



INFOR-Projekt Nr. 17

Konzept zur Reduzierung des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoff-Bedarfs von Feinpapier-Fabriken

SCHLUSSBERICHT

August 2002

Lehrstuhl und Fachrichtung
Papiertechnik
Technische Universität Dresden

Leiter der Forschungsstelle:
Prof. Dr.-Ing. H.L. Baumgarten

Projektbearbeiter:
Dipl.- Ing. R. Zelm
F. Hofmann

Abschlußbericht
**Konzept zur Reduzierung des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoff-
Bedarfs von Feinpapier-Fabriken**

INFOR-Projekt - Nr. 17, TUD-LPT 01/01 "Energie-Reduktion: Feinpapier"

H.L. Baumgarten, R. Zelm, F. Hofmann

August 2002

Projektbegleiter:

- Dipl.-Ing. J. Hoppe
Nordland Papier AG
- Dr. G. Papier
Zanders Feinpapiere AG
- Dr. J. Hemmes
M-real Werk Stockstadt

Das Forschungsprojekt wurde gefördert
aus dem **INFOR-Fonds** des
**Kuratoriums für Forschung und
Technik der Zellstoff- und Papier-
industrie im Verband Deutscher
Papierfabriken e.V. (VDP)**, Bonn

**LEHRSTUHL UND FACHRICHTUNG
PAPIERTECHNIK**



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

PROF.DR.-ING. H.L. BAUMGARTEN

TU Dresden * Lehrstuhl für Papiertechnik * 01062 Dresden

Tel.: (03 51) 4 63 / 3 80 33 Fax: (03 51) 4 63 / 3 80 32 e-mail: lepatec@mhp.mw.tu-dresden.de

August 2002

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt den Projektbegleitern für ihre intensive Unterstützung und Beratung während der Durchführung des Projektes. Weiterhin gilt unser Dank den Mitarbeitern von VTT Processes, Jyväskylä und den Mitarbeitern der Metso Paper Inc.. Dem Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (VDP), Bonn, danken wir für die finanzielle Förderung dieses Projektes und die damit verbundene Nachwuchsförderung.

Dresden, August 2002

Inhaltsverzeichnis

I	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	IV
II	Abkürzungsverzeichnis	VI
III	Formelzeichen und Indizes.....	VII
IV	Übersetzungsverzeichnis	IX
V	Begriffe und Definitionen.....	X
V.I	Sub- und Hilfssysteme.....	X
V.II	Mehrmalig auftretenden Module	XI
V.III	Einmalig auftretenden Module	XII
V.IV	Ströme	XIII
1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1-1
2	ENTWICKLUNG DES ENERGIE-, WASSER-, LUFT- UND STOFFGEBRAUCHS IN FEINPAPIERFABRIKEN.....	2-1
2.1	Energieeinsatz	2-1
2.2	Wassergebrauch.....	2-3
2.3	Stoffgebrauch	2-5
2.4	Luftgebrauch.....	2-7
3	SYSTEMATISIERUNG DER PRODUKTIONSLINIE	3-1
3.1	Definition des Systems	3-1
3.2	Bilanzierte Stromgrößen	3-1
3.3	Besonderheiten der drei modellierten Produktionslinien	3-5
3.4	Erstellen von Subsystemen	3-6
3.4.1	Systematik der Subsysteme - Production Line System	3-6
3.4.2	Stoffaufbereitung	3-9
3.4.3	Papiermaschine.....	3-12
3.4.4	Streichmaschine.....	3-16
3.4.5	Ausrüstung und Verpackung.....	3-17
3.4.6	Hilfssysteme	3-18
3.5	Simulation des Prozeßablaufes und Aufnahme der Prozeßdaten	3-20
3.6	Lösungsmethodik.....	3-25
3.6.1	Benchmarking	3-25
3.6.2	Pinch-Analyse	3-26
3.7	Simulations- und Analyse-Programme	3-30
3.7.1	Programmauswahl	3-30
3.7.2	Informationsveranstaltungen über Simulationssoftware	3-33
4	BALAS – SIMULATIONSSOFTWARE FÜR PAPIERSTOFF- UND PAPIERSYSTEME	4-1
4.1	Prozeßsimulation	4-1
4.2	BALAS Programmstruktur	4-2
4.3	Berechnung der spezifischen Wärmekapazität in BALAS.....	4-3
4.3.1	Allgemeines	4-3
4.3.2	Chemisch reine Fluide (<i>reid.dat</i>)	4-3
4.3.3	Feststoffe und Stoffgemische (<i>ctp.dat</i>)	4-4
4.3.4	Sonderfall: Wasser	4-5
4.4	Berechnung der Enthalpie in BALAS.....	4-5
4.4.1	Grundlagen.....	4-5
4.4.2	Berechnung der Enthalpie von Stoffen und Stoffgemischen	4-6

4.4.3	Definition des Referenzzustandes	4-7
4.5	Betrachtungen zum Energieeintrag in die Module einer Simulation	4-12
4.5.1	Grundlagen.....	4-12
4.5.2	Energieberechnung in BALAS-Modulen	4-13
4.5.3	Grenzen der Energieberechnung in der Software	4-17
4.6	Anmerkungen zur Verwendung der Begriffe „Dry Content“ und „Consistency“	4-19
4.6.1	Allgemeines	4-19
4.6.2	Dry Content	4-19
4.6.3	Consistency.....	4-19
4.6.4	Konsequenzen der unterschiedlichen Definitionen für die Datenerfassung	4-19
4.7	Erweiterungen der Software	4-20
4.7.1	Einführung	4-20
4.7.2	Im Rahmen des Projektes neu erstellte Symbole	4-21
5	LÖSUNGSWEGE ZUR SYSTEMOPTIMIERUNG	5-1
5.1	Verfahrenstechnische Lösungswege.....	5-1
5.1.1	Schaffung von Hochtemperaturkreisläufen.....	5-1
5.1.2	Niedertemperatureindampfung	5-1
5.1.3	Luftfreie Papiertrocknung	5-2
5.1.4	Verringerung der rechnerischen Austauschzeiten	5-2
5.2	Produktionstechnische Lösungswege	5-3
5.2.1	Erhöhung der Verfügbarkeit (Runability).....	5-3
5.3	Maschinentechnische Lösungswege	5-3
5.3.1	Nutzung der Abwärme großer Elektromotoren	5-3
5.3.2	Verringerung des Antriebsbedarfes durch Drehzahlregelung.....	5-4
5.3.3	Einsatz von Dampfstrahlpumpen	5-5
5.3.4	Nutzung von Abwärmequellen durch Wärmepumpen	5-6
5.3.5	Verringerung der Masse von bewegten Teilen	5-7
5.4	Zusammenfassung	5-7
6	PROZEß- UND INVESTITIONSKOSTEN	6-1
6.1	Konzept der Kostenangaben	6-1
6.2	Einordnung.....	6-1
6.3	Berechnung.....	6-1
6.3.1	Berechnungsmethode	6-1
6.3.2	Optimierung des Energiegebrauchs.....	6-2
6.3.3	Optimierung des Wassergebrauchs.....	6-2
6.4	Durchführbarkeit	6-3
7	ZUSAMMENFASSUNG	7-1
8	LITERATURVERZEICHNIS	8-1
9	ANHANG	9-1
9.1	Darstellungen der einzelnen Feinpapier-Produktionslinien	9-1
9.1.1	Flowsheet der Feinpapier-Produktionslinie B nach Umbau einer bestehenden fiktiven Feinpapierfabrik.....	9-2
9.1.2	Flowsheet der Feinpapier-Produktionslinie B (nach erster Systematisierung mit eingezeichneten Systemgrenzen der Subsysteme	9-3
9.1.3	Beispiel zum Stand der Simulation und Bilanzierung – 07/2001.....	9-4
9.1.4	Specific mass and energy balances – 08/2001	9-5
9.1.5	Specific mass and energy flows between subsystems and support systems – 08/2001	9-6
9.1.6	Production Line System der Produktionslinie B	9-7

9.1.7 Terms, definitions and shortcuts.....	9-8
9.1.8 Subsystemdarstellung: Chemical Pulp System (CEPUS) der Produktionslinie B.....	9-9
9.1.9 Dryer Section (DRYES) der Produktionslinie C.....	9-10
9.1.9.1 Subsystemdarstellung: Pre Dryer System (PREDS)	9-10
9.1.9.2 Subsystemdarstellung: Sizer System (SIZES)	9-11
9.1.9.3 Subsystemdarstellung: Post Dryer System (PODYS)	9-12
9.1.9.4 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/DRYES))	9-13
9.1.10 Wet End Section (WETES) der Produktionslinie A	9-14
9.1.10.1 Subsystemdarstellung: Wire System WIRES).....	9-14
9.1.10.2 Subsystemdarstellung: Press System (PRESS)	9-15
9.1.10.3 Subsystemdarstellung: Fresh Water System (FEWAS/WETES)	9-16
9.1.10.4 Subsystemdarstellung: Steam System (STEAS/WETES)	9-17
9.1.10.5 Subsystemdarstellung: Return Pulp System (REPUS/WETES)	9-18
9.1.11 Coating Machine (CM) der Produktionslinie B	9-19
9.1.11.1 Subsystemdarstellung: Front Pre Coater and Dryer System (FPCDS).....	9-19
9.1.11.2 Subsystemdarstellung: Front Top Coater and Dryer System (FTCDS)	9-20
9.1.11.3 Subsystemdarstellung: Back Pre Coater and Dryer System (BPCDS).....	9-21
9.1.11.4 Subsystemdarstellung: Back Top Coater and Dryer System (BTCDS)	9-22
9.1.11.5 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/CM)	9-23
9.2 Technische Erläuterungen	9-24
9.2.1 Vorgehensweise beim Einbinden neuer Module in Symbolbibliotheken der grafischen Benutzeroberfläche Flosheet für die Simulations-Software BALAS	9-25
9.2.2 Einsatz- und Ausführungsbeispiele von Dampfstrahlpumpen.....	9-30
9.2.3 Kosteneinsparung durch richtige Motorenwahl	9-33
9.2.4 Umrechnung der Dampferzeugungskosten je Tonne Dampf in Euro-Cent je kWh.....	9-37
9.2.5 Themenvorschläge aus dem Bereich: Energie/Energienutzung	9-39

I Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abb. V.IV-1	Bezeichnung der Ströme am Beispiel eines Spritzwassertanks	XIII
Abb. V.IV-2	Bezeichnung der Ströme am Beispiel eines Hydrozyklons	XIV
Tab. 1-1:	Exemplarische SWOT-Analyse von Papierproduktionslinien [1-1].....	1-3
Abb. 2.1-1:	Energieeinsatz in der deutschen Papierindustrie	2-1
Tab. 2.1-1:	Spez. Energiebedarf für verschiedene Papiersortengruppen (Mittelwerte: 1995 bis 1998) [2-3]	2-2
Abb. 2.1-2:	Spezifischer für holzfrei gestrichene Papiere von 1995 bis 1998 [2-3]	2-1
Tab. 2.1-2:	Spez. Gesamtenergiebedarf für holzfrei gestrichene Papiere in Deutschland, 1998 [2-3].....	2-2
Tab. 2.1-3:	Spez. Energiebedarf für holzfrei gestrichene Papiere (WFC) in Deutschland, 1998 [2-3].....	2-3
Abb. 2.2-1:	Mittlere spezifische Abwassermengen der Papierindustrie Deutschlands [2-4, PTS, 2-5, 2-6]	2-4
Abb. 2.2-2:	Frischwassergebrauch ausgewählter Feinpapierfabriken (1995-1997) [2-7]	2-4
Abb. 2.2-3:	Entwicklung der spezifischen Abwassermenge nach Produktionsgruppen (1987-1996) [2-8]	2-5
Abb. 2.3-1:	World consumption of total papermaking fibres 1994 [2-4, 2-10]	2-5
Abb. 2.3-2:	Global paper and board consumption and raw material base 1995 [2-4, 2-10]	2-5
Abb. 2.3-3:	Industrial minerals in paper and board worldwide 1995, 19 Mt/a (=7 % of 270 Mt/a paper) [2-11].....	2-5
Tab. 2.3-1:	Faserstoffeinsatz in der deutschen Papierindustrie [2-5, 2-9, 2-1].....	2-6
Abb. 2.3-4:	Gesamtgebrauch von Zell-, Holz- und Altpapierstoff in Deutschland [2-12].....	2-6
Tab. 3.2-1:	Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur in °C [3-17]	3-2
Tab. 3.2-2:	Tagesmittelwerte des Außenluft-Wasserdampfgehaltes in g(H ₂ O)/kg(trockene Luft) [3-17].....	3-2
Abb. 3.2-1:	Stoff- und Energiesysteme einer Papierfabrik [3-18].....	3-3
Abb. 3.2-2:	Verknüpfung der Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffströme einer Papierfabrik [3-19].....	3-3
Tab. 3.2-3:	Tabelle der Daten zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit	3-5
Abb. 3.4-1:	Production Line System.....	3-6
Tab. 3.4-1:	Stromarten in den FloSheet- und Excel-Darstellungen	3-8
Abb. 3.4-2:	Schema der Zellstoffaufbereitung (Produktionslinie B)	3-9
Abb. 3.4-3:	Schema der Mineralstoffaufbereitung (Produktionslinie C)	3-10
Abb. 3.4-4:	Schema der Stärkeaufbereitung (Produktionslinie B).....	3-10
Abb. 3.4-5:	Schema der Zusatzstoffaufbereitung (Produktionslinie C)	3-11
Abb. 3.4-6:	Schema der Fertigungsausschußsystem (Produktionslinie A)	3-11
Abb. 3.4-7:	Schema der Streichfarbenaufbereitung (Produktionslinie A)	3-12
Abb. 3.4-8:	Schema des Konstantteils (Produktionslinie C).....	3-13
Abb. 3.4-9:	Schema der Naßpartie (Produktionslinie C)	3-14
Abb. 3.4-10:	Schema der Trockenpartie (Produktionslinie A)	3-15
Abb. 3.4-11:	Schema des ersten Streichwerkes der Streichmaschine mit Abrollung (Produktionslinie B).....	3-16
Abb. 3.4-12:	Schema des Hallenluftsystems der Streichmaschine (Produktionslinie B)	3-17
Tab. 3.4-3:	Zusammenstellung der Kalendarerdaten.....	3-18
Abb. 3.4-14:	Schema der Frischwasseraufbereitung (Produktionslinie C).....	3-19
Abb. 3.4-15:	Schema der Abwasseraufbereitung (Produktionslinie C).....	3-19
Abb. 3.4-16:	Schema des Dampf- und Kondensatsystems (Produktionslinie C)	3-20
Tab. 3.5-1:	Die spezifischen Abwassermengen ABW _{sa} und ABW _{sp} [3-20]	3-21
Tab. 3.5-2:	Übersicht der untersuchten Produktionslinien und Papiersorten	3-21

Abb. 3.5-3:	Specific mass and energy balances (flows and energy per oven dry base paper; main stream calculated without internal return pulp) 3-22
Abb. 3.5-4:	Compact Table: Specific mass and energy balances (flows and energy per kg oven dry base paper) 3-23
Abb. 3.6-1:	Die fünf Phasen des Benchmarking-Prozesses [3-2] 3-26
Abb. 3.6-2:	Zustandsänderung zweier Stoffströme ohne Wärmeintegration [3-21] 3-27
Abb. 3.6-3:	Wärmeintegration bei zwei Stoffströmen [3-21] 3-27
Abb. 3.6-4:	Temperaturintervalle der heißen und kalten Stoffströme [3-21] 3-28
Abb. 3.6-5:	Summenkurven und optimale Wärmeintegration (schematisch) [3-21] 3-29
Abb. 3.6-6:	Wärmestromprofil bei optimaler Wärmeintegration (schematisiert) [3-21] 3-30
Tab. 3.7-1:	Kostenübersicht der betrachteten Programme (Stand Nov. 2000) 3-33
Tab. 3.7-2:	Kostenübersicht der verschiedenen IDEAS-Versionen (Stand Nov. 2001) 3-34
Abb. 4.1-1:	Modul mit verknüpften Prozeßströmen im Fließbild [4-5] 4-1
Abb. 4.1-2:	Vereinfachter Bleichprozeß [4-5] 4-1
Abb. 4.2-1:	BALAS 2.5 Softwarestruktur. 4-2
Abb. 4.5-1:	BALAS-Dialogfeld "Electricity" für einen Sortierer 4-13
Tab. 4.5-1:	Begriffe im BALAS-Dialogfeld „Electricity“: Input values 4-14
Tab. 4.5-2:	Begriffe im BALAS-Dialogfeld "Electricity": Calculated values 4-14
Abb. 4.5-3:	Möglichkeiten und Einschränkungen der Routine „Electricity“ 4-18
Tab. 4.6-1:	Beispiel für die Auswirkung der unterschiedlichen Berechnungsvorschriften 4-20
Abb. 4.7-1:	Neues Symbol für Leimpresse bzw. Symsizer 4-21
Abb. 4.7-2:	Neues Symbol für ein Maschinenglättwerk.....4-22
Abb. 4.7-3:	Neues Symbol für einen Poperoller 4-22
Abb. 4.7-4:	Neues Symbol für eine Abrollung 4-22
Abb. 4.7-5:	Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie A 4-23
Abb. 4.7-6:	Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie B 4-23
Abb. 4.7-7:	Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie C 4-23
Abb. 4.7-8:	Kalender der Produktionslinie A mit Ein- und Ausgangsströmen.....4-23
Abb. 4.7-9:	Kalender der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen.....4-23
Abb. 4.7-10:	Kalender der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen.....4-24
Abb. 4.7-11:	Symbol zur Darstellung des Kühlzylinders der Produktionslinie C 4-24
Abb. 4.7-12:	Kühlzylinder der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen 4-24
Tab. 5.1-1:	Wasser-, Dampf- und Luftdaten für Wärmetauscher [5-6].....5-1
Abb. 5.1.1:	Verdampfungswärme des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur [5-6] 5-2
Abb. 5.1.2:	Kennzeichnung des Stoff-Wassersystems einer Papierfabrik durch rechnerische Austauschzeiten [5-30].....5-3
Abb. 5.3.1:	Pumpenkennlinien von zwei Prozeßpumpen [5-67] 5-4
Abb. 5.3.1:	Aufbau einer regelbaren Dampfstrahlpumpe mit pneumatischen Stellantrieb 5-5
Abb. 5.3-3:	Grundprinzip der Wärmepumpe [5-1] 5-7
Abb. 5.3-4:	Sankey-Diagramm der Wärmepumpe [5-1] 5-7
Abb. 6.3-1:	Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem kW elektrischer Energie nach der Kapitalwertmethode 6-2
Abb. 6.3-2:	Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem m ³ Abwasser.....6-3
Abb. 6.4-1:	Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem kW elektrischer Energie bei einer Amortisationszeit von zwei Jahren 6-3
Abb. 6.4-2:	Maximale Investitionskosten zur Einsparung eines m ³ Abwassers bei einer Amortisationszeit von zwei Jahren 6-3

II Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
CTMP	chemical thermomechanical pulp
NB	Nebenbetriebe
otro	ofentrocken
PM	Papiermaschine
SA	Stoffaufbereitung
SM	Streichmaschine
spez.	spezifisch
SW1	Siebwasser 1
SW2	Siebwasser 2
Tab.	Tabelle
WFC	wood free coated

III Formelzeichen und Indizes**a) Formelzeichen**

A	Querschnittsfläche
a, b, c, d	Stoffspezifische Konstanten
A, B, C, D	Stoffspezifische Konstanten
c	Strömungsgeschwindigkeit
c_p	Spez. oder molare isobare Wärmekapazität
c_v	Spez. oder molare isochore Wärmekapazität
C_p	Molare Wärmekapazität des realen Gases
C_p^0	Molare Wärmekapazität des idealen Gases
ΔC_p	Departure Function der Wärmekapazität
$(\Delta C_p)^{(0)}$	Simple fluid contribution (Beitrag des einfachen Fluids)
$(\Delta C_p)^{(1)}$	Deviation Function (Abweichungs-Funktion)
φ	Phasenwinkel
h	Spez. Enthalpie
Δh_f^{298}	Standardbildungsenthalpie
$h^{T,p}$	Enthalpie eines Stoffes bei der Temperatur T und dem Druck p
H	Enthalpie
$\dot{H}$	Enthalpiestrom
ΔH	Enthalpieänderung bei der Reaktion
η	Elektrischer Wirkungsgrad
I	Stromstärke
M	Drehmoment, Molare Masse
$\dot{m}$	Massestrom
n	Drehzahl
N	Molanzahl
p	Statischer Druck
p_c	Kritischer Druck

p_r	Reduzierter Druck
P	Leistung
π	Kreiskonstante
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{Q}_C$	Abzuführender Wärmestrom
$\dot{Q}_T$	transferierter Wärmestrom
$\dot{Q}_H$	zuzuführender Wärmestrom
$\Delta \dot{Q}$	Wärmestromdifferenz
ρ	Dichte
R	Universelle Gaskonstante, $R=8,3145 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
s	Spez. Entropie
T	Thermodynamische Temperatur
T_c	Kritische Temperatur
T_r	Reduzierte Temperatur
t	Celsius-Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz
u	Spez. innere Energie
U	Spannung, innere Energie
v	Spez. Volumen
v_i	Stöchiometrischer Koeffizient der Komponente i
V	Volumen
ω	Pitzer acentric factor
x_i	Anteil der Komponente i am Gesamtmassestrom

b) Indizes

1, 2, 3, ...	Zustände/Periode 1, 2, 3
C	Kalt (engl.: cool)
el	Elektrisch
H	Warm (engl.: heat)
liquid	Flüssige Phase
liquid, non volatile	Nichtflüchtige Komponenten der flüssigen Phase
i, j	Zählvariablen
I	Intervall I
max	Maximalwert
mech	Mechanisch
min	Minimalwert
prod	Produkte (products)
reac	Ausgangsstoffe (reactants)
solid	Feste Phase
T	Periode T

IV Übersetzungsverzeichnis**Englisch****Deutsch**

additive	Zusatzstoff, Hilfsstoff
air	Luft
amylo pulp	Stärke
approach section	Konstantteil
back pre coat	Rückseitenvorstrich
back top coat	Rückseitendeckstrich
broke	Rückstoff
calender	Kalander
chemical pulp	Zellstoff
chest	Behälter, Bütte
clear filtrate	Klarfiltrat
cloudy filtrate	Trübfiltrat
coater	Streichwerk
coating color	Streichfarbe
consistency controller	Stoffdichteregler
disk filter	Scheibenfilter
divider / stream divider	Stromteiler
dosing	Dosierung
dryer section	Trockenpartie
effluent water	Abwasser
fiber recovery	Faserrückgewinnung
filler	Mineralstoff
front pre coat	Vorderseitenvorstrich
front top coat	Vorderseitendeckstrich
hall air	Hallenluft
headbox	Stoffauflauf
heat	Wärme
heat exchanger	Wärmeaustauscher
heat transmitter	Wärmeübertrager
heat loss	Wärmeverlust
heat pump	Wärmepumpe
heat recovery	Wärmerückgewinnung
junction	Stromvereinigung
mineral pulp	Mineralstoff
oven dry	ofentrocken
post dryer system	Nachtrockenpartie
pre dryer system	Vortrockenpartie
preheating	Vorwärmung

Englisch**Deutsch**

press system	Pressenpartie
pulper	Stofflöser
pump	Pumpe
raw water	Frischwasser
retention agent	Retentionshilfsmittel
return pulp	Rückstoff
runability	Verfügbarkeit
screen	Sortierer
seal	Dichtung
section	Sektion = räumliche Einheit
shower water	Spritzwasser
sludge	Schlamm
starch	Stärke
steam	Dampf
steam box	Dampfkasten
steam heater	Dampfheizter
storage chest	Vorratsturm
super clear filtrate	Superklarfiltrat
supply chest	Zuführbütte
surface size	Oberflächenleimung
sweetener stock	Filterhilfsschicht
system	System = verfahrenstechnische Einheit
tank	Bütte
thermocompressor	Strahlpumpe
tower	Turm
unwinder	Abrollung
vapour	Dampfanteil des Dampf-Luft-Gemisches
volatile	flüchtig
water	Wasser
wet end	Nasspartie
white water	Siebwasser 1
wire pit	Siebwasserbehälter
wire system	Siebpartie
wood free coated	holzfrei, gestrichen

V Begriffe und Definitionen**V.I Sub- und Hilfssysteme**

1	Stoffaufbereitung	Pulp Systems	PS
1.1	Zellstoffaufbereitung	<u>C</u> h <u>e</u> m <u>i</u> c <u>a</u> l <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	CEPUS
1.1.1	Kurzfaserstoff	<u>H</u> a <u>r</u> d <u>w</u> o <u>o</u> d <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	HWPUS
1.1.2	Langfaserstoff	<u>S</u> o <u>f</u> t <u>w</u> o <u>o</u> d <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	SWPUS
1.2	Mineralstoffaufbereitung	<u>M</u> i <u>n</u> e <u>r</u> a <u>l</u> <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	MIPUS
1.3	Stärkeaufbereitung	<u>A</u> m <u>y</u> l <u>o</u> <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	AMPUS
1.4	Hilfsstoffsystem	<u>A</u> dd <u>i</u> t <u>i</u> v <u>e</u> s <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	ADDIS
1.5	Rückstoffaufbereitungssystem	<u>R</u> e <u>t</u> u <u>r</u> n <u>P</u> u <u>l</u> p <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	REPUS
1.6	Streichfarbenaufbereitung	<u>C</u> o <u>a</u> t <u>i</u> n <u>g</u> <u>C</u> o <u>l</u> o <u>u</u> r <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	COCOS
2	Papiermaschine	Paper Machine	PM
2.1	Konstantteil	<u>A</u> p <u>p</u> r <u>o</u> a <u>c</u> h <u>S</u> e <u>c</u> t <u>i</u> o <u>n</u>	APROS
2.2	Naßpartie	<u>W</u> e <u>t</u> <u>E</u> n <u>d</u> <u>S</u> e <u>c</u> t <u>i</u> o <u>n</u>	WETES
2.2.1	Naßpartie-Wasser-System	<u>W</u> e <u>t</u> <u>E</u> n <u>d</u> <u>W</u> a <u>t</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	WEWAS
2.2.2	Siebsystem	<u>W</u> i <u>r</u> e <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	WIRES
2.2.3	Pressensystem	<u>P</u> r <u>e</u> s <u>s</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	PRESS
2.3	Trockenpartie	<u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> e <u>c</u> t <u>i</u> o <u>n</u>	DRYES
2.3.1	Vortrockenpartiesystem	<u>P</u> r <u>e</u> <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	PREDS
2.3.2	Leimungssystem	<u>S</u> i <u>z</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	SIZES
2.3.3	Nachtrockenpartiesystem (inkl. Maschinenglättwerk und Poperoller)	<u>P</u> o <u>s</u> t <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m (includes Online Calender and Pope Roller)	PODYS
3	Streichmaschine	Coating Machine	CM
3.1	Oberseiten-Vorstrich und Trocknungs- Systeme (inkl. Abrollung)	<u>F</u> r <u>o</u> n <u>t</u> <u>P</u> r <u>e</u> <u>C</u> o <u>a</u> t <u>e</u> r and <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m (includes Unwinder)	FPCDS
3.2	Oberseiten-Deckstrich und Trocknungs- Systeme	<u>F</u> r <u>o</u> n <u>t</u> <u>T</u> o <u>p</u> <u>C</u> o <u>a</u> t <u>e</u> r and <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	FTCDS
3.3	Unterseiten-Vorstrich und Trocknungs- Systeme	<u>B</u> a <u>c</u> k <u>P</u> r <u>e</u> <u>C</u> o <u>a</u> t <u>e</u> r and <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	BPCDS
3.4	Unterseiten-Deckstrich und Trocknungs- Systeme (inkl. Poperoller)	<u>B</u> a <u>c</u> k <u>T</u> o <u>p</u> <u>C</u> o <u>a</u> t <u>e</u> r and <u>D</u> r <u>y</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m (includes Pope Roller)	BTCDS
4	Ausrüstung und Verpackung	Finishing and Packing	FP
4.1	Kalandersystem	<u>S</u> u <u>p</u> e <u>r</u> <u>C</u> a <u>l</u> e <u>n</u> d <u>e</u> r <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	SUCAS
4.2	Rollenschneider und –Verpackungssystem	<u>R</u> e <u>e</u> l <u>C</u> u <u>t</u> t <u>e</u> r and <u>P</u> a <u>c</u> k <u>e</u> r <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	RECPS
5	Hilfssystem	Support Systems	SS
5.1	Rohwasseraufbereitungssystem	<u>F</u> r <u>e</u> s <u>h</u> <u>W</u> a <u>t</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	FEWAS
5.2	Kühlwassersystem	<u>C</u> o <u>o</u> l <u>i</u> n <u>g</u> <u>W</u> a <u>t</u> e <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	COWAS
5.3	Abwasseraufbereitungssystem	<u>W</u> a <u>t</u> e <u>r</u> <u>C</u> l <u>e</u> a <u>n</u> i <u>n</u> g <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	WACES
5.4	Dampfsystem	<u>S</u> t <u>e</u> a <u>m</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	STEAS
5.5	Druckluftsystem	<u>C</u> o <u>m</u> p <u>r</u> e <u>s</u> s <u>e</u> d <u>A</u> i <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	COMAS
5.6	Maschinenhallenluftsystem	<u>H</u> a <u>l</u> l <u>A</u> i <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	HALAS
5.7	Elektroenergiesystem	<u>E</u> l <u>e</u> c <u>t</u> r <u>i</u> c <u>a</u> l <u>E</u> n <u>e</u> r <u>g</u> y <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	ELENS
5.8	Trocknungsluftsystem	<u>D</u> r <u>y</u> i <u>n</u> g <u>A</u> i <u>r</u> <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	DRYAS
5.9	Vakuumsystem	<u>V</u> a <u>c</u> u <u>u</u> m <u>S</u> y <u>s</u> t <u>e</u> m	VACUS

V.II Mehrmals auftretenden Module

Grundsätzlich sind alle Module innerhalb ihres Subsystems zu numerieren. Die Nummern werden von links nach rechts vergeben. Sollte

diese Einteilung nicht eindeutig sein, so ist eine weitere Einteilung von oben nach unten vorzunehmen.

