

ENERGIEEFFIZIENZPOTENZIAL IN DER PLANUNG AM BEISPIEL DER PAPIERHERSTELLUNG

Studie im Auftrag des Sächsischen
Staatsministeriums für Umwelt und
Landwirtschaft

ABSCHLUSSBERICHT

Energieeffizienzpotenzial in der Planung am Beispiel der Papierherstellung

Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz

M.Sc. Thomas Büttner, Dipl. Betr.-wirt (FH) Annegret Schimmang-Esche, Dr.-Ing. Andreas Schlegel

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
in Chemnitz, Dresden und Zittau.

Projektnummer: 145521

Inhalt

Abkürzungen	5
Management Summary	6
1 Zielstellung und Konzeption der Studie	10
1.1 Aufgabenstellung	10
1.2 Vorgehen bei der Erstellung der Studie	11
2 Ausgangssituation	12
2.1 Papierherstellung	12
2.1.1 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	13
2.1.2 Aktuelle Gesetzeslage	15
2.2 Merkblatt für die besten verfügbaren Techniken	16
2.3 Papierherstellungsprozess	18
2.4 Energieverteilung in der Papierfabrik	21
3 Methodische Elemente der Studie	26
3.1 Analyse spezieller Studien und F&E Berichte	26
3.2 Mathematisches Modell zur Potenzialanalyse	27
3.3 Industrienumfrage	34
4 Ergebnisse.....	35
4.1 Referenz-Papierfabrik.....	35
4.2 Energieeinsparpotenziale	37
4.2.1 Stoffaufbereitung	39
4.2.2 Papiermaschine	40
4.2.3 Infrastruktur (inkl. übergreifender Maßnahmen).....	42
4.2.4 Alternative Energiequellen	44
4.3 Gesamtergebnis.....	45
5 Fazit.....	48
Quellenverzeichnis	52
Anlage A: Fragebogen	55
Anlage B: Auswertung der Umfrage	61
Anlage C: Relevante Maßnahmen.....	66
C1: Stoffaufbereitung	66
C2: Papiermaschine	68
C3: Infrastruktur und übergreifende Maßnahmen	73

Abkürzungen

Abschn.	Abschnitt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionschutzverordnung
Bsp.	Beispiel
bspw.	beispielsweise
BVT	Beste verfügbare Techniken
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
D	Deutschland
d.h.	das heißt
EHRL	Emmissionshandelsrichtlinie
elektr.	elektrisch
GE	Gesamteinsparpotenzial
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm
inkl.	inklusive
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
lt.	laut
n/a	nicht angegeben
PE	Prozessbezogenees Einsparpotenzial
PM	Papiermaschine
therm.	thermisch
u.ä.	und ähnliches
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VDP	Verband Deutscher Papierfabriken e.V.
vgl.	vergleiche
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Einheiten

€	Euro
a	Jahr
kWh	Kilowattstunden
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
t	Tonne

Nomenklatur

Condebelt	Kondensatzbandtrockner
Deinking	Druckfarbenentfernung
LWC	Light weight coated, holzhaltig gestrichenes Papier
Pulping	Stoffaufschluss
Refiner	Mahlwerk
SC	Super calendered, holzhaltig ungestrichenes Papier
Tissue	Hygienepapier

Management Summary

Im Hinblick auf den angestrebten bundeseinheitlichen Vollzug des §5 Abs.1 Nr.4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BlmschG) erweist es sich als hilfreich, fundierte Schätzungen zu den Energieeffizienzpotenzialen zu erhalten, die typischerweise in der Planungsphase industrieller Anlagen erschließbar sind. Diese Potenziale sind in Relation zu den Möglichkeiten zu sehen, die auch im laufenden Betrieb bspw. via Energiemanagementsystem (EMS) erschlossen werden.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden Unternehmen der Ziffer 6.2 des Anhangs 1 der 4. BlmSchV, d.h. Papierfabriken, als exemplarische energieintensive Branche ausgewählt, nachdem in den vorangegangenen Studien bereits Potenziale der Gießerei- und Brauereiindustrie eruiert wurden. Der monetäre Nutzeffekt, der in dieser Branche durch Energieeffizienzmaßnahmen erzielt werden kann, ist nicht zu vernachlässigen und stellt einen wichtigen Motivator dar.

Um grundlegende Informationen für eine qualifizierte Schätzung der adressierbaren Einsparpotenziale und damit einhergehend eine Entscheidungsbasis zur Verfügung stellen zu können, erfolgte im Rahmen der Studie zunächst eine Auswertung verfügbarer Literatur.

Im Anschluss daran stellte die Umfrage an Unternehmen innerhalb der sächsischen Papierhersteller einen wesentlichen Bestandteil der Untersuchungen dar.

Im Ergebnis entstanden Erkenntnisse und Ansätze, die Entscheidungsträgern aus Industrie, Forschung und Politik aufzeigen, wie der Aspekt der Energieeffizienz bei der Planung industrieller Anlagen berücksichtigt werden kann und in welchem Umfang Einsparpotenziale in den einzelnen Prozessen adressiert werden können.

Die ermittelten Möglichkeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Studie in zwei Kategorien eingeteilt:

- Maßnahmen, welche einer Genehmigung nach BlmschG bedürfen, da sie im Rahmen einer Neuplanung (Errichtung einer neuen Papierfabrik bzw. Erweiterung einer bestehenden) oder einer Änderungsplanung (bestehende Anlagen werden modernisiert oder ersetzt) erfolgen.
- Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, die auch im laufenden Anlagenbetrieb realisierbar sind und keiner Genehmigung bedürfen.

Bei der Begutachtung der Literatur wurde bereits ersichtlich, dass zumeist unterschiedliche Bezugsgrößen und Systemgrenzen für die Energieeinsparungen angeführt sind. Dies erschwerte die Potenzialabschätzung erheblich und führte dazu, dass eine Vergleichbarkeit der Resultate nicht ohne die Vereinheitlichung derer hergestellt werden konnte. Für die Untersuchungen war es jedoch essentiell, eine Bezugsgröße zur Beurteilung des Energieverbrauchs bzw. der -einsparung zur Verfügung stellen zu können. Weitere Schwierigkeiten ergaben sich aus der Tatsache, dass Papierfabriken die Zellstoffaufbereitung unterschiedlich stark integriert haben und entsprechend dem Papierproduktportfolio hohe Unterschiede im Energieeinsatz bestehen.

Als Systemgrenze wurde eine Basis-Referenzpapierfabrik definiert, welche die Prozesse Stoffaufbereitung (inklusive Altpapieraufbereitung) und Papierherstellung (entspricht der Papiermaschine) sowie die Infrastruktur bzw. übergreifenden Bereiche einbezieht. Anhand von Beispielfabriken wurde ein durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch von **2418 kWh / Tonne Papier** berechnet.

Die Festlegung der Rahmenbedingungen der Referenzfabrik geschah in Anlehnung an die in Deutschland zum hohen Anteil produzierten grafischen Papiere und Verpackungspapiere (insges. 87 %) sowie der hohen Altpapiereinsatzquote (64 %).

Nach der Auswertung verschiedener Informationsquellen sowie der durchgeführten Umfrage können folgende Kernaussagen zu den Energieeffizienzpotenzialen festgehalten werden:

- Die Papierfabrikbranche ist eine sehr energiebewusste Branche. Der Großteil der im Katalog enthaltenen **83 Maßnahmen** war den befragten Papierfabriken bekannt.
- Nach Bereinigung der Maßnahmenliste, aufgrund von Überschneidungen, sind **65 Maßnahmen final** einbezogen worden.
- Im Ergebnis der Umfrage konnte festgestellt werden, dass 53 von 65 Maßnahmen bereits umgesetzt sind bzw. sich momentan in der Umsetzung befinden. Aber, durch Gewichtung der Aussagen im Abgleich mit der Referenzpapierfabrik wird geschätzt, dass **alle 65 Maßnahmen potenzialträchtig** sind.
- Das theoretische Gesamteinsparpotenzial **aller** Maßnahmen beträgt **1937 kWh / t** Papier.
- **31 Maßnahmen** sind nur der **Planungsphase** zugeordnet und erfordern hohe Investitionen oder eine Genehmigung. Sie haben einen Anteil von **70 %** am Gesamteinsparpotenzial (1363 kWh/t von 1937 kWh/t).
- **17 Maßnahmen** sind **mit kurzen Anlagenstillegungen im Betrieb** durchführbar und können durchaus auch in der Planungsphase der Anlagen berücksichtigt werden. Sie haben einen Anteil von **11 %** am Gesamteinsparpotenzial (204 kWh/t von 1937 kWh/t).
- Folglich können **48 von 65 Maßnahmen bereits in der Planung** berücksichtigt werden. Zusammen haben Sie einen **Anteil von 81 %** am Gesamteinsparpotenzial (1567 kWh/t von 1937 kWh/t).
- **17 weitere Maßnahmen** sind Verbesserungen, die keine Investitionen und Stilllegungen erfordern. Sie haben einen Anteil von **19 %** am Gesamteinsparpotenzial (370 kWh/t von 1937 kWh/t). Die Maßnahmen zeigen damit eine beachtliche Menge an potenziellen „Quick Wins“ auf.
- Aufgrund der Bandbreite, der in der Realität erzielbaren Einspareffekte werden schätzungsweise nur **50 % der maximal erreichbaren Effekte** in die Betrachtungen einbezogen. Daraus resultierend kann ein Einsparungspotenzial von ca. **969 kWh / t Papier** angenommen werden.
- Veränderungen im Unternehmen, die auf Basis einer genehmigungsbedürftigen Planung durchgeführt werden, erzielen größere Einsparungen als einzelne, im Betrieb umsetzbare Maßnahmen.
- Große **Einsparungen** lassen sich **durch Verfahrensubstitution** erzielen.
- Bei Entscheidungen über die Durchführung von **Neuinvestitionen** spielt die Amortisationszeit eine wichtige Rolle. Als eine, einem starken Kostendruck unterlegene Branche, müssen Papierhersteller eher **sehr langfristig** planen, da Papiermaschinen eine hohe Investition darstellen. In den letzten 7 Jahren auf nahezu gleichbleibendem Niveau investierten nur knapp 20 % der Unternehmen in kostensenkende Prozessinnovationen. Gleichzeitig stagniert die Verbesserung des spezifischen Energieeinsatzes. Mit einem Kostenanteil von ca. 12 % am Umsatz bleiben Energieeffizienzmaßnahmen weiter ein Hebel für den wirtschaftlichen Erfolg.

- Der, für die Verdampfung des Wassers, größte Teil des Energieeinsatzes in der Trockenpartie wird auf lange Sicht nicht von radikalen Prozessinnovationen, wie die wasserlose Papierherstellung abgelöst werden.¹

Die Hypothesen H1, H2 und H3 können bestätigt werden.

(H1) Veränderungen im Unternehmen auf Basis einer genehmigungsbedürftigen Planung erzielen größere Einsparungen als einzelne Maßnahmen, die ausschließlich im Betrieb durchgeführt werden.

Mit einem Anteil von 81 % am Gesamteinsparpotenzial bilden planerische und investive Maßnahmen den Hauptteil.

(H2) Durch die Nutzung von Speichern und Kreislaufsystemen können Energieeffizienzpotentiale erschlossen werden.

Kreislaufsysteme zur Wärmerückgewinnung und die Nutzung von Rejekten als stofflicher Speicher bieten Energieeinsparpotenziale

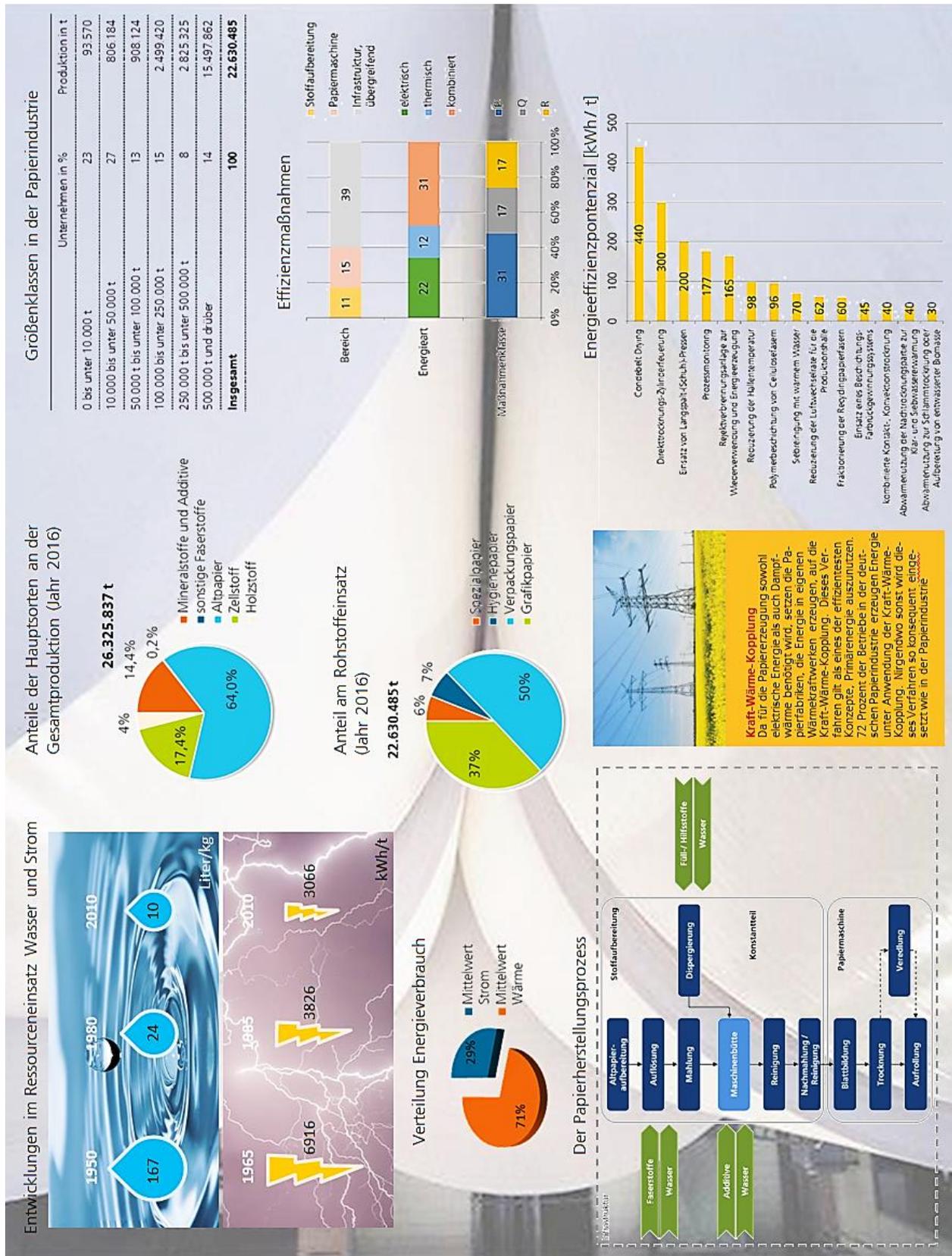
(H3) Anteil des Energieeinsatzes (Strom und Wärme) ist stark abhängig vom produzierten Papier und von der Anlagentechnik.

Der Energieeinsatz hängt maßgeblich vom Produkt ab. Diverse Papierqualitäten erfordern unterschiedlich viel Wasser, welches verdampft werden muss, und verschiedene komplexe Produktionsschritte (vgl. Verpackungspapier vs. Tissue).

Unter Berücksichtigung, der in der Studie vorgestellten Maßnahmen und Ergebnisse können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Durch Innovationen, Verfahrenssubstitution und unkonventionelle Denkweisen können hohe Potenziale innerhalb der Papiermaschine erschlossen werden.
- Die Nutzung alternativer Energiequellen kann ein großer Schritt in Richtung Energieautarkie einer Papierfabrik sein. Hinderlich dabei ist, dass die Genehmigung derartigen Anlagen sehr aufwändig und kompliziert ist. Die fehlende Planbarkeit für die Zukunft, aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen bei der Energiegesetzgebung, bremst die Investitionen in diese Technologien aus.
- Die Ausstattung der Anlagen (bspw. Dampfverbrauchern) mit Energiemesspunkten kann noch weiter ausgebaut werden, um neben der Verbrauchsübersicht und Systemoptimierung auch die durch Störungen oder Leckagen auftretenden Mehrverbräuche frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Durch die Speicherung von Energiedaten sind zudem rückwirkende Analysen möglich.

¹ Dispan u. Vassiliadis, 2014



Quellen: www.vdp-online.de „Papier kompakt“ (Jan. 2018) & Diagramme siehe Bericht
 Bildquellen: Pixabay, lizenzfrei & vdp-online (Kraft-Wärme-Kopplung)

1 Zielstellung und Konzeption der Studie

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen vorangegangener Studien wurden die Potenziale für Eisen-, Stahl- und Temperguss-Gießereien sowie Brauereien (4.BImSchV, Anhang 1, Ziffer 3.7 und 7.27) untersucht. Aus den Ergebnissen heraus entstand der Bedarf nach einer vergleichbaren Studie für eine weitere energieintensive Branche, der Papierherstellung (4.BImSchV, Anhang 1, Ziffer 6.2. Im Sinne der Vergleichbarkeit und Wiedererkennung entspricht das Untersuchungskonzept in seinem Grundaufbau dem, der vorangegangenen Studien.

In der durchgeführten Untersuchung wurden Auswertungen der verfügbaren Literatur sowie eine Umfrage unter den Wissens- und Entscheidungsträgern durchgeführt, um eine qualifizierte Schätzung zu den, in der Planungsphase von Papierherstellungsunternehmen adressierbaren Energieeffizienzpotenzialen vorzunehmen und um diese in Relation zu dem Potenzial, das typischerweise im laufenden Betrieb erschlossen werden kann, zu stellen. Diese Kombination des theoretischen Wissens und der praktischen Erfahrung soll dem Ziel dienen, möglichst anwendungsnahe Ergebnisse zu erhalten.

Die Haupthypothese lautet:

(H1) Veränderungen im Unternehmen auf Basis einer genehmigungsbedürftigen Planung erzielen größere Einsparungen als einzelne Maßnahmen, die ausschließlich im Betrieb durchgeführt werden.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden weitere untergeordnete Hypothesen untersucht:

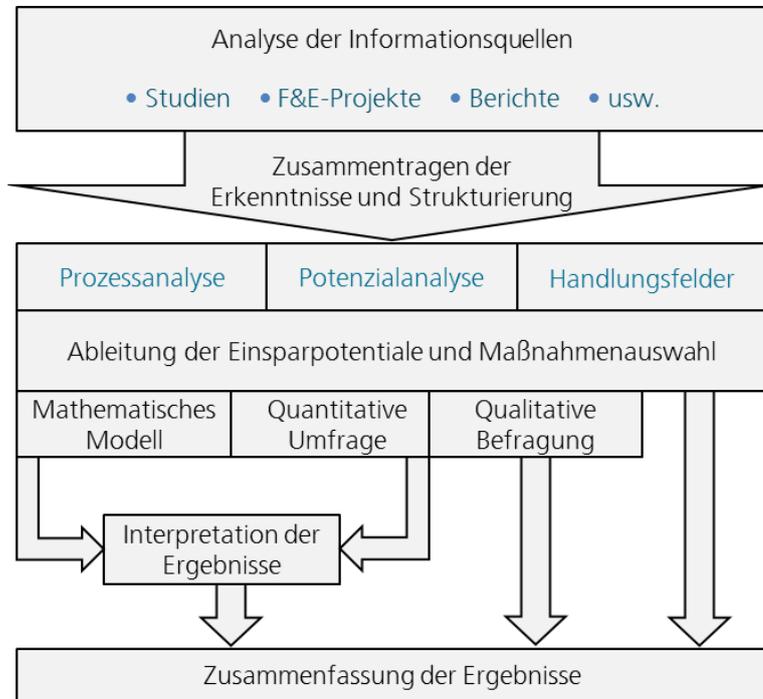
(H2) Durch die Nutzung von Speichern und Kreislaufsystemen können Energieeffizienzpotentiale erschlossen werden.

(H3) Anteil des Energieeinsatzes (Strom und Wärme) ist stark abhängig vom produzierten Papier und von der Anlagentechnik.

Diese Annahmen sollen, im Verlauf der Studie untersucht, zur Bildung einer Gesamtaussage herangezogen werden.

1.2 Vorgehen bei der Erstellung der Studie

Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Erstellung der Studie näher erläutert. Eine schematische Darstellung der Inhaltlichen Schwerpunkte kann aus der folgenden Abbildung entnommen werden.



.....
Zielstellung und Konzeption der Studie
.....

Abb. 01
Schematische Darstellung des Vorgehens bei Erstellung der Studie

Ausgehend von der Analyse der Informationsquellen wurde die Ausgangssituation (Kap. 2) in der Papierherstellung erfasst. Diese beinhaltete neben den wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, einen Überblick über die relevanten Prozesse sowie die Verbräuche und deren Verteilungen in den einzelnen Gewerken. Durch diese Betrachtung wurde ein Verständnis über den Energiehaushalt der Papierhersteller entwickelt und studienrelevante Bereiche hervorgehoben. Empfehlungen aus den BVT-Merkblättern bildeten den Ausgangspunkt für die Maßnahmenrecherche.

Nachfolgend werden die methodischen Kernelemente der Studie (Kap. 3) dargelegt. Diese umfassen die Ausführungen zu den ausgewählten Quellen und deren Verwendung in der Studie, die Formulierung des mathematischen Modells zur Ermittlung des Gesamtpotenzials der Energieeinsparung in der Planungsphase industrieller Anlagen und das Vorgehen bei der Durchführung der Umfrage zur Definition einer Referenzpapierfabrik.

Die Auswertung der Ergebnisse (Kap. 4) beinhaltet die Analyse der eruierten Energieeffizienzmaßnahmen bezüglich ihrer Zugehörigkeit zur Planungsphase sowie der praktischen Umsetzungsreife. Die Resultate fließen in die Schätzung des, in der Planung adressierbaren Energieeffizienzpotenzials industrieller Anlagen im Vergleich zu dem, der Betriebsphase ein.

Im Ergebnis (Kap. 5) entstehen Erkenntnisse und Ansätze für Entscheidungen in Industrie, Forschung und Politik. Diese zeigen auf, in welchem Maße und wie dem Aspekt der Energieeffizienz schon bei der Planung genehmigungspflichtiger industrieller Anlagen in der Papierherstellung entsprochen werden kann und wie hoch die adressierbaren Energieeffizienzpotenziale sind.

2 Ausgangssituation

2.1 Papierherstellung

Die Papierherstellung hat weltweit eine über 2000 Jahre alte Tradition. Im Jahr 1390 begann mit der Inbetriebnahme der ersten Papiermühle in Nürnberg die Produktion auch in Deutschland.² Bis heute hat sich Deutschland diese Tradition bewahrt und nimmt im internationalen Vergleich die vierte Position hinter China, den USA und Japan in der Produktion von Papier und Kartonagen ein. In Europa hält sie die Spitzenposition inne.³

Einer der Gründe dafür ist, dass Deutschland selbst einen riesigen Markt an Papiergütern stellt. Es ist sowohl der weltweit größte Importeur als auch der größte Exporteur⁴ von Papier und Kartonagen. Überwiegend mittelständige Unternehmen und weltweit agierende Konzerne prägen die Industrielandschaft und produzieren mehr als 22,6 Mio. Tonnen Papier im Jahr, wovon mehr als die Hälfte auf dem Binnenmarkt seinen Absatz findet.⁵ Der Anteil an Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke macht dabei einen Anteil von über 50 % aus.

Größenklassen in der Papierindustrie

Tab. 01 Größenklassen in der Papierindustrie in 2016⁶

	Unternehmen in %	Produktion in t
0 bis unter 10.000 t	23	93.570
10.000 bis unter 50.000 t	27	806.184
50.000 t bis unter 100.000 t	13	908.124
100.000 bis unter 250.000 t	15	2.499.420
250.000 t bis unter 500.000 t	8	2.825.325
500.000 t und drüber	14	15.497.862
Insgesamt	100	22.630.485

Die deutschen Papierhersteller sind aber auch weltweit Spitzenreiter, wenn es ums Recycling geht. In kaum einem anderen Land wird so viel Altpapier gesammelt wie in Deutschland.⁷ Die Einsatzquote von Altpapier bei der Papier- und Pappeproduktion ist seit Jahren konstant gestiegen und betrug 2017 75 %.⁸

Auch Sachsen blickt auf eine jahrhundertlange Tradition in der Papierherstellung zurück. Die erste nachweisbar produzierende Papiermühle entstand 1485⁹ an der Weiße-

² VDW, 2018

³ VDP, 2017

⁴ Statista, 2018

⁵ VDP, 2017

⁶ VDP, 2017

⁷ WWF, 2018

⁸ VDP, 2017

⁹ APV, 2016

ritz in Dresden. Die Ausbreitung des gutenbergschen Buchdruckverfahrens und die zunehmende Zivilisierung führten im 16. Jahrhundert zu 39 Neugründungen auf dem heutigen Landesgebiet. Die Zahl der Papier- und Pappemaschinen stieg bis 1909 auf über 600 an, mit einem Anteil von ca. 25 % an der gesamtdeutschen Produktion.¹⁰

Heute werden in 18 sächsischen Werken, lt. VDP Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 960.000 Tonnen Papier, mit einem Umsatz von 680 Mio. Euro, hergestellt. Damit trägt die sächsische Industrie immer noch über 4 % zum Gesamtumsatz der Branche bei.

