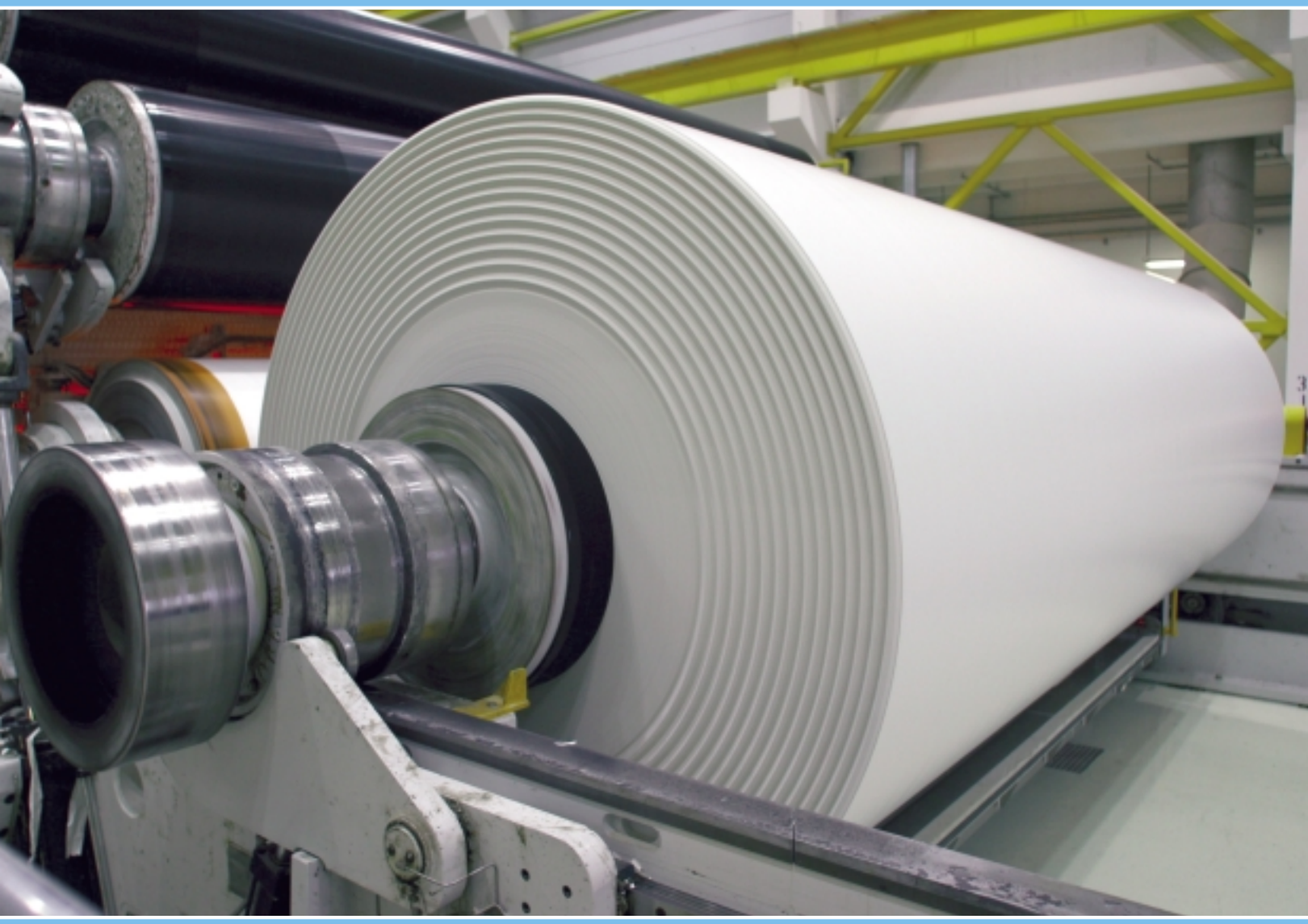
# Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie

## Nutzung von Niedertemperaturabwärme



Bayerisches Landesamt
für Umweltschutz

# Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie

## Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Bayerisches Landesamt
für Umweltschutz

**Augsburg, 2002 – ISBN 3-936385-36-x**

| | |
|---|---|
| Herausgeber: | Bayerisches Landesamt für Umweltschutz<br>Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg |
| Tel.: | (0821) 90 71 – 0 |
| Fax: | (0821) 90 71 – 55 56 |
| E-mail: | poststelle:@lfu.bayern.de |
| Internet: | http://www.bayern.de/lfu |
| Auftragnehmer: | Papiertechnische Stiftung München<br>Heßstraße 134, 80797 München |
| Partnerbetrieb: | Gebr. Lang GmbH, Papierfabrik<br>Fabrikstraße 4, 86833 Ettringen |
| Layout: | Bayerisches Landesamt für Umweltschutz |
| Titelbild: | Gebr. Lang GmbH |
| Druck: | DINO DRUCK GmbH, Augsburg |
| Zitiervorschlag: | Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): „Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie - Nutzung von Niedertemperaturabwärme“, Augsburg, 2003 |

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staastsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2003

Gedruckt auf Recyclingpapier

## Inhalt

**1 Zusammenfassung ... 3**

**2 Problemstellung und Zielsetzung ... 4**

**3 Grundlagen ... 5**

3.1 Prozess der Papierherstellung ... 5

3.2 Energiebedarf in der Papierindustrie ... 10

**4 Vorgehensweise und ermittelte Basisdaten ... 13**

4.1 Phase I: Erstellung einer Wärmebilanz / Aufnahme des Ist-Zustandes ... 13

4.2 Phase II: Erstellung eines Konzeptes zur Nutzung der Niedertemperaturabwärme ... 18

4.3 Phase III: Übertragung der Ergebnisse auf die bayerische Papierindustrie ... 20

**5 Ergebnisse ... 22**

5.1 Bilanz der Anlage ... 22

5.2 Nutzbare Quellen und Senken ... 23

5.3 Ergebnisse der Pinch-Analyse ... 27

5.4 Möglichkeiten der Nutzung von Niedertemperaturabwärme (Konzeptvarianten) ... 28

5.5 Ergebnisse der Simulationsrechnungen für alle Szenarien ... 33

5.6 Erarbeitung, Prüfung und wirtschaftliche Bewertung möglicher Konzepte (Wirtschaftlichkeitsanalyse) ... 41

**6 Übertragung der Ergebnisse auf die bayerische Papierindustrie ... 50**

6.1 Handlungsempfehlungen für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme ... 50

6.2 Wärmebilanz und $CO_2$-Minderungspotenziale in der bayerischen Papierindustrie ... 52

**7 Anhang (Verfahrensbeschreibungen) ... 58**

7.1 Wärmepumpen ... 58

7.2 Adsorptionskältemaschinen ... 60

## Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| A | Fläche |
| ABW | Abwasser |
| AP | Altpapier |
| ARA | Abwasserreinigungsanlage |
| BK | Betriebskosten |
| c | Konzentration |
| CMP | Chemi-Mechanical-Pulp |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| CTMP | Chemi-Thermo-Mechanical-Pulp |
| D | Decke |
| DIP | deinked pulp |
| E | Einlage, Träger |
| EFH | Einfamilienhaus |
| FS | Feststoff |
| FTR | Filtrat-Trockenrückstand |
| FW | Frischwasser |
| FWW | warmes Frischwasser |
| $H_2O$ | Wasser |
| $H_2S$ | Schwefelwasserstoff |
| HS | Holzschleiferei / Holzstoff |
| HSA | Holzstoffaufbereitung |
| KF | Klarfiltrat |
| KW | Klarwasser (entspricht Klarfiltrat) |
| LF | Leitfähigkeit |
| lutro | lufttrocken |
| M | Maßnahme (Empfehlung) |
| MAK | Maximale Arbeitsplatz-Konzentration |
| MSR | Mess-, Steuer-, Regeltechnik |
| MW | Mittelwert |
| NTP | Nachtrockenpartie |
| $O_2$ | Sauerstoff |
| otro | ofentrocken |
| $\Delta T$ ln | logarithmische Temperaturdifferenz |
| P | Probenahmestelle |
| PGW | Pressure Groundwood |
| PM | Papiermaschine |
| PP | Pressenpartie |
| PLS | Prozessleitsystem |
| RL | Rücklauf |
| ROI | Return on Investment |
| RMP | Refiner-Mechanical-Pulp |
| RS | Rückseite |
| RW | Rückwasser |
| SGW | Stone Groundwood |
| SF | Scheibenfilter |
| SP | Siebpartie |
| SWM | Stadtwerke München |
| SZ | Szenario |
| STA | Stoffaufbereitung |
| SW | Siebwasser |
| T | Temperatur |
| TF | Trübfiltrat |
| TMP | Thermo-Mechanical-Pulp |
| TP | Trockenpartie |
| TR | Trockenrückstand |
| V | Volumen |
| VDP | Verband Deutscher Papierfabriken |
| VKB | Vorklärbecken |
| VL | Vorlauf |
| VTP | Vortrockenpartie |
| VP | Vakuumpresse |
| V% | Variationskoeffizient |
| WP | Wärmepumpe |
| WRG | Wärmerückgewinnung |
| ZS | Zellstoff |

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Zusage der Bundesrepublik Deutschland zur Reduktion treibhauswirksamer Abgase hat sich die deutsche Industrie freiwillig verpflichtet, die spezifischen $CO_2$-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 28 % zu reduzieren. Die deutsche Zellstoff- und Papierindustrie ist der fünftgrößte industrielle Energieverbraucher. In den vergangenen Jahren wurde der spezifische Energieeinsatz durch technische Optimierungen kontinuierlich gesenkt. Der rationelle Energieeinsatz durch Energieeinsparung im Produktionsprozess bleibt allerdings eine Herausforderung an die Papierindustrie.

In diesem Zusammenhang führte das Landesamt für Umweltschutz (LfU) im Auftrag des bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) ein Projekt zur rationellen Energienutzung in der Papierindustrie durch. Ziel des Projektes war die mit der rationellen Energienutzung verbundene Senkung der Treibhausgasemissionen, insbesondere des $CO_2$-Ausstoßes. Die Untersuchung sollte zeigen, welche in der Papierindustrie bisher nicht oder kaum genutzten Technologien oder Verfahrensschritte zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme zum Erreichen dieses Ziels genutzt werden können. Im Rahmen des Projektes wurde der Schwerpunkt auf das Medium Wasser als Hauptwärmeträger gelegt.

In einem ersten Schritt erfolgte in einem Partnerbetrieb eine detaillierte Bestandsaufnahme der Energiesituation, insbesondere die Erstellung einer Wärmebilanz. Die detaillierte Aufnahme des Ist-Zustandes konzentrierte sich auf die Ermittlung und Bilanzierung des Wärmebedarfs der potenziellen Abnehmer.

Basierend auf der detaillierten Bestandsaufnahme erfolgte die Erstellung eines Simulationsmodells zur Bilanzierung der Wärmeströme. Wichtigstes Ergebnis war die Identifikation der Quellen und Senken des Papiererzeugungsprozesses. Auf der Basis der vorhandenen Quellen und Senken wurde mit Hilfe der Pinch-Analyse ein maximales (theoretisches) Einsparpotenzial für den untersuchten Betrieb von 6,1 GWh pro Monat ermittelt.

Auf des Basis eines detaillierten Simulationsmodells der Anlage wurden umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt. Besonders hohe Einsparungen ergeben sich dabei für die Nutzung der Abwärme des Gesamtabwassers und einzelner Abluftströme. Es wurde ein Konzept für die interne Nutzung der Niedertemperaturabwärme entwickelt, mit dem eine Einsparung von 5,5 MW im Sommer und 13,6 MW im Winter erreicht werden kann. Zusätzlich wurde ein Konzept zur externen Nutzung der Niedertemperaturabwärme und zur Kälteerzeugung erstellt.

Eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit ergab, dass insbesondere bei einer lokalen Koppelung von Wärmequellen und –senken ROI-Werte von deutlich unter einem Jahr erzielt werden können. Die Wirtschaftlichkeit leidet immer dann, wenn die örtlichen Gegebenheiten einen hohen Aufwand (Rohrleitungen etc.) erfordern. Eine externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme ist grundsätzlich möglich. Es treten jedoch z.T. hohe externe Kosten auf, wenn kein Fernwärmenetz zur Verfügung steht und dieses erst aufgebaut werden soll. Eine Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte erscheint unter den Randbedingungen der Papiererzeugung als wenig attraktiv.

Die grundlegenden Möglichkeiten zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme wurden unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Wärmemenge und der Wirtschaftlichkeit zusammengefasst. Die Ergebnisse sind auf die bayerische Papierindustrie übertragbar. Für die einzelnen Varianten ergeben sich $CO_2$- und Wärmeeinsparpotenziale von bis zu 10 %. Das spezifische $CO_2$- Einsparpotenzial liegt – in Abhängigkeit der Maßnahmen – zwischen 6 und 30 kg/t.

# 2 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der Zusage der Bundesrepublik Deutschland zur Reduktion treibhauswirksamer Abgase hat sich die deutsche Industrie freiwillig verpflichtet, die spezifischen $CO_2$-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 28 % zu reduzieren. Die bayerische Staatsregierung unterstützt diese Bemühungen durch begleitende Projekte.

Die Zellstoff- und Papierindustrie zählt in Deutschland zu den energieintensivsten Industriezweigen. In den vergangenen Jahren wurde der spezifische Energieeinsatz durch technische Optimierungen kontinuierlich gesenkt. Der rationelle Energieeinsatz durch Energieeinsparung im Produktionsprozess bleibt allerdings eine Herausforderung an die Papierindustrie. In diesem Zusammenhang führt das Landesamt für Umweltschutz (LfU) ein Projekt zur rationellen Energienutzung durch.

Das LfU hat bereits im Vorfeld einige Gespräche mit Verantwortlichen der Papierindustrie geführt und die PTS mit der Erstellung einer Projektskizze beauftragt. Die Ergebnisse des Vorprojekts haben eindeutig zwei verschiedene Stoßrichtungen aufgezeigt, die gleichermaßen innovativen Charakter wie branchenübergreifende Bedeutung haben. Es sind dies:

- Substitutionsmöglichkeiten fossiler Energieträger in der Papier erzeugenden Industrie
- Möglichkeiten der Nutzung von Niedertemperaturabwärme aus dem Prozess der Papierherstellung

Beide Themenstellungen bergen erhebliches Potenzial zur Verminderung von $CO_2$-Emissionen. In einem ersten Schritt wird die Projektidee „Nutzung von Niedertemperaturabwärme“ umgesetzt.

Ziel des Projektes ist die mit der rationellen Energienutzung verbundene Senkung der $CO_2$-Emissionen. Die Untersuchung soll zeigen, welche in der Papierindustrie bisher nicht oder kaum genutzten Technologien oder Verfahrensschritte zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme zum Erreichen dieses Ziels genutzt werden können. Im Rahmen des Projektes wird der Schwerpunkt auf das Medium Wasser als Hauptwärmeträger gelegt.

Das Projekt wird in mehreren Teilschritten durchgeführt, die aufeinander aufbauen. Die Vorgehensweise wird detailliert in Kapitel 4 beschrieben. Die Ergebnisse werden in dem vorliegenden Projektbericht dokumentiert. Der Projektbericht gibt insbesondere Empfehlungen geben, wann der Einsatz welcher Technologie ökologisch vorteilhaft ist und unter welchen Bedingungen eine solche Investition wirtschaftlich ist.

# 3 Grundlagen

## 3.1 Prozess der Papierherstellung

Der Papiererzeugungsprozess lässt sich in vier Hauptbereiche aufteilen:

- Halbstofferzeugung (Zell-, Holz- oder Altpapierstoff)
- Stoffaufbereitung
- Papiermaschine
- Veredelung

Die einzelnen Hauptbereiche können unterschiedlich strukturiert sein und sowohl integriert als auch an verschiedenen Standorten angesiedelt sein. Auf den Prozess der Zellstoffherstellung wird in diesem Bericht nicht eingegangen. Die Erzeugung von Holzstoff und Altpapierstoff ist gewöhnlich in die Papierfabrik integriert. Die Abb. 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Verfahrensschritte. Die einzelnen Prozessschritte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

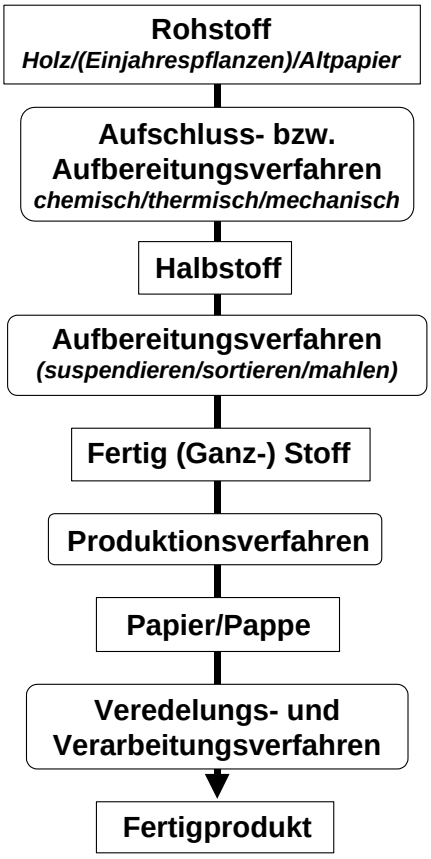



Abb. 1: Verfahrensschritte der Papier- und Pappenherstellung

### 3.1.1 Halbstofferzeugung

Herstellung von Altpapierstoff:

Die Altpapieraufbereitung ist letztlich die Umkehrung der Papierherstellung zur Herstellung eines definierten Altpapierstoffes. Die Abb. 2 zeigt die Grundprozesse der Altpapieraufbereitung.

Unter "Suspendieren" ist dabei die Zerlegung des Fasergefüges in Einzelfasern zu verstehen. Dazu ist es erforderlich, die Bindungskräfte zwischen den Fasern soweit wie möglich zu reduzieren. Dies geschieht durch Zugabe von Wasser und gegebenenfalls durch die Zugabe von Chemikalien. Die eigentliche Vereinzelung erfolgt dann durch mechanische oder hydraulische Beanspruchung des in seiner Festigkeit reduzierten Papiers.

Die Reinigung erfolgt auf mechanischem Weg nach Größe, Form oder spezifischem Gewicht in Sortierern oder Cleanern, wie sie auch in anderen Bereichen der Halbstofferzeugung eingesetzt werden. Wenn bedruckte Altpapiere als Rohstoff für die Herstellung graphischer Papiere oder Hygienepapiere, aber auch für die Herstellung heller Kartondecken eingesetzt werden sollen, müssen die Druckfarben in der Altpapieraufbereitungsanlage möglichst weitgehend entfernt werden. Für die Druckfarbenentfernung haben sich in der industriellen Praxis im Wesentlichen zwei Verfahren, die Flotation und die Wäsche, durchgesetzt.

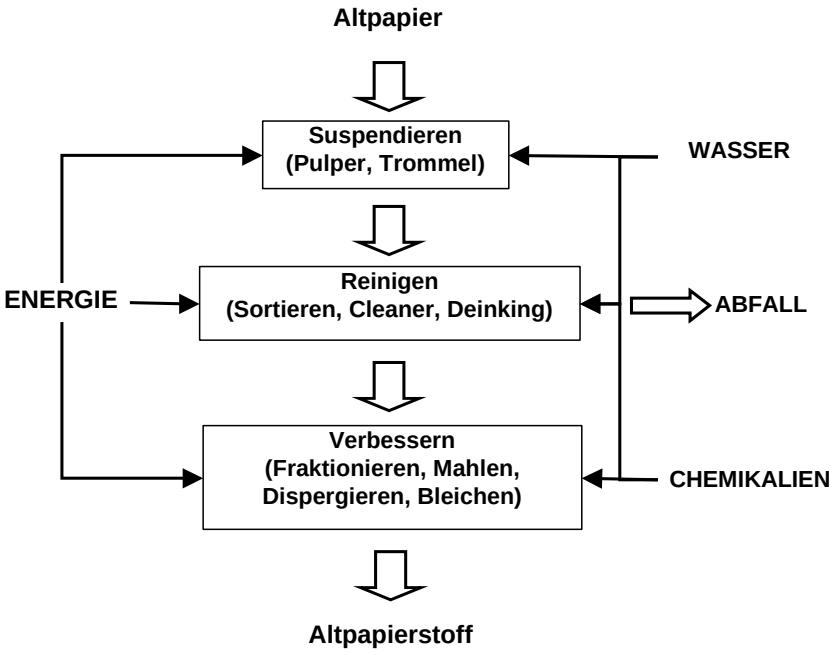



Abb. 2: Grundprozesse der Altpapieraufbereitung

Herstellung von Holzstoff:

Unter dem Begriff „Holzstoff“ werden heute alle Faserstoffe verstanden, deren Einzelfasern auf mechanischem Weg aus dem verholzten Faserverbund gelöst worden sind. Verfahrenstechnisch gesehen ist die Holzstofferzeugung ein Zerkleinerungsprozess, bei dem zusätzlich thermische Vorgänge auftreten.

Für die eigentliche Holzstoffherstellung – Zerfaserung des entrindeten Holzes – gibt es zwei Maschinen: Schleifer (Stein-Verfahren) oder Refiner. Je nach Anwendung des technologischen Verfahrens spricht man von Holzschliff oder Refinerholzstoff. Die Abb. 3 gibt einen Überblick über die Verfahren.

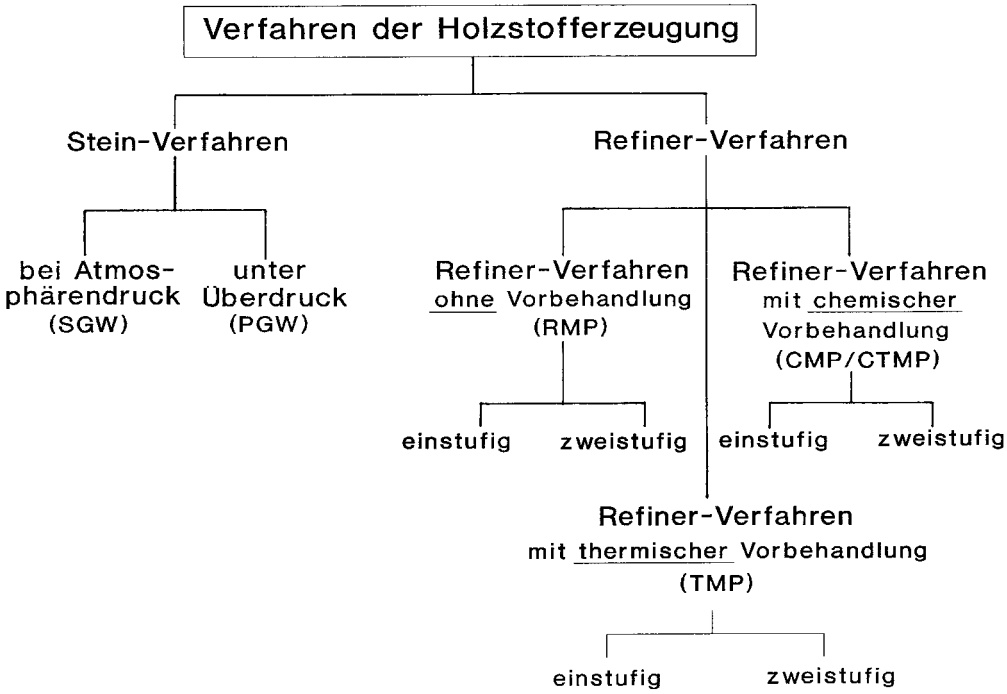



Abb. 3: Verfahren der Holzstofferzeugung

Die Zerfaserung erfolgt beim Steinschliffverfahren durch Anpressen von achsparallel zur Schleiferwelle liegenden Holzprügeln auf die Mantelfläche eines rotierenden Schleifsteins unter Zugabe von Wasser. Der anfallende Stoff muss durch mehrstufige mechanische Trennverfahren (Sortierung) von Unreinheiten wie Rinde oder Sand getrennt werden.

Beim Refiner-Holzstoffverfahren wird der Faserstoff durch mechanische Zerfaserung von Hackschnitzeln gewonnen. Ein Refiner ist eine Mahlmaschine, bei dem die Hackschnitzel auf den Stirnflächen rotierender Scheiben zerfasert werden (Scheibenmühle, Scheibenrefiner). Beim Refinerverfahren gibt es eine Vielzahl von Verfahrensvarianten, abhängig von der Vorbehandlung der Hackschnitzel (z.B. thermisch oder chemisch) oder der Betriebsweise des Refiners (drucklos oder unter Druck).

### 3.1.2 Stoffaufbereitung

Unter Stoffaufbereitung versteht man das Maschinenfertigmachen des Halbstoffes, d.h. die Arbeitsgänge Suspendieren, Reinigen und Mahlen der Halbstoffe (Faserstoffe), das Mischen der verschiedenen Faserstoffarten und die Zugabe von Füll- und Hilfsstoffen. Das Ergebnis ist der sog. Fertig- oder Ganzstoff. Die Abb. 4 zeigt das vereinfachte Schema der Stoffaufbereitung sowie die wesentlichen maschinentechnischen Aggregate.

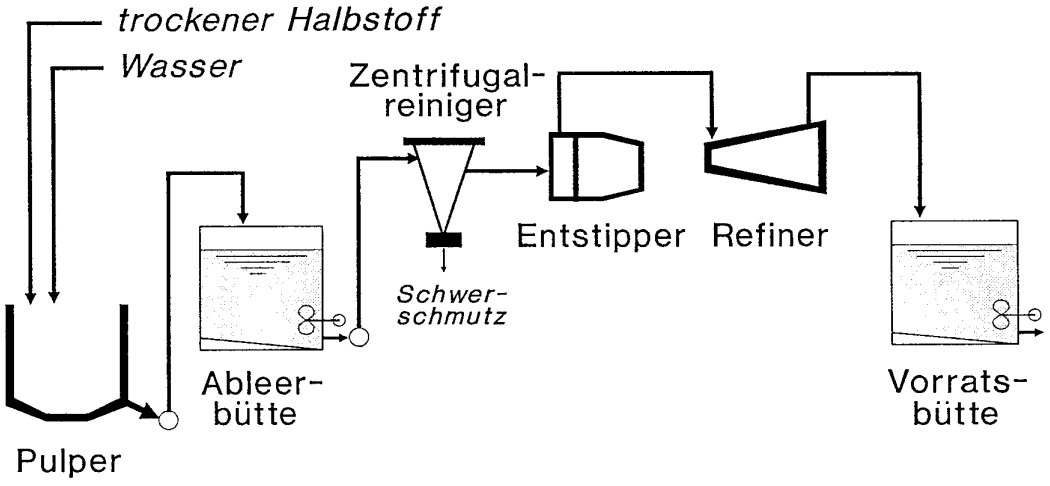



Abb. 4: Vereinfachtes Fließschema für eine Halbstoffaufbereitung

### 3.1.3 Papiermaschine

Papiermaschinen sind anspruchsvolle technische Anlagen. Trotz ihrer konstruktiven Vielfalt setzen sich alle Maschinen im Prinzip aus den gleichen Elementen zusammen. Die Ausführung der Elemente hängt stark von den erzeugten Produkten ab: Stoffauflauf und Siebpartie, Pressenpartie, Trockenpartie und Aufrollung. Das Grundschema einer Papiermaschine ist in Abb. 5 dargestellt.

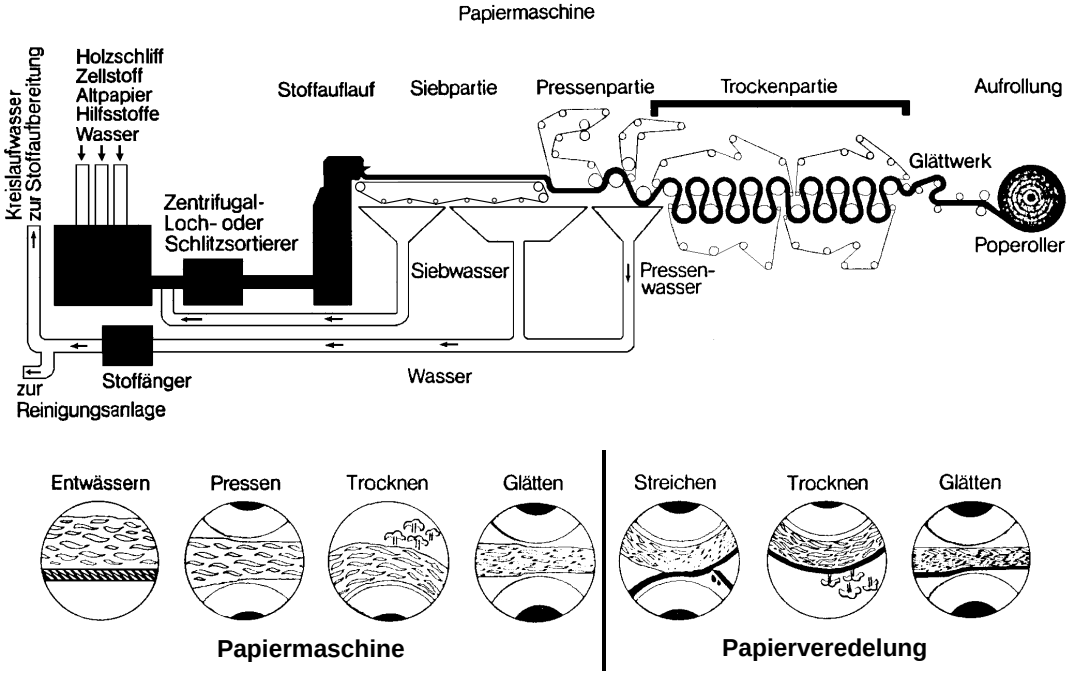



Abb. 5: Schema der Papierherstellung

Stoffauflauf und Siebpartie:

Der Stoffauflauf hat die Aufgabe, die hochverdünnte Fasermischung gleichmäßig auf die Breite der Papiermaschine zu verteilen. In der Siebpartie erfolgt die Formung des Netzwerkes der Papierbahn aus ihren Stoffkomponenten. Auf dem Sieb lagern sich die Fasern neben- und aufeinander ab. Das endlose Blatt wird durch einen Filtrationsvorgang gebildet, das Wasser läuft durch das Sieb hindurch bzw. wird nach unten abgesaugt.

Die Blattbildung ist abgeschlossen, wenn die Entwässerung soweit fortgeschritten ist, dass sich die Fasern in der Stoffsuspension nicht mehr frei bewegen können. Am Ende der Siebpartie enthält die Papierbahn allerdings immer noch ca. 80 % Wasser.

Pressenpartie:

Die noch wenig feste Papierbahn wird durch mechanischen Druck in der Pressenpartie weiter entwässert. Die Bahn wird auf einem saugfähigen endlosen Filztuch zwischen Walzen hindurchgeführt.

Die Bedeutung der mechanischen Entwässerung in der Pressenpartie liegt darin, dass eine Steigerung des Trockengehaltes um 1 % absolut eine Energieeinsparung an thermischer Energie in der Trockenpartie von ca. 5 % zulässt. Durch Innovationen in der Filzindustrie und im Maschinenbau wurden in den vergangenen Jahren immer höhere Entwässerungsleistungen in der Pressenpartie und in der Folge höhere Maschinengeschwindigkeiten erzielt.

Trockenpartie:

Im Anschluss an die Pressenpartie gelangt die Papierbahn in die Trockenpartie. Die Papierbahn wird über bis zu 100 dampfbeheizte Zylinder geführt. In der Trockenpartie können zusätzliche Maschineneinrichtungen spezielle Effekte bewirken (z.B. Leimpresse zur Erhöhung der Oberflächenfestigkeit des Papiers).

Ein Teil der Papiermaschinen besitzt im Anschluss an die Trockenpartie ein Glättwerk (bestehend aus mehreren Walzen), um die nahezu trockene Papierbahn zu verdichten und zu glätten.

Aufrollung:

Die fertige Papierbahn mit einer Restfeuchte von ca. 5-8 % wird auf einem Tambour aufgewickelt.

### 3.1.4 Veredelung

Die unterschiedlichen Ansprüche, die von der weiterverarbeitenden Industrie und vom Endverbraucher an die Eigenschaften von Papier gestellt werden, erfordern teilweise eine Veredelung von Papier. Genannt seien hier das Streichen von Papier und das Satinieren von Papier.

Durch das Streichen von Papier erhält man eine geschlossene Papieroberfläche. Dabei wird eine Streichfarbe bestehend aus Pigmenten und Bindemitteln auf das Rohpapier aufgetragen. Streichmaschinen sind komplexe Anlagen, die sowohl on-line (d.h. direkt nach der Trockenpartie vor der Aufrollung) als auch off-line (d.h. separat von der Papiermaschine) betrieben werden. Die Abb. 6 zeigt die Grundprozesse der Veredelung durch Streichen.

Eine nachträgliche Veredelung der Oberfläche lässt sich durch das Satinieren (Glätten) der Papierbahn mit Hilfe eines Kalanders erzielen.

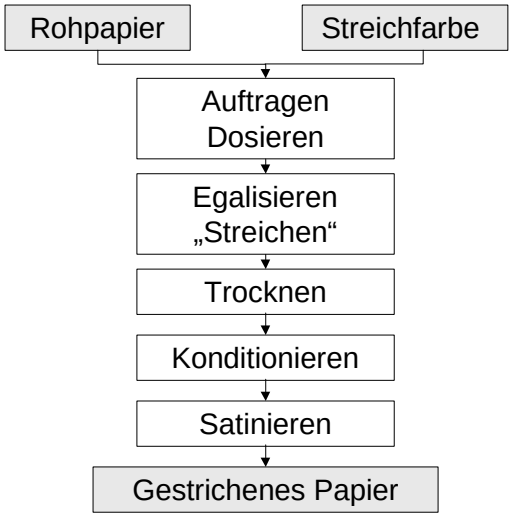



Abb. 6: Grundprozesse bei der Veredelung durch Streichen

### 3.2 Energiebedarf in der Papierindustrie

Die deutsche Zellstoff- und Papierindustrie ist der fünftgrößte industrielle Energieverbraucher. Sowohl aus umweltpolitischer Sicht als auch aus Kostengesichtspunkten ist das Thema Energieeinsparung eine Daueraufgabe der deutschen Papierindustrie. Bezogen auf den Umsatz beträgt der Anteil der Energiekosten ca. 10 %. Bei einzelnen Sorten ist der Anteil der Energie noch deutlich höher.

Die Papierindustrie hat daher frühzeitig versucht, Möglichkeiten zur Verringerung des Energieeinsatzes zu suchen. Die Energieeffizienz wurde durch technische Optimierung in Kraftwerken, Papiermaschinen sowie durch die Änderung der Rohstoffstruktur erreicht. So wuchs in den vergangenen 20 Jahren der absolute Energiebedarf lediglich um 39 %, während im gleichen Zeitraum die Produktionsmengen an Papier und Pappe um 121 % zunahmen.

Interessanter ist daher die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs. Der spezifische Energiebedarf, d.h. die zur Produktion einer Tonne Papier, Pappe und Karton benötigte Energie, sank von 8.242 kWh/t im Jahr 1955 auf 2.674 kWh/t im Jahr 2001 (siehe Abb. 7). Allerdings ist aus der Abbildung auch ersichtlich, dass die Senkung des spezifischen Energiebedarfs nun in kleineren Schritten vorangeht.

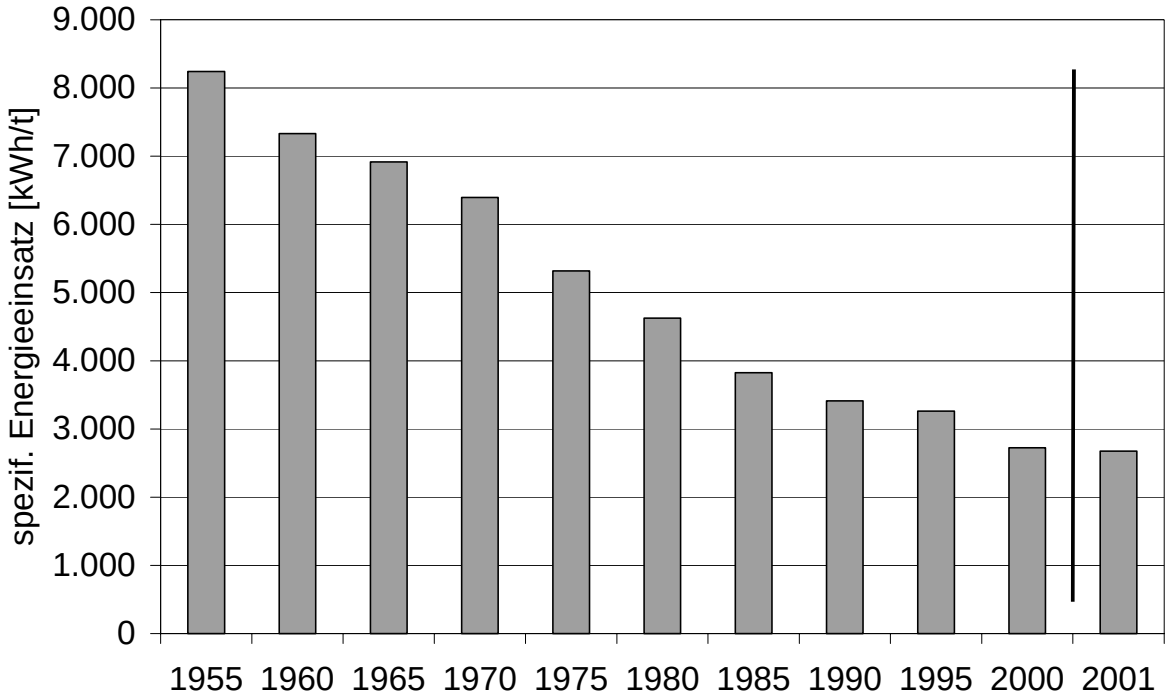



Abb. 7: Darstellung des spezifischen Energiebedarfs

Für die starke Reduzierung des spezifischen Energieeinsatzes sind mehrere Faktoren verantwortlich. Die wesentlichen Größen sind:

- verstärkter Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung in den industrieeigenen Kraftwerken
- Ausbau von Wärme-Rückgewinnungsanlagen
- Verbesserung der mechanischen Entwässerung in der Pressenpartie durch den Einsatz neuer Aggregate (z.B. Schuhpresse)
- Einsatz von Aggregaten mit höheren Wirkungsgraden
- zunehmende Substitution der energieintensiven Holzstofferzeugung durch Altpapiereinsatz
- verstärkter Füllstoff- und Pigmenteinsatz bei graphischen Papieren

Von Interesse ist auch die Veränderung der eingesetzten Energieträger. Die Abb. 8 zeigt den Wandel in der Energieträger-Struktur.

In einer ersten Phase erfolgte die weitgehende Substitution des Energieträgers Kohle durch das billigere Heizöl. In der zweiten Phase wurde das Heizöl, ausgelöst durch die Ölkrise von 1973, durch den verstärkten Einsatz von Erdgas und Fremdstrom verdrängt. Seit den 80er Jahren ist eine Zunahme der Nutzung von Produktionsreststoffen zur Energieerzeugung festzustellen. Der Vorteil des Einsatzes von Produktionsreststoffen (Sulfitablauge, Rinde, Faser- und Deinkingrückstände, Biogas) ist, dass diese überwiegend aus Naturfaser oder Holzbestandteilen bestehen und damit $CO_2$-neutral sind.

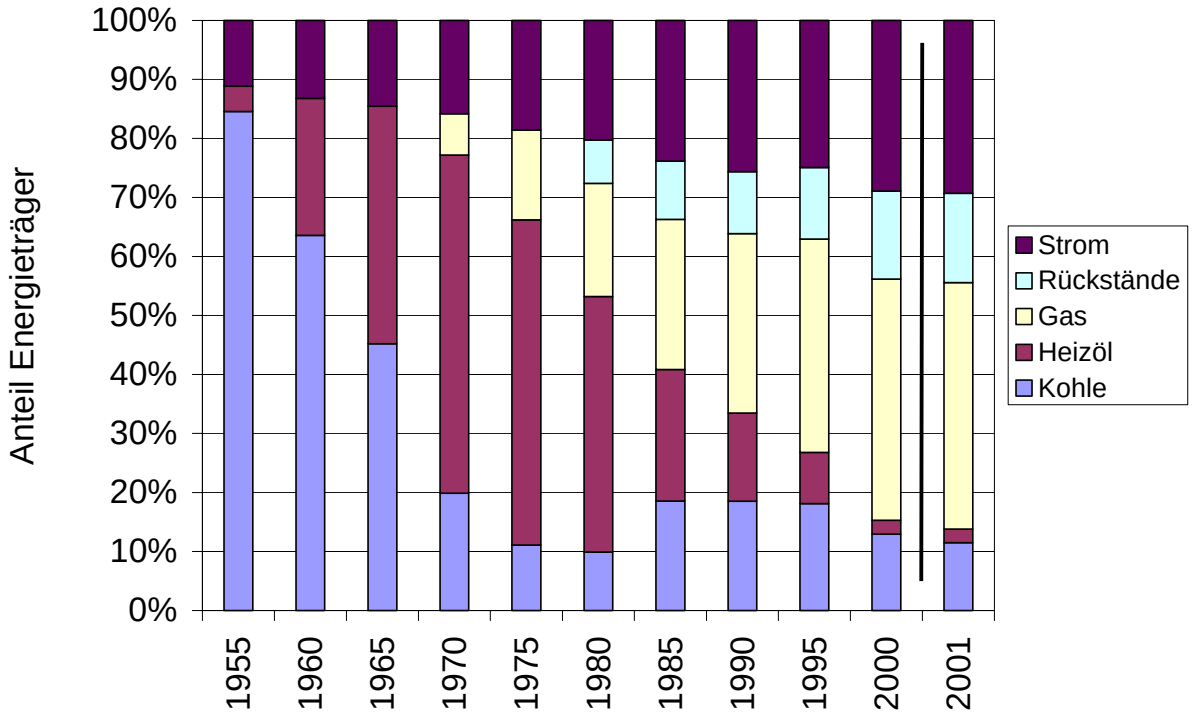



Abb. 8: Anteile der Energiearten am Energiebedarf der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie

Eine Vorstudie in der bayerischen Papierindustrie hat gezeigt, dass die Unternehmen weitere Potenziale zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs und zur Reduzierung der $CO_2$-Emissionen sehen. Allerdings sind die Einsparpotenziale deutlich geringer als in den vergangenen Jahrzehnten. Ein Großteil der Anstrengungen ist auch nur mit hohen Investitionen erzielbar.

Insbesondere die effiziente Nutzung von Niedertemperaturabwärme, die ungenutzt über das Wassersystem und die Abluft die Papierfabrik verlässt, stellt ein ungelöstes Problem der Papierindustrie dar.

# 4 Vorgehensweise und ermittelte Basisdaten

Das Projekt gliedert sich in die im Folgenden dargestellten Phasen I bis IV:

## 4.1 Phase I: Erstellung einer Wärmebilanz / Aufnahme des Ist-Zustandes

In dem Partnerbetrieb erfolgt eine detaillierte Bestandsaufnahme der Energiesituation, insbesondere die Erstellung einer Wärmebilanz. Die Wärmebilanz ist die Basis für die gezielte Simulation und Bilanzierung der möglichen Nutzung der Niedertemperaturabwärme. Die detaillierte Aufnahme des Ist-Zustandes konzentriert sich auf die Ermittlung und Bilanzierung des Wärmebedarfs der potenziellen Abnehmer.

### 4.1.1 Untersuchter Betrieb

Als Rohstoff wird im untersuchten Betrieb überwiegend Altpapier eingesetzt. Der Zellstoffeinsatz spielt eine untergeordnete Rolle. Eine Besonderheit ist die betriebsinterne Erzeugung von Holzstoff, der einen Rohstoffanteil von über 10% hat.

Als Produkte werden Zeitungsdruckpapiere für Tageszeitungen in Standardqualität, sowie in aufgebesserter Qualität für Beilagen und Anzeigenblätter hergestellt. Weiterhin erfolgt eine Produktion von Magazinpapieren für Tiefdruck und Heatset Offsetdruck. Verwendet werden diese Papiere z. B. für Zeitschriften, Kataloge oder Telefonbuchdruck.

Die gesamte Produktionsmenge des Werks im Untersuchungszeitraum beträgt 1529 t/d. Die Abwassermenge liegt im Untersuchungszeitraum bei 524,4 m³/h.

Zur Energieversorgung werden als Primärenergieträger Gas und Heizöl verwendet. In den beiden werkseigenen Kraftwerken erfolgt daraus die Stromerzeugung mittels Dampfturbinen. Der Niederdruckdampf der Turbinen wird an den Papiermaschinen zur Dampfversorgung verwendet. Der erzeugte Strom aus den Kraftwerken deckt den Werksbedarf nur zu einem geringen Teil, so dass die Stromversorgung zum überwiegenden Teil mit Fremdstrom erfolgt.

Für das Gesamtwerk betrug der Energiebedarf im Monat April ca. 130.159 MWh und liegt im Durchschnitt der Branche. Für das verfolgte Projektziel ist vor allem die Energiebilanz für die Systemgrenze *Wasser* von Bedeutung.

### 4.1.2 Beschreibung der grundsätzlichen Verfahrenstechnik und Definition der Systemgrenzen

Dieser Schritt umfasst die detaillierte Beschreibung der Energieversorgungsstruktur. Es wurden die eingesetzten Energieträger sowie Energiespeicher, die installierten Messstellen und die vorhandenen Energieströme ermittelt. Die Basis der Bewertung ist die Papiererzeugungsanlage. Nicht betrachtet werden im Rahmen dieses Projektes:

- Dampf- und Stromerzeugung (Kraftwerk)
- Logistik, Lagerung
- Vor- und nachgelagerte Prozesse

Betrachtete Systeme sind das **Stoff-Wassersystem** und das **Zu- und Abluftsystem**. In diesen werden alle durch Dampf und Strom in die Papiererzeugung eingetragenen Energieströme innerhalb der Anlage ausgetauscht und über die Systemgrenzen nach außen transportiert. Der Energietransport mit festen Medien (Papier, Reststoffe) leistet nur einen sehr geringen Beitrag zur Energiebilanz.

Die Struktur der Papierfabrik ist in Abb. 9 skizziert. In der Stoffaufbereitung finden sich drei Stränge zur Altpapieraufbereitung (DIP A, DIP B und DIP C), eine Zellstofflinie sowie die Holzschleiferei. Aus diesen Stoffaufbereitungslinien werden die drei Papiermaschinen PM A, PM B und PM C versorgt.

Jeder Strang aus der Altpapieraufbereitung ist dabei genau einer Papiermaschine zugeordnet. PM A wird ausschließlich mit Stoff aus der Deinking-Linie DIP A versorgt. PM B kann mit Stoff aus DIP B, mit Zellstoff und mit Holzstoff aus der Holzschleiferei betrieben werden. PM C wird durch Altpapier aus DIP C,sowie durch Zellstoff und Holzstoff versorgt.

Zwischen den einzelnen Anlagenteilen bestehen verschiedene Querverbindungen. Beispielsweise wird in nennenswertem Umfang Rückwasser der PM B oder PM C in der Holzschleiferei verwendet. Rückwasser der PM A fließt zur Zellstoffaufbereitung, wobei an der PM A jedoch kein Zellstoff verarbeitet wird. Rejekte der Stränge DIP B und C werden über Bellmerpresse[1] und Krofta[2] 3 zusammengefasst und erzeugen gemeinsames Abwasser.

Das Abwasser der gesamten Anlage sammelt sich im Vorklärbecken (VKB)/Puffer und wird zentral in der Abwasserreinigungsanlage behandelt.

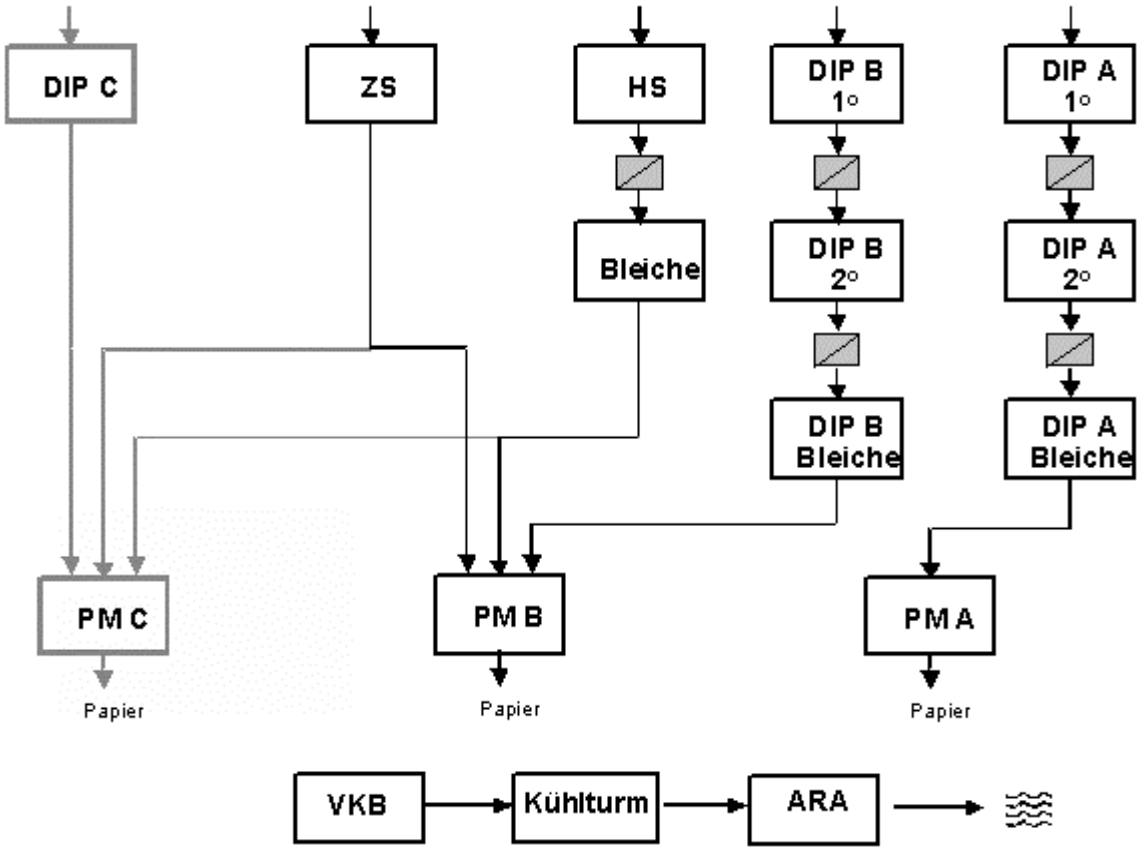



Abb. 9: Struktur der Anlage (Blockdiagramm der Stoff- und Wasserkreisläufe)

[1] Bellmerpresse: Doppelsiebbandpresse
[2] Krofta: Entspannungsflotationsanlage

### 4.1.3 Detaillierte Systemaufnahme

Es erfolgte eine detaillierte Systemaufnahme der Anlagen PM A, PM B, DIP B und DIP A sowie Schleiferei. Es wurden Aufzeichnungen und kontinuierliche Messungen des Unternehmens, Berechnungen aufgrund vorhandener Daten und fixer Parameter sowie punktuelle bzw. kontinuierliche ergänzende Messungen genutzt. Es wurden insgesamt 51 Probenahmestellen für die in Tab. 1 genannten Parameter definiert.

Während des Untersuchungszeitraumes wurden drei Probenahmerunden durchgeführt (siehe Tab.1). Die Probenahmen erfolgten als einfache Stichprobe.

Tab. 1: Liste der Probenahmestellen und ermittelte Parameter (P39, P42 und P44 wurden nicht benötigt)

| PN | | FS | CSB | ph, LF | FTR | T |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Anzahl Tests | 36 X | 48 X | 114 X | 9 X | 129 X |
| | Anzahl PN-Runden | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **54** | **Anzahl PN-Stellen** | **12** | **16** | **38** | **3** | **43** |
| P 1 | Schleifer | 3 X | | | | 3 X |
| P 2 | Zulauf Scheibenfilter | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 3 | nach Stapelturm | 3 X | | 3 X | | 3 X |
| P 4 | Klarfiltrat Schleiferei | 3 X | | 3 X | | 3 X |
| P 5 | Dickstoff Scheibenfilter | 3 X | | | | |
| P 6 | Zulauf Deinkingflotation DIP B | | | 3 X | | 3 X |
| P 7 | Zulauf Scheibenfilter DIP B Loop 1 | 3 X | 3 X | | 3 X | 3 X |
| P 8 | Dickstoff Presse DIP B Loop 1 | 3 X | | | | |
| P 9 | Klarfiltrat DIP B Loop 1 | | | 3 X | | 3 X |
| P 10 | Klarwasser Krofta 1 | | | 3 X | | 3 X |
| P 11 | nach Bleiche DIP B Loop 2 | | | | | 3 X |
| P 12 | Zulauf Scheibenfilter DIP B Loop 2 | | 3 X | 3 X | 3 X | 3 X |
| P 13 | Dickstoff Scheibenfilter DIP B Loop 2 | 3 X | | | | |
| P 14 | Klarfiltrat DIP B Loop 2 | | | 3 X | | 3 X |
| P 15 | Fertigstoff DIP B | 3 X | | 3 X | | 3 X |
| P 16 | Zulauf Deinkingflotation Strang | | | 3 X | | 3 X |
| P 17 | Zulauf Scheibenfilter DIP A Loop 1 | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 18 | Dickstoff Presse DIP A Loop 1 | 3 X | | | | |
| P 19 | Klarfiltrat DIP A Loop 1 | | | 3 X | | 3 X |
| P 20 | Klarwasser Krofta 2 | | | 3 X | | 3 X |
| P 21 | nach Bleiche DIP A Loop 2 | | | | | 3 X |
| P 22 | Zulauf Scheibenfilter DIP A Loop 2 | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 23 | Dickstoff Scheibenfilter DIP A Loop 2 | 3 X | | | | |
| P 24 | Klarfiltrat DIP A Loop 2 | | | 3 X | | 3 X |
| P 25 | Fertigstoff DIP A | 3 X | | 3 X | | 3 X |
| P 26 | Fertigstoff Zellstoff | 3 X | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 27 | Siebwasser 1 PM B | | 3 X | 3 X | 3 X | 3 X |
| P 28 | Siebwasser 1 PM A | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 29 | Klarfiltrat Scheibenfilter PM B | | | 3 X | | 3 X |
| P 30 | Klarfiltrat Scheibenfilter PM A | | | 3 X | | 3 X |
| P 31 | Abwassergrube PM B | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 32 | Abwassergrube PM A | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 33 | Klarwasser Krofta 3 | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 34 | Siebbandpresse (Andritz) zur ARA | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 35 | Zulauf Kühlturm ARA | | | 3 X | | 3 X |
| P 36 | Abwasser DIP B | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 37 | Bellmer Biologie | | 3 X | | | 3 X |
| P 38 | Abwasser PM C | | | 3 X | | 3 X |
| P 39 | | | | | | |
| P 40 | Gesamtabwasser PM A/PM B | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 41 | Zulauf Biologie (Nach Kühlturm) | | | 3 X | | 3 X |
| P 42 | | | | | | |
| P 43 | Trübfiltrat PM B | | | 3 X | | 3 X |
| P 44 | | | | | | |
| P 45 | Trichter PM B | | | 3 X | | 3 X |
| P 46 | Spritzwasser PM A | | | 3 X | | 3 X |
| P 47 | RW Turm DIP B | | | 3 X | | 3 X |
| P 48 | RW Turm DIP A | | | 3 X | | 3 X |
| P 49 | Rückwasser PM C | | 3 X | 3 X | | 3 X |
| P 50 | Rückwasser zur Schleiferei | | | 3 X | | 3 X |
| P 51 | Ablauf ARA in Vorfluter | | | 3 X | | 3 X |
| P 52 | DIP | | | | | |
| P 53 | Zellstoff vor Mahlung | | | | | |
| P 54 | Frischwasser (2000m³ Tank) | | | | | |
| | | | | | | |

Daneben wurden in folgenden Anlagenteilen Zu- bzw. Abluftmessungen durchgeführt.

Tab. 2: Vermessene Abluftströme

| **Vermessene Abluftströme** | P [kW] | ΔT [°C] | kWh/t | Bezugsgröße |
|---|---|---|---|---|
| HS- Abluft Schleifer 4, 5, (8, 9), 10 - 15 | -8710 | 13 | -1342 | Holzschliff |
| PM A- Haubenabluft VTP | -10068 | 19 | -796 | Bruttoprod. |
| PM A- Haubenabluft NTP | -14520 | 25 | -1148 | Bruttoprod. |
| PM B- Haubenabluft | -52536 | 41 | -2649 | Bruttoprod. |
| PM B- Vakuumpumpen | -4800 | 138 | -242 | Bruttoprod. |

Die Erfassung der Produktionsdaten und die Probenahmen wurden im Zeitraum vom 08.04.2002 bis 19.04.2002 durchgeführt. Die Probenahmen erfolgten für die Papiermaschinen an unterschiedlichen Tagen. Jede Papiermaschine wurde an jeweils drei Tagen beprobt. Alle Daten zum Ist-Zustand beziehen sich, soweit nicht gesondert erwähnt, auf den Untersuchungszeitraum. Die Produktionsdaten während des Untersuchungszeitraumes sind in Tab. 3 aufgeführt.

Die mittlere Produktionsmenge (Rohpapier, Bruttoproduktion) beträgt 303,5 t/d an der PM A bzw. 476,0 t/d an der PM B. Für die PM C ergeben sich Produktionsdaten von 749,5 t/d.

Der Anteil des Holzstoffs an der von den Papiermaschinen abgenommenen Faserstoffmenge beträgt in etwa 10 %. Die durchschnittliche Holzstofferzeugung liegt bei 155,8 t/d (Tab. 4).

Tab. 3: Produktionsdaten Ist-Zustand

| **Produktionsdaten** | | Durchschnitt im Untersuchungszeitraum |
|---|---|---|
| **PM A** | | |
| **Geschwindigkeit** | m/min | 1.158 |
| **Arbeitsbreite** | cm | 460 |
| **Bruttoproduktion** | t/d | 303,5 |
| **Nettoproduktion** | t/d | 274,7 |
| **Ausfallzeit** | min | 171 |
| **PM B** | | |
| **Geschwindigkeit** | m/min | 1.259 |
| **Arbeitsbreite** | cm | 651 |
| **Bruttoproduktion** | t/d | 476,0 |
| **Nettoproduktion** | t/d | 441,5 |
| **Ausfallzeit** | min | 142 |
| **PM C** | | |
| **Geschwindigkeit** | m/min | 1.488 |
| **Arbeitsbreite** | cm | 810 |
| **Bruttoproduktion** | t/d | 749,5 |
| **Nettoproduktion** | t/d | 690,0 |
| **Ausfallzeit** | min | 197 |
| **Gesamtproduktion, Brutto** | | 1.529 |
| **Gesamtproduktion, Netto** | | 1.406 |

Tab. 4: Produktionsdaten der Schleiferei

| **Holzschleiferei** | | Durchschnitt im Untersuchungszeitraum |
|---|---|---|
| **Holzschl.** | t | 155,8 |
| **Raummeter** | ø | 549 |
| **Leistung** | kWh/100kg | 164 |
| **Ausfallzeit** | min | 2.403 |
| **Wasser PMC** | % | 82% |
| **Wasser PMB** | % | 18% |

Auf der Basis der ermittelten Daten erfolgte eine Ermittlung der Wärmeströme und der effektiven Wärmeverluste der Hauptverbraucher sowie eine Charakterisierung der Energiezustände im Abwärmebereich. Eine komplette Wärmebilanz für das Stoff-Wassersystem wurde erstellt.

## 4.2 Phase II: Erstellung eines Konzeptes zur Nutzung der Niedertemperaturabwärme

Der Mittelpunkt der Untersuchung ist die Identifikation von potenziellen Abnehmern sowie alternativ die Ermittlung von Möglichkeiten zur Aufwertung von Niedertemperaturwärme. Es wurde ein Maßnahmenkatalog erarbeitet. Daraus ergibt sich ein Konzept für eine verbesserte Nutzung der Niedertemperaturabwärme für die untersuchte Anlage. Die Erstellung des Konzeptes mit den genannten Schwerpunkten beruht insbesondere auf der Erarbeitung und Nutzung eines Simulationsmodells zur Bilanzierung der Wärmeströme.

Anhand der Kalibrierdaten konnte ein gut an die Realität angepasstes Simulationsmodell aufgebaut werden. Das Modell des Ist-Szenarios dient als Basis für alle dargestellten Szenarien.

### 4.2.1 Modellerstellung

Es erfolgte eine Erstellung und Kalibrierung eines Bilanzmodells (Wärmebilanz) für den Partnerbetrieb. Basis ist das Stoff-Wassersystem. Die Abluft ist als Randbedingung in dem System berücksichtigt. Das Modell ist statisch und berücksichtigt die Parameter

- Wasser
- Faserstoff
- CSB
- Wärme (Enthalpie)

Basis der Simulation ist die Software IDEAS der Firma AMEC Technologies. Die verwendeten Blöcke (objektorientierte Simulation) stellen Eigenentwicklungen der PTS dar.

Die Struktur des Modells basiert auf der Blockstruktur der Anlage. Die Systemgrenzen wurden bereits in Abb. 9 dargestellt.

Das Modell weist keine einzelnen Apparate auf. Das System ist in Blöcke untergliedert, die den Teilsystemen ("Loops") Zellstoffaufbereitung (ZS), Schleiferei, den Bleichereisträngen mit entsprechenden Unterloops, dem DIP-Strang und den Papiermaschinen entsprechen. Lediglich die Eindicker und die Bleichen wurden einzeln abgebildet. Die Abb. 10 zeigt die Komplexität des Modells. Ein wesentlicher Teil der vorhandenen Verbindungen ist durch namentliche Verknüpfungen ersetzt, um die Übersicht zu erhöhen.

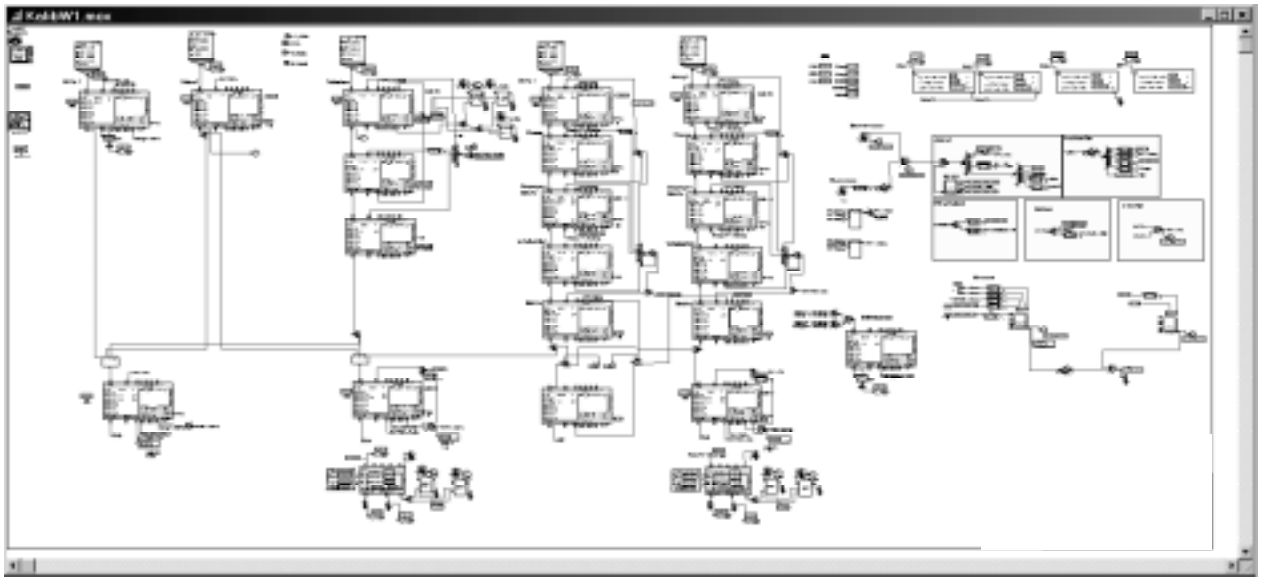


Abb. 10: Abbildung des Simulationsmodells

### 4.2.2 Simulationsrechnungen

Es erfolgten Simulationsrechnungen auf der Basis von vorab definierten Szenarien.

Tab. 5: Simulierte Szenarien

| Beschreibung der Szenarien | Szenario |
|---|---|
| Identifikation von potenziellen internen Abnehmern | 1.1 – 1.4 (Tausch Wasser – Wasser)<br><br>2.1 – 2.5 (Tausch Luft – Wasser) |
| Untersuchung von Möglichkeiten zur Aufwertung der Abwärmeströme | 3.1 – 3.2 (Einsatz von Wärmepumpen) |
| Ermittlung von Möglichkeiten zur Veränderung der kritischen Prozessparameter | 4.1 – 4.2 |
| Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte | 5.1 (Einsatz von Adsorptionskältemaschinen) |
| Externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme | 6.1 – 6.2 (Schwimmbad, Fernheizung) |

### 4.2.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse und Auswahl geeigneter Konzepte

Auf Basis der Ergebnisse der Szenarien erfolgte eine Festlegung folgender Angaben

- Dimensionierung der notwendigen Größe von Wärmetauschern, Wärmepumpen etc.
- Festlegung der Aufstellungsorte
- Abschätzung der notwendigen Verrohrung und MSR-Technik

Aus dieser Basis erfolgte eine Ermittlung der erforderlichen Sach- und Personalmittel. Mit Hilfe der Ergebnisse erfolgte eine Prüfung und Bewertung der Konzeptvarianten unter verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Kriterien (Wirtschaftlichkeitsanalyse). Es wurden potenzielle Nutzungsvarianten selektiert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.6 dargestellt.

## 4.3 Phase III: Übertragung der Ergebnisse auf die bayerische Papierindustrie

Anhand der Ergebnisse dieses Teilprojektes sollen Rückschlüsse auf das $CO_2$-Minderungspotenzial sowie den möglichen Einsatz verschiedener Technologien zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme in bayerischen Papierfabriken gezogen werden. Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen und Betrachtungen werden die Ergebnisse auf die Breite der Papier erzeugenden Industrie übertragen.

Die Schritte sind im Einzelnen:

- Darstellung der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Technologien zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme (technische und wirtschaftliche Randbedingungen, eventuelle Schwierigkeiten und Besonderheiten)
- Erstellung eines Katalogs mit allgemeingültigen Handlungsempfehlungen für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme
- Abschätzung einer Wärmebilanz für die gesamte bayerische Papier erzeugende Industrie auf der Basis vorliegender Statistiken und einer Hochrechnung der im Rahmen des Projektes ermittelten Daten
- Abschätzung der $CO_2$-Minderungspotenziale in der bayerischen Papier erzeugenden Industrie durch Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 dargestellt.

# 5 Ergebnisse

## 5.1 Bilanz der Anlage

### 5.1.1 Leistungsaufnahme und -abgabe der Papiererzeugungsanlage

Betrachtet man die Gesamtbilanz des Werkes ohne PM C so fällt auf, dass die Abstrahlungs- und Abluftverluste einen hohen Anteil an den Gesamtleistungsverlusten haben. Nur ca. 15% der Wärme werden mit dem Abwasser an die Umgebung abgegeben. 81% verlassen das System mit der Abluft und durch Abstrahlung. Das Abwasser der PM C und DIP C ist als Input in das System zu werten, da die ARA Bestandteil der bilanzierten Anlage ist.

Tab. 6: Leistungsaufnahme und -abgabe des Werkes mit ARA ohne PM C und DIP C

| | Bilanz Werk ohne PMC und DIP C | kW |
|---|---|---|
| Input | Strom | 38.145 |
| | Dampf | 38.597 |
| | Abwasser von PM C | 7.382 |
| | **Summe** | **84.124** |
| | | |
| Output | Abwasser | 12.911 |
| | Abluft und Abstrahlung | 67.964 |
| | Austausch mit PMC (netto) | 3.249 |
| | **Summe** | **84.124** |

### 5.1.2 Leistungsaufnahme und -abgabe des Bezugsystems „Stoff- und Wassersystem“

Der Dampfeintrag in das Bezugsystem „Stoff- und Wassersystem“ ist die Menge, die direkt in das Wasser- und Stoffsystem zugegeben wird. Nicht enthalten ist der Dampfbedarf in der Trockenpartie. Durch eine Erhöhung der Temperatur im Siebwasser der Papiermaschine erhöht sich die Entwässerung in Sieb- und Pressenpartie infolge einer niedrigeren Viskosität. Aus der besseren Entwässerung resultiert ein höherer Trockengehaltes der Papierbahn, was den Dampfbedarf in der Trockenpartie reduziert. Obwohl diese Einsparungen außerhalb der betrachteten Systemgrenzen entstehen, wurden sie berücksichtigt da sie durch Änderungen des Wärmehaushaltes im Stoff- und Wassersystem verursacht werden.

Unter der Kategorie „Kühler und Wärmetauscher“ sind auch bereits vorhandene Anlagen zur Wärmerückgewinnung enthalten, die einen Teil der in der Trockenpartie als Dampf eingesetzten Energie wieder für den Prozess verfügbar machen.

Tab. 7: Leistungsaufnahme und -abgabe des betrachteten Systems „Stoff und Wasser“ mit ARA ohne PM C und DIP C

| | Bilanz "Stoff und Wasser" ohne PMC und DIP C | kW |
|---|---|---|
| Input | Dampf | 5.706 |
| | Dissipation (el. Energie) | 14.371 |
| | Kühler und Wärmetauscher | 19.193 |
| | Abwasser von PM C | 7.382 |
| | **Summe** | **46.652** |
| | | |
| Output | Abluft SP, PP und Abstrahlung | 28.728 |
| | Papier | 1.764 |
| | Abwasser | 12.911 |
| | Austausch mit PMC (netto) | 3.249 |
| | **Summe** | **46.652** |

## 5.2 Nutzbare Quellen und Senken

### 5.2.1 Dampfeintrag und Abluft

Wichtigstes Ergebnis der Aufnahme des Ist-Zustandes war die Identifizierung der für eine Energieeinsparung nutzbaren Wärmequellen und -senken des Papiererzeugungsprozesses (Abb. 11). Diese sind im Folgenden genannt. Wesentlich ist dabei das betrachtete System. Da es sich um das System „Stoff und Wasser“ handelt, wurde die Systemgrenze entsprechend dem Wasser gewählt. Das betrachtete System endet damit am Eingang der Trockenpartie.

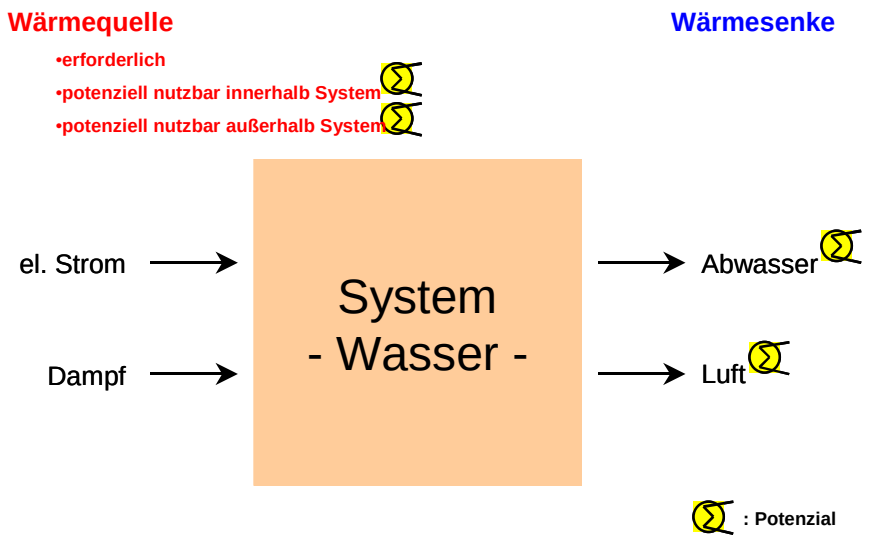



Abb. 11: Quellen und Senken

Für das System „Wasser und Stoff“ sind Energieeinträge (Quellen) erforderlich, die zur Erhöhung der Temperatur dieses Systems dienen, insbesondere direkte Wärmeeinträge.

Tab. 8: Energiequellen für das Stoff-Wassersystem

| **Erforderliche Wärmequellen für Produktion** | P [kW] | ΔT [°C] | kWh/t | Bezugsgröße |
|---|---|---|---|---|
| Gesamtwerk FW-Aufheizung Flusswasser | 2640 | 5,0 | 41,4 | Bruttoprod. Ges. |
| PM A- Dampfblaskasten | 448 | | 35,4 | Bruttoprod. PM |
| PM A- Siebwasserbeheizung | 725 | 0,3 | 57,3 | Bruttoprod. PM |
| PM A- FW Aufheizung | 608 | 5,5 | 48,1 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Dampfblaskasten | 1193 | | 60,2 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Siebwasserbeheizung | 858 | 0,2 | 43,3 | Bruttoprod. PM |
| PM B- FW Aufheizung | 60 | 39,4 | 3,0 | Bruttoprod. PM |
| Disperger DIP B | 925 | 18,4 | 40,6 | AP-Einsatz |
| Disperger DIP A | 1025 | 22,0 | 68,7 | AP-Einsatz |

In Tab. 8 sind Energiequellen zusammengefasst, die jeweils einem prozessbedingten Zweck dienen, z. B. der Erreichung eines gewünschten Temperaturniveaus in den Dispergern. Diese Energiequellen können durch eine geänderte Wärmeführung im Prozess überflüssig werden, wenn das gewünschte Temperaturniveau auf andere Weise erreicht werden kann. Es sind folglich Wärmequellen, die Einsparpotenziale beinhalten.

In Tab. 9 sind Energiequellen für das System zusammengefasst, die für den Prozess notwendig sind, aber nicht ersetzt werden können. Diese beinhalten den Wärmeeintrag durch den prinzipbedingt vorhandenen Wirkungsgrad. Der Wärmeeintrag könnte durch den Einsatz effizienterer Anlagen reduziert, nicht aber durch eine geänderte Wärmeführung im Prozess verringert werden. Zusätzlich sind Wärmequellen aufgeführt, die bereits eine Nutzung von Abwärme darstellen. Dies sind z. B. die Energieeinträge von Hydraulikölkühlern.

Tab. 9: Externe Energiequellen für das Stoff-Wassersystem

| **Sonstige Wärmequellen im System** | P [kW] | ΔT [°C] | kWh/t | Bezugsgröße |
|---|---|---|---|---|
| HS- Strom Schleifer | 10242 | | 1577,6 | Holzschliff |
| HS- Strom Schleifer Nebenmaschinen | 3441 | | 530,0 | Holzschliff |
| HS- Kühlung Schleifer | 405 | 2,2 | 62,4 | Holzschliff |
| Zellstoff Refiner | 186 | 3,0 | 119,4 | Zellstoff |
| PM A- Gesamtstromverbrauch | 4552 | | 360 | Bruttoprod. PM |
| PM A- Wärmerückgewinnung NTP | 661 | 5,6 | 52,3 | Bruttoprod. PM |
| PM A- Wärmerück. VTP (für Klarfiltrat) | 180 | 6,5 | 14,3 | Bruttoprod. PM |
| PM A- Hilfskondensator | 114 | 28,0 | 9,0 | Bruttoprod. PM |
| PM A- Kondensator Deculator | 382 | 28,6 | 30,2 | Bruttoprod. PM |
| PM A- div. Kühler | 600 | 6,7 | 47,5 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Gesamtstromverbrauch | 8528 | | 430,0 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Wärmerückgewinnung | 1663 | 6,4 | 83,9 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Hilfskondensator | 365 | 0,9 | 18,4 | Bruttoprod. PM |
| PM B- WT Umlaufschmierung | 208 | 26,0 | 10,5 | Bruttoprod. PM |
| PM B- Kühlkreislauf (in Trog) | 384 | 9,6 | 19,4 | Bruttoprod. PM |
| DIP B - Strom | 6608 | | 290,0 | AP-Einsatz DIP B |
| DIP A - Strom | 4773 | | 320,0 | AP-Einsatz DIP A |

In Tab. 10 sind gemessene und direkt quantifizierbare Energiesenken dargestellt. Das sind Senken, die das betrachtete System „Wasser und Stoff“ verlassen, z.B. die Abluft der Schleiferei, das Abwasser des Prozesses oder der Luftwärmetauscher für das Abwasser. Nicht aufgeführt, da nicht direkt quantifizierbar, sind diffuse Senken wie die Wärmeabstrahlung der Behälter und Anlagen und die Abluft der Gebäude durch offene Türen etc. Diese Senken sind nicht für eine Nutzung geeignet.

Tab. 10: Energiesenken für das Stoff-Wassersystem

| **Wärmesenken** | P [kW] | ΔT [°C] | kWh/t | Bezugsgröße |
|---|---|---|---|---|
| HS- Abluft Schleifer 4, 5, (8, 9), 10 - 15 | -8710 | 13,2 | -1341,5 | Holzschliff |
| PM B- Trichter | -92 | 0,8 | -4,6 | Bruttoprod. |
| ARA Kühlturm | -7189 | 11,7 | -112,8 | Bruttoprod. |
| ARA Ablauf in Vorfluter | -12911 | 20,6 | -202,7 | Bruttoprod. |
| Rejekt (gesamt) | -457 | | -7,2 | Bruttoprod. |
| Energieaustrag mit Papier nach Presse | -2924 | | -45,9 | Bruttoprod. |

In Tab. 11 sind potenziell nutzbare Energiequellen dargestellt, die nicht dem System „Wasser und Stoff“ zugeordnet sind. Die Papierbahn verlässt das betrachtete System „Wasser und Stoff“ mit dem Eintritt in die Trockenpartie. Dem Papier anschließend zur Trocknung zugeführte Ener-

gie hat keinen direkten Einfluss mehr auf das betrachtete System. Die Energie in der Abluft der Trockenpartien ist jedoch als externe Wärmequelle potenziell nutzbar.

Tab. 11: Potenzielle externe Energiesenken für das Stoff-Wassersystem

| **Potentielle externe Wärmequellen** | P [kW] | ΔT [°C] | kWh/t | Bezugsgröße |
|---|---|---|---|---|
| PM A- Haubenabluft VTP | -10068 | 18,9 | -796,2 | Bruttoprod. |
| PM A- Haubenabluft NTP | -14520 | 25,4 | -1148,3 | Bruttoprod. |
| PM B- Haubenabluft | -52536 | 40,6 | -2649,1 | Bruttoprod. |
| PM B- Kühlturm Janus | -313 | 12,9 | -15,8 | Bruttoprod. |
| PM B- Vakuumpumpen | -4800 | 137,7 | -242,0 | Bruttoprod. |

### 5.2.2 Ermittelte Kältebedarfe

Der Kältebedarf der Anlage beträgt ca. 3 MW (Tab. 12) Dieser Bedarf wird derzeit durch konventionelle Kältemaschinen gedeckt.

Tab. 12: Kältebedarfe der Anlage

| **Aggregat** | **Ort** | **Kompressor Leistungsaufnahme** | **Kühlleistung** |
|---|---|---|---|
| | | kW | kW |
| PM B Zusatzkühlung | neben Aufzug Warte | 20,5 | 57 * |
| PM B Hauptkühlung | unter Treppe Warte | 7,7 * | 21,5 |
| PM A Hauptkühlung - 1 | Keller PM A | 28 | 79,7 |
| PM A Hauptkühlung - 2 | Keller PM A | 20 * | 56 * |
| PM A Elektroraum | Dach PM A | | 27,8 |
| PM C Gesamtkühlung | PM C Keller | 800 | 6000 |
| typischer Wert | | 200 | 1500 |
| Schleiferei 20 kV-Raum | Dach Schleiferei | 6,27 | 18,25 |
| Schleiferei Warte und E-Räume | Schleiferei 1. Ebene | 7,5 | 22,9 |
| DIP A + B | | 29,6 | 83 * |
| AP Halle | Dach Warte AP-Halle | 8,4 | 21,9 |
| ARA Warte | Außen an Warte | 8 | 25,7 |
| ARA Dach Ozonanalage | Dach Ozonanalage | 30,6 | 86 * |
| ARA Kühlung Ozongeneratoren | Nebengeb. Ozonanlage | 360 | 1.008 * |
| **Summe (tatsächliche Werte)** | | **727** | **3008** |
| **PM A+PM B** | | **120** | **366** |

* errechnet

## 5.3 Ergebnisse der Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse ermöglicht die Berechnung des maximalen Einsparpotenzials auf der Basis der für den Wärmeaustausch in Frage kommenden Quellen und Senken. Dabei ist für die betrachtete Anlage natürlich nur eine Substitution der vorhandenen Energieeinträge z.B. Dampfaufheizung von Kreislaufwasser durch innerhalb der Anlage verfügbare Wärmequellen von Interesse. Diese verfügbaren Wärmequellen sind die „hot utilities“. Ein Beispiel dafür sind heiße, feuchte Abluftströme. Diesen werden die notwendigen Aufheizungen als „cold utilities“ gegenübergestellt. Ein Beispiel dafür ist die Zusatzheizung mit Dampf im Siebwasser. Nicht von Interesse sind cold utilities, an denen prinzipbedingt keine Substitution erfolgen kann. Dies ist z.B. die Aufheizung des Stoff-Wassersystems durch den Schleifer oder durch Pumpen. Stellt man nun die Kurven der hot und der cold utilities gegenüber und nimmt eine minimale für den Wärmetausch notwendige Temperaturdifferenz von 5 K an, erhält man Abb. 12. Nicht berücksichtigt wurden die Kältebedarfe der Anlage.

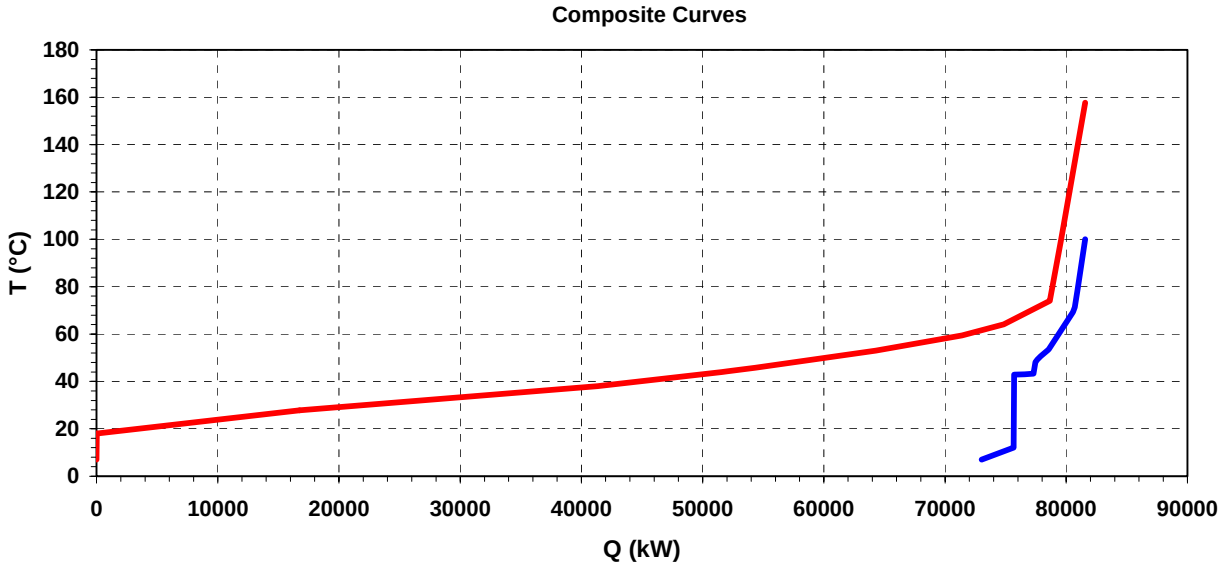



Abb. 12: Pinch-Analyse

Das Ergebnis der Pinch-Analyse ist das Potenzial zur Energieeinsparung für die betrachteten Quellen und Senken. Für die in den untersuchten Anlagen relevanten Quellen und Senken ergeben sich folgende Werte:

| | |
|---|---|
| derzeitiger zusätzlicher Wärmebedarf im Wassersystem: | 8,5 MW |
| minimaler zusätzlicher Wärmebedarf: | 0 MW |
| max. theoretische Einsparung durch Wärmetauscher: | 8,5 MW |

weitere Einsparungen möglich (Wärmepumpe)

Energieeinsparung: 6,1 GWh p.m.

Die Energieeinsparungen entsprechen einer monatlichen Kosteneinsparung von 183.000 € (0,03 €/kWh). Diese Einsparungen beziehen sich auf den erfassten Ist-Zustand. Im Winter ist ein deutlich höheres Einsparpotenzial zu erwarten. Ebenso ist bei einem Einsatz von Wärmepumpen eine höhere Einsparung erzielbar.

Um das tatsächlich nutzbare Potenzial zu ermitteln, wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, die im Folgenden beschrieben sind.

## 5.4 Möglichkeiten der Nutzung von Niedertemperaturabwärme (Konzeptvarianten)

Zur Nutzung des Potenzials wurden folgende grundsätzliche Möglichkeiten eines Wärmeübertrags zwischen Prozessmedien in Betracht gezogen (siehe Tab. 5) :

- Tausch Wasser gegen Wasser
- Tausch Wasser gegen Luft
- Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen, Eigen- und Fremdnutzung

### 5.4.1 Szenariengruppe 1: Tausch Wasser gegen Wasser

Für den Wärmeaustausch Wasser gegen Wasser wurden 4 Szenarien erarbeitet (Abb. 13).

**SZ 1.1.** Nutzung der Wärme des Rohabwassers zur Aufwärmung des Flusswassers. Die dortige Dampfbeheizung könnte dadurch ersetzt werden.

**SZ 1.2.** Austausch der Wärme im Klarfiltrat 2° Loop der Deinkinganlage DIP A gegen das Klarfiltrat der PM A. Die Dampfbeheizungen im Siebwasser können durch eine höhere Systemtemperatur ersetzt werden.

**SZ 1.3.** Analog zur Szenario 2 für die PM B.

**SZ 1.4.** Wärmeaustausch mit dem Filtrat Holzschleiferei mit Klarfiltrat der PM B. Diese Schaltung ist der Variante 3 wegen des höheren Temperaturunterschieds vorzuziehen. Ziel ist auch hier die Vermeidung der Direktdampfbeheizung im Siebwasser durch höhere Systemtemperatur.

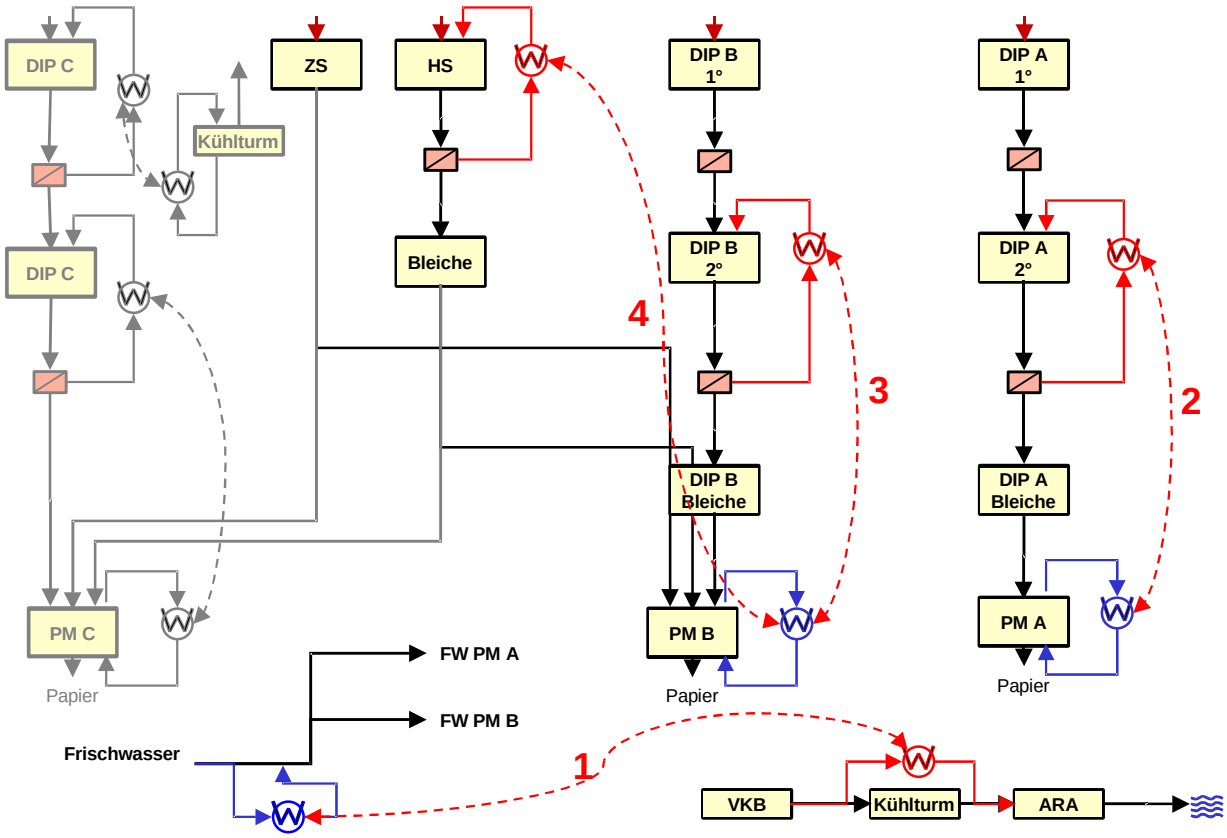



Abb. 13: Szenarien 1.1 – 1.4 für den Tausch Wasser gegen Wasser

### 5.4.2 Szenariengruppe 2: Tausch Wasser gegen Luft

Es wurden fünf Szenarien zur Nutzung der Energie in der Abluft erarbeitet (Abb. 14).

**SZ 2.1.** Wärmeaustausch der Abluft Nachtrockenpartie PM A gegen Frischwasser PM A. Der Dampfeintrag zur Frischwasseraufheizung und die Siebwasserbeheizung infolge einer höheren Systemtemperatur an der PM A könnten entfallen.

**SZ 2.2.** Nutzung der Energie in der Abluft Vakuumpumpen PM B zur Aufwärmung des Klarfiltrates an der PM B. Infolge einer höheren Systemtemperatur kann dadurch die Siebwasserbeheizung entfallen.

**SZ 2.3.** Tausch Abluft Vakuumpumpen PM B gegen Frischwasser PM B. Auch an der PM B können mit dieser Maßnahme die Dampfaufheizung des Frischwassers und die Siebwasserbeheizung vermieden werden.

**SZ 2.4.** Tausch Abluft Vakuumpumpen PM B gegen Flussfrischwasser. Die dortige Dampfbeheizung sowie die zusätzlichen Beheizungen an den Systemen PM A und PM B können dadurch ersetzt werden.

**SZ 2.5.** Mit der Nutzung der Abwärme aus der Nachtrockenpartie PM B kann der Dampfeintrag für das Frischwasser und Siebwasser an der PM B ersetzt werden.

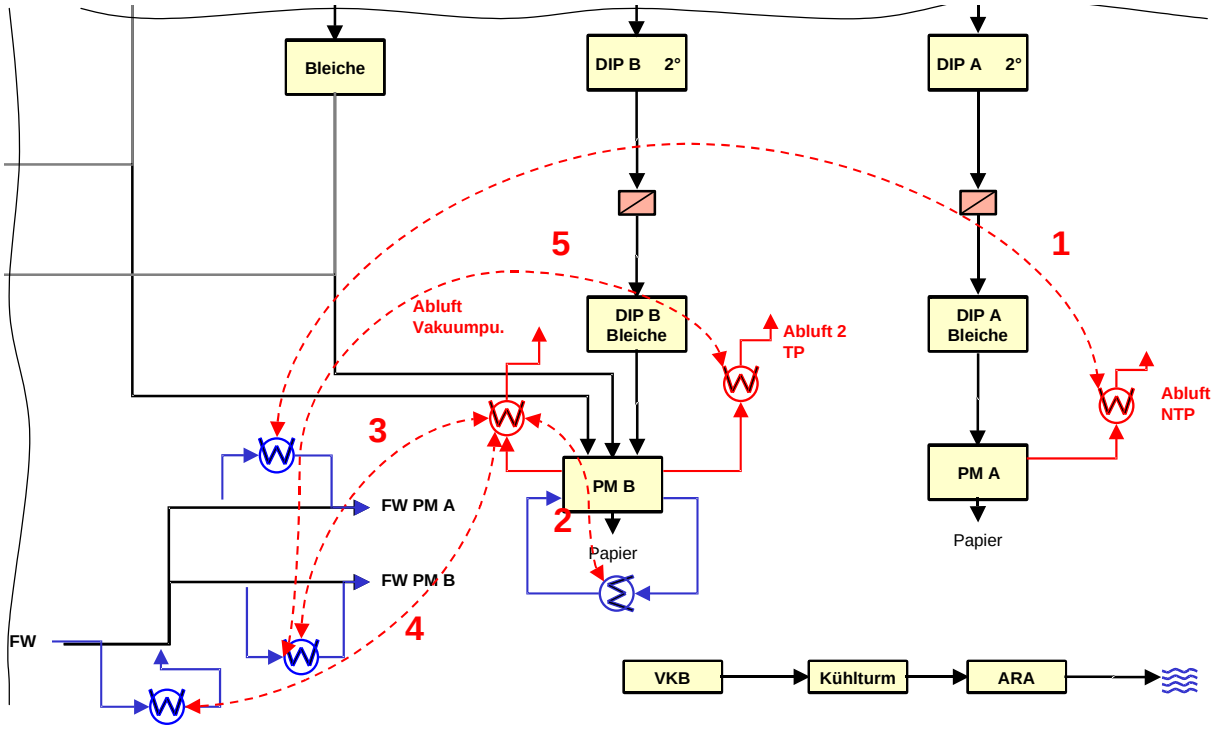



Abb. 14: Szenarien 2.1 – 2.5 für den Tausch Wasser gegen Luft

### 5.4.3 Szenariengruppen 3 und 6: Einsatz von Wärmepumpen

Idealerweise kommt als Einsatzort für eine Wärmepumpe das Rohabwasser in Frage (Abb. 15). Die dem Abwasser entnommene Energie könnte zur Aufheizung des Klarfiltrates der PM A oder PM B verwendet werden, um dort die Dampfbeheizungen einzusparen.

Als mögliche externe Nutzung kommt die Beheizung eines Schwimmbades in der näheren Umgebung (im Sommer) in Frage. Im Winter könnte die Wärmepumpe ein Treibhaus oder Büro- und Lagerräume der Fabrik beheizen.

Es wurden vier Szenarien zur Nutzung der Energie durch Einsatz von Wärmepumpen (Abb. 15) ausgearbeitet.

- Szenariengruppe 3:

**SZ 3.1.** Wärmeaustausch des Rohabwassers Papiererzeugung gegen Klarwasser PM A durch Einsatz einer Wärmepumpe. Der Dampfeintrag zur Warmwasseraufheizung und die Siebwasserbeheizung an der PM A könnten infolge einer höheren Systemtemperatur entfallen.

**SZ 3.2.** Wärmeaustausch des Rohabwassers Papiererzeugung gegen Klarwasser PM B durch Einsatz einer Wärmepumpe. Der Dampfeintrag zur Warmwasseraufheizung und die Siebwasserbeheizung infolge einer höheren Systemtemperatur an der PM B könnten entfallen.

- Szenariengruppe 6:

**SZ 6.1.** Einsatz einer Wärmepumpe zur externen Nutzung der Wärme des Gesamtabwassers: Erwärmung eines Schwimmbades.

Als Energiebedarf für Schwimmbäder wurden die in Tab. 13 wiedergegebenen Werte angenommen. Die Werte basieren auf Angaben der SWM (Stadtwerke München). Der Energiebedarf von Frei- und Hallenbädern ist unterschiedlich. Beide Optionen werden bewertet. Für den Winterbetrieb wurde ein Hallen- und für den Sommerbetrieb ein Freibad angenommen.

Tab. 13: Grunddaten Schwimmbäder

| **Grunddaten** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Hallenbad** | | |
| Wärmebedarf | 3,0-7,0 | MWh/m²a | wasserflächenbezogen |
| | 10,0-20,0 | kWh/Pers | besucherbezogen |
| Wasserbedarf | 50-100 | m³/m²a | wasserflächenbezogen |
| | 150-250 | l/Pers | besucherbezogen |
| | **Freibad** | | |
| Wärmebedarf | 0,3-0,7 | MWh/m²a | wasserflächenbezogen |
| Wasserbedarf | 8,0-13,0 | m³/m²a | wasserflächenbezogen |
| | 150-200 | l/Pers | besucherbezogen |

**SZ 6.2.** Einsatz einer Wärmepumpe zur externen Nutzung der Wärme des Gesamtabwassers: Einsatz in der Fernwärmeversorgung.

Als Energiebedarf wurden für die Fernwärmeheizung die in Tab. 14 wiedergegebenen Werte angenommen. Die Werte basieren auf Angaben der SWM. Zu beachten ist, dass der Nutzerkreis für Fernwärme begrenzt ist und sich auf den benachbarten Ort mit einer Einwohnerzahl von rund 3400 bezieht. Eine Versorgung weiterer Bereiche wird nicht als sinnvoll erachtet.

Tab. 14: Grunddaten Fernwärme

| **Grunddaten** | | |
|---|---|---|
| Rohrleitungsnetz | 0,2 | km/MW |
| Bedarf EFH | 26700 | kWh/a |
| Anschlußleistung EFH | 16 | kW |
| Preis | 0,05 | €/kWh |
| Temp VL | 80 | °C |
| Temp RL | 50 | °C |
| Engpassleistung | 75 | % |

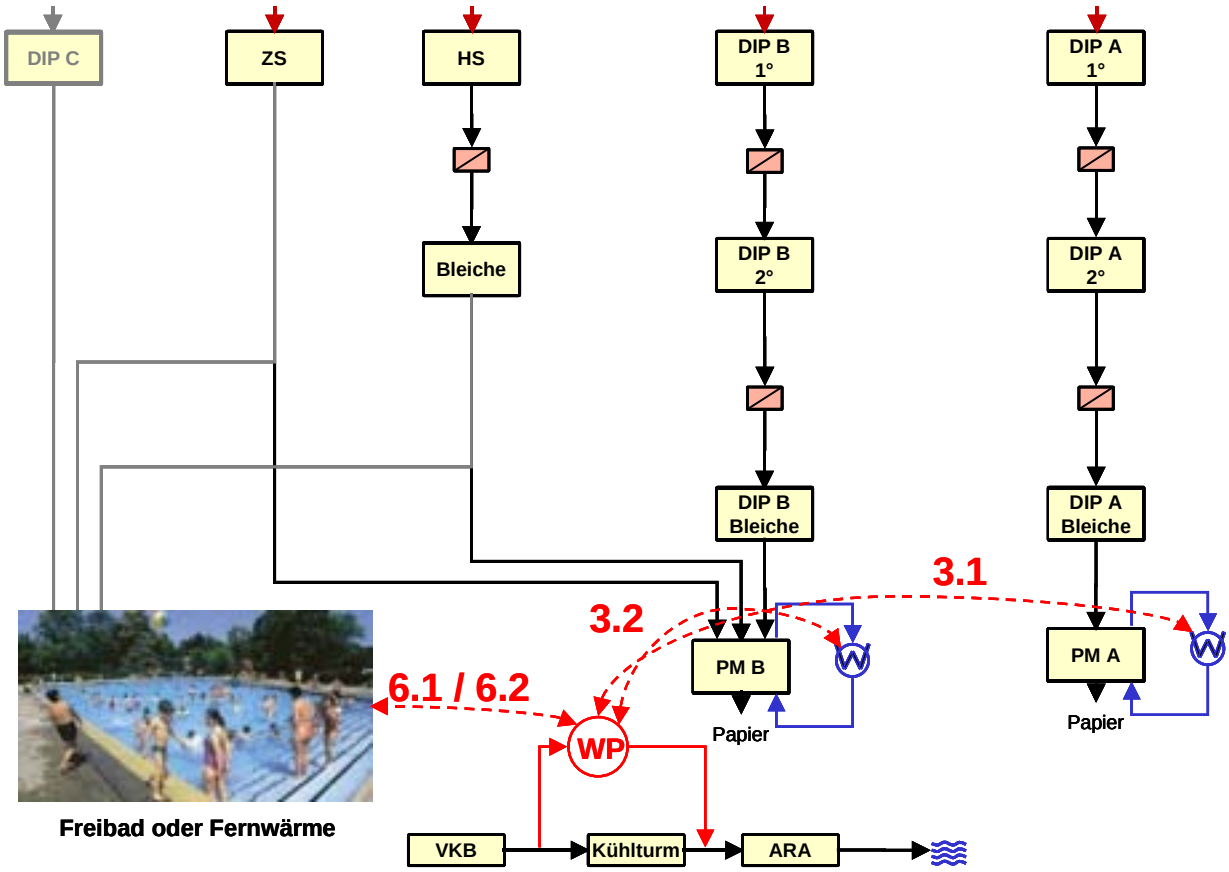



Abb. 15: Szenarien 3.1, 3.2 und 6.1, 6.2 für den Einsatz von Wärmepumpen

### 5.4.4 Szenariengruppe 4: Änderung kritischer Prozessbedingungen

Als kritische Prozessbedingungen wurden u. a. identifiziert:

- Temperatur des Frischwassers vor der Flockung/Fällung
- Temperatur am Schleifer
- Temperatur in der Dispergierung
- Temperatur im Siebwasser

Im Folgenden wurden insbesondere die Auswirkungen einer Reduzierung der Temperaturen im Frischwasser und im Siebwasser untersucht:

**SZ 4.1.** Einsatz anderer Flockungsmittel in der Frischwasseraufbereitung zur Reduzierung des Dampfbedarfs bei der Frischwasseraufwärmung. Dieses Szenario ist nur im Winter rechenbar, da im Sommer keine Frischwasseraufheizung erfolgt.

Es wird angenommen, dass es gelingt, ein anderes Verfahren zur Flockung oder eine völlig andere Vorbehandlung einzusetzen, bei der eine Erhöhung der Temperatur des Frischwassers nicht mehr erforderlich ist.

**SZ 4.2.** Reduzierung der Siebwassertemperatur durch Verzicht auf die Aufheizung des Siebwassers PM A und PM B mit dem Ziel einer Reduzierung des Dampfbedarfs zur Siebwasseraufwärmung.

Für beide Szenarien wurde der zusätzlich notwendige Dampfbedarf in der Trockenpartie ermittelt. Es wurde nicht berücksichtigt, dass durch eine Reduzierung der Temperatur zusätzlich eine Verringerung der Entwässerungsleistung am Sieb eintreten kann. Diese führt zu einem niedrigeren Trockengehalt im Einlauf Pressen- und Trockenpartie. In der Folge würde sich die notwendige Trockenleistung der Trockenpartie weiter erhöhen.

#### 5.4.5 Variantengruppe 5: Einsatz von Sorptionskältemaschinen

Eine Nutzung der Niedertemperaturabwärme kann auch erfolgen, um eine Adsorptionskältemaschine zu betreiben. Sorptionskältemaschinen nutzen die Exergie von höhertemperierter Wärmeenergie, um Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein mittleres Temperaturniveau zu heben. Der im Sommer erhöhte Kältebedarf für Raumklimatisierung und Kühlung elektrischer Einheiten kann idealerweise mit einer im Sommer höheren Abwassertemperatur bedient werden. Bisher wurden vor allem Adsorptionsmaschinen mit dem Stoffpaar Lithiumbromid/Wasser eingesetzt. Neuere Maschine nutzen das Stoffpaar Silicagel/Wasser. Diese Anlagen sind Basis der nachfolgenden Betrachtungen.

Folgendes Szenario wurde gerechnet:

**SZ 5.1.** Einsatz einer Adsorptionskältemaschine zur Kühlung der Warten und EDV-Räume und weiterer Anlagen einer Papiermaschine. Es wird eine Nutzung der Abluft Vakuumpumpen PM B als Wärmequelle zur Desorption und des Frischwassers vor der Aufheizung als Kühlwasser zur Wärmeabfuhr angenommen. Es wird angenommen, dass an PM A oder PM B ein neuer Kaltwassersatz mit einer etwas höheren Kälteleistung im Vergleich mit den bestehenden installiert werden soll. Ursache ist, dass die derzeit installierten Kapazitäten an beiden Maschinen im Sommer nicht immer ausreichend sind. Die erforderliche Kälteleistung wird mit 300 kW angenommen.

### 5.5 Ergebnisse der Simulationsrechnungen für alle Szenarien

#### 5.5.1 Kalibrierung des Modells und Vergleich mit den Ist-Werten für Sommer und Winter

Die für das Simulationsmodell durchgeführte Kalibrierung ergab für die betrachteten Systemorte Abwasser (Einleitung), Abwasser vor Kühlturm und Abwasser nach Kühlturm eine ausgezeichnete Übereinstimmung für die Szenarien zum Untersuchungszeitraum und im Winter. Für den Sommer ergibt sich lediglich in der biologischen ARA ein deutlich höherer Wärmeverlust. Die Abbildung der summarischen Effekte des Prozesses ist jedoch ebenfalls korrekt, da die vorgelagerten Systemorte eine gute Übereinstimmung zeigen. Zu berücksichtigen ist, dass insbesondere an der PM B auch im Sommer eine Aufheizung des Siebwassers mit Dampf zugrunde gelegt wurde.

Mit der Betrachtung der im Sommer und im Winter erreichten Werte sind die Extremwerte abgebildet. Eine Auslegung ist auf dieser Basis möglich.

Tab. 15: Kalibierwerte und Ergebnisse des Simulationsmodells im Vergleich zur Realität

| **Kalibrierwerte** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Temperaturen | | Winter | Untersuchung | Sommer |
| Vorfluter | °C | 2 °C | 8 °C | 25 °C |
| Brunnen | °C | 5 °C | 7 °C | 8 °C |
| Deinking | °C | 30 °C | 35 °C | 35 °C |
| Schleiferei | °C | 25 °C | 30 °C | 35 °C |
| Außen | °C | 2 °C | 18 °C | 30 °C |
| PM Hallen | °C | 25 °C | 30 °C | 32 °C |
| FW Schleiferei | m³/h | 5 | 20 | 40 |
| Heizung FW | Status | an | an | aus |
| Kühlturm FW | Status | aus | aus | an |

| **Ergebniswerte** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sollwerte (Realdaten) | | Winter | Untersuchung | Sommer |
| Abwasser | °C | 20,0 °C | 24,7 °C | 30,0 °C |
| nach Kühlturm | °C | 25,0 °C | 27,0 °C | 35,0 °C |
| vor Kühlturm | °C | 32,0 °C | 35,0 °C | 43,0 °C |
| Istwerte (Simulation) | | | | |
| Abwasser | °C | 20,1 °C | 24,9 °C | 35,1 °C |
| nach Kühlturm | °C | 25,0 °C | 26,7 °C | 36,5 °C |
| vor Kühlturm | °C | 31,5 °C | 34,7 °C | 42,8 °C |
| Abweichung (Real-Simulation) | | | | |
| Abwasser | °C | -0,1 °C | -0,2 °C | -5,1 °C |
| nach Kühlturm | °C | 0,0 °C | 0,3 °C | -1,5 °C |
| vor Kühlturm | °C | 0,5 °C | 0,3 °C | 0,2 °C |

### 5.5.2 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

In den Variantenrechungen erfolgte eine Grunddimensionierung der wichtigsten Aggregate bezogen auf ihre Wärmeleistung. Die für die Konzepte benötigten Dimensionierungen finden sich in Tab. 16 ff.

Auslegungen erfolgten für folgende Aggregate und Verbraucher:

- Wärmetauscher
- Wärmepumpe
- Adsorptionskältemaschine
- Frei- und Hallenbad
- Fernwärmeversorgung

Auf dieser Basis erfolgten die Anfragen bei Lieferanten. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Auslegungen wiedergegeben.

Tab. 16: Auslegungsdaten der wichtigsten Aggregate (Sommer)

**Auslegungsdaten Wärmeoptimierung Sommer**

| | Aggregattyp | Fläche | k- Wert | ΔT ln | Leistung |
|---|---|---|---|---|---|
| SZ1_1 | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 12,7 °C | 7.600 kW |
| SZ1_1R | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 11,6 °C | 7.000 kW |
| SZ1_2 | Wärmetauscher | 60 m² | 2 kW/(m²*K) | 5,3 °C | 600 kW |
| SZ1_3 | Wärmetauscher | 80 m² | 2 kW/(m²*K) | 5,2 °C | 800 kW |
| SZ1_4 | Wärmetauscher | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 5,6 °C | 2.200 kW |
| SZ2_1 | Wärmetauscher | 120 m² | 2 kW/(m²*K) | 9,0 °C | 2.200 kW |
| SZ2_2 | Wärmetauscher | 100 m² | 2 kW/(m²*K) | 8,1 °C | 1.600 kW |
| SZ2_3 | Wärmetauscher | 30 m² | 2 kW/(m²*K) | 37,8 °C | 2.300 kW |
| SZ2_4 | Wärmetauscher | 30 m² | 2 kW/(m²*K) | 39,7 °C | 2.400 kW |
| SZ2_5 | Wärmetauscher FW | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 9,6 °C | 3.800 kW |
| | Wärmetauscher KW | 30 m² | 2 kW/(m²*K) | 11,9 °C | 600 kW |
| | | Qelektrisch | Leistungszahl | Awin | Leistung |
| SZ3_1 | Wärmepumpe | 630 kW | 3,5 | 43,6 °C | 2.200 kW |
| SZ3_2 | Wärmepumpe | 540 kW | 3,5 | 43,7 °C | 1.890 kW |
| SZ5_1 | Sorptionskältemaschine | 0 kW | 0,54 | | 300 kW |
| | Warmseite | 45 m² | 2 kW/(m²*K) | 88,3 °C<br>81,1 °C | 600 kW |
| | Kaltseite | 50 m² | 2 kW/(m²*K) | 37,6 °C<br>31,5 °C | 900 kW |
| SZ6_1 | Wärmepumpe | 45 kW | 4,4 | 42,8 °C | 200 kW |
| SZ6_2 | Wärmepumpe | 0 kW | 4,4 | 42,8 °C | 0 kW |

SZ1_1R: wie SZ1_1, zusätzlich reduzierter Dampfeintrag im Siebwasser PM A und PM B

ΔT ln: logarithmische Temperaturdifferenz, ΔT ln = (ΔT warm - ΔT kalt) / ln(ΔT warm / ΔT kalt)

Tab. 17: Auslegungsdaten der wichtigsten Aggregate (Winter)

**Auslegungsdaten Wärmeoptimierung Winter**

| | Aggregattyp | Fläche | k- Wert | ΔT ln | Leistung |
|---|---|---|---|---|---|
| SZ1_1 | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 16,4 °C | 9.900 kW |
| SZ1_1R | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 16,0 °C | 9.600 kW |
| SZ1_2 | Wärmetauscher | 60 m² | 2 kW/(m²*K) | 5,5 °C | 700 kW |
| SZ1_3 | Wärmetauscher | 80 m² | 2 kW/(m²*K) | 5,3 °C | 800 kW |
| SZ1_4 | Wärmetauscher | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 4,2 °C | 1.700 kW |
| SZ2_1 | Wärmetauscher | 140 m² | 2 kW/(m²*K) | 14,0 °C | 3.800 kW |
| SZ2_2 | Wärmetauscher | 40 m² | 2 kW/(m²*K) | 34,5 °C | 2.800 kW |
| SZ2_3 | Wärmetauscher | 30 m² | 2 kW/(m²*K) | 42,7 °C | 2.600 kW |
| SZ2_4 | Wärmetauscher | 20 m² | 2 kW/(m²*K) | 70,6 °C | 2.700 kW |
| SZ2_5 | Wärmetauscher FW | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 9,6 °C | 3.800 kW |
| | Wärmetauscher KW | 100 m² | 2 kW/(m²*K) | 11,9 °C | 2.300 kW |
| | | Qelektrisch | Leistungszahl | Awin | Leistung |
| SZ3_1 | Wärmepumpe | 1.050 kW | 3,5 | 33,7 °C | 3.700 kW |
| SZ3_2 | Wärmepumpe | 1.200 kW | 3,5 | 34,3 °C | 4.200 kW |
| SZ5_1 | Sorptionskältemaschine | 0 kW | 0,54 | | 300 kW |
| | Warmseite | 45 m² | 2 kW/(m²*K) | 88,3 °C<br>81,1 °C | 600 kW |
| | Kaltseite | 14 m² | 2 kW/(m²*K) | 37,1 °C<br>30,9 °C | 900 kW |
| SZ6_1 | Wärmepumpe | 45 kW | 4,4 | 31,5 °C | 200 kW |
| SZ6_2 | Wärmepumpe | 1.900 kW | 4,4 | 31,5 °C | 8.400 kW |

SZ1_1R: wie SZ1_1, zusätzlich reduzierter Dampfeintrag im Siebwasser PM A und PM B

ΔT ln: logarithmische Temperaturdifferenz, ΔT ln = (ΔT warm - ΔT kalt) / ln(ΔT warm / ΔT kalt)

Tab. 18: Ergebnisse Berechnungen Freibad

| **Freibad** | | |
|---|---|---|
| Wasserfläche | 1000 | m² |
| | 28 | °C |
| | 0,7 | MWh/m²a |
| Wärmeverbrauch | 700 | MWh/a |
| Saisonlänge | 150 | t/a |
| theoretischer Bedarf | 194 | kW |
| Spitzenlast | 389 | kW |
| **Anschlussleistung** | **389** | **kW** |
| | **60** | **°C** |

Tab. 19: Ergebnisse Berechnungen Hallenbad

| **Hallenbad** | | |
|---|---|---|
| Wasserflächen | 312,5 | m² |
| | 28 | °C |
| | 3 | MWh/m²a |
| | 100 | m² |
| | 35 | °C |
| | 7 | MWh/m²a |
| Wärmeverbrauch | 1637,5 | MWh/a |
| Saisonlänge | 365 | t/a |
| theoretischer Verbrauch | 187 | kW |
| Spitzenlast | 374 | kW |
| **Anschlussleistung** | **374** | **kW** |
| | **60** | **°C** |

Tab. 20: Ergebnisse Berechnungen Fernwärme

| **Auslegung** | | |
|---|---|---|
| Leistung WP | 8370 | kW |
| max. Anschließerleistung | 11160 | kW |
| Anzahl Abnehmer | 698 | EFHs |
| Rohrleitungslänge | 2,23 | km |
| Umwälzvolumenstrom | 240 | m³/h |
| verkaufte Energiemenge | 18600 | MWh/a |
| Erlös | 986000 | € |
| Nettoleistung | 2100 | kW |

### 5.5.3 Tatsächliche Einsparpotenziale der Szenarien

Auf der Basis dieses kalibrierten Modells wurden Simulationsrechnungen für alle genannten Szenarien durchgeführt.

Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden die Temperaturen und Energieströme an allen relevanten Systemorten ermittelt. Auf eine Darstellung im Rahmen des Berichtes wird aufgrund der großen Datenmenge verzichtet. Im Folgenden sind lediglich die erzielbaren Einsparungen für Sommer und Winter wiedergegeben (Abb. 16 und Abb. 17). Folgende Annahmen wurden dabei zugrunde gelegt:

- Es werden zunächst nur einzelne Maßnahmen und keine Kombinationen von Maßnahmen gerechnet.
- Jede Maßnahme wird zur Einsparung von Energie und damit $CO_2$ eingesetzt. Eine mögliche Erhöhung der Produktionsmenge wird nicht berücksichtigt.
- Es werden sowohl direkte als auch indirekte Einsparungen berücksichtigt. Direkte Einsparungen ergeben sich durch den Ersatz von Frischdampf zur Prozesswassererwärmung durch einen Wärmetauscher, der Abwärme nutzt („Eingesparte Energie (Dampf)“). Indirekte Einsparungen ergeben sich z. B. dadurch, dass bei einer Maßnahme die Siebwassertemperatur steigt und zusätzlich zur Einsparung der Wasseraufwärmung auch eine Reduzierung des Dampfeinsatzes in der Trockenpartie erreicht werden kann („zusätzliche Dampfreduzierung TP“, siehe auch Kap. 5.1.2).
- Für die Einsparungen von Dampf wird folgende Umrechnung in el. Energie zugrunde gelegt:

  Energieinhalt von 1t Dampf: 715 kW/t

  (Voraussetzung: Sattdampf 145°C; 4,2 bar kondensiert auf 80°C)

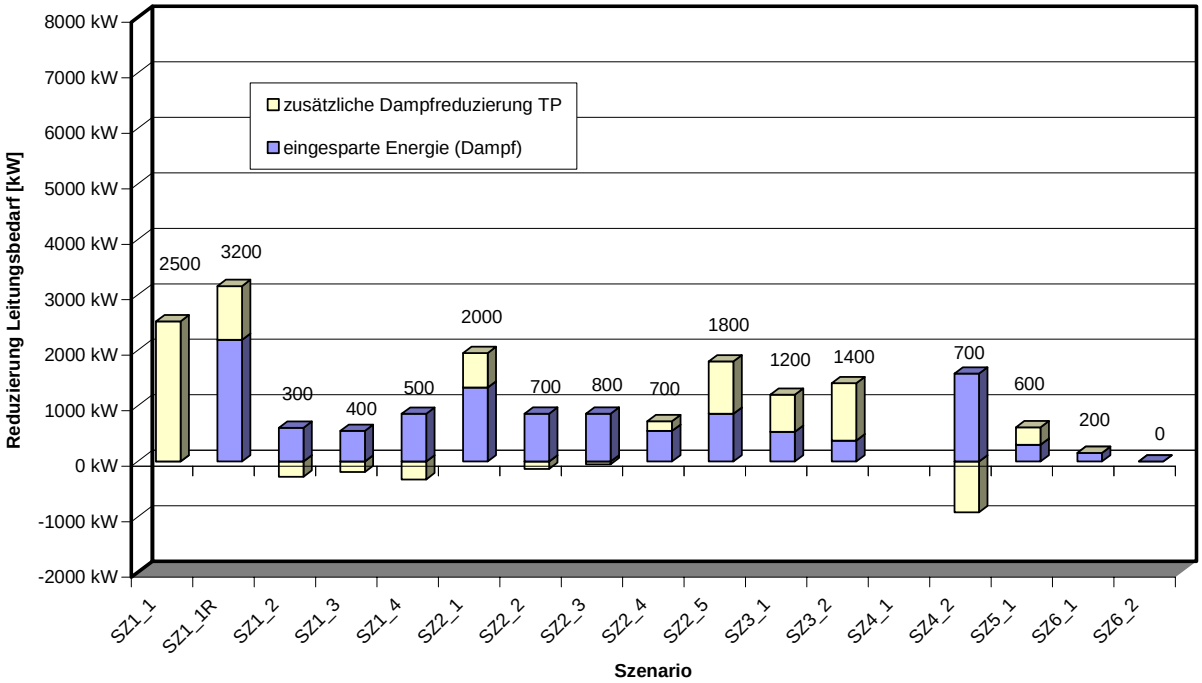



Abb. 16: Einsparpotenzial im Sommer für alle Szenarien

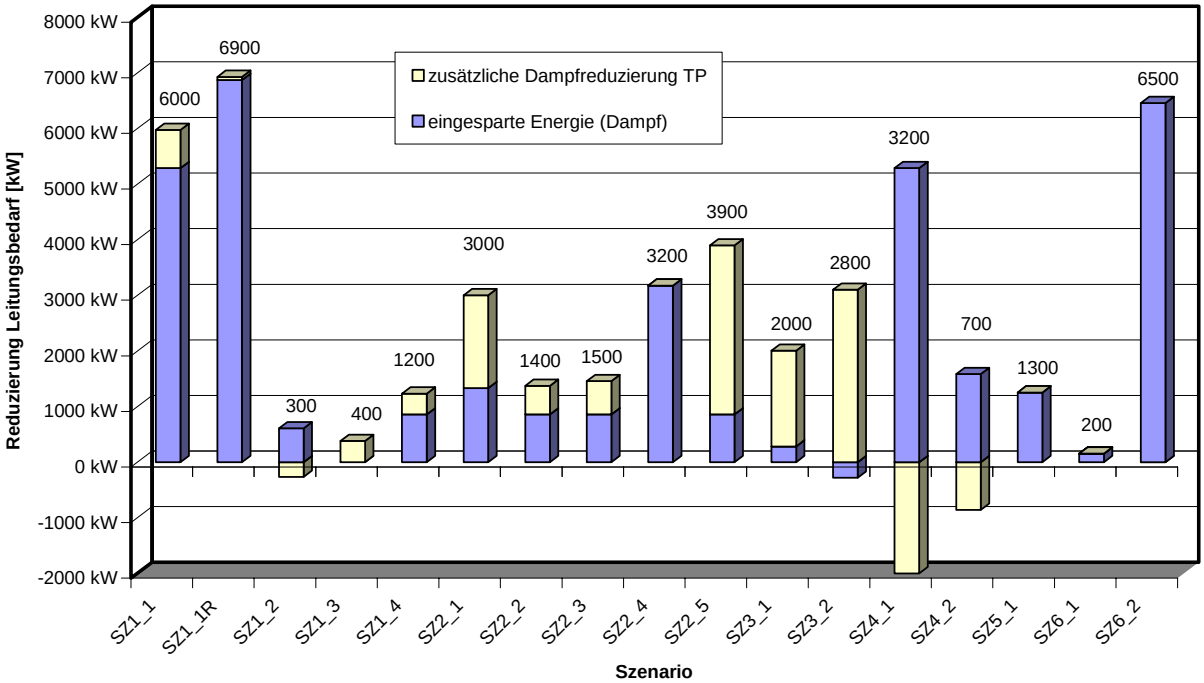



Abb. 17: Einsparpotenzial im Winter für alle Szenarien

### 5.5.4 Diskussion der Ergebnisse

**Szenariengruppe 1: Tausch Wasser gegen Wasser**

Die höchsten Potenziale ergeben sich für die Szenarien 1.1 und 1.1R. Es werden die größten Wärmemengen getauscht. Die zusätzliche Einsparung an Dampfeinträgen an PM A und B (SZ1_1R) ist energetisch günstiger als eine weitere Erhöhung der Systemtemperaturen (SZ1_1) dort. Wenig erfolgversprechend ist der Wärmetausch zwischen den Papiermaschinen und den Altpapieraufbereitungen (SZ 1.2 und 1.3). Die übertragenen Wärmemengen sind gering. Ursache ist insbesondere der geringe Temperaturunterschied zwischen den Anlagenteilen. Eine höhere Einsparung verspricht die Nutzung der Wärme der Schleiferei (SZ 1.4). Es wurde eine Erwärmung der PM B untersucht. Bemerkenswert ist allerdings, dass durch diese Maßnahmen die Temperatur in der Schleiferei stark abgesenkt wird (um ca. 15°C).

**Szenariengruppe 2: Tausch Wasser gegen Luft**

Es wurden fünf Varianten zur Nutzung der Energie in der Abluft erarbeitet. Dabei wird die Kondensationswärme der übersättigten Abluftströme genutzt, um Wasser aufzuheizen und Dampf einzusparen. Das höchste Potenzial bietet hier SZ 2.5. Dabei werden die Energieinhalte der Abluft der Nachtrockenpartie PM B und des Frischwasser PM B miteinander getauscht. Dieser Tausch erschließt insgesamt das höchste erreichte Potenzial zur Verringerung der Leistungsaufnahme von insgesamt 1800 bzw. 3900 kW. Dies wird hauptsächlich durch Einsparungen von Prozessdampf in der Trockenpartie PM B erzielt (900 bzw. 3000 kW). Alle anderen Szenarien ermöglichen demgegenüber geringere Einsparungen. So liefern die Szenarien 2.2 – 2.4 trotz der Nutzung der sehr heißen (157,7°C) Abluft der Vakuumpumpen PM B nicht so hohe Energiemengen, da dieser Abluftstrom eine sehr geringe relative Feuchte aufweist und daher die theoretisch verfügbare Leistung mit 4800 kW relativ gering ist.

**Szenariengruppe 3: Einsatz von Wärmepumpen zur internen Nutzung**

Der Einsatz einer Wärmepumpe unter Nutzung der Abwärme des Abwassers zur Erwärmung des Prozesswassers der Papiermaschinen dient der Erhöhung der Siebwassertemperatur. Mit relativ geringen Wärmemengen kann die Temperatur der Papiermaschinen deutlich gesteigert werden (SZ 3.1 und 3.2). Nur ein geringer Teil des vorhandenen Potenzials des Abwassers wird damit tatsächlich genutzt. Damit können im Sommer wie im Winter ca. 55°C an beiden Maschinen erreicht werden.

**Szenariengruppe 4: Änderung kritischer Prozessbedingungen**

Eine Änderung der kritischen Prozessbedingungen ist mit einer genauen Bewertung der Folgen für den Gesamtprozess zu verknüpfen. Eine Verringerung der Frischwasseraufheizung im Winter (SZ 4.1) führt zu einer deutlichen Energieeinsparung. Folge ist jedoch auch die Reduzierung der Temperatur im Gesamtprozess. Die in der Trocknung notwendige Energie zur Aufheizung der Papierbahn muss zusätzlich eingesetzt werden. Vergleichbar ist der Zusammenhang bei einer Reduzierung des Dampfeinsatzes in der Siebwasserheizung (SZ 4.2). Bemerkenswert ist, dass bei einer Reduzierung der Siebwasserheizung der Dampfbedarf unterproportional ansteigt. Damit wird deutlich, dass eine Siebwasserheizung nicht nur zur Steigerung der Trockenleistung sondern auch zur Erwärmung des Gesamtsystems beiträgt. Ein Energieeintrag durch direkte Beheizung der Papierbahn vor oder nach der Pressenpartie (Dampfblaskasten) ist daher einer Beheizung des Siebwassers energetisch vorzuziehen. Voraussetzung ist eine noch ausreichende Entwässerungsleistung der Siebpartie.

**Szenariengruppe 5: Einsatz von Sorptionskältemaschinen**

Die Nutzung einer Sorptionskältemaschine ist grundsätzlich denkbar. Die zur Kälteerzeugung notwendige Energiemenge ist gering im Vergleich zu den verfügbaren Energieströmen. Problem eines Einsatzes einer solchen Anlage ist, dass zwei Ströme zur Verfügung stehen müssen, um die Desorption und die Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Dadurch ist die Einbindung der Anlage komplexer als für die anderen untersuchten Technologien.

**Szenariengruppe 6: Einsatz von Wärmepumpen zur externen Nutzung**

Es wurde untersucht, ob der Wärmeinhalt des Abwassers auch zur externen Nutzung geeignet ist. Dies ist im Ergebnis technisch realisierbar. Die von einem Schwimmbad abgenommene Wärmemenge ist jedoch auch im Winter mit weniger als 200 kW gering im Vergleich zu der verfügbaren Energiemenge. Die Bäder wurden so ausgelegt, dass der Leistungsbedarf im Sommer und Winter gleich ist.

Höhere Energiebedarfe hat ein Fernwärmenetz. Als Fernwärme könnten im Winter rund 6500 kW abgegeben werden. Die Abnahme im Sommer ist jedoch deutlich geringer. Damit wird gerade in der für die Einleitung in den Vorfluter kritischen Zeit weniger Wärme entnommen. An heißen Sommertagen ist nicht mit einer Abkühlung des Abwassers, jedoch mit einer hohen Abwassertemperatur zu rechnen.

## 5.6 Erarbeitung, Prüfung und wirtschaftliche Bewertung möglicher Konzepte (Wirtschaftlichkeitsanalyse)

### 5.6.1 Selektion potenzieller Nutzungskonzepte

Es wurden 3 grundsätzlich unterschiedliche Konzepte selektiert und einer Kostenrechnung unterzogen. Es sind dies:

1. Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Einsparung von Prozessdampf (Variantengruppen 1-3)
2. Externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme (Variantengruppe 6)
3. Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte (Variantengruppe 5)

Eine Kombination dieser drei Konzepte ist ebenfalls denkbar. Die Komplexität steigt dabei jedoch stark. Grundsätzliche Zusammenhänge und Entwicklungsrichtungen sind nicht mehr ablesbar. Um die Transparenz zu wahren wurde daher darauf verzichtet, diese zu kombinieren, und statt dessen wurde jedes der oben genannten Konzepte separat gerechnet. Die Auswahl der für die Konzepte zu nutzenden, bereits gerechneten Varianten ist im Folgenden dargestellt.

**zu 1.) Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Einsparung von Prozessdampf**

Auf der Basis der gerechneten Szenarien 1 bis 3 muss die bestgeeignete Kombination der gerechneten Einzelvarianten ermittelt werden. In Tab. 21 ist eine Übersicht über die gerechneten Kombinationen von zu kühlenden und aufzuwärmenden Strömen dargestellt.

Tab. 21: Verknüpfte Ströme für die gerechnete Szenariengruppen 1-3

| | **zu kühlende Ströme** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **aufzuwärmende Ströme** | KW DIP B | KW DIP A | KW HSA | Abw Gesamt | NTP PM A | VP PM B | NTP PM B |
| SW KF PM A | | 1.2 | | 3.1 | 2.1 | | |
| SW KF PM B | 1.3 | | 1.4 | 3.2 | | 2.2 | 2.5 |
| FW Gesamt | | | | 1.1 | | 2.4 | |
| FW PM B | | | | 3.2 | | 2.3 / 2.4 | 2.5 |
| FW PM A | | | | 3.1 | | 2.4 | |

Jeder Strom kann nur einmal verwendet werden, um die volle Wärmeleistung zu tauschen. Daher ist die Anzahl der zu einem Konzept kombinierbaren Varianten begrenzt. Unter Beachtung der in den Varianten einsparbaren Dampfmengen (s. Abb. 16 ff.) wurden Kombinationen von Varianten ermittelt, die zu einer maximalen Einsparung führen (Tab. 22).

Tab. 22: Einsparpotenzial (in kW) verschiedener Kombinationen mehrerer Varianten

| | Variante: | | | |
|---|---|---|---|---|
| Konzept 1 = | 1.1R | 2.1 | 2.5 | |
| Konzept 2 = | 1.1R | 2.2 | 3.1 | |
| Konzept 3 = | 2.1 | 2.4 | 3.2 | |
| Konzept 4 = | 2.4 | 2.5 | 3.1 | |
| Einsparung Sommer | | | | nom. Summe |
| Konzept 1 | 3200 | 2000 | 1800 | **7000** |
| Konzept 2 | 3200 | 700 | 1200 | 5100 |
| Konzept 3 | 2000 | 700 | 1400 | 4100 |
| Konzept 4 | 700 | 1800 | 1200 | 3700 |
| Einsparung Winter | | | | nom. Summe |
| Konzept 1 | 6900 | 3000 | 3900 | **13800** |
| Konzept 2 | 6900 | 1400 | 2000 | 10300 |
| Konzept 3 | 3000 | 3200 | 2800 | 9000 |
| Konzept 4 | 3200 | 3900 | 2000 | 9100 |

SZ1_1R: wie SZ1_1; zusätzlich reduzierter Dampfeintrag im Siebwasser PM A und PM B

Konzept 1 ermöglicht die höchsten Einsparungen. Die tatsächlich möglichen Einsparpotenziale betragen:

| | Sommer | Winter |
|---|---|---|
| Konzept 1 | 5,5 MW | 13,6 MW |

Die Schätzungen (Tab. 22) konnten für beide exemplarisch gerechneten Szenarien gut bestätigt werden. Abweichungen ergeben sich aus den Wechselwirkungen der Maßnahmen miteinander. Die Relation der Szenarien ist auch bei einer kombinierten Nutzung der Potentiale gültig. Damit ist Konzept 1 auch nach einer Simulation das bestgeeignete Konzept. Konzept 1 wird daher im Folgenden mit einer Wirtschaftlichkeitsrechung überprüft.

In Abb. 18 ist die Temperaturverteilung im Prozess nach Realisierung der Änderungen im Rahmen von Konzept 1 dargestellt. Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen sind im Zuge einer Detail-Konzepterstellung erforderlich. Die Konzepte schließen die Nutzung von Potenzialen durch eine Erhöhung der Prozesstemperatur ein. Dies wird aus dem Verlauf der Temperaturen für Konzept 1 deutlich (Abb. 18).

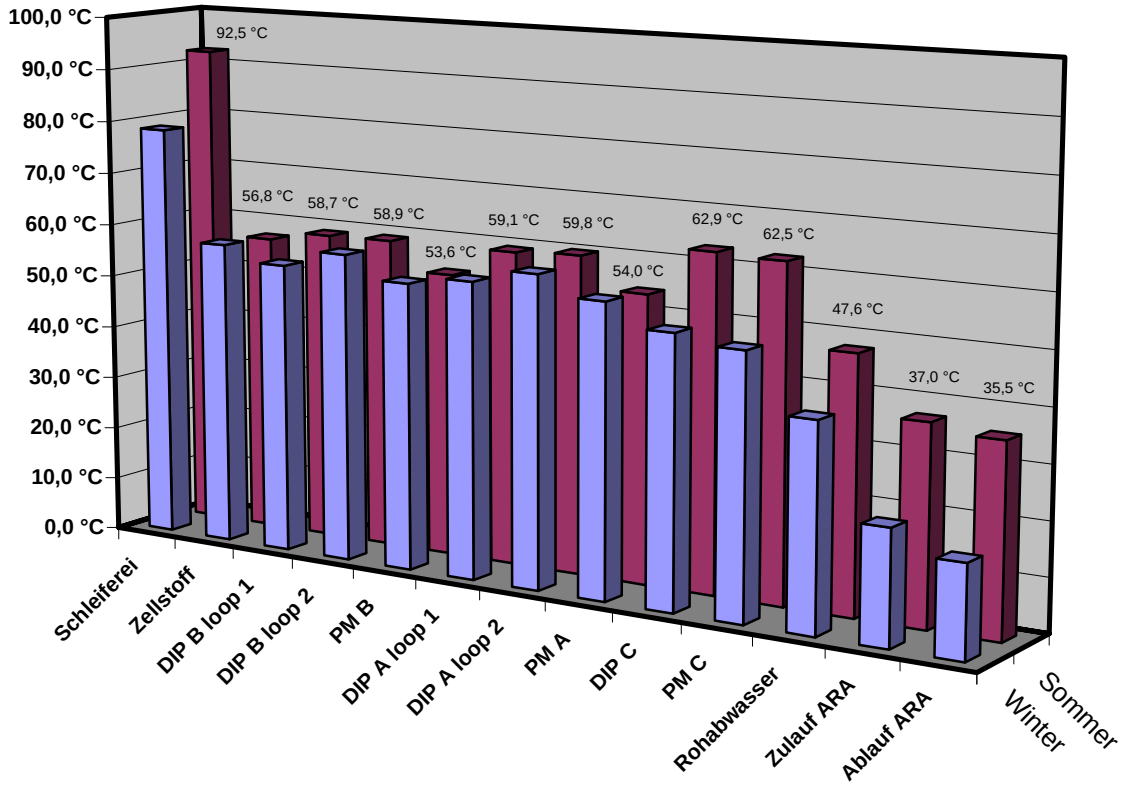



Abb. 18: Temperaturverteilung bei Konzept 1 (Zahlenangaben: Temperaturen im Sommer)

**zu 2.) Externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme**

Bei der externen Nutzung der Wärme wurden die Szenarien 6.1 und 6.2 unmittelbar zur Grundlage gewählt. Für 6.2 wurden auch die Kosten ermittelt. Nicht berücksichtigt sind die Kosten für das Fernwärmenetz.

**zu 3.) Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte (Variantengruppe 5)**

Es wurde ein Szenario gerechnet bei der eine Maschine mit einer neuen Kältemaschine ausgerüstet wird.

Mit den gewählten Konzepten ist der Einsatz aller drei im Rahmen der Variantenrechnungen untersuchten Verfahrenstechniken

- Wärmetauscher,
- Wärmepumpe und
- Adsorptionskältemaschine

berücksichtigt.

### 5.6.2 Auslegungsdaten der wichtigsten Aggregate

Die in den Konzepten eingesetzten Verfahren wurden im Rahmen der Simulationsrechnungen ausgelegt. Es handelt sich dabei um eine Vorauslegung mit dem Ziel, eine erste Kostenrechnung durchführen zu können. Die Ergebnisse der Vorauslegung sind in den folgenden zwei Tabellen wiedergegeben.

Tab. 23: Auslegungsdaten der wichtigsten Aggregate (Winter)

| **Auslegungsdaten Wärmeoptimierung Winter** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Szenario | Aggregattyp | Qelektrisch | Leistungszahl | Zulauf | Leistung |
| SZ5_1 | Sorptionskältemaschine | 0,4 kW | 0,54 | | 300 kW |
| | Warmseite | 45 m² | 2 kW/(m²*K) | 88,3 °C<br>81,1 °C | 553 kW |
| | Kaltseite | 14 m² | 2 kW/(m²*K) | 37,1 °C<br>30,9 °C | 853 kW |
| SZ6_1 | Wärmepumpe | 45 kW | 4,4 | 31,5 °C | 198 kW |
| SZ6_2 | Wärmepumpe | 1.900 kW | 4,4 | 31,5 °C | 8.370 kW |
| | Aggregattyp | Fläche | k- Wert | ΔT ln | Leistung |
| Kombi1 | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 17,8 °C | 10.700 kW |
| | Register WRG PMA | 140 m² | 2 kW/(m²*K) | 10,5 °C | 3.000 kW |
| | Register WRG PM B FW | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 7,3 °C | 2.900 kW |
| | Register WRG PM B KW | 120 m² | 2 kW/(m²*K) | 11,9 °C | 2.800 kW |

ΔT ln: logarithmische Temperaturdifferenz, ΔT ln = (ΔT warm - ΔT kalt) / ln(ΔT warm / ΔT kalt)

Tab. 24: Auslegungsdaten der wichtigsten Aggregate (Sommer)

| **Auslegungsdaten Wärmeoptimierung Sommer** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Szenario | Aggregattyp | Qelektrisch | Leistungszahl | Zulauf | Leistung |
| SZ5_1 | Sorptionskältemaschine | 0,4 kW | 0,54 | | 300 kW |
| | Warmseite | 45 m² | 2 kW/(m²*K) | 88,3 °C<br>81,1 °C | 553 kW |
| | Kaltseite | 14 m² | 2 kW/(m²*K) | 37,1 °C<br>30,9 °C | 853 kW |
| SZ6_1 | Wärmepumpe | 45 kW | 4,4 | 31,5 °C | 198 kW |
| SZ6_2 | Wärmepumpe | 0 kW | 4,4 | 31,5 °C | 0 kW |
| | Aggregattyp | Fläche | k- Wert | ΔT ln | Leistung |
| Kombi1 | Wärmetauscher | 300 m² | 2 kW/(m²*K) | 11,2 °C | 6.700 kW |
| | Register WRG PMA | 70 m² | 2 kW/(m²*K) | 12,1 °C | 1.700 kW |
| | Register WRG PM B FW | 200 m² | 2 kW/(m²*K) | 4,3 °C | 1.700 kW |
| | Register WRG PM B KW | 0 m² | 2 kW/(m²*K) | - | 0 kW |

ΔT ln: logarithmische Temperaturdifferenz, ΔT ln = (ΔT warm - ΔT kalt) / ln(ΔT warm / ΔT kalt)

### 5.6.3 Auslegungsbasis für Investitionen/Betriebskosten

Es wurden folgende Kostenarten bei der Schätzung der Investitionen berücksichtigt:

- Bauleistungen
- Maschinentechnik (Behälter, Pumpen, Rührwerke, Wärmetauscher, Kühltürme)
- Rohrleitungen inkl. Verbindungs- und Halterungsmaterialien, Armaturen, etc.
- E-Technik, MSR–Technik,

Diese Kosten wurden anhand von Pauschalfaktoren abgeschätzt.

Nicht enthalten sind die Investitionskosten für:

- Gründungen und Dachstützkonstruktionen (mit Ausnahme der Betonfundamente)
- evtl. bauliche Erweiterungen von elektr. Schalträumen
- evtl. notwendige Hardware-Erweiterungen der vorhandenen PLS-Systeme
- evtl. Kosten für Aufwendungen zur Aufrechterhaltung der Hallenklimata an den Papiermaschinen

Es ist zweckmäßig bzw. erforderlich, für die gesamte Wärmerückgewinnungsanlage Stand-by-Apparate zu installieren. Diese sind nicht in der Kostenschätzung enthalten. Ebenso sind nicht die Aufwendungen für das notwendige Engineering enthalten.

Neben den Investitionskosten wurden auch die Betriebskosten (inkl. Kapitalkosten) der einzelnen Konzeptvarianten ermittelt. Als kalkulatorische Grundlagen wurden nachstehende Daten in Ansatz gebracht.

| | | | |
|---|---|---|---|
| PRODUKTION | | | |
| - Produktionstage | 330 | d/a | Annahme PTS |
| PRODUKTIONSHILFSMITTEL | | | |
| - Dampf/Kondensat | | | |
| Dampfkosten | 11,5 | €/t | Daten PF |
| Kondensatkosten | 2 | €/t | Daten PF |
| - Elektr. Energie | | | |
| E-Energiekosten | 0,03 | €/kWh | Annahme PTS |
| FINANZTECHNISCHE DATEN | | | |
| - Abschreibungszeit | 10 | Jahre | Annahme PTS |
| - kalkulatorischer Zinssatz | 6 | % | Annahme PTS |
| - Personalkosten | 40 | k€/a | Annahme PTS |

### 5.6.4 Vergleich von Kosten und Einsparungen

**Allgemeine Hinweise**

Die Basis für Kosten und Einsparungen sind die Annahmen in Kap. 5.6.3. Der ROI (Return On Invest) wird berechnet als Verhältnis von Investition zu den jährlichen Einsparungen. Für die Berechnung des ROI bleiben die Betriebskosten unberücksichtigt.

**Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Einsparung von Prozessdampf (Varianten-gruppen 1-3)**

Konzept 1 enthält Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung aus dem Gesamtabwasser und aus der Abluft. Hohe Investitionskosten ergeben sich für die Maßnahme 1.1 aufgrund der sehr langen Rohrleitung.

Tab. 25: Investitionskosten für Konzept 1

| **Investitionskostenabschätzung Konzept 1 (Sz 1.1 - 2.1 - 2.5)**<br>Kosten in k€ | |
|---|---|
| Bauleistungen | 61 |
| Maschinentechnik | 578 |
| Rohrleitungen | 603 |
| EMSR-Technik | 300 |
| indirekte Kosten und Unvorhergesehenes | 156 |
| **Summe Investition** | **1.698** |

Der ROI für Konzept 1 beträgt 1,3 Jahre (Tab. 26).

Tab. 26: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Konzept 1

| **Gesamtkosten Konzept 1 (1.1 - 2.1 - 2.5)**<br>Kosten in k€ | | |
|---|---|---|
| Investitionen | | 1.698 |
| Einsparungen | | 1.282 |
| ROI | (Jahre; ohne BK) | 1,32 |
| Betriebskosten p.a. (ohne Abschreibung) | | 78 |

Um den Einfluss der hohen Investitionen in Maßnahme 1.1 zu eliminieren, wurde zusätzlich Maßnahme 2.5 gerechnet. Die Ergebnisse zeigen eine wesentlich höhere Wirtschaftlichkeit, wenn diese Maßnahme isoliert ergriffen wird. Der ROI sinkt auf 0,8 Jahre.

Tab. 27: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Szenario 2.5

| **Gesamtkosten Szenario 2.5**<br>Kosten in k€ | | |
|---|---|---|
| Investitionen | | 320 |
| Einsparungen | | 385 |
| ROI | (Jahre; ohne BK) | 0,83 |
| Betriebskosten p.a. (ohne Abschreibung) | | 19 |

**Externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme (Szenariengruppe 6)**

Bei einer externen Nutzung der Niedertemperaturabwärme wurde die Variante zur Nutzung der Wärme als Fernwärme unter Einsatz einer Wärmepumpe gerechnet. Das Szenario 6.1 zum Betrieb eines Schwimmbades ist aufgrund des geringen Wärmebedarfs von geringer Bedeutung und wurde daher keiner Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen.

Tab. 28: Investitionskosten für Szenario 6.2

| **Investitionskostenabschätzung Szenario 6.2**<br>Kosten in k€ | |
|---|---|
| Bauleistungen | 25 |
| Maschinentechnik | 546 |
| Rohrleitungen | 54 |
| EMSR-Technik | 127 |
| indirekte Kosten und unvorhergesehenes | 127 |
| **Summe Investition** | **879** |

Der ROI erscheint mit 0,9 Jahren relativ kurz. Die jährlichen Betriebskosten betragen jedoch 455 k€/a. Damit stellt sich die Wirtschaftlichkeit einer solchen Maßnahme anders dar. Ebenfalls zu berücksichtigen sind die sehr hohen Kosten für den Aufbau und den Betrieb eines Fernwärmenetzes. Eine endgültige Bewertung dieses Szenarios ist daher nicht ohne eine weitere eingehende Überprüfung möglich.

Tab. 29: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Szenario 6.2

| **Gesamtkosten Szenario 6.2**<br>Kosten in k€ | | |
|---|---|---|
| Investitionen | | 900 |
| Erlös | | 987 |
| ROI | (Jahre; ohne BK) | 0,91 |
| Betriebskosten p.a. (ohne Abschreibung) | | 455 |

### Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte (Variantengruppe 5)

Die technisch mögliche Nutzung von Niedertemperaturabwärme erfordert relativ hohe Investitionen. Die Adsorptionskältemaschine ist mit ca. 107 k€ daran beteiligt. Zusätzliche Kosten verursachen das Abluftregister (Desorptionswärme) und die notwendigen Pumpen.

Tab. 30: Investitionskosten für Szenario 5.1

| **Investitionskostenabschätzung Szenario 5.1**<br>Kosten in k€ | |
|---|---|
| Bauleistungen | 10 |
| Maschinentechnik | 197 |
| Rohrleitungen | 124 |
| EMSR-Technik | 56 |
| indirekte Kosten und Unvorhergesehenes | 56 |
| **Summe Investition** | **443** |

Aufgrund des ungünstigen Verhältnisses der Investitionskosten zu den zu erzielenden Einsparungen ergibt sich ein relativ hoher Wert für den ROI. Die Umsetzung von Szenario 5.1 ist daher wenig attraktiv (Tab. 31).

Tab. 31: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Szenario 5.1

| **Gesamtkosten Szenario 5.1**<br>Kosten in k€ | | |
|---|---|---|
| Investitionen | | 480 |
| Einsparungen | | 133 |
| ROI | (Jahre; ohne BK) | 3,62 |
| Betriebskosten p.a. (ohne Abschreibung) | | 17 |

### Zusammenfassende Bewertung

In Abb. 19 wird die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Szenarien / Konzepte verglichen. Dargestellt sind die Investitionskosten, die erzielbaren Einsparungen und der ROI.

Eine hohe Wirtschaftlichkeit ist insbesondere bei einer lokalen Koppelung von Wärmequellen und –senken erzielbar (Szenario 2.5). Die erreichten ROI-Werte sind mit deutlich unter einem Jahr für eine Umsetzung sehr interessant. Die Wirtschaftlichkeit leidet immer dann, wenn die örtlichen Gegebenheiten einen hohen Aufwand (Rohrleitungen etc.) erfordern (Szenario 1.1 in Konzept 1).

Eine externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme ist grundsätzlich möglich. Es treten jedoch z.T. hohe externe Kosten auf, wenn kein Fernwärmenetz zur Verfügung steht und dieses erst aufgebaut werden soll.

Eine Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte erscheint unter den Randbedingungen der Papiererzeugung als wenig attraktiv.

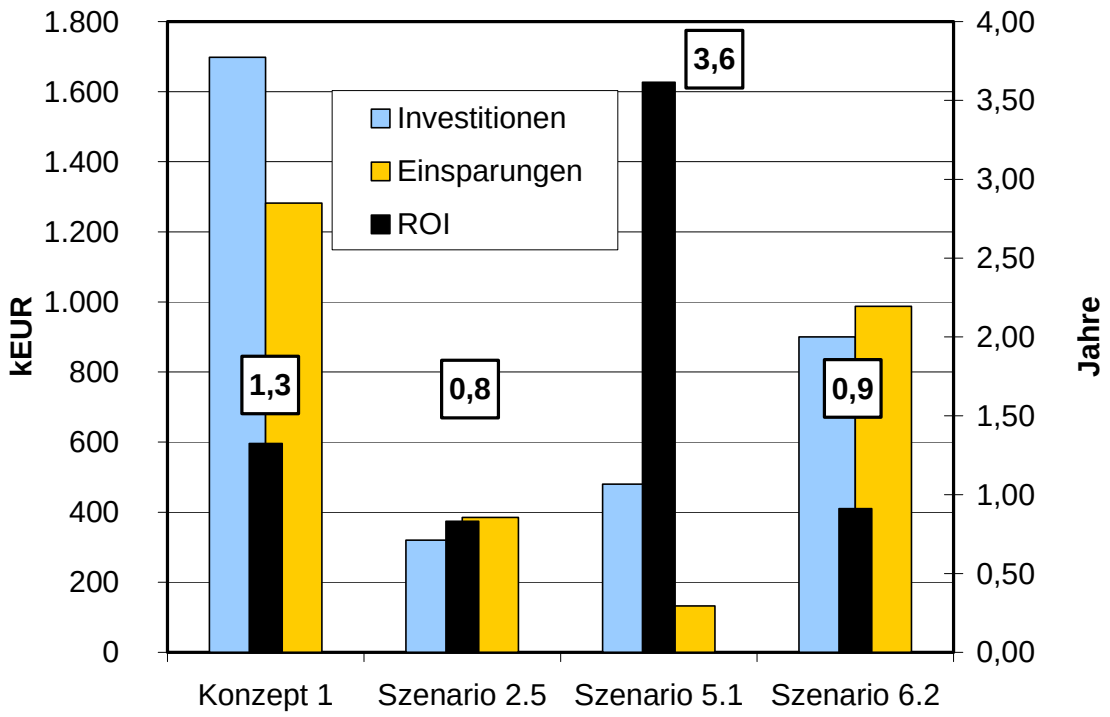



Abb. 19: Zusammenfassende Bewertung der Wirtschaftlichkeit

# 6 Übertragung der Ergebnisse auf die bayerische Papierindustrie

## 6.1 Handlungsempfehlungen für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Die Untersuchungen sollten zeigen, welche in der Papierindustrie bisher nicht oder kaum genutzten Technologien oder Verfahrensschritte zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme eingesetzt werden können.

Die Untersuchungen wurden in einem Partnerbetrieb durchgeführt, der Zeitungsdruck- und Magazinpapiere herstellt. Als Rohstoff wird im untersuchten Betrieb überwiegend Altpapier eingesetzt. Der Zellstoffeinsatz spielt eine untergeordnete Rolle. Sortentypisch ist die betriebsinterne Erzeugung von Holzstoff, der einen Rohstoffanteil von über 10% hat.

Es erfolgte eine detaillierte Systemaufnahme des Stoff-Wassersystems und des Zu- und Abluftsystems. Umfang der Untersuchung waren die Anlagen PM A und B, DIP A und B sowie die Schleiferei. In diesen werden alle durch Dampf und Strom in die Papiererzeugung eingetragenen Energieströme innerhalb der Anlage ausgetauscht und über die Systemgrenzen nach außen transportiert. Der Energietransport mit festen Medien (Papier, Reststoffe) leistet nur einen sehr geringen, vernachlässigbaren Beitrag zur Energiebilanz.

Die Möglichkeiten zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme in dem untersuchten Partnerbetrieb wurden identifiziert und unter Berücksichtigung eines erarbeiteten Simulationsmodells ein Konzept zur verbesserten Nutzung der Niedertemperaturabwärme erarbeitet. Geeignete Konzepte wurden einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen.

Zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme in der Papierindustrie stehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten eines Wärmeübertrags zur Verfügung:

- Wärmetausch Wasser gegen Wasser
- Wärmetausch Wasser gegen Luft
- Einsatz von Wärmepumpen und Kältemaschinen zur Aufwertung von Abwärmeströmen (sowohl interne Nutzung als auch Fremdnutzung)

Daraus ergeben sich drei potenzielle **Konzepte zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme**:

1. **Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Einsparung von Prozessdampf**
2. **Externe Nutzung der Niedertemperaturabwärme**
3. **Nutzung der Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte**

In der Abb. 20 werden die grundsätzlichen Möglichkeiten, die der Papierindustrie zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Verfügung stehen, dargestellt. Die linke, untere Ecke der jeweiligen Verbindungsfelder gewichtet die zur Verfügung stehende Wärmemenge. Die rechte, obere Ecke ist ein Maß für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit.

Aus der Bewertung wird ersichtlich, dass zum einen die Nutzung der Wärme aus dem Kreislauf Deinkinganlagen (DIP), zum anderen der Einsatz von überschüssiger Wärme zur internen Heizung von Lager- und Büroräumen sowie zur externen Heizung z.B. eines Schwimmbades von untergeordneter Bedeutung sind. Geeignete Varianten zur Nutzung von Abwärme sind die Aufwärmung des Siebwassers und des Frischwassers. Aus wirtschaftlichen Gründen sind hier insbesondere die Wärmeströme des Filtrats der Schleiferei und die Abluft der Trockenpartie von

Bedeutung. Die Nutzung des Abwärmestroms des Abwassers ist aufgrund der hohen zu tauschenden Wärmemenge sehr interessant, allerdings zumeist aufgrund der weiten Entfernungen zu den Tauschpartnern unwirtschaftlich.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Wärmeentnahme aus dem Kreislauf der Deinkinganlage (DIP) nur bei Papierfabriken, die Altpapier einsetzen und eine Deinking-Anlage betreiben, und der Wärmestrom Filtrat Schleiferei nur bei Unternehmen, die Holzstoff als Halbstoff erzeugen, zur Verfügung steht.

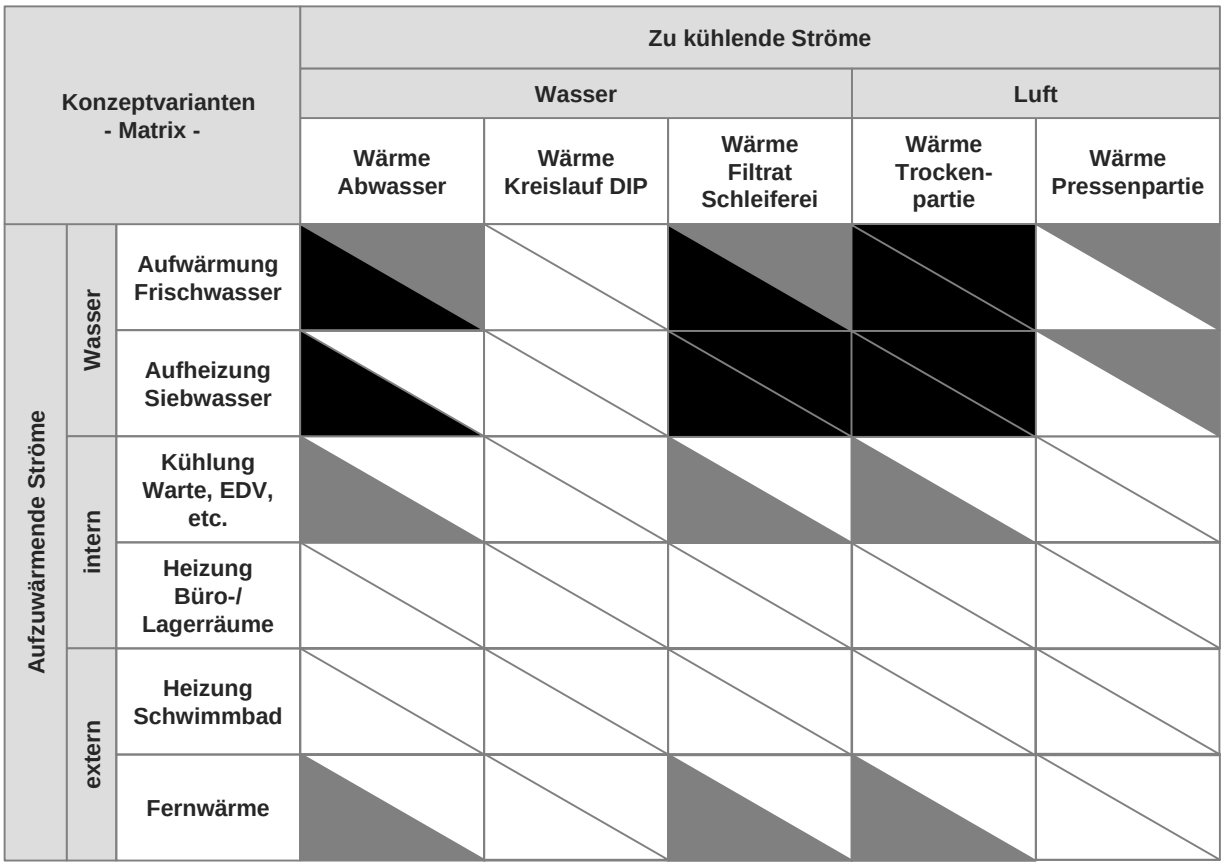



Abb. 20: Möglichkeiten der Nutzung von Niedertemperaturabwärme unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Wärmemenge (unteres Dreieck) und der Wirtschaftlichkeit (oberes Dreieck): schwarz = hoch; grau = mittel; weiß = gering

Zusätzlich zu den aufgezeigten Varianten besteht die Möglichkeit, kritische Prozessbedingungen zu ändern. Beispielsweise seien hier die folgenden Prozesstemperaturen genannt: Frischwasser vor der Flockung/Fällung, Schleifer, Dispergierung, Siebwasser. Diese Maßnahmen können allerdings mit negativen Wechselwirkungen für den Prozess der Papierherstellung verbunden sein. Eine Umsetzung ist daher oft nicht möglich.

Im Folgenden werden die wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen und deren Konsequenzen für die Nutzung der verschiedenen Varianten zusammengefasst:

- Eine hohe Wirtschaftlichkeit ist gegeben, wenn Wärmequellen und –senken möglichst lokal gekoppelt werden. Wird aufgrund der Entfernung der Wärmequellen und –senken ein hoher

Aufwand an Rohrleitungen, Pumpen, etc. notwendig, leidet die Wirtschaftlichkeit. Hier kann es von Papierfabrik zu Papierfabrik erhebliche Unterschiede geben.

- Eine externe Nutzung von Niedertemperaturabwärme ist grundsätzlich möglich. Die Wirtschaftlichkeit ist aber stark von den vorhandenen Abnehmern und den logistischen Randbedingungen (z.B. Fernwärmenetz) abhängig. Eine Nutzung von Fernwärme erscheint nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn ein bestehendes Fernwärmenetz (z.B. am Stadtrand) genutzt werden kann.
- Die Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte erscheint unter den gegebenen Randbedingungen der Papierindustrie als wenig attraktiv.

## 6.2 Wärmebilanz und $CO_2$-Minderungspotenziale in der bayerischen Papierindustrie

Die Abschätzung der Wärmebilanz und der $CO_2$-Minderungspotenziale aus der Nutzung von Niedertemperaturabwärme erfolgte auf Basis der vorliegenden Statistiken bezüglich der Produktions- und Energiedaten in der deutschen und bayerischen Papierindustrie sowie einer Hochrechnung der im Rahmen des Projektes ermittelten Daten.

### 6.2.1 Wärmebilanz

Für die Darstellung des Wärme- und Strombedarfs und der Ermittlung der $CO_2$-Minderungspotenziale ist eine Betrachtung der Sortenstruktur der Papierindustrie von Bedeutung. Die Abb. 21 zeigt die Sortenstruktur in der Bundesrepublik Deutschland, die Abb. 22 zeigt die bayerische Sortenverteilung. Aus dem Vergleich der Darstellungen wird ersichtlich, dass in Bayern eine andere Produktionsstruktur als in der Bundesrepublik vorhanden ist. Der Anteil an Druck- und Pressepapieren, insbesondere an Zeitungsdruckpapieren liegt in Bayern deutlich höher als im bundesdeutschen Durchschnitt. Insgesamt lag die Gesamtproduktion in Deutschland bei ca. 18 Mio. t im Jahr 2001 und in Bayern bei ca. 4 Mio. t/a.

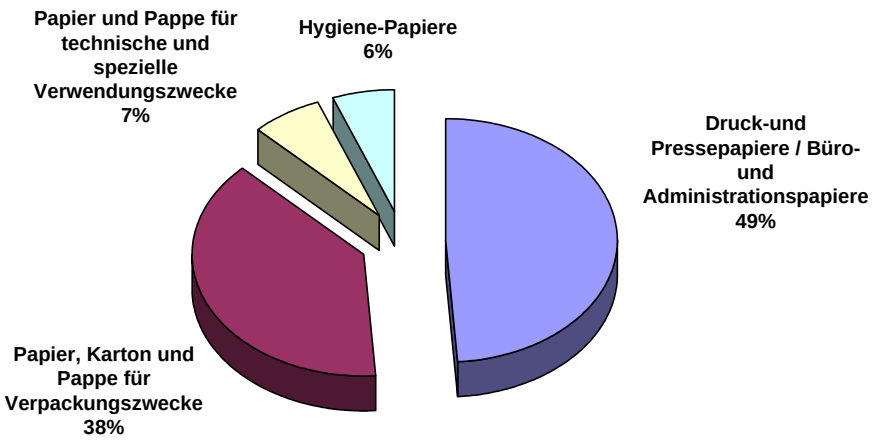



Abb. 21: Papier, Karton und Pappe Produktion in Deutschland im Jahr 2001 (Quelle: VDP)

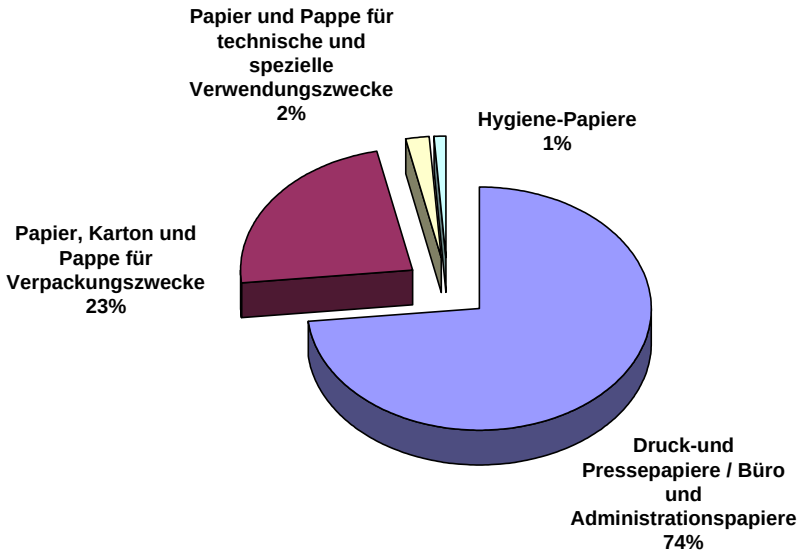



Abb. 22: Papier, Karton und Pappe Produktion in Bayern im Jahr 2001 (Quelle: VDP)

Für die Berechnung des Energiebedarfs ist neben der oben angegebenen Produkteinteilung eine sortenspezifische Einteilung, die sich v.a. am unterschiedlichem Energiebedarf orientiert, notwendig. Daher wurde eine weitere sortenspezifische Einteilung für die bayerische Papiererzeugende Industrie in die folgenden Produktgruppen vorgenommen:

- Zeitungsdruck
- Holzfrei, gestrichen
- Holzfrei, ungestrichen
- Holzhaltig, gestrichen
- Holzhaltig, ungestrichen
- Verpackungspapiere
- Hygienepapiere

Die Einteilung orientiert sich an der Einteilung des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln (EWI) und des ZELLCHEMING-Fachunterausschusses Energie-, Maschinen- und Anlagentechnik (ZELLCHEMING). Von Seiten des ZELLCHEMING wurde der Energieeinsatz der VDP-Hauptsorte Druck- und Pressepapiere detailliert untersucht. Die Betrachtung umfasste die Sortengruppen Zeitungsdruck, holzhaltig gestrichene Papiere und holzfrei gestrichene Papiere. EWI führte im Auftrag des VDP eine Studie zum Energieeinsatz in der Papierindustrie von 1990 bis 2005 durch.

In Abb. 23 ist die sortenspezifische Verteilung der bayerischen Papierindustrie dargestellt. In Tab. 32 sind die Ergebnisses von ZELLCHEMING und EWI zusammengefasst. Dargestellt sind der spezifische Strom- und Wärmebedarf, aufgeschlüsselt nach den genannten Papiersorten. Aus den dargestellten Daten wird ersichtlich, dass der Wärme- und Strombedarf der Papierindustrie stark von der Sortenstruktur, den eingesetzten Veredelungsstufen (Streichmaschine)

und der Halbstoffaufbereitung abhängig ist. Dies spiegelt sich in der aufgeführten Sortenverteilung wider.

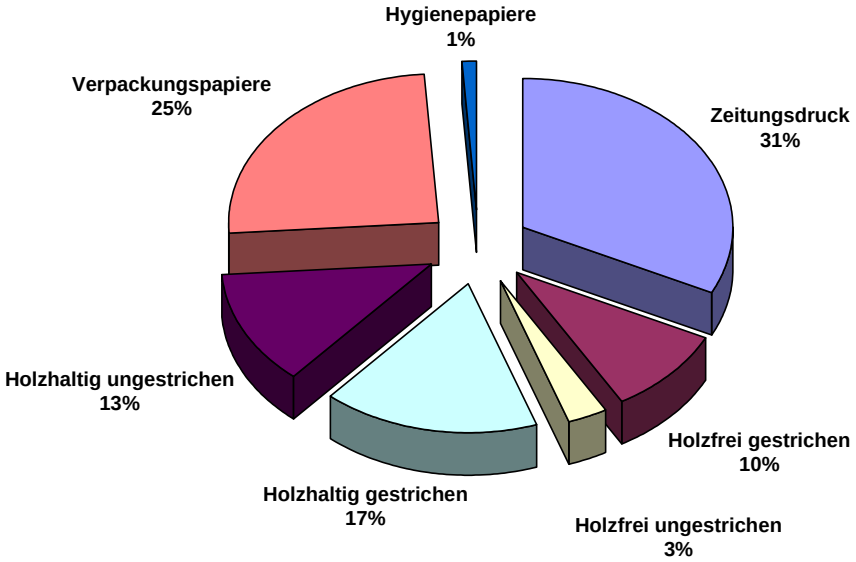



Abb. 23: Papier, Karton und Pappe Produktion in Bayern im Jahr 2001

Tab. 32: Spezifischer Energiebedarf der Sorten (Quelle: ZELLCHEMING und EWI)

| | Wärmebedarf [kWh/t] | Strombedarf [kWh/t] | Energiebedarf [kWh/t] |
|---|---|---|---|
| **Hygieniepapiere** | 1900 | 1150 | 3050 |
| **Holzhaltig gestrichen** | 1600 | 1450 | 3050 |
| **Holzfrei gestrichen** | 1800 | 1000 | 2800 |
| **Holzhaltig ungestrichen** | 1250 | 1370 | 2620 |
| **Holzfrei ungestrichen** | 1600 | 770 | 2370 |
| **Zeitungsdruck** | 1000 | 1200 | 2200 |
| **Verpackungspapiere** | 1500 | 500 | 2000 |

Aus der Sortenverteilung der bayerischen Papierindustrie (siehe Abb. 23) und dem sortenspezifischen Energiebedarf (siehe Tab. 32) wurde der Wärme- und Strombedarf der bayerischen Papierindustrie abgeschätzt. Insgesamt ergibt sich für die bayerische Papierindustrie ein Wärmebedarf von ca. 5,37 Mio. MWh und ein Strombedarf von ca. 4,18 Mio. MWh. Demnach beträgt der Wärmebedarf ca. 56% des gesamten Energiebedarfs.

Tab. 33: Geschätzter Energiebedarf der Sorten in Bayern im Jahr 2001

| | Wärmebedarf [MWh] | Strombedarf [MWh] | Energiebedarf [MWh] |
|---|---|---|---|
| **Hygienepapier** | 76.445 | 46.269 | 122.714 |
| **Holzhaltig gestrichen** | 1.062.650 | 963.026 | 2.025.676 |
| **Holzfrei gestrichen** | 688.462 | 382.479 | 1.070.941 |
| **Holzhaltig ungestrichen** | 629.596 | 690.037 | 1.319.634 |
| **Holzfrei ungestrichen** | 200.483 | 96.483 | 296.966 |
| **Zeitungsdruck** | 1.289.012 | 1.546.814 | 2.835.826 |
| **Verpackungspapiere** | 1.501.701 | 500.567 | 2.002.268 |
| **Gesamt** | **5.371.904** | **4.179.407** | **9.551.311** |

### 6.2.2 $CO_2$-Minderungspotenziale

Die rechnerischen $CO_2$-Emissionen sind abhängig von den eingesetzten Brennstoffen. Sie ergeben sich aus dem Produkt des Brennstoffenergieeinsatzes der einzelnen Energieträger und deren jeweiligen spezifischen $CO_2$-Emissionsfaktoren.

In Abb. 24 ist die Verteilung der einzelnen Energieträger in der deutschen Papierindustrie dargestellt. Eine Verteilung der Energieträger bezogen auf die bayerische Papierindustrie liegt nicht vor. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass das Verhältnis der Energieträger in Bayern ähnlich ist. Für die Ermittlung des $CO_2$-Ausstoßes wird von der selben Verteilung wie in Deutschland ausgegangen.

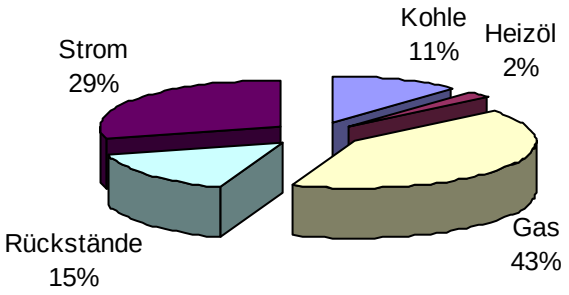



Abb. 24: Energieträger in der Papierindustrie in Deutschland im Jahr 2001,
Gesamtenergieeinsatz: 54,2 Mio. MWh (Quelle: VDP)

In Abhängigkeit der spezifischen $CO_2$-Emissionsfaktoren lässt sich der $CO_2$-Ausstoß ermitteln. Die spezifischen $CO_2$-Emissionsfaktoren wurden vom EWI detailliert berechnet. Die vom EWI ermittelten Faktoren werden der Abschätzung der $CO_2$-Emissionen und $CO_2$-Einsparpotenziale der bayerischen Papierindustrie zugrunde gelegt (siehe Tab. 34).

Bei einer Produktion im Jahr 2001 von ca. 4 Mio. t in Bayern ergibt sich ein $CO_2$-Emission pro t Erzeugung von 0,55 t $CO_2$/t (absolut 2,2 Mio. t $CO_2$/a).

Tab. 34: $CO_2$-Emissionsfaktoren, Energieeinsatz in Bayern im Jahr 2001 sowie $CO_2$-Emissionen im Jahr 2001 aufgeteilt nach Energieträgergruppen ($CO_2$-Emissionsfaktoren nach EWI)

| | t $CO_2$/MWh Brennstoffenergie | MWh | t $CO_2$/a 2001 |
|---|---|---|---|
| **Steinkohle** | 0,336 | 910.881 | 306.056 |
| **Braunkohle** | 0,357 | 186.565 | 66.604 |
| **Heizöl** | 0,277 | 220.635 | 61.116 |
| **Gas** | 0,201 | 3.989.583 | 801.906 |
| **Rückstände** | 0 | 1.445.113 | 0 |
| **Fremdstrom** | 0,231 | 2.082.000 | 480.942 |
| **Eigenstrom** | 0,67 | 716.425 | 480.005 |
| **Gesamt** | | 9.551.202 | 2.196.629 |

In der Untersuchung des Partnerbetriebes wurde detailliert ermittelt, dass erhebliche Potenziale zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme vorhanden sind. Die verschiedenen Variantengruppen wurden eingehend in der Ergebnisdarstellung diskutiert. Der untersuchte Partnerbetrieb ist aufgrund des Standes der Technik bezüglich der Nutzung von Niedertemperaturabwärme als vergleichbares Unternehmen in der bayerischen Papierindustrie zu bezeichnen.

Dennoch ist eine Übertragung der ermittelten Wärme- und damit auch $CO_2$-Einsparpotenziale aufgrund der unterschiedlichen örtlichen und verfahrenstechnischen Bedingungen nicht ohne weiteres möglich. Daher kann im Rahmen dieses Projektes nur eine Abschätzung des $CO_2$-Einsparpotenzials in der bayerischen Papierindustrie aufgrund der Nutzung von Niedertemperaturabwärme gemacht werden.

In der Tab. 35 sind das Wärme- und $CO_2$-Einsparpotenzial der bayerischen Papierindustrie (gemittelt für Sommer und Winter) auf Basis der im Partnerbetrieb ermittelten Daten zusammengefasst. Die dargestellten Varianten zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme stellen die – bezogen auf die Wirtschaftlichkeit und die zur Verfügung stehende Wärmemenge – interessantesten Möglichkeiten dar. Zusätzlich sind die auf die Brutto-Produktion bezogenen spezifischen Wärmeeinsparpotenziale aufgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der spezifische Wärmebedarf in Abhängigkeit von den produzierten Sorten zwischen 1.000 und 1.900 kWh/t liegt (siehe Tab. 32).

Für die einzelnen Varianten ergeben sich $CO_2$- und Wärmeeinsparpotenziale von bis zu 10 %. Das spezifische $CO_2$- Einsparpotenzial (bezogen auf die Produktionsmenge) liegt zwischen 6 und 30 kg/t.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Varianten miteinander gekoppelt werden können. In der für den Partnerbetrieb betrachteten Konzeptvariante ergibt sich ein gemitteltes Einsparpotenzial von maximal 25 %.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Nutzung der Wärme aus dem Holzstofferzeugungsprozess nur bei Unternehmen, die Holzstoff selbst erzeugen und diesen im eigenen Werk einsetzen, möglich ist. Der Einsatz von Abwärme zur externen Heizung mittels eines Fernwärmenetzes ist nur bei Nutzung eines bestehenden Fernwärmenetzes wirtschaftlich attraktiv.

Alle weiteren im Rahmen der Studie geprüften Varianten zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme sind weniger attraktiv und wurden daher in Tab. 35 nicht berücksichtigt.

Tab. 35: $CO_2$- und Wärme-Einsparpotenzial in der bayerischen Papierindustrie

| **Wärmetausch** | **Relevanz** | **Art der Nutzung von Niedertemperaturabwärme** | **Wärme- und $CO_2$-Einsparpotenzial [%]** | **spez. Einsparpotenzial [kWh/t]** | **spez. $CO_2$-Reduz. potenzial [kg/t]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Luft - Wasser | alle Papierfabriken | Wärme Trockenpartie zur Aufwärmung von Siebwasser / Frischwasser | 6% - 7% | 77 - 88 | 18 - 20 |
| Luft - Wasser | alle Papierfabriken | Wärme Pressenpartie zur Aufwärmung von Siebwasser / Frischwasser | 2% - 4% | 32 - 60 | 7 - 14 |
| Wasser - Wasser | alle Papierfabriken | Wärme Abwasser zur Auffwärmung des Frischwassers | ca. 10% | ca. 131 | ca. 34 |
| Wasser - Wasser | nur Papierfabriken mit Holzstoff-erzeugung | Wärme Schleiferei zur Aufwärmung von Siebwasser / Frischwasser | ca. 2% | ca. 26 | ca. 6 |
| Wasser - Extern | alle Papierfabriken (bei vorh. Fernwärmenetz) | Wärme Abwasser zur Einspeisung in das Fernwärmenetz | ca. 7% | ca. 100 | ca. 23 |

# 7 Anhang (Verfahrensbeschreibungen)

## 7.1 Wärmepumpen

Prinzip der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wandelt Wärme niedriger Temperatur in Wärme hoher Temperatur um. Dies geschieht durch einen geschlossenen Kreisprozess durch ständiges Ändern des Aggregatzustandes des Arbeitsmittels (Verdampfen, Komprimieren, Verflüssigen, Expandieren).

Die Wärmepumpe nutzt Niedertemperaturabwärme und gibt diese plus der Antriebsenergie in Form von Wärme an den Heiz- und Warmwasserkreislauf ab.

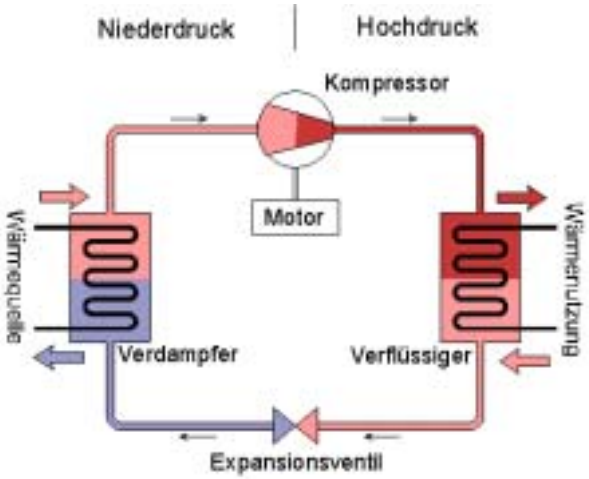



Abb. 25: Der Kreisprozess der Wärmepumpe

Kenngrößen einer Wärmepumpenanlage

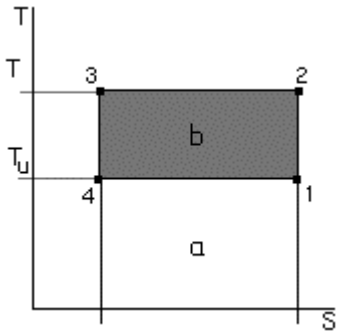
$\varepsilon$ = Heizleistung / Antriebsleistung = (Umweltenergie + Antriebsleistung) / Antriebsleistung

Die Leistungszahl $\varepsilon$ gibt die abgegebene Heizleistung im Vergleich zur aufgewendeten Antriebsleistung an. Eine Leistungszahl von 4 bedeutet daher, dass das Vierfache der eingesetzten elektrischen Leistung in nutzbare Wärmeleistung umgewandelt wird. Die Leistungszahl ist ein Momentanwert. Die im Laufe einer gesamten Heizperiode gelieferte Wärme $Q_w$ im Verhältnis zu der zugeführten elektrischen Antriebsenergie $W_{el}$ ergibt die **Jahresarbeitszahl ß**. Ferner kann zwischen der Wärmepumpen-Arbeitszahl und der (gesamt) Anlagen-Arbeitszahl unterschieden werden. Der ideale Vergleichsprozess des Wärmepumpen-Arbeitsprozesses ist der rückwärtslaufende (Kraftwärmemaschine**)** ideale Carnot-Prozess. Für diesen Prozess ergibt sich der theoretische Wirkungsgrad $\eta_c$. Damit können wir die Leistungszahl auch über die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Verdampfer) und Wärmenutzungsanlage (Kondensator) berechnen:

$$\eta_c = T / (T - T_u) = T / \Delta T$$

$\eta_c$ = Leistungszahl nach Carnot
$T_u$ = Temperatur der Umgebung aus der die Wärme aufgenommen wird
T = Temperatur der Umgebung an die die Wärme abgegeben wird
$\Delta T$ = Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite

Eine Darstellung der während des Carnot-Prozesses durchlaufenen Werte der Variablen T und S (Entropie) sieht wie folgt aus:




Von Umwelt aufgenommene Energie: **Fläche a**

Antriebsenergie Kompressor: **Fläche b**

Gesamte abgegebene Energie: **Fläche a + b**

S = Entropie = Energieinhalt

1 -2: verdichten (Temperaturhub)
2 - 3: kondensieren
3 -4: expandieren
4 -1: verdampfen

Abb. 26: T-S Diagramm. Die Kurve besteht aus zwei Adiabaten (S = const) und zwei Isothermen (T = const)

Beispiel:

Für $T_u$ = 0°C = 273 K, T = 50°C = 323 K folgt eine theoretisch größte Leistungszahl $\eta_c$ = 6,5. Die Leistungszahlen für den tatsächlichen Wärmepumpenprozess, also inklusive Verluste, werden geringer sein. Aufgrund der thermischen, mechanischen und elektrischen Verluste sowie des Energiebedarfs der Hilfsantriebe ist die effektiv erreichte Leistungszahl $\eta$ kleiner als $\eta_c$. Für Überschlagsrechnungen kann $\eta$ gleich 0,5 x $\eta_c$ gesetzt werden. In jedem Fall ist die reale Leistungszahl von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und der Wärmeverteilung abhängig: Je geringer dieser "Temperaturhub" ausfällt, um so wirtschaftlicher arbeitet jede Wärmepumpe. Daher ist die optimale Planung der Gesamtanlage so bedeutend.

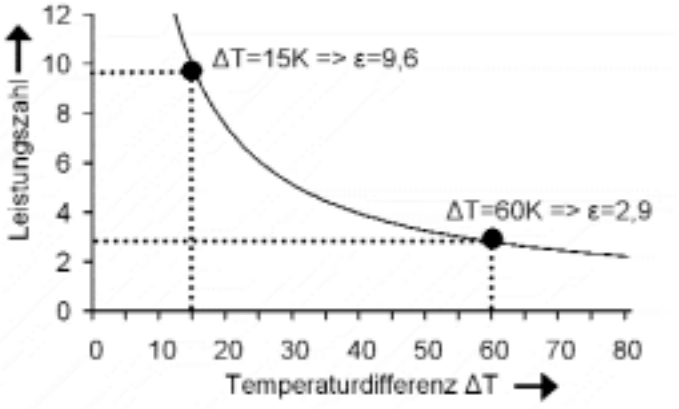



Abb. 27: Die Leistungszahl in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied

## 7.2 Adsorptionskältemaschinen

Funktionsweise einer Adsorptionskältemaschine

Eine Adsorptionskältemaschine besteht aus zwei mit Sorptionsmittel gefüllten Arbeitskammern sowie einem Kondensator und einem Verdampfer. Als Sorptionsmittel wird Silicagel und als Kältemittel Wasser eingesetzt. Der Prozess ist diskontinuierlich und geschlossen. Während eines Zyklus laufen folgende Vorgänge ab:

Das an das Silicagel angelagerte Wasser wird in der rechten Kammer unter Wärmezufuhr ausgetrieben. Das Wasser wird im Kondensator verflüssigt und Wärme an das Kühlwasser abgeführt. Das Kondensat wird in den Verdampfer eingesprüht und bei starkem Unterdruck verdampft. Dabei wird Wärme aus dem Kaltwasser entnommen und dieses dabei auf die für die Klimaanlage erforderliche Temperatur abgekühlt. In der linken Kammer wird der Wasserdampf adsorbiert und die entstehende Wärme an das Kühlwasser abgeführt.

Durch einfaches Umlenken des Heiz- und Kühlwasserkreislaufes zwischen den beiden Kammern werden die Funktionen Austreiber und Adsorber am Ende eines Zyklusses vertauscht und der Prozess beginnt von Neuem. Im Auslegungszustand dauert ein Arbeitszyklus 400 Sekunden. Zwischen zwei Arbeitszyklen liegt noch eine Umschaltphase von 20 Sekunden, so dass der Gesamtzyklus sieben Minuten dauert. Während der Umschaltphase werden beide Kammern in Reihe durchströmt, so dass Wärme zurückgewonnen wird.

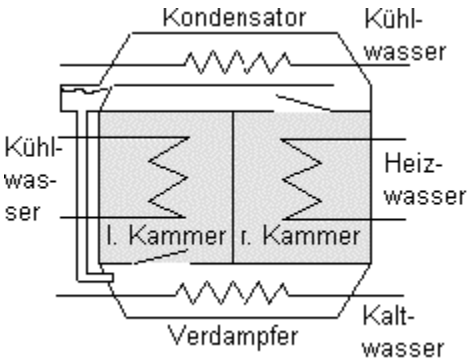



Abb. 28: Prinzipskizze einer Adsorptionskältemaschine