, um Sektoren, in denen Treibhausgase nach heutigem Wissensstand gar nicht oder nur sehr schwer vermieden werden können, auszugleichen. Beispiele sind die Landwirtschaft und die Abfallwirtschaft, aber auch einige Industrieprozesse fallen darunter.

Eine Schlüsselrolle zur Bewältigung dieser Herausforderung könnten Kraftwerke einnehmen, die Ersatzbrennstoffe oder Biomasse einsetzen. Durch Abscheidung und Speicherung des beim Verbrennungsprozess entstehenden biogenen CO₂ kann eine Klimasenke realisiert werden. Dafür muss das CO₂ dauerhaft und sicher unterirdisch verpresst werden. Die gängige Abkürzung für diese Technologie ist „BECCS“ und leitet sich aus dem englischen „Bioenergy Carbon Capture and Storage“ ab. Viele Studien und auch das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) gehen davon aus, dass die Klimaziele ohne solche CO₂-Speichertechnologien nicht erreichbar sind. Deutschland hat sich mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz zudem das Ziel gesetzt, nach der Klimaneutralität eine Netto-Senke anzustreben. Der BECCS-Technologie könnte zukünftig daher auch hierzulande eine wichtige Rolle zukommen.

Die Technologie ist dabei in drei Schritte zu unterteilen. Zuerst wird die Energie aus nachhaltigen biogenen Stoffen gewonnen, die zuvor die Nutzungskaskade durchlaufen haben und nicht mehr stofflich verwertet werden können. Das dabei entstehende biogene CO₂ wird aus dem Abgas/Rauchgas des Kraftwerks in einem zweiten Schritt abgeschieden. Anschließend kann es dann abtransportiert und in geeigneten Stätten dauerhaft unterirdisch verpresst werden.

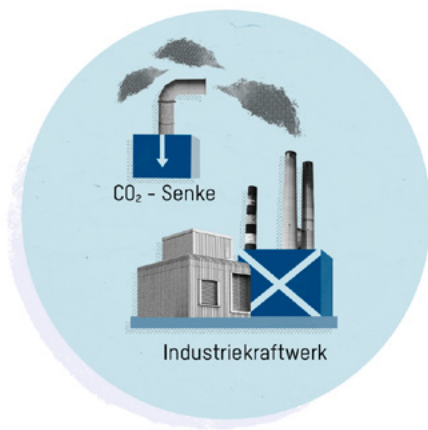


Abbildung 37 – Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS)

Die bisherigen Abscheideverfahren sind zusammen mit dem CO₂-Transport und der dauerhaften Einspeicherung derzeit noch sehr energieintensiv. Insgesamt sollte darauf geachtet werden, dass bei der großtechnischen Anwendung der Energieaufwand deutlich niedriger als der Energieertrag aus den Brennstoffen ist. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat zu dieser Thematik ein Kurzgutachten bei der Prognos AG beauftragt [13].

Aus wirtschaftlicher Perspektive ist der Einsatz von BECCS vornehmlich für größere energetische Verwerter biogener Reststoffe interessant. Auch die Papierindustrie könnte sich daher für den perspektivischen Einsatz dieser Technologie eignen. Zellstofffabriken betreiben schon heute die größten Biomassekraftwerke in Deutschland und auch Recyclingpapierhersteller mit Ersatzbrennstoffkraftwerken und einem hohen Reststoffaufkommen bieten Potential, nach der energetischen Verwertung genügend biogenes CO₂ für die Einlagerung abzuscheiden.

In Deutschland wurde die CO₂-Abscheidung und Speicherung bisher nur in Pilotanlagen betrieben. Insbesondere skandinavische Länder wie Norwegen oder Schweden sind bereits in der großindustriellen Umsetzung Vorreiter und machen sich für eine Ausweitung stark.

4.6 INNOVATIVE ANSÄTZE IN DER PAPIERFERTIGUNG

Die heutige industrielle Papiererzeugung ist ein Beispiel für eine hochautomatisierte, schlanke Prozessindustrie. Die Prozessstufen sind so aufeinander abgestimmt, dass möglichst geringe Verluste an Rohstoffen entstehen und die Herstellung mit höchster Produktivität möglich wird. Wie im Branchenportrait erläutert, spielt Wasser dafür eine entscheidende Rolle. Die Papierfasern gehen mit Hilfe von Wasser zueinander feste Bindungen ein, die wesentlich auf Wasserstoffbrückenbindungen, Salzbrücken und einem molekularen Klettmechanismus (Interlocking) beruhen. Das anschließende Entwässern ist jedoch sehr energieintensiv.

Während in der Siebpartie noch kaum Energie zur Entwässerung benötigt wird, ist die Pressenpartie schon ein relevanter Energieverbraucher. Die meiste Energie muss jedoch im letzten Entwässerungsschritt, bei der Trocknung in der Trockenpartie, eingesetzt werden. Vor dem Hintergrund, dass die Entwässerung entscheidend für den hohen Energiebedarf der konventionellen Papiererzeugung ist, können innovative Ansätze daher wie folgt unterteilt werden:

a. Papiererzeugung mit Wasser

Um die hervorragenden Eigenschaften von Wasser auch weiter nutzen zu können, wird der Strang weiter erforscht. Eine Möglichkeit besteht bspw. darin, den Trocknungsanteil zu minimieren und die anderen Entwässerungsstufen zu stärken. Weiterhin wird untersucht, wie die aus der Trocknung stammende Abwärme mit ca. 40 bis 50 °C wieder nutzbar gemacht werden kann. Auch eine Modifikation von Fasern, damit diese weniger Wasser aufnehmen und folglich eine geringere Wassermenge energieaufwendig aus der Papierbahn entfernt werden muss, ist denkbar.

b. Trockene Papiererzeugung

Hier wird die Fragestellung untersucht, wie eine trockene Papiervlieslegung mit entsprechender Bindung realisiert werden kann. Es werden unter anderem Technologien entwickelt, um trockene Fasern gleichmäßig zu verteilen.

c. Austausch von Wasser durch eine andere Flüssigkeit

Hier steht die Frage im Mittelpunkt, ob eine Papierherstellung mit anderen Fluiden als Wasser ermöglicht werden kann, sodass weniger Energie

gebraucht wird, um das Fluid aus der Papierbahn zu entfernen.

Bei jedem der Ansätze gilt es, das Gesamtbild im Blick zu behalten. Neben dem Energieverbrauch müssen auch andere Aspekte, wie Produkteigenschaften, Umweltverträglichkeit, Ressourceneffizienz etc. weiterhin angemessen berücksichtigt werden. Die Verbesserung eines Aspektes darf nicht zu Lasten einer unverhältnismäßigen Verschlechterung anderer Aspekte gehen.

Auf dem Weg zur klimaneutralen Papierindustrie muss eine systemische Integration der erforschten Ergebnisse auf verschiedenen Ebenen sichergestellt sein. An erster Stelle steht die energetische Betrachtung der gesamten Papierherstellung. Das Zusammenführen optimaler Einzelprozesse führt nicht automatisch zu einem optimalen Gesamtsystem. Die neuen Prozesse benötigen Energie auf anderen Temperaturniveaus oder in Form anderer Medien als heute. Gleichzeitig verändert sich der Energiemarkt und die Verfügbarkeit von Energieträgern. Eine Unterstützung aller Forschungsbereiche kann die Digitalisierung leisten.