2.1.1 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Die Papierindustrie ist mit einem Anteil von ca. 9 Prozent des Energieverbrauchs innerhalb des verarbeitenden Gewerbes eine sehr energieintensive Branche und fällt damit unter die Top 3 in Deutschland, neben der Metallerzeugung und Chemieindustrie.¹¹

Mit 57,6 Prozent am Gesamtenergiebedarf bilden erneuerbare Energien, gewonnen aus der thermischen Verwertung von bspw. Holzreststoffen, einen vergleichbar hohen Anteil. Darüber hinaus sind in dieser Branche Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen fast flächendeckend (95 %) in Europa im Einsatz.¹²

Wasser als essentieller Prozessbestandteil wird im aktuellen Stand der Technik durch Kreislaufsysteme mehrfach wiederverwendet. Pro Kilogramm Papier werden ca. 9 Liter Wasser benötigt.¹³ Für den Energieeintrag in das Medium Wasser, vor allem zur Dampferzeugung in der Trockenpartie, wird ein wesentlicher Teil der Wärme benötigt. Die Regelung der Temperaturniveaus, Wärmetausch- oder Leitungssysteme und Isolierungen beeinflussen den Energieeintrag in das Wasser maßgeblich.

Nachhaltiges Wirtschaften und Ressourcenproduktivität sind deshalb seit vielen Jahren die Vorgaben nach denen die deutschen Papierhersteller produzieren. Im Vergleich zu früher wird ein einzelnes Blatt Papier nur noch mit einem Bruchteil an Holz, Wasser und Energie hergestellt.¹⁴ Dennoch steht diese Branche vor einem enormen Wettbewerbs- und Kostendruck eines globalisierten Marktes. Um langfristig bestehen zu können, müssen die Anstrengungen zu optimalen Ausnutzung der knappen Ressourcen weiter verstärkt werden.

¹⁰ Ocken, 2016

¹¹ VDP, 2017

¹² VDP, 2017

¹³ VDP, 2017

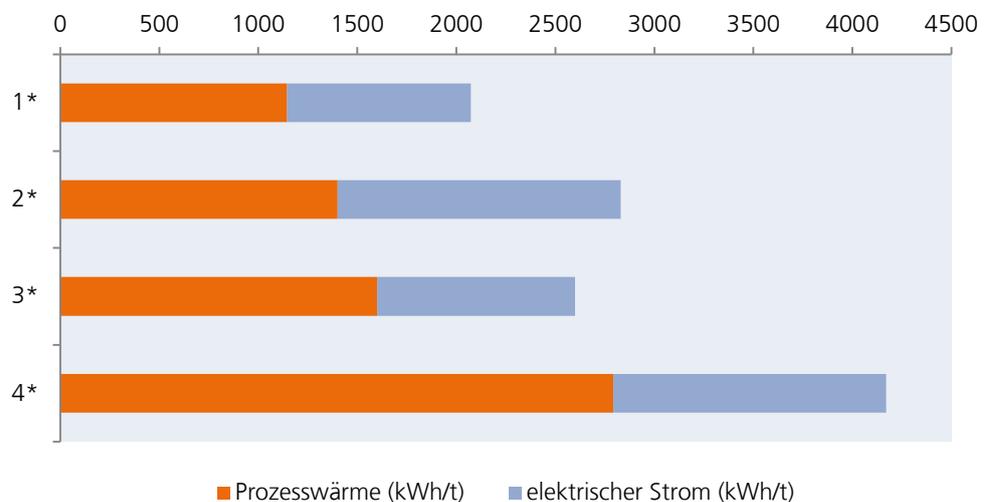
¹⁴ Effizienz-Agentur NRW, 2005

Diese Herausforderung resultiert aus den Faktoren:

- Sparsame Energieverwendung ist ein Wettbewerbsvorteil, denn für ein Kilogramm Primärfaserpapier müssen 3 – 6 kWh und für Recyclingpapier 1 – 3 kWh eingesetzt werden.¹⁵ Über die gesamten Herstellkosten betrachtet, hat der Energieverbrauch einen Anteil von ca. 12 %.¹⁶
- Verringerung des Wasserverbrauchs senkt die Produktionskosten, denn für ein Kilogramm aus Holz hergestelltem Papier werden heute immer noch ca. 250 Liter¹⁷ Wasser benötigt.
- Nachhaltiges Wirtschaften beinhaltet sparsamen Einsatz der Ressource Holz und wirkt sich damit unmittelbar positiv auf den Umweltschutz sowie den Energieeinsatz bei der Produktion von Papier aus.

Die Aufteilung des Energieverbrauchs auf die primären Energieträger Strom und Wärme, Abb.02, zeigt deutlich den Unterschied zwischen den einzelnen Papierarten und deren Zusammensetzung.

Abb. 02 Spezifische Energieverbrauchsdaten deutscher Recycling-Papierfabriken mit Deinking (Referenzjahr: 2006, Referenzjahr für Zeitungspapier: vorrangig 2011)¹⁸



- 1* = Zeitungspapier/superkalandriertes Papier aus 100 % Altpapier
- 2* = Zeitungspapier/superkalandriertes Papier aus 52 % Altpapier, 42 % Holzzellstoff, 6 % eingekaufter chemischer Zellstoff
- 3* = Papiertuch aus 75 % Altpapier, 25 % eingekaufter chemischer Zellstoff
- 4* = Papiertuch aus Holzzellstoff und eingekauftem Zellstoff (unbekannte Verteilung)

Die beispielhafte Darstellung der Energieverbräuche für verschieden zusammengesetzte Papiersorten zeigt, dass der Gesamtenergiebedarf für Papiere, welche aus Altpapier hergestellt werden, wesentlich geringer ist. Zum anderen aber auch, dass der Optimierungsprozess des Energieeinsatzes für die Produktion bspw. durch den Einsatz klimaneutraler erneuerbarer Energieträger weiter vorangetrieben werden muss.

¹⁵ Rummel, 2014

¹⁶ VDP

¹⁷ Blikk

¹⁸ European Commission, 2015

Mit Blick auf den stagnierenden Absatz in der Papierindustrie müssen die Hersteller weiterhin in neue Geschäftsmodelle und eine ressourcenoptimierte Produktion investieren sowie neue Prozesse und Verfahren inszenieren, um im globalisierten Markt auch zukünftig bestehen zu können.

2.1.2 Aktuelle Gesetzeslage

Obwohl Deutschland bereits über einen weit entwickelten Markt für Energieaudits, Energiedienstleistungen und anderen Effizienzmaßnahmen verfügt, müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um diese Ziele der Bundesregierung zu erreichen:¹⁹

- **Klimaschutz:** 40 % weniger Treibhausgasemissionen bis 2020 (im Vergleich zu 1990) und 80 % bis 95 % weniger bis 2050
- **Erneuerbare Energien:** mindestens 35 % Anteil am Endenergieverbrauch bis 2020, bis 2050 mindestens 80 %
- **Gebäude:** Senkung des Wärmebedarfs bis 2020 um 20 %, bis 2050 soll der gesamte Energiebedarf bis zu 80 % fallen
- **Effizienz:** Senkung des Primär- oder Endenergieverbrauchs bis 2020 um 20 % (im Vergleich zu 2008), bis 2050 um 50 %
- **Bruttostromverbrauch:** Senkung bis 2020 um 10 %, bis 2050 um 25 % (Basisjahr 2008)
- **Verkehr:** Gegenüber 2005 soll der Endenergieverbrauch bis 2020 um 10 % zurückgehen, bis 2050 um 40 % (Basisjahr 2005)

Eine wichtige Weiche für das Erreichen der nationalen Ziele wurde mit dem „Integrierten Energie- und Klimaprogramm (IEKP)“, welches die Bundesregierung am 05.12.2007 beschlossen hat, gelegt. Es umfasst 29 Maßnahmen, die vor allem für mehr Energieeffizienz und einem größeren Anteil erneuerbarer Energien, stehen.

Das IEKP²⁰ umfasst unter anderem folgende, die Papierhersteller betreffenden Ziele:

- **Kraft-Wärme-Kopplung:** Verdopplung des Anteils auf 25 % bis 2020.
- **Intelligente Messverfahren für Stromverbrauch:** Zügige Verbreitung von neuen Technologien im liberalisierten Strom-Messwesen zur zeitgenauen Verbrauchsmessung als Voraussetzung für Stromeinsparungen.
- **Einführung moderner Energiemanagementsysteme:** Realisieren der umfangreichen Effizienzverbesserungspotenziale in der Industrie.
- **Einspeiseregulierung für Biogas in Erdgasnetze:** Erhöhung der Biogaseinspeisung bis 2030 auf 10 % des derzeitigen Erdgasverbrauchs. Dezentral erzeugtes Biogas soll verstärkt effizient und zielgerichtet in der Kraft-Wärme-Kopplung und als Kraftstoff eingesetzt werden.
- **Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz:** Anteil der erneuerbaren Energien soll auf 14 % bis 2020 u.a. durch die Nutzung solarer Strahlungsenergie oder die Nutzung von KWK-Anlagen erhöht werden.

¹⁹ Bund, 2018

²⁰ IEKP, 2018

Nicht zuletzt bewirkt die Erneuerung der Emissionshandelsrichtlinie (EHRL) auf europäischer Ebene, dass die Preise für Emissionszertifikate drastisch steigen. Es werden zwar weiterhin kostenlose Zertifikate zur Verfügung gestellt, jedoch wird deren Anteil ab 2026 schrittweise auf null gesenkt. Für die Papierhersteller bedeutet dies eine enorme Umstellung. Nicht nur, dass sich die technischen Benchmarks verschärfen, nach denen die kostenlose Verteilung erfolgt. Auch die Zuteilungen verkürzen sich, wenn die Produktion im Schnitt von zwei Jahren um mehr als 15 % zurückgeht.

Der Wermutstropfen dabei, wenn ein Unternehmen am 01.01.2005 oder danach eine Anlage zur hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW) bzw. der energetischen Verwertung von Restgasen betreibt und damit Strom an dritte verkauft, so gilt diese als Energieerzeuger-Anlage und das Unternehmen kann weiterhin auf kostenlose Zertifikate hoffen.

Positive Änderung der Richtlinie. Es wird einen Modernisierungs- und Innovationsfond geben. Dieser dient der Förderung technologischer Entwicklungen im Bereich erneuerbarer Energien sowie solcher zur Verringerung von CO₂-Ausstößen.²¹

Ein Kontrollorgan, welches das Erreichen der energiepolitischen Zielsetzung sicherstellen soll, ist das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). In §2 Abs. 1 Satz 1 ist geregelt, dass „die Errichtung und der Betrieb von Anlagen“ genehmigungsbedürftig ist. Außerdem ist in §5 Abs. 1 Nr. 4 als eine der Pflichten der Betreiber festgelegt, dass die Anlagen so zu errichten sind, dass „Energie sparsam und effizient verwendet wird“.

2.2 Merkblatt für die besten verfügbaren Techniken

Das Merkblatt für die besten verfügbaren Techniken über die Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung – BVT (engl. BAT: Best Available Techniques) beschreibt im Wesentlichen angewandte Techniken mit den zugehörigen Emissions- und Verbrauchswerten. Im Bereich der Papierherstellung ist anzumerken, dass verschiedene angewandte Messmethoden innerhalb Europas sowie stark heterogene Herstellprozesse und Energieträger eine Vergleichbarkeit von Emissions- und Verbrauchszahlen schwierig machen.²² „Der Abschnitt zu den besten verfügbaren Techniken beinhaltet Emissions- und Verbrauchswertebereiche in Verbindung mit der Umsetzung der BVT. Die Schlussfolgerungen zu den BVT basieren auf tatsächlichen Erfahrungen und auf der Beurteilung durch die Sachverständigen der technischen Arbeitsgruppe (TWG).“²³ Obwohl es diesbezüglich unterschiedliche Auffassungen gibt, soll das Merkblatt generell eine breite Anwendung in den Fabriken finden, um umweltorientierte und wirtschaftliche Maßnahmen herauszustellen.

Im Sinne der Einhaltung der Energieeffizienz ist es wichtig den Input und Output an Hilfs- und Betriebsstoffen sowohl auf der einen Seite als auch die Emissionen, welche während des Prozesses anfallen, siehe 17Abb. 03, auf der anderen Seite zu kennen. Neben Rohstoffen werden vor allem Energie und Wasser eingesetzt.

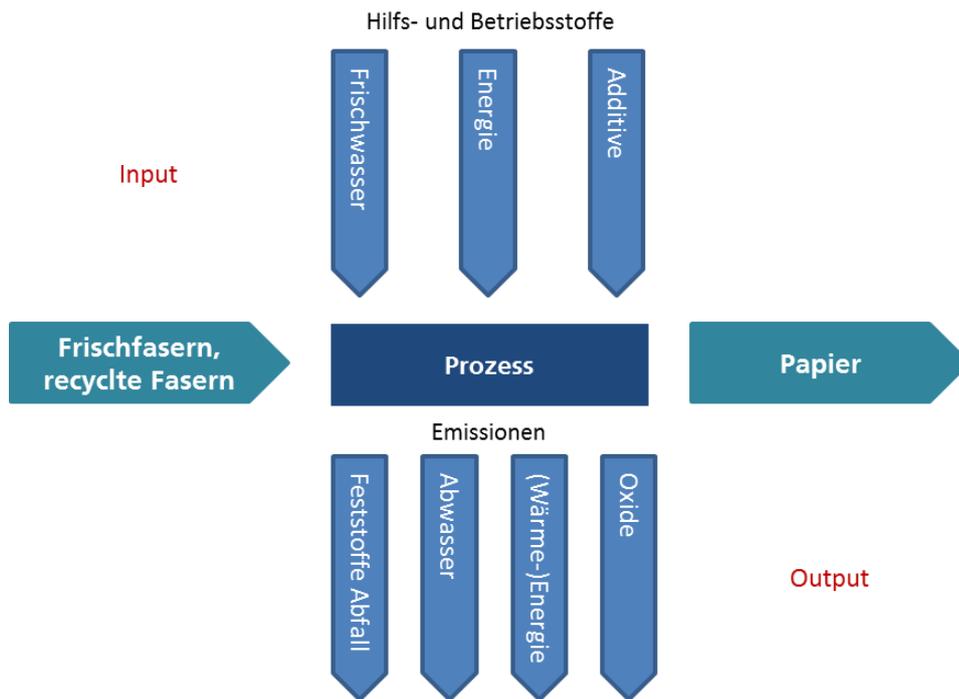
Als Emissionen entstehen hauptsächlich Abwasser, Kohlenstoffdioxid und organische und anorganische Abfälle.²⁴

²¹ Becker Büttner Held, 2018

²² UBA, 2015

²³ UBA, 2013

²⁴ UBA, 2015



.....
Ausgangssituation
.....

Abb. 03
Input/Output einer Papierfabrik

Im Detail gliedert sich der Einsatz an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, welche für eine Tonne Papier benötigt werden wie folgt auf.

Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe pro Tonne Papier (INPUT)

	(Grafik-)Feinpapier (gestrichen & ungestrichen (1 Referenzfabrik)	Papiertuch (bis 53 Referenzfabriken)	Spezialpapier (1 Referenzfabrik)
Rohstoffe			
Gebleichter Zellstoff	576	1010	709
Pigmente kg	385	-	320
Binder kg	74	0 - 130	60
Andere			57
Hilfs- und Betriebsstoffe			
Frischwasser m ³	4,2	5 - 71	13,4
Wärmeenergie MJ	4082	4600 - 21000	7180
Elektrizität kWh	1700	900 - 3100	2682

Tab. 02
Jährlicher, mittlerer Bedarf an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen einer nicht integrierten Papierfabrik in Europa nach verschiedenen Produkten²⁵

²⁵ UBA, 2015

Emissionen pro Tonne Papier (zugehöriger OUTPUT)

Tab. 03
Mittlere Emissionen einer
Papierfabrik nicht integrierten
Papierfabrik in Europa nach
verschiedenen Produkten²⁶

	(Grafik-)Feinpapier (gestrichen & ungestrichen)	Papiertuch	Spezialpapier
Kohlenstoffdioxid kg	229	300 - 1800	661
Abfälle			
Schlamm kg	11,7	10 - 40	-
andere kg	4,5		
Abwasser m ³	3	4 - 70	13
Wasserdampf m ³	1,5	1 - 3	

Die große Spannweite der Messergebnisse deutet auf unterschiedliche Prozesse und sehr heterogene Fabriken und Produkte innerhalb der Branche hin. Daher betrachtet die BVT verschiedene Umweltfragen, „die sich bei der Zellstoff und Papiererzeugung aus unterschiedlichen Faserstoffen in integrierten und nichtintegrierten Zellstoff- und Papierfabriken ergeben. In nichtintegrierten Zellstoffwerken (zur Erzeugung von Marktzellstoff) wird lediglich Zellstoff zum Verkauf auf dem freien Markt hergestellt. In nichtintegrierten Papierfabriken kommt zur Papiererzeugung Halbstoff zum Einsatz, der anderweitig erworben wurde. Demgegenüber werden in integrierten Zellstoff- und Papierwerken Zellstoff- und Papier am gleichen Standort erzeugt.“²⁷ In der vorliegenden Studie wird sich, entsprechend des Untersuchungsfeldes, auf die Kapitel 1 „Allgemeine Informationen zur Branche“, 2 „Allgemein anwendbare Prozesse und Techniken“, 6 „Altpapier-Recycling“, 7 Papierherstellungsprozess sowie 8 „Beste verfügbare Techniken und Schlussfolgerungen“ gestützt. Alle Maßnahmen sind in Anlage B aufgeführt.

2.3 Papierherstellungsprozess

Im Verlauf der Analyse energetischer Potenziale innerhalb der Planungsphase in der Papierherstellung wurde Folgendes untersucht:

- Wie sind die Papierfabriken, entsprechend 4.BImSchV, Anhang 1, Ziffer 6.2, aufgebaut?
- Welche Energieverbräuche gibt es?
- Wie ist der Verbrauch der Energie strukturiert?
- Wie sieht der idealtypische Papierherstellungsprozess aus?

Die Voruntersuchung diente dazu, einen Überblick über den Papierfabrikprozess zu erhalten. Durch die Betrachtung des Gesamtenergieverbrauchs sowie dessen Verteilung auf einzelne Bereiche wurde ein Verständnis über den Energiehaushalt der Papierfabriken entwickelt und studienrelevante Prozesse hervorgehoben. Die Darstellung und Erläuterung des idealtypischen Herstellungsprozesses wurde für die Einordnung und Klassifikation der Verbesserungsmaßnahmen verwendet.

Der Prozess der Papierherstellung gliedert sich seit jeher in folgenden Ablauf: in Wasser aufgelöste pflanzliche Faserstoffe verbinden sich bei der Entwässerung auf einem Sieb zu einem zusammenhängenden Faservlies – dem Papier.²⁸

²⁶ UBA, 2015

²⁷ UBA, 2013

²⁸ Layer, 2018

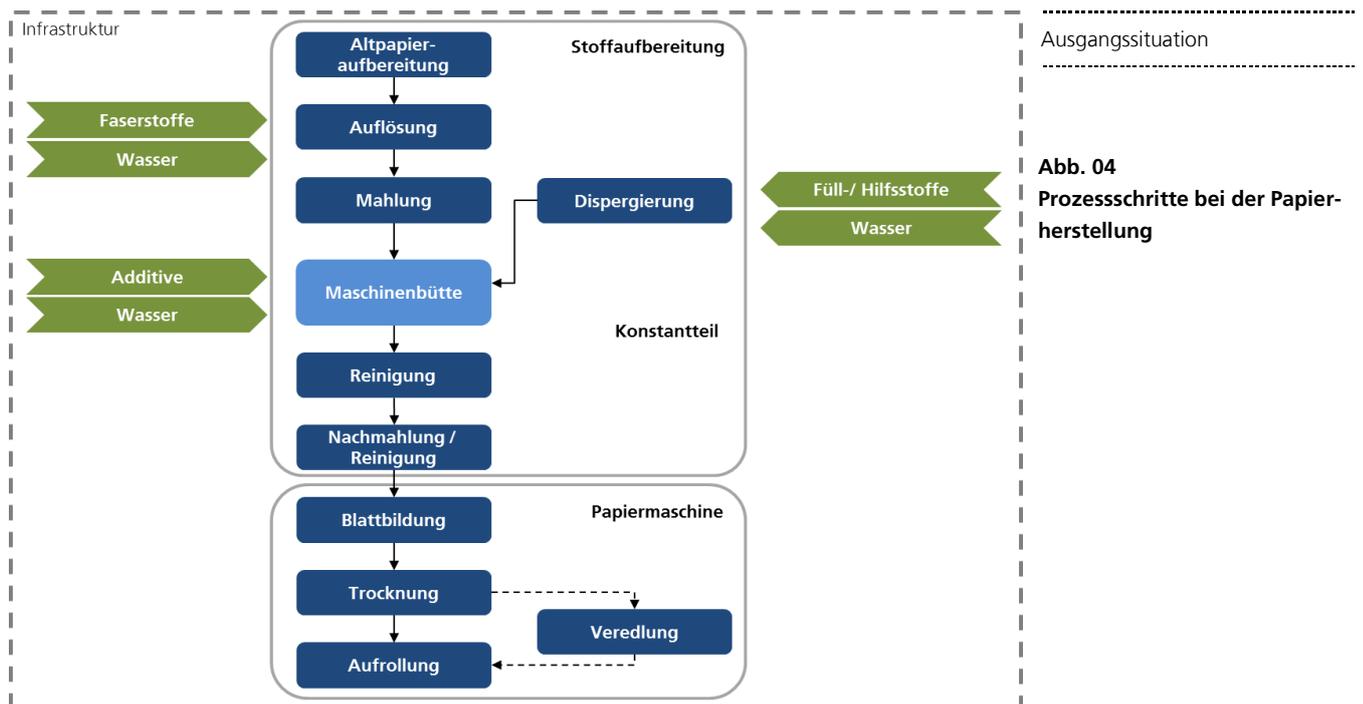


Abb. 04
Prozessschritte bei der Papier-
herstellung

Mit Blick auf den ressourcenschonenden Einsatz pflanzlicher Faserstoffe -speziell der Holzfasern- besteht heute ein Großteil des hergestellten Papiers aus Altpapier. Bevor dieses als Faserstoff dem Herstellungsprozess zugeführt werden kann, muss es aufbereitet werden. In einem vorgelagerten Prozessschritt werden nicht weiter verwendbare Materialien bspw. Heftklammern u. ä. sowie die Druckerfarbe weitestgehend entfernt. Im Anschluss kann das zerfaserte und gebleichte Altpapier dem Herstellungsprozess zugeführt werden.

Dieser wird in zwei grundlegende Produktionsstufen unterschieden: der Stoffaufbereitung inkl. Konstantteil und der Papiermaschine.

Im ersten Schritt, der Stoffaufbereitung, werden die verschiedenen Faserstoffe unter Zugabe von Wasser aufgelöst. Die gewünschte Papiersorte entscheidet hier über die Mischverhältnisse der verschiedenen Rohstoffe. Über den Prozessschritt des Dispergierens werden Füll- und Hilfsstoffe zugeführt, welche der Verbesserung der Papierqualität und der Erhöhung der Produktivität dienen. Um die benötigten Eigenschaften für das zukünftige Papier garantieren zu können, werden in vielen Papierfabriken die Zellstoffe in einem Refiner nochmals gemahlen. Je nach Rohstoff und Papiersorte kann dieser Prozessschritt sehr energieintensiv sein.²⁹

Im nächsten Schritt wird die entstandene Faserstoff-Wasser-Suspension über den Stoffauflauf der Papiermaschine gleichmäßig über die gesamte Siebbreite verteilt. Hier lagern sich die Fasern nebeneinander ab: das Blatt wird gebildet. Von Beginn bis zum Ende der Siebpartie erhöht sich der Feststoffgehalt der Papierbahn von ca. 1 % auf 16% bis 25 %. Anschließend wird der Papierbahn durch den mechanischen Druck der Pressen weiter Wasser entzogen. Der Pressvorgang verdichtet das Papiergefüge und erhöht den Trockengehalt auf bis zu 50 % bzw. 55 %. In diesem Prozessschritt wird die Oberflächengüte maßgeblich beeinflusst.³⁰

²⁹ VDP

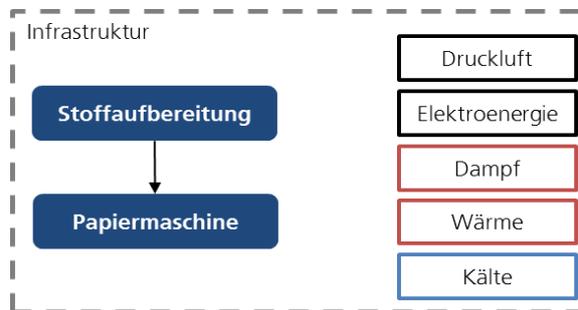
³⁰ Fleiter et al., 2013

Abschließend muss über den energieintensiven Prozess, der thermischen Trocknung, das verbliebene Wasser bis auf die Restfeuchte von 2 % bis 10 % aus der Papierbahn verdampft werden. Im klassischen Trocknungsprozess verläuft die Papierbahn slalomartig über verschiedene Trockenzylinder, welche mit Dampf auf bis zu 100 °C aufgeheizt sind. Dadurch wird eine gleichmäßige Trocknung gewährleistet.³¹ Für eine glatte Oberfläche und eine gleichmäßige Dicke wird das Papier nachfolgend geglättet. Zum Schluss wird die fertige Papierbahn auf einen Stahlkern (Tambour) gewickelt, welcher eine Bahn von etwa 60 Kilometer bzw. ein Gewicht von 25 Tonnen aufnehmen kann. Je nach Papierqualität und deren weitere Verarbeitung wird eine Veredlung des Rohpapiers erforderlich sein.

Aktuell verfügen Papiermaschinen über bis zu 12 m Bahnbreite, sind bis zu 250 m lang und wiegen bis zu 5.000 Tonnen und gehören zu den größten Industriemaschinen.³² Die Geschwindigkeit der Papierbahn beträgt bis zu 2.200 Meter pro Minute (~132 km/h). Daraus entsteht aus einer Fasersuspension mit ca. 1 % Feststoffgehalt (also 99 % Wasser) innerhalb weniger Sekunden eine fertige, aufgewickelte Papierbahn. Die Jahresproduktion beträgt bei großen Papiermaschinen bis zu 600.000 Tonnen, was einer Produktionsmenge von 70 Tonnen pro Stunde. Typischerweise produziert eine Papiermaschine ca. 8.300 Stunden im Jahr und kostet 100 bis 500 Mio. €. ³³ Produktionskapazität und Geschwindigkeit sind somit wichtige Entscheidungsfaktoren für Investitionen in der Papierindustrie.

Aufgrund der sehr geringen Datenverfügbarkeit zum tatsächlichen Energieverbrauch im Papierherstellungsprozess kann nicht auf jeden einzelnen Prozessschritt und dessen Effizienzpotenziale in dieser Studie eingegangen werden. Daher wurden die untersuchungsrelevanten Subsysteme von Papierfabriken mit ihren Elementen und Prozessen vereinfacht und in drei Bereiche gegliedert:

Abb. 05
Vereinfachte Prozessdarstellung



Diesen Bereichen sind folgende Prozesse zugeordnet:

Tab. 04
Aufteilung in die Subsysteme inklusive relevanter Prozesse

Bereiche	Zugeordnete Prozesse
Stoffaufbereitung	Auflösen, Mahlen, Dispergieren, Reinigen, Deinking
Papiermaschine	Blattbildung, Trocknen, Aufrollen, Veredlung
Infrastruktur	Kälte- und Kühltechnik; Warmwasser- und Dampfaufbereitung, Druckluftherzeugung, Energieerzeugung

³¹ Fleiter et al., 2013

³² Stumm, 2007

³³ Blum et al., 2007

2.4 Energieverteilung in der Papierfabrik

Von ehemals noch im Jahr 1955 **spezifischem Energieeinsatz** von 8200 kWh/t produziertem Papier sank dieser bis dato im Durchschnitt auf knapp **2800 kWh / t**.³⁴ Diese Zahlen schließen die Verbräuche der Zellstoff- sowie Papierherstellung zusammen ein.

Eine Verteilung dahingehend ist wichtig für die Systemabgrenzung, wenngleich sich diese nicht so einfach verallgemeinern lässt, da **Papierfabriken** den Zellstoffherstellungsprozess jeweils **unterschiedlich stark integriert** haben. Zudem wird die Verteilung maßgeblich von den **unterschiedlichen Herstellungsprozessen, Zell-Rohstoffen, Papiereigenschaften** und damit spezifischen Energieverbräuchen **beeinflusst**. Zur Verdeutlichung seien hier spezifische Energieverbräuche nach Papiersorten exemplarisch gezeigt:

Zellstoff-/Papiersorte	Energieverbrauch		Basis (Anzahl der Betriebe)
	Einheiten (kWh/t)	Wertebereich	
Kraftzellstoff (nicht integrierte Fabrik)	Strom	700 – 800	5 Betriebe
	Wärme	3800 – 5100	
Ungestrichenes, holzhaltiges Paper (integrierte Fabrik)	Strom	1200 – 1400	3 Betriebe
	Wärme	1000 – 1600	
Gestrichenes, holzhaltiges Papier (integrierte Fabrik)	Strom	1200 – 2100	13 Betriebe
	Wärme	1300 – 1800	
Gestrichenes, holzfreies Papier (nicht integrierte Fabrik)	Strom	600 – 1000	7 Betriebe
	Wärme	1200 – 2100	
Grafikpapier aus Altpapier mit Deinking	Strom	900 – 1400	12 Betriebe
	Wärme	1000 – 1600	
Verpackungspapier aus Altpapier mit Deinking	Strom	400 – 700	10 Betriebe
	Wärme	1000 – 2700	
Tissue / Papiertuch aus Altpapier	Strom	800 – 2000	4 Betriebe
	Wärme	1900 – 2800	
Holzfreies Spezialpapier	Strom	600 – 3000	6 Betriebe
	Wärme	1600 – 4500	

Tab. 05
Spezifischer Energieverbrauch
einiger Beispiel-Zellstoff- und
Papierfabriken³⁵ (Jahre 2005-
2007)

Die zusammengefassten spezifischen Energieverbräuche je Papiersorte geben allerdings keinen Aufschluss über die prozessorientierte Energieverteilung in der Fabrik oder der eingesetzten Technologien. Für den Betrachtungsraum dieser Studie, die „Papierherstellung“, und zur weiteren Beurteilung der Energieverteilung in einer Referenzfabrik sind zusätzliche Informationen bzw. Beispielwerte nötig.

³⁴ VDP, 2017

³⁵ European Commission, 2015

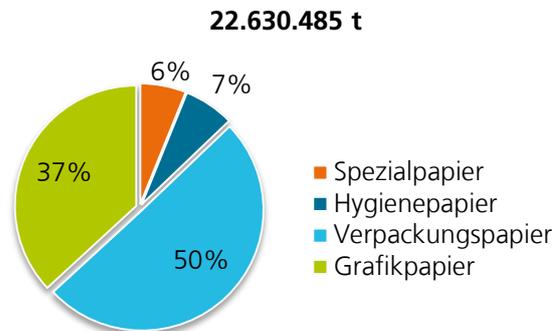
Nachfolgende Tabelle zeigt exemplarische Stromverbrauchsbereiche von isolierten Papiermaschinen auf:

Tab. 06
Typischer Stromverbrauch
(elektr. Strom) moderner Pa-
pierfabriken (nicht integriert)
(Jahr 2010)

Papiersorte	Strom (kWh / t)
Gestrichene Holzhaltige Papiere, LWC Papier (light weight coated)	500 – 800
Ungestrichene Holzhaltige SC Papiere (satiniert)	450 – 700
Gestrichenes Feinpapier	600 – 750
Sackpapier (Spezialpapier)	700 – 850

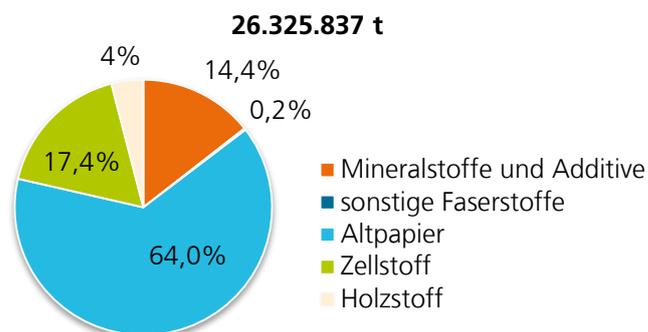
Innerhalb dieser Studie soll sich nachfolgend auf die in Deutschland anteilig am meisten produzierten Papiersorten – **Verpackungs- und Grafikpapiere** – fokussiert werden. Damit wird der sehr große Wertebereich der spezifischen Energieverbräuche eingegrenzt und trotzdem eine hohe Abdeckung bzw. Skalierungsmöglichkeit erreicht. **50 % (7 von 14 Betrieben) der sächsischen Papierfabriken** haben sich auf dieses Portfolio spezialisiert.

Abb. 06
Anteil am Rohstoffeinsatz
(Jahr 2016)³⁶



Da die Papierindustrie in Deutschland sehr kreislauforientiert ist – erkennbar am eingesetzten Altpapieranteil – erscheint eine Berücksichtigung der Altpapieraufbereitung im Papierherstellungsprozess sinnvoll, wenngleich nicht jede Papierfabrik den Zell-Rohstoff selbst aufbereitet.

Abb. 07
Anteile der Hauptsorten an
der Gesamtproduktion (Jahr
2016)³⁷



³⁶ VDP, 2017

³⁷ VDP, 2017

Für die Aufteilung des spezifischen Energieverbrauchs auf die einzelnen Prozessschritte sind aus verschiedenen Studien bzw. Beispielpapierfabriken folgende Werte gegeben:

Ausgangssituation

Prozessschritt	Strom in kWh / t					Wärme in kWh / t					
	Bsp1	Bsp2	Bsp3	Bsp4	Ø [%]	Bsp1	Bsp2	Bsp3	Bsp4	Ø [%]	
Altpapieraufbereitung											
Stoffauflösung-Sieben/ Deinking-Dispergieren- Bleichen (zusammenge- fasst) *ohne Deinking	300	50*	260	-	29	200	200	150	-	11	
Stoffaufbereitung											
Stoffzentrale/ Aufberei- tung (Auflösung/ Pulpung- Refiner-Mischen-Reinigen)	150	60	170	101	17	-	-	-	-		
Papiermaschine											
Stoffauflauf/ Sieb	160	100	70	97	15	-	-	153	-	9	
Presse	150	70	100	103	15	-	-	-	65	4	
Trocknung	60	50	90	79	10	1100	1000	1069	880	59	
Aufrollung/ Veredlung	50	20	40	20	5	-	-	153	-	9	
Infrastruktur											
Allgemeiner Energiever- brauch (Druckluft, Abwas- ser, zusammengefasst)	-	-	60	-	9	-	-	153	-	9	
Summe	870	350	730	400	100	1300	1200	1678	945	100	
Ø Betrieb ⁴¹					698					1720	

Tab. 07
Verteilung des Energiever-
brauchs^{38 39 40}

■ European Commission 2013 ■ Fleiter et al. ■ Jung u. Kappen

³⁸ European Commission, 2015

³⁹ Fleiter et al., 2013

⁴⁰ Jung u. Kappen, 2013

⁴¹ Die Werte entsprechen den Summen aus den prozessorientierten Mittelwerten, jeweils getrennt für Strom und Wärme.

Entsprechend der Werte in Tab. 07 ergibt sich für die Energieverteilung (in kWh/t) der Prozesse folgende Verbrauchsspannen:



Der Wertebereich für den Energieverbrauch von Papierfabriken liegt demnach bei: (Min_{Strom}-Min_{Wärme}) bis (Max_{Strom}-Max_{Wärme}): **1655 bis 2675 kWh / t Papier**. Als Mittelwert aus den beiden Werten ergibt sich rechnerisch **2165 kWh / t**. Damit liegt dieser Wert weit unter dem **Branchenwert** von **2800 kWh / t**. Zum Vergleich: Die UPM Group, als eine der größten Papier- und Zellstoffhersteller, gibt für seine Papierfabriken einen Wert an von 2300 – 2500 kWh/t bei einer Produktionsmenge von 18,3 Mio. Tonnen Papier im Jahr 2016. Die Aufteilung Strom zu Wärme liegt hier bei ca. 1:1.⁴²

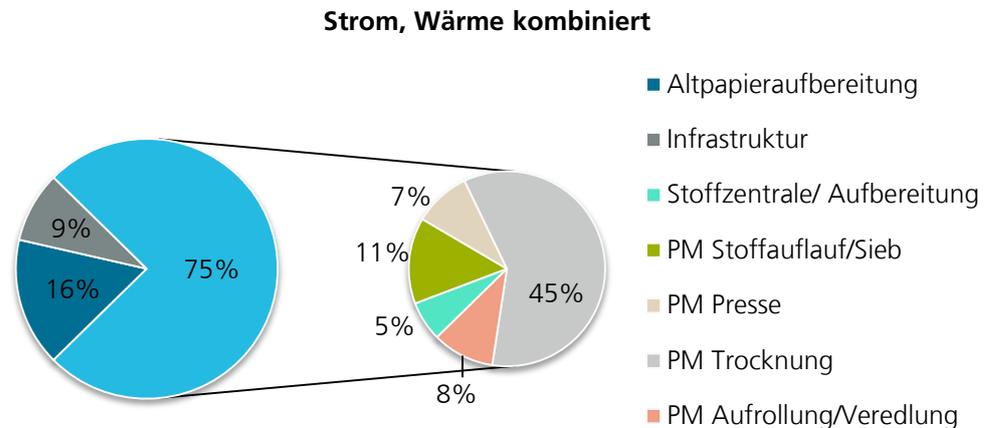
An dieser Stelle wird, entsprechend der Quellen, der

durchschnittliche spezifische Energieeinsatz von **2418 kWh / t**

(=698+1720) gem. Tab. 07 für die Basis-Referenzpapierfabrik angesetzt.

Die Energieverteilung sei mit folgender Abbildung nochmals verdeutlicht:

Abb. 08
Verteilung Energieverbrauch einer Beispielpapierfabrik



⁴² UPM, 2016

Folgende Abbildungen zeigen die prozentuale Verteilung von Wärme und Strom einer beispielhaften Papierfabrik.

Ausgangssituation

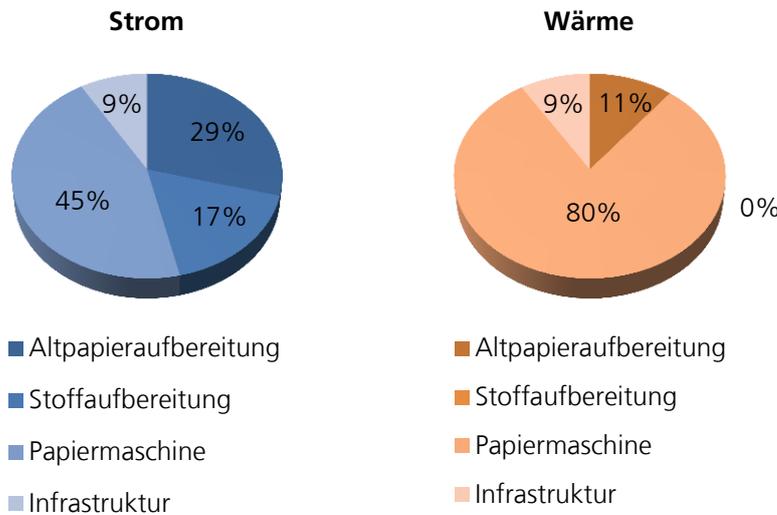


Abb. 09
Aufteilung der Energieverbräuche der Basis-Referenzfabrik

Zum Gesamtverbrauch in der beispielhaften Papierfabrik ergibt sich folgendes Verhältnis.

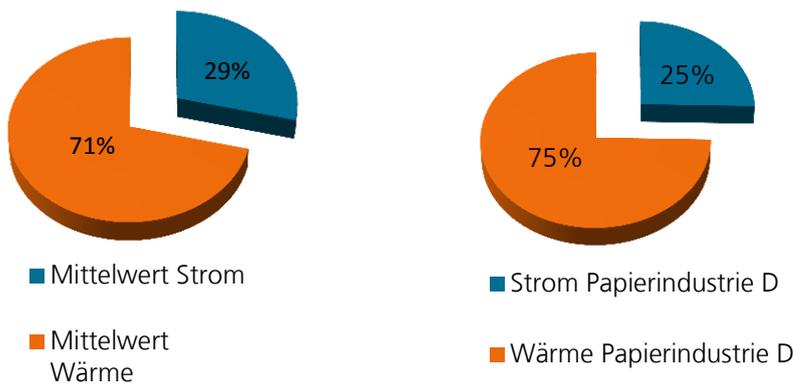


Abb. 10
Verteilung Energieverbrauch der-Referenzfabrik vs. Papierbranche Deutschland nach Strom und Wärme⁴³

Kleinere, aber auch größere Papierfabriken können von diesem prozentualen Verteilungsmuster, siehe vorherige Abbildungen, stark abweichen – die Beschreibung einer Referenzfabrik ist daher eher schwierig. Gründe dafür sind neben der Heterogenität der Betriebe und ihren Portfolios auch der Stand der Technik, der technischen Ausrüstung. An dieser Stelle wurde daher versucht, eine plausible Annahme unter Zuhilfenahme mehrerer Beispiele und Branchenwerte zu treffen.

⁴³ VDP, 2017

3 Methodische Elemente der Studie

3.1 Analyse spezieller Studien und F&E Berichte

Um einen weitreichenden Überblick zu den vielfältigen Einsparmöglichkeiten in der Papierherstellung zu erhalten, wurden neben einer allgemeinen Literaturrecherche und Umfrage, folgende spezielle Branchenkonzepte bzw. branchenspezifische Berichte untersucht und ihre Empfehlungen und Maßnahmen für das Gesamtergebnis aufgearbeitet:

1. Energy Bandwidth Study (USA), Pulp and Paper Industry, Institute of Paper Science and Technology (IPST) at Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia 2006⁴⁴
Projektbericht des American Institute of Chemical Engineers (AIChE), im Rahmen des Industrial Technologies Programm (DOE-ITP) des US-Energieministeriums, zu den Schätzungen des gegenwärtigen Energieverbrauchs der US-amerikanischen Zellstoff- und Papierindustrie sowie dem Einsatz von Best Practices und deren Auswirkungen. (P&P)
2. Energieeffizienz in der Industrie, Springer Vieweg 2013⁴⁵
Die Veröffentlichung gibt einen Überblick zu den energieintensiven Industriebranchen. Der Energieeinsatz der ausgewählten Branchen wird spezifiziert und Anwendungsbeispiele zur Energieeinsparung aufgezeigt.
3. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente⁴⁶
Die Publikation des Forschungsvorhabens zielt darauf ab, mögliche politische Maßnahmen zur Realisierung der Potenziale in den energieintensiven Grundstoffproduktionen (7 Branchen) vorzuschlagen.
4. Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie – Nützliche Informationen und Praxisbeispiele für Unternehmen⁴⁷
Der Bericht zeigt umfassende Praxisbeispiele in verschiedenen Betriebsbereichen und vermittelt Herangehensweisen zur Bewertung von Energieeffizienz und Optimierung des Energieeinsatzes.
5. Papiererzeugung in Deutschland – Eine Branchenanalyse⁴⁸
Die Analyse zeigt die Entwicklung und Strukturen der Papierbranche sowie Branchentrends und Herausforderungen.
6. Leitfaden Energieeffizienz für die Papierindustrie. Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier⁴⁹

⁴⁴ Jacobs, 2006

⁴⁵ Blesl u. Kessler 2013

⁴⁶ Fleiter et al., 2013

⁴⁷ EnergieAgentur.NRW, 2010

⁴⁸ Dispan u. Vassiliadis, 2014

⁴⁹ Vogt et al., 2008

3.2 Mathematisches Modell zur Potenzialanalyse

Im Zuge der Analyse der untersuchten Studien sowie der verfügbaren Literatur wurde die Problematik unterschiedlicher Maßeinheiten für die Einsparungen ersichtlich. Die verschiedenen Einheiten erschwerten den Vergleich und somit auch die Potenzialschätzung. Für die vorliegende Studie war es essentiell, eine einheitliche Größe zur Beurteilung des Energieverbrauchs bzw. der -einsparung auszuwählen. Tab. 08 zeigt die verschiedenen Bewertungsgrößen auf.

Bewertungsgröße	Beschreibung
% GE	Die prozentuale Angabe über den eingesparten Anteil am Gesamtenergieverbrauch scheint auf den ersten Blick sinnvoll. Damit ist eine Lokalisierung und Bewertung der Maßnahmen über mehrere Gewerke einer Papierfabrik möglich. Diese Einheit ist vorzuziehen, wenn eine Untersuchung nur anhand einer speziellen Papierfabrik durchgeführt wird.
% PE	Ähnlich wie die vorhergehende Einheit ist die prozentuale Angabe des eingesparten, prozessbezogenen Verbrauchs am besten geeignet, um Potenziale innerhalb eines Prozesses und Unternehmens aufzudecken.
kWh/a	Die absolute Angabe eines Verbrauchs bzw. einer Einsparung pro Jahr ist für eine interne Einschätzung im Unternehmen vorteilhaft. Mit dieser Einheit kann auch eine Kalkulation aus betriebswirtschaftlicher Sicht direkt erfolgen. Diese Größe ist für die Untersuchung eines speziellen Unternehmens geeignet.
kWh/t	Der Verbrauch pro Tonne Papier ist eine Einheit, die in der Industrie als Kennzahl für den spezifischen Verbrauch weit verbreitet ist (z.B. in Umwelterklärungen der Unternehmen). Diese Einheit liefert eine sehr gute Vergleichbarkeit und kann als „normierte Bezugsgröße“ angesehen werden. Dadurch ist sie für diese Analyse sehr gut geeignet. Aufgrund der starken Unterschiede des spezifischen Energieverbrauchs zwischen den heterogenen Papierprodukten (Papiereigenschaften & Veredelungsprozesse) und der teils stark unterschiedlichen Systemabgrenzung (integrierte/nicht integrierte Papierfabrik) wird es notwendig sein hierzu die Randbedingungen mit anzugeben.

Tab. 08
Auswahl der Bewertungsgröße

Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse lässt sich mit der Bewertungsgröße „Energieverbrauch in kWh pro Tonne Papier [kWh/t]“ am besten erzielen. Dementsprechend wurde zur Ausweisung der Potenziale die **Bewertungsgröße kWh/t** gewählt.

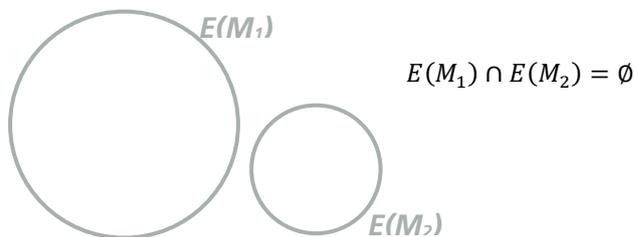
Beim Vergleich der lokalisierten Einspareffekte sind die Rahmenbedingungen nicht außer Acht zu lassen. Eine direkte Übernahme der Maßnahmen in die Produktion ist nur bedingt möglich, da die Produktionsstrukturen und Rahmenbedingungen zwischen den Unternehmen verschieden sind und diese einen Einfluss auf die Höhe der Einspareffekte haben. Die aufgezeigten Potenziale stellen eine allgemeine Tendenz dar, was bei stabilen Produktions- und Umweltbedingungen erreicht werden kann.

Um eine Abschätzung der Energieeffizienzpotenziale in der Planung sinnvoll und nachvollziehbar treffen zu können, wird im Folgenden die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser erläutert, wobei die Beschreibung durch ein -mittels mathematischer Notation erzeugtes Modell- repräsentiert wird.