Modul	englische Bezeichnung	Modulbezeichnung
Auffangwanne	pan	pan.subsystem.Modulnummer
Bandpresse (Entwässerung)	sludge press	sludge_press.subsystem.Modulnummer
Bogensieb	bow screen	bs.subsystem.Modulnummer
Bütte	chest	chest.Werksbezeichnung
Dampfquelle	steam source	steam_Dampfdruck in bar
Deculator	deculator	deculator.subsystem.Modulnummer
Disperger	disperger	disp.subsystem.Modulnummer
Drucksortierer	machine screen	ms.subsystem.Modulnummer
Eindicker	thickener	thickener.subsystem.Modulnummer
Entstipper	deflaker	deflaker.subsystem.Modulnummer
Entwässerungselement	dewatering element	de.subsystem.Modulnummer
Stoffstromregler (hier: nur für Eingangsströme)	flow controller	fc.Bezeichnung_des_Eingangsstromes
Hallenluft	hall air	hall_air.Modulnummer
Heiz- oder Kühlaggregat	heater/ cooler	hc.subsystem.Modulnummer
Heizdampfaggregat	steam heater	sh.subsystem.Modulnummer
Hydrozyklon	cleaner	cleaner.Cleanerstufe.subsystem
Infrarottrockner	IR dryer	IR_dryer.Modulnummer
Klärbecken	clarifier	clarifier.Reinigungsmethode (z. B. sedimentation).subsystem
Kondensator	condensor	c.subsystem.Modulnummer
Kondensat-Tank	condensate_tank	con.subsystem.Modulnummer
Mischtank [z. B. bei Streichfarbenaufb.]	mixing chest	mc.subsystem.Modulnummer
Motor	motor (= heater/cooler, aber anderes Symbol)	mo.subsystem.Modulnummer
Nash-Vakuumpumpe	Nash pump	nash_pump.subsystem.Modulnummer
Pulper	pulper	pulper.subsystem.Modulnummer
Pumpe	pump	pump.Werksbezeichnung pump_to_Aggregat
Reaktor	reactor	reactor.subsystem.Modulnummer
Refiner	refiner	refiner.subsystem.Refinernummer
Scheibenfilter	disc filter	disc_filter.subsystem.Modulnummer
Schwebetrockner	air flotation dryer	afd.Modulnummer
Sedimentationsbehälter	sedimentation chest	chest_sedimentation.subsystem.Modulnummer
Sortierer allg. (Nachsortierer etc.)	screen	screen.Werksbezeichnung
Sperr-/Kühlwasser	cooling (water)	cooling.Gruppe/Apparatur/Werksbezeichnung
Stärkekocher	starch cooker	starch_cooker.subsystem.Modulnummer
Stoffdichteregler	consistency controller	cc.subsystem.Modulnummer
Streichwerk	coater	coater.Streichwerknummer

Stromteiler	stream divider	<i>sd.subsystem.Modulnummer</i>
Trennaggregat	separator	<i>sep.subsystem.Modulnummer</i>
Ventil	valve	<i>va.subsystem.Modulnummer</i>
Ventilation	ventilation	<i>vent.subsystem.Modulnummer</i>
Verbindungsstelle	junction	<i>ju.subsystem.Modulnummer</i>
Verbindungsstelle/Mischer	mixer	<i>mix.subsystem.Modulnummer</i>
Vorratsbehälter	storage tank	<i>st.subsystem.Modulnummer</i>
Wärmetauscher	heat exchanger	<i>he.subsystem.Modulnummer</i>
Wuchtschüttler	vibration screen	<i>vs.subsystem.Modulnummer</i>
Zylindergruppe in CM	cylinder group	<i>cylinder_group.Gruppennummer</i>

V.III Einmalig auftretenden Module

Modul	englische Bezeichnung	Modulbezeichnung
Ausschußbütte	return pulp chest	return_pulp_chest
Biologische Abwasserreinigung	biological water treatment	biological_treatment
Cleaner ATREX	ATREX cleaner	cleaner_ATREX
Disperger ATREX	ATREX disperger	disperger_ATREX
Fangstoffbütte	recovered fiber chest	recovered_fiber_chest
Frischwassertank	purified water tank	purified_water_tank
Hauptklärung	clarifier	<i>clarifier.Bezeichnung des Verfahrens (z. B. sedimentation)</i>
Hochkonsistenzhydrozyklon	high consistency cleaner	HC_cleaner
Kalander	calender	calender
Klarfiltratbehälter	clear filtrate chest	chest.clear_filtrate
Kleiner Rückwassertank	small back water tank	small_back_water
Kühlwassertank	cooling water tank	cooling_water_tank
Mahlbütte	supply refining chest	supply_refining_chest
Maschinenbütte	machine chest	machine_chest
Mischbütte	mixing chest	mixing_chest
Nachklärung	post clarifier	<i>post_clarifier.Bezeichnung des Verfahrens (z. B. sedimentation)</i>
Nachtrockengruppe	after dryer group	after_dryer_group
Nashgraben	Nash water	chest.nash_water
Oberflächenleimung	surface sizing	surface_sizing
Poperoller [Stromteiler]	pope roller	pope_roller
Randstreifenbütte	edge-trim chest	edge-trim_chest
Rollenschneider	reel cutting machine	cutting
Rollenverpackung	reel packing machine	packing
Rückwassertank	back water tank	back_water_tank
Siebwasser-1-Behälter	wire pit 1	wire_pit_1
Siebwasser-2-Behälter	wire pit 2	wire_pit_2
Spritzwassertank	shower water tank	shower_water_tank
Stadtwassertank	city water tank	city_water_tank
Stoffauflauf	headbox	headbox
Superklarfiltrat	super clear filtrate chest	chest.super_clear_filtrate
Tropfkörper	trickling filter	trickling_filter

Trübfiltrat	cloudy filtrate chest	chest.cloudy_filtrate
UV Bestrahlung	UV cleaning	uv_cleaning
Vorklärung	primary clarifier	primary_clarifier. <i>Bezeichnung des Verfahrens (z. B. sedimentation)</i>
Vortrockengruppe	pre dryer group	pre_dryer_group
Warmwassertank	warm water tank	warm_water_tank
Zentrifuge	centrifuge	centrifuge

V.IV Ströme

Um eine Systematik in der Bezeichnung der Ströme zu gewährleisten, sind alle Ströme nach ihrem Herkunftsmodul benannt. Der Name der Stroms ergibt sich folglich aus dem

Namen des Herkunftsmoduls und einer Stromnummer (01...04), die vom Modulnamen durch einen Punkt getrennt ist. Die Stromnummern werden immer im Uhrzeigersinn, mit zwölf Uhr beginnend, für ein Modul vergeben.

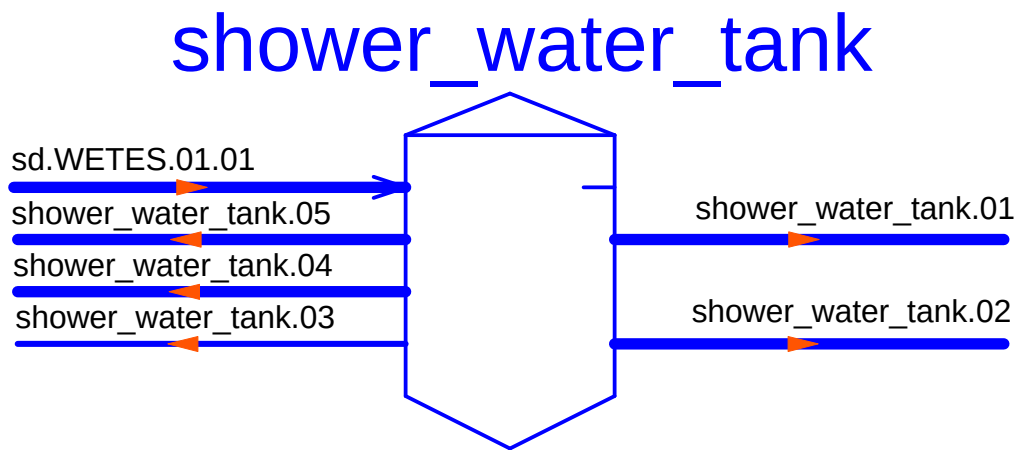


Abb. V.IV-1 Bezeichnung der Ströme am Beispiel eines Spritzwassertanks

Des Spritzwassertank ist ein einmalig auftretendes Modul und trägt die Bezeichnung „shower_water_tank“ (**Abb. V.IV-1**). In der Richtung „zwölf Uhr“ ist kein Strom angeschlossen. Beginnend von dieser Position wird der erste angeschlossene Strom im Uhrzeigersinn, der aus dem Modul „shower_water_tank“ austritt, mit „shower_water_tank.01“ bezeichnet. Der

nächstfolgende Strom bekommt die Bezeichnung „shower_water_tank.02“ usw.. Der in der **Abb. V.VI-1** links oben angeschlossene Strom kommt von einem anderen Modul. Er trägt die Bezeichnung „sd.WETES.01.01“, d.h. dieser Strom ist der erste austretende Strom aus dem ersten Stromteiler (stream divider) aus dem Subsystem WETES (Wet End Section).

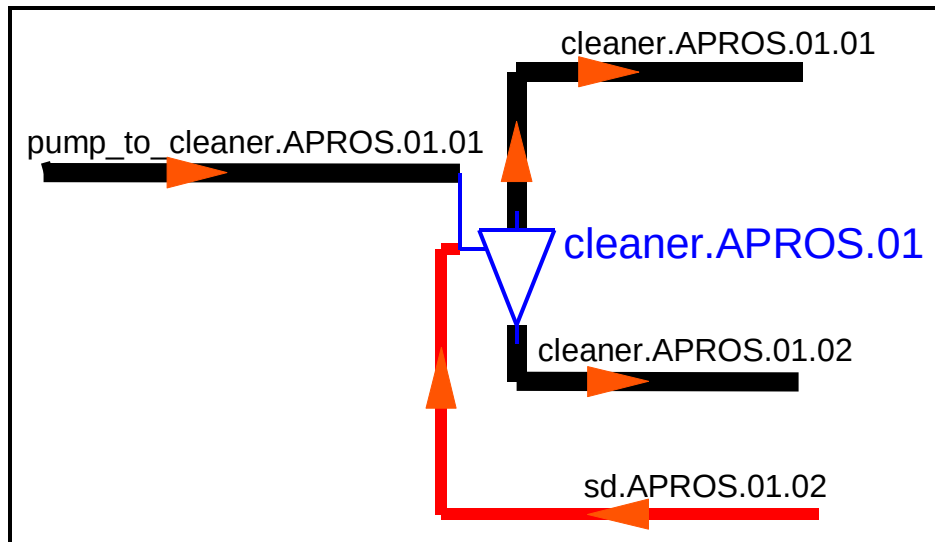


Abb. V.IV-2 Bezeichnung der Ströme am Beispiel eines Hydrozyklons

Der Hydrozyklon „cleaner.APROS.01“ ist der erste Cleaner im Approach System (APROS). Der Strom, der den Cleaner in „Zwölf-Uhr-Position“ verläßt, wird mit „cleaner.APROS.01.01“ bezeichnet. Der nächste austretende Strom liegt in „Sech-Uhr“-Position und wird fortlaufend mit „cleaner.APROS.01.02“ bezeichnet. Die Ströme „pump_to_cleaner.APROS.01.01“ und „sd.APROS.01.02“ (**Abb. V.IV-2**)

Ströme, die von außen in das Gesamtsystem eintreten und deren Herkunft somit nicht eindeutig definiert ist, werden nach ihren Inhaltsstoffen und/oder ihrer Herkunft mit dem Zusatz „_in“ bezeichnet. Treten gleichartige Ströme an unterschiedlichen Stellen in das System ein, sind diese mit einer durch einen Punkt abgetrennten Numerierung bezeichnet.

1 Einleitung und Zielsetzung

In den letzten 4 Jahrzehnten hat die deutsche Papierindustrie mit großem Aufwand und Erfolg den spez. Energiebedarf reduziert. Als gerundeter Mittelwert für alle deutschen Papierfabriken, einschließlich integrierter Holzstoff- und Altpapierstoff-Fabriken, wird hier für den spez. Gesamt-Energiebedarf 3 kWh pro kg Papier genutzt. Davon entfallen weniger als 1 kWh pro kg Papier auf den elektrischen Energiebedarf – also vor allem auf Antriebe – und etwa 2 kWh pro kg Papier auf den thermischen Energiebedarf – also vor allem auf die Trocknung bzw. auf die Verdampfungsenergie in ihrer warmen und feuchten Abluft.

Im gleichen Zeitraum konnte die deutsche Papierindustrie ihren spez. Frischwasserbedarf ebenfalls mit großem Aufwand und Erfolg reduzieren. Derzeit liegt der gerundete Mittelwert für alle deutschen Papierfabriken deutlich unter 15 l Wasser pro kg Papier und in vielen Papierfabriken im Bereich zwischen 4 bis 10 l/kg.

Während die thermische Energie überwiegend mit dem Wasserdampf der Trockenpartie von der Papierfabrik emittiert wird, sorgt die elektrische Antriebsenergie vor allem für die Erwärmung der Kreislaufwässer und damit auch des Abwassers. Bei gleichbleibendem spez. elektrischen Energiebedarf wird die Temperatur der Kreislaufwässer und Abwässer mit sinkendem spez. Frischwasser-Einsatz erhöht. Die zweckmäßige Trennung der Wasser- und Luftströme reduziert die Kühlwirkung – etwa 0,65 kWh/kg verdunstetem Wassers – der diffusen Verdunstung, die vor einigen Jahrzehnten bei mehr als 2 l Wasser pro kg Papier oder 1,3 kWh Kühlwirkung pro kg Papier lag.

Zur Zeit werden auch Feinpapier-Fabriken mit einem geringen spez. Elektro-Energiebedarf wegen ihres gleichzeitig geringen spezifischen Wasserbedarfes mit folgenden Problemen belastet:

- o Hohe Restabwassertemperaturen, die – zum Sichern der zulässigen Maximaltemperaturen – große Kühlaufwendungen

erfordern und gleichzeitig die Wärme- und Wasserdampf-Emissionen der Papierindustrie steigern.

- o Erzeugung und Verwendung von Sekundär-Rohstoff in Form des Überschussschlammes von aeroben biologischen Abwasserreinigungsanlagen mit zusätzlichem elektrischen Energiebedarf.
- o Kosten für die Erzeugung von Trocknungsdampf, dessen Energiegehalt vorwiegend in Form des Papierwasser-Dampfes emittiert wird.

Das vorrangige Ziel des Projektes ist ein Konzept zur deutlichen Reduzierung des spezifischen Energiebedarfes zunächst der Feinpapierfabriken in Verbindung mit einer starken Verminderung der spezifischen Abwasser-, Reststoff-, Abdampf- und Abluftmenge und seiner anschließenden Übertragung auf andere Sortengruppen.

Dazu gehört die Aufnahme und Dokumentation der Prozeßdaten, die Systematisierung der Kreisläufe und der zu betrachtenden Prozeßgrößen, wie elektrische und thermische Energie, Faser- und Mineralstoffe, gelöste und kolloidale organische und anorganische Substanzen sowie die Prozeßluft.

Dazu bestehen folgende Teilkonzepte:

- o Nutzung der elektrischen Verlustleistung großer Elektro-Motoren, der Lager-Kühlung und der Papierbahn-Kühlung durch Niedertemperatur-Dampf-Erzeugung.
- o Reduzierung des elektrischen Antriebsbedarfes von Pumpen und Bütten, u.a. durch drehzahlregelbare Antriebe und damit Verringerung der Restabwassertemperatur.
- o Schaffung von Hochtemperatur-Teilkreisläufen (60 – 90 °C) mit hohem Eintrag elektrischer Antriebsenergie – z.B. Mahl-Anlagen mit vor- und nachgeschalteter Entwässerung und Wäsche – und Nutzung des Energie-Eintrages zur Niedertemperatur-Dampf-Erzeugung bei gleichzeitiger Absenkung der Restwassertemperatur.
- o Niedertemperatur-Eindampfung von Kreislaufwasser-Teilströmen mit Rück-

Kondensation zur Entsalzung der Kreisläufe, Reduzierung des Restabwassers und des Klärschlammes sowie Gewinnung von Frischwasser-Ersatz durch Nutzung des Niedertemperatur-Sekundärdampfes.

- o Luftfreie Niedertemperatur-Hochgeschwindigkeits-Papiertrocknung (60 – 90 °C) bei Siedetemperaturen von 20 – 60 °C mit Rück-Kondensation zur Reduzierung des Trocknungs-Energiebedarfes und des Abdampfes durch Nutzung des Niedertemperatur-Sekundärdampfes.

Neben der Einsparung von Ressourcen, die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens ist, gewinnt die gesellschaftliche Akzeptanz ebenfalls mehr und mehr Bedeutung für den Erfolg eines Unternehmens.

In der Vergangenheit wurde Umweltschutz oft ausschließlich als kostenverursachend und reglementierend auf den unternehmerischen Handlungsraum betrachtet. Er stand damit durch Gewinnminderung im Widerspruch zu den ökonomischen Zielen einer Unternehmung. Somit ist die Ausschöpfung begründeter Umweltschutzpotentiale, sowie die Vermeidung von Risiken, die mit einer Mißachtung ökologischer Aspekte verbunden sind, eine notwendige strategische Führungsaufgabe zur langfristigen Existenzsicherung des Unternehmens.

Der langfristige Unternehmenserfolg wird durch einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Grundsätzlich können diese in unternehmensinterne und –externe Größen unterteilt werden.

Interne Faktoren werden üblicherweise in einem Stärken-Schwächen-Profil dargestellt. Die internen Faktoren können direkt vom Unternehmen beeinflusst werden, man spricht deshalb auch von einer Unternehmensanalyse. Die einzelnen Kriterien sind dabei zu bewerten, z. B. in einer Skala von 1 = sehr stark bis 6 = sehr schwach. Als Kriterien im Blick auf ökologische Aspekte sind in diesem Zusammenhang die

Recyclfähigkeit der Produkte der Gebrauch von Energie, sowie die Verwendung von Rohstoffen, unterteilt nach nachwachsenden Rohstoffen und nicht nachwachsenden Rohstoffen wichtig.

Externe Faktoren werden in einer Umfeldanalyse dargestellt. Hier sind der Staat, der den rechtlichen Rahmen für die unternehmerische Tätigkeit vorgibt, die Kunden, die durch Ihre Kaufentscheidung den Absatz bestimmen und die allgemeine Öffentlichkeit, die Staat und Kunden beeinflussen, als wichtigste Kriterien zu nennen.

Aufbauend auf der Unternehmens- und der Umfeldanalyse können die Ergebnisse in einer *SWOT-Analyse*, auch *TOWS-Analyse* genannt, weiter verdichtet werden. Sie unterscheidet vier mögliche Strategien:

Bei der *SO-Strategie* trifft eine Chance aus dem Umfeld auf eine Stärke des Unternehmens. Es gilt die Stärke zur Nutzung der Gelegenheit einzusetzen.

Die *WO-Strategie* verbindet eine Chance aus dem Umfeld mit einer Schwäche des Unternehmens. Das Ziel muß hier sein, die Chance zur Überwindung der eigenen Schwäche zu nutzen.

ST-Strategien liegen dann vor, wenn eine Bedrohung aus dem Umfeld auf eine Stärke des Unternehmens trifft. Hier muß die Stärke des Unternehmens zur Überwindung der Bedrohung genutzt werden.

Wenn eine Bedrohung aus dem Umfeld auf eine Schwäche des Unternehmens fällt, handelt es sich um eine *WT-Strategie*. Da aus dieser Situation eine besondere Gefahr für das Unternehmen ausgeht, muß es Ziel sein, diese Situation durch Einschränkung der eigenen Schwäche und Vermeidung der Bedrohung auszuschließen.

Die **Tab. 1-1** stellt eine exemplarische *SWOT-Analyse* dar, wie sie für Papierproduktionslinien durchgeführt werden könnte.

Tab. 1-2.1-1: Exemplarische SWOT-Analyse von Papierproduktionslinien [1-1]

	Stärken (Strengths) • Hoher Anteil an Naturstoffen im Produkt • Hohe Recycelfähigkeit • Einfache Produkthandhabung • Hohe Bildqualität	Schwächen (Weaknesses) • Hoher absoluter Energieverbrauch • Hoher absoluter Wasserverbrauch • Anfall von Reststoffen
Chancen (Opportunities) • Wachsender Informationsfluß • Wachsende Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Produkte • Abnehmerpräferenz durch Gewohnheit	SO-Strategien • Einfaches Handling des Informationsflusses mit hoher Qualität	WO-Strategien • Verpflichtung zur Steigerung der Nachhaltigkeit und ggf. Umlage der Mehrkosten auf den Konsumenten
Bedrohungen (Threats) • Rechtliche Auflagen • Abnehmerboykott • Ressourcenverknappung	ST-Strategien • Garantie einer mindest Recyclingquote durch die Industrie	WT-Strategien • Verringerung des spez. Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffbedarfs

Rohstoffe und Energie machen einen großen Anteil der Kosten bei der Papiererzeugung aus.

Bedeutung bei der weiteren Senkung des spezifischen Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffbedarfs zu.

Damit kommt der komplexen Modellierung der Rohstoff- und Hilfsstoffströme sowie der thermischen und elektrischen Ströme sowie der systemverfahrenstechnischen Systematisierung der Produktionslinien eine besondere

Die auf diese Weise erfolgte Modellierung von mehreren Papierproduktionslinien wird breite Anwendung finden – z.B. zur Optimierung des Systems bei Prozeß- und Produktentwicklungen.

2 Entwicklung des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffgebrauchs in Feinpapierfabriken

2.1 Energieeinsatz

Die Papiererzeugung der deutschen Papierindustrie stieg im Zeitraum von 1955 (2,515 Mt/a) bis 2000 (18,182 Mt/a) um den Faktor 7,2. Gleichzeitig konnte der spezifische Energieeinsatz von 1955 (8,242 Wh/kg) bis zum Jahre 2000 (2,705 Wh/kg) um ca. 67,2 % (**Abb. 2.1-1**) [2-1, 2-2] gesenkt werden.

Insgesamt entfallen ca. 67 % des Energieeinsatzes auf den thermischen Energiebedarf und etwa 33 % auf den elektrischen Energiebedarf.

Der spezifische Energiebedarf ist stark abhängig von den einzelnen Sortengruppen. So zeigt sich z. B., daß bei gestrichenem Papier ein wesentlich höherer Gebrauch an Energie nötig ist als bei Zeitungsdruckpapier (**Tab. 2.1-1**). Für die untersuchte Sortengruppe (holzfrei gestrichene Papiere) ergibt sich ein durchschnittlicher Anteil von 64,3 % für den thermischen Energiebedarf und 35,7 % für den elektrischen Energiebedarf (**Tab. 2.1-1**). Der erhöhte thermische Energiebedarf resultiert aus

der – gegenüber der Herstellung von Zeitungsdruckpapier – zusätzlich benötigten thermischen Energie für die Trocknung an der Streichmaschine.

Der spezifische Gesamtenergiebedarf für die Produktion holzfrei gestrichener Papiere konnte von 2.860 Wh/kg im Jahr 1995 auf 2.670 Wh/kg im Jahr 1998 gesenkt werden (**Abb. 2.1-2**). Der thermische Energiebedarf konnte in diesem Zeitraum um 100 Wh/kg und der elektrische Energiebedarf um 90 Wh/kg reduziert werden. Diese Daten wurden an 7 Prozeßlinien mit Produktionsleistungen von 3,7 t/h bis 39 t/h aufgenommen. Für diese Untersuchung wurden Daten von Bilder- und Kunstdruckpapierherstellern, sowie von SD- und Thermopapierherstellern einbezogen. Hinsichtlich des Energieeinsatzes konnten keine Unterschiede bezüglich der Untersorten festgestellt werden [2-3].

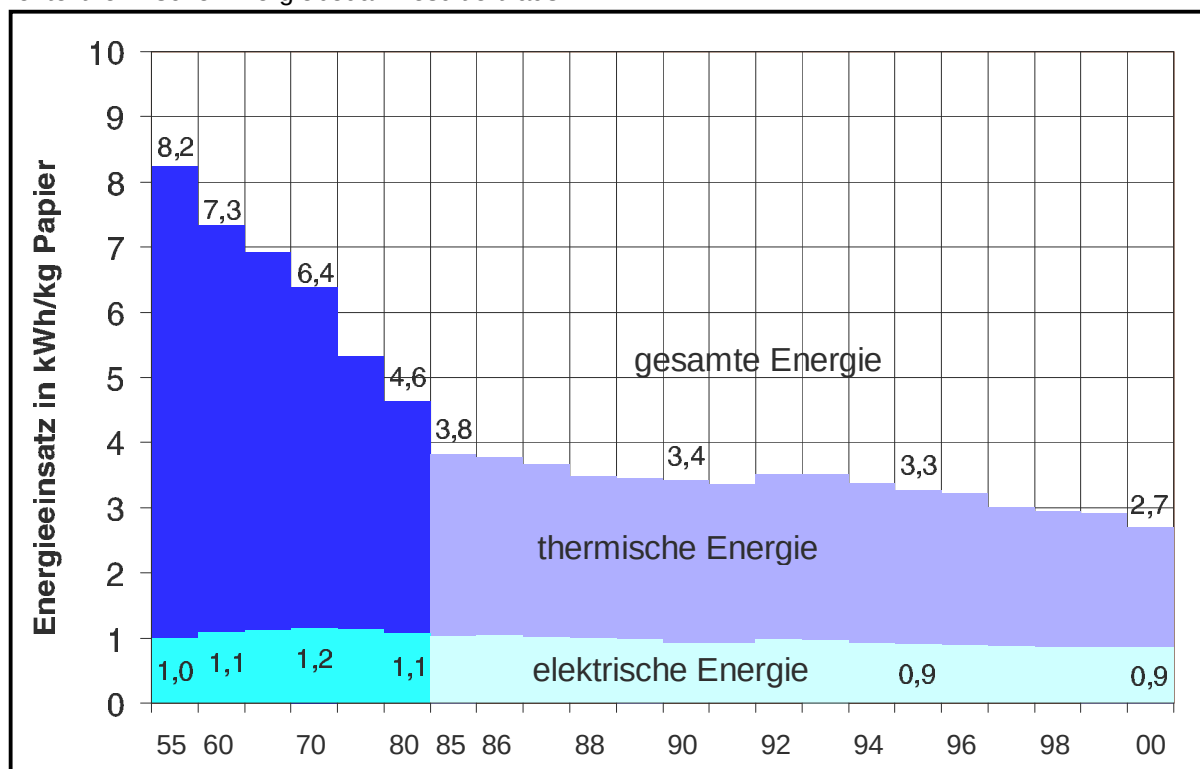
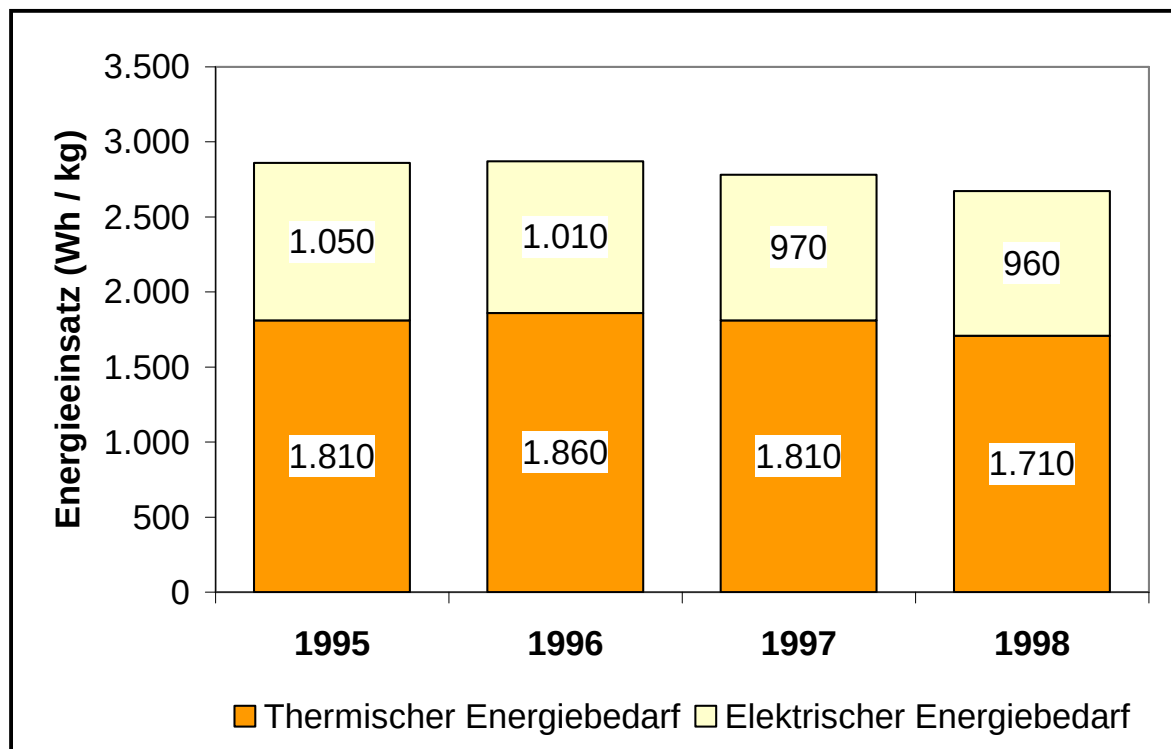


Abb. 2.1-1: Energieeinsatz in der deutschen Papierindustrie [2-8]

Tab. 2.1-1: Spez. Energiebedarf für verschiedene Papiersortengruppen (Mittelwerte: 1995 bis 1998)
[2-3]

Papiersorte	Thermischer Energiebedarf		Elektrischer Energiebedarf		Gesamtenergiebedarf	
	Wh/kg	%	Wh/kg	%	Wh/kg	%
Hygienepapier	1.900	63,3	1.150	36,7	3.000	100
holzhaltig gestrichen	1.600	52,5	1.450	47,5	3.050	100
holzfrei gestrichen	1.800	64,3	1.000	35,7	2.800	100
Zeitungsdruck	1.000	45,4	1.200	54,6	2.200	100
Verpackungspapiere	1.500	75,0	500	25,0	2.000	100

**Abb. 2.1-2:** Spezifischer Energieeinsatz für holzfrei gestrichene Papier von 1995 bis 1998 [2-3]**Tab. 2.1-2:** Spez. Gesamtenergiebedarf für holzfrei gestrichene Papiere in Deutschland, 1998 [2-3]

Systemgrenze	Energie / Wh/kg	Anteil / %
Stoffaufbereitung SA	297	10,6
Papiermaschine PM	2041	72,9
Streichmaschine SM	428	15,3
Ausrüstung	34	1,2
Gesamte Linie WFC	2800	100,0

Tab. 2.1-3: Spez. Energiebedarf für holzfrei gestrichene Papiere (WFC) in Deutschland, 1998 [2-3]

Systemgrenze	Gesamte Energie		Thermische Energie		Elektrische Energie	
	Wh/kg	%	Wh/kg	%	Wh/kg	%
SA	297	10,6	0	0,0	297	100,0
PM + SM + NB	2503	89,4	1784	71,3	720	28,7
Gesamt (WFC)	2800	100,0	1784	63,7	1016	36,3

Für holzfrei gestrichene Papiere betrug der Anteil des spezifischen Gesamtenergiebedarfs der Stoffaufbereitung 10,6 %, der Papiermaschine 72,9 %, der Streichmaschine 15,3 % und der Ausrüstung 1,2 % (**Tab. 2.1-2**).

Für die Stoffaufbereitung wird diese Energie zu 100 % als elektrische Energie eingesetzt. Dagegen setzt sich der Energieeinsatz von Papiermaschine (PM), Streichmaschine (SM) und Nebenbetriebe (NB) zu 71,3 % aus thermischer und zu 28,7 % aus elektrischer Energie zusammen (**Tab. 2.1-3**).

2.2 Wassergebrauch

Der spezifische Wassergebrauch in der deutschen Papierindustrie konnte in den vergangenen Jahren von 1955 mit ca. 150 kg/kg bis 1996 mit 12 kg/kg mit großem Aufwand kontinuierlich gesenkt werden (**Abb. 2.2-1**). Dabei stand zuerst als Hauptziel die „Verringerung der Stoffverluste“ im Vordergrund [2-4]. Die Trendlinie trifft das Ziel einer spezifischen Abwassermenge von nur 1 kg/kg erst im Jahre 2030 [2-4]. Eine vollständige Kreislaufschließung und damit einhergehend vollständige Abwasservermeidung konnte bereits in einigen Verpackungspapierwerken realisiert werden.

Der Massenstrom an warmer und feuchter Luft, d.h. verdampfungsenergiereicher Luft beträgt genauso wie die Warm-Abwassertonnage mehr als das 10fache der Papierproduktion [2-4]. Das Ziel „Energieeinsparung“ ist nur erreichbar, wenn diese an Abluft und Abwasser gebundenen Wärmeverluste drastisch reduziert werden und die elektrische Antriebsenergie, die in jeder Papierfabrik bekanntlich fast vollständig in thermische Energie umgewandelt wird, in dieser Form wiederverwendet wird [2-4].

Die **Abb. 2.2-2** stellt den spez. Frischwassergebrauch von 10 ausgewählten Feinpapierfabriken in Deutschland im Zeitraum von 1995 bis 1997 dar. Der Mittelwert lag bei 11 l/kg Papier (Standardabweichung: 5,9 kg/kg; Variationskoeffizient: 0,54). Ohne den Ausreißer mit 25 kg/kg ergibt sich ein mittlerer Frischwassergebrauch von 9,3 l/kg (Standardabweichung: 3,3 kg/kg; Variationskoeffizient: 0,35), d.h. ein bedeutend geringerer Frischwassergebrauch.

In [2-8] wurden die mittleren spezifischen Abwassermenge für den Zeitraum von 1987 bis 1996 für einzelner Produktionsgruppen gegenübergestellt. Dabei wurden zwischen holzfrei, holzhaltig, gestrichen und altpapierstoffhaltig unterschieden.

In dieser Darstellung sind einerseits die enormen Fortschritte bei der Reduzierung der spezifischen Abwassermenge bei allen Produktionsgruppen zu erkennen, andererseits wird auch deutlich, daß die Schritte bei der Verringerung der spezifischen Frischwassermenge immer kleiner werden. Daraus läßt sich schließen, das der technologische Aufwand zur weiteren Verringerung der spezifischen Abwassermenge steigt [2-8]. Weiterhin zeigen die mittleren spezifischen Abwassermengen für altpapierstoffhaltige Papiere, daß eine weitere Verringerung der spezifischen Abwassermenge möglich ist, sich aber hier ein Grenzwert zeigt, der auf einen notwendigen Sprung in der Technologie hindeutet [2-8].

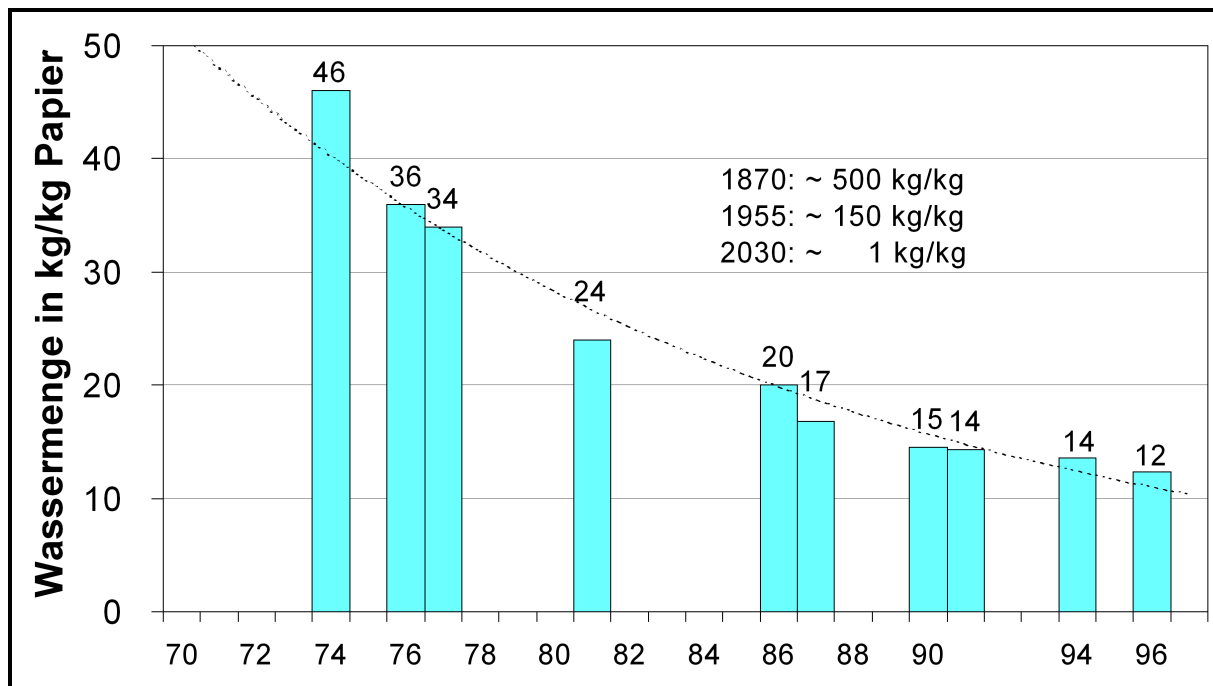


Abb. 2.2-1: Mittlere spezifische Abwassermengen der Papierindustrie Deutschlands [2-4, PTS, 2-5, 2-6]

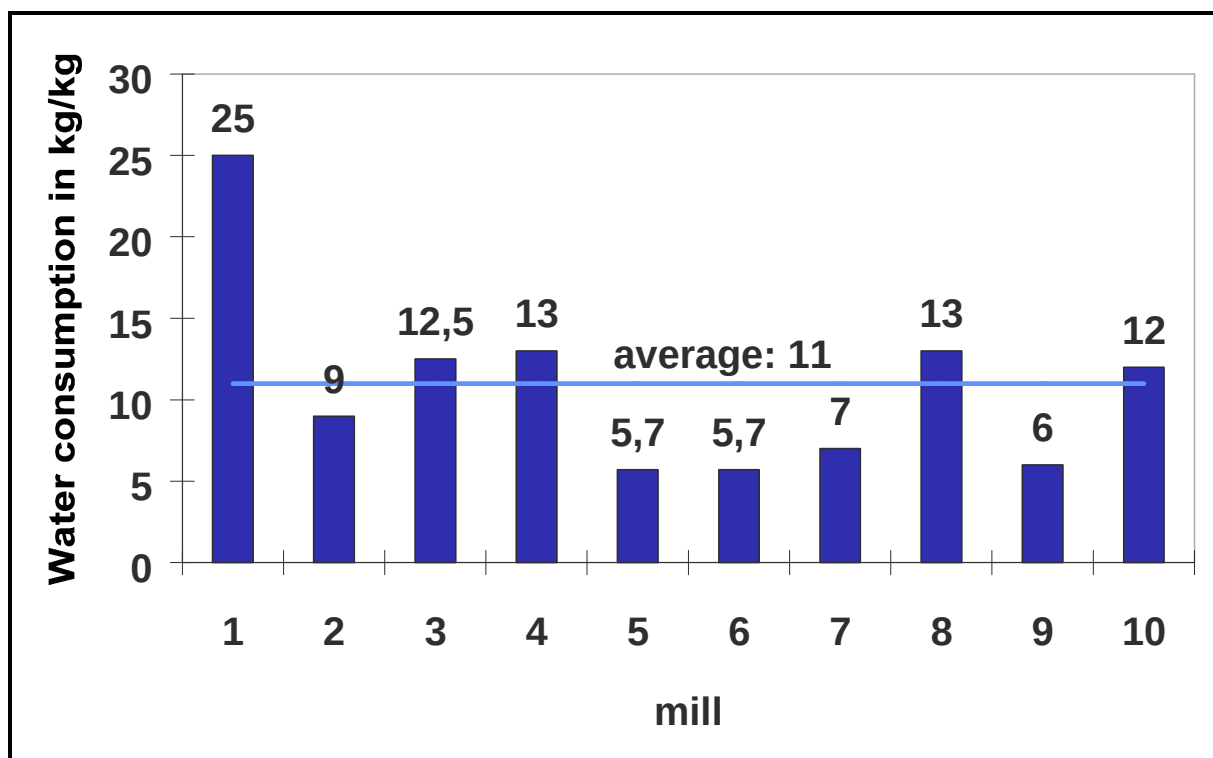


Abb. 2.2-2: Frischwassergebrauch ausgewählter Feinpapierfabriken (1995-1997) [2-7]

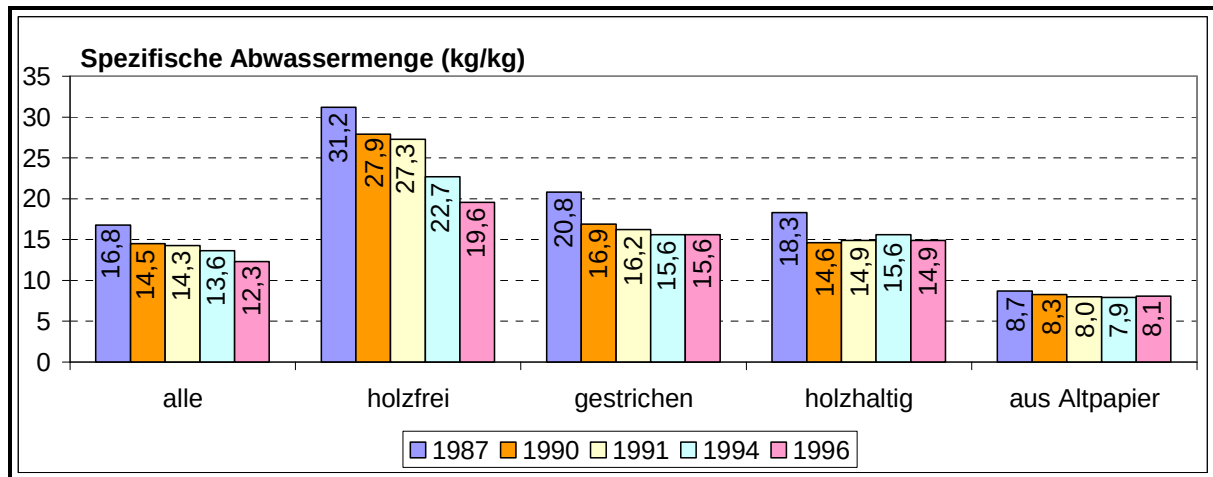


Abb. 2.2-3: Entwicklung der spezifischen Abwassermenge nach Produktionsgruppen (1987-1996) [2-8]

2.3 Stoffgebrauch

Bis ca. 1850 waren die Hadern die „Primär-Rohstoffquelle“ der Papiermanufakturen [2-5]. Bereits 1870 bildeten Holzstoff und Zellstoff – letzterer auf Holz- und Strohbasis – zusammen bereits 60 % der Papierfaserstoffe (**Tab. 2.3-1**), dagegen war der Anteil der Hadern bereits auf 40 % zurückgegangen.

Heute ist Altpapier bzw. der aus Altpapier hergestellte Altpapierstoff der mengenmäßig wichtigste Rohstoff für die deutsche Papierindustrie (**Tab. 2.3-1**, **Abb. 2.3-4**).

Auch im internationalen Vergleich ist Altpapier einer der wichtigsten Rohstoffe für die Papiererzeugung (**Abb. 2.3-1**).

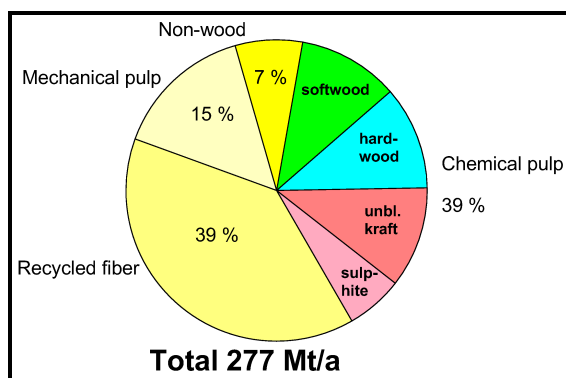


Abb. 2.3-1: World consumption of total papermaking fibres 1994 [2-4, 2-10]

Von den global etwa 270 Mt Papier, Karton und Pappe genutzt. Zu deren Herstellung wurden etwa 290 Mt Roh-, Halb-, Mineral- und Hilfsstoffe eingesetzt (**Abb. 2.3-2**) [2-4, 2-10].

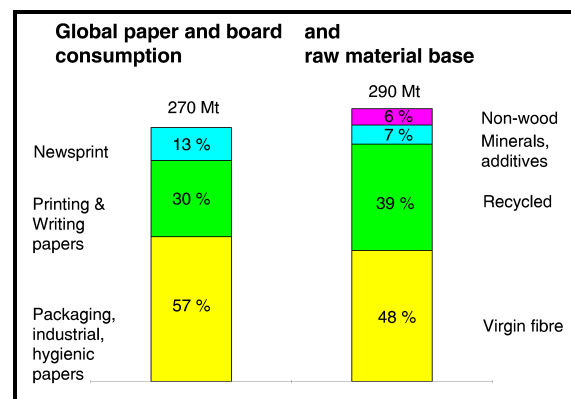


Abb. 2.3-2: Global paper and board consumption and raw material base 1995 [2-4, 2-10]

Als Mineralstoffe wurden 1995 vor allem Kaolin (52 %) und Calciumcarbonat (28 %) eingesetzt (**Abb. 2.3-3**). [2-4, 2-11].

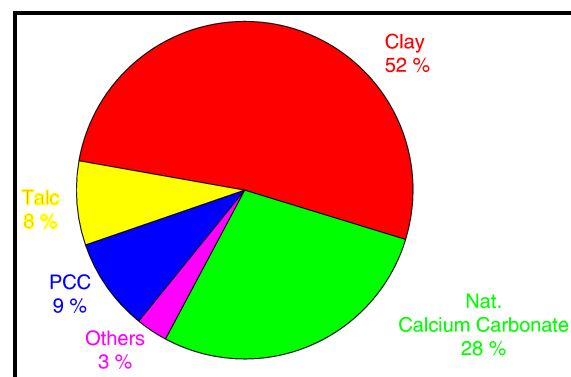


Abb. 2.3-3: Industrial minerals in paper and board worldwide 1995, 19 Mt/a (=7 % of 270 Mt/a paper) [2-11]

Der relative Anteil des Zellstoffgebrauches in Deutschland ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gesunken ist. Der absolute Zellstoffgebrauch ist jedoch weiter gestiegen (**Abb. 2.3-4**).

Für die innerhalb dieses Projektes untersuchte Papierqualitäten (zweiseitig, zweifach gestrichenes Bilderdruckpapier) sind vor allem der Zellstoff- und Mineralstoffeinsatz relevant.

Neben den Faser-, Halb- und Mineralstoffen werden aber auch sogenannte Hilfsstoffe eingesetzt. Die wichtigsten Hilfsstoffe sind dabei

die nativen und modifizierten Stärkeprodukte zur Oberflächenleimung, im Masseeinsatz, als Strichbindemittel und zum Sprühen mit einem Masseanteil an der statistischen Europa-Papiertonne von 1,8 % (1995) und mit regionalen Maximalwerten von 2 % [2-4]. Damit ist die Stärke nach der Cellulose und dem Mineralstoff der wichtigste Papierrohstoff.

Tab. 2.3-1: Faserstoffeinsatz in der deutschen Papierindustrie [2-5, 2-9, 2-1]

% (Σ 100 %)	1800	1850	1870	1914	1937	1965	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Altpapier	<1	<1	<1	11	28	47	62	64	64	65	65	65
Zellstoff	0	0	48	43	37	34	28	28	27	26	26	26
Holzstoff	0	0	12	40	33	17	10	8	9	9	9	9
Hadern	100	100	40	6	2	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1

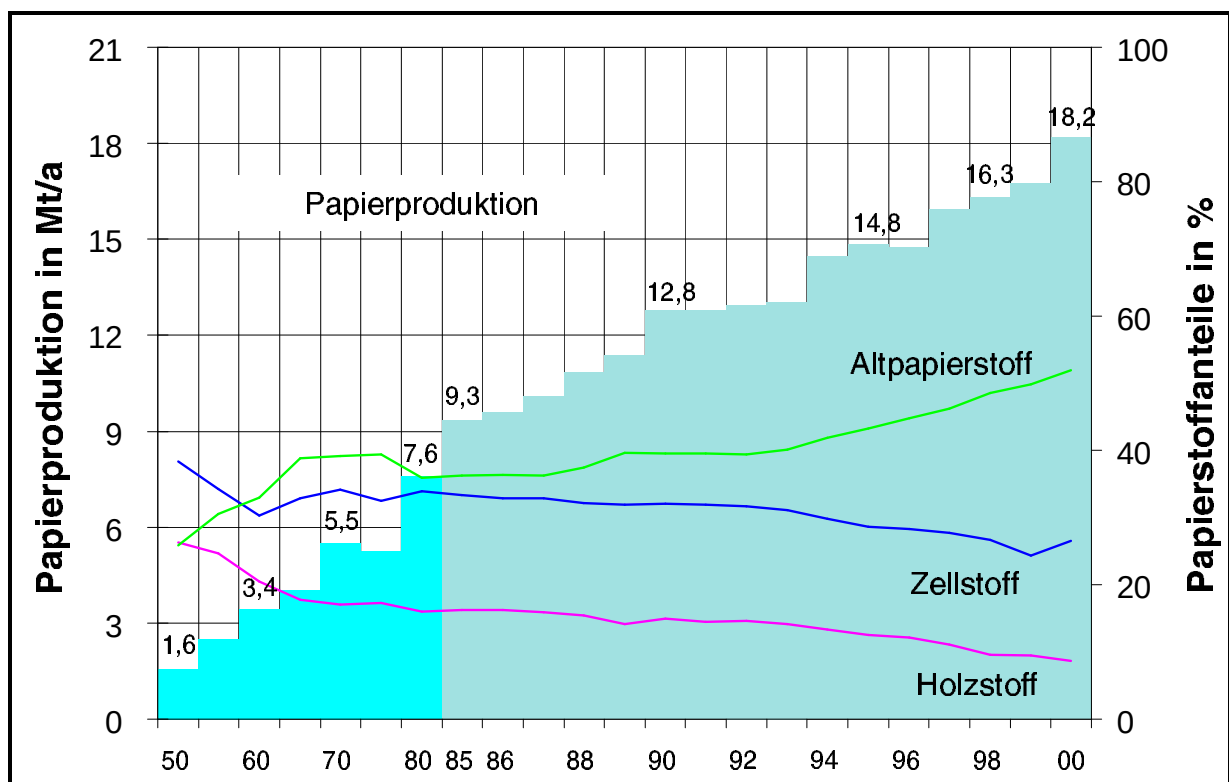


Abb. 2.3-4: Gesamtgebrauch von Zell-, Holz- und Altpapierstoff in Deutschland [2-12]

2.4 Luftgebrauch

Neben Faser-, Halb-, Mineral- und Hilfsstoffen, sowie Wasser, thermischer und elektrischer Energie wird auch ein großer Anteil Luft bei der Papiererzeugung eingesetzt (**Abb. 3.2-1**) [2-12].

Die engen Verknüpfungen zwischen den Stoff-, Wasser-, Energie- und Luftströmen werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

Der Luftgebrauch in Papierfabriken findet bisher wenig Beachtung und beträgt doch mehr als das 10fache der Papierproduktion [2-4].

Diese warme und feuchte Luft ist reich an Verdampfungsenergie. Das Ziel „Energieeinsparung“ ist nur erreichbar, wenn die in der Abluft gebundene thermische Energie erneut genutzt wird bzw. die an die Abluft gebundenen thermischen Energieverluste drastisch reduziert werden (siehe auch Kap. 2.2, Kap. 3.1) [2-4].

Diese Verluste werden vor allem mit der Trocknungsluft von Papier- und Streichmaschinen und mit der durch die Abwärme der Motoren und Lager aufgeheizten Hallenluft ausgetragen.

Bei der Betrachtung des Luftbedarfs ist neben der direkten – vor allem wasserdampfgebundenen – Energiebeladung auch der indirekte Energiebedarf zur Ventilation der Luft zu berücksichtigen. Bei einem Masseverhältnis von 10:1 (10 kg Luft je 1 kg erzeugtes Papier) beträgt das Volumenverhältnis 500:1 (bei trockener unkomprimierter Luft ($1,29 \text{ kg/m}^3$) und bei einer scheinbaren Papierdichte von 645 kg/m^3) bzw. 775:1 im Vergleich mit Wasser (20°C , trockene Luft), d.h. es muß das 500fache Volumen der Luft im Vergleich zum Papier transportiert werden.

3 Systematisierung der Produktionslinie

3.1 Definition des Systems

Als erster Schritt einer Mengen- oder Energiebilanz sind geeignete Bilanzhüllen festzulegen. Die Bilanzgebiete sind dabei entsprechend der Zielsetzung der Betrachtung zu wählen. Vor dem Aufstellen der Bilanz ist genau zu prüfen, wie weit eine Einengung des Bilanzgebietes gehen muß. Auch sind rechtzeitig Überlegungen anzustellen, welcher Genauigkeitsgrad der Aussage erreicht werden soll, um ein brauchbares Ergebnis zu erzielen. Dabei stehen Übersichtlichkeit, notwendiger Detaillierungsgrad und Zeitaufwand oft im Widerspruch. Abhilfe kann durch Verdichtung einzelner Elemente zu Modulen geschaffen werden.

Die untersuchten Systeme sind als Produktionslinien innerhalb der Werke abgegrenzt. Dem Stoffstrom folgend beginnen die Produktionslinien mit der Stoffaufbereitung und enden mit dem fertig verpackten Papier nach der Rollenverpackung, welches dann das Gesamtsystem verläßt. Die direkt der Produktion dienenden Teilsysteme sind dem Produktionssystem zugeordnet. Des weiteren sind notwendige Hilfssysteme, wie z. B. Abwasser- und Frischwasseraufbereitung, entlang der Produktionslinien im untersuchten System integriert.

Die **Abb. 3.1-1** zeigt exemplarisch eine Papierfabrik mit integrierter Holzstoff-Herstellung sowie Zellstoff- und Altpapier-Aufbereitung als Gesamtsystem. Die bilanzierten Masseströme sind in der Einheit kg / (kg otro Papier) dargestellt. Die Energieströme sind in kWh / (kg otro Papier) dargestellt.

Die Tabellen **Tab. 3.2-1** und **Tab. 3.2-2** zeigen die Tagesmittelwerte für die Außenlufttemperatur und für den Außenluft-Wasserdampfgehalt nach DIN 4710 (1982) [3-17] für neun Standor-

te in Deutschland. Davon ausgehend werden als Randbedingungen für die Umgebung die mittlere Lufttemperatur und die mittlere Frischwassertemperatur auf 9 °C, sowie die mittlere absolute Luftfeuchtigkeit auf 6 g(H₂O)/kg(trockene Luft) festgelegt. Die realen Randbedingungen des jeweiligen Produktionsstandortes können jedoch davon abweichen und müssen dann nach der Isothermenkarte der DIN 4710 aus den Meßwerten der Referenzstandorte berechnet werden.

Die Grenztemperatur für die Einleitung von Abwasser ist je nach Produktionslinie individuell vertraglich geregelt. Sie kann zum Beispiel 30 °C betragen.

Ein Grenzwert für die Ablufttemperatur existiert von gesetzlicher Seite her nicht.

3.2 Bilanzierte Stromgrößen

Grundlage der Prozeßanalyse sind Bilanzgleichungen, welche auf den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls basieren. Da die Untersuchung keine kernphysikalischen Prozesse zum Gegenstand hat, können Energie und Massenerhaltung getrennt betrachtet werden.

Folgende Masseströme werden bilanziert:

- o Zellstoffe
- o Mineralstoffe
- o Hilfsstoffe
- o Gelöste organische Stoffe (anionisch, kationisch)
- o Gelöste anorganische Stoffe
- o Wasser
- o Luft
- o Dampf

Tab. 3.2-1: Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur in °C [3-17]

Standort	Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Braunschweig	8,6	-0,2	0,0	3,3	8,0	12,2	15,9	17,0	16,7	14,0	9,8	4,8	1,3
Bremerhaven	8,7	0,9	0,9	3,4	7,4	11,7	15,3	16,5	16,5	14,3	10,2	5,4	2,2
Essen	9,5	1,6	2,2	5,1	8,8	12,6	15,7	17,0	16,7	14,6	10,7	5,8	2,8
Frankfurt/Main-Stadt	10,0	1,1	2,0	5,7	10,1	14,1	17,5	18,9	18,1	15,1	10,3	5,4	2,2
Gießen	8,9	0,2	1,0	4,4	8,8	12,7	16,3	17,6	16,9	14,0	9,4	4,6	1,4
Hamburg-Fuhlbüttel	8,4	0,5	0,4	3,2	7,3	11,6	15,3	16,4	16,1	13,6	9,6	4,9	1,8
Mannheim	10,2	1,2	2,1	5,8	10,2	14,3	17,6	19,2	18,3	15,3	10,3	5,4	2,2
München-Riem	8,1	-1,5	-0,4	3,4	8,4	11,9	15,6	17,5	16,7	13,9	8,8	3,6	-0,2
Nürnberg-Flughafen	8,5	-1,0	0,2	3,6	8,4	12,6	16,4	17,8	16,7	13,8	9,1	4,1	0,0

Tab. 3.2-2: Tagesmittelwerte des Außenluft-Wasserdampfgehaltes in g(H₂O)/kg(trockene Luft) [3-17]

Standort													Dez
Braunschweig	5,8	3,3	3,4	3,8	4,9	6,3	8,0	9,0	8,9	7,8	6,3	4,6	3,7
Bremerhaven	6,1	3,6	3,5	4,0	5,0	6,4	8,1	9,2	9,2	8,1	6,7	4,9	4,0
Essen	6,1	3,7	3,7	4,2	5,0	6,4	8,0	9,0	9,0	8,0	6,6	4,9	4,1
Frankfurt/Main-Stadt	6,0	3,4	3,5	4,1	5,1	6,5	8,3	9,1	9,0	8,0	6,3	4,6	3,8
Gießen	5,7	3,3	3,4	3,9	4,8	6,2	7,8	8,7	8,6	7,6	6,1	4,5	3,6
Hamburg-Fuhlbüttel	5,8	3,4	3,3	3,7	4,7	6,1	7,8	8,8	8,8	7,8	6,3	4,7	3,8
Mannheim	6,1	3,5	3,6	4,1	5,1	6,6	8,4	9,2	9,2	8,2	6,4	4,7	3,8
München-Riem	5,8	3,0	3,2	3,9	5,0	6,6	8,5	9,2	9,0	7,9	6,0	4,3	3,4
Nürnberg-Flughafen	5,8	3,1	3,3	3,8	5,0	6,4	8,1	8,8	8,8	7,7	6,1	4,5	3,4

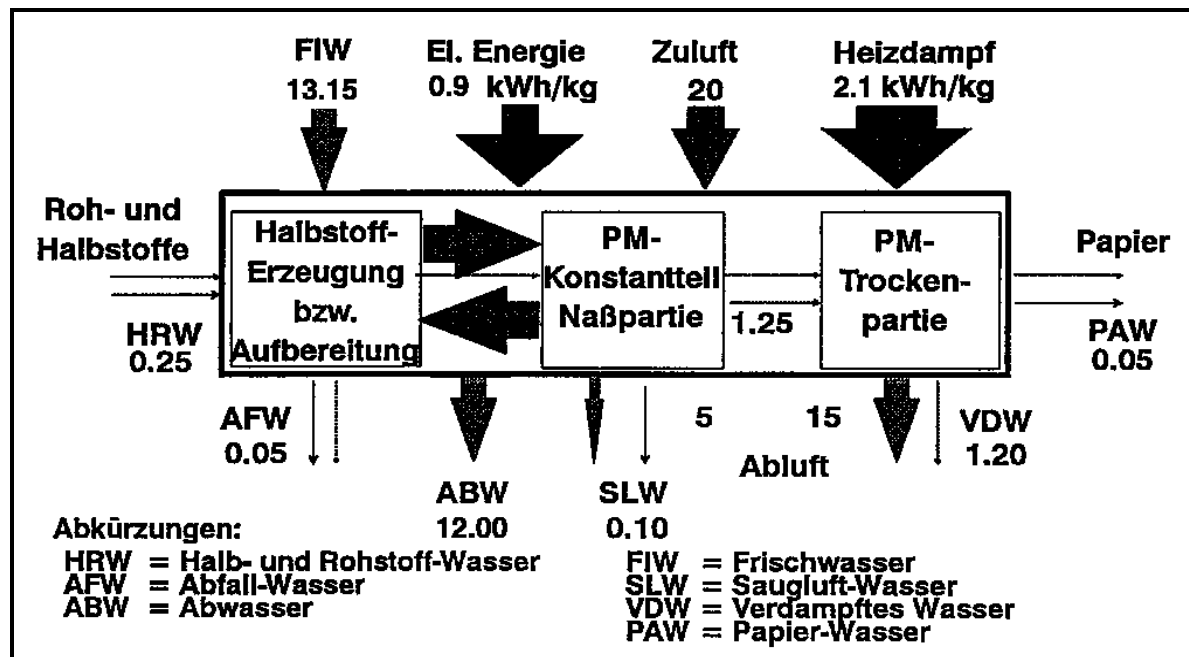


Abb. 3.2-1: Stoff- und Energiesysteme einer Papierfabrik [3-18]

Daneben wird der Eintrag und der Transport der elektrischen Energie und thermischen Energie berücksichtigt. Die zugeführte thermische Energie wird als Dampfstrom erfaßt. Elektrische Energie wird z. T. in thermische Energie umgewandelt und führt zu einer Temperaturerhöhung der Masseströme. Die Masse- und Energieströme in einer Papierfabrik sind auf vielfältige Weise miteinander

verknüpft. (Abb. 3.2-2). Alle Stoffströme werden konsequent als Masseströme (nicht als Volumenströme) in der Basiseinheit kg/kg bezogen auf 1 kg ofentrockene (otro) Basispapier erfaßt und simuliert. Die Energieströme werden als Enthalpie dargestellt und in Wh/kg berechnet. Die Temperatur dient als Konzentrationsmaß der in den Masseströmen enthaltenen Energie.

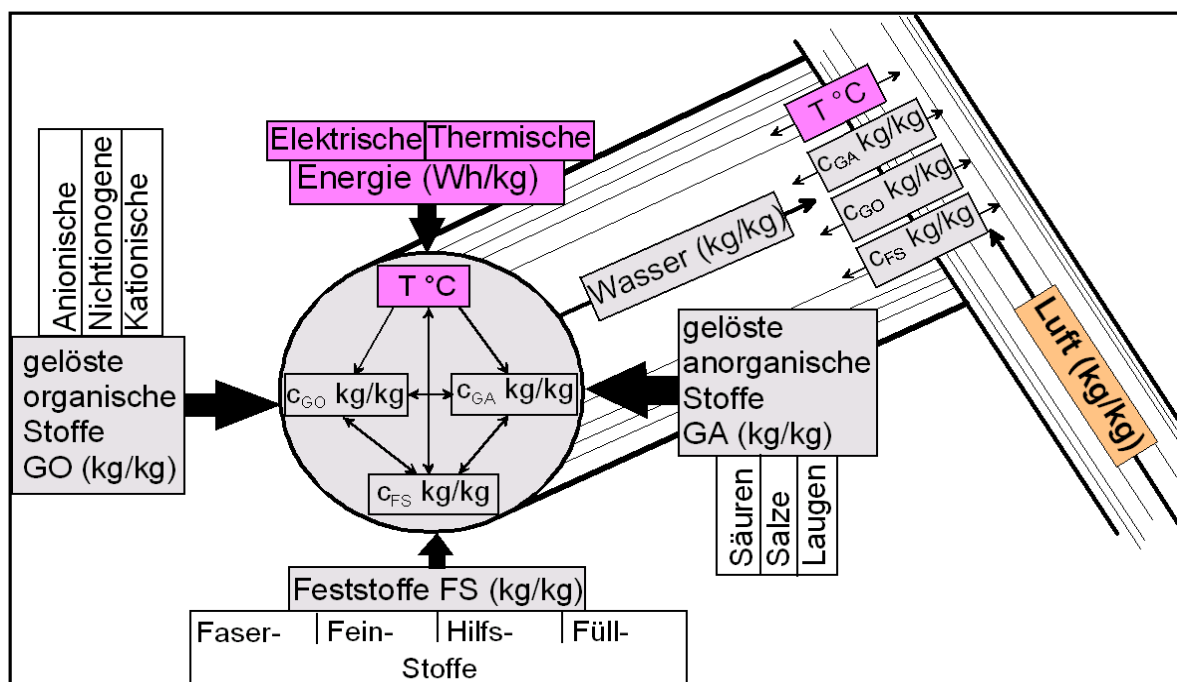


Abb. 3.2-2: Verknüpfung der Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffströme einer Papierfabrik [3-19]

Für die Bewertung des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffbedarfs der Produktions- und Supportsysteme werden die Stoff- und Energieströme jeweils spezifisch auf das produzierte ofentrockene (otro) Basispapier angegeben. Dadurch ist es möglich, Kennzahlen zu erhalten, die unabhängig von der Feuchte des Papiers und unempfindlich gegenüber der Strichmenge sind. Durch den Bezug auf das otro-Basispapier sind diese Kennzahlen gleichermaßen auf alle Papiersorten anwendbar. Diese Kennzahlen sind sowohl zum Vergleich verschiedener Produktionslinien als auch zum Vergleich der Produktion verschiedener Papiersorten auf der gleichen Produktionslinie anwendbar.

Als wichtigste Kennzahlen sind hier zu nennen:

Spezifischer Elektroenergiebedarf:

$$Spez.ELEN = \frac{E_{ELECTRICAL} \text{ in kWh}}{BAPAIN kg otro}$$

Spezifischer thermischer Energiebedarf:

$$Spez.THEN = \frac{E_{THERM} \text{ in kWh}}{BAPAIN kg otro}$$

Spezifischer Wasserbedarf:

$$Spez.WATER = \frac{WATER \text{ in kg}}{BAPAIN kg otro}$$

Spezifischer Luftbedarf:

$$Spez.AIR = \frac{AIR \text{ in kg}}{BAPAIN kg otro}$$

Stoffbedarf für ungestrichene Papiere:

$$Spez.PULP = \frac{PULP \text{ in kg}}{BAPAIN kg otro}$$

Stoffbedarf für gestrichene Papiere:

$$Spez.PULP = \frac{(PULP + COCO) \text{ in kg}}{BAPAIN kg otro}$$

Legende:

BAPA:	Base Paper
COCO:	Coating Colour
E _{ELECTRICAL} :	electrical Energy
E _{THERM} :	thermal Energy

Beim spezifischen Stoffbedarf wird jeweils zwischen den eingesetzten Stoffarten, wie Chemical Pulp, Mineral Pulp, Amylo Pulp und Zusatzstoffen unterschieden.

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit dienen die in **Tab. 3.2-3** dargestellten Daten. Die exakten Werte variieren je nach Werk, deshalb wurden plausible Rechenwerte in Absprache mit den beteiligten Werken definiert. Exakte Einzelwerte werden nicht ausgewiesen, da es Ziel ist, mit Hilfe dieser Datenbasis prinzipielle Aussagen zu treffen. Außerdem kann so Vertraulichkeit gegenüber den einzelnen Werken gewahrt werden.

Tab. 3.2-3: Tabelle der Daten zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Parameter	Wert in Euro-Cent/kg
Gebleichter Sulfatzellstoff	58 ± 13
CTMP	40 ± 10
Mineralstoff: CaCO ₃ (Streichpigment, Füllstoff)	13 ± 3
Mineralstoff: Kaolin (Streichpigment, Füllstoff)	18 ± 8
Stärke (Oberflächen- und Massensterke)	75 ± 25
Retentionsmittel und weitere Hilfsstoffe	175 ± 75
Farbstoffe	1.250 ± 250
Gestrichenes Bilderdruckpapier 150 g/m ²	115 ± 15
Reststoffentsorgung	5,00 (50 % otro)
Rohwasser	0,01
Abwasser	0,08
Dampferzeugung 10 bar	1,00 ± 0,25 ¹
Parameter	Wert in Euro-Cent/kWh
Elektroenergie	5,0 ± 2,5
Dampferzeugung 10 bar	1,2 ± 0,3 ¹
Betriebsdauer	7000 h/a
Zinssatz	10 ± 5 % p.a.

¹ Die Umrechnung von Euro-Cent/kg in Euro-Cent/kWh befindet sich im Anhang 9.2.4.

3.3 Besonderheiten der drei modellierten Produktionslinien

Modelliert und simuliert wurden drei Feinpapierproduktionslinien jeweils bestehend aus den Pulp Systems (PS), der Paper Machine (PM) mit Approach System (APROS), der Coating Machine (CM), den Finishing Systems (FS) und den Support Systems (SS). Die Produktionslinien wurden so ausgewählt, daß die Produktion von zweifach, doppelseitig gestrichenem Bilderdruckpapier (150 g/m²) einheitlich simuliert werden konnte.

Bereits bei der Modellierung dieser drei Produktionslinien wurde deutlich, welche Vielfalt an unterschiedlichen Konzepten für die einzelnen Verfahrens- und Prozeßschritte der Produktionssysteme existieren.

Während in den Chemical Pulp Systems (CEPUS) der Produktionslinien B und C nur Handelszellstoff in Ballenform suspendiert wird, wird in der Produktionslinie A zusätzlich Zellstoff aus einer integrierten Zellstofffabrik mit geringer Stoffdichte eingesetzt. Die Chemical

Pulp Systems der Produktionslinien A und B sind kompakt aufgebaut. Dagegen ist das Chemical Pulp System der Produktionslinie C variabler, d.h. für ein weites Sortenprogramm, konzipiert.

Da der Mineralstoff in Regel als Slurry angeliefert wird unterscheiden sich die Mineral Pulp Systems (MIPUS) kaum. Die weiteren Pulp Systems und die Additives Systems (ADDIS) unterscheiden sich ebenfalls kaum.

Verschiedenartig sind dagegen die Konzepte der Frischwassernutzung und der Wasserführung. Die Produktionslinien B und C haben jeweils ein von den anderen Produktionslinien stark entkoppeltes Frischwassersystem. Dagegen wird in die Produktionslinie A eine große Menge an Frischwasser eingespeist. Dieses wird zum größten Teil nach der Nutzung in der modellierten Produktionslinie zu weiteren Papiermaschinen geleitet, nur ein geringer Teil des Wassers wird mit der Abwasserreinigung zugeführt. Somit ist ein direkter Vergleich der Frischwassernutzung der drei Produktionslini-

en kaum möglich. Der Aufwand für die Frischwasseraufbereitung ist den jeweiligen Frischwasserqualitäten der unterschiedlichen Produktionsstandorte angepaßt.

Die Trockner der Coating Machines (CM) der Produktionslinien A und C werden mit Gas beheizt. In der CM der Produktionslinie B werden dagegen Elektro-IR-Trockner eingesetzt. In der Produktionslinie A wird ein Softkalandar verwendet. In den Produktionslinien B und C wird jeweils mit einem Superkalandar geglättet. Besonders müssen die Verknüpfungen durch das Return Pulp System (REPUS) beachtet werden. Dabei muß bei der Interpretation zwischen internem und externem Return Pulp (REPU) unterschieden werden. Als externen Return Pulp wird hier der Return Pulp bezeichnet, der von anderen Produktionslinien stammt. In den Produktionslinien B und C wird auch ein großer Teil von externem Return Pulp eingesetzt. Insbesondere in der Produktions-

linie B gibt es eine enge Verknüpfung mit einer anderen Produktionslinie innerhalb des Approach Systems. Hier wird ein Teil des Pulps aus dem Approach System heraus an eine andere Produktionslinie geleitet.

3.4 Erstellen von Subsystemen

3.4.1 Systematik der Subsysteme - Production Line System

Das Gesamtsystem wurde in Subsysteme unterteilt. Wie in **Kapitel 3.1** dargestellt, dient diese Unterteilung der Systematisierung, erhöht die Übersichtlichkeit und erleichtert die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen. Außerdem kann man mit Hilfe der Subsysteme das Produktionssystem als eine übersichtliche Bilanz darstellen. Diese wird im folgenden als **Production Line System** bezeichnet (Abb. 3.4-1 und Anhang 9.1.6).

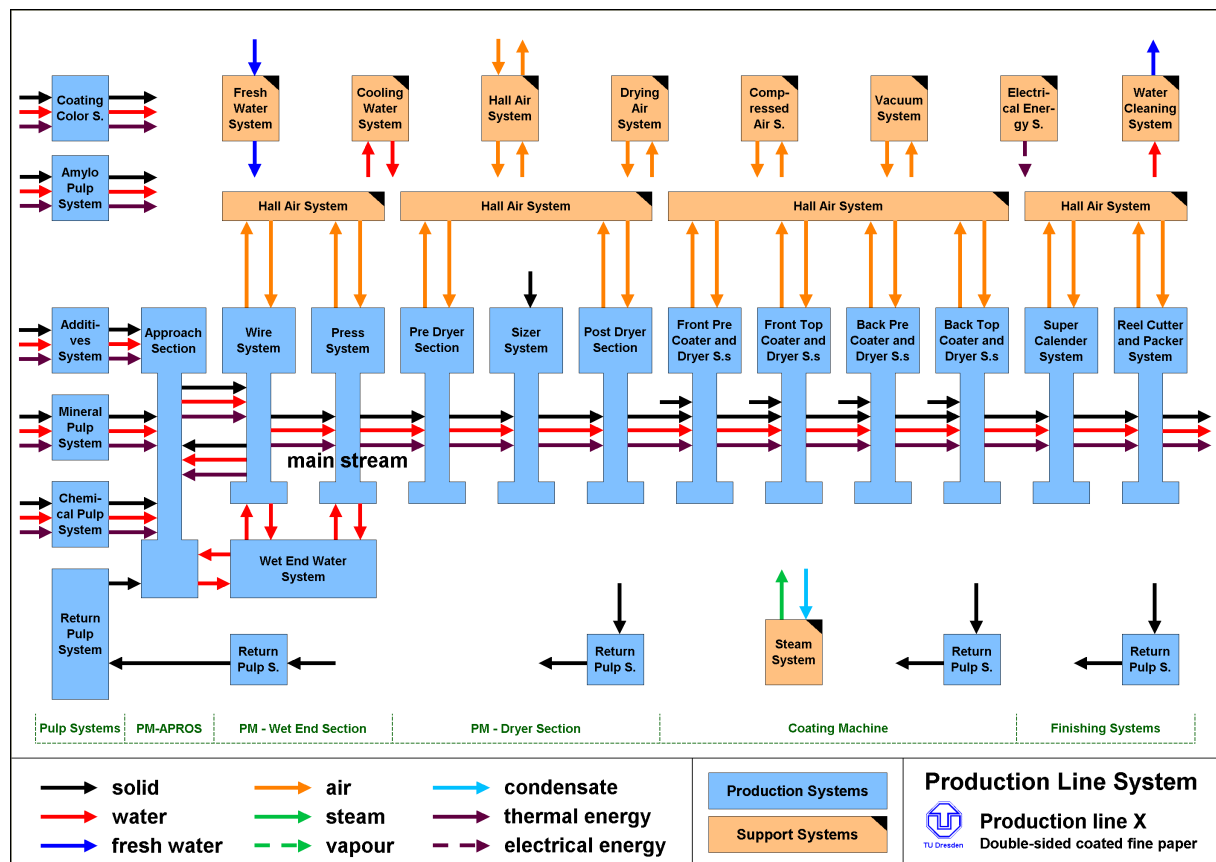


Abb. 3.4-1: Production Line System

Das Production Line System zeigt in erster Linie den horizontalen Produktionsfluß in verfahrenstechnisch richtiger Reihenfolge von links nach rechts. Die Unterteilung der Darstellung in die einzelnen Produktionsabschnitte wird durch die dunkelgrüne Legende unterhalb der Darstellung unterstützt.

Auf der linken Seite des Production Line Systems befinden sich zuerst die Stoffaufbereitungssysteme (Pulp Systems). Diese Systeme beliefern die Papiermaschine, die rechts neben den Pulp Systems dargestellt ist. Die Papiermaschine ist zunächst in die drei Abschnitte Konstantteil (Approach Section), Naßteil (Wet End Section) und Trockenpartie (Dryer Section) unterteilt. Die Abschnitte Naßteil und Trockenpartie sind wiederum in jeweils vier Subsysteme gegliedert.

Im Anschluß an die Trockenpartie ist die Streichmaschine (Coating Machine) dargestellt, die von der Trockenpartie aus mit dem produzierten Basispapier versorgt wird und als System zur Papierveredelung aufzufassen ist. Sie besteht aus den vier Streichwerken sowie dem Hallenluftsystem.

Nach der Streichmaschine befinden sich die Systeme zur weiteren Veredelung und zur Verarbeitung des gestrichenen Papiers (Finishing Systems), die den Superkalander (Super Calender System) sowie den Rollenschneider und das Verpackungssystem (Reel Cutter and Packer System) beinhalten.

Zur Vervollständigung der Produktionslinie befinden sich unterhalb der Naßpartie, Trockenpartie, Streichmaschine und der Veredelungs- sowie Verarbeitungssysteme die sogenannten Fertigungsausschußsysteme (Return Pulp Systems), welche die Rückstoffe entgegen der eigentlichen Produktionsrichtung

zum übergeordneten Return Pulp System im Abschnitt Pulp Systems zurückführen.

Alle bisher beschriebenen Systeme, die zur Stoffaufbereitung, zur Herstellung des Basispapiers und des gestrichenen Papiers sowie zur weiteren Verarbeitung beitragen, werden als Production Systems bezeichnet und sind im Production Line System (**Abb. 3.4-1**) blau gekennzeichnet.

Im Gegensatz dazu gibt es die Hilfssysteme (Support Systems), die in dieser Abbildung durch orange-farbene Rechtecke oberhalb der Produktionslinie, mit Ausnahme des Steam Systems, dargestellt sind. Diese Systeme beinhalten die vertikalen Stoffströme, die das Production Line Systems in Analogie zur Abbildung **Abb. 3.2-1**, mit Wasser, Luft und Energie versorgen.

Die Hilfssysteme der Wasserversorgung bestehen aus der Frischwasseraufbereitung (Fresh Water System), dem Kühlwassersystem (Cooling Water System) und dem Wasserreinigungssystem (Water Cleaning System). Zur Luftversorgung dienen das Gesamthallenluftsystem (Hall Air System), das Trocknungsluftsystem (Drying Air System), sowie das Druckluft- und das Vakuumsystem (Compressed Air System und Vacuum System). Das Electrical Energy System beliefert die gesamte Produktionslinie mit elektrischer Energie und das Dampfsystem (Steam System) liefert die thermische Energie für den Prozeß.

Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Subsystemen bilden die Stoff-, Wasser-, Luft- und Energieströme, die in den Darstellungen der Simulationen charakteristische Farben und Formen haben. Diese zeigt die folgende Tabelle:

Tab. 3.4-1: Stromarten in den FloSheet- und Excel-Darstellungen

Stromart	FloSheet-Darstellung	Excel-Darstellung
Stoff (pulp)	 Schwarz	 Schwarz
Kreislaufwasser (cycle water)	 Rot	 Rot
Frischwasser (fresh water)	 Blau	 Blau
Luft (air)	 Rot-Orange mit Strichpunkt-Linie	 Orange hell
Wasserdampf als reine Phase (steam)	 Blaugrün	 Blaugrün
Wasserdampf als Komponente (vapour)	- nicht vorhanden -	 Blaugrün gestrichelt
Kondensat (condensate)	 Cyan	 Cyan
Thermische Energie (thermal energy)	- nicht vorhanden -	 Violett
Elektrische Energie (electrical energy)	- nicht vorhanden -	 Violett gestrichelt
Kanalstrom (floor channel)	 Grau, schmale und breite Linie	 Schwarz

Die „FloSheet“-Darstellungen der Produktionslinien befinden sich in den **Anhängen 9.1.1** und **9.1.2**. Im **Anhang 9.1.2** sind als erster Systematisierungsschritt die eingezeichneten Systemgrenzen zu sehen. Die Entwicklung der Bilanzierung der Massen- und Energieströme ist in den Excel-Darstellungen der **Anhänge 9.1.3 bis 9.1.10** zu finden. Der **Anhang 9.1.3** zeigt für das Chemical Pulp System der Produktionslinie A die absoluten Eingangs- und Ausgangsströme. Der nächste Entwicklungsschritt sind die „Specific mass and energy balances“ im **Anhang 9.1.4**. Sie zeigen die spezi-

fischen Ein- und Ausgangsströme der Produktionslinie mit einer groben Untergliederung in die Stoffaufbereitung, die Papiermaschine, die Streichmaschine und die Ausrüstung. Einen Vorläufer des vollständigen Production Line Systems (**Anhang 9.1.6**) bildet die Gesamtdarstellung im **Anhang 9.1.5**.

In der Darstellungen des Production Line Systems werden vielfach Abkürzungen für die verschiedenen Stoffe verwendet. Die nachstehende Tabelle gibt eine englische und deutsche Erklärung dieser Abkürzungen:

Tab. 3.4-2: Verwendete Abkürzungen für Stoffe

Stromart	Abkürzung	Bedeutung Englisch	Bedeutung Deutsch	Zugehöriges System
Pulp	AMPU	amylo pulp	Stärke	AMPUS
	CEPU	chemical pulp	Zellstoff	CEPUS
	MIPU	mineral pulp	Mineralstoff	MIPUS
	REPU	return pulp	Rückstoff	REPUS
	COCO	coating colour	Streichfarbe	COCOS
Paper	BAPA	Base Paper	Basispapier	PM
	COPA	Coated Paper	gestrichenes Papier	PM/CM
Kondensat	COND	condensate	Kondensat	STEAS
Luft	DRYA	drying air	Trocknungsluft	DRYAS
	EXHA	exhaust air	Abluft	DRYAS/HALAS
	INTA	intake air	Zuluft	DRYAS/HALAS
Wasser	FEWA	fresh water	Frischwasser	FEWAS
Dampf	STEAM	steam	Dampf	STEAS

Die Unterteilung des Production Line Systems in mehrere Subsysteme wurde so vorgenommen, daß jedes einzelne Modul der Simulation genau einem Subsystem zuzuordnen ist. Die einzelnen Subsysteme der betrachteten Produktionslinien sind im nachfolgenden beschrieben.

3.4.2 Stoffaufbereitung

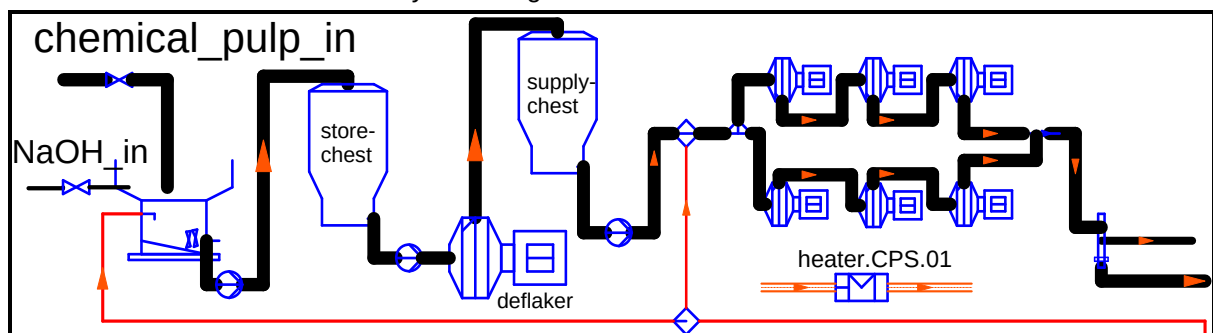
3.4.2.1 Systemgrenzen der Stoffaufbereitung

Dem Hauptstoffstrom folgend beginnen die Produktionslinien mit der Stoffaufbereitung (Pulp System: PS). Hier wird der Großteil der Stoffe von außen in das Gesamtsystem einge-

tragen. Die Stoffaufbereitung endet mit der sich anschließenden Papiermaschine.

3.4.2.2 Zellstoffaufbereitung

Die Zellstoffaufbereitung (Chemical Pulp System: CEPUS) umfaßt die Stoffsuspendierung, Entstippung und Mahlung (**Abb. 3.4-2**). Dabei muß ggf. noch eine Langfaser- und Kurzfaserlinie (Softwood Pulp System: SWPUS und Hardwood Pulp System: HWPUS) unterschieden werden. Im **Anhang 9.1.8** ist das Chemical Pulp System einer Produktionslinie als Subsystemdarstellung abgebildet.

**Abb. 3.4-2:** Schema der Zellstoffaufbereitung (Produktionslinie B)

3.4.2.3 Mineralstoffaufbereitung

Die Mineralstoffaufbereitung (Mineral Pulp System: MIPUS) beinhaltet die Verdünnung

und Dispergierung der Mineralstoffe soweit dies notwendig ist, da sie auch flüssig angeliefert werden können (**Abb. 3.4-3**).

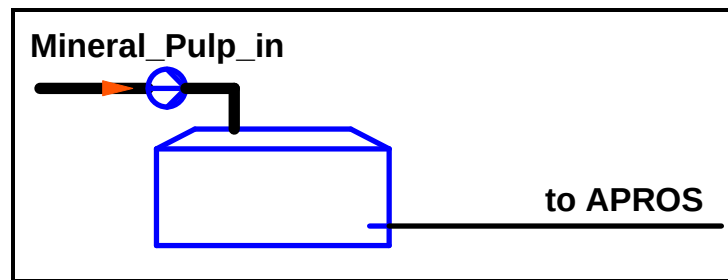


Abb. 3.4-3: Schema der Mineralstoffaufbereitung (Produktionslinie C)

3.4.2.4 Stärkeaufbereitung

Die Stärkeaufbereitung (Amylo Pulp System: AMPUS) grenzt die Stärkeauflösung und Stär-

kekochung mit anschließender Verdünnung ab (Abb. 3.4-4).

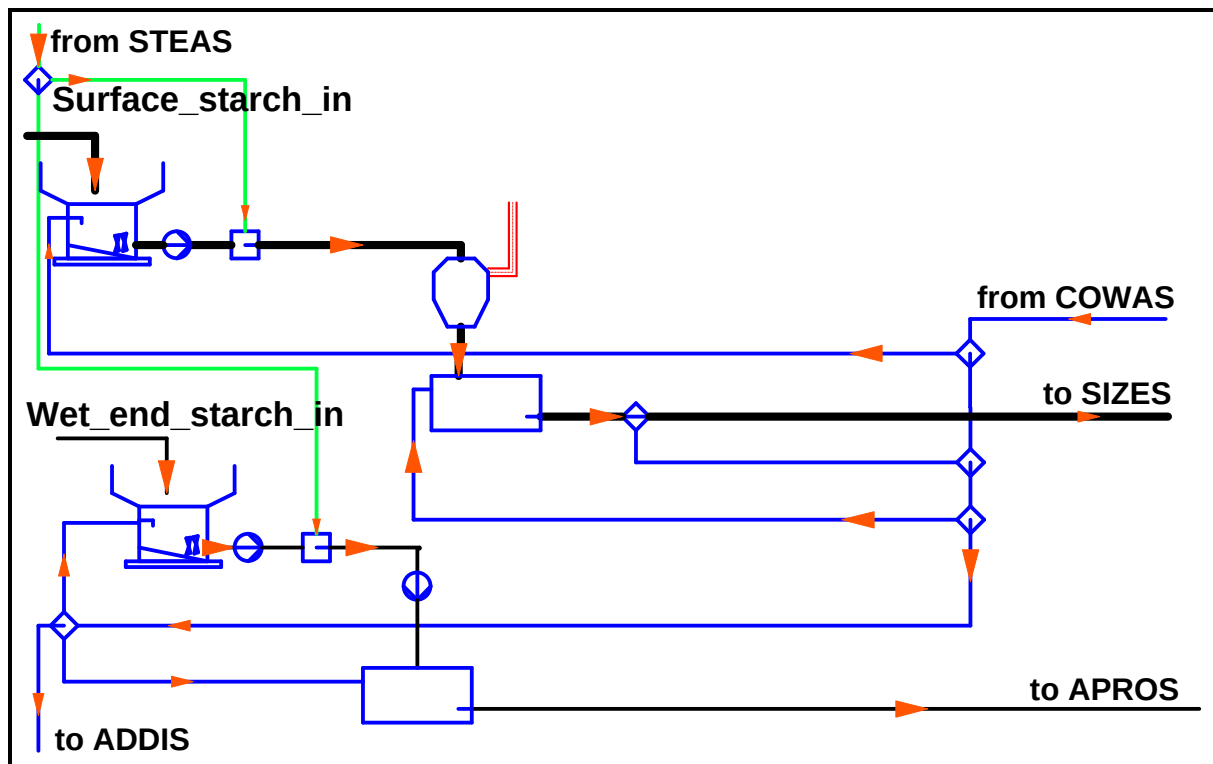


Abb. 3.4-4: Schema der Stärkeaufbereitung (Produktionslinie B)

3.4.2.5 Zusatzstoffeaufbereitung

Die Zusatzstoffeaufbereitung (Additives System: ADDIS) umfaßt die Verdünnung und Bereitstellung der verschiedenen Hilfsstoffe,

wie Retentionsmittel, Farbstoffe zur Einstellung des Farbortes des Papiers und optische Aufheller, die zur Produktion des Papiers benötigt werden (**Abb. 3.4-5**).

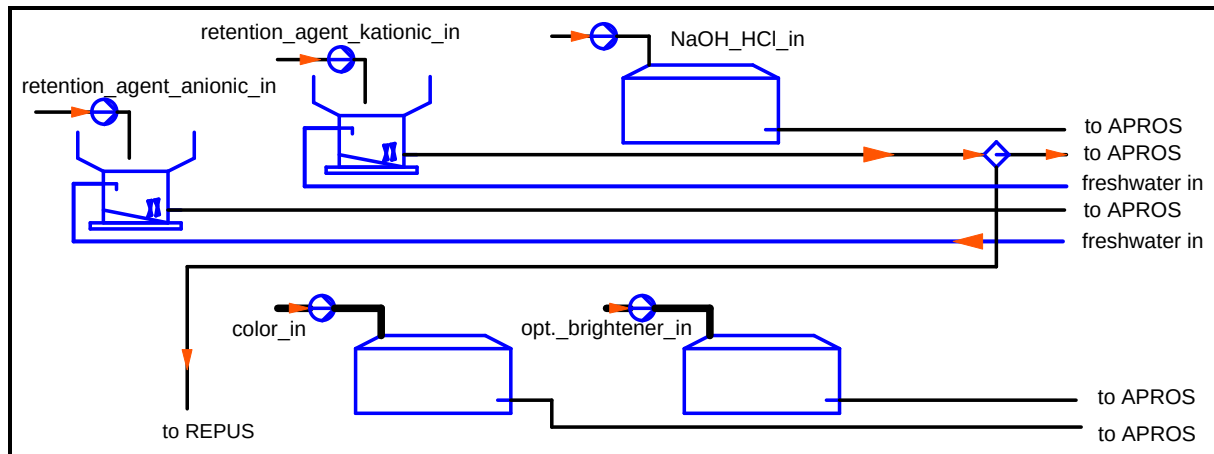


Abb. 3.4-5: Schema der Zusatzstoffaufbereitung (Produktionslinie C)

3.4.2.6 Fertigungsausschußsystem

Das Fertigungsausschußsystem (Return Pulp System: REPUS) bereitet den anfallenden Fertigungsausschuß auf, so daß er anschließend wieder dem Hauptstoffstrom zugeführt werden kann. Das System schließt sich an den

Strom des gesammelten Fertigungsausschusses an und ist durch die austretenden Stoffströme der wiederverwertbaren Materialien und ggf. des Ausschußstroms begrenzt (**Abb. 3.4-6**).

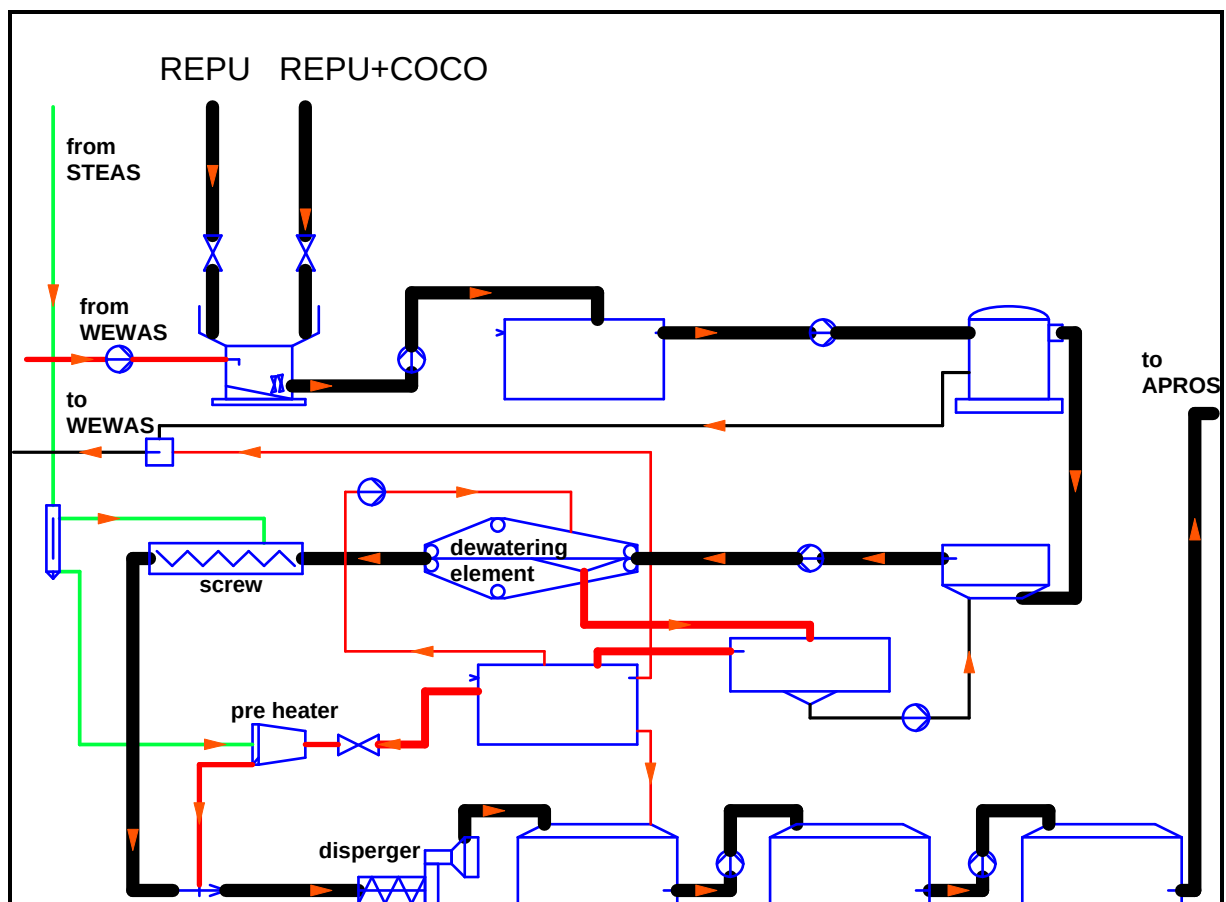


Abb. 3.4-6: Schema der Fertigungsausschußsystem (Produktionslinie A)

3.4.2.7 Streichfarbenaufbereitung

Die Streichfarbenaufbereitung (Coating Colour System: COCOS) beginnt mit dem Eintrag der zur Herstellung der Farbe notwendigen Stoffe,

schließt die Mischung, Kochung und Verdünnung ein, und endet vor den Auftragswerken der Streichfarbe in der Streichmaschine (**Abb. 3.4-7**).

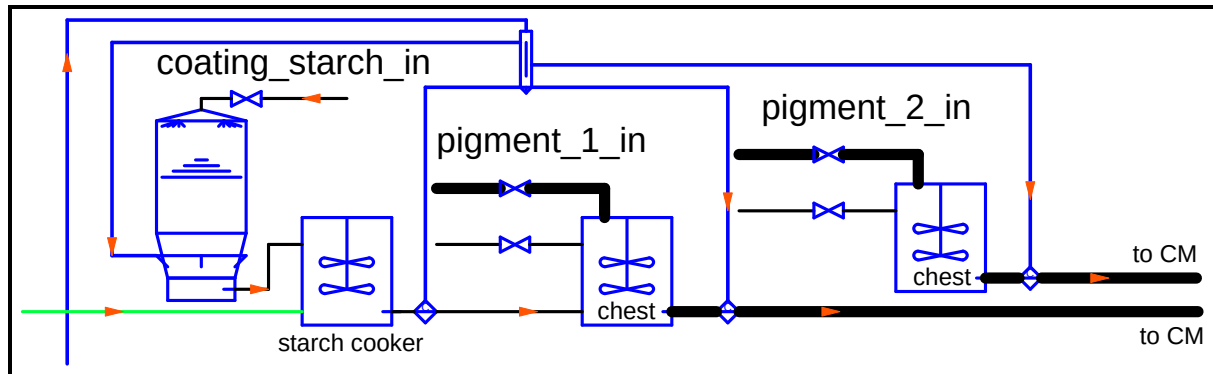


Abb. 3.4-7: Schema der Streichfarbenaufbereitung (Produktionslinie A)

3.4.3 Papiermaschine

3.4.3.1 Systemgrenzen der Papiermaschine

Die Papiermaschine (Paper Machine: PM) schließt sich an die Stoffaufbereitung an und endet mit der Aufrollung des Basispapiers. Hier findet die eigentliche Produktion des Basispapiers statt.

3.4.3.2 Konstantteil

Der Hauptstoffstrom durchläuft als ersten Teil der PM den Konstantteil (Approach System: APROS). Er beginnt mit der Mischbütte und endet nach dem Stoffauflauf. Im APROS wird der Stoff gereinigt, verdünnt, entlüftet und es werden ihm alle notwendigen Produkt- und Prozeßhilfsmittel zugesetzt. Außerdem werden hier die Siebwässer gesammelt und dem Stoffstrom wieder zugeführt (**Abb. 3.4-8**).

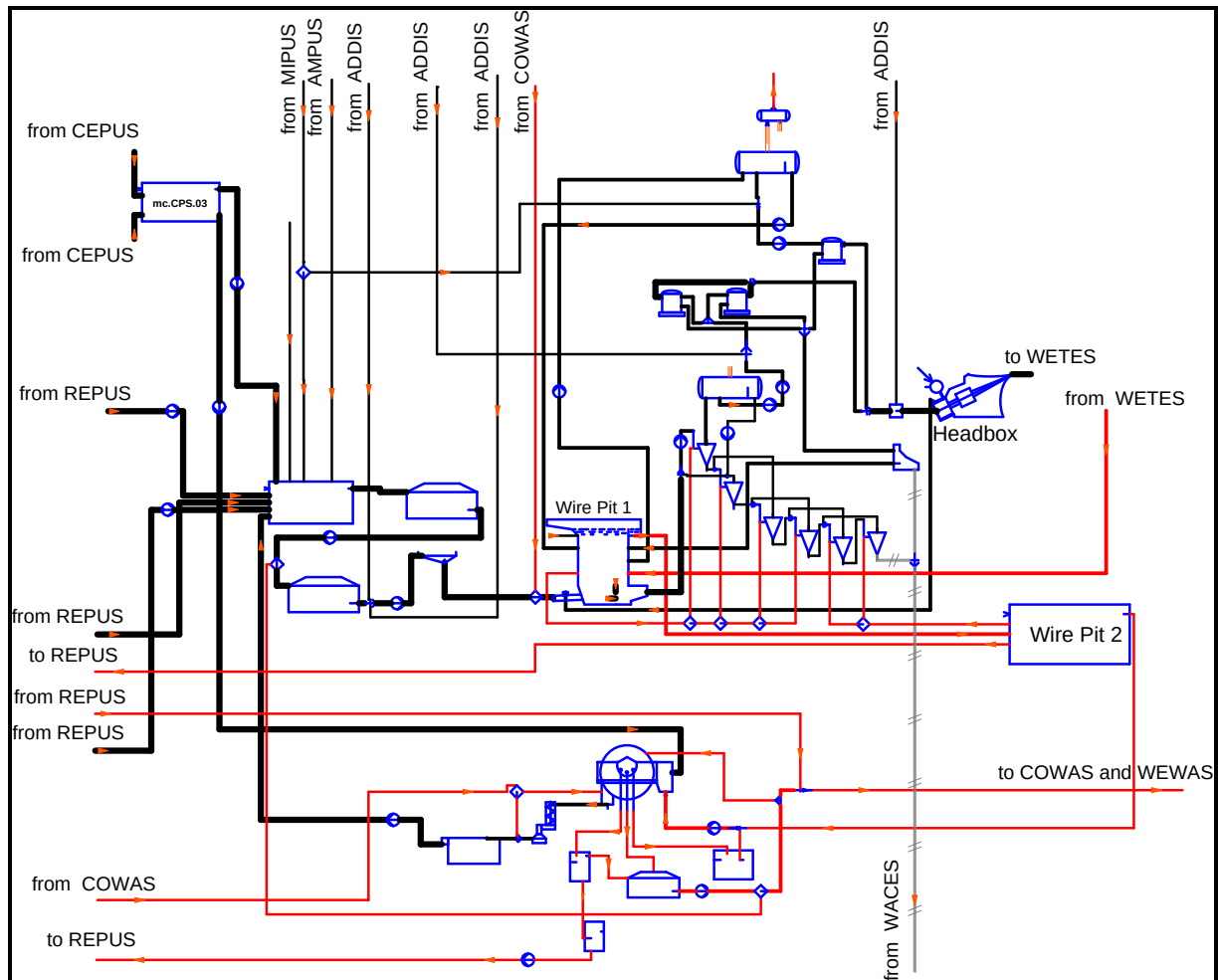


Abb. 3.4-8: Schema des Konstantteils (Produktionslinie C)

3.4.3.3 Naßpartie

Der Stoffstrom wird in der Naßpartie (Wet End Section: WETES) mechanisch entwässert. Die Entwässerung erfolgt dabei durch Filtration mit und ohne zusätzlichen Druck und ein anschließendes Pressen der Papierbahn. Die WETES beginnt mit dem Sieb und endet vor dem Einlauf in die Trockenpartie (**Abb. 3.4-9**).

Ergänzend sei hierzu auch auf die im **Anhang 9.1.10** befindlichen Abbildungen verwiesen. In diesen wird das WETES nochmals detaillierter dargestellt. Dem Hauptstoffstrom folgend ergibt sich dann folgendes Bild: Nach dem Stoffauflauf beginnt die Siebpartie (Wire System: WIRES), gefolgt vom internen Return Pulp System (REPUS/WETES), welches durch den

“Wet Broke“ dargestellt ist, und anschließend der Pressenpartie (Press System: PRESS).

Das interne Wassersystem (Wet End Water System: WEWAS) wird in den Abbildungen im **Anhang 9.1.10.3** und **9.1.10.4** detaillierter ausgeführt, um den Frischwasser und Kondensat Einsatz besser verfolgen zu können.

Die Siebpartie (WIRES) beginnt nach dem Stoffauflauf und endet dem Hauptstoffstrom folgend nach dem Gautschbruch. Die Pressenpartie (PRESS) umfaßt alle Pressnips. Im Wet End Water System (WEWAS) wurden alle anderen Module der Naßpartie zusammengefaßt, so z. B. die Module zur Siebreinigung und die Wannen und Büten, die das Siebwasser auffangen.

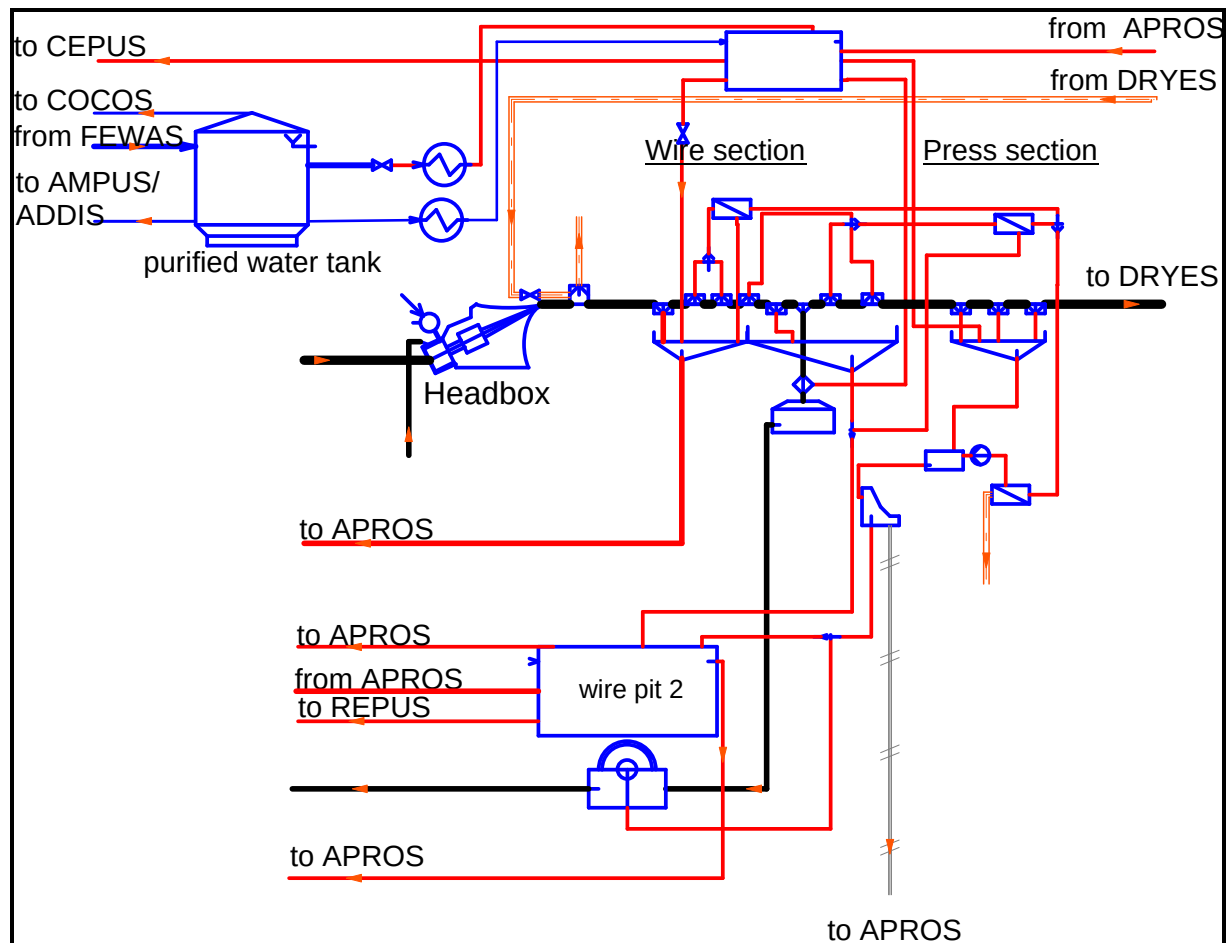


Abb. 3.4-9: Schema der Naßpartie (Produktionslinie C)

Die Siebpartie (WIRES) beginnt nach dem Stoffauflauf mit der Simulation der Oberflächenverdunstung des Wassers vom Suspensionsfilms an die Umgebungsluft. Die Entwässerungselemente bis zum Gautschbruch (Wet Broke) fassen die gesamte Siebpartie zusammen. Sie sind in drei Bereiche unterteilt: Erstens alle Entwässerungselemente beginnend nach dem Stoffauflauf bis vor das Obersieb. Dieses wiederum wurde ebenfalls durch ein separates Aggregat im Hauptstoffstrom zusammengefaßt. Im dritten Teil werden alle Elemente, wie Naß- und Flachsauer, im Be-

reich nach dem Obersieb bis einschließlich der Siebsaugwalze erfaßt (**Abb. 3.4-9**).

Der Gautschbruch ist der nächste Teil in der Naßpartie, welcher im Anschluß an die Siebpartie direkt im Hauptstoffstrom eingebunden ist. Hier wird ein konstanter Teilstrom abgeleitet, der unter anderem den Randbeschnitt erfaßt.

Die Pressenpartie (PRESS) stellt jeden Preßnip separat dar und fast alle Aggregate der Filzentwässerung und -reinigung im jeweiligen Pressenabschnitt zusammen.

3.4.3.4 Trockenpartie

Die Trockenpartie (Dryer Section: DRYES) beginnt mit dem Auslauf der Papierbahn aus der Pressenpartie und endet mit der Aufrollung des Basispapiers am Pope Roller.

In der Trockenpartie wird die Papierbahn getrocknet, anschließend erfolgt die Oberflächenleimung mittels Stärkeauftrag und die zweite Trocknung, die auch zur Regelung der Endfeuchte dient. Die Trocknung erfolgt als Kon-

takttrocknung durch dampfbeheizte Zylinder. Bei der Produktionslinie C ist in der Nachrocknung der Kontakttrocknung noch ein Gas-IR-Trockner vorgeschaltet. Zusätzlich wird die Luft in der Trockenpartie zur besseren Wasseraufnahme gezielt aufgeheizt. Diese Aufwärmung

erfolgt in drei Schritten, in denen die Luft zuerst über Wärmetauscher mittels der Abluft der Trockengruppe und danach durch Kondensat erwärmt und anschließend mit Dampf beheizt wird (**Abb. 3.4-10**).

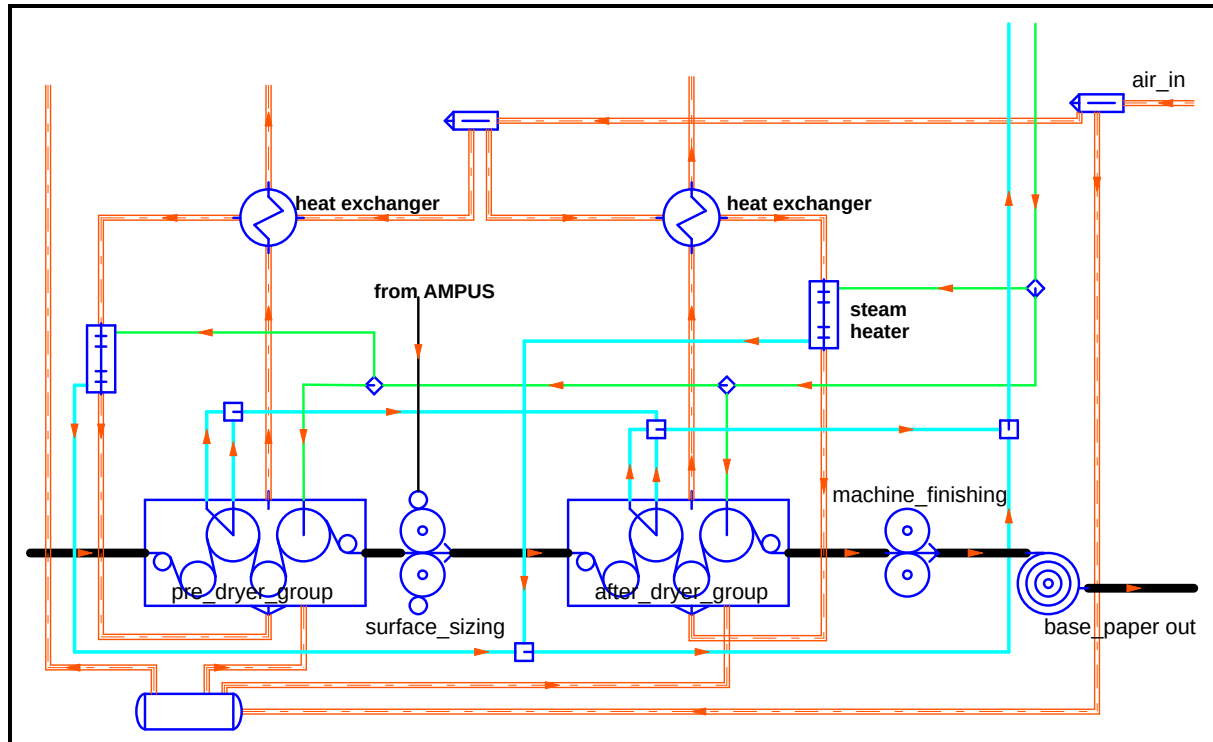


Abb. 3.4-10: Schema der Trockenpartie (Produktionslinie A)

Die Trockenpartie ist weiterhin in vier Subsysteme untergliedert. In der Produktionslinie unterscheidet man als erstes die Vortrockenpartie PREDS (Pre Dryer System), anschließend die Oberflächenleimung SIZES (Sizer System) und zum Abschluß der Trockenpartie die Nachtrockenpartie PODYS (Post Dryer System), welche zusätzlich noch die Maschinenglättung und die Aufrollung enthält. Das vierte Subsystem ist das Hallenluftsystem der Trockenpartie HALAS (Hall Air System), das bilanzierte Luftströme für die Vor- und Nachtrockenpartie enthält.

In den Gesamtdarstellungen der drei Produktionslinien sind die Subsysteme PREDS, SIZES und PODYS im Produktionsfluß von links nach rechts dargestellt (Eine Produktionslinie ist als Beispiel im **Anhang 9.1.6** dargestellt.). In den jeweiligen Subsystemdarstellungen (**Anhang 9.1.9**) sind die einzelnen

Module und die Ströme zwischen den Subsystemen abgebildet. Bei den Strömen handelt es sich um spezifische Stoff-, Luft und Dampf- und Kondensatströme. Diese sind in Teilströme untergliedert, die die Komponenten des Stromes, sowie die mit dem Strom mitgeführte Energie (Enthalpiestrom) darstellen. Bei dem Stoffstrom ist zusätzlich noch die Temperatur angegeben (**Abb. 3.4-10**).

Zur besseren Übersicht liegt bei der Darstellung das Hauptaugenmerk auf dem Stoffstrom, der waagrecht die Darstellung durchläuft. Die anderen Ströme gehen senkrecht von diesem ab bzw. dazu. Um eine Überschneidung dieser Ströme zu vermeiden, sind sie, wenn es sich nicht vermeiden ließ, mit Verweisen versehen, die besagen von welchem Modul oder System die Ströme aus fließen bzw. wohin sie fließen.

3.4.4 Streichmaschine

3.4.4.1 Systemgrenzen der Streichmaschine

Die Streichmaschine (Coating Machine: CM) trägt eine definierte Menge Mineralstoff auf die Papierbahn auf. Das System schließt sich an die PM an und endet vor dem Kalandrier.

Die Abbildungen im **Anhang 9.1.11** zeigen die Subsystemdarstellung der Streichmaschine der Produktionslinie B.

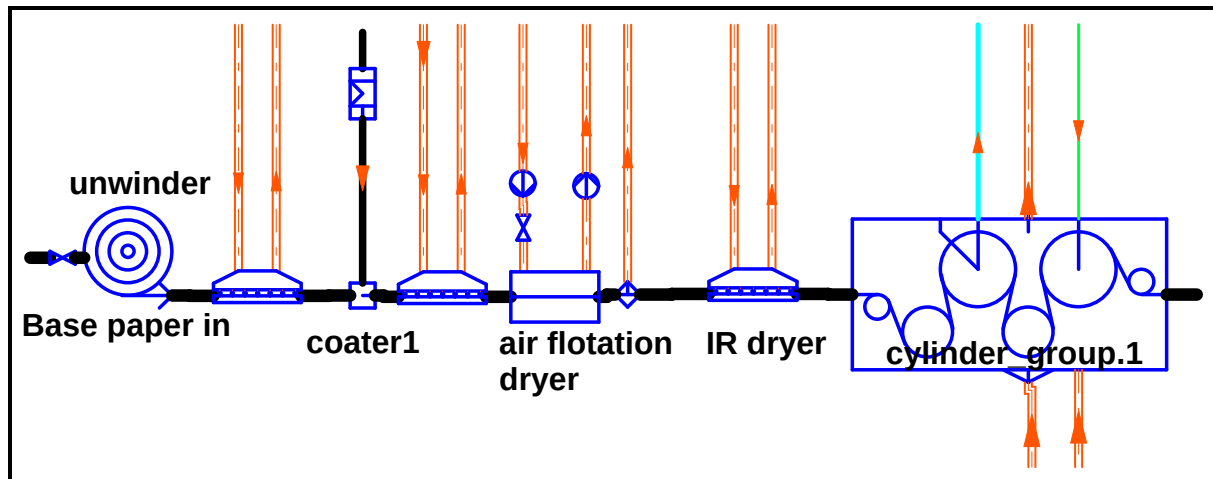


Abb. 3.4-11: Schema des ersten Streichwerkes der Streichmaschine mit Abrollung (Produktionslinie B)

3.4.4.2 Streichfarbenauftrag und Trocknung

Streichfarbenauftrag und Trocknung werden für jeden Strich als einzelnes Subsystem betrachtet. An einzelnen Auftragswerken wird einseitig Streichfarbe auf die Papierbahn aufgetragen und die Bahn anschließend getrocknet. Die Trocknung erfolgt üblicherweise durch eine Infrarot-Trocknung, gefolgt von Schwebetrocknung mit anschließender Zylindertrocknung. Für die vier Striche (jeweils Vorstrich und Deckstrich für Ober- und Unterseite) mit ihren Trocknungsaggregaten wurden folgende Bezeichnungen vereinbart:

- FPCDS: Front Pre Coater and Dryer System (includes Unwinder) siehe **Abb. 3.4-11**
- FTCDS: Front Top Coater and Dryer System
- BPCDS: Back Pre Coater and Dryer System
- BTCDS: Back Top Coater and Dryer System (includes Pope Roller)

Das Hallenluftsystem HALAS der Streichmaschine bildet das fünfte Subsystem. In diesem System sind alle Luftströme der Infrarot-Trockner erfasst (**Abb. 3.4-12**).

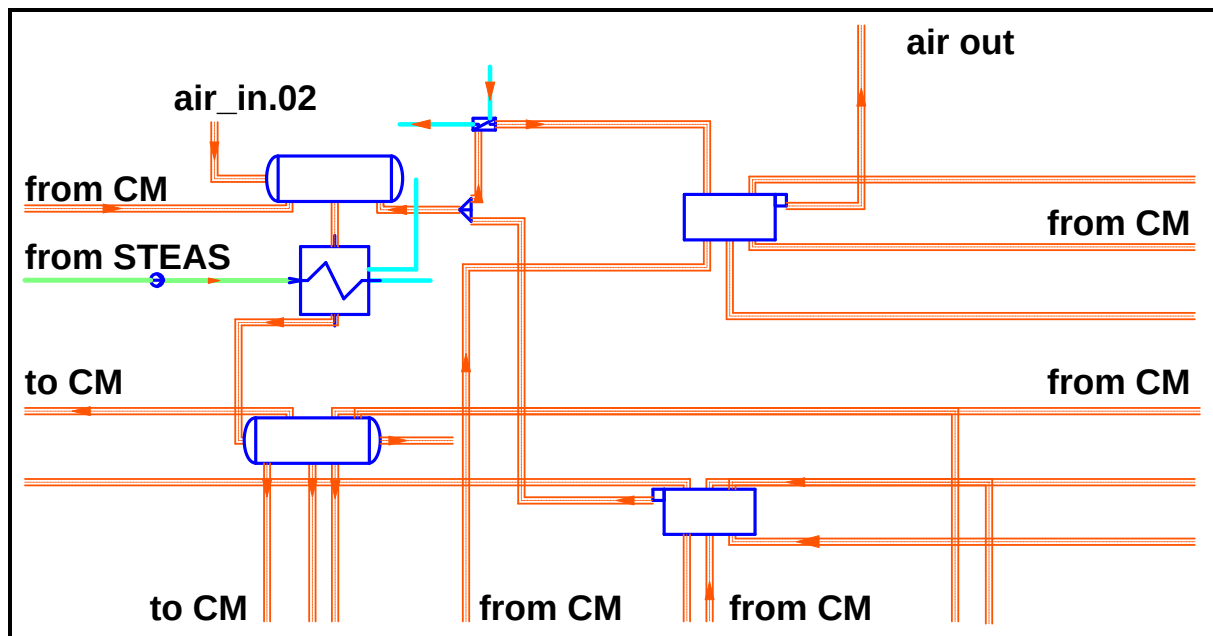


Abb. 3.4-12: Schema des Hallenluftsystems der Streichmaschine (Produktionslinie B)

3.4.5 Ausrüstung und Verpackung

3.4.5.1 Systemgrenzen der Ausrüstung und Verpackung

Die Ausrüstung und Verpackung (Finishing Systems: FS) ist das letzte System, das der Hauptstoffstrom passiert. Hier wird die Papierbahn geglättet, in Rollen zerschnitten und anschließend verpackt. Das System beginnt nach der CM und endet mit dem Austrag der Papierbahn aus dem Gesamtsystem.

3.4.5.2 Kalandrier

Ein weiterer Teil einer Produktionslinie ist der Kalandrier (Super Calender System: SUCAS). Er schließt sich direkt an die Streichmaschine (CM) an und endet vor dem Rollenschneider (RECPS).

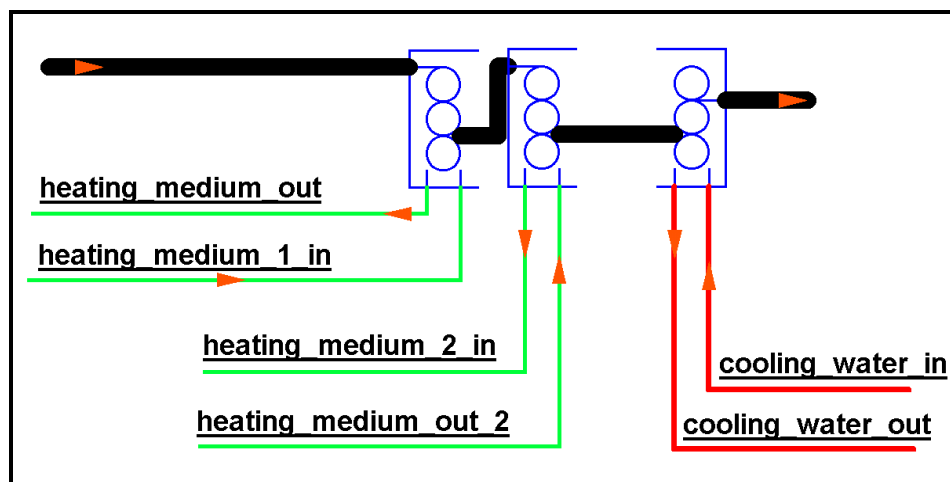
Seine Aufgabe ist die Behandlung der Oberfläche einer Papierbahn mit dem Ziel, Eigenschaften wie Glätte und Glanz zu verbessern und Dickenschwankungen zu minimieren. Das

Papier wird im Kalandrier abwechselnd zwischen Papierwalzen und beheizten Stahlwalzen hindurchgeführt. Durch den hohen Druck und die Übertragung thermischer Energie, unter Zuhilfenahme eines Heizmediums, werden die Papiereigenschaften wie Glätte und Glanz positiv beeinflusst. Beim Heizmedium handelt es sich um Dampf, Heißwasser oder Thermoöl.

Die im Projekt betrachteten Produktionslinien haben unterschiedliche Arten von Kalandriern. Bei den Linien B und C handelt es sich um Superkalandrier mit 11 bzw. 13 Nips, das Papier der Produktionslinie A wird auf einem Softkalandrier mit 4 Nips geglättet. Außerdem unterscheiden sich die drei Anlagen auch in den verwendeten Heiz- bzw. Kühlmedien. In **Tab. 3.4-3** sind diese Unterschiede im Überblick dargestellt.

Tab. 3.4-3: Zusammenstellung der Kalandersdaten

	<i>Produktionslinie A</i>	<i>Produktionslinie B</i>	<i>Produktionslinie C</i>
Kalanderart	Softkalander	Superkalander	Superkalander
Anzahl Nips	4	11	13
Heizmedium	Thermoöl	Wasser	Sattdampf
Kühlmedium	Keine direkte Kühlung, sondern über Hallenluft	Wasser	Wasser

**Abb. 3.4-13:** Schema des Softkalanders (Produktionslinie A)

In **Abb. 3.4-13** ist ein Softkalander dargestellt, wie er in Linie A simuliert wurde. Die Darstellung zeigt drei Hauptanlagenteile: 1. Thermowalze, 2. Thermowalze und 3. die Einbindung der Hallenluft. Die 1. und 2. Thermowalze werden in Abhängigkeit vom Feed-Strom und den Temperaturvorgaben vom Thermoöl beheizt. Die Abgabe thermischer Energie an die Umgebungsluft des Kalanders wird im letzten Anlagenteil simuliert. Um den Umformungsprozeß der Oberfläche zu unterstützen, wird die Papierbahn im ersten Teil des Kalanders zusätzlich beheizt. Dies geschieht unter anderem durch Dampf, Thermoöl oder Wasser. Im unteren Teil des Kalanders ist der Druck im Walzenspalt allerdings so groß, daß er eine enorme Erwärmung der Bahn verursacht. Daher muß die Bahn hier gegebenenfalls gekühlt werden.

3.4.5.3 Rollenschneider und Rollenverpackung

Der Rollenschneider zerschneidet die Papierbahn in mehrere Rollen. Die Rollenverpackung verpackt die Papierrollen. Diese Subsysteme beginnen im Anschluß an den Kalander und enden mit dem Austrag der verpackten Rollen aus dem Gesamtsystem. Das verwendete Verpackungspapier wird nicht in der Simulation berücksichtigt. Für den Rollenschneider wurde die Kurzbezeichnung RECUS (Reel Cutter System) gewählt.

3.4.6 Hilfssysteme

3.4.6.1 Definition der Hilfssysteme

Die Systeme, die nicht direkt an der Papierherstellung beteiligt, aber für die Funktion des Produktionssystems notwendig sind, werden als Hilfssysteme definiert (Support Systems: SS). Die Hilfssysteme versorgen das Produktionssystem mit Wasser, Luft, Dampf und elek-

trischer Energie. Sie sind im Production Line System orange dargestellt.

3.4.6.2 Frischwasseraufbereitung

Die Frischwasseraufbereitung (Fresh Water System: FEWAS) reinigt das ins Gesamtsystem eingehende Rohwasser und stellt es in der zur Produktion notwendigen Qualität zur Verfügung.

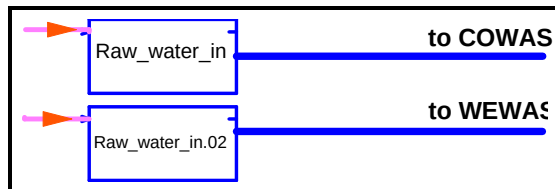


Abb. 3.4-14: Schema der Frischwasseraufbereitung (Produktionslinie C)

Es beginnt mit dem ins Gesamtsystem eingebrachten Rohwasser und endet nach der Wasseraufbereitung (**Abb. 3.4-14**).

3.4.6.3 Kühlwassersystem

Das Kühlwassersystem (Cooling Water System: COWAS) wird zur Wasserkühlung von verschiedenen Maschinen verwendet. Das System ist durch die eintretenden kalten Wasserströme und die austretenden warmen Wasserströme abgegrenzt.

3.4.6.4 Wasserreinigungssystem

Das Wasserreinigungssystem (Waste Cleaning System: WACES) reinigt das bei der Produktion anfallende Abwasser so, daß es anschließend in den Vorfluter eingeleitet werden kann. Das System beginnt mit dem Abwassersammelbehälter und endet mit dem aus dem Gesamtsystem austretendem Schlamm und gereinigtem Abwasser (**Abb. 3.4-15**).

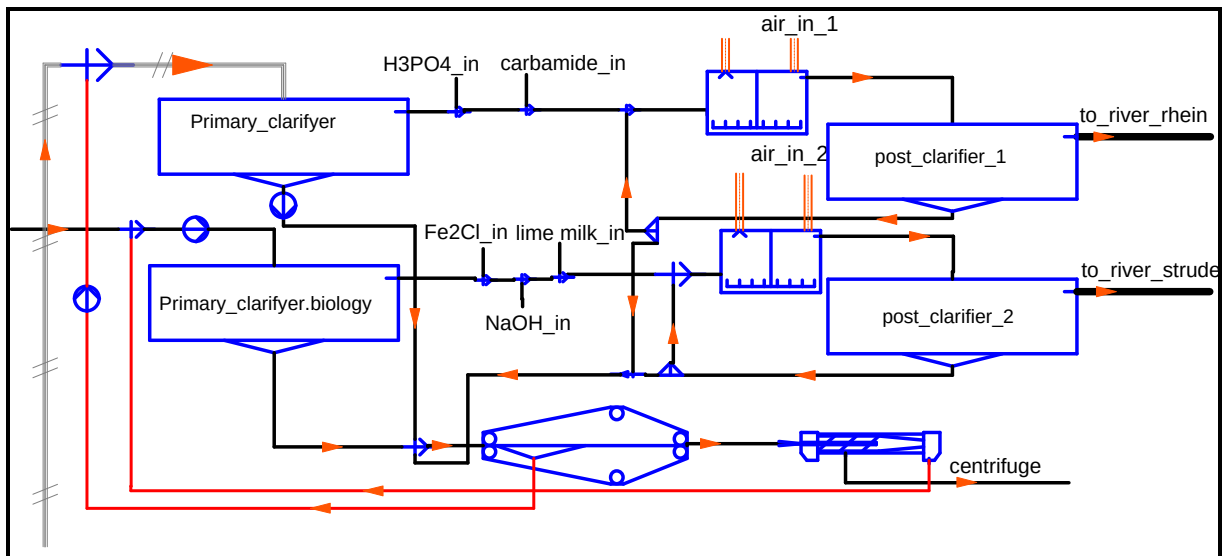


Abb. 3.4-15: Schema der Abwasseraufbereitung (Produktionslinie C)

3.4.6.5 Dampfsystem

Das Dampfsystem (Steam System: STEAS) liefert den zur Produktion notwendigen Dampf und nimmt das anfallende Kondensat zurück. Die Systemgrenzen sind durch den ausgehen-

den Dampf und das eingehende Kondensat definiert. Die Simulation dieses Systems soll nach dem "Black-Box-Prinzip" erfolgen, d. h. auf eine detaillierte Darstellung des Systems wird verzichtet (**Abb. 3.4-16**).

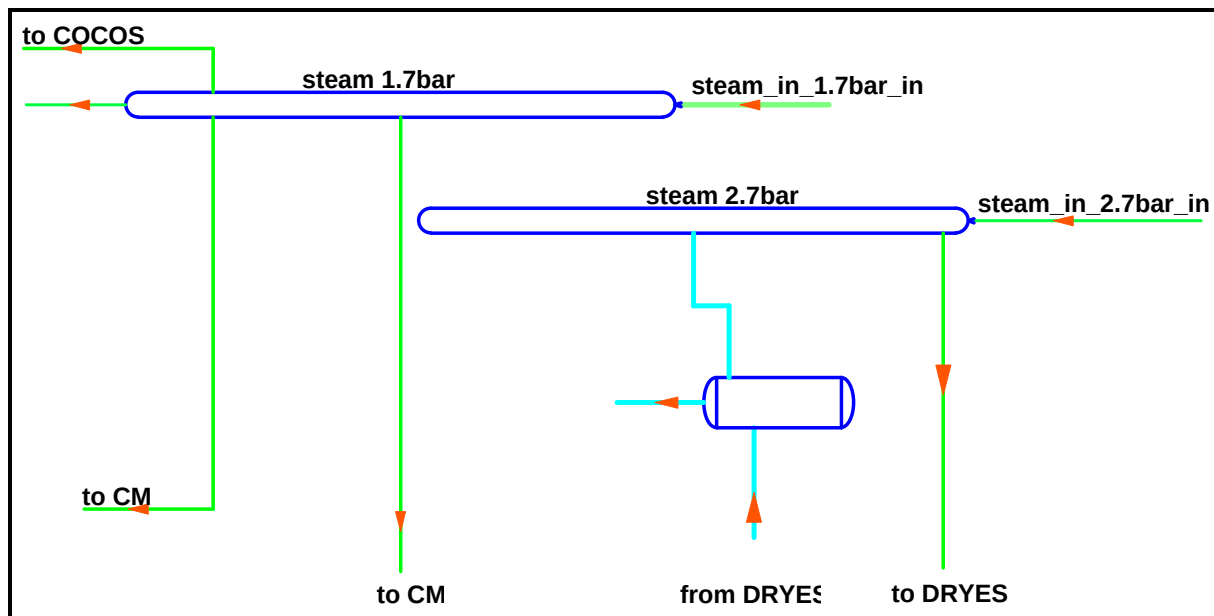


Abb. 3.4-16: Schema des Dampf- und Kondensatsystems (Produktionslinie C)

3.4.6.6 Druckluftsystem

Das Druckluftsystem (Compressed Air System: COMAS) liefert die für die Anlage erforderliche Druckluft.

3.4.6.7 Hallenluftsystem

Das Hallenluftsystem (Hall Air System: HALAS) beschreibt die in der Maschinenhalle vorhandene Luft, ihren Austausch mit der Umwelt und ihre Wechselwirkung mit der Anlage. Bei der Bilanzierung wurden einigen Subsystemen ein HALAS zugewiesen, welchem die entsprechenden Module der Luftversorgung aus der Simulation zugeordnet wurden. Das „Haupt“-HALAS faßt damit alle Luftströme der einzelnen HALAS zusammen und bildet die Schnittstelle zwischen Production Line System und Umgebung bezüglich des Luftgebrauches. Das Hallenluftsystem ist als produktionsintegrierter Bestandteil zu betrachten, nicht als Bestandteil der Papiermaschinen- oder Streichmaschinenhalle. Dies zeigt zum Beispiel das integrierte Hallenluftsystem der Streichmaschine (Abb. 3.4-12).

3.4.6.8 Elektroenergiesystem

Das Elektroenergiesystem (Electrical Energy System: ELENS) besteht aus den Anlagenteilen, die die dem Werk zugeführte Elektroenergie umwandeln und weiterleiten.

3.4.6.9 Trocknungsluftsystem

Das Trocknungsluftsystem (Drying Air System: DRYAS) beinhaltet die Bereitstellung und Aufbereitung der Luft, die von den Trocknungsaggregaten der Papiermaschine und der Streichmaschine zum Trocknen benötigt wird.

3.4.6.10 Vakuumsystem

Das Vakuumsystem (Vacuum System: VACUS) besteht aus den Anlagenteilen, die unter Unterdruck stehende Luft erzeugen und transportieren.

3.5 Simulation des Prozeßablaufes und Aufnahme der Prozeßdaten

Die Aufnahme der Prozeßdaten erfolgt in der eingeschwungenen, ungestörten Produktionsphase. Dabei ist zu beachten, daß die Wasser- und Energiegebräuche unter den Mittelwerten von längeren Produktionszeiträumen liegen. **Tab. 3.5-1** verdeutlicht diesen Zusammenhang. Dies ist notwendig, da Sortenwechsel und Stillstände die Bilanzen verfälschen und die Vergleichbarkeit der Produktionslinien beeinträchtigen. Ist es notwendig Sortenwechsel und Stillstände zu berücksichtigen, müssen diese getrennt betrachtet werden.

Tab. 3.5-1: Die spezifischen Abwassermengen ABW_{sa} und ABW_{sp} [3-20]

Spez. <u>ABWASSERMENGE</u> ABW_s = Abwassermenge (kg) / PM-Brutto-Produktion (kg) Für einen langen Zeitraum (z.B. Jahr [a]) ABW_{sa} in (kg/kg) und für eine ungestörte <u>Produktionsphase</u> ABW_{sp} in (kg/kg)		
Durchfahrbetrieb ohne Sortenwechsel, offener Wasserkreislauf $ABW_{sa} \approx ABW_{sp}$	Allgemein gilt $ABW_{sa} \geq ABW_{sp}$	Kein Durchfahrbetrieb häufiger Sortenwechsel, eingegengter Wasserkreislauf $ABW_{sa} > ABW_{sp}$

Bei der Erfassung der Prozeßdaten wurde für jede Produktionslinie je eine Papiersorte ausgewählt. Die Auswahl der Produktionslinien und Papiersorten erfolgte so, daß möglichst

hohe Vergleichbarkeit gegeben ist. Die **Tab. 3.5-2** gibt eine Übersicht der modellierten Produktionslinien und der ausgewählten Papiersorten.

Tab. 3.5-2: Übersicht der untersuchten Produktionslinien und Papiersorten

Papiermaschine	2	2	3
Produktion Basispapier (lutro) / t/d	480	517	540
Stoffstrom (otro) / kg/s	5,361	5,744	6,062
Flächenmasse (lutro) / g/m ²	79,0	93,5	90,0
Trockengehalt / %	96,5	96,0	97,0
spez. Massestrom Wasser / kg/kg otro Basispapier	0,036	0,042	0,031
Mineralstoffgehalt / %	12,2	22,4	19,6
spez. Mineralstoffstrom / kg/kg otro Basispapier	0,122	0,224	0,196
Streichmaschine	2	1	3
Produktion gestrichenes Papier (lutro) / t/d	770	862	557
Stoffstrom (otro) / kg/s	8,600	9,578	6,189
Flächenmasse (lutro) / g/m ²	135	150	150
Trockengehalt / %	96,5	96,0	96,0
spez. Massestrom Wasser / kg/kg otro Basispapier	0,062	0,067	0,070
Mineralstoffgehalt / %	43,8	51,1	41,3
spez. Mineralstoffstrom / kg/kg otro Basispapier	0,438	0,511	0,413

Die Zielrichtung der Modellierung der Produktionslinien ist eine Verbesserung des Systems. Die vereinfachte Darstellung einer Papierfabrik mit integrierter Halbstoffherzeugung (siehe **Abb. 3.2-1**) wurde weiterentwickelt und der

Produktion der untersuchten Papierqualität (beidseitig zweifach gestrichenes Bilderdruckpapier) angepaßt (**Abb. 3.5-3** und **Abb. 3.5-4**).

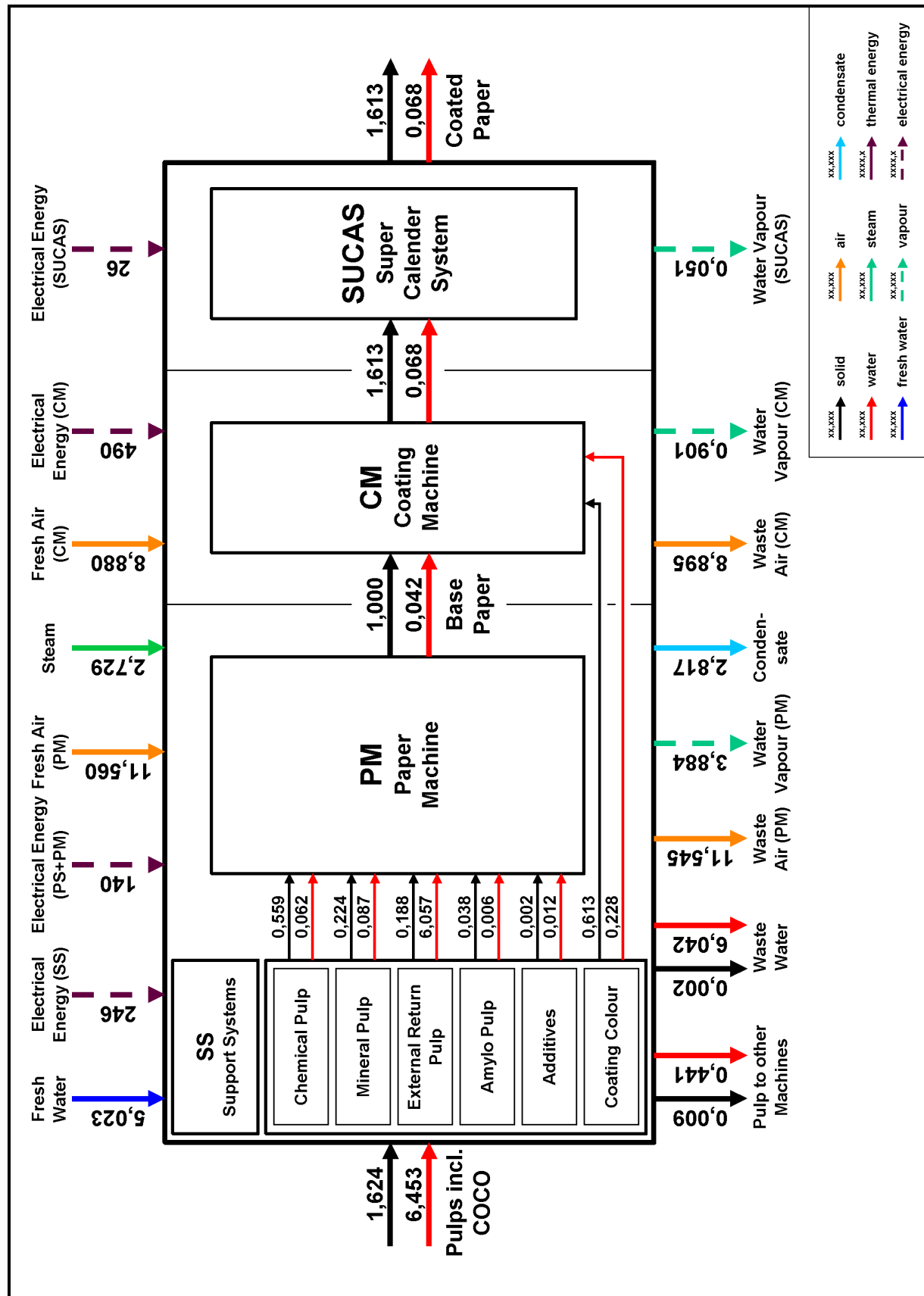


Abb. 3.5-3: Specific mass and energy balances (flows and energy per oven dry base paper; main stream calculated without internal return pulp)

Input Flows			Output Flows		
kg/kg	solid	fluid	kg/kg	solid	fluid
Chemical Pulp	0,559	0,062	Paper - Base Paper	1,000	0,042
Mineral Pulp	0,224	0,087	Paper - Coated Paper	1,613	0,068
External Return Pulp	0,188	6,057	Pulp to other Machines	0,009	0,441
Integrated Chemical Pulp	-	-	Water to other Machines	-	-
Amylo Pulp	0,038	0,006	Waste Water	0,002	6,042
Additives	0,002	0,012	Waste Air (PM)	-	11,545
Coating Color	0,613	0,228	Waste Air (CM)	-	8,895
Total Pulps*	1,011	6,224	Total Waste Air	-	20,440
Total Pulps incl. COCO*	1,624	6,453	Water Vapour (PM)	-	3,884
Total Fresh Water	-	5,023	Water Vapour (CM)	-	0,901
Fresh Air (PM)	-	11,560	Water Vapour (SUCAS)	-	0,051
Fresh Air (CM)	-	8,880	Total Water Vapour	-	4,836
Total Fresh Air	-	20,440	Condensate	-	2,817
Steam	-	2,729			
Input Energy Wh/kg			Enthalpy Wh/kg		
Steam (PM+PS)	1901		Pulps incl. COCO	115	
Steam (CM)	163		Paper - Coated Paper	40	
Total Steam	2064		Fresh Water	10	
ELEN (PM+PS)	140		Water to other machines	-	
ELEN (CM)	490		Waste Water	156	
ELEN (SUCAS)	26		Fresh Air (PM)	54	
ELEN (SS)	246		Waste Air (PM)	923	
Total Electrical Energy	902		Fresh Air (CM)	61	
			Waste Air (CM)	335	
PM = Paper Machine CM = Coating Machine SS = Support Systems PS = Pulp Systems			SUCAS = Super Calender System COCO = Coating Color ELEN = Electrical Energy * input and output pulp flows with zero internal return pulp		

Abb. 3.5-4: Compact Table: Specific mass and energy balances (flows and energy per kg oven dry base paper)

Diese **Abb. 3.5-3** beinhaltet eine kompakte Darstellung der unterschiedlichen Pulp Systems (Chemical Pulp System; Mineral Pulp

System; Amylo Pulp System, Additives System und Coating Color System), des Approach + Wet End Systems sowie des Pre(Sizer) Post

Dryer Systems der Paper Maschine (PM), der Coating Machine (CM) und des Supercalendering Systems. Die Zuführung des Frischwassers erfolgt über die Support Systems (SS), die u.a. die Rohwasseraufbereitung (Fresh Water System - FEWAS) beinhalten.

In dieser kompakten Darstellung sind ist das Production Line System in vereinfachter Form von links nach rechts dargestellt (vgl. **Anlage 9.1.6**). Die Roh- und Halbstoffe treten von links in die Modellpapierfabrik ein und auf der rechten Seite verläßt das produzierte Papier (inklusive Restfeuchtigkeit) die Papierfabrik. Alle Stoffströme sind in kg / kg otro Basispapier, alle Energieströme sind in Wh / kg otro Basispapier dargestellt.

Die Hilfsströme, wie z.B. Luft- und Energieströme sind dagegen vertikal in Form von Cross Connect Flows dargestellt.

In der **Abb. 3.5-3** sind die Daten in einer weiter komprimierten Form zusammengestellt.

Für die Interpretation der Daten ist ein umfangreiches Detailwissen über den Aufbau der einzelnen Production Line Systems sowie die Verknüpfung des untersuchten Production Line Systems mit anderen Production Line Systems notwendig. Dies betrifft z.B. den Energiebedarf für die Trocknung an der Streichmaschine, die teils mit Dampf, Gas oder elektrischen IR-Trocknern erfolgt. Diese Kenntnis ist erforderlich, um den Elektroenergiebedarf der Streichmaschine (CM) richtig zu interpretieren. Weiterhin wurde der interne Return Pulp gleich null gesetzt und nur der externe Return Pulp – z.B. Stoffübergabe von anderen Maschinen – dargestellt.

Das Return Pulp System bedarf infolge seiner spezifischen Komplexität besonderer Beachtung. Nachlaufzeiten, Schwankungen in der Zusammensetzung, unterschiedliche Anteile von gestrichenem und ungestrichenem Return Pulp und der Einsatz von feuchtem und trockenem Return Pulp erschweren eine korrekte Bilanzierung. Das bedeutet, daß das Return Pulp System bei weiteren Arbeiten speziell behandelt werden muß.

Auf weitere Besonderheiten der untersuchten Produktionslinien wurde im **Kapitel 3.3** bereits hingewiesen.

Aus diesen Gründen wurde auf eine Gegenüberstellung der Gesamtbilanzen der 3 Produktionslinien verzichtet, da eine solche direkte Gegenüberstellung zu Fehlinterpretationen führen würde.

Bei der Modellierung der drei Produktionslinien zeigte sich, daß der Arbeitszeitaufwand für die Simulation einer Produktionslinie, der im wesentlichen einmal geleistet werden muß bzw. zukünftig Bestandteil der Planung von Prozeßverbesserungen sein wird, und der Arbeitszeitaufwand für die Aufnahme der relevanten Daten einer Papiersorte im stabilen Prozeßzustand liegen in der gleichen Größenordnung liegen. Dabei müssen diese Daten für alle wichtigen Papiersorten einer Produktionslinie ermittelt werden - nicht nur als Mittelwerte im stabilen Prozeßzustand, sondern auch in der Schwankungsbreite sowie in der Umstellungsphase und das nicht einmalig, sondern für jede neue Produktionsphase der jeweiligen Papiersorte.

Die angestrebte ständige Optimierung von Produktionslinien ist nur möglich, wenn die Daten mit einem drastisch reduzierten Arbeitszeitaufwand in die Simulation einfließen.

Dies führte zu einem neuen Pilotprojekt. Es soll an den drei Feinpapier-Produktionslinien die Nutzung des jeweiligen Prozeßleitsystems (PLS) bzw. der Datenbank erprobt werden. Im Regelfall wird man auf die PLS unabhängigen Datenbanken zurückgreifen - wie z.B. mit FTP (File Transfer Protocol) in älteren Anlagen oder OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control) in neueren Anlagen. Vorteilhaft ist, daß übliche Simulationsprogramme und Datenbanken meist über MS-Excel®-Tabellenkalkulation verbunden werden können. Dies soll in enger Zusammenarbeit mit VTT-Processes geschehen. Dabei muß eine intensive Überprüfung der strukturierten Daten geschehen.

Ziel des Projektes ist die erfolgreiche Nutzung der 3 Prozeßleitsysteme bzw. ihrer Datenbanken für die ständige Aktualisierung der sortenspezifischen BALAS-Simulationen für Mittelwerte und Standardabweichungen sowie in der Umstellungsphase.

Das vorrangige Ziel des Folgeprojektes ist die Erarbeitung einer kostengünstigen Methodik zur ständigen sortenspezifischen Optimierung der Produktionslinien hinsichtlich spez. Energie-, Abwasser-, Reststoff-, Abdampf- und Abluftmenge am Beispiel der BALAS-Simulationen von drei Feinpapier-Produktionsstraßen durch Übernahme der PLS-Daten aus der Datenbank (z.B. FTP, OPC) über Excel und ihre Nutzung direkt in der Produktion sowie in der Prozeß- und Produkt-Entwicklung. Die besondere wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse besteht darin, daß diese Methodik für nahezu alle Papier-Produktionslinien, PLS bzw. Datenbanken und Simulations-Programme anwendbar ist.

3.6 Lösungsmethodik

3.6.1 Benchmarking

Ziel des Benchmarkings ist die Suche und Ausnutzung von vorhandenem Erfolgspotential im Unternehmen, auf Basis von Vergleichs- und Richtwerten, sog. Benchmarks. Diese Benchmarks werden von anderen führenden Unternehmen aus der gleichen oder aber auch einer anderen Branche vorgegeben.

Durch den Vergleich des eigenen Unternehmens mit den besten der Branche oder den besten der Welt können nachhaltige Verbesserungen der eigenen Unternehmenstätigkeit aufgezeigt werden. Im Unterschied zum Betriebsvergleich wird aber nicht nur das Ergebnis verglichen, sondern vor allem analysiert,

wie es zu den beobachteten Ergebnissen kommt.

Aufbauend auf dieser Analyse wird ein systematisches Verbesserungskonzept entwickelt, so daß es nicht zu einer einfachen Imitation des Benchmarking-Partners kommt, sondern, daß generelle Ansatzpunkte zur Optimierung des eigenen Unternehmens identifiziert werden können. Es handelt sich somit um ein Konzept zum organisierten Lernen im Unternehmen und es dient zur geplanten Unternehmensentwicklung. Die nachfolgend dargestellte Aufteilung des Benchmarking-Prozesses verdeutlicht die einzelnen Schritte des Konzeptes von der Identifikation des Analyseobjektes bis zur Umsetzung und Kontrolle der Maßnahmen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden der Energie-, Wasser-, Stoff- und Luftgebrauch als Analyseobjekt festgelegt. Die Benchmarking-Partner sind drei Feinpapier-Produktionslinien mit vergleichbaren Papierqualitäten. Als Benchmarks sind die spez. Gebräuche, bezogen auf kg otro Papierproduktion ausgewählt worden. Durch Modellierung der Produktionslinien als Simulation werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Linien dargestellt. Aufbauend auf den Simulationsdaten werden Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Die Simulation gibt zusätzlich die Möglichkeit, daß die Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen modelliert werden kann und so bereits vor der tatsächlichen Umsetzung erste Erkenntnisse über die Auswirkungen im Gesamtsystem gewonnen werden können.

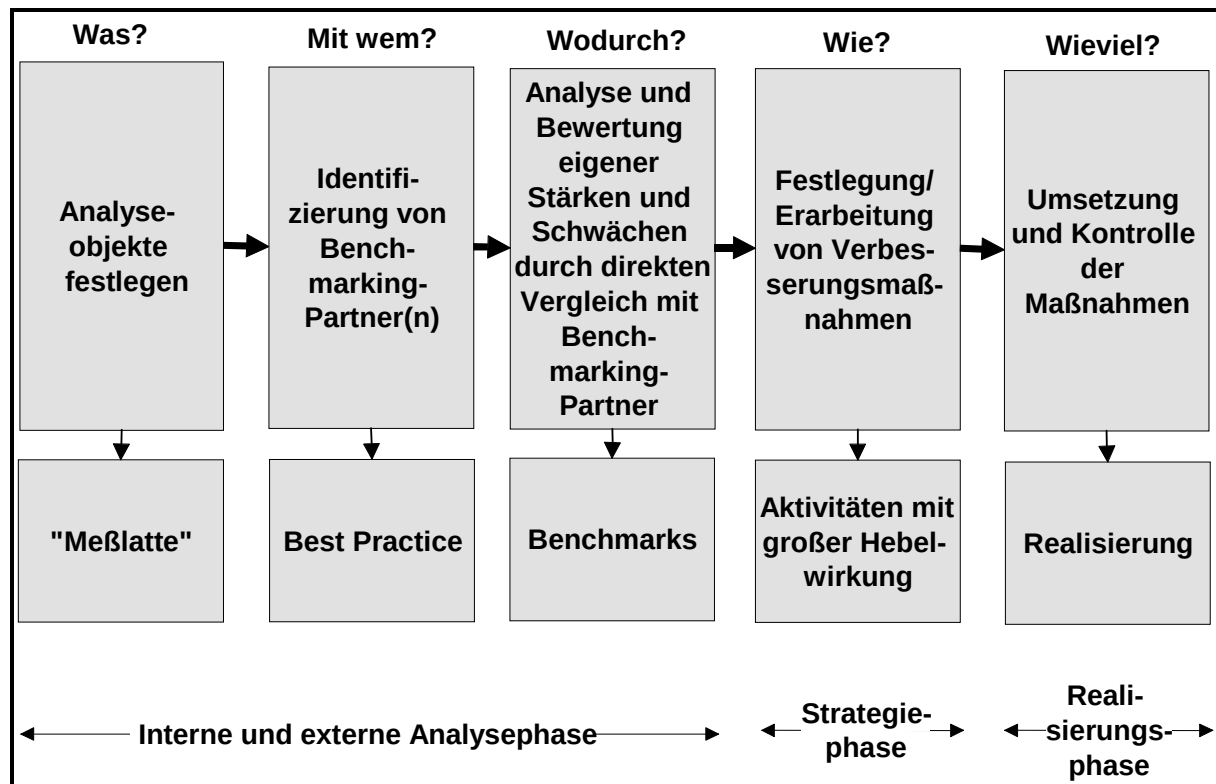


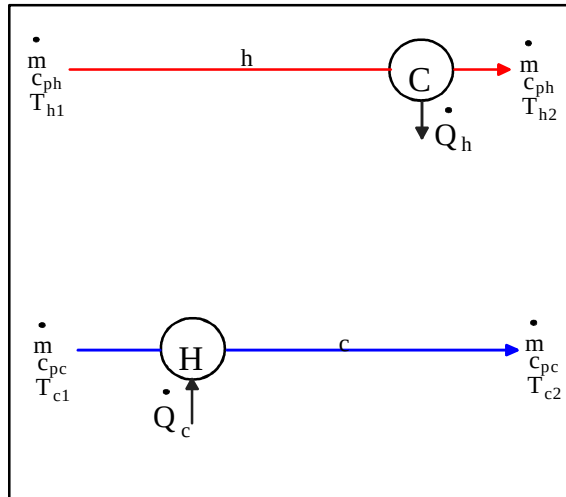
Abb. 3.6-1: Die fünf Phasen des Benchmarking-Prozesses [3-2]

3.6.2 Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse ist ein Instrument zur energetischen Bewertung von Systemen. Insbesondere ein Vergleich vor und nach Optimierungsmaßnahmen gibt Aufschluß über die erzielten Verbesserungen.

Die Erwärmung eines kalten Stoffstroms erfolgt in den meisten Fällen mittels Primärenergie. Dabei ergibt sich jedoch ein hoher Exergieverlust, da Primärenergie hochwertige Energie ist. Somit ergibt sich ein hohes Optimierungspotential, wenn zum Aufheizen des kalten Stromes ein warmer Strom, der prozeßbedingt gekühlt werden muß, zur Verfügung steht. Mittels Wärmeintegration kann ein sich zwangsläufig ergebender Exergieverlust minimiert werden. **Abb. 3.6-2** veranschaulicht das Prinzip der Wärmeintegration anhand von zwei Strömen. Dabei wird ein heißer Stoffstrom (h) vom Massestrom $\dot{m}_h$, der spezifischen Wärmekapazität c_{ph} und der Anfangstemperatur T_{h1} prozeßbedingt auf eine Endtemperatur

T_{h2} abgekühlt. Vereinfachend kann von einem isobaren Prozeß ohne Phasenwechsel und konstanter Wärmekapazität ausgegangen werden.



Legende:

c	cool stream	$\dot{m}$	mass flow
C	cooler	c_p	heat capacity
h	heat stream	T	temperature
H	heater	$\dot{Q}$	heat flow

Abb. 3.6-2: Zustandsänderung zweier Stoffströme ohne Wärmeintegration [3-21]

Basierend auf dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h2} - T_{h1}) < 0 \quad (3.6-1)$$

für den abzuführenden Wärmestrom ($\dot{Q}_h$) und

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) > 0 \quad (3.6-2)$$

für den kalten Strom.

Wie bereits zum Beginn des Kapitels aufgeführt wurde, wäre ein hoher Verbrauch an Primärenergie und Einsatz von Kühlmittel nötig, um beide Ströme aufzuheizen bzw. abzukühlen.

Abb. 3.6-3 stellt dar in welchem Maße die kombinierte Heiz- und Kühlaufgabe durch interne Wärmeübertragung bewerkstelligt werden kann.

Die beiden Stoffströme werden durch die Endtemperaturen sowie über die Wärmekapazitätsströme ($\dot{m}c_p$), welche die Steigungen der Geraden beschreiben, definiert.

Dabei wird der heiße Stoffstrom als Gerade im $T, \dot{H}$ -Diagramm abgebildet, welche von hoher Temperatur und hoher Enthalpie zu niedriger Temperatur und niedriger Enthalpie verläuft. Dagegen verläuft der kalte Strom vom niedrigen zum hohen Niveau.

Aus der Bedingung das bei einer Wärmeübertragung die Temperatur des heißen Stoffstromes nicht niedriger sein darf als die des Kalten, ergeben sich Grenzen für die Wärmeintegration. (2. Hauptsatz)

Unter der Bedingung $(\Delta T)_{\min} = 0$ kann die kalte Gerade so weit parallel nach links verschoben werden, bis sie die heiße Gerade berührt. Der Berührungspunkt der beiden Geraden wird als "Pinch" bezeichnet.

Der schraffierte Bereich stellt den durch inneren Wärmetransfer übertragenen Wärmestrom $\dot{Q}_T$ dar.

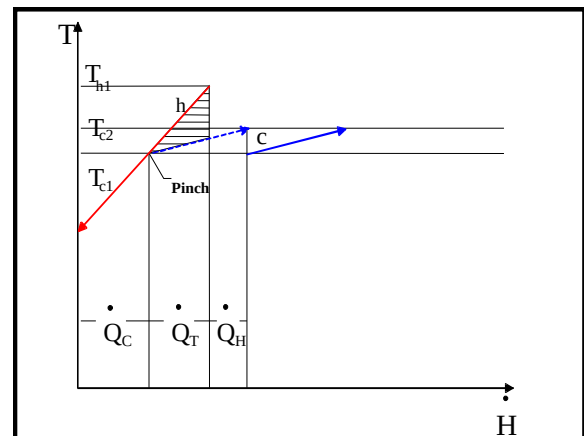


Abb. 3.6-3: Wärmeintegration bei zwei Stoffströmen [3-21]

Um die Geraden auf die geforderten Endtemperaturen (T_{c2}, T_{h2}) zu bringen, muß zusätzlich Wärme

$$|\dot{Q}_C| = |\dot{Q}_h| - |\dot{Q}_T| \quad (3.6-3)$$

bzw.

$$|\dot{Q}_H| = |\dot{Q}_c| - |\dot{Q}_T| \quad (3.6-4)$$

zu- oder abgeführt werden.

Diese Wärmeströme sind aber wesentlich kleiner als die durch

$$\begin{aligned}\dot{Q}_h &= \dot{m}_h c_{ph} (T_{h2} - T_{h1}) < 0 \\ \dot{Q}_h &= \dot{m}_h c_{ph} (T_{h2} - T_{h1}) < 0\end{aligned}\quad (3.6-1)$$

bzw.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_c &= \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) < 0 \\ \dot{Q}_c &= \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) > 0\end{aligned}\quad (3.6-2)$$

gegebenen Wärmeströme, die ohne Wärmeintegration erforderlich wären.

Durch eine optimale Wärmeintegration kann somit die Heiz- bzw. Kühlaufgabe mit minimalem Exergieverlust realisiert werden.

Die Pinch-Analyse gestaltet sich schwieriger, wenn mehrere Ströme betrachtet werden.

Dafür müssen die einzelnen heißen und kalten Ströme aufsummiert werden. Der heiße Strom stellt dabei eine Wärmequelle und der kalte eine Wärmesenke dar.

Die Darstellung erfolgt ebenfalls in einem $T, \dot{H}$ -Diagramm.

Zum Beginn der Analyse werden die verschiedenen Ströme in Temperaturintervalle eingeteilt. **Abb. 3.6-4** zeigt die Temperaturintervalle, welche durch die Anfangs- und Endtemperaturen der Stoffströme gebildet werden.

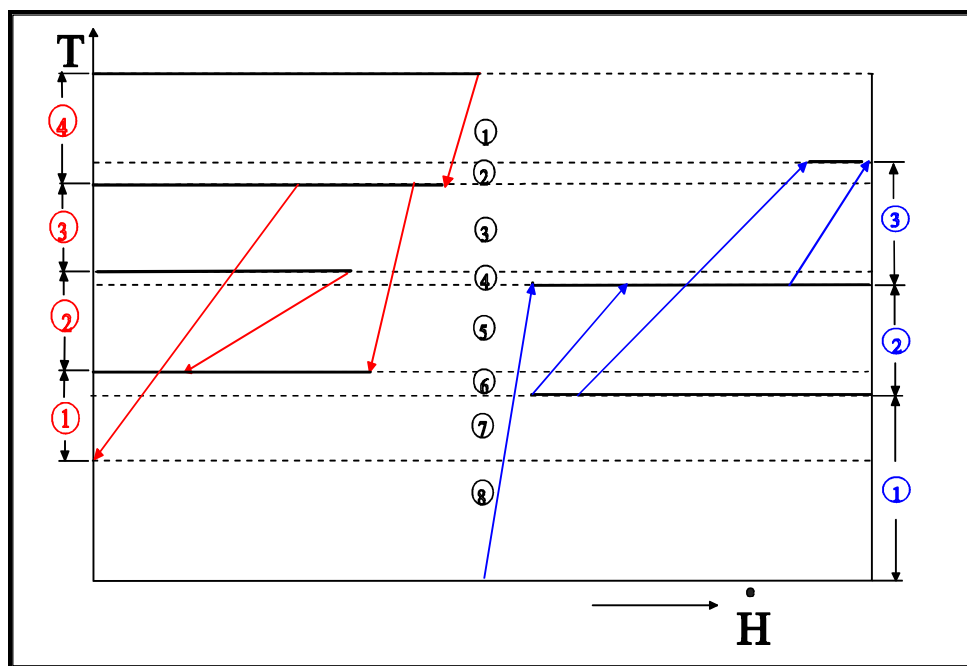


Abb. 3.6-4: Temperaturintervalle der heißen und kalten Stoffströme [3-21]

Die summarische Enthalpieänderung der heißen Stoffströme beträgt in jedem einzelnen Intervall i:

$$(\Delta \dot{H}_h)_i = \sum_j (\dot{m}_c)_j (\Delta T)_i \quad (3.6-5)$$

mit $(\Delta T)_i$ als dem Temperaturintervall i und $\sum_j (\dot{m}_c)_j$ als der Summe über alle j heißen

Wärmekapazitätsströme in diesem Temperaturintervall.

Das gleiche gilt für die kalten Stoffströme, welche aus der Analyse der kalten Ströme nach

$$(\Delta \dot{H}_c)_i = \sum_j (\dot{m}_c)_j (\Delta T)_i \quad (3.6-6)$$

berechnet werden.

Abb. 3.6-5 zeigt die Summenkurven der kalten und heißen Stoffströme.

$\dot{Q}_c$ entspricht der Wärmestrommenge, welche dem kalten Strom zugeführt werden müsste, um die erforderliche Endtemperatur zu erreichen. Die maximal mögliche Wärmeintegration bei einem Gleichgewichtsprozeß wird durch die Parallelverschiebung der kalten Summenkurve nach links bis zum Berührungspunkt mit der heißen Kurve gefunden.

Die Wärmestrommenge, welche im inneren Wärmeaustausch zwischen den heißen und

kalten Strömen übertragen wird, wird mit $\dot{Q}_T$ bezeichnet.

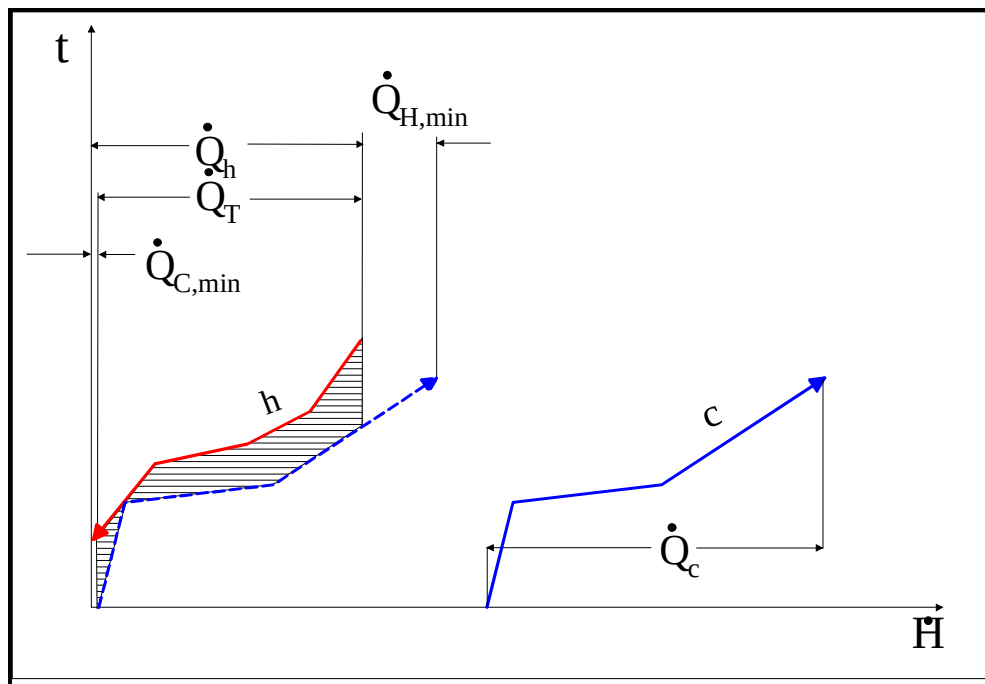


Abb. 3.6-5: Summenkurven und optimale Wärmeintegration (schematisch) [3-21]

Um die geforderten Endtemperaturen der Stoffströme zu erreichen, müssen zusätzlich der Wärmestrom $\dot{Q}_{H,min}$ zugeführt bzw.

$\dot{Q}_{C,min}$ abgeführt werden. Sie repräsentieren den Mindestaufwand an externer Wärmezufuhr bzw. -abfuhr.

Zur Ermittlung der optimalen Wärmeintegration wird ein Algorithmus, welcher auf der sogenannten Wärmekaskade beruht, verwendet. Dadurch ist eine schnellere und genauere Berechnung von Hand bzw. auf einem Computer möglich.

Zu Beginn der Aufstellung der Wärmekaskade werden die Temperaturintervalle (Abb. 3.6-4) aller Stoffströme festgelegt. Sie sind durch die Eingangs- und Austrittstemperaturen der Stoffströme definiert. Ausgehend von der höchsten Prozeßtemperatur, wird für jedes der acht Temperaturintervalle die Energiebilanz aufgestellt.

Anhand der Berechnung des Wärmestroms:

$$\dot{Q}_i = \left[\sum_c (\dot{m} \cdot c_p)_c - \sum_h (\dot{m} \cdot c_p)_h \right] (\Delta T)_i \quad (3.6-7)$$

kann die Differenz des von den kalten Stoffströmen summarisch aufzunehmenden und des von den heißen Strömen summarisch abzugebenden Wärmestroms ermittelt werden. Auf diese Weise werden in einem jedem Temperaturintervall die Wärmeüberschüsse $\dot{Q}_i < 0$ bzw. die Wärmedefizite $\dot{Q}_i > 0$ ermittelt.

Durch Addition der Wärmeüberschüsse bzw. -defizite für jedes Temperaturintervall i werden kumulierte Überschüsse bzw. Defizite berechnet, nach

$$\Delta \dot{Q}_i = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dots + \dot{Q}_n \quad (3.6-8)$$

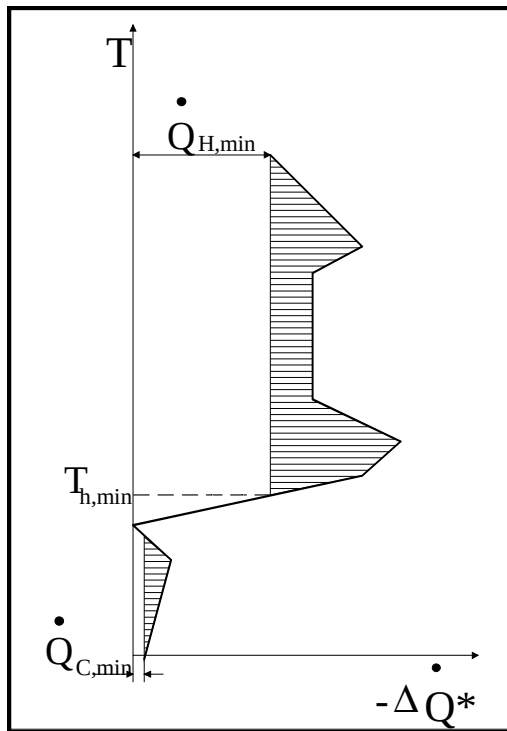


Abb. 3.6-6: Wärmestromprofil bei optimaler Wärmeintegration (schematisiert) [3-21]

Sollte in einem höheren Temperaturintervall ein Wärmeüberschuß existieren, so kann dieser genutzt werden, um im nachfolgenden Intervall eventuelle Defizite auszugleichen. Die Wärme wird stets auf die nächst tiefer liegende Temperatur übertragen, im Sinne einer Kaskade.

Dabei gilt es, das größte kumulierte Wärmedefizit durch externe Wärmezufuhr zu kompensieren.

Es ergeben sich die Netto-Wärmedefizite bzw. Netto-Wärmeüberschüsse zu

$$\Delta \dot{Q}_i^* = (-\Delta \dot{Q})_{\max} + \Delta \dot{Q}_i \quad (3.6-9)$$

und es gilt

$$\Delta \dot{Q}_1^* = (-\Delta \dot{Q})_{\max} = \dot{Q}_{H,\min} \quad (3.6-10)$$

sowie

$$\Delta \dot{Q}_n^* = (-\dot{Q})_{\max} + \Delta \dot{Q}_n = \dot{Q}_{K,\min} \quad (3.6-11)$$

wenn 1 das oberste und n das unterste Temperaturintervall der Wärmekaskade ist.

In **Abb. 3.6-6** werden die Wärmeüberschüsse durch einen negativen Anstieg des Wärmestromprofils charakterisiert. Die Temperatur nimmt dabei ab.

Dabei werden die Wärmeüberschüsse durch die mit einem positiven Anstieg gekennzeichneten Wärmedefizite abgebaut.

An der Berührungsstelle der beiden Summenkurven, dem "Pinch", wird $\Delta \dot{Q}_i^* = 0$.

Der mindestens zuzuführende Wärmestrom $\dot{Q}_{H,\min}$ muß nicht bei höchster Prozeßtemperatur aufgebracht werden, sondern kann bei einer wesentlich niedrigeren Temperatur $T_{h,\min}$ zugeführt werden.

Dies bedeutet eine Qualifizierung der exergetischen Anforderungen an das Betriebsmittel.

Anhand einer gezielten Wärmeintegrationsanalyse kann der minimale Aufwand an Kühl- bzw. Heizleistung, sowie die Mindesttemperatur des Betriebsmittels ermittelt wird.

3.7 Simulations- und Analyse-Programme

3.7.1 Programmauswahl

Als Hilfsmittel zur Modellierung eines Prozesses stehen verschiedenste Programmsysteme zur Auswahl. Man kann grob drei verschiedene Programmtypen unterscheiden. Dies sind:

a) Offene Bilanzierungs- und Simulationsprogramme

Diese Programme bieten die höchsten Freiheitsgrade, aber erfordern auf der anderen Seite auch den höchsten Programmier- bzw. Arbeitsaufwand. Dieser Gruppe gehören die folgenden Programme an:

- o MatLab mit SimuLink (MathWorks Inc.)
- o MassBal (Sacda)
- o Genesis (Iconics)
- o G2 (Gensym)

MATLAB ist ein weit verbreitetes Programm zur Datenerfassung, Datenanalyse und -auswertung, Visualisierung und Bildverarbeitung, Planung und Entwicklung von Algorithmen, Modellbildung und Simulation sowie zur Programmierung und Entwicklung von Anwendungen. In Verbindung mit der *SimuLink*-

Bibliothek Ergänzungsprogramm ist die Durchführung von Simulationen möglich. (www.mathworks.de)

MassBal ist ein script-basierendes Programm zur Berechnung von Massenbilanzen. Die Modelle werden aus Basis-Modulen wie z.B. „Adder“ und „Divider“ zusammengesetzt. Es ist möglich diese Basismodule zu Gruppenmodulen zusammenzusetzen, wie z.B. beim mitgelieferten „Brown-Stock-Wäscher“. Zum Zeichnen der Flußdiagramme und zum Erstellen der Scripte wird als graphische Oberfläche das Programm *CadSim* mitgeliefert.

GENESIS ist ein Programmsystem, daß für die Prozeßsteuerung und –visualisierung konzipiert wurde. Es hat umfangreiche Schnittstellen zu externen Geräten. Mit der Off-Line-Version wird auch ein spezielles Programm-Paket für die Prozeßsimulation angeboten. Die graphische Darstellung erfolgt mit Hilfe eines Zeichenprogramms (*GraphWorX32*) mit dem auch dynamische Verknüpfungen zum Prozeß z.B. die Darstellung von Büttenfüllständen realisiert werden können. Die Simulation, Prozeßdatenübernahme, Aufzeichnung von Trends usw. erfolgt jeweils mit eigenen Programmmodulen. (www.iconics.com)

G2 ist ein auf einer Wissensdatenbank basiertes Echtzeit-Expertensystem für die Datenerfassung, -auswertung, Prozeßsteuerung und –simulation. G2 ist vollständig objektorientiert und wird mittels eigener Programmiersprache programmiert. Es sind keine speziell für die Papiertechnik vorgefertigten Modulbibliotheken vorhanden. Diese können aber im G2 selbst programmiert werden und können dann allen weiteren G2-Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. (www.gensym.com)

ASPEN Customer Modeller™ (ACM) ist als ähnlich wie das Expertensystem G2 als offenes System konzipiert. Es wird ohne Datenbank ausgeliefert, der Import der *ASPEN PLUS™*–Stoffdatenbank ist jedoch möglich. Es ist Bestandteil der *ASPEN ENGINEERING SUITE* und eine sinnvolle Ergänzung zum *ASPEN PLUS™*.

b) Spezielle Simulationsprogramme

Diese Simulationsprogramme beinhalten bereits die umfangreiche Modulbibliotheken. Im einzelnen sind dies:

- o Pro II (Simulation Sciences Inc.)
- o HYSYS (AEA Technology)
- o ASPEN PLUS™ (Aspen Technology, Inc.; Cambridge)
- o IDEAS™ (amec Technologies)
- o BALAS (VTT Processes: Technical Research Center of Finland)
- o FlowMac™ (Papermac AB)
- o WinGEMS (Pacific Simulation)

Die Programme *Pro II* und *HYSYS* haben ihren Schwerpunkt bei der Berechnung und Simulation von petrochemischen Prozeß. Für den Bereich der Chemie, Petrochemie und Pharmazie besteht ein umfangreiches Angebot an Simulationsblöcken und Komponenten.

Das Programm *ASPEN PLUS™* ist spezialisiert für verfahrenstechnische Prozesse. Es besitzt eine umfangreiche Stoffdatenbank - ca. 2000 Stoffe, die ständig aktualisiert wird – bisher allerdings keinen Faserstoff. Es wird erfolgreich in der Verfahrenstechnik angewendet z.B. bei der Planung und Auslegung von Anlagen aber auch bei der Optimierung von Zyklonen, Wärmeübertragern, Verdampfern, Trennaggregaten. Es kann direkt durch weitere Programme aus der *ASPEN ENGINEERING SUITE™*, wie z.B. *ASPEN PINCH™*, erweitert werden.

Das Programm *IDEAS™* (Integrated Design Engineering with Advanced Simulation) ist ein blockorientierter dynamischer Simulator. *IDEAS™* wird von der PTS (Papiertechnische Stiftung) erfolgreich zur statischen und dynamischen Simulation von einzelnen Prozessen der Papierherstellung eingesetzt. (J. Balderud, Chr. Haag and D. Wilson: Large scale dynamic paper machine models: March 23, 2001)

BALAS wurde von VTT Processes, dem Technischen Forschungszentrum in Finnland entwickelt. Es enthält eine umfangreiche Stoffda-

tenbank und ist mit dem Ziel der Bilanzierung von Masse- und Energieströmen entwickelt worden. Dieses Programm wird in Finnland von verschiedenen Papierfabriken, Ingenieurbüros und Maschinenherstellern genutzt.

Das Programm bietet einen Link zu Excel, um dem Nutzer auf dieser Basis die Möglichkeit von unterschiedlichen Darstellungen und Berechnungen zu geben. In **Kapitel 4** wird detailliert auf den Programmaufbau von *BALAS* eingegangen. (S. Kaijaluoto and J. Manninen: *BALAS – Process Simulations Software*)

Das Programm *FlowMacTM* wurde zur Bilanzierung von Masseströmen entwickelt in Papierfabriken entwickelt. Es können bis zu 20 Inhaltsstoffe verarbeitet werden und das Programm berechnet die Wassertemperatur automatisch. *FlowMacTM* besteht aus einer Reihe von Bibliotheken, die insgesamt über 500 Blöcke, wie Pumpen, Ventile, Meßgeräte, Stoffaufläufe usw. beinhalten.

(FlowMacTM: A Tools for Modelling and eEvaluation of Pulp and Paper making processes for Decission Support: www.papmac.se: Papermac AB)

WinGEMS ist Produkt der Firma Pacific Simulation und basiert auf der GEMS-Software, die am Lehrstuhl für chemische Verfahrenstechnik der Universität von Idaho entwickelt wurde. *WinGEMS* ist auf dem amerikanischen Kontinent sehr verbreitet. Dieses Bilanzierungs- und Simulationsprogramm, daß seinen Schwerpunkt in der Zellstoff- und Papierindustrie hat, ist ebenfalls blockorientiert und beinhaltet ca. 140 getestete Blöcke. (www.pacsim.com)

c) Spezielle Analyseprogramme

In diesem Punkt sind die Programme für die Pinch-Analyse zusammengefaßt. Im einzelnen sind sollen hier aufgeführt werden:

- o SuperTarget (Linnhoff March)
- o Steam97 (Linnhoff March) - Excel Add-Inn
- o PinchExpress (Linnhoff March)
- o Water Target (Linnhoff March) ASPEN PINCHTM (Apen Technologies, Inc.)

Die Programme für die Pinch-Analyse (Super-Target, Steam97, PinchExpress und Water-Target) setzen eine Bilanzierung des betrachteten Prozesses voraus.

Die Programme SuperTarget und Pinch-Express sind auf die Energie-Pinch-Analyse und das Programm WaterTarget ist auf die Wasser-Pinch-Analyse spezialisiert. *ASPEN PINCHTM* ist Bestandteil der *ASPEN ENGINEERING SUITETM* für die Analyse und Konstruktion von Wärmetauscher-Netzwerken.

Ein wesentlicher Faktor für die Auswahl der Software für das Pilotprojekt ist das Vorhandensein einer Stoffdatenbank, die die wesentlichen zu betrachtenden Roh- und Hilfsstoffe für die Papiererzeugung beinhaltet. Ein weiteres Kriterium ist das Vorhandensein einer Moduldatenbank mit Maschinen und Apparaten, die für den Aufbau einer Simulation einer Papierproduktionslinie erforderlich sind. Des weiteren ist das Vorhandensein einer leistungsstarken Solver-Engine vorteilhaft für die schnelle Berechnung einer Simulation.

Für die gestellte Aufgabe – die Optimierung von Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffsystemen – ist die Entscheidung zugunsten von *BALAS* gefallen. *BALAS* steht für Balance, d. h. ein Programm zur Bilanzierung von Kreisläufen. *BALAS* wurde speziell für Betrachtungen von Masseströmen und Energieströmen in Papierfabriken entwickelt. Die aktuelle Version ist für statische Simulationen mit einer schnellen Solver-Engine für die Bilanzierung ausgerüstet und bietet gegenüber flußbasierenden Berechnungen den Vorteil einer schnellen Konvergenz.

Da die aktuelle Version noch keine Pinch-Analyse enthält, wurde zur Durchführung der

Pinch-Analyse das Matrizenberechnungsprogramm „MATLAB“ ausgewählt, was in der Ingenieurtechnik zur Lösung mathematischer Probleme weit verbreitet ist.

Die **Tab. 3.7-1** stellt abschließend die anfallenden Kosten der einzelnen Programme dar.

Tab. 3.7-1: Kostenübersicht der betrachteten Programme (Stand Nov. 2000)

Programme	Licence		
	academic	non commercial research	commercial
SuperTarget (Linnhoff March)	500 GBP (first year) (750 network) + 300 GBP/a	need more information	8.000 GBP
Pinch-Express (Linnhoff March)	none	need more information	4.000 GBP
WaterTarget (Linnhoff March)	500 GBP (first year) (750 network) +300 GBP/a	need more information	5.000 GBP
ASPEN PLUS (Aspen Technologies)	750 USD/a		30.000 DEM/a
ASPEN ACM (Aspen Technologies) (Aspen Customer Modeler)	750 USD/a		30.000 DEM/a
BALAS (VTT Energy, Finnland)	10 % of commercial fee		10.000 EUR + 1.000 EUR/a
MATLAB (Math Works)	1.000 DEM/a		
WinGEMS (Pacific Simulation)	500 USD (min. 10)	6.250 USD (7.250 network)	12.500 USD (14.500 USD)

3.7.2 Informationsveranstaltungen über Simulationssoftware

Die Arbeit mit Prozeßsimulationen erfordert aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der angebotenen Programme einen regelmäßigen Vergleich der am Markt verfügbaren Tools. Dabei ist es vorteilhaft, die aktuellen Erfahrungen von verschiedenen Nutzern regelmäßig auszutauschen.

Daher wurde am Dienstag, den 22.05.01, und Mittwoch, den 23.05.01, eine Informationsveranstaltung mit dem Titel: „BALAS – Simulationsprogramm für Papier- und Papierstoff-Prozess-Systeme: Information, Präsentation und Nutzung“ durchgeführt. Auf dieser Veranstaltung wurde detailliert über die Technik und Nutzungsmöglichkeiten von BALAS informiert. Es wurden den Teilnehmern die beiden Teilprogramme „FLOSHEET“ und „BALAS“ sowie

Möglichkeiten zum dynamischen Datenaustausch mit Hilfe des BALAS-EXCEL-Links präsentiert.

Am Freitag, den 02.11.01, und Samstag, den 03.11.01, wurde ein zweites Seminar mit dem Titel „Simulationsprogramme für Papier- und Papierstoff-Prozess-Systeme: Information, Präsentation und Nutzung“ durchgeführt. Während dieses Seminars wurden die Programme *IDEASTM*, *AUDITTM* und *EXTENDTM* sowie BALAS vorgestellt.

Dr. M.V. Karkare von der Firma amec Technologies (Bellingham, Georgia) gab einen Überblick zu Aufbau, Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten von *IDEASTM*. Die Preise sind in **Tab. 3.7-2** zusammengestellt.

Tab. 3.7-2: Kostenübersicht der verschiedenen IDEAS-Versionen (Stand Nov. 2001)

Version	Preis je Lizenz in USD
Bronze	8.000
Silver	13.000
Gold	25.000
Kodak	40.000
Akademische Universitätsversion	3.000 USD / a (unbegrenzte Anzahl)

Ein früherer Kritikpunkt aus einer Quelle aus dem Jahre 1998 – die mangelnde Performance konnte durch Weiterentwicklungen wie z.B. die Verwendung einer neuen *gPROMS*-Solver Engine zur Berechnung von Differentialgleichungssystemen ausgeräumt werden. Bei der aktuellen Version ist nur bei entsprechend großen Simulationsmodellen mit Geschwindigkeitsproblemen zu rechnen. Dieses Programm wird bei der Papiertechnischen Stiftung PTS erfolgreich zur Simulation von Wasserkreisläufen eingesetzt. Für papiertechnische

Prozesse stehen verschiedene Blockmodelle z.B. für den Stoffauflauf zur Verfügung.

Ass. Prof. Mag. Dr. M. Hofer stellte zusammen mit M. Dipl.-Ing. Mayer eine Kombination der beiden Programme *AUDITTM* und *EXTENDTM* vor. Die vorgestellte Simulation wurden nicht nur prozeßbezogen genutzt, sondern auch, um betriebswirtschaftliche Datenerfassungs- und Informations-Systeme (z.B. *SAP R/3*) zu unterstützen und zu kontrollieren.

Als dritte Software wurde *BALAS* von Research Professor K. Edelman vorgestellt.

4 BALAS – Simulationssoftware für Papierstoff- und Papiersysteme

4.1 Prozeßsimulation

BALAS 2.5 ist ein “steady state simulations” - Paket, mit dem eingeschwungene Zustände simuliert werden können. Es findet Verwendung bei der:

- o Kalkulation von Masse-, Energie- und Exergiebilanzen
- o Analyse von Wärmeintegration und Wärmerückgewinnung
- o “Was wenn” Analyse
- o Prozeßoptimierung
- o Entwicklung von Modellen für verschiedene Grundoperationen

Als Prozeßsimulation dient es vor allem zur Nachbildung von realen Prozessen in der chemischen und papiererzeugenden Industrie. Diese Prozesse variieren von einem einfachen Verdünnungsprozeß, welcher in

Abb. 4.1-1 gezeigt wird, bis hin zur Modellierung von kompletten Papiermaschinen oder sogar Papierfabriken.

Das Ziel der Simulation ist es, die Verfahren in diesen Prozessen fehlerfrei zu modellieren, um Vorhersagen zu treffen und Optimierung und “Was wenn” – Kalkulationen durchzuführen.

Ströme und Module bilden die Basis der Prozeßsimulation. Die Ströme liefern die Bestandteile, Energie und Informationen für den Prozeß, während die Module diese konvertieren.

Abb. 4.1-1 zeigt eins der Module aus denen der Simulationsprozeß aufgebaut ist.

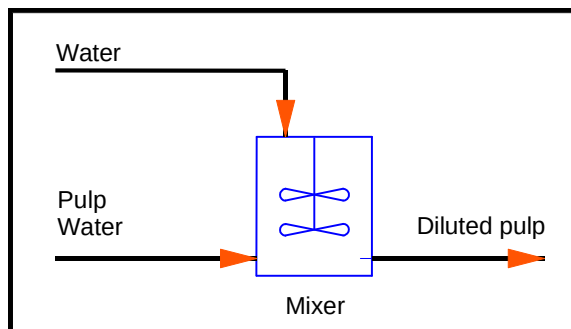


Abb. 4.1-1: Modul mit verknüpften Prozeßströmen im Fließbild [4-5]

Das Fließbild beinhaltet ein Modul, einen Mixer, der alle Eingangsströme mischt und einen Ausgangsstrom produziert. In diesem Fließbild wird ein Eingangsstrom, bestehend aus Faserstoff und Wasser, durch einen zweiten Eingangsstrom, einen Wasserstrom, verdünnt.

Werden die Masseströme der Eingangsströme eingegeben, dann berechnet das Modul den Wert des Ausgangsstroms, aber der Simulator berechnet mehr als nur die Masseströme. Es werden auch Temperaturen, Stoffdichten, u.s.w. berücksichtigt.

In **Abb. 4.1-2** ist ein etwas komplizierterer Prozeß dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Bleichprozeß, bei dem einem Faserstrom Bleichchemikalien zugegeben werden. Anschließend wird dieser gewaschen und die ungenutzten Bleichchemikalien werden den frischen Bleichchemikalien wieder zugeführt.

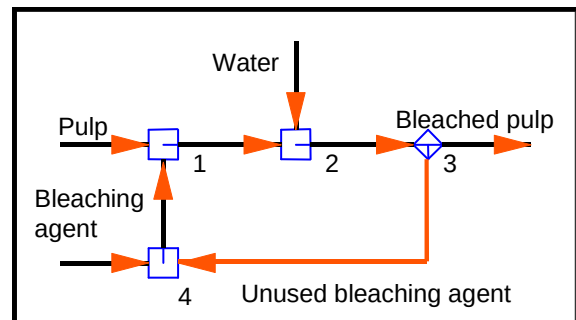


Abb. 4.1-2: Vereinfachter Bleichprozeß [4-5]

Diese Art von Verbindung wird als Iteration bezeichnet und erschwert die Kalkulation eines statischen Zustands erheblich, da die Menge der ungenutzten Bleichchemikalie nicht bekannt ist.

Ein sequentieller Simulator wie BALAS arbeitet die Simulation wiederholend Unit für Unit ab. Die Prozeßinformation für die Berechnungen der Units wird von Unit zu Unit, als Mittelwert der Prozeßströme, die mit der Unit verbunden sind, transportiert. Ein Iterationsschema ist notwendig, um das Fließbild in einen stationären Zustand zu überführen, wenn das Fließbild Kreislaufströme enthält oder wenn Design-Zwänge eingeführt worden sind.

Der einfachste Weg ein Iterationsproblem zu lösen, ist die direkte Substitution. Der Haupt-

nachteil ist, daß diese keine effiziente Lösungen von Konstruktionsproblemen erlaubt. Ein Sekantenalgorithmus kann genutzt werden, um die Information von Kreisläufen, erzeugt durch Design-Zwänge und korrespondierenden Design-Variablen sowie den anderen Kreisläufen im Prozeß, simultan zu konvergieren. In der Praxis funktioniert diese Annäherung selten, denn die Sekantenmethode kann Kopplungen zwischen Variablen, welche für das Design-Problem sehr signifikant sein können, nicht berücksichtigen.

Der Quasi-Newton (QN)-Solver in BALAS ist in der Lage Kopplungen zwischen verschiedenen Variablen zu berücksichtigen. Der große Rechenaufwand, der in Verbindung mit der Berechnung der partiellen Ableitung erforderlich ist, wird durch Nutzung einer Update-Prozedur vermieden, indem die aktuelle Annäherung die alte Jakobi-Matrix von der vorhergehenden Iteration ersetzt. Die Methode konvergiert lokal mit einer Konvergenz zweiter Ordnung. In der Praxis bedeutet eine Konvergenz zweiter Ordnung, daß sich die Zahl der signifikanten Variablen etwa in jeder Iteration verdoppelt.

BALAS ist instande, Prozeßdesigns mit fester Prozeßstruktur zu optimieren. Diese Art der Optimierung kann in eine Form eines NLP-Problems (Nichtlineare Programmierung) überführt werden, mit der Voraussetzung, daß das optimierte Objekt in einem statischen Zustand ist und im Arbeitsbereich liegt.

4.2 BALAS Programmstruktur

Das BALAS-Simulationsprogramm unterteilt sich in 4 Hauptbereiche:

- o Das "FloSheet" – Programm wird für die graphische Darstellung des Prozeßlayouts verwendet.
- o Das "BALAS User Interface" dient als Interface zwischen dem Nutzer und dem Simulator.
- o Die "Database" beinhaltet alle Daten, welche vom Simulator benötigt werden.
- o Der "Simulator" führt die aktuellen Kalkulationen und Simulationen durch.

Abb. 4.2-1 zeigt die verschiedenen Bereiche der BALAS Software und den Datenfluß zwischen ihnen. Er wird durch die Pfeile symbolisiert.

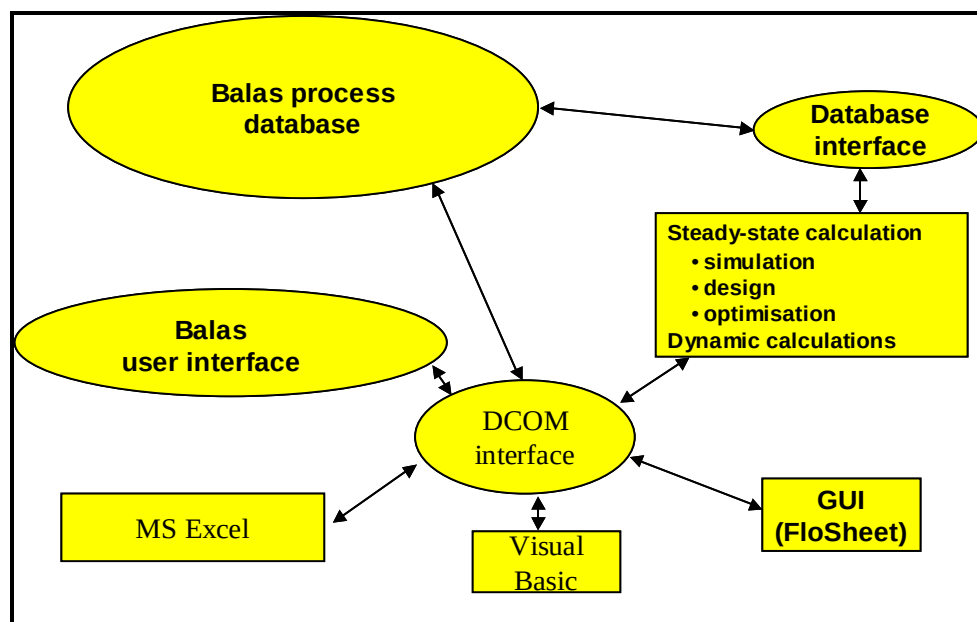


Abb. 4.2-1: BALAS 2.5 Softwarestruktur.

4.3 Berechnung der spezifischen Wärmekapazität in BALAS

4.3.1 Allgemeines

Die spezifische Wärmekapazität gibt die Wärmemenge an, die notwendig ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes oder eines Stoffgemisches, Wärmeenergie zu speichern und ist somit eine entscheidende Größe für die Berechnung der Enthalpie von Stoffströmen und damit für die Energiebilanz einer verfahrenstechnischen Anlage.

Es wird dabei unterschieden zwischen der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v . Diese Parameter sind definiert als partielle Ableitungen der inneren Energie u bzw. der Enthalpie h nach der Temperatur bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen [102]. Die Anwendung dieser Beziehungen wird im Kapitel 4.4 beschrieben.

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \text{ bzw. } c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (4.3-1)$$

Im allgemeinen können verfahrenstechnische Systeme der Zellstoff-, Holzstoff- und Papierindustrie als offene Systeme betrachtet werden, d.h. der Druck bleibt im Regelfall konstant bzw. ändert sich nur sprunghaft, während das spezifische Volumen eines Stoffstromes nicht beschränkt wird. Das bedeutet, daß der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p als Stoffparameter eine Schlüsselrolle zukommt.

Im folgenden wird beschrieben, wie die spezifische Wärmekapazität für die einzelnen Stoffe einer Simulation in BALAS berechnet wird. Dabei wird zwischen drei Stoffgruppen unterschieden:

- o Chemisch reine Fluide
- o Feststoffe und Stoffgemische
- o Sonderfall: Wasser

Die Unterteilung ergibt sich aus den Quellen, aus denen die Stoffparameter entnommen wurden. Die Daten für chemisch reine Fluide wurden aus dem Buch Reid et al: The Properties of Gases and Liquids [4-17] entnommen und in der Datenbank *reid.dat* in BALAS hinterlegt. Feststoffe und Stoffgemische wurden von Paccot [4-19] untersucht; die hier ermittelten Parameter wurden in der Datei *ctp.dat* gespeichert.

4.3.2 Chemisch reine Fluide (*reid.dat*)

Die spezifische Wärmekapazität der in der Datenbank *reid.dat* enthaltenen Verbindungen wird aus der molaren Wärmekapazität für reale Gase ermittelt. Diese wiederum setzt sich zusammen aus der molaren Wärmekapazität für ideale Gase und einem Term, der in der Literatur mit Departure Function bezeichnet wird [4-17] und die Abweichung des realen Zustands vom Idealzustand abschätzt.

$$C_p = C_p^o + \Delta C_p \quad (4.3-2)$$

- mit:
- C_p - Molare Wärmekapazität des realen Gases
 - C_p^o - Molare Wärmekapazität des idealen Gases
 - ΔC_p - Departure Function der Wärmekapazität

Die Departure Function kann in zwei weitere Terme zerlegt werden:

$$\Delta C_p = (\Delta C_p)^{(0)} + \omega \cdot (\Delta C_p)^{(1)} \quad (4.3-3)$$

- mit:
- $(\Delta C_p)^{(0)}$ - Simple fluid contribution (Beitrag des einfachen Fluids)
 - $(\Delta C_p)^{(1)}$ - Deviation function (Abweichungs-Funktion)
 - ω - Pitzer acentric factor

Die Berechnungsvorschriften bzw. die Tabellen für diese drei druck- und temperaturabhängigen Variablen sind aus [4-17] entnommen und in der BALAS-Datenbank hinterlegt. Die molare Wärmekapazität des idealen Gases kann nach [4-17] ermittelt werden aus:

$$C_p^o = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad (4.3-4)$$

mit: C_p^o - Molare Wärmekapazität
des idealen Gases in
cal/(mol*K)
 T - Absolute Temperatur in K
 $A, B,$ - Stoffspezifische Konstan-
 C, D - ten

Die Konstanten A, B, C und D sind ebenfalls in der BALAS-Datenbank gespeichert und wurden aus [4-17] übernommen. Somit kann die molare Wärmekapazität einer chemischen Verbindung berechnet werden. Den obigen Berechnungsvorschriften folgend, liegt das Ergebnis zunächst in der Einheit cal/mol*K vor. Die spezifische Wärmekapazität in KJ/(kg*K) ergibt sich aus der Umrechnung der thermi-

schen Einheit Kalorie in Joule sowie unter Einbeziehung der molaren Masse der betrachteten Verbindung. Die Kalorie ist so definiert, daß die molare Wärmekapazität von Wasser ca. 1 cal/(mol*K) beträgt [4-18], somit ist 1 cal = 4,1868 J. Es sind zwei Arten von Kalorien definiert: Die thermochemische Kalorie (cal) wird u.a. in der Chemie und der Reaktionskinetik verwendet und ist definiert durch 1 cal = 4,1840 J. Die international steam table calorie (cal_{IT}) wird in der Wärmeenergie-technik angewendet; sie ist definiert durch 1 cal_{IT} = 4,1868 J. BALAS rechnet ebenfalls mit 4,1868 J, der Verständlichkeit halber wird hier die Kalorie aber allgemein mit cal abgekürzt. Damit kann die spezifische Wärmekapazität aus der molaren Wärmekapazität in cal/(mol*K) errechnet werden aus:

$$c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] = C_p \left[\frac{cal}{mol \cdot K} \right] \cdot 4,1868 \left[\frac{J}{cal} \right] \cdot M \left[\frac{g}{mol} \right] \quad (4.3-5)$$

mit: c_p - Spezifische Wärmekapazität
 M - Molare Masse

Mit dieser Formel werden die spezifischen Wärmekapazitäten aller Einträge der Datenbank *reid.dat* – mit Ausnahme von Wasser - berechnet.

4.3.3 Feststoffe und Stoffgemische (ctp.dat)

Die oben diskutierten Formeln sind ausschließlich für Fluide gültig. Abgesehen von Wasser sind fast alle Komponenten von Faserstoffsuspensionen Feststoffe, die zudem oft nicht eindeutig chemisch definiert sind. Dazu gehören unter anderem Faserstoffe (Hardwood, Softwood etc.), Füllstoffe (Calciumcarbonat etc.) sowie Prozeß- und Produkthilfsstoffe (Stärke, Retentionsmittel etc.) Für die Berechnung der molaren Wärmekapazitäten dieser Stoffe wird deshalb eine andere Formel verwendet [4-19]:

$$cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + \frac{c}{T^2} \quad (4.3-6)$$

mit: cp - Molare Wärmekapazität
des idealen Gases in
J/(mol*K)
 T - Absolute Temperatur in K
 $a, b,$ - Stoffspezifische Konstanten
 c, d

Die stoffspezifischen Konstanten a, b, c und d wurden in [4-19] ermittelt und sind in abgewandelter Form im BALAS-Quellcode gespeichert. Die Abwandlung besteht lediglich darin, daß die Werte in [100] auf kJ basierend angegeben sind, wogegen sie im Database Manager von BALAS auf J umgerechnet wurden. Unter Einbeziehung der molaren Masse kann die molare Wärmekapazität in die spezifische Wärmekapazität umgerechnet werden:

$$c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] = cp \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right] \cdot M \left[\frac{g}{mol} \right]$$

$$(4.3-7)$$

mit: c_p - Spezifische Wärmekapazität
 M - Molare Masse

4.3.4 Sonderfall: Wasser

Die chemische Verbindung Wasser spielt bei der Simulation von verfahrenstechnischen Anlagen für die Zellstoff-, Holzstoff- und Papier-Industrie eine tragende Rolle. In den Stoffströmen hat Wasser den größten Anteil, deshalb müssen Fehler, die durch Abschätzungen von Stoffeigenschaften entstehen, hier weitestgehend minimiert werden. Aus diesem Grund werden für die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser die sogenannten 1967 ASME Steam Tables verwendet. Diese Tabellen und Berechnungsformeln zur Beschreibung der Eigenschaften von flüssigem Wasser und Wasserdampf wurden 1967 vom International Formulation Committee (IFC) entwickelt und von der American Society of Mechanical Engineers (ASME) für die industrielle Anwendung angepasst und veröffentlicht.

Die Steam Tables sind im BALAS-Programmcodex gespeichert und werden unter anderem für die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von Wasser bzw. Wasserdampf in den Simulationen genutzt.

4.4 Berechnung der Enthalpie in BALAS

4.4.1 Grundlagen

Die energetische Zustandsgröße Enthalpie kann aus ingenieurtechnischer Sicht wie folgt erklärt werden: [4-20]

Die Enthalpie H ist die mit einem Stoffstrom über eine Systemgrenze transportierte stoffgebundene Energie, die nur vom inneren Zustand des Fluids an der Systemgrenze abhängt.

Sie ist definiert als die Summe der inneren Energie U und des Produkts von absolutem Druck p und Volumen V : $H = U + p \cdot V$, oder als spezifische Größen: [4-21]

$$h = u + p \cdot v \quad (4.4-1)$$

mit: h - Spezifische Enthalpie
 u - Spezifische Innere Energie
 p - Absoluter Druck
 v - Spezifisches Volumen

Das Attribut "spezifisch" kann sich in diesem Fall sowohl für die komplette Gleichung auf die absolute Masse oder auf die Einheit Mol beziehen.

Für technische Belange ist die Änderung der Enthalpie besonders wichtig. Für $h = h(T, p)$ gilt:

$$dh = du + p \cdot dv + v \cdot dp \quad (4.4-2)$$

Die Änderung der Inneren Energie wird unter Einbeziehung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für kompressible, abgeschlossene Systeme und innerlich reversible Prozesse eliminiert:

$$T \cdot ds = du + p \cdot dv \quad (4.4-3)$$

mit: s - Spezifische Entropie
 T - Absolute Temperatur

Daraus ergibt sich:

$$du = T \cdot ds - p \cdot dv \quad (4.4-4)$$

und somit für die Änderung der spezifischen Enthalpie

$$dh = T \cdot ds + v \cdot dp \quad (4.4-5)$$

Die spezifische Entropie ist sowohl druck- als auch temperaturabhängig: $s = s(p, T)$, daher ist

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T dp \quad (4.4-6)$$

Die partielle Ableitung der Entropie nach der Temperatur kann gemäß [4-21] ersetzt werden durch:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = \frac{c_p}{T} \quad (4.4-7)$$

mit: c_p - Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

Außerdem wird die partielle Ableitung der Entropie nach dem Druck durch eine der sogenannten Maxwell-Beziehungen, die Konsequenzen der Gibbs'schen Gleichungen sind, ersetzt: [4-21]

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad (4.4-8)$$

$$h(T, p) = h_0(T_0, p_0) + \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot dT + \int_{p_0}^p v \cdot dp - \int_{p_0}^p T_0 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot dp \quad (4.4-10)$$

4.4.2 Berechnung der Enthalpie von Stoffen und Stoffgemischen

Im Allgemeinen sind setzen sich sämtliche Stoffströme einer verfahrenstechnischen Anlage der Zellstoff-, Holzstoff- und Papierindustrie aus zwei oder mehr Komponenten zusammen. Die Berechnung der tatsächlichen Enthalpie eines solchen Stoffstromes setzt daher die genaue Kenntnis über die Art und die Menge der einzelnen Komponenten voraus, zusätzlich dazu auch das Zusammenwirken der unterschiedlichen Stoffe in der Mischung.

Für die Berechnung der Enthalpie eines Stoffstromes in BALAS wird davon ausgegangen, daß die Ströme als ideale Durchmischung aller Komponenten vorliegen. Weiterhin sind die Temperatur T_0 und der Druck p_0 im Referenzzustand für alle Stoffe gleich. Unter diesen Voraussetzungen und bei Kenntnis der Anteile der einzelnen Elemente am Gesamtmassenstrom kann die Enthalpie des Stoffgemisches additiv aus den Enthalpien der Komponenten ermittelt werden:

Die Enthalpieänderung in einem abgeschlossenen, kompressiblen System mit innerlich reversiblen Prozessen kann somit ausgedrückt werden durch:

$$dh = c_p \cdot dT + \left(v - T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right) \cdot dp \quad (4.4-9)$$

Für die thermodynamische Bewertung von Prozessen wird im Regelfall zwischen zwei Zuständen verglichen. Im Falle von BALAS sind dies der aktuelle Systemzustand und ein Referenzzustand (Index 0). Durch Integration von (4.4-9) erhält man:

$$h(T, p) = \sum_i x_i \cdot h_i(T, p) \quad (4.4-11)$$

mit: h - Spezifische Enthalpie des Stoffgemisches [kJ/kg]
 h_i - Spezifische Enthalpie der Komponente i [kJ/kg]
 x_i - Anteil der Komponente i am Gesamtmassenstrom

Für die verschiedenen Bestandteile eines Massenstroms muß nun die Gleichung (4.4-10) angewendet werden. Hier können wiederum Vereinfachungen getroffen werden, indem gasförmige Stoffe als ideale Gase betrachtet werden und Stoffe im festen und flüssigen Zustand als inkompressibel. Eine Ausnahme bildet dabei Wasser, worauf später noch näher eingegangen wird. Unter diesen Voraussetzungen gilt für Gase (außer Wasserdampf): [4-19]

$$\int_{p_0}^p v \cdot dp - \int_{p_0}^p T_0 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot dp = 0 \quad (4.4-12)$$

Für Feststoffe und Flüssigkeiten sind die druckabhängigen Zustandsänderungen sehr klein, es gilt somit:

$$\int_{p_0}^p v \cdot dp - \int_{p_0}^p T_0 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot dp \approx 0 \quad (4.4-13)$$

Für die Berechnung der Enthalpie in BALAS reduziert sich damit (4.4-10) auf:

$$h(T, p) = h_0(T_0, p_0) + \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot dT \quad (4.4-14)$$

Damit kann bei Kenntnis der spezifischen Wärmekapazität (bzw. der zu ihrer Berechnung notwendigen stoffspezifischen Konstanten; siehe **Kapitel 4.3**) und der Enthalpie in einem Referenzzustand die Enthalpie eines Stoffstromes bei einer beliebigen Temperatur T berechnet werden.

4.4.3 Definition des Referenzzustandes

4.4.3.1 Allgemeines

Die Berechnung der Enthalpie bei einer bestimmten Temperatur T und einem Druck p nach der Gleichung (4.4-14) setzt die Kenntnis der Enthalpie an einem Referenzpunkt voraus. Auf der Grundlage dieses Referenzpunktes werden die Enthalpiebetrachtungen der gesamten Simulation ausgeführt