Auf der Ebene der Kreislaufwirtschaft ist zudem die Untersuchung der Auswirkungen neuer Produkte und Prozesse auf den Wertstoffkreislauf notwendig. Dies kann zum einen experimentell erfolgen, bspw. durch die Untersuchung der Rezyklierbarkeit nach heutigen Prozess- und Methodenstandards oder durch die Untersuchung des Verhaltens heutiger Papierprodukte in modifizierten bzw. neuen Aufschlussverfahren. Dabei gilt es, auch biotechnologische Verfahren zu prüfen. Zum anderen können Simulationen zur Abschätzung mittelfristiger Auswirkungen neuer Rohstoffe, Produkte und Prozesse auf den Papierkreislauf erfolgen.

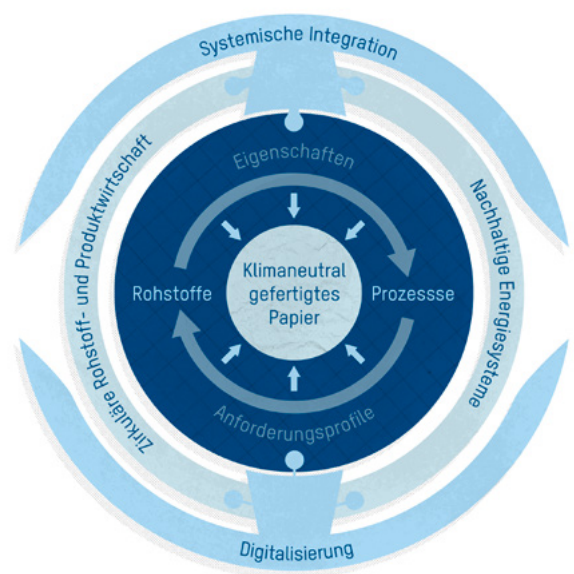


Abbildung 38 - Ganzheitlicher Forschungsansatz der Modellfabrik Papier für klimaneutral gefertigtes Papier

Für dieses umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsprogramm, in Abbildung 38 zusammenfassend dargestellt, wurde die Modellfabrik Papier gGmbH von 15 Unternehmen aus der Papier- und Papierzulieferindustrie gegründet [13]. Dazu wird in enger Kooperation mit 7 wissenschaftlichen Instituten und der Wirtschaftsförderung Düren eine neue Forschungsfabrik errichtet. Mit der Modellfabrik Papier wird eine Infrastruktur geschaffen, die der Papierindustrie erstmals die Möglichkeit gibt, im Rahmen eines offenen Innovationsnetzwerkes an einem zentralen Ort im Rheinischen Braunkohlerevier disruptiv an der Vision einer klimaneutralen Papierproduktion zu forschen.



Abbildung 39 - Logo der Modellfabrik Papier

5 TRANS- FORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN PAPIERINDUSTRIE

Im Kapitel 4 wurde aufgezeigt, dass eine klimaneutrale Papierproduktion schon heute technisch möglich ist. Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Versorgung mit klimaneutralem Strom, nachhaltigen Festbrennstoffen und grünen Gasen. Mit dieser Voraussetzung steht die Papierindustrie nicht allein da. Auch die anderen energieintensiven Branchen sind mit unterschiedlichen Schwerpunkten auf eine Versorgung mit klimaneutraler Energie zu international wettbewerbsfähigen Preisen angewiesen. Letztlich ist der gesamte deutsche Energiebedarf zusammenhängend zu betrachten, da eine singuläre Betrachtung einzelner Fabriken wichtige Synergieeffekte vernachlässigen würde. Im Folgenden soll daher die Energieversorgung der Papierindustrie im deutschen Gesamtkontext betrachtet werden. Anschließend wird eine klimaneutrale Papierindustrie dargestellt, die entsprechende Synergien berücksichtigt. Abschließend soll untersucht werden, wie passende klimaneutrale Energiemix-Szenarien aussehen könnten.

5.1 ENERGIEVERSORGUNG IM DEUTSCHEN GESAMTKONTEXT

Deutschland ist ein Energieimportland. Der Anteil der Nettoimporte am Primärenergieverbrauch liegt laut dem statistischen Bundesamt bei über 60 %. Mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien steigert sich zwar die Energieproduktion im Inland. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Deutschland auch in Zukunft ein Energieimportland bleiben wird. Energie wird somit eine wertvolle Ressource bleiben, die es effizient zu nutzen gilt. Die Importe dürften auch zukünftig zum Großteil in Form von Brennstoffen erfolgen. Die derzeit überwiegend fossilen Energieträger müssen im Rahmen der Transformation durch klimaneutrale Alternativen ersetzt werden. Aus Gründen der Verfügbarkeit dürfte den grünen Gasen, ggf. auch in verflüssigter Form, perspektivisch eine Hauptrolle zukommen. Die Energieerzeugung im Inland dürfte dagegen vor allem durch den Ausbau von Windkraft und Photovoltaik steigen. Durch eine passende Gesamtbetrachtung lassen sich Synergien heben, die zu einer effizienteren Energienutzung beitragen.

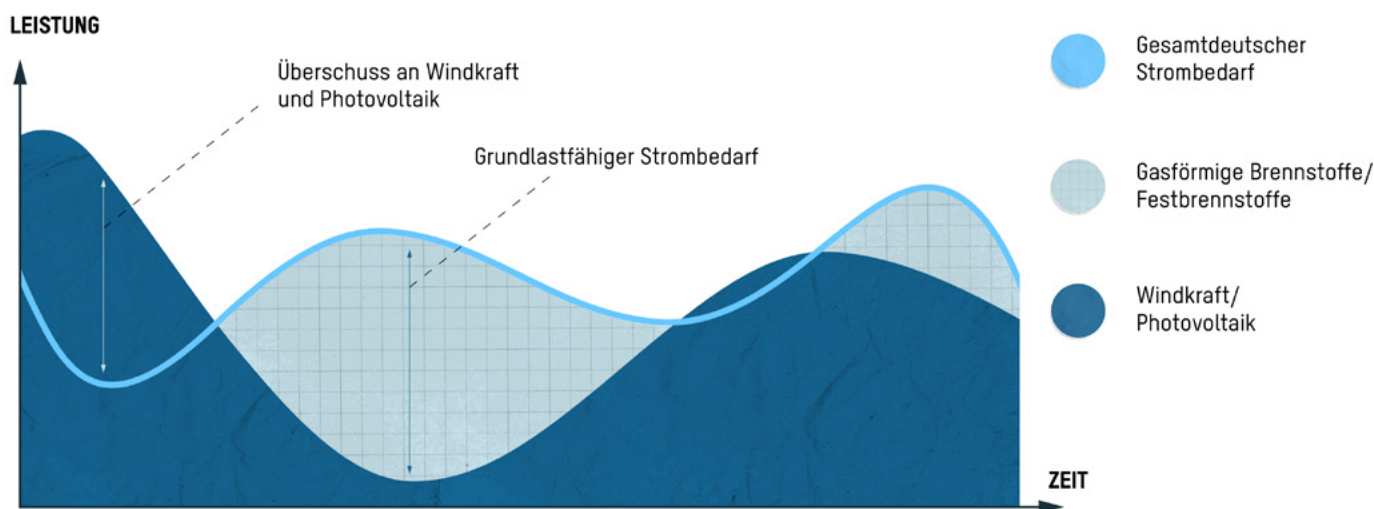


Abbildung 40 - Schema für einen zeitlich variablen und klimaneutralen Stromerzeugungsmix

5.1.1 STROM

Mit der Energiewende hat Deutschland einen großen Fokus auf den Umbau des Stromsystems gelegt. Erneuerbare Energien werden gefördert, um fossile Energieträger zu ersetzen. Der Anteil der Erneuerbaren am deutschen Strommix beträgt dadurch mittlerweile über 40 %, im Jahr 2022 sogar über 46 % [14]. Dieser Wandel geht jedoch auch mit einem veränderten Stromerzeugungsprofil einher. Tagesaktuelle Daten hierzu sind auf der von der Bundesnetzagentur betriebenen Seite Smard.de abrufbar [15]. Während fossile Stromerzeugungsanlagen grundlastfähigen Strom liefern, der jederzeit an den Bedarf angepasst werden kann, ergibt sich für die Erneuerbaren ein differenzierteres Bild. Kraftwerke auf Basis nachhaltiger Festbrennstoffe liefern den Strom ebenfalls grundlastfähig. Das Stromangebot von Windkraft und Photovoltaik ist hingegen abhängig von der Wetterlage. Dadurch gewinnt die zeitliche Komponente im Stromsystem mehr und mehr an Bedeutung, wodurch auch die Preise volatiler werden. In Zeiten von hohem Windaufkommen und starker Sonneneinstrahlung stellt sich schon heute ein Überangebot an volatilern erneuerbarem Strom ein, das teilweise sogar abgeregelt werden muss, da sich keine Abnehmer finden bzw. das Stromnetz den Strom noch nicht aufnehmen kann. In Zeiten von niedrigem Windaufkommen und geringer Sonneneinstrahlung (im Extremfall auch als „Dunkelflaute“ bezeichnet) müssen

hingegen regelbare Spitzenlastkraftwerke die Stromversorgung übernehmen. Auch in einem zukünftigen klimaneutralen Stromsystem wird dieses Zusammenspiel preisbestimmend sein.

Durch die enge Verflechtung mit der Stromwirtschaft sind Papierfabriken letztlich Teil des deutschen Stromversorgungssystems. Der Anstieg der Volatilität betrifft daher auch die Papierindustrie und bringt neue Herausforderungen und Chancen mit sich. Strom wird zum einen benötigt, um den mechanischen Energiebedarf zu decken (Pumpen, Papierwalzen, Faserstofferzeugung/-mahlung etc.). Der hierfür benötigte Strombedarf entspricht dem Grundlastbedarf, der rund um die Uhr bereitgestellt werden muss. Darüber hinaus kann Strom auch genutzt werden, um Wärme bzw. Dampf zu erzeugen und so Brennstoff einzusparen. Dies ist aber nur dann effizient, wenn der Strom nicht zuvor selbst auf Basis von Brennstoffen erzeugt werden musste, sondern Strom aus volatilen Erneuerbaren genutzt wird, die ansonsten abgeregelt worden wären.

Somit muss das Stromsystem als Ganzes betrachtet werden. Eine Elektrifizierung der Wärme ist nur unter bestimmten Voraussetzungen bzw. in bestimmten Zeiten sinnvoll. Diese hängen wiederum maßgeblich vom Überangebot an volatilen Erneuerbaren ab, welches mit dem politisch forcierten Ausbau noch weiter zunehmen wird. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass in einer Dunkelflaute genügend

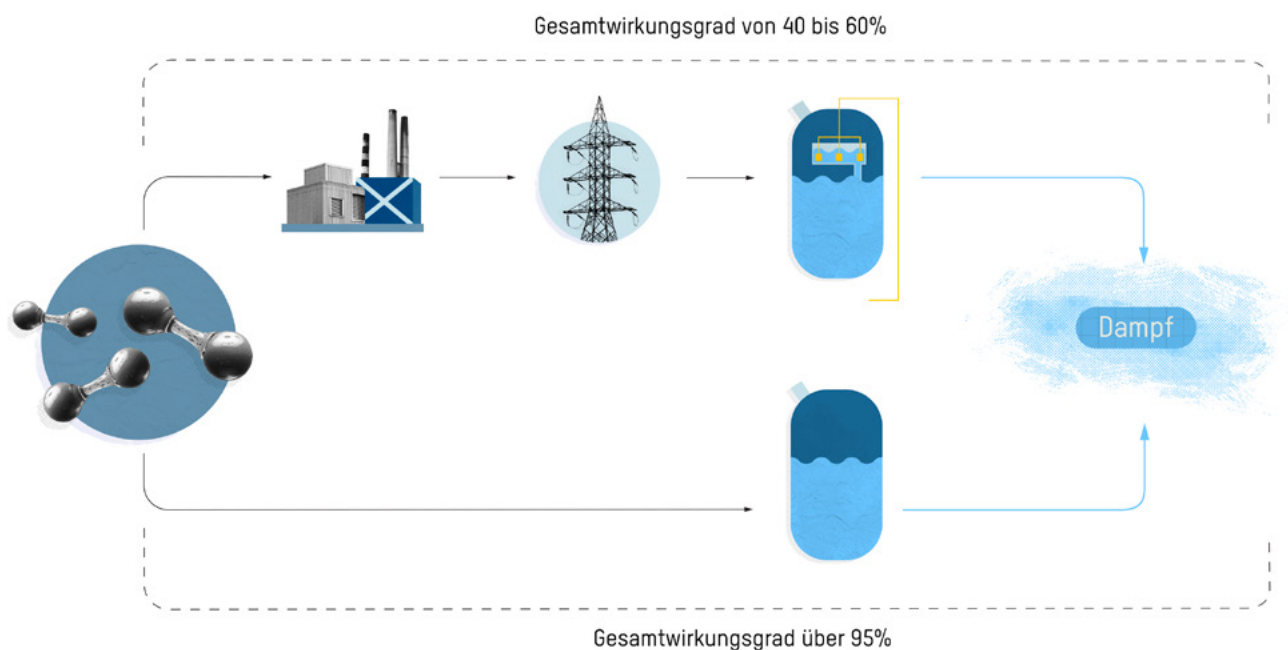


Abbildung 41 - Gesamtwirkungsgrade E-Kessel und Brennstoffkessel

alternative Stromerzeugungskapazitäten vorhanden sind. Unabhängig von der tatsächlichen Geschwindigkeit des Zubaus an volatilen Erneuerbaren inklusive der notwendigen Netzinfrastruktur werden Spitzenlastkraftwerke daher auch in Zukunft benötigt, vor allem im Winter. Auch hier kann die Papierindustrie eine tragende Rolle einnehmen. Schon heute versorgen sich die meisten Papierfabriken über Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). Durch eine Neudimensionierung, angepasst an die Bedürfnisse der Energiewende, können diese Anlagen auch in Zukunft den benötigten Spitzenlaststrom zur Verfügung stellen und gleichzeitig die Papierfabrik mit Dampf versorgen. Dies verschafft den Anlagen einen großen Effizienzvorteil gegenüber Spitzenlastkraftwerken, die ihre Wärme nicht nutzen.

Ein großer Kostenfaktor ist die Bereitstellung der notwendigen Netzinfrastruktur. Da die Ausspeisung von Spitzenlast und der Bezug von Überschussstrom jedoch immer zeitversetzt laufen, bietet sich eine Doppelnutzung der Infrastruktur an. In der Dunkelflaute kann das KWK-Kraftwerk die Papierfabrik mit Strom und Wärme versorgen und gleichzeitig Überschussstrom in das Netz

ausspeisen. In Zeiten eines Stromüberangebots kann wiederum der Strombedarf durch Windkraft und Photovoltaik aus dem Netz gedeckt und der Wärmebedarf zumindest teilweise durch E-Kessel bereitgestellt werden.

Durch eine flexible Energieversorgung können Papierfabriken somit einen Beitrag zur Stabilisierung der deutschen Stromversorgung leisten und gleichzeitig ihre Energiekosten optimieren. Mit den Möglichkeiten, die eine flexible Energieversorgung mit sich bringt, steigt jedoch auch die Komplexität. Vermehrt wird die Energieversorgung daher wirtschaftlich ausgegliedert; entweder in Partnerschaften mit Energieversorgern oder in eigene Energiegesellschaften. Letztlich sind Flexibilitätsmaßnahmen immer ökonomisch zu bewerten. Sie sind mit Investition verbunden und flexible Fahrweisen erhöhen in der Regel den Energieverbrauch. Für die Gesamteffizienz ist die Hebung von Flexibilitätspotentialen aber ein wichtiger Baustein, um die begrenzten erneuerbaren Energieressourcen für die klimaneutrale Papierproduktion möglichst effizient zu nutzen.

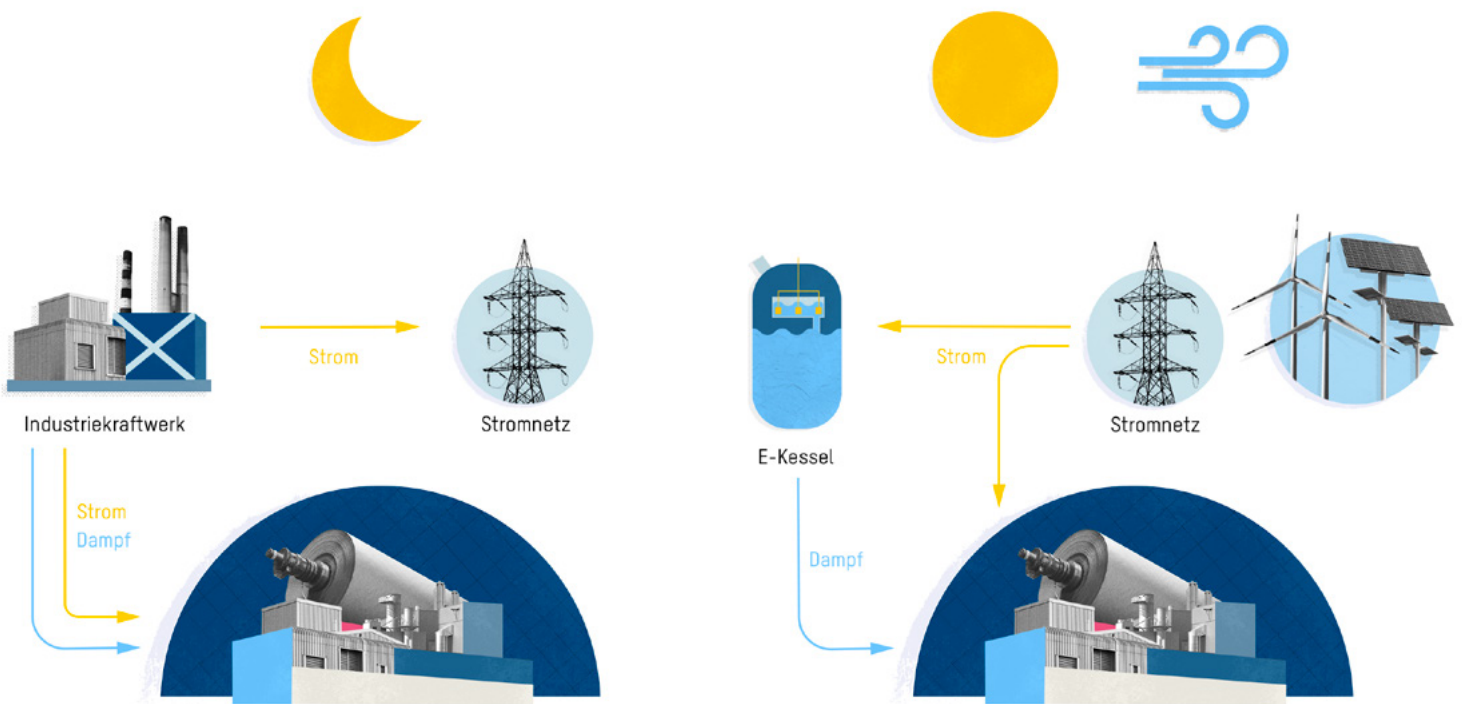


Abbildung 42 - Energieversorgung in Abhängigkeit von Windkraft und Photovoltaik

5.1.2 WÄRME

Der größte Anteil des Energiebedarfs einer Papierfabrik entfällt auf die Wärmebereitstellung, die vor allem zur Trocknung des Papiers benötigt wird. Der erzeugte Prozessdampf kondensiert in den Trocknungszyklindern der Trockenpartie und gelangt als Kondensat wieder ins Kraftwerk zur Dampferzeugung. Die bei der Trocknung abgegebene Wärme ist in der Abluft der Trockenpartie enthalten und wird zum Aufwärmen der zugeführten Luft genutzt.

Energie, die aus der Wärmerückgewinnung stammt, kann häufig nur in bestimmten Prozessen der Papierfabrik eingesetzt werden. Das Potential ist jedoch schnell erschöpft, sodass auch in Fabriken mit einer effizienten Wärmerückgewinnung noch Wärme auf einem Niveau von etwa 40 bis 50 °C übrig bleibt, die nicht genutzt werden kann. Um die Effizienz weiter zu erhöhen, kann es daher sinnvoll sein, auch weitere mögliche Wärmeverbraucher hinzuzuziehen. Dadurch ergeben sich weitere Potentiale, die durch eine integrierte Wärmeplanung, bei der alle Abwärmequellen und Wärmebedarfe berücksichtigt werden, optimal genutzt werden können. Je nach Konzept kann dies zwar bedeuten, dass sich der Energieinput der Papierfabrik leicht erhöht, da sie einen Teil der Abwärme nicht mehr selbst nutzt. Da die Abwärmenutzung an anderer Stelle dafür umso mehr Energie einspart (bspw. Strom oder Brennstoffe), wird insgesamt weniger Energie verbraucht. Von der Versorgung öffentlicher Schwimmbäder

bis hin zur Beteiligung an einer Fernwärmeversorgung für ganze Wohnviertel existieren bereits viele Beispiele in der Praxis.

Eine große Hürde für die Abwärmenutzung durch Dritte ist der Aufbau der Infrastruktur. Fernwärmenetze sind kapitalintensiv und erfordern meist eine eigene Betreibergesellschaft. Den potenziellen Abnehmern stehen zudem oft fossile Alternativen zur Verfügung, die in der Regel noch günstiger sind. Zudem müssen das Abwärmeaufkommen und der entsprechende Wärmebedarf planbar sein. Papierfabriken sind jedoch bestrebt, ihre Abwärme aus Effizienzgründen zu reduzieren.

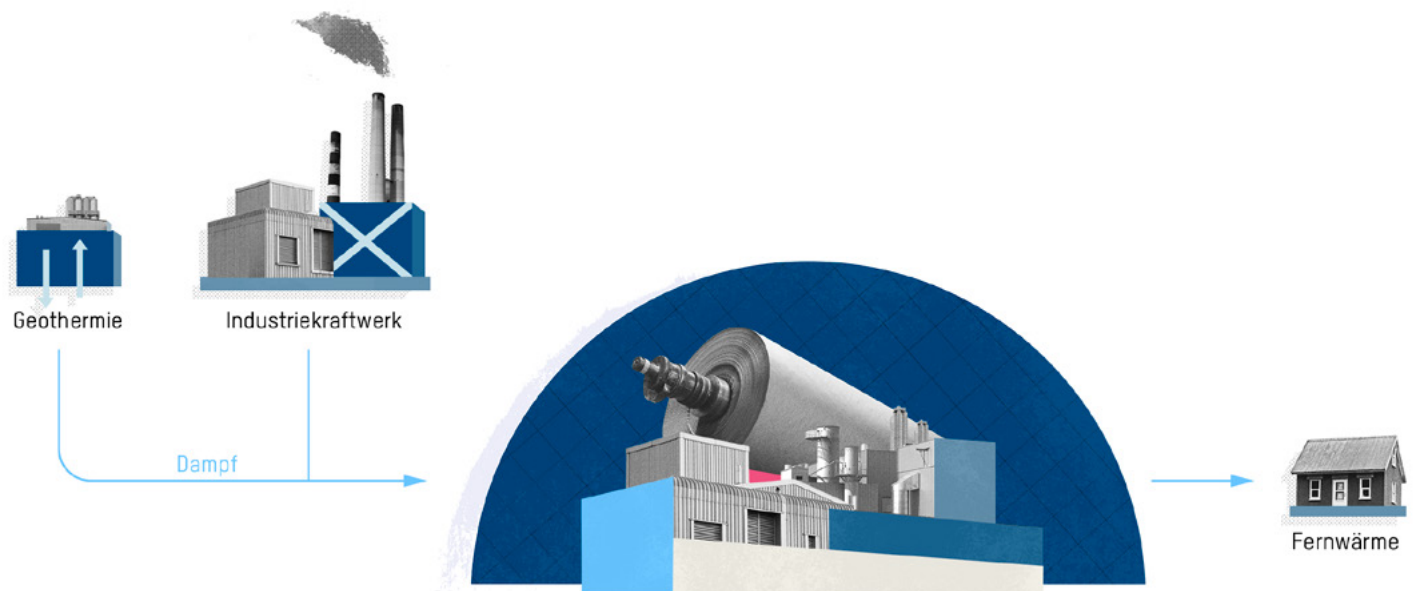


Abbildung 43 - Nutzung der Abwärme einer Papierfabrik

5.2 DIE KLIMANEUTRALE PAPIERPRODUKTION

Auch der klimaneutrale Papierkreislauf beginnt im Wald. Als Rohstoffquelle dienen vor allem Durchforstungsholz und Sägenebenprodukte aus der Forstwirtschaft, die nach dem Kaskadenprinzip für die Holz- und Zellstoffherstellung genutzt werden. Die Zellstoffherstellung kann ihren Energiebedarf dabei über die Reststoffe abdecken, die bei der Produktion anfallen. Die Holzstoffherstellung ist vor allem stromintensiv und erfolgt an der Papierfabrik. Neben den Frischfasern setzt die Branche zudem auch auf ein konsequentes Papierrecycling. Über die Altpapieraufbereitung werden die Sekundärfasern wieder für die Produktion neuer Papiere nutzbar gemacht.

Auf den Papiermaschinen werden schließlich die unterschiedlichsten Papierprodukte produziert und in den Markt gebracht. Dafür werden Dampf, Strom und gasförmige Brennstoffe für befeuerte Trocknungsprozesse benötigt. Der klimaneutrale Dampf kann über Industriekraftwerke bereitgestellt werden, die diesen entweder auf Basis von nachhaltigen Festbrennstoffen (beispielsweise aus Reststoffen der Faserstoffherzeugung), grünen Gasen wie Wasserstoff oder auf Basis von erneuerbarem Überschussstrom erzeugen. Für geeignete Standorte kann die Dampfproduktion zudem wesentlich durch Geothermie ergänzt werden. Der benötigte klimaneutrale

Strom kann abwechselnd aus Windkraft und Photovoltaik bereitgestellt und in Zeiten einer Dunkelflaute durch KWK-Spitzenlastkraftwerke auf Basis von grünen Gasen oder nachhaltigen Festbrennstoffen ergänzt werden. Zudem können die Spitzenlastkraftwerke in diesen Zeiten durch Überschussstrom auch das öffentliche Stromnetz unterstützen. Durch die Umstellung der befeuerten Trocknungsprozesse auf grüne Gase wie Wasserstoff oder Biomethan kann die Papierproduktion letztlich komplett klimaneutral werden. Dabei macht das Klimaschutzpotential nicht am Werkstor halt. Durch eine abgestimmte Wärmeplanung kann mit der Abwärme der Papierfabrik auch ein Beitrag zur Transformation der lokalen Wärmeversorgung geleistet werden, bspw. über Fernwärme.

Auch die Papierfaser wird, nachdem sie den Recyclingkreislauf mehrfach durchlaufen hat und sich durch starke Abnutzung nicht mehr für die Papierproduktion eignet, energetisch genutzt. Die dabei freiwerdenden biogenen CO₂-Emissionen werden bilanziell durch das Waldwachstum wieder aufgenommen und schließen in Form der Holzfaser den Kohlenstoffkreislauf. Dadurch wird auch die Klimaneutralität der Papierindustrie komplettiert. Durch die Abscheidung und dauerhafte Einspeicherung der biogenen CO₂-Emissionen kann sogar eine CO₂-Senke erreicht werden. Perspektivisch kann die Branche dadurch langfristig zur Klimasenke werden.

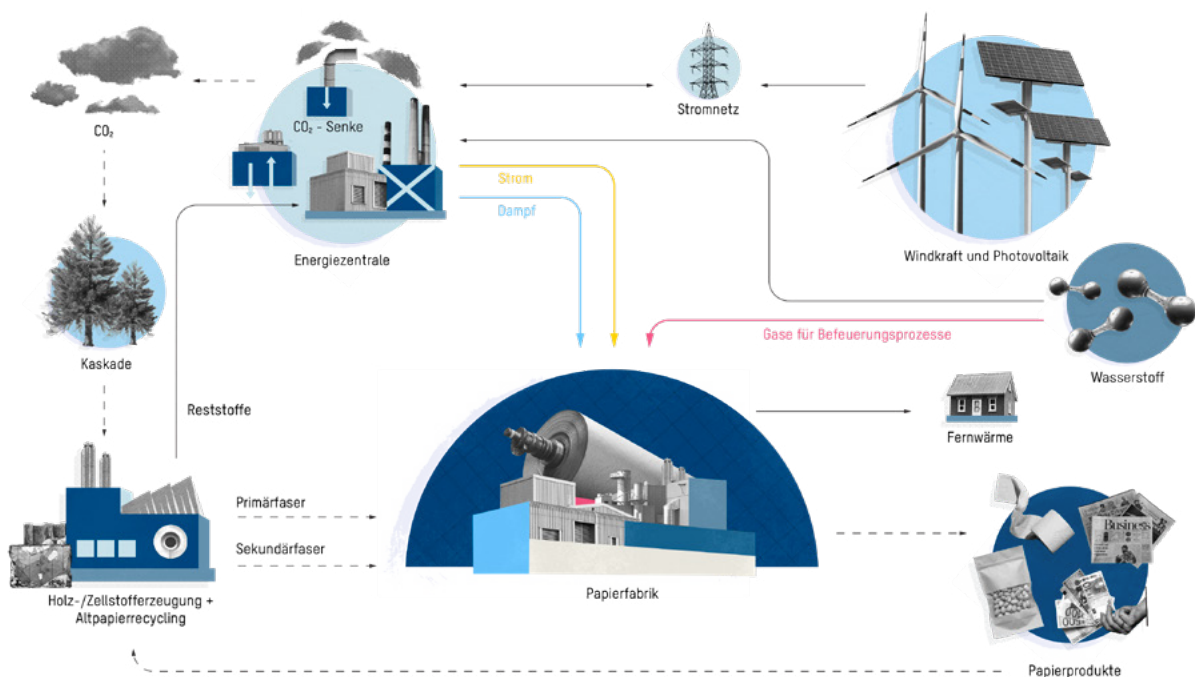


Abbildung 44 - Die klimaneutrale Papierindustrie

5.3 ENERGIEMIXSZENARIEN FÜR EINE KLIMANEUTRALE PAPIERINDUSTRIE

Eine klimaneutrale Papierindustrie ist technisch bereits heute möglich und hängt von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien zu wettbewerbsfähigen Preisen ab. Diese muss somit generell vorausgesetzt werden, um mögliche klimaneutrale Energiemixszenarien zu ermitteln. Aktuell besteht der Energiemix aus etwa 30 TWh fossilen Brennstoffen (überwiegend Erdgas), 6 TWh Fremdwärme, 10 TWh Strom und rund 14 bis 15 TWh an alternativen Brennstoffen (größtenteils nachhaltige Festbrennstoffe). Diese werden genutzt, um etwa 30 TWh Dampf, 16 TWh Strom und 4 TWh für direkte Befeuerungsprozesse bereitzustellen.

Während für eine klimaneutrale Papierindustrie der Energiebedarf für die Befeuerungsprozesse vereinfacht in einen Bedarf an grünen Gasen umgerechnet werden kann, stellt sich die Situation für die Dampf- und Stromversorgung ungleich komplexer da. Er kann zum einen auf Basis von Brennstoffen bereitgestellt (Dampfkessel und/oder KWK-Anlagen) und zum anderen auf Basis von Strom gedeckt werden (Netzbezug, Elektrodenkessel). Als weitere Möglichkeit kommt die Geothermie hinzu, deren zukünftiges Potential aktuell noch schwer zu quantifizieren ist. Da bei der Geothermie der Dampf mit Hilfe von Erdwärme gewonnen wird, die durch elektrische Pumpen gefördert wird, verringert die Technologie den Dampfbedarf und erhöht gleichzeitig den Strombedarf um etwa 10 % in Höhe der Dampfeinsparung. Nimmt man an, dass Geothermie mit einer Dampferzeugung von etwa 3 TWh zur Klimaneutralität der Papierindustrie beiträgt, müssten noch 27 TWh

Dampf und ein Grundlastverbrauch von 16,3 TWh Strom transformiert werden.

Bei der Stromversorgung ergibt sich die größte Herausforderung durch die Volatilität von Windkraft und Photovoltaik, die mit deren Ausbau noch weiter zunimmt. Der tages- bzw. stundenaktuelle Energiemix für Strom variiert mit der Verfügbarkeit dieser volatilen Erzeugung. Gleichzeitig wird auch der Energiemix einer klimaneutralen Papierfabrik vom jeweiligen Strommix beeinflusst. Eine so detaillierte Analyse würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Im Folgenden soll daher vereinfacht ein Stromsystem unterstellt werden, in dem zu einem Drittel ein Stromüberschuss mit niedrigen Strompreisen herrscht und sich somit auch der Betrieb von E-Kesseln zur Dampferzeugung lohnt. Auch im zweiten Drittel soll der Bedarf weitgehend durch Wind und Photovoltaik gedeckt werden können. Dies geschieht jedoch zu Preisen, die den wirtschaftlichen Einsatz von E-Kesseln nicht ermöglichen. Für das letzte Drittel soll unterstellt werden, dass volatile Erneuerbare nur zu einem sehr geringen Teil zur Stromerzeugung beitragen und letztlich Gaskraftwerke auf Basis grüner Gase sowie weitere grundlastfähige Kraftwerke die Spitzenlastversorgung übernehmen müssen. In diesem Fall wäre der Einsatz von E-Kesseln zur Dampferzeugung nicht nur unwirtschaftlich, sondern mit einem schlechteren Gesamtwirkungsgrad als die direkte Dampferzeugung auf Basis von grünen Gasen oder nachhaltigen Festbrennstoffen letztlich auch ineffizient. Unter dieser Annahme kann der Grundlastbedarf an Strom nur zu etwa 2/3 aus Windkraft und Photovoltaik gedeckt werden, was 10,8 TWh entspricht. Auch wenn dieses volatile Stromangebot voraussichtlich nicht zu 100 % den Grundlastbedarf decken kann, kann es in Überschusszeiten durch E-Kessel zusätzlich zur Dampferzeugung genutzt werden. Auch

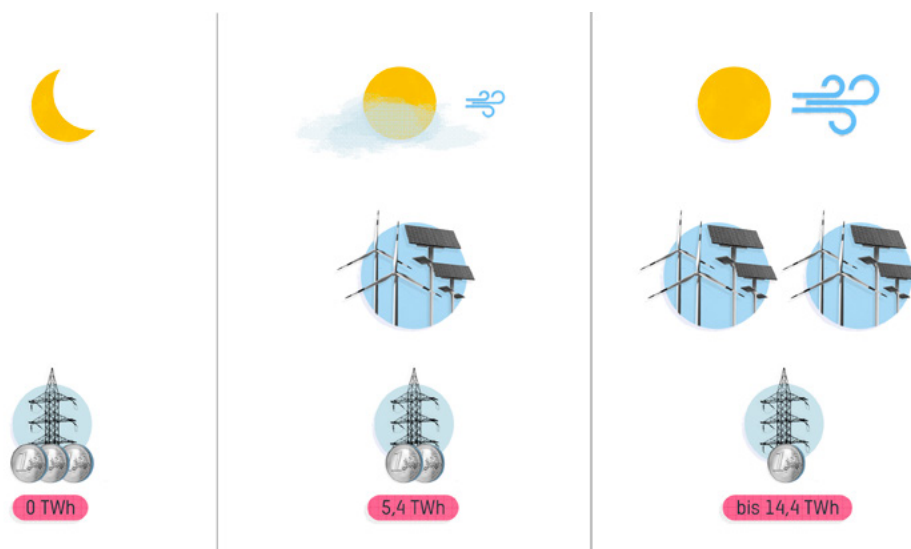


Abbildung 45 – Drei Beispiele für EE-Angebotssituationen

dieses Einsatzszenario wäre aber begrenzt und läge bei maximal 9 TWh. Dafür wäre es jedoch notwendig, die Netzanschlusskapazität nochmal zu verdreifachen. Selbst bei 5 TWh wäre immer noch eine Verdopplung der Netzanschlusskapazität notwendig.

Volatile Erneuerbare würden somit insgesamt zu etwa 15,8 bis maximal 19,8 TWh zum Energiemix einer klimaneutralen Papierindustrie beitragen. Damit bliebe ein Dampfbedarf von 22 bzw. 18 TWh und ein Spitzenlastbedarf an Strom von etwa 5,4 TWh. Dieser Bedarf müsste direkt oder indirekt über Brennstoffe gedeckt werden. Unterstellt man einen Brennstoffnutzungsgrad von 80 % ergibt sich je nach Grad der Elektrifizierung ein verbleibender Brennstoffbedarf von 34,3 TWh bzw. 29,3 TWh. Verteilt man diesen Restbedarf in verschiedenen Brennstoffszszenarien einmal zu gleichen Teilen auf nachhaltige Festbrennstoffe bzw. grüne Gase (Restbedarf $R_{1,1}$) und einmal im Verhältnis 2 zu 1 (Restbedarf $R_{2,1}$), ergeben sich mit den beiden Netzanschlusszenarien (Netzanschluss $N_{200\%}$ und $N_{300\%}$) insgesamt vier potenzielle Energiemixszenarien (S_1 bis S_4). Dabei gilt es zu beachten, dass noch weitere 4 TWh grüne Gase für befeuerte Trocknungsprozesse benötigt werden.

Unter den getroffenen Annahmen würde eine klimaneutrale Papierindustrie jährlich etwa 15 TWh bis 20 TWh Strom aus Wind- bzw. Photovoltaik eingliedern können. Der Rest müsste durch 15 bis 20 TWh

Wasserstoff und bis zu 23 TWh nachhaltige Festbrennstoffe gedeckt werden. Die betrachteten klimaneutralen Energiemixszenarien sind jedoch nur Ausschnitte aus vielen möglichen Szenarien. Durch die Herleitung wird insbesondere nochmal verdeutlicht, welchen entscheidenden Einfluss die unterjährige Verfügbarkeit von Windkraft und Photovoltaik auf den Energiemix hat. Außerdem zeigt sich, dass für belastbare Prognosen ein vollwertiges Strommarktmodell unerlässlich ist. Für ein solches sind wiederum klare Rahmenbedingungen, wie die gesicherte Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie und der entsprechenden Infrastruktur (Strom- und Wasserstoffleitungen), notwendig.

Neben der technischen Machbarkeit ist auch die Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Faktor. Eine erfolgreiche Transformation in Deutschland benötigt einen klimaneutralen Energiemix, der wettbewerbsfähig ist. Energieintensive Industrien wie die Papierindustrie stehen in einem harten internationalen Wettbewerb. Durch zu hohe Energiekosten in Deutschland droht eine Produktionsverlagerung in Länder mit günstigeren Bedingungen, die meist auf fossilen Energien oder Atomkraft basieren. Zur Erreichung der Klimaneutralität benötigt Deutschland somit eine langfristige Strategie, in der alle technischen und ökonomischen Aspekte Berücksichtigung finden und die energieintensiven Branchen eine Perspektive bietet.

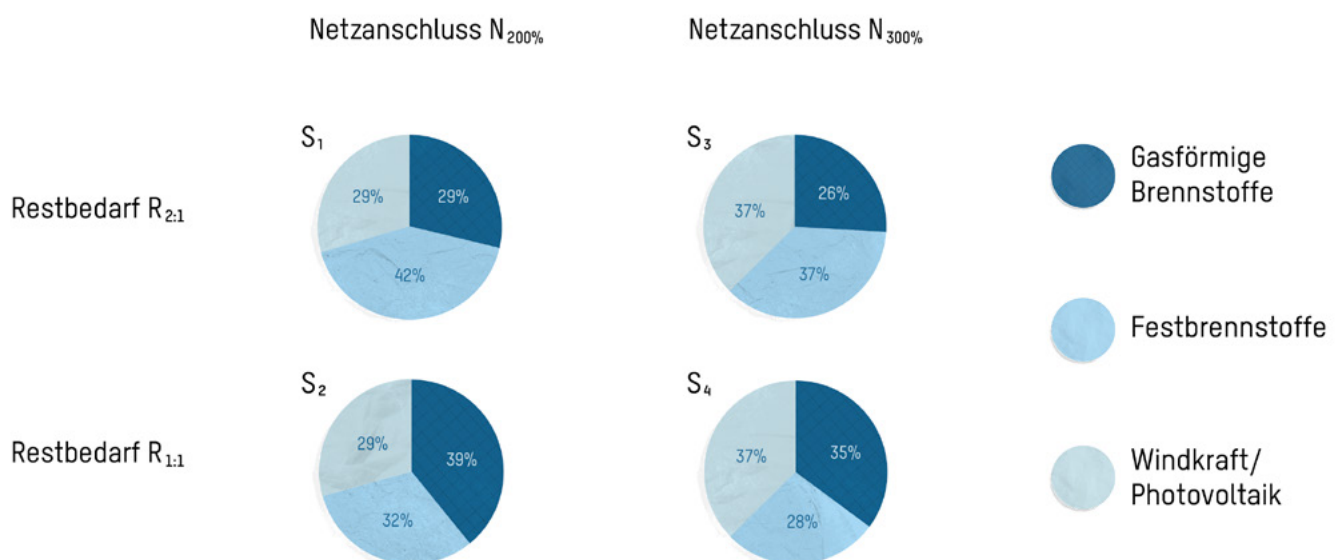


Abbildung 46 - Energiemixszenarien für eine klimaneutrale Papierindustrie

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die gesellschaftliche Transformation zur Klimaneutralität erfasst auch die deutsche Papierindustrie und hat großen Einfluss auf ihre Produktion. Die „Klimastudie Papierindustrie“ schafft einen Überblick über die Herausforderungen und Entwicklungen, die damit verbunden sind. Sie beschreibt die Transformati-
ontechnologien der Branche und zeigt auf, wie eine klimaneutrale Papierproduktion aussehen kann.

Produktseitig profitiert die Branche vom allgemeinen Nachhaltigkeitstrend. Als fossilfreier Werkstoff, der mit einer Quote von 79 % recycelt wird, ist Papier stark nachgefragt. Durch seinen pflanzlichen Rohstoff trägt Papier zudem zur Dämpfung des Treibhauseffekts bei, da es als Teil der Forstwirtschaft CO₂ aus der Atmosphäre in seinem Rohstoff bindet und eine nachhaltige Waldbewirtschaftung fördert. Als Verpackungspapier, bedrucktes Informationsmedium oder als Hygienepapier wird es vielseitig im Alltag genutzt und kommt zudem in vielen Spezialbereichen zur Anwendung. Die Branche erlebt einen Strukturwandel, der zu Verschiebungen zwischen den produzierten Papiersorten führt, wobei Nachfrage und Produktionskapazitäten insgesamt zugenommen haben. Da die Branche überdurchschnittlich stark im ländlichen Raum vertreten ist, trägt sie insbesondere dort zur wirtschaftlichen Stabilisierung und zur Wertschöpfung bei.

Als energieintensive Grundstoffindustrie ist die Transformation zugleich aber auch mit enormen Herausforderungen verbunden. Der jährliche Energieverbrauch der deutschen Papierproduktion liegt bei ca. 60 TWh und geht mit rund 12 Millionen Tonnen an fossilen CO₂-Emissionen einher. Diese Energie wird benötigt, um Dampf, Strom und gasförmige Brennstoffe für den Produktionsprozess bereitzustellen, und zwar rund um die Uhr. Für die Transformation zu einer klimaneutralen Papierindustrie bedarf es jedoch fossilfreier Lösungen. Im Rahmen der Klimastudie wurden dafür verschiedene Dampferzeugungstechnologien, Kraft-Wärme-Kopplungskonzepte und Lösungen für papierspezifische befeuerte Trocknungsprozesse aufgezeigt. Fossile Brennstoffe müssen dafür durch einen Mix aus Windkraft bzw. Photovoltaik, grünen Gasen wie bspw. Wasserstoff und nachhaltigen Festbrennstoffen ersetzt werden. Da das Angebot an Windkraft und Photovoltaik sehr volatil ist, sind die klimaneutralen Brennstoffe auch als Ausgleich notwendig. Zudem sind grüne Gase für bestimmte befeuerte Trocknungsprozesse die effizienteste Transformationsoption. Diese

Umstellung der Energieversorgung ist der technologische Kern einer klimaneutralen Papierindustrie.

Für die Transformation gilt es, auch weitere Optionen zu untersuchen und zu nutzen. Dazu zählt beispielsweise die Möglichkeiten, biogenes CO₂ abzuscheiden und zu speichern. Auch die Senkung des spezifischen Energieverbrauchs ist ein wichtiger Faktor. Die Effizienzpotentiale in der konventionellen Produktion sind jedoch weitestgehend ausgeschöpft, sodass vor allem eine Abwärmenutzung durch Dritte, bspw. über ein Fernwärmenetz, in Frage kommt. Mit dem Ziel, den Energiebedarf für die Trocknung zu reduzieren, forscht die Branche zudem auch an innovativen Ansätzen in der Papierfertigung.

Damit die in der Studie skizzierten Transformationsstrategien umgesetzt werden können, sind die richtigen Rahmenbedingungen erforderlich. Dazu zählt zum einen die notwendige Infrastruktur. Um Zugang zum benötigten erneuerbaren Strom und Wasserstoff zu bekommen, sind die Papierfabriken auf die entsprechenden Leitungen mit ausreichender Kapazität angewiesen. Während für die Stromnetzanschlüsse eine Verdopplung bis Verdreifachung der Kapazität notwendig werden kann, gilt es beim Wasserstoff eine neue Infrastruktur aufzubauen, die für die Papierindustrie vergleichbare energetische Kapazitäten wie das heutige Erdgasnetz bereitstellt. Neben der Infrastruktur muss auch die Verfügbarkeit der klimaneutralen Energieträger gewährleistet werden. Dafür braucht es einen ambitionierten Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie die Schaffung von ausreichend Importkapazitäten für Wasserstoff. Zudem müssen die begrenzt verfügbaren Biomasseressourcen priorisiert der Industrie zur Verfügung gestellt werden. Der Einstieg in eine klimaneutrale Energieversorgung ist dabei die Voraussetzung für den Ausstieg aus fossilen Energieträgern. Andernfalls droht eine Energieversorgungslücke und damit einhergehend eine Produktionsverlagerung. Als Drittes ist auch die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Für die Transformation ist eine Strategie notwendig, die dauerhaft wettbewerbsfähige Energiekosten sichert, auch während der Umstellung der Energieversorgung auf klimaneutrale Energiequellen. Die Sicherstellung wettbewerbsfähiger Energiekosten ist die wichtigste Voraussetzung für die Transformation zu einer klimaneutralen Papierindustrie.

7 QUELLENVERWEISE

1. DIE PAPIERINDUSTRIE-Leistungsbericht PAPIER 2023; DIE PAPIERINDUSTRIE e.V in 2023; (<https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>)
2. Bedeutung der Deutschen Papierindustrie – Studie für DIE PAPIERINDUSTRIE e.V.; IW Consult GmbH in 2022; https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/12_Sonstige/220519_IW-Studie-Bedeutung_der_deutschen_Papierindustrie.pdf
3. Blechschmidt, Jürgen; Taschenbuch der Papiertechnik; 2. Auflage; 2013 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; ISBN: 978-3-446-43802-6
4. PTS Paper4Power-Initiative; Papiertechnische Stiftung; <https://www.ptspaper.de/>
5. Informationsblatt CO₂-Faktoren; Hrsg. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Leitungsstab Presse- und Öffentlichkeitsarbeit in 2023; https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_CO2_faktoren_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=3
6. Destatis Verkehr aktuell; Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 1.1, 04/2023; https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?__blob=publicationFile
7. Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik; Hrsg. DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. in 2011; <http://www.CO2-sachverstaendiger.de/pdf/DSLV-Leitfaden%20Berechnung%20von%20THG-Emissionen%20in%20Spedition%20und%20Logistik.pdf>
8. LULUCF sector emissions and removals in the EU, by main land use category; European Environment Agency, abgerufen am 18.07.2023; <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-land>
9. Änderungsvorschlag der EU-Kommission für die LULUCF-Verordnung im Rahmen des Green Deal; VERORDNUNG (EU) 2018/841 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14.07.2021; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0554&qid=1626940138360>
10. Climate effects of the forest-based sector in the European Union; CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES (CEPI) in 2020; <https://www.cepi.org/cepi-study-climate-effects-of-the-forest-based-sector-in-the-european-union/>
11. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG); letzte Änderung vom 18.08.2021; <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>
12. HYFLEXPAPER; <https://www.hyflexpower.eu/>
13. Prognos AG (2021). Technische CO₂ -Senken – Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂ -Negativemissionstechnologien. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena); https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf
14. Modellfabrik Papier gGmbH; <https://modellfabrikpapier.de/>
15. Veröffentlichung des Umweltbundesamt, abgerufen am 28.07.2023; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>
16. Bundesnetzagentur | SMARD.de; <https://www.smard.de/home>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 - Anteile der Hauptsorten an der Gesamtproduktion 2022.....	7
Abbildung 2 - Wellpappe	8
Abbildung 3 - Karton	8
Abbildung 4 - Produktion und Kapazität von Verpackungspapieren.....	9
Abbildung 5 - Grafische Papiere	9
Abbildung 6 - Produktion und Kapazität von grafischen Papieren.....	10
Abbildung 8 - Produktion und Kapazität von Hygienepapieren	10
Abbildung 7 - Hygienepapiere	10
Abbildung 9 - Spezialpapiere	11
Abbildung 10 - PTS Paper4Power-Initiative [4].....	11
Abbildung 11 - Produktion und Kapazität von Spezialpapieren.....	12
Abbildung 12 - Arbeitsschritte der Papiererzeugung	13
Abbildung 13 - Rohstoffeinsatz in der deutschen Papiererzeugung 2022	14
Abbildung 14 - Holzstruktur	14
Abbildung 15 - Die Holznutzungskaskade.....	14
Abbildung 16 - Die Zellstoffherstellung.....	15
Abbildung 17 - Fibrillierung der Fasern	15
Abbildung 18 - Holzstoffherstellung (Stone Groundwood – SGW).....	16
Abbildung 19 - Holzstoffherstellung (Thermomechanical Pulp – TMP).....	16
Abbildung 20 - Altpapieraufbereitung	17
Abbildung 21 - Die Papiermaschine	19
Abbildung 22 - Energiebedarf in den einzelnen Abschnitten der Papiermaschine.....	20
Abbildung 23 - Bedarf an Dampf, Strom für mechanische Energie sowie gasförmige Brennstoffe für die befeuerte Trocknung ..	22
Abbildung 24 - Anteile der Verkehrsträger an Beförderungsleistung und Emissionen	23
Abbildung 25 - CO ₂ -Speicherung in Forstprodukten	24
Abbildung 26 - CO ₂ -Bindung durch Papier.....	25
Abbildung 27 - Energiequellen zur Bereitstellung von Dampf, Strom und Brennstoffen für die befeuerte Trocknung	26
Abbildung 28 - Dampferzeugung auf Basis von Festbrennstoffen	29
Abbildung 29 - Elektrodenkessel	30
Abbildung 30 - Kreislauf der Wärmepumpe.....	31
Abbildung 31 - Prinzip der Tiefengeothermie	32
Abbildung 32 - GuD-Prozess.....	33

Abbildung 33 - Festbrennstoff KWK.....	34
Abbildung 34 - Trockenhaube und Yankee-Zylinder	36
Abbildung 35 - Infrarottrocknung.....	36
Abbildung 36 - Schwebetrockner	37
Abbildung 37 - Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS).....	38
Abbildung 38 - Ganzheitlicher Forschungsansatz der Modellfabrik Papier für klimaneutral gefertigtes Papier	39
Abbildung 39 - Logo der Modellfabrik Papier	40
Abbildung 40 - Schema für einen zeitlich variablen und klima-neutralen Stromerzeugungsmix.....	41
Abbildung 41 - Gesamtwirkungsgrade E-Kessel und Brennstoffkessel	42
Abbildung 42 - Energieversorgung in Abhängigkeit von Windkraft und Photovoltaik.....	43
Abbildung 43 - Nutzung der Abwärme einer Papierfabrik.....	44
Abbildung 44 - Die klimaneutrale Papierindustrie	45
Abbildung 45 - Drei Beispiele für EE-Angebotssituationen.....	46
Abbildung 46 - Energiemixszenarien für eine klimaneutrale Papierindustrie	47

9 IMPRESSUM

HERAUSGEBER

DIE PAPIERINDUSTRIE e. V.
Gertraudenstraße 20
10178 Berlin

www.papierindustrie.de
info@papierindustrie.de

PROJEKTLEITUNG/VERANTWORTLICH

Jan C. Schaffrath
Leiter Energie- und Klimapolitik

PROJEKTTEAM

Peter Bekaert
Martin Bunkowski
Prof. Dr. Samuel Schabel
Jan C. Schaffrath
Dr. Martin Zahel
Mitglieder des Studienbegleitkreises

GESTALTUNG

VISIONARY Berlin GmbH