Auf der Grundlage der Analyse spezieller Studien sowie diverser F&E-Berichte konnte im ersten Schritt eine Liste mit Maßnahmen erstellt werden, welche eine Steigerung der Energieeffizienz in der Papierherstellung zur Folge haben. Die zugehörigen Einsparpotenziale sind von verschiedenen Einflüssen abhängig, welche nicht ohne weiteres mathematisch beschrieben werden können. Daher ist lediglich eine Abschätzung der Potenziale möglich und keine konkrete Wertzuweisung. Für die Liste von Maßnahmen gelten allerdings zwei Restriktionen. Einerseits können nicht alle ermittelten Maßnahmen bereits in der Planung berücksichtigt werden, d. h. eine Kategorisierung sowie Selektion wird erforderlich. Andererseits ist festzuhalten, dass das durch die eruierten Maßnahmen maximal erreichbare Einsparpotenzial nicht der Summe aller Einzelpotenziale entspricht. Um letzteres zu verdeutlichen, sollen die folgenden Erläuterungen dienen:

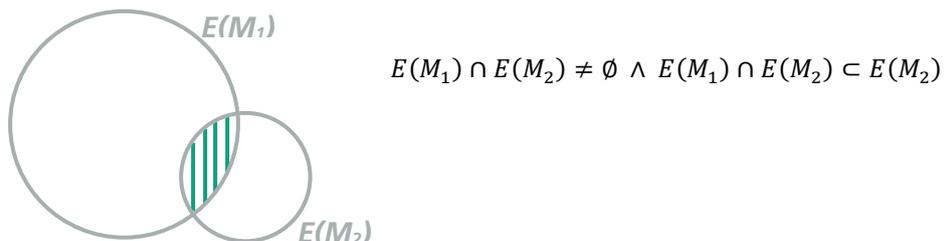
Sei M_1, \dots, M_n mit $n \in \mathbb{N}$ die Gesamtheit aller gesammelten Maßnahmen und $E(M_i)$ mit $i \in \mathbb{N}$ das Einsparpotenzial der Maßnahme M_i . Zur Veranschaulichung werden die möglichen Einsparungen als Mengen dargestellt.

Fall 1:



Die Einspareffekte beider Maßnahmen zielen nicht auf dieselbe Effizienzsteigerung ab. Da es keine Überschneidung der Mengen gibt, liegt auch keine teilweise oder vollständige Substitution bzw. Beeinflussung vor. Somit können beide Maßnahmen sowie die zugehörigen Effekte für die Ermittlung der Einsparpotenziale vorläufig (d.h. sofern eine mögliche Berücksichtigung in der Planung zutrifft) herangezogen werden.

Fall 2:



Die Einspareffekte beider Maßnahmen weisen eine Überschneidung auf und die Schnittmenge ist eine echte Teilmenge von $E(M_2)$, d. h. die Schnittmenge ist eine Teilmenge von $E(M_2)$, aber nicht identisch mit $E(M_2)$. Wie bereits oben erwähnt, existieren für die gesammelten Maßnahmen nur Abschätzungen hinsichtlich möglicher Einsparpotenziale. Somit kann nicht bestimmt werden, wie groß der Anteil der Schnittmenge am Gesamteffekt beider Maßnahmen ist. Eine Summation beider Potenziale würde demnach zu einer Überschätzung des Gesamtpotenzials führen.

Fall 3:

$$E(M_1) \cap E(M_2) \neq \emptyset \wedge E(M_1) \cap E(M_2) = E(M_2)$$

Die Einspareffekte beider Maßnahmen weisen eine Überschneidung auf und die Schnittmenge entspricht $E(M_2)$, d. h. die Schnittmenge ist komplett in $E(M_1)$ enthalten. Wie groß der Anteil der Schnittmenge am Gesamteffekt beider Maßnahmen ist, ist für diesen Fall irrelevant. Dennoch würde auch hier eine Summation beider Potenziale zu einer Überschätzung des Gesamtpotenzials führen.

Für die Berechnung der maximal erreichbaren Einsparpotenziale wurden daher folgende Festlegungen getroffen.

- Fall 1: Es liegt keine Überschneidung vor. Die Effekte beider Maßnahmen finden Beachtung.
- Fall 2: Es liegt eine Überschneidung vor. Lediglich die Maßnahme, welche den größeren Einspareffekt aufweist, wird berücksichtigt.
- Fall 3: Es liegt eine Überschneidung vor. Lediglich die Maßnahme, welche den größeren Einspareffekt aufweist, wird berücksichtigt.

Diese Annahmen stellen sicher, dass keine Überbewertung der Maßnahmen erfolgt. Obgleich ist es insbesondere im Fall 2 möglich, dass Einspareffekte nicht in die Berechnung einbezogen werden. Um eine nachvollziehbare Ermittlung der Energieeffizienzpotenziale gewährleisten zu können und mögliche Unsicherheiten in den Resultaten zu reduzieren, ist diese Prämisse zwingend erforderlich.

Bevor eine Einteilung der Maßnahmen stattfinden kann, werden die eruierten Maßnahmen sowie die zugehörigen Effizienzpotenziale wie zuvor beschrieben, hinsichtlich offensichtlicher Überschneidungen geprüft. Maßnahmen, welche dem Fall 2 und 3 zuzuordnen sind und einen geringeren Einspareffekt aufweisen, werden für weitere Betrachtungen nicht berücksichtigt und gehen somit nicht in das maximal erreichbare Einsparpotenzial ein.

Ausgehend von der nun bereinigten Maßnahmenliste kann die Klassifizierung erfolgen. Dabei wird in die folgenden drei Kategorien unterschieden.

$P^{(n)}$ für $i = 1 \dots n; n \in \mathbb{N}$ bezeichnet die Gesamtheit aller Effizienzmaßnahmen, welche eine technische Planung und Genehmigung sowie ggf. eine Anlagenstilllegung erfordern und hohe Investitionskosten aufweisen.

$Q^{(m)}$ für $j = 1 \dots m; m \in \mathbb{N}$ bezeichnet die Gesamtheit aller Effizienzmaßnahmen, welche keine Genehmigung sowie kurze bzw. keine Anlagenstilllegung erfordern und geringe Investitionskosten aufweisen.

$R^{(t)}$ für $k = 1 \dots t; t \in \mathbb{N}$ bezeichnet die Gesamtheit aller Effizienzmaßnahmen, welche im laufenden Betrieb umgesetzt werden können und keine Investitionskosten erfordern.

In der folgenden Tabelle sind die Unterscheidungsmerkmale aller drei Maßnahmenklassen zusammenfassend dargestellt.

Tab. 09
Maßnahmenklassen

Klasse	Unterscheidungsmerkmale
P	<ul style="list-style-type: none"> - Erfordert technische Planung und Genehmigung - Stilllegung der Anlage bei Umbau erforderlich - Hohe Investitionskosten
Q	<ul style="list-style-type: none"> - Erfordert keine Genehmigung - Kurze bzw. keine Stilllegung der Anlage notwendig - Geringe Investitionskosten
R	<ul style="list-style-type: none"> - Erfordert keine Genehmigung - Umsetzung im laufenden Betrieb - Keine Investitionskosten

Bezugnehmend auf den Aufwand $A(M)$, welcher mit der Umsetzung der Maßnahmen einhergeht, kann die folgende Verallgemeinerung getroffen werden:

$$A(R^{(k)}) < A(Q^{(j)}) < A(P^{(i)}); \forall i, j, k \in \mathbb{N}$$

Diese Abfolge kann allerdings nicht auf die Einsparpotenziale der Maßnahmen übertragen werden, da kein direkter Zusammenhang zwischen Aufwand und Effekt vorliegt.

Die Gesamtheit aller eruierten Maßnahmen darf nicht mit dem tatsächlichen Potenzial von Papierfabriken gleichgesetzt werden, da bereits diverse Maßnahmen umgesetzt wurden bzw. sich in der Umsetzung befinden und somit keine zusätzlichen Effekte daraus generiert werden.

Um das Einsparpotenzial planungsrelevanter Maßnahmen für die Papierfabriken dennoch abschätzen zu können, ist es erforderlich eine Modell-Papierfabrik zu definieren, die widerspiegelt, auf welchem Stand sich generell die Energieeffizienz durchschnittlich befinden. Zu diesem Zweck wird eine Befragung mit ausgewählten Papierfabriken durchgeführt, in der ermittelt wird, welchen Umsetzungsgrad die Maßnahmen im jeweiligen Unternehmen aufweisen.

Die vier Umsetzungsgrade (UG) definieren sich dabei wie folgt:

UG1: Die Maßnahme wurde bis dato nicht betrachtet bzw. war bisher unbekannt.

UG2: Die Maßnahme wurde als möglicher Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz identifiziert. Derzeit ist eine Umsetzung allerdings nicht geplant.

UG3: Die Umsetzung der Maßnahme wurde entschieden, d.h. eine Realisierung ist mittelfristig geplant.

UG4: Die Maßnahme befindet sich momentan in der Umsetzung bzw. wurde bereits umgesetzt.

Sofern eine Maßnahme als „**nicht anwendbar**“ deklariert wird, wird sie mit dem **UG4** gleichgesetzt. Es ist davon auszugehen, dass die Maßnahme bekannt ist, aber kein Potenzial, bspw. aus technologischen Gründen, bietet.

Um einen hohen Rücklauf der Umfrage erreichen zu können, ist es wichtig, dass der Fragebogen nur wenig Zeit in Anspruch nimmt und die Darstellung kompakt ist. Daher wurde für die Befragung eine Matrix festgelegt, welche mehrere Fragen mit einem identischen Satz von Möglichkeiten beantwortet. In einer solchen Matrix können die

Antworten sowohl eine skalare Wertung wie auch zuordnende absolute Eigenschaften umfassen. Die einzelnen Fragen werden untereinander aufgeführt und bilden die Matrix mit den Antwortmöglichkeiten, die in der Kopfzeile stehen.

Für den hier betrachteten Kontext enthält die erste Spalte der Matrix alle Maßnahmen (inkl. Kurzbeschreibung) der bereinigten Liste und in der ersten Zeile werden von links nach rechts die Umsetzungsgrade aufgelistet. Die Befragten sind nunmehr aufgefordert, die Maßnahmen dementsprechend zu beurteilen.

In der folgenden Tabelle sind $n(= 3)$ beispielhafte Antwortmatrizen dargestellt:

Papierfabrik 1 (P ₁)				
Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
M1	X			
M2		X		
M3		X		
M4			X	

Papierfabrik 2 (P ₂)				
Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
M1			X	
M2			X	
M3		X		
M4				X

Papierfabrik 3 (P ₃)				
Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
M1	X			
M2	X			
M3		X		
M4				X

Tab. 10
Beispielhafte Antwortmatrizen

Werden jetzt jedem Umsetzungsgrad entsprechend seiner Ordnungszahl Punkte zugewiesen, kann für jede Maßnahme der durchschnittliche Umsetzungsgrad ermittelt werden. Das Ergebnis für eine Maßnahme $\emptyset UG(M_i)$ auf Basis der $n(= 3)$ Antwortmatrizen der Papierfabriken B_1, \dots, B_n wird dementsprechend wie folgt berechnet:

$$\emptyset UG(M_i) = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n UG(M_{ij})$$

Dabei ist unter $UG(M_{ij})$ dem Umsetzungsgrad der Maßnahme i in der Papierfabrik j zu verstehen.

Auf der Grundlage dieser Berechnungsvorschrift resultieren folgenden Ergebnisse für die Beispielantworten:

Tab. 11
Beispielantworten nach der Berechnungsvorschrift

Maßnahme	$\varnothing UG(M_i)$	$\triangle UG$
M1	1,66	UG2
M2	2,00	UG2
M3	2,00	UG2
M4	3,66	UG4

Beispielsweise würde dies für Maßnahme 1 bedeuten, dass einer Papierfabrik die Maßnahme bekannt ist. Sie bietet somit Einsparpotenzial. Dagegen können aus der Maßnahme 4 eher keine Effekte durch eine Berücksichtigung in der Planung erzielt werden, da diese bereits umgesetzt wurde.

Ziel der Befragung ist es, unter anderem eine Referenz-Papierfabrik zu definieren, d. h. es ist zu bestimmen, welche Maßnahmen in einer durchschnittlichen Papierfabrik welchen Umsetzungsgrad aufweisen und durch welche Maßnahmen noch Einspareffekte erzielt werden können. Wird allerdings, wie im Beispiel beschrieben, außer Acht gelassen, dass gewisse Papierfabriken bis dato weitaus mehr Potenziale gehoben haben als andere, dann kommt es zu einer Verzerrung der Ergebnisse und somit zu einer falschen Charakterisierung der Referenz-Papierfabrik.

Daher ist es notwendig eine Gewichtung in die Berechnung einzubeziehen. Für diesen Zweck wird der spezifische Strombedarf *spezELT* in kWh/t sowie der spezifische Wärmebedarf *spezW* in kWh/t herangezogen. In den jährlichen Umwelterklärungen werden diese Angaben teilweise getrennt voneinander und teilweise aggregiert durch jede Papierfabrik ausgewiesen.

Wie in Abschnitt 2.4 hergeleitet, seien für **$\varnothing ELT$ gleich 698 kWh/t** und für **$\varnothing W$ gleich 1720 kWh/t** festgelegt, welche in die weitere Bewertung als Basiswerte eingehen.

Für die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren $g(P_i)$ für $i = 1, \dots, n; n \in \mathbb{N}$ wird festgelegt, dass der Gewichtungsfaktor 1 beträgt, wenn die betreffende Papierfabrik den gleichen spezifischen Strom- und Wärmebedarf aufweist, wie die vorab bestimmten Werte. Papierfabriken, die bisher wenig Effizienzpotenziale gehoben haben, sollen zudem einen höheren Gewichtungsfaktor als 1 erhalten und Papierfabriken, die bezüglich der Energieeffizienz überdurchschnittlich sind einen kleineren.

Der Gewichtungsfaktor $g(P_i)$ der Papierfabrik i berechnet sich dann nach folgender Vorschrift:

$$g(P_i) = 1 + \frac{\text{spezELT}(P_i) - \varnothing ELT}{\varnothing ELT} + \frac{\text{spezW}(P_i) - \varnothing W}{\varnothing W}$$

In der folgenden Tabelle wurden für die Beispiel-Papierfabriken exemplarische Werte für den spezifischen Energiebedarf angenommen und die zugehörigen Gewichtungsfaktoren berechnet.

Papierfabrik	ØELT [kWh/t]	ØW [kWh/t]	spezELT (P _i) [kWh/t]	spezW (P _i) [kWh/t]	g(P _i)
P ₁	698	1720	780	1500	0,99
P ₂	698	1720	320	1425	0,29
P ₃	698	1720	1150	1300	1,40

Tab. 12
exemplarische Werte für
Beispiel-Papierfabriken

Werden diese Gewichtungen in die Auswertung der Befragung einbezogen, ergibt sich ein gewichteter durchschnittlicher Umsetzungsgrad $\phi_g UG(M_i)$, der sich wie folgt für die Maßnahme i berechnen lässt:

$$\phi_g UG(M_i) = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n (UG(M_{ij}) * g(P_j))$$

Für die Beispielantworten ergeben sich demnach folgende Resultate für $\phi UG(M_i)$ und $\phi_g UG(M_i)$:

Maßnahme	ØUG(M _i)	ΔØUG	ØgUG(M _i)	ΔØgUG
M1	1,66	UG2	1,08	UG1
M2	2,00	UG2	1,42	UG1
M3	2,00	UG3	1,79	UG2
M4	3,66	UG3	3,24	UG3

Tab. 13
Resultate für die Zuordnung
von Maßnahmen zu den
Umsetzungsgraden

Da im Zuge dieser Studie nur ausgewählte Papierfabriken befragt werden und somit auch kein ausreichend großer Stichprobenumfang erreicht wird, um eine signifikante Aussage bezüglich einer Referenz-Papierfabrik treffen zu können, wurde der Einbezug von Gewichtungsfaktoren als sinnvoll erachtet. Nachdem die Umfrage erstellt und durch die Papierfabriken ausgefüllt wurde, erfolgt im vorletzten Schritt die Auswertung auf Basis der zuvor beschriebenen Vorgehensweise unter Berücksichtigung spezifischer Energiebedarfe und Gewichtungsfaktoren.

Anhand der Ergebnisse kann ermittelt werden, mit welchen Maßnahmen ein wirkliches Effizienzpotenzial gehoben werden kann $\phi_g UG < UG4$ und durch welche nicht $\phi_g UG = UG4$.

$E(P^{(i)}) =$ Einsparpotenzial der Maßnahme $P^{(i)}$

$E(Q^{(j)}) =$ Einsparpotenzial der Maßnahme $Q^{(j)}$

$E(R^{(k)}) =$ Einsparpotenzial der Maßnahme $R^{(k)}$

$$\sum_{i=1}^n E(P^{(i)}) + \sum_{j=1}^m E(Q^{(j)})$$

= kumulierte Einsparpotenziale der Maßnahmen aus Betrieb und Planung

$$E(M^{(ges)}) = \sum_{i=1}^n E(P^{(i)}) + \sum_{j=1}^m E(Q^{(j)}) + \sum_{k=1}^o E(R^{(k)})$$

= kumulierte Einsparpotenziale der Maßnahmen aus Betrieb, energieoptimiertem Betrieb und Planung

Für den Fokus der Studie sind allerdings nur Maßnahmen relevant, welche der Planung zugeordnet (UG1) bzw. bereits in der Planung berücksichtigt werden können (1)+(2). Demnach wird das Energieeffizienzpotenzial (in %) $E(P_{\%})$ bzw. $E(PQ_{\%})$ wie folgt aus dem Einsparpotenzial und dem maximal erreichbaren Potenzial aller Maßnahmen ermittelt:

$$E(P_{\%}) = \frac{E(P^{(n)})}{E(M^{(ges)})} * 100\% \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}$$

$$E(PQ_{\%}) = \frac{E(P^{(n)}) + E(Q^{(m)})}{E(M^{(ges)})} * 100\% \quad \text{mit } n, m \in \mathbb{N}$$

Für die Berechnung gilt, dass die Betrachtung von Maßnahmen, die sich in ihren Effekten gegenseitig substituieren bzw. beeinflussen, keine Beachtung finden. Offensichtliche Überschneidungen werden herausgerechnet.

3.3 Industrieumfrage

Um die theoretischen Erkenntnisse mit Erfahrungen aus der Praxis zu untermauern und die für die Potenzialberechnung erforderliche Referenz-Papierfabrik zu definieren, wurde eine Umfrage mit sächsischen Papierfabriken, die dem Produktfokus siehe Abschn. 2.3 entsprechen, durchgeführt. Von sechs relevanten Unternehmen konnten vier Umfragerückläufer ausgewertet werden. Die Ergebnisse spiegeln den aktuellen Status der Maßnahmen wieder, welche in der Praxis bereits angegangen wurden und geben einen Überblick über aktuell bestehende Energieeffizienzpotenziale.

Die Umfrage wurde so ausgelegt, dass die Beantwortung der Fragen eine Dauer von 15 Minuten nicht übersteigt. Sie bestand aus zwei Teilen:

- Teil I: Allgemeine Kenndatenermittlung:
Nutzung der Daten zur Kategorisierung der Unternehmen, nach jährlicher Produktionskapazität und Gewichtung der Einschätzung bzgl. Umsetzungsreife der Energieeffizienzmaßnahmen
- Teil II: Spezifische Potenzialermittlung:
Abfrage der Maßnahmen in den Unternehmen mittels einer Vorlage bzgl. der Umsetzungsreife (siehe Anlage A: Fragebogen). Dabei entschieden die Befragten, ob die abgefragten Maßnahmen: unbekannt, bekannt, geplant oder in Umsetzung bzw. umgesetzt sind. Die Ergebnisse gehen direkt in die Berechnung der Potenziale, nach dem, im vorherigen Abschnitt vorgestellten mathematischen Modell, ein.

Bei der Durchführung wurde großer Wert auf eine möglichst einfache Handhabung und Anonymität gelegt. Die Beantwortung des Fragebogens erfolgte schriftlich.

4 Ergebnisse

4.1 Referenz-Papierfabrik

Die Auswertung der Ergebnisse beinhaltet die Analyse der eruierten Energieeffizienzmaßnahmen bezüglich ihrer Zugehörigkeit zur Planungsphase sowie der praktischen Umsetzungsreife. Die Resultate fließen in die Schätzung des, in der Planung adressierbaren Energieeffizienzpotenzials industrieller Anlagen *im Vergleich zu dem*, der Betriebsphase ein.

Um das Einsparpotenzial planungsrelevanter Maßnahmen für die Papierfabriken abschätzen zu können, ist es erforderlich eine Referenz-Papierfabrik zu definieren, die widerspiegelt, auf welchem Stand sich die Papierfabriken hinsichtlich der Energieeffizienz durchschnittlich befinden. Zu diesem Zweck wurde die Aussagen der sächsischen Papierfabriken aus der durchgeführten Umfrage, siehe Anlage: „Fragebogen“, über den jeweiligen Umsetzungsgrad der Effizienzmaßnahmen ausgewertet. Die Basis-Referenzpapierfabrik, siehe Abschn. 2.4, dient als Vergleichswert für die Gewichtung und Abschätzung potenzialträchtiger Effizienzmaßnahmen.

Eine Kategorisierung der Unternehmen ist aufgrund der überschaubaren Anzahl der Betriebe nicht ratsam, da die Beteiligten sehr inhomogen bzgl. ihrer Ausbringungsmenge, Produktportfolio und Integration der Zellstoffherstellung zueinander sind. Die Spannweite reicht vom mittelständigen Unternehmen, welches in seinem Portfolio einen Mix an Papier und Kartonagen produziert, bis zum Großunternehmen, welches sich auf grafische Papiere spezialisiert hat. Des Weiteren wurden Hersteller für Tissue und Spezialpapiere nicht betrachtet, da sich die Spannweite der eingesetzten Energiemenge und -verteilung dadurch noch weiter vergrößern würde.

Rahmenbedingungen für die Referenzfabrik:

- Produktion von grafischen Papieren und Verpackungspapieren
- Stoffaufbereitung erfolgt in Berücksichtigung einer integrierten Altpapieraufbereitung
- Keine festgelegte Unternehmensgröße
- Spezifischer Energiebedarf wird mit 2.418 kWh/t festgelegt (Siehe Abschn. 2.4)

Aus **65 Maßnahmen** zur Energieeffizienzverbesserung, die innerhalb der Studie herausgefunden wurden, sind **0 bereits umgesetzt bzw. befinden sich in der Planung (UG3 und UG4)**. Die Auflistung dieser Maßnahmen kann in der Anlage B: „Auswertung der Umfrage zu Umsetzungsgraden der eruierten Maßnahmen“ nachgeschlagen werden.

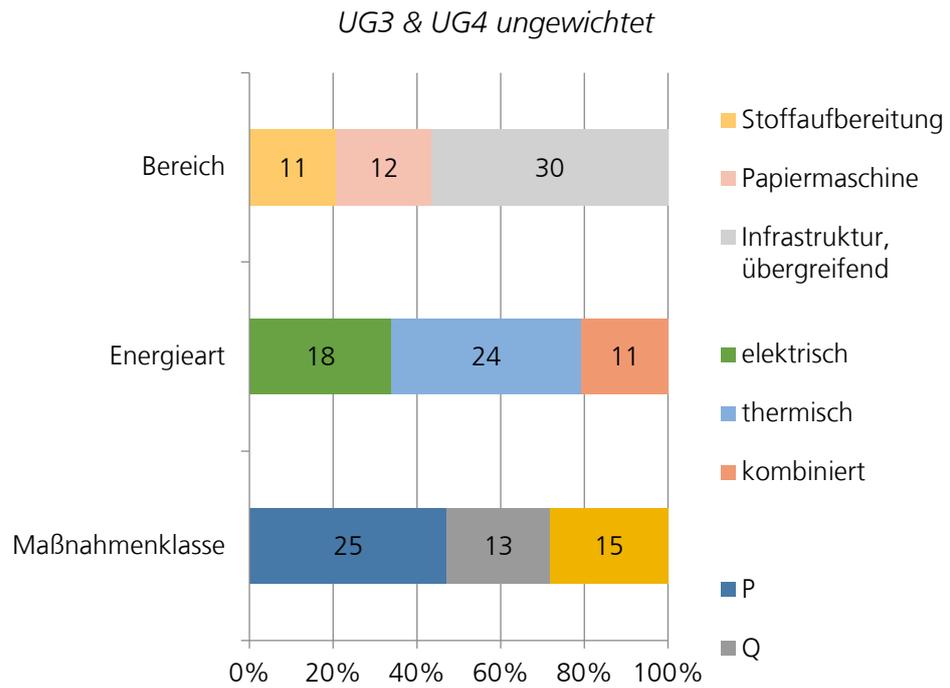
Dies ist auf das zugrundeliegende mathematische Modell in Verbindung mit dem Energiebedarf der Referenzfabrik zurückzuführen. Die befragten Unternehmen weisen einen zum Teil deutlich geringeren Energiewert als die Referenzpapierfabrik aus, was zu der Annahme führt, dass im Durchschnitt entsprechend andere Fabriken weniger energieeffizient sind. Im Ergebnis werden geplante und umgesetzte Maßnahmen aus der Befragung (UG3, UG4) abgewertet und potenzialträchtig.

Zum Vergleich sei eine quantitative Verteilung der nicht gewichteten, durchschnittlichen Maßnahmen mit **UG3 und höher** hinsichtlich Maßnahmenklasse, adressierten Energieart sowie Anwendungsbereich gegeben. Von 65 Effizienzmaßnahmen sind nach Angaben der Befragten bereits **53 umgesetzt, in Planung oder aus betrieblichen Gründen nicht anwendbar**.

Erklärung:

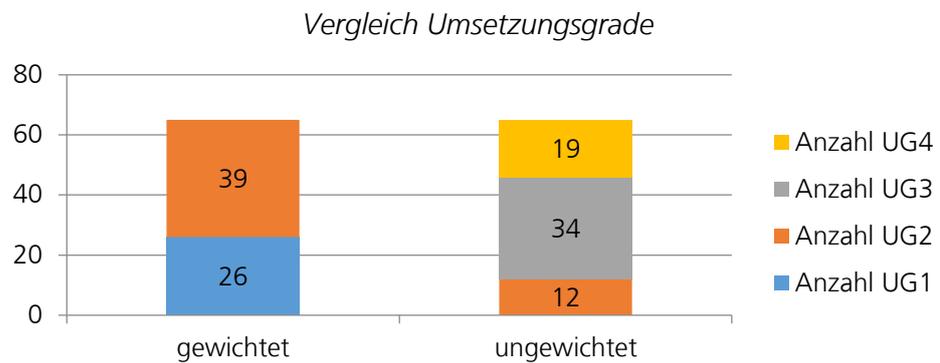
Das Ziel der stichprobenartigen Unternehmensumfrage ist die Abschätzung eines realen Bildes potenzialträchtiger Effizienzmaßnahmen für den Branchendurchschnitt. Im Falle, eine befragte Fabrik hat einen geringeren spezifischen Energieeinsatz als die durchschnittliche Basis-Referenzpapierfabrik (2418 kWh/t), wird für ebendiese durchschnittliche Referenzfabrik davon ausgegangen, dass Effizienzmaßnahmen noch Potenziale bieten, denn wir haben bereits eine vergleichsweise effizientere Fabrik gefunden. Anders herum muss davon ausgegangen werden, dass im Mittel Energieeffizienzpotenziale bereits umgesetzt wurden, sofern die Umfrage mehrheitlich Fabriken mit höherem Energieverbrauch zeigt.⁵⁰

Abb. 11
Quantitative Verteilung der geplanten & umgesetzten Maßnahmen aus dem Umfrageergebnis (ungewichtet)



Die Verschiebung der Umsetzungsgrade nach Anwendung der Gewichtung sei zur Vollständigkeit nachfolgend abgebildet:

Abb. 12
Vergleich der Umsetzungsgrade vor und nach Anwendung des mathematischen Modells



⁵⁰ Kritik, wie bereits erläutert: Es sind gleichzeitig gleichartige Prozesse und Produkte unter den Papierfabriken zu Grunde zu legen.

4.2 Energieeinsparpotenziale

Aus dem ermittelten durchschnittlichen Stand auf dem sich die Papierfabrik (Referenzfabrik) hinsichtlich der Energieeffizienz befindet, werden die Einsparpotenziale planungsrelevanter Maßnahmen allgemeingültig für die Papierfabriken im folgenden Abschnitt abgeschätzt.

Aus 65 Maßnahmen zur Energieeffizienzverbesserung, die innerhalb der Studie ermittelt wurden, stellen **alle ein Verbesserungspotenzial** dar (UG1-UG3). Die Gesamtübersicht kann in Anlage B: „Auswertung der Umfrage zu Umsetzungsgraden der eruierten Maßnahmen“ nachgeschlagen werden. Die potenzialträchtigen Maßnahmen teilen sich in folgende Klassen auf:

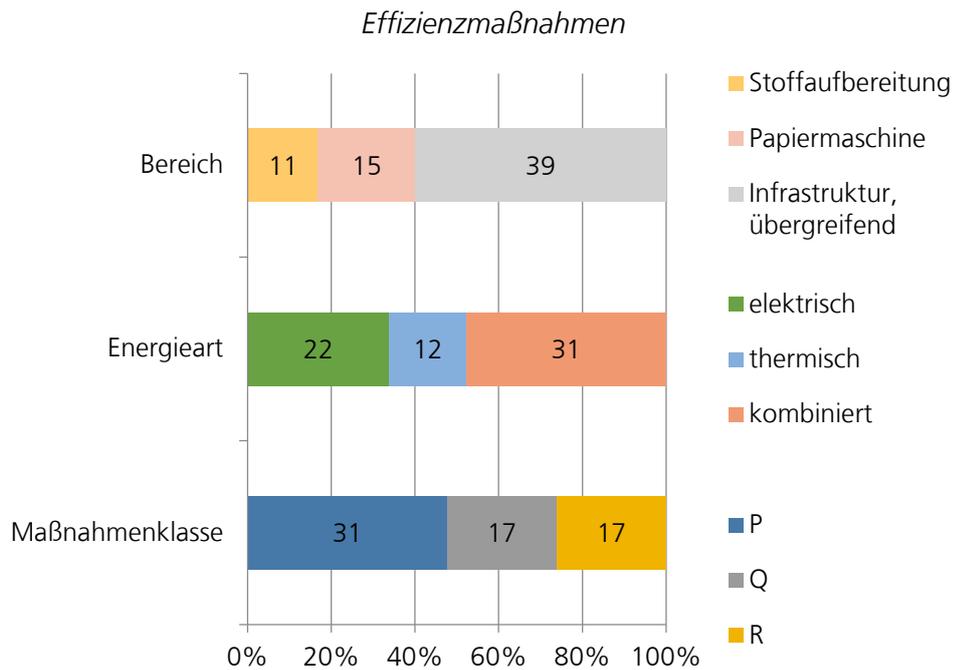


Abb. 13
Quantitative Verteilung der potenzialbildenden Maßnahmen

Die meisten Energieeffizienzmaßnahmen sind im Bereich Infrastruktur und übergreifende Maßnahmen (39) zu finden. Aufgrund des eher geringen, anteiligen spezifischen Energiebedarfs in diesem Bereich wird das Potenzial tendenziell überschaubar sein. Die Maßnahmen in der Stoffaufbereitung (11) und Papiermaschine (15) halten sich in etwa die Waage.

Die hauptsächlich adressierte Energieart betrifft kombinierte Strom-Wärme-Maßnahmen (31), gefolgt von rein elektrischen (22) und rein thermischer Energieeinsparung (12).

Die Anzahl der Maßnahmen aus Klasse P (31) dominiert jene der Klassen Q (17) und R (17). Dies deutet darauf hin, dass zukünftige Potenziale eher durch hohe Investitionen und Innovationen erschließbar sind.

Im Weiteren erfolgt die allgemeine Auswertung zu den, in den einzelnen Bereichen möglichen Maßnahmen. Die Auswertungstabellen sind wie folgt aufgebaut:

- Die laufende Nummer in den folgenden Tabellen gibt die Maßnahme im jeweiligen Bereich und die Art der Energie an, wie beispielsweise:

$$I_{\text{Therm.1}} = \textit{Infrastruktur|thermische Maßnahme|Nummerierung}$$

- Benennung der Maßnahme
- Die Zugehörigkeit einer Maßnahme zu einer Klasse (P,Q,R) wird durch die Tabellenspalte festgelegt, in die das Einsparpotenzial in kWh/t eingetragen wird.
- Die in der Tabelle schwarz hervorgehobenen Maßnahmen sind gemäß den Berechnungsvorschriften (vgl. Abschn. 3.2) in die Berechnung eingegangen; weitere werden durch teils Aussortierung nicht einbezogen, bspw. aufgrund der Teilmengenproblematik und einer möglichen Potenzialüberschätzung oder Maßnahmen ohne Potenzialangabe. Eine Übersicht zur ungekürzten Liste aller eruierten Maßnahmen sind in Anlage A: Fragebogen bzw. Anlage C: „Relevante Maßnahmen“ zu finden.
- Die Summen der Einzelpotenziale wurden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Bei vielen Maßnahmen handelt es sich jedoch um Systeme, die in sich geschlossene Einheiten oder neue Verfahrensarten darstellen, die letztendlich nur mit Experten und Erfahrungswissen final auf eine Vereinbarkeit abgestimmt werden können. Dies betrifft ebenso den angesetzten Wert, welcher im jeweiligen betrieblichen Umfeld eine Korrektur erfahren muss.

4.2.1 Stoffaufbereitung

Ergebnisse

Die Stoffaufbereitung ist der einer Papiermaschine vorgelagerte Bereich. Hier finden zahlreiche Prozesse statt, um aus den eingesetzten Faserstoffen Zellstoff, Halbzellstoff und Altpapier, eine Papiersuspension herzustellen.

Setzt man an dieser Stelle schon Maßnahmen für eine effiziente Produktion um, so können die nachfolgenden Prozesse maßgeblich beeinflusst werden. Mit dem Einsatz neuer Technik bspw. durch Nutzung einer optimierten S-Wendel im Hochkonsistenzpulper oder dem Einsatz neuer Mehrscheiben- und Doppelzylinderrefiner erhöht sich das Resultat um ein Vielfaches gegenüber der Einzelbetrachtung einer Maßnahme.

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
S _{Elektro} 1	Hochkonsistenzpulper mit S-Wendel	15		
S _{Elektro} 2	Optimierung der Büttengeometrie		1	
S _{Elektro} 3	Optimierung des Rührwerks		1	
S _{Elektro} 4	Verbesserte Vertikalsortierer mit MultiFoil-Rotor und Stabsiebkorb	18		
S _{Elektro} 5	Anpassung der Stoffdichte v. Altpapier			13
S _{Elektro} 6	Verwendung optimierter Refiner (z.B. Mehrscheiben-, Doppelzylinderrefiner)	110		
S _{Elektro} 7	Hochzahngarnituren für Dispergierer		6	
S _{Elektro} 8	Einsatz von Stufendiffusoren (selbstansaugend) zu Luftbeimengung beim Deinking	n/a		
	Summe	143	8	13

Tab. 14
Maßnahmen zur elektrischen Energieeinsparung im Bereich Stoffaufbereitung

Thermische Einsparpotenziale sind in diesem Bereich kaum vorhanden. Möglichkeiten bieten sich jedoch in der Nutzung der Abwärme aus der Papiermaschine. Diese Maßnahmen sind dem Entstehungsbereich bzw. allg. der Infrastruktur zugeordnet.

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
S _{Therm} 1	Wärmerückgewinnung aus heißem Bleichwasser		5	
	Summe	-	5	-

Tab. 15
Maßnahmen zur thermischen Energieeinsparung im Bereich Stoffaufbereitung

Des Weiteren gibt es in allen Bereichen Maßnahmen, bei welchen sowohl Elektroenergie, als auch thermische Energie eingespart werden kann. Diese sind im jeweiligen Bereich in einer separaten Tabelle aufgeführt.

Nach Brunke bewirkt bspw. die Fraktionierung von Recyclingfasern, bei der die Lang- und Kurzfasern unterschiedlich und getrennt voneinander aufbereitet werden, einen geringeren Chemikalien- und Energieeinsatz.

Tab. 16
Maßnahmen mit elektro- und thermischer Energieeinsparung im Bereich Stoffaufbereitung

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
S _{Kombi} 1	Schichtdesign (Nutzung verschiedener Faserrohstoffe)	n/a		
S _{Kombi} 2	Fraktionierung der Recyclingpapierfasern	65		
Summe		65	-	-

4.2.2 Papiermaschine

Der energieintensivste Bereich in der Papierherstellung ist die Papiermaschine. Er beinhaltet die Prozessschritte Sieben, Pressen, Trocknen und Glätten, wobei die Papiertrocknung den größten Energieverbraucher darstellt. Ca. 1.000 kWh/t Papier (vgl. Abschn. 2.4) müssen für den benötigten Dampf bereitgestellt werden. Es gilt, je höher der Trockengehalt nach der Pressenpartie, desto niedriger ist die erforderliche Energiemenge, welche für den abschließenden Trocknungsprozess benötigt wird. Durch den Einsatz bspw. moderner Schuhpressen wird der Trockengehalt in der Papierbahn erhöht und damit die Nachfrage nach thermischer Energie gesenkt.

Mit Blick auf die Ressourcenverknappung und die Einhaltung der Emissionswerte werden neue Konzepte, wie bspw. die wasserlose Papierherstellung immer attraktiver. Generell sind hohe Einsparpotenziale bei der Entwässerung und Trocknung der Papierbahn vorhanden. Eine Vielzahl, unterschiedlicher Verfahren sind verfügbar und insbesondere die energieeffiziente Trocknung stellt einen Schwerpunkt in der Forschung dar. Aber auch im Prozessschritt Veredeln lässt sich durch den Einsatz von Beschichtungs- und Farbrückgewinnungssystemen der Feststoffabfall reduzieren und dadurch Energie einsparen.

Tab. 17
Maßnahmen zur elektrischen Energieeinsparung im Bereich Papiermaschine

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
P _{Elektro} 1	Einsatz eines Beschichtungs-Farbrückgewinnungssystems	45		
Summe		45	-	-

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
P _{Therm} 1	Siebreinigung mit warmen Wasser zur besseren Entwässerung in der Trockenpartie		70	
P _{Therm} 2	Nutzung von Axialgebläsen zur Wärmerückgewinnung für die Zuluft der Trockenhaube		26	
P _{Therm} 3	Einsatz von Langspalt-(Schuh)-Pressen	200		
P _{Therm} 4	Impulstrocknung mittels heißer Presse	n/a		
P _{Therm} 5	Gasbetriebene IR-Trockner	n/a		
P _{Therm} 6	Rieselturm mit Yankee-Haube	50		
P _{Therm} 7	Condebelt Drying (Kondensatbandtrockner)	440		
P _{Therm} 8	Direkttrocknungs-Zylinderfeuerung	300		
P _{Therm} 9	kombinierte Kontakt-, Konvektionstrocknung	40		
P _{Therm} 10	Messung des Taupunktniveaus in der Trockenhaube			10
P _{Therm} 11	Einsatz von Thermokompressoren		5	
P _{Therm} 12	Abwärmenutzung der Nachtrocknungspartie zur Klar- und Siebwassererwärmung	40		
P _{Therm} 13	Rückgewinnung der Wärme aus Infrarot-Abluft		n/a	
Summe		1070	31	10

Tab. 18
Maßnahmen zur thermischen Energieeinsparung im Bereich Papiermaschine

In der folgenden Tabelle sind die kombinierten Maßnahmen aus dem Bereich Prozessmaschine aufgeführt. Maßnahmen, welche noch nicht in der breiten Industrie ihre Anwendung finden und spezielle Möglichkeiten für die Tissue-Produktion sind im Gesamtergebnis nicht beachtet.

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
P _{Kombi} 1	Prozessmonitoring			177
P _{Kombi} 2	Polymerbeschichtung von Zellulosefasern		96	
Summe		-	96	177

Tab. 19
Maßnahmen mit elektro- und thermischer Energieeinsparung im Bereich Papiermaschine

Zusammenfassend sind hier die größten Einsparpotenziale im Bereich der Trocknung bzw. der Pressenpartie einer Papiermaschine zu sehen. Alle gewählten Maßnahmen können bereits in der Anlagenplanung berücksichtigt werden. Zusätzlich zu eruierten Potenzialen lässt sich durch den Einsatz eines Monitoringsystems nicht nur die Qualität im Prozess verbessern, sondern auch Energie einsparen.

4.2.3 Infrastruktur (inkl. übergreifender Maßnahmen)

Die Maßnahmen, welche im Bereich Infrastruktur angesiedelt sind, lassen sich meist schnell umsetzen und können so zeitnah effizient wirken. Aufgrund fehlender Datenbasen und teilweise schwieriger Prozessabgrenzungen ist das Beziffern vieler Maßnahmen nur schwer möglich.

Tab. 20
Maßnahmen zur elektrischen
Energieeinsparung im Bereich
Infrastruktur

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
I _{Elektro} 1	Erneuerung der Druckluftherzeugungsanlage	20		
I _{Elektro} 2	Druckniveau-Optimierung			1
I _{Elektro} 3	Minimierung von Druckluftleckagen			n/a
I _{Elektro} 4	Optimierung der Lüftungsanlage		n/a	
I _{Elektro} 5	Energetisch optimiertes Motoren- und Pumpensystem (keine Überdimensionierung)		20	
I _{Elektro} 6	Regelmäßige Wartung Keilriemenspannung			n/a
I _{Elektro} 7	Verringerung der Pumpenleistung durch Einengung der Wasserkreisläufe		2	
I _{Elektro} 8	Optimierte Fahrweise von Gegendruckturbinen			n/a
I _{Elektro} 9	Umstellung auf moderne Hochleistungsschmierstoffe für Kälte- und Luftkompressoren etc.			n/a
I _{Elektro} 10	Modernisierung von Beleuchtung und automatische Abschaltung			n/a
I _{Elektro} 11	Batteriespeicher	n/a		
I _{Elektro} 12	Nutzung von Dampfturbinen unter Nutzung von Medien mit niedriger Siedetemperatur zur Stromerzeugung	n/a		
	Summe	20	22	1

Im thermischen Bereich seien vor allem die Regulierung von Hallentemperatur und Luftwechselrate zu nennen, wenngleich diese Maßnahmen mit Vorsicht zu genießen sind. Die Kondensatrückführung zum Kraftwerk bietet sich an, um das Frischwasser mit dem wärmeren Kondenswasser zu substituieren.

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
I _{Therm} 1	Geschlossenes Wassermanagementsystem	n/a		
I _{Therm} 2	Wärmedämmung von Anlagen und Verbindungsstücken, Dampfverteilsystem		2	
I _{Therm} 3	Erneuerung der Dampfleitungen	n/a		
I _{Therm} 4	Leckagen-Reparatur (Dampfleitungen)			2
I _{Therm} 5	Regelmäßige Wartung des Kondensatableiters			2
I _{Therm} 6	Nutzung der Abwärme zur Klärschlamm-trocknung	n/a		
I _{Therm} 7	Nutzung von Wärmetauschern zur Erwärmung der Frischluft		10	
I _{Therm} 8	Innovative Wärmetauschertechnologie (Abwasser im freien Gefälle ableiten)"	n/a		
I _{Therm} 9	Kondensatrückführung zum Kraftwerk	20		
I _{Therm} 10	Optimierte Fahrweise von Gegendruckturbinen			n/a
I _{Therm} 11	Optimierung im Kondensatsystem (Überprüfung der Ventile, Vermeidung der Verluste)		n/a	
I _{Therm} 12	Optimierung und regelmäßige Wartung der Kühlsysteme			3
I _{Therm} 13	Dämmung Dächer		n/a	
I _{Therm} 14	Reduzierung der Hallentemperatur			98
I _{Therm} 15	Reduzierung der Luftwechselrate für die Produktionshalle			62
I _{Therm} 16	Torluftschleieranlagen			2
I _{Therm} 17	Abwärmenutzung zur Schlamm-trocknung oder Aufbereitung von entwässerter Biomasse		30	
	Summe	20	42	169

Ergebnisse

Tab. 21
Maßnahmen zur thermischen Energieeinsparung im Bereich Infrastruktur

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
I _{Kombi} 1	Licht und Temperatursteuerung	n/a		
	Summe	-	-	-

Tab. 22
Maßnahmen mit elektro- und thermischer Energieeinsparung im Bereich Infrastruktur

4.2.4 Alternative Energiequellen

Die nachfolgenden Maßnahmen, welche an sich der Infrastruktur zugeordnet werden können, wurden hier thematisch als „Energieerzeugung“ von den obigen „Energienutzern“ separiert.

Tab. 23
Maßnahmen zur elektrischen Energieeinsparung im Bereich Infrastruktur

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
E _{Elektro} 1	Windkraft	n/a		
Summe		-	-	-

Tab. 24
Maßnahmen mit elektro- und thermischer Energieeinsparung im Bereich Infrastruktur

Bereich	Maßnahme	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]
E _{Kombi} 1	Optimierte Fahrweise von Gasturbinen bei eigener Strom-Wärme-Erzeugung			n/a
E _{Kombi} 2	Geothermie	n/a		
E _{Kombi} 3	Solarthermie	n/a		
E _{Kombi} 4	BHKW	10-15%		
E _{Kombi} 5	Effizienter Rückgewinnungskessel im BHKW	n/a		
E _{Kombi} 6	Biogasverbrennungsanlage	n/a		
E _{Kombi} 7	Isolierung der Biogasanlage			n/a
E _{Kombi} 8	Rejektverbrennungsanlage zur Wiederverwendung und Energieerzeugung	165		
E _{Kombi} 9	Verbrennung von Abfällen und Schlämmen aus DIP Anlage zur Energieerzeugung	n/a		
E _{Kombi} 10	Industriekläranlage (anaerobe Abwasserreinigung) mit Energierückgewinnung (Biogas)	n/a		
Summe		-	-	-

Alternative Energiequellen können bspw. fossile Brennstoffe teilweise ersetzen. Als Energieerzeuger fallen diese Maßnahmen bei der weiteren Betrachtung vorerst raus, da diese nicht zum Energiebilanzkreis der Fabrik gehören.

4.3 Gesamtergebnis

Ergebnisse

In den vorhergehenden Abschnitten konnten Möglichkeiten, die der Energieeffizienz im Unternehmen dienen, eruiert und verifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen Potenziale auf, an welcher Stelle sich Kosten durch die Senkung des Energiebedarfs einsparen lassen. Die Zusammenfassung zeigt die folgende Tabelle:

Tab. 25
Gesamtergebnis Darstellung

Bereich	P [kWh/t]	Q [kWh/t]	R [kWh/t]	Summe [kWh/t]
$\Sigma S_{\text{Elektro}}$	143	8	13	
ΣS_{Therm}	-	5	-	
ΣS_{Kombi}	65	-	-	
$\Sigma P_{\text{Elektro}}$	45	-	-	
ΣP_{Therm}	1070	31	10	
ΣP_{Kombi}	-	96	177	
$\Sigma I_{\text{Elektro}}$	20	22	1	
ΣI_{Therm}	20	42	169	
ΣE_{Kombi}	-	-	-	
Summe Elektrisch	208	30	14	Σ 252
Summe Thermisch	1090	78	179	Σ 1347
Summe Kombi	65	96	177	Σ 338
Gesamtsumme	1363	204	370	Σ 1937

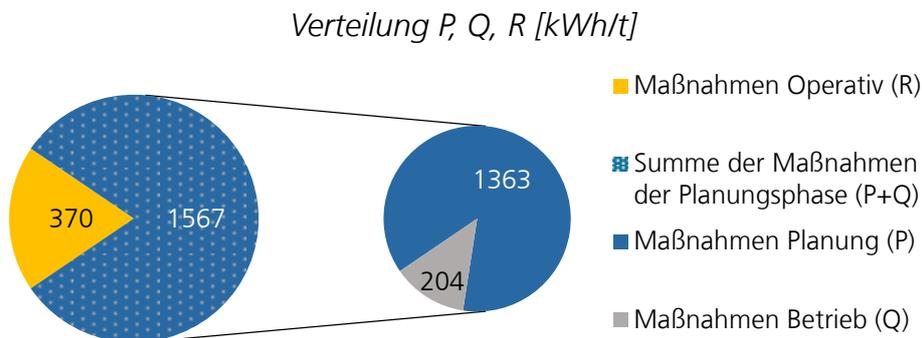
Das Ergebnis gibt als theoretischen Wert den **Umfang** der erschließbaren Einsparpotenziale an und erfüllt so den Untersuchungsauftrag einer fundierten Schätzung des **adressierbaren Energieeffizienzpotenzials**. Unter welchen Voraussetzungen einzelne Effekte in der Praxis erzielt werden können und welche Einsparungen sich in Kombination mehrerer oder aller Maßnahmen unter Berücksichtigung kumulativer Effekte erreichen lassen, war nicht Gegenstand der Untersuchung und müsste bei Bedarf in einer weiteren Studie explizit untersetzt werden.

Ziel war die Darstellung der Einsparpotenziale, die sich bereits bei der Anlagenplanung realisieren lassen, in Gegenüberstellung zu denen im Anlagenbetrieb. Unter der Annahme, dass die Maßnahmen, welche im **Betrieb (Q)** durchgeführt werden können, auch bereits in der **Planung (P)** Berücksichtigung finden, kann **in Summe (P und Q)** ein Einsparpotenzial von ca. **81 %** (entspricht 1567 kWh/t Papier) des Gesamtumfangs von 1937 kWh/t Papier adressiert werden.

Die Maßnahmen, die ausschließlich der **Planung** zugeordnet werden konnten, haben einen Anteil von ca. **70 %** (entspricht 1363 kWh/t Papier) am Gesamteinsparpotenzial.

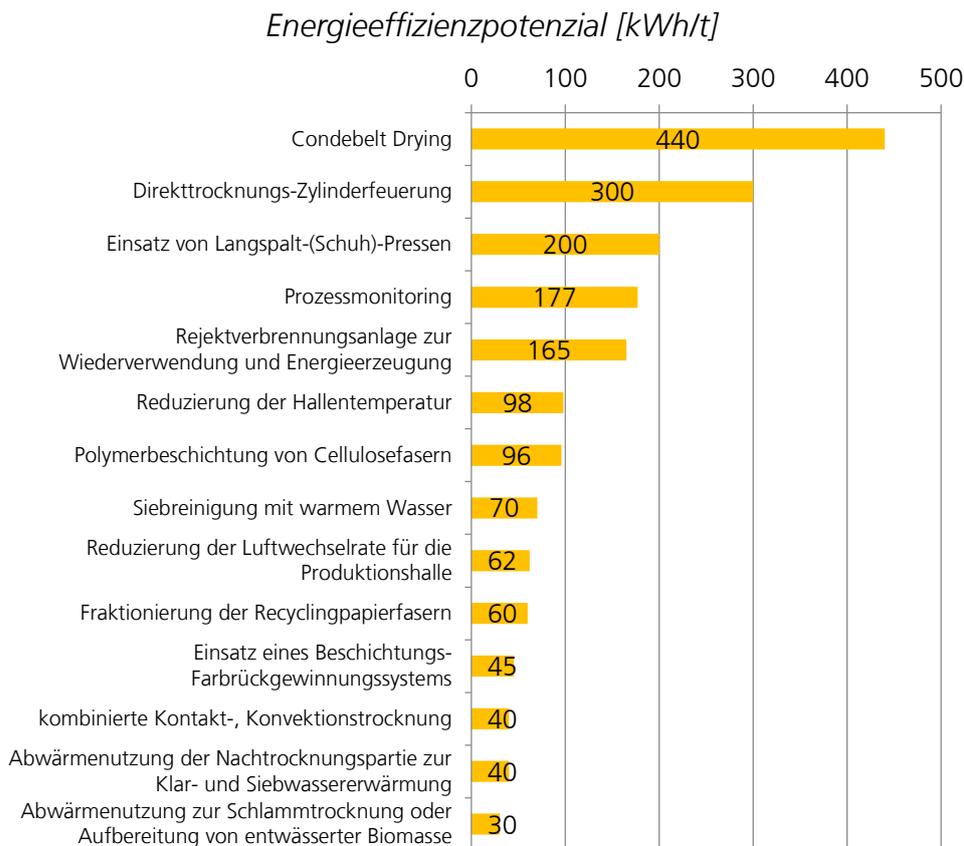
Mit zusätzlichen Maßnahmen, die auf einen **betrieboptimierten Anlagenbetrieb (R)** zurückführen sind (beispielsweise energieeinsparendes Handeln, Optimierung der Prozessparameter), wird ein Einsparpotenzial von ca. **19 %** (entspricht 370 kWh/t Papier) des Gesamtumfangs adressiert.

Abb. 14
Prozentuale Verteilung aller Maßnahmen zum Gesamtpotenzial



Die Maßnahmen, die ausschließlich der **thermischen Energieeinsparung** zugeordnet wurden, haben einen Anteil von **70 %** (entspricht 1347 kWh/t Papier) am Gesamteinsparpotenzial. Die **elektrischen Einsparungen** haben einen Anteil von ca. **13 %** (252 kWh/t Papier). Die Restlichen **17 %** sind **kombinierte Maßnahmen** (therm. und elektr.) und gehen mit einem Wert von 338 kWh/t in die Gesamtsumme ein. Die Maßnahmen mit dem höchsten Einsparpotenzial (Top 14) sind nachfolgend aufgelistet:

Abb. 15
Energieeffizienzpotenziale sortiert nach der Höhe der möglichen Einsparungen



Maßnahme Nr. 5: *Rejektverbrennungsanlage zur Wiederverwendung und Energieerzeugung* wurde in den Berechnungen aufgrund von Zahlen aus einem speziellen Einzelbeispiel nicht berücksichtigt. Zudem stellt die Nutzung von Biogas aus Abfallstoffen keine direkte Energieeinsparung dar, da die Abfallstoffe nicht zum hier betrachteten Energiebilanzkreis gehören.

Insgesamt führen in Relation zur Referenz-Papierfabrik die Umsetzungen aller Maßnahmen mit den bezifferten **Maximaleinsparungen** zu einer Reduktion des Energieverbrauches um **bis zu 80 %** (1937 kWh/t Papier).

Aufgrund der Bandbreite, der in der Realität erzielbaren Einspareffekte, werden nur 50 % der maximalerreichbaren Effekte in die Betrachtungen einbezogen. Daraus resultierend kann ein Einsparungspotenzial von **40 %** (ca. 969 kWh/t Papier) angenommen werden. Beispielsweise hat der Einsatz einer Schuhpresse einen Effekt auf die Trocknungspartie. In Kombination mit einem Kondensatbandtrockner (Condebelt) sind jedoch die Potenziale nach unten zu korrigieren.

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die Einsparungen aller betrachteten Maßnahmen nur eine begrenzte Aussagekraft haben und daher als Maximalwerte zu betrachten sind. Die Gründe dafür sind:

- Beim Vergleich der lokalisierten Möglichkeiten sind die Rahmenbedingungen nicht außer Acht zu lassen. Eine direkte Übernahme der Maßnahmen in die Produktion ist nur bedingt möglich, da die Produktionsstrukturen und Rahmenbedingungen zwischen den Unternehmen verschieden sind und diese einen Einfluss auf die Höhe der Einsparpotenziale haben. Die Rahmenbedingungen betreffen insbesondere Papiertyp, Integration der Stoffaufbereitung/-herstellung und notwendige Verfahrenstechnik bzw. Produktionstechnologie. Die aufgezeigten Effekte stellen eine allgemeine Tendenz dar, was bei stabilen Produktions- und Umweltbedingungen erreicht werden kann.
- Die Effekte der einzelnen Maßnahmen geben keine Auskunft darüber, ob dieser praktische Einsparungswert aus einem Unternehmen stammt, welches noch keine Schritte unternommen hat, um effizienter zu produzieren, oder ob dieser aus einer energiebewussten Papierfabrik stammt. Die angegebenen Effekte neigen zur Übertreibung.

Um die Aussagekraft der bezifferten Effekte der Maßnahmen verbessern zu können, bedarf es einer erweiterten Datengrundlage. Für jede Maßnahme wären hierfür folgende Informationen notwendig:

- Erzielter Einsparungseffekt der Maßnahme aus mehreren Papierfabriken mit unterschiedlichen Produktvarianten. Da die Papierherstellung ein sehr wärmeintensiver Prozess ist und Energie hauptsächlich dazu verwendet wird, um Wasser aus der Papierbahn zu verdrängen, wären Werte wünschenswert, die einen Aufschluss über das Wasser-Fasergemisch geben.
- Nähere Angaben zu den Unternehmen, welche diese Maßnahme umgesetzt haben. Dazu gehören Daten zu Ausstoßmenge und Energieverbrauch sowie Informationen zu den spezifischen Energieverbräuchen vor und nach der Umsetzung.
- Genaue Branchenverbrauchswerte unterteilt in Größenklassen

Hinzu sei erwähnt, dass sich das Referenzblatt zu den besten verfügbaren Techniken bei Energiepotenzialangaben oft auf Beispielfabriken stützt, was sowohl eine Verallgemeinerung als auch eine Ableitung von Potenzial-Korrelationen schwierig macht.

5 Fazit

Das Thema Energieeffizienz und Minderung der Treibhausgase ist zu einem zentralen Thema in der Gesellschaft geworden. Besonders die energieintensiven Industriezweige Baustoffe, Chemie, Glas, Nichteisenmetalle, Papier und Stahl stehen immer wieder vor besonderen Herausforderungen, da sie durch ihre Vorleistungen in der Wertschöpfungskette einen Großteil des Energieeinsatzes und der Treibhausgasemissionen schultern.⁵¹

Im Laufe der letzten Dekaden hat sich in der Papierbranche viel verändert. Es wurde viel für die Verbesserung des spezifischen Energieverbrauches getan. Haupttreibende Kräfte für eine bessere Energieeffizienz waren wirtschaftlicher Natur (kostengetrieben), bspw. höhere Rohstoffpreise, ein Anstieg der Löhne um 30 % und explosionsartig gestiegene Energiekosten. Dabei sind die Absatzmengen bei z. T. sinkenden Verkaufspreisen im gleichen Zeitraum nahezu konstant geblieben. Jede Energieeinsparung (Herstellungskostenanteil zwischen 10 und 12 %) ist ein Vorteil gegenüber dem Wettbewerber. Das Thema Energieeffizienz nimmt einen großen Stellenwert in der Branche ein. Das ist unter anderem daran zu erkennen, dass spezielle Arbeitsgruppen etabliert sind, welche an neuen Konzepten und Technologien für eine effizientere Produktion forschen.

Die Ergebnisse sind positiv. Lag der spezifische Energieverbrauch 1955 noch bei rund 8.200 kWh/t, beträgt er heute knapp 2.800 kWh/t.⁵² Untermauert werden diese Zahlen mit den dahinter stehenden Forschungs- und Entwicklungskosten, welche sich auf über 150 Mio. Euro pro Jahr (Holzwaren-, Papier-, Pappe- und Druckwarenindustrie) belaufen.⁵³ Jedoch stagniert die Anzahl der Unternehmen, welche in kostensenkende Prozessinnovationen investieren. Lag der Anteil in 2009 noch bei knapp 30 %, investierten 2016 nur noch ca. 18 % in neue Technologien. Das kann zum einen daran liegen, dass die Einführung effizienter Technologien, welche mit einfachen Maßnahmen umgesetzt werden können, bereits zum Großteil abgeschlossen sind, zum anderen, dass die Investitionsaufwände für neue Technologien enorm hoch sind und vor allem kleine und mittelständige Unternehmen den finanziellen Rahmen dazu nicht bereitstellen können.

Rund 3000 verschiedene Papiersorten – unterteilt in vier Sortenbereiche Verpackungspapiere, Graphische Papiere, Hygienepapiere und Papiere für technische und spezielle Anwendungen – werden deutschlandweit an 157 Standorten täglich produziert.⁵⁴ So breit gefächert wie die Anzahl der Papiersorten sind auch die dazugehörigen Energieverbräuche unter den Unternehmen. Die Spannweite für elektrische Energie reicht von 300 kWh/t für Verpackungspapiere bis zu 3000 kWh/t für Holzfreies Spezialpapier. Die Wärmeeinträge liegen zwischen 700 kWh/t und 4500 kWh/t.

Aufgrund dieser besonderen Prozess- und Energiesensitivität der Branche lässt sich der Einsatz neuer effizienter Technologien nicht auf jedes Unternehmen gleich anwenden. Die Auswertung des Fragebogens hat ergeben, dass auch hier die Aussagen weit auseinander gehen. Bezüglich der Maßnahme „Airless-Drying“ bspw. (siehe Beschreibung in Anlage C) reichten die Antworten von „für unseren Prozess nicht relevant“ bzw. „nicht anwendbar“ bis hin zu „umgesetzt“.

⁵¹ VDP, 2017

⁵² VDP, 2017

⁵³ Statista, 2018

⁵⁴ VDP, 2017

Energieeffizienzpotenziale sind in allen Bereichen der Papierherstellung noch nicht ausgeschöpft. Wiederrum gibt es aber auch einige Technologien, welche in der Branche bekannt und bereits in einem Großteil der Unternehmen ihren Einsatz finden. Hierzu zählt bspw. der Einsatz von Langschuhspaltpressen (Potenzial bis zu 200 kWh/t). Auf der anderen Seite bestehen Potenziale bei Anwendung neuer Verfahren, wie der Einsatz einer Direkttrocknungs-Zylinderfeuerungsanlage (Potenzial bis zu 300 kWh/t Papier).

Eine große Anzahl an Maßnahmen, bei denen hohe Einsparpotenziale mit einer spürbaren, monetären Nutzenerwartung einhergehen, befindet sich teilweise schon in der Umsetzung. Hier sind bspw. die Papierbahnerwärmung mittels Dampfblaskasten oder auch die Modernisierung des Dampfverteilungsnetzes zu nennen.

Die Potenziale zur Rückgewinnung der thermischen Energie sind enorm. Wenigstens 50 %⁵⁵ der aus der Trockenpartie abgeführten Energie kann mit einem effizienten Wärmerückgewinnungssystem wieder verwertet werden. Die Rückgewinnungsmöglichkeiten für elektrische Energie sind geringer einzustufen. Möglichkeiten zu erheblichen Verbesserung des Primärenergieverbrauchs sind in neuen Technologien und der Technologiesubstitution zu suchen. Dies wird bei den vorgestellten Maßnahmen im Bereich Papiermaschine besonders deutlich. Jedoch sind die Umsetzungen dieser mit hohem Aufwand, hohen Investitionskosten und Risiken verbunden.

An dieser Stelle sei nochmals verdeutlicht, dass die Spanne zwischen durchschnittlichen und theoretischen Energieverbräuchen recht hoch sein kann, wie folgende exemplarische Grafik zeigt:

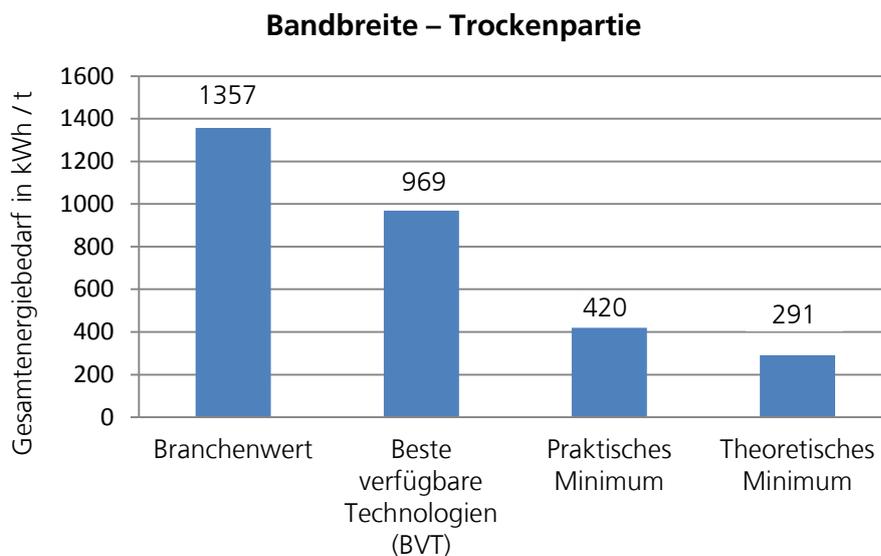


Abb. 16
Energiebandbreite am Beispiel der Papiertrocknung⁵⁶

Die Grafik entstammt einem Auftrag zu Schätzungen des gegenwärtigen Energieverbrauchs der US-amerikanischen Zellstoff- und Papierindustrie. Es könnte viel Energie gespart werden, wenn effizientere Arten von Technologien zur Herstellung von Zellstoff und Papier sowie Best Practices eingesetzt würden.

⁵⁵ UBA, 2013

⁵⁶ Jacobs, 2006

Branchenwert:

Eine Schätzung des aktuellen durchschnittlichen Energieverbrauchs nach Werksflächen / Technologien auf der Grundlage des MECS (Manufacturing Energy Consumption Survey) von 2002.

BVT:

Eine Schätzung des Energieverbrauchs nach Werksbereichen / Technologien, wenn "Best Available" -Praktiken angewendet würden.

Praktisches Minimum:

Eine Schätzung in ausgewählten Werksbereichen / Technologien, wie hoch der Energieverbrauch wäre, wenn neue Technologien entwickelt werden könnten, um den Energieverbrauch auf ein "praktisches Minimum" zu senken, indem fortschrittliche Technologie verwendet wird, die derzeit nicht praktiziert wird. Der Unterschied zwischen dem heutigen Durchschnitt und den "praktischen Minimaltechnologien" stellt einen Bereich dar, der genutzt werden könnte, um Forschungsgelder zur Entwicklung von Technologien zu verwenden, die zu einem geringeren Energieverbrauch führen.

Theoretisches Minimum:

Eine Schätzung des Energieverbrauchs ausgewählter Werksflächen / Technologien, wenn "minimale theoretische" Energie erreicht werden könnte, d. h. der Energieverbrauch, der aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik berechnet wird.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Kernaussagen zu den definierten Untersuchungsschwerpunkten treffen:

(H1) Veränderungen im Unternehmen auf Basis einer genehmigungsbedürftigen Planung erzielen größere Einsparungen als einzelne Maßnahmen, die ausschließlich im Betrieb durchgeführt werden.

Diese Hypothese lässt sich mit folgenden Aussagen der Studie bestätigen:

- 31 der 65 verbleibenden Maßnahmen sind der Kategorie P zugeordnet und erfordern hohe Investitionen oder eine Genehmigung bei der Planung. 17 der 65 Maßnahmen sind mit kurzen Anlagenstilllegungen im Betrieb durchzuführen, können jedoch in der Planungsphase der Anlagen auch berücksichtigt werden.
- Unter der Annahme, dass die Maßnahmen, welche im Betrieb (Q) durchgeführt werden, auch bereits in der Planung (P) Berücksichtigung finden, kann in Summe (P und Q) ein Einsparpotenzial von 81 % (entspricht 1567 kWh/t) des Gesamtpotenzials von 1937 kWh/t adressiert werden.
- Die Maßnahmen, die ausschließlich der Planung (P) zugeordnet werden konnten, haben einen Anteil von 70% (entspricht 1363 kWh/t) am Gesamteinsparpotenzial.
- 17 Maßnahmen sind Verbesserungen die ohne Investitionen und Stilllegungen erfolgen. Sie weisen ein Einsparpotenzial von 19 % mit ca. 370 kWh/t am Gesamtpotenzial auf.

Der Beschaffenheit des Produktionsprozesses und dem hohen Automatisierungsgrad geschuldet, sind die meisten Verbesserungen mit Stilllegungen verbunden und müssen in den Betriebsablauf eingeplant werden. Die größten Einsparungen erfordern eine Integration von neuen Anlagenmodulen deren Umsetzung jedoch mit hohen Investitionskosten und ggf. Genehmigungsaufwand einhergeht.

Die durch Mitarbeiter beeinflussbaren Energieeinsparungspotenziale liegen in der Überwachung und Optimierung der Betriebsparameter und Wartung der Anlagen.

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads ist der Einfluss der Mitarbeiter auf die Prozessverbräuche jedoch eher gering.

Fazit

Energiedaten werden in alle befragten Unternehmen erfasst und überwacht. Außerdem finden die Energiemanagementnorm ISO 50001 (100 % der Befragten) und die Umweltmanagementnorm ISO 14001 (80 % der Befragten) Anwendung. In Verbindung mit den Zielen und Maßnahmen, welche in den jeweiligen Umwelterklärungen veröffentlicht werden, ist ein etablierter Verbesserungsprozess in den Betrieben hinsichtlich Energieeffizienz und Verringerung von Emissionen zu erkennen.

(H2) Durch die Nutzung von Speichern und Kreislaufsystemen können Energieeffizienzpotentiale erschlossen werden.

Diese Hypothese lässt sich mit folgenden Aussagen der Studie bestätigen.

Speicher ermöglichen die Nutzung der Abwärme, die nicht direkt wieder in den Prozess zugeführt wird. Die Verwendung der zurückgewonnenen Wärmeenergie für die Niedertemperaturprozesse oder Heizung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Der Energiespeichertank (Heißwasser) kann sogar zum zentralen Punkt im Unternehmen werden. Auch Kältespeicher können ihren Einsatz finden. Eisbänke eignen sich aufgrund der latenten Schmelzwärme gut als Energiespeicher.

(H3) Anteil des Energieeinsatzes (Strom und Wärme) ist stark abhängig vom produzierten Papier und von der Anlagentechnik.

Diese Hypothese lässt sich anhand der Studie voll und ganz bestätigen. Verpackungspapiere haben einen wesentlich geringeren Energieeintrag, als holzfreies, gebleichtes Grafikpapier. Aufwändigere Prozessschritte und vorgelagerte Reinigungsmaßnahmen beeinflussen den Wärme- und Stromeintrag der entstehenden Produkte maßgeblich (vgl. Kapitel 2.4).

Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten:

- Papierfabrikbranche ist eine sehr energiebewusste Branche, welche in den letzten Jahrzehnten große Erfolge beim Thema Energieeffizienz erzielt hat.
- Es gibt lediglich 12 (ungewichtete Aussagen) der 83 Maßnahmen im Maßnahmenkatalog, die einen UG1 haben, also der Allgemeinheit der Papierfabriken unbekannt sind. Davon ist wiederum ein Großteil der Maßnahmen in den befragten Unternehmen nicht anwendbar, da sie sich auf spezielle Prozesse beziehen (Tissueherstellung).
- Große Einsparungen lassen sich nur durch Technologiesubstitution erzielen.
- Das operative Energieeinsparpotenzial wird als gering eingestuft.
- In der Papierindustrie besteht weiteres Potenzial, um effizienter zu produzieren. Mit der Einführung neuester Technologien, bspw. der Blitzkondensation mit Dampf, könnten zukünftig die CO₂-Emissionen um bis zu 50 % und der Primärenergieeinsatz um bis zu 20 % gesenkt werden.⁵⁷

Die Ergebnisse dieser Studie sollen dem sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft einen Überblick geben, in welchem Umfang Energieeinsparpotenziale in der Papierherstellung, vor allem in der Planungsphase, noch bestehen.

⁵⁷ Austropapier, 2013

Quellenverzeichnis

APV (2016): "Von der Mühle zur Papierfabrik", Teil 1. Online verfügbar unter: http://apv-dresden.de/wp-content/uploads/2016/04/WBP_2016-05_288-291_Keller5.pdf. Zuletzt geprüft am 03.04.2018.

Austropapier (2013): Jahresbericht der Österreichischen Papierindustrie 2013. [online] [Zugriff am 14. Mai 2018]. Verfügbar unter: http://www.papierholz-austria.at/_images/infocenter/Nachhaltigkeitsbericht_2013.pdf

Becker Büttner Held (Hrsg.) (2018): Emissionshandel und Umweltrecht. Newsletter. Online verfügbar unter: https://www.beckerbuettnerheld.de/fileadmin/user_upload/documents/newsletter/Newsletter_Emissionshandel/27_Newsletter_zum_Emissionshandel_und_Umweltrecht.pdf.pdf. Zuletzt geprüft am 01.06.2018.

Bellante, Antonio; Georg Leinfelder GmbH (2013): Herausforderungen für Unternehmen im Bereich Energieeffizienz. Kurzbericht. Online verfügbar unter: http://www.schwedt.eu/media_fast/457/130926_LEIPA_Energieeffizienz_SDT_Public.pdf. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.

Bienert et al. (2013): Gewinnung von Prozesswärme aus Abwärme. Forschungsbericht. Online verfügbar unter: http://pfi.pfi-germany.de/fileadmin/user_upload/W2PHeat_63_EN_Ver%C3%B6ffentlichung.pdf. Zuletzt geprüft am: 24.04.2018.

Blesl, M.; Kessler, A. (2013): Energieeffizienz in der Industrie, Springer Vieweg, 2013

Blick: "Beispielzahlen: Wozu wie viel Wasser gebraucht wird und einige "Wasser-Weltrekorde". Onlineressource. Verfügbar unter <http://www.blick.it/angebote/primarmathe/ma0424.htm>. Zuletzt geprüft am 07.05.2018.

Blum, Oliver; Maur, Bernd; Öller, Hans-Jürgen (2007): Revision of Best Available Technique Reference Document for the Pulp & Paper Industry – Use of Energy saving Techniques. Bericht Nr. 4540 (1) PTS München.

Brunke, Jean Christian Ulf (2016): Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland – Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkurven. Stuttgart. Diss. Online verfügbar unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9259/5/BRUNKE_ENERGIEEINSPARKOSTENKURVEN_209.pdf. Zuletzt geprüft am 07.02.2018

Bund (2018): Energiewende. Onlineressource. Verfügbar unter: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html. Zuletzt geprüft am 22.01.2018.

Canada (2003): Francis, D.W.; Towers, M.T.; Browne, T.C.: "Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry – An Energy Benchmarking Perspective", Canada, 2003

Dispan, Jürgen, Vassiliadis, Michael, hrsg. von Industriegemeinschaft Bergbau, Chemie, Energie (2014): Papiererzeugung in Deutschland – Eine Branchenanalyse. Hannover. Online verfügbar unter: http://www.imu-institut.de/data/publication/papierindustrie-in-deutschland/at_download/file. Zuletzt geprüft am 02.05.2018.

Effizienz Agentur Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2005): "Die neuen Erfolgsfaktoren der Papierindustrie". Online verfügbar unter: https://www.pius-info.de/dokumente/download/efa_0905_efa_papierbroschuere_1.pdf. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.

EnergieAgentur.NRW (2010): Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie – Nützliche Informationen und Praxisbeispiele für Unternehmen. Online verfügbar unter: <https://broschueren.nordrheinwestfalendirekt.de/broschuerenservice/energieagentur/eff>

iziente-energienutzung-in-der-papierindustrie-nuetzliche-informationen-und-praxisbeispiele-fuer-unternehmen/1233. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.

Quellenverzeichnis

European Commission (2015): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Luxembourg Publications Office of the European Union. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken/sevilla-prozess/bvt-merkblaetter-durchfuehrungsbeschluesse>. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.

Fleiter et al. (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer Verlag, Stuttgart. Online verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2013/Umweltforschungsplan_FKZ-370946130.pdf. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.

IEKP (2018): "Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm". Online verfügbar unter: http://m.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/klimapaket_aug2007.pdf. Zuletzt geprüft am 27.01.2018.

IIP Institute for Industrial Produktivity: „Condebelt Drying“, „Direct drying Cylinder Firing“, Airless Drying“. Technology Database. Onlineresource. <http://ietd.iipnetwork.org>. Zuletzt geprüft am 05.02.2018.

Jacobs (2006): "Pulp and Paper Industry – Energy Bandwidth Study", Georgia (USA), 2006. Online verfügbar unter: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/doe_bandwidth.pdf. Zuletzt geprüft am 10.04.2018.

Jung Holger; Hutter, Achim (2010): Energierückgewinnung in der Papierindustrie. Online verfügbar unter: http://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/PTSPAPER/01_Ueber_uns/Dokumente/Veroeffentlichungen/2010_HIT_Energierueckgewinnung.pdf. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.

Jung, Holger; Kappen, Johannes (2013): Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie. Kolloquium „Effiziente Energienutzung“ im Rahmen der Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart (GREES). Papiertechnische Stiftung. Stuttgart.

Kramer, Klaas Jan et al. (2009): Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry. Online verfügbar unter: https://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Pulp_and_Paper_Energy_Guide.pdf. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.

Layer (2018): "Prozess der Papierherstellung". Onlineresource. Verfügbar unter: <https://www.layer-chemie.de/onlineschulungen/papierherstellung>. Zuletzt geprüft am 05.02.2018.

Ocken, Rüdiger (2016): "Von der Mühle zur Papierfabrik". Online verfügbar unter: http://apv-dresden.de/wp-content/uploads/2016/04/WBP_2016-05_288-291_Keller5.pdf. Zuletzt geprüft am 05.02.2018.

Papierfabrik Julius Schulte Söhne GmbH & Co. KG (2017): Umwelterklärung Januar 2017.

PTJ: Papiertrocknungsverfahren. Onlineresource. Online verfügbar unter: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2411586-2/*/*Papiertrocknungsverfahren.html?op=Wiki.getwiki&scope=all&search=Meeresenergie. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.

Rummel, Jürgen (2014): "Buy Smart+ - Beschaffung und Klimaschutz". Online verfügbar unter: https://lena.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Sonstige_Webprojekte/Lena/Dokumente/Downloads/2_Landesnetzwerktreffen/EP_211_Buy_Smart_Papier_ueberarbeitet.pdf. Zuletzt geprüft am 09.02.2018

- SAENA GmbH (Hrsg.) (2016): Energie, Effizienz, Strategie 2016. 7. Fachtagung der Sächsischen Energieagentur. Online verfügbar unter: https://crm.saena.de//sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/2016-06-16_SAENA_Tagung2016_Tagungsband_Final.pdf. Zuletzt geprüft am 7.4.2018
- Siemens (2017a): Fiber Industry im Wandel. In: Das Magazin (Siemens) 01.2017. Online verfügbar unter: <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/customer-magazine/2017/industry/otherassets/mag-fiber-de-final.pdf>. Zuletzt geprüft am 23.04.2018.
- Siemens (2017b): Effizienz steigern, Qualität verbessern, Energiebedarf senken. Online-ressource. Online verfügbar unter: <https://www.industry.siemens.com/verticals/global/de/papierindustrie/PublishingImages/sipaper-de.pdf>. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.
- Statista (2018): "Import und Export von Papier, Karton und Pappe im internationalen Vergleich im Jahr 2015 (in 1.000 Tonnen)" Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239767/umfrage/import-und-export-von-papier-und-pappe-ausgewaehelter-laender/>
Zuletzt geprüft am 08.02.2018.
- Steinbeis Papier GmbH (2016): Umwelterklärung 2016.
- Stumm, D.-R. (2007): "Untersuchungen zum chemischen Wasserrückhaltevermögen und zur Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von chemischen Additiven", Dissertation.
- UBA Umwelt Bundesamt (2013): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung – Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_zellst-off-papierindustrie_vv.pdf. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.
- UPM (2016): Umwelterklärung der UPM Group für das Jahr 2016. Online verfügbar unter: http://assets.upm.com/Responsibility/Documents/EMAS2016/UPM_GlobalEMAS_2016_DE.pdf. Zuletzt geprüft am 07.04.2018.
- VDP Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (Hrsg.) (2017): Papier 2017 – Ein Leistungsbericht. Bonn. Online verfügbar unter: <https://www.vdp-online.de/industrie/statistik.html>. Zuletzt geprüft am 16.02.2018.
- VDP Verband Deutscher Papierfabriken e.V.: "Papierschule". Onlineressource. Verfügbar unter: <http://www.papierschule.org/bereich-herstellung/produktion.html> und <http://www.papierschule.org/bereich-nachhaltigkeit/energie.html>. Zuletzt geprüft am 09.02.2018.
- VDW Verband der Wellpappen-Industrie e. V. (2018): "Geschichte der Papierherstellung". Onlineressource. Verfügbar unter: <http://www.wellpappe-wissen.de/wissen/papier/papierherstellung/geschichte-der-papierherstellung.html>. Zuletzt geprüft am 07.02.2018.
- Vogt, Monika et al. (2008): Leitfaden Energieeffizienz für die Papierindustrie. Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier. Duisburg. Online verfügbar unter: https://www.pius-info.de/dokumente/download/wh_0709_papierindustrie-leitfade_1_.pdf. Zuletzt geprüft: 02.05.2018.
- WWF (2018): "Aus Wäldern wird Papier". Onlineressource. Verfügbar unter: <http://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/papierverbrauch/zahlen-und-fakten/>
Zuletzt geprüft am 08.02.2018.

Anlage A: Fragebogen

.....
 Anlage A: Fragebogen

Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Allgemeine Angaben zu Ihrem Unternehmen

Wie hoch ist Ihre Produktionskapazität pro Jahr in Tonnen?

Wie viel Prozent der Produktionsmenge entfielen (2017) in etwa auf die unterschiedlichen Papiersorten?

Grafische Papiere	Verpackungspapiere	Hygienepapiere	Spezialpapiere
_____ %	_____ %	_____ %	_____ %

Wird in Ihrem Unternehmen aktuell eine Software zur Energiedatenerfassung eingesetzt? *

Ja Nein keine Aussage möglich

Welche Energie- oder Umweltnorm findet in Ihrem Unternehmen Anwendung? (Mehrfachnennung möglich)*

<input type="checkbox"/> ISO 50001 (Energiemanagementsystem)	<input type="checkbox"/> EMAS (Umweltmanagementsystem)
<input type="checkbox"/> ISO 14001 (Umweltmanagementsystem)	<input type="checkbox"/> Andere Auditierung (z.B. Sächs. Gewerbeenergiepass): _____
<input type="checkbox"/> DIN EN 16247-1 (Energieaudit)	
<input type="checkbox"/> keine	

Angaben zum Strom- und Wärmeverbrauch

Wie hoch war ihr spezifischer Wärmeverbrauch(kWh/t), Strombedarf(kWh/t), sowie Wasserverbrauch(m³/t) im Jahr 2017, jeweils pro Tonne produziertem Papier?

spez. Wärmebedarf	spez. Stromverbrauch	spez. Wasserverbrauch
_____ kWh/t	_____ kWh/t	_____ m ³ /t

Sollten Ihre Eingaben nicht zu den angegebenen Einheiten passen, schreiben Sie die verfügbare Einheit dazu.

Wie schätzen Sie die prozentuale Verteilung des Strom- und Wärmeverbrauches in Ihrem Unternehmen bezogen auf die verschiedenen Produktionsbereiche ein?

	Stoffaufbereitung	Papiermaschine	Veredlung	Sonstige Bereiche
Wärmeverbrauch [in %]				
Stromverbrauch [in %]				



Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Wie schätzen Sie den Umsetzungsgrad (Erläuterung¹ siehe unten) der folgenden Maßnahmen ein? Welches Potenzial in kWh pro Tonne Papier schätzen Sie, kann die jeweilige Maßnahme einsparen?

Pulper – (Stoffaufbereitung)

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Hochkonsistenzpulper mit hochdynamischer S-Wendel mit Spoiler und optimierte Drehzahl					
Optimierung der Büttengeometrie					
Optimierung des Rührwerks					
Erhöhung der Konsistenz im HC-Pulper					
Verbesserte Vertikalsortierer mit MultiFoil-Rotor und Stabsiebkorb					
Anpassung der Stoffdichte von Altpapier					
Fraktionierung der Recyclingpapierfasern					
HC-Aufschluss von Altpapier zur effizienten Weiterbearbeitung					
Nutzung von Axialgebläsen zur Wärmerückgewinnung für die Zuluft der Trockenhaube					
Wärmerückgewinnung aus heißem Bleichwasser					
Nutzung effizienter Siebkörbe und -Konzepte					
Minimiertes Reinigen und Sieben ohne Fraktionierung und weitere Faserbehandlung					
Schichtdesign (Nutzung verschiedener Faserrohstoffe)					
Verwendung optimierter Refiner (z.B. Mehrscheiben-, Doppelzylinderrefiner)					
Refiner mit höherem Nutzungsgrad optimal dimensionieren					
alternatives Säulendesign zur Rührkesselreaktion (Verzicht auf 1 Rührwerk)					
Hochzahngarnituren für Dispergierer					

¹ **Unbekannt:** Die Maßnahme wurde bis dato nicht betrachtet bzw. war bisher im Kontext des Papierherstellungsprozesses unbekannt.

Bekannt: Die Maßnahme wurde als möglicher Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz identifiziert. Derzeit ist eine Umsetzung allerdings nicht geplant.

Geplant: Die Umsetzung der Maßnahme wurde entschieden, d.h. eine Realisierung ist mittelfristig geplant.

In Umsetzung/Umgesetzt: Die Maßnahme befindet sich momentan in der Umsetzung bzw. wurde bereits umgesetzt.

Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Einsatz von Stufendiffusoren (selbstansaugend) zu Luftbeimengung beim Deinking					

Papiermaschine

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Prozess Monitoring					
Siebreinigung mit warmem Wasser					
Wasserlose Papierherstellung (mittels Luftstrom in der Siebparty)					
Einsatz von Langspalt-(Schuh)-Pressen					
Impulstrocknung mittels heißer Presse					
Gasbetriebene IR-Trockner					
Rieselturm mit Yankee-Haube					
Condebelt-Drying					
Direkttrocknungs-Zylinderfeuerung					
Airless-Drying					
kombinierte Kontakt-, Konvektionstrocknung					
Nutzung der Kondensatwärmeenergie zum Vorwärmen der Zuluft					
Messung des Taupunktniveaus in der Trockenhaube					
Wärmerückgewinnung aus Axialgebläsen					
Wärmerückgewinnung durch Vakuumgebläse					
Unterdrucksaugwalzpresse zur Tissuepapier-Trocknung					
Einsatz von Thermokompressoren (Reduzierung von Kondensatorverlusten)					
Thermokompressoren zur Brüdenkompression					
Papierbahnerwärmung mit Dampfblaskasten					
Abwärmenutzung der Nachtrocknungspartie zur Klar- und Siebwassererwärmung					
Polymerbeschichtung von Cellulosefasern					

Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Veredlung

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Wärmerückgewinnung aus der Infrarot-Abluft					
Einsatz eines Beschichtungs-Farbrückgewinnungssystems					

Infrastruktur

Druckluftversorgung, Wasser- und Dampfverteilung

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Erneuerung der Druckluftherzeugungsanlage					
Druckniveau-Optimierung					
Minimierung von Druckluftleckagen					
Optimierung der Lüftungsanlage					
Geschlossenes Wassermanagementsystem					
Wärmedämmung von Anlagen und Verbindungsstücken, Dampfverteilsystem					
Erneuerung der Dampfleitungen					
Leckagen-Reparatur (Dampfleitungen)					
Regelmäßige Wartung des Kondensatableiters					
Automatische Überwachung des Kondensatableiters					
Nutzung von Wärmepumpen					
Nutzung von Sekundärwärme und -Kondensat					
Abwärmenutzung zur Klärschlamm-trocknung					
Nutzung von Wärmetauschern zur Erwärmung der Frischluft					
Innovative Wärmetauscher-technologie (Abwasser im freien Gefälle ableiten)					
Kondensat-Rückführung zum Kraftwerk					

Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Motoren und motorennutzende Systeme, Kälte- und Kühltechnik

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Effiziente Motorleistung u.a. Anpassung bei Leerlauf, Austausch der Aggregate (eff. Frequenzumrichter für Motoren, Pumpen)					
Energetisch optimiertes Motoren- und Pumpensystem (Vermeiden von Überdimensionierung)					
Regelmäßige Wartung Keilriemenspannung					
Pumpen mit trocken laufenden Turbogebäsen					
Verringerung der Pumpenleistung durch Einengung der Wasserkreisläufe					
Optimierte Fahrweise von Gegendruckturbinen					
Nutzung von Dampfturbinen zur Stromerzeugung					
Optimierung im Kondensatsystem (Überprüfung der Ventile, Vermeidung der Verluste)					
Optimierung und regelmäßige Wartung der Kühlsysteme					
Umstellung auf moderne Hochleistungsschmierstoffe - Kältekompressoren - Luftkompressoren - Getriebemix					

Sonstige Infrastruktur und übergreifende Maßnahmen

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Modernisierung von Beleuchtung und automatische Abschaltung					
Licht und Temperatursteuerung					
Optimierung der Hallenlüftung					
Dämmung Dächer					
Reduzierung der Hallentemperatur					
Reduzierung der Luftwechselrate für die Produktionshalle					
Batteriespeicher					
Optimierte Fahrweise von Gasturbinen bei eigener Strom-Wärme-Versorgung					
Torluftschleieranlagen					

Energieeffizienzpotenziale in der Planung Papierherstellungsindustrie für Anlagentyp 6.2 (4. BImSchV)

Nutzung alternativer Energiequellen

Maßnahmenbeschreibung	Unbekannt	Bekannt	In Planung	In Umsetzung/ Umgesetzt	Geschätztes Potenzial in kWh/t
Geothermie					
Windkraft					
Solarthermie					
BHKW					
Effizienter Rückgewinnungskessel im BHKW					
Biogasverbrennungsanlage					
Isolierung der Biogasanlage					
Rejektverbrennungsanlage zur Wiederverwendung und Energieerzeugung					
Verbrennung von Abfällen und Schlämmen aus DIP Anlage zur Energieerzeugung					
Abwärmenutzung zur Schlamm-trocknung oder Aufbereitung entwässerter Biomasse					
Industriekläranlage (anaerobe Abwasserreinigung) mit Energierückgewinnung (Biogas)					

Anmerkungen

Kontaktdaten

Dürfen wir Sie für eventuelle Rückfragen zum Thema Energieeffizienz in der Papier-Industrie kontaktieren?

<input type="checkbox"/> Nein	
<input type="checkbox"/> Ja	Name: _____ Email: _____ Firma: _____ Telefon: _____

Anlage B: Auswertung der Umfrage

Anlage B: Auswertung der Umfrage

Bereich	Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
Stoffaufbereitung	Hochkonsistenzpulper mit hochdynamischer S-Wendel	■	■	■	■
	Optimierung der Büttengeometrie	■	■	■	■
	Optimierung des Rührwerks	■	■	■	■
	Erhöhung der Konsistenz im HC-Pulper	■	■	■	■
	Verbesserte Vertikalsortierer mit MultiFoil-Rotor und Stabsiebkorb	■	■	■	■
	Anpassung der Stoffdichte von Altpapier	■	■	■	■
	Fraktionierung der Recyclingpapierfasern	■	■	■	■
	HC-Aufschluss von Altpapier zur effizienten Weiterbearbeitung	■	■	■	■
	Wärmerückgewinnung aus heißem Bleichwasser	■	■	■	■
	Nutzung effizienter Siebkörbe und -Konzepte	■	■	■	■
	Minimiertes Reinigen und Sieben ohne Fraktionierung und weitere Faserbehandlung	■	■	■	■
	Schichtdesign (Nutzung verschiedener Faserrohstoffe)	■	■	■	■
	Verwendung optimierter Refiner (z.B. Mehrscheiben-, Doppelzylinderrefiner)	■	■	■	■
	alternatives Säulendesign zur Rührkesselreaktion (Verzicht auf 1 Rührwerk)	■	■	■	■
	Hochzahngarnituren für Dispergierer	■	■	■	■
	Einsatz von Stufendiffusoren (selbstansaugend) zur Luftbeimengung beim Deinking	■	■	■	■

- = gewichtet bewertete Aussagen
- = ungewichtete Aussagen

Bereich	Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
Papiermaschine	Nutzung von Axialgebläsen zur Wärmerückgewinnung für die Zuluft der Trockenhaube	Light	Green	Light	Light
	Prozessmonitoring	Light	Light	Light	Green
	Siebreinigung mit warmem Wasser	Light	Light	Light	Green
	Wasserlose Papierherstellung (mittels Luftstrom in der Siebparty)	Light	Light	Green	Light
	Einsatz von Langspalt-(Schuh)-Pressen	Light	Light	Green	Light
	Impulstrocknung mittels heißer Presse	Light	Light	Green	Light
	Gasbetriebene IR-Trockner	Light	Light	Green	Light
	Rieselturm mit Yankee-Haube	Light	Light	Green	Light
	Condebelt Drying	Light	Light	Green	Light
	Direkttrocknungs-Zylinderfeuerung	Light	Light	Green	Light
	Airless Drying	Light	Light	Green	Light
	kombinierte Kontakt-, Konvektionstrocknung	Light	Light	Green	Light
	Nutzung der Kondensatwärmeenergie zum Vorwärmen der Zuluft	Light	Light	Light	Green
	Messung des Taupunktniveaus in der Trockenhaube	Light	Light	Light	Green
	Wärmerückgewinnung durch Vakuumgebläse	Light	Light	Green	Light
	Unterdrucksaugwalzpresse zur Tissuepapier-trocknung	Light	Light	Green	Light
	Einsatz von Thermokompressoren	Light	Light	Green	Light
	Thermokompressoren zur Brüdenkompression	Light	Light	Green	Light
	Papierbahnerwärmung mit Dampfblaskasten	Light	Light	Green	Light
	Abwärmenutzung der Nachtrocknungspartie zur Klar- und Siebwassererwärmung	Light	Light	Green	Light
Polymerbeschichtung von Cellulosefasern	Light	Light	Green	Light	

Bereich	Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
	Rückgewinnung der Wärme aus Infrarot-Abluft				
	Einsatz eines Beschichtungs-Farbrückgewinnungssystems				
Infrastruktur Druckluftversorgung, Wasser- und Dampfverteilung	Erneuerung der Druckluftherzeugungsanlage				
	Druckniveau-Optimierung				
	Minimierung von Druckluftleckagen				
	Optimierung der Lüftungsanlage				
	Geschlossenes Wassermanagementsystem				
	Wärmedämmung von Anlagen und Verbindungsstücken, Dampfverteilssystem				
	Erneuerung der Dampfleitungen				
	Leckagen-Reparatur (Dampfleitungen)				
	Regelmäßige Wartung des Kondensatableiters				
	Automatische Überwachung des Kondensatableiters				
	Kondensatrückführung zum Kraftwerk				
	Nutzung von Wärmepumpen				
	Nutzung der Abwärme zur Klärschlamm-trocknung				
	Nutzung von Wärmetauschern zur Erwärmung der Frischluft				
	Innovative Wärmetauschertechnologie (Abwasser im freien Gefälle ableiten)				
Kondensatrückführung zum Kraftwerk					

Bereich	Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
Infrastruktur Motoren und motorennutzende Systeme, Kälte- und Kühlechnik	Effiziente Motorleistung u.a. Anpassung bei Leerlauf, Austausch der Aggregate (eff. Frequenzumrichter für Motoren, Pumpen)				
	Energetisch optimiertes Motoren- und Pumpensystem (Vermeiden von Überdimensionierung)				
	Regelmäßige Wartung Keilriemenspannung				
	Pumpen mit trockenlaufenden Turbogebläsen				
	Verringerung der Pumpenleistung durch Einengung der Wasserkreisläufe				
	Optimierte Fahrweise von Gegendruckturbinen				
	Nutzung von Dampfturbinen zur Stromerzeugung				
	Optimierung im Kondensatsystem (Überprüfung der Ventile, Vermeidung der Verluste)				
	Optimierung und regelmäßige Wartung der Kühlsysteme				
	Umstellung auf moderne Hochleistungsschmierstoffe - Kältekompressoren - Luftkompressoren - Getriebemix				
Infrastruktur sonst. Übergeifende Maßnahmen	Modernisierung von Beleuchtung und automatische Abschaltung				
	Licht und Temperatursteuerung				
	Reduzierung der Luftwechselrate				
	Dämmung Dächer				
	Reduzierung der Hallentemperatur				
	Reduzierung der Luftwechselrate für die Produktionshalle				
	Batteriespeicher				
	Optimierte Fahrweise von Gasturbinen bei eigener Strom-Wärme-Erzeugung				
	Torluftschleieranlagen				

Bereich	Maßnahme	UG1	UG2	UG3	UG4
Infrastruktur Nutzung alternativer Energiequellen	Geothermie	Light	Green	Grey	Grey
	Windkraft	Light	Green	Grey	Grey
	Solarthermie	Light	Green	Grey	Grey
	BHKW	Light	Grey	Green	Grey
	Effizienter Rückgewinnungskessel im BHKW	Light	Green	Grey	Grey
	Biogasverbrennungsanlage	Light	Grey	Green	Grey
	Isolierung der Biogasanlage	Light	Green	Grey	Grey
	Rejektverbrennungsanlage zur Wiederverwendung und Energieerzeugung	Grey	Light	Green	Grey
	Verbrennung von Abfällen und Schlämmen aus DIP Anlage zur Energieerzeugung	Grey	Light	Green	Grey
	Abwärmenutzung zur Schlamm-trocknung oder Aufbereitung von entwässerter Biomasse	Light	Grey	Green	Grey
	Industriekläranlage (anaerobe Abwasserreinigung) mit Energierückgewinnung (Biogas)	Grey	Light	Green	Grey

 Anlage B: Auswertung der
 Umfrage

Anlage C: Relevante Maßnahmen

C1: Stoffaufbereitung

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄRME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Hochkonsistenzpulper mit hochdynamischer S-Wendel	15		1	P	In der Stoffauflösung (engl. Pulper) wird die meiste Energie dazu verwendet, den Schlamm zu bewegen. Wird der Feststoffgehalt von 5-7 % auf 20 % erhöht, kann aufgrund der reduzierten Massenströme der Strombedarf in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und der Anforderung an das Produkt verringert werden.	Brunke, 2016
Optimierung der Büttengeometrie	1		2	P	Optimierung durch die Wahl der Büttengeometrie. Stehende Bütten sind deutlich energiesparender als liegende Bütten.	EnergieAgentur.NRW, 2010
Optimierung des Rührwerks	1		2	Q	Anpassung der Größe und Anordnung des Rührwerks führen zu Einsparungen.	EnergieAgentur.NRW, 2010
Erhöhung der Konsistenz im HC-Pulper	2		2	R	Energieeinsparung durch geringeren Wassergehalt im Pulper und verminderte Rührgeschwindigkeit.	European Commission, 2015
Verbesserte Vertikalsortierer mit MultiFoil-Rotor und Stabsiebkorb	18		2	P	Mit Hilfe von Vertikalsortierern werden Störstoffe vom Altpapierstoff getrennt. Die Vorteile neuerer Systeme sind der erhöhte Durchsatz, die verringerte Leistungsaufnahme und die verbesserte Sortiergüte.	Brunke, 2016
Anpassung der Stoffdichte von Altpapier	13		1	R	Die Stoffdichte in der Altpapiersortierung sollte idealerweise bei etwa 1,8 bis 2,5 % liegen. Durch eine Anhebung der Stoffdichte können die Aggregate kleiner dimensioniert bzw. bei einer bestehenden Anlage Kapazitäten schaffen.	EnergieAgentur.NRW, 2010
Fraktionierung der Recyclingpapierfasern	4,7	60	2	P	Fraktionierung von Lang- und Kurzfasern und das Führen durch das Eindicken, Dispergieren, Mahlen und Bleichen als getrennte Teilstränge (s. Jung 2013). Als Fraktionator werden Drucksortierer, Siebfraktionatoren mit Rotor oder Hydrozyklone, sogenannte Cleaner, eingesetzt. Kramer et al. (2009) bescheinigen der Fraktionierung eine Energieeinsparung von 12 % bzw. 17 MJ/t Altpapierstoff Strom und 40 % bzw. 216 MJ/t Altpapierstoff thermischer Energie bei einer Investition von 9,6 EUR/t Altpapierstoff.	Brunke, 2016

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄRME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Wärmerückgewinnung aus heißem Bleichwasser		5 – 10	2	Q	Das erwärmte Bleichwasser (55-60 °C) kann über Wärmetauscher zur Erwärmung des Siebwassers genutzt werden.	European Commission, 2015
Nutzung effizienter Siebkörbe und -Konzepte	18		2	Q	Beim Sieben werden Verunreinigungen aus dem recycelten Papier entfernt. Mithilfe einer erhöhten Konsistenz im Sieb (von 1,5 auf 2,5 %) und das Nutzen effizienterer Körbe (höhere Trennleistung) kann die Rotationsgeschwindigkeit bei gleicher Produktionsrate verringert werden.	European Commission, 2015
Minimiertes Reinigen und Sieben	15 – 30	10 – 20	2	R	Minimiertes Reinigen und Sieben in der Stoffaufbereitungsanlage ohne Fraktionierung und ohne weitere Faserbehandlung wie Dispergieren und zusätzliches Reinigen und Sieben.	European Commission, 2015
Schichtdesign			2	P	Die Nutzung von verschiedenen Faserrohstoffen oder Faserfraktionen für einen Schichtaufbau bietet erhebliches Potenzial zur Material-, Energie- und damit Kosteneinsparung (Papiereigenschaften verbessern).	Jung u. Kappen, 2013
Verwendung optimierter Refiner (z.B. Mehrscheiben-, Doppelzylinderrefiner)	110		1	P	Der Einsatz von Mehrscheiben- oder Doppelzylinderrefiner spart im Vergleich zu Konusrefinern Energie. Zusätzlich kann durch das Ändern des Betriebsmodus in ein Stapelbetriebssystem bis zu 18 % des für die Raffinerien erforderlichen Stromverbrauchs gespart werden.	European Commission, 2015
Alternatives Säulendesign zur Rührkesselreaktion	12		1	P	Ein alternatives Säulendesign zur Rührkesselreaktion, welches auf ein Rührwerk verzichten kann, benötigt einen ca. 30 % geringeren Energieverbrauch.	Brunke, 2016
Hochzahngarnituren für Dispergierer	6		1		Das Nachrüsten von älteren Dispergierern mit Hochzahn-Garnituren bringt neben Energieeinsparungen von 20 % nicht-energetische Vorteile, wie eine höhere Sauberkeit der Fertigprodukte mit sich.	Brunke, 2016
Einsatz von Stufendiffusoren beim Deinking	n/a		2	P	Bei der Deinkingflotation gibt es Unterschiede in der Energieeffizienz durch die Art der Lufteinbringung in den Stoff. Anlagen mit Stufendiffusoren (selbstansaugend) sind deutlich effizienter als jene, bei denen die Luft durch Kompressoren eingebracht wird.	EnergieAgentur.NRW, 2010

C2: Papiermaschine

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Einsatz von Axialgebläsen		26	1	Q	Nutzung von Axialgebläsen zur Wärmerückgewinnung für die Zuluft der Trockenhaube.	European Commission, 2015
Prozessmonitoring	4 – 17% (Ø 8%) (2418 kWh - Infrastruktur (213) = 2205*0,08 =177		2	R	Die fortlaufende Überwachung der Regelgüte im laufenden Anlagenbetrieb ist entscheidend. Mittels Prozessmonitoring lassen sich Maßnahmen zur Wartung, Instandhaltung und Einstellung gezielt planen und fokussiert umsetzen. Neben den etablierten Software-Tools zur Überwachung der Regelgüte, die lokal in einer Anlage installiert werden können, gibt es einen neuen cloudbasierten Service: Control Performance Analytics (CPA). Verschiedene Studien belegen, dass in der Prozessindustrie, speziell in der Papier- und Zellstoffindustrie, durchschnittlich nur 50 Prozent der Regelkreise optimiert sind.	Siemens, 2017a
Siebreinigung mit warmem Wasser		70–200	2	Q	Die Siebreinigung mit heißem Wasser (45-55°C) führt zur Temperierung der Stoffbahn, womit in der Pressenpartie eine bessere Entwässerung stattfindet und resultierend weniger Wärme in die Trockenpartie eingebracht werden muss.	Blum et al., 2007
Wasserlose Papierherstellung			1	P	Eine langfristige Vision zur Steigerung der Energieeffizienz stellt die wasserlose Papierherstellung dar. Hierbei wird bspw. ein Luftstrom eingesetzt, um in der Siebpartie eine gleichmäßige Blattbildung zu bewirken, was traditionell über die Faser-Wasser-Suspension erreicht wird. Um eine solche Bindung zu erhalten, werden u.a. Harz oder künstliche Bindemittel hinzugefügt.	Fleiter et al., 2013
Einsatz von Langspalt-(Schuh)-Pressen		15% / bis 200	2	P	Das Pressen mit Langspalt- (Schuh-) Pressen führt zu einer höheren Entwässerung der Papierbahn zur Trockenpartie und damit zu einer Reduzierung des Primärdampfbedarfs im Vergleich zum Pressen mit einer Scharfspaltpresse.	European Commission, 2015; Blum et al., 2007;Blesl u. Kessler, 2013

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Impulstrocknung mittels heißer Presse			1	P	Bei der Impulstrocknung wird die Idee verfolgt, den Trockengehalt der Papierbahn noch in der Pressenpartie zu erhöhen, indem bei sehr kurzer Kontaktzeit zwischen einer heißen Presse (150–500°C, beheizt über Induktionsheizer) im Pressnip ein sehr hoher Druck auf das Papier ausgeübt wird und dadurch der erzeugte Wasserdampf Wasser aus dem Papier treibt – ohne dieses zu verdampfen.	Fleiter et al., 2013
Kondensatbandtrocknung		100	0	P	Bei der Kondensationsbandtrocknung wird die Papierbahn in Kontakt mit einem heißen Stahlband getrocknet. Es werden Dampfeinsparungen von 10 bis 20% erwartet. Nachdem bereits 1975 die Forschung an der Kondensationsbandtrocknung begonnen wurde, wurden erste kommerzielle Anlagen 1996 in Finnland und 1999 in Südkorea errichtet. Sie befindet sich noch immer im Anfangsstadium der Markteinführung.	PTJ
IR-Trockner (Gas)			2	P	Trockner von Strombetrieb auf Gasbetrieb umstellen.	Bellante, 2013
Rieselurm mit Yankee-Haube		bis zu 50	2	P	Zum Beispiel kann in einem Rieselurm die heiße Abluft von der Yankee-Haube in den Gegenstrom gerichtet werden, wobei klares Filtrat aufgeheizt wird. Der Dampf für die Erwärmung von Siebwasser wird eingespart. (besonders bei Tissue).	European Commission, 2015
Condebelt Drying		440	1	P	Beim Condebelt-Trocknen wird das Papier in einer Trockenkammer durch Kontakt mit einem kontinuierlich heißen Stahlband getrocknet, das entweder mit Dampf oder heißem Gas erhitzt wird. Das Wasser aus der Bande verdampft aufgrund der Hitze von der Bande. Diese Technologie hat eine Trocknungsrate, die 5 bis 15 Mal höher ist als bei der herkömmlichen Dampftrocknung.	IIP
Direkttrocknungs-Zylinderfeuerung		300	1	P	Bei der Direkttrocknungs-Zylinderfeuerung werden die Zylinder mit Erdgas oder anderen Treibstoffen auf Erdölbasis beheizt, anstatt die Zylinder mit Dampf zu beheizen. Daher eliminiert diese Technik den Zwischenschritt der Dampferzeugung. Dies birgt zwar das Potenzial, erhebliche Kraftstoffeinsparungen zu erzielen, erfordert jedoch zusätzliche Betriebs- und Wartungsarbeiten.	IIP

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Airless Drying	+ bis zu 20%	70 – 90%	1	P	Airless-Trocknung nutzt die latente Wärme verdampfter Feuchtigkeit. Es erfordert eine luftdichte und gut isolierte Haube um die Trockenpartie der Papiermaschine herum. Immer noch wird das Papier durch dampfbeheizte Zylinder getrocknet, aber der Dampf wird durch Verdichten des verdunsteten Wassers erzeugt. Dieser kondensierte Wasserdampf kann 60 bis 80 % der gesamten Wärmeenergie liefern, die zum Trocknen benötigt wird.	IIP
Kombinierte Kontakt-, Konvektionstrocknung		40 – 100	2	P	Durch Wärmerückgewinnung und kombinierte Kontakt-Konvektionstrocknung, Luftstromoptimierung, Reduzierung Leckluftanteil.	European Commission, 2015, Ener- gieAgen- tur.NRW, 2010
Nutzung der Kondensatwärmeenergie zum Vorwärmen der Zuluft		3	2	P	In Papierfabrik A wird die Zuluft der Trockenpartie über eine Wärmerückgewinnung auf 41°C vorgewärmt. Die Aufheizung bis zur Zieltemperatur von 94°C erfolgt mit Dampf. Das anfallende Kondensat wird mit 81°C ins Kraftwerk zurückgeführt. Durch Nutzung der im Kondensat befindlichen Energie kann die Zuluft-Temperatur auf 53°C angehoben und somit Frischdampf eingespart werden. Weiterhin wird aufgrund der niedrigeren Kondensat-Temperatur die Abgasverluste am Kraftwerk gesenkt.	Bienert et al., 2013
Messung des Tau- punktniveaus in der Trockenhaube		10	2	R	Der Wasserdampf-Taupunkt (in der Trockenhaube) bestimmt die Wärme-Tauscheffizienz, wird aber durch die Einstellung von Ventilatoren beeinflusst. Die Taupunktniveaus in Papiertrocknungshauben sollten gemessen und kontrolliert werden, um den Trocknungsprozess zu optimieren.	Kramer et al., 2009
Wärmerückgewinnung durch Vakuumgebläse		30	1	Q	Wärmeübertrag Luft-Luft zur Vorwärmung der Haubenzuluft.	Jung u. Hutter, 2010 Blum et al., 2007

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Unterdrucksaugwalz- presse zur Tissuepapier- trocknung	457	1305	2	P	Lufthaltige Papiere dürfen nicht mechanisch vorgetrocknet werden. Hygienepapiere werden daher im TAD-Verfahren (engl. Through Air Drying) um einen großen Yankee-Zylinder geleitet, der von heißer Luft durchströmt wird, wodurch der Energieaufwand für die Trocknung sich im Vergleich zu herkömmlichen Papieren verdoppelt (Vogt et al. 2008). Wird die Papierbahn über eine Saugwalze mit einem Unterdruck von 0,5 bar geführt, kann sie dennoch schonend entwässert werden. Zur Verbesserung der Viskosität und des Trockengehalts wird die heiße Abluft des nachgeschalteten Yankee-Zylinders ebenfalls durch die Saugwalze geleitet. Dadurch können 30 % Fasermasse und 35 % Energie gegenüber einer konventionelleren Herstellung von Tissue eingespart werden (vgl. Berardi 2012).	Brunke, 2016
Einsatz von Thermo- kompressoren		5 – 120	1	Q	Der Einsatz von Thermokompressoren erhöht die Energieeffizienz des Trocknungsprozesses (Verringerung der Kondensatverluste), da weniger Dampf zum Kondensator geleitet werden muss.	European Commission, 2015
Thermokompressoren zur Brüdenkompression		25	1	Q	Die Brüden, die aus der letzten Stufe des kaskadierenden Dampf- und Kondensationssystems entstehen, haben einen zu geringen Druck, als dass sie zum Trocknen eingesetzt werden könnten. Ein Dampfstrahlverdichter komprimiert den Brüden, sodass dieser in der Trockenpartie eingesetzt werden kann, statt in den Kondensator eingeleitet zu werden.	Brunke, 2016
Papierbahnerwärmung mit Dampfblaskasten		50	2	P	Um die Entwässerungseigenschaften des Gewebes zu verbessern, kann die Temperatur der Papierbahn erhöht werden. Das Wasser erhält eine höhere Viskosität. Dadurch wird die Pressleistung in der Trockenpartie reduziert.	Brunke, 2016
Abwärmenutzung der Nachtrocknungspartie		40	2	P	Große Energieeinsparung sind zu erzielen bei Nutzung der Abwärme aus der Nachtrocknungspartie zur Erwärmung des Frisch- und Siebwassers.	Brunke, 2016

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Polymerbeschichtung von Cellulosefasern	45	51	1	R	Der Nachteil der Faserstoffmahlung in der Holzstoffaufbereitung ist ein schlechtes Entwässerungsverhalten in der Papiermaschine, was sich negativ auf die Blattqualität und den Energieverbrauch auswirkt. Die molekulare Beschichtung von Cellulosefasern mit Polymeren fördert die Bindungsbildung und verringert den Mahlaufwand um 360 MJ/tPapier. Gleichzeitig verringert sich der Trocknungsaufwand durch ein geringeres Wasserrückhaltvermögen und die Webdichte, so dass 5-15 % Faserstoff eingespart werden können (vgl. Erhard et al. 2010). Fleiter et al. (2012a) erwarten eine Markteinführung in den kommenden Jahren und eine nachträgliche Umrüstung bestehender Anlagen.	Brunke, 2016
Wärmerückgewinnung aus Infrarot-Abluft		n/a	1	Q	Rückgewinnung der Wärme aus Infrarot-Abluft zum Trocknen von Streichfarben.	European Commission, 2015
Einsatz eines Beschichtungs-Farbrückgewinnungssystems	45		1	P	Eine Beispielmühle reduzierte den gesamten Feststoffabfall der gesamten Mühle um 60%, indem sie ein wirksames System zur Rückgewinnung von Beschichtungsabwässern in Betrieb nahm. Weniger Transport von Pigmenten und Abfall sind weitere Vorteile.	European Commission, 2015 Energie-Agentur.NRW (2005)

C3: Infrastruktur und übergreifende Maßnahmen

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Druckluftsystemopti- mierung	20		2	P	Erneuerung der Druckluftanlage, Zusammenführung von Systemen.	Energie- Agentur.NRW (2005)
Druckniveau- Optimierung	1		2	R	Senkung des Druckniveaus und -toleranzen.	Allgemeine Maßnahme
Druckluftleckagen	n/a		2	R	Minimierung von Leckagen.	Allgemeine Maßnahme
Optimierung der Lüf- tungstechnik	n/a		2	Q	Potenziale für die Optimierung durch erhöhte Wärmerückgewinnung, Anpassung der Luftmengen unter Berücksichtigung der Taupunkttemperatur, Isolierung, Reduzierung des Leckluftanteils.	EnergieAgen- tur.NRW, 2010
Geschlossenes Was- sermanagementsystem		n/a	2	P	Simulation und Modelle zur Prozessoptimierung nutzen.	European Commission, 2015
Wärmedämmung von Anlagen und Verbin- dungsstücken, Dampf- verteilssystem		2	2	Q	Mittels einer Analyse der genutzten und vorhandenen Dämmstoffe können sich Energieeinsparungen ergeben. Faktoren die bei der Auswahl der Materialien eine wichtige Rolle spielen sind: geringe Wärmeleitfähigkeit, Formbeständigkeit bei Temperaturänderung, Beständigkeit gegen Wasserabsorption und Verbrennungen.	EnergieAgen- tur.NRW, 2010
Erneuerung der Dampf- leitungen		n/a	2	P	Sanierung von Dampfleitungen, wenn Isolierung o. ä. fehlt birgt Einsparmaßnahmen.	Allgemeine Maßnahme
Leckagen-Reparatur (Dampfleitungen)		2	2	R	Wie bei Kondensatableitern haben Verteilerrohre selbst oft Lecks, die ohne ein Programm zur regelmäßigen Inspektion und Wartung unbemerkt bleiben.	EnergieAgen- tur.NRW, 2010 Jung u. Kap- pen, 2013

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Regelmäßige Wartung des Kondensatableiters		2	2	R	An Kondensatableitern können erhebliche Mengen an Dampf entweichen, wenn diese nicht richtig überwacht werden. Eine einfache Inspektion und Wartungsprogramme können Energie einsparen.	Allgemeine Maßnahme
Einsatz von Wärmepumpen		500	1	P	Mit Hilfe von Wärmepumpen (Antrieb über Primärenergie) kann Prozesswärme durch eine Erhöhung des Temperaturniveaus aufgewertet und damit für andere Prozessschritte, Gebäudeheizung o. ä. nutzbar gemacht werden.	European Commission, 2015 Jung u. Hutter, 2010
Nutzung der Abwärme zur Klärschlamm-trocknung		n/a	1	P	Zur Behandlung der großen Abwassermengen verfügen Papierfabriken über eigene Klärwerke. Die aus Reststoffen entstehenden Klärschlämme werden entweder deponiert oder, wenn die entsprechende Anlagentechnik installiert ist, thermisch verwertet. In beiden Fällen werden die Schlämme zuvor getrocknet. Dies kann durch den Einsatz von Niedertemperaturabwärme bei ca. 45 °C bis 60 °C geschehen. Die Wirtschaftlichkeit bzw. Durchführbarkeit der Maßnahme nimmt allerdings mit steigendem Abstand zwischen Wärmequelle und -senke rasch ab. In Südeuropa genügt häufig bereits die Temperatur der Außenluft zur Trocknung.	Fleiter et al., 2013
Einsatz Wärmetauscher		10	2	Q	Einsatz von Wärmetauschern zur Erwärmung der Frischluft.	Steinbeis, 2016
Innovative Wärmetauschertechnologie (Abwasser im freien Gefälle ableiten)	n/a		2	P	Neben den in der Papierindustrie bereits erfolgreich eingesetzten Freistrom-, oder Spiralwärmetauschern, die aufgrund ihrer Bauweise einen stabilen Betrieb auch bei faser- und feststoffhaltigen Medien ermöglichen, gibt es seit kurzem eine neue Technologie, die es ermöglicht, Abwasser im freien Gefälle abzuleiten und durch ein einfaches Reinigungssystem ständig sauber zu halten.	Bienert et al., 2013

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Kondensatrückführung zum Kraftwerk		20	2	P	Die Wiederverwendung des heißen Kondensats in der Dampferzeugung reduziert den Energie- und Frischwasserbedarf.	Jung u. Kappen, 2013
Energetisch optimiertes Motoren- und Pumpensystem (Vermeiden von Überdimensionierung)	20 – 30		2	Q	Effiziente Motorleistung u.a. Anpassung bei Leerlauf, Austausch der Aggregate (eff. Frequenzumrichter für Motoren, Pumpen). Energieeinsparungen für Pumpenanwendungen ergeben sich aus den geringeren Drosselverlusten und höheren hydraulischer Ertrag der Pumpe.	European Commission, 2015 EnergieAgentur.NRW, 2010
Verringerung der Pumpenleistung	2		2	Q	Verringerung der Pumpleistung durch Einengung der Wasserkreisläufe.	Bellante, 2013 EnergieAgentur.NRW (2005)
Keilriemenspannung	5 – 15%		2	R	Regelmäßige Wartung der Keilriemenspannung vermindert Reibeverluste.	Expertenbefragung
Pumpen mit trockenlaufenden Turbogebbläsen	10 – 60		1	Q	Substitution mit ineffizienter Vakuumpumpen.	Blum et al., 2007
Optimierte Fahrweise von Gegendruckturbinen		n/a	2	R	Senkung der Energieverluste im Regel- und Bahnabrissverhalten.	SAENA, 2016
Nutzung von Dampfturbinen zur Stromerzeugung	n/a		2	P	Anlagen nach dem Clausius-Rankine-Prozesses (Dampfturbine) werden durch Medien mit niedriger Siedetemperatur betrieben.	Jung u. Hutter, 2010
Optimierung im Kondensatsystem		n/a	2	Q	Überprüfung der Ventile, Vermeidung von Verlusten.	Allgemeine Maßnahme
Optimierung der Kühlsysteme	3		2	R	Vermeidung von Leckagen und regelmäßige Wartung.	EnergieAgentur.NRW, 2010

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Optimierung der Beleuchtung und Temperatur	10 – 20%		2	R	Die Benutzung von Sensoren, wie bspw. Bewegungsmelder, und effizienteren LED statt Glühlampen können schon nach kurzer Zeit wirtschaftlich sein.	Kramer et al., 2009
Reduzierung der Luftwechselrate	7	62	1	R	Die Luftwechselrate lässt sich deutlich reduzieren, insbesondere bei einer optimierten Luftführung. Empfehlenswert ist die Einleitung der warmen Zuluft auf Maschinenebene.	European Commission, 2015 EnergieAgentur.NRW, 2010
Dämmung Dächer		n/a	1	Q	Isolierung der Fabrikhalle zur gleichmäßigen Klimatisierung.	Allgemeine Maßnahme
Reduzierung der Hallentemperatur		98	1	R	Durch die Senkung der Hallentemperatur kann die frei gewordene Abwärme für andere Prozessschritte genutzt werden.	European Commission, 2015 EnergieAgentur.NRW, 2010
Batteriespeicher	n/a		1	P	Pufferung von Lastspitzen, Umverteilung des Lastprofils, Weiterversorgung bei Netzunterbrechungen.	SAENA, 2016 Siemens, 2017b
Optimierte Fahrweise von Gasturbinen	n/a	n/a	2	R	Gasturbinen mit eigener Strom-Wärme-Erzeugung u.a. in Verbindung mit Anbindung an Wärmenetz optimieren.	SAENA, 2016
Torluftschleieranlagen		2	2	R		Allgemeine Maßnahme
BHKW	10 – 15%	n/a	1	P	Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) erhöhen die Energieeffizienz (Verbrauch von Primärenergie fällt) und damit reduzieren die CO ₂ -Emissionen.	European Commission, 2015

Maßnahmen	STROM, Wert in kWh/t	WÄR- ME, Wert in kWh/t	UG	P, Q, R	Kurzbeschreibung	Quelle kurz
Effizienter Rückgewinnungskessel im BHKW	n/a		1	P	Neue Rückgewinnungskessel können einen Druck von mindestens 100 bar und die Temperatur 510 ° C halten (Energieerzeugung).	European Commission, 2015
Biogasverbrennungsanlage	n/a	n/a	1	P	Bei der anaeroben Reinigung von Abwässern aus der Papierproduktion wird ein methanhaltiges Gas frei. Eine Verstromung des Biogases in einem BHKW bietet die Möglichkeit zur Substitution von fossilen Brennstoffen und Generierung von CO ₂ -Zertifikaten.	Jung u. Hutter, 2010
Isolierung Biogasanlage	n/a	n/a	1	Q	Biogasverwertung muss nicht mehr gedrosselt werden wenn es sehr warm oder kalt ist.	Schulte, 2017
Rejektverbrennungsanlage zur Wiederverwendung und Energieerzeugung	n/a	66000 MWh	2	P	Die Verbrennung von Ausschuss spart Deponiekapazitäten. Die resultierenden sind zur Wiederverwendung geeignet, z. B. zur Verwendung im Straßenbau. Fossile Brennstoffe für die Energieerzeugung können ersetzt werden.	European Commission, 2015 Energie-Agentur.NRW 2005
Verbrennung von Abfällen und Schlämmen aus DIP Anlage	1	n/a	2	P	Die Energierückgewinnung kann ein sekundärer Grund für die Anwendung dieser Technik sein. Nach der Entwässerung ergibt sich eine leicht positive Energiebilanz.	European Commission, 2015
Abwärmenutzung zur Schlamm-trocknung oder Aufbereitung von entwässerter Biomasse		30 – 50	1	Q	Abwasserbehandlung: Bei Entsorgungsmengen von bis zu 40 t/Tag kann es sinnvoll sein, nach dem Kompaktieren einen zusätzlichen Trocknungsprozess in Betracht zu ziehen. Mit übermäßiger Papiermaschinenwärme können Endtrockenwerte von 90% erreicht werden. Die Trocknung erhöht den Brennwert der Biokraftstoffe und des Schlammes und erhöht den thermischen Wirkungsgrad bei der Verbrennung.	European Commission, 2015
Industriekläranlage mit Energierückgewinnung (Biogas)	n/a	n/a	2	P	Bei anaerober Reinigung von Wasser aus der Papierproduktion wird methanhaltiges Gas, als Nebenprodukt, gesammelt und behandelt.	Jung u. Hutter, 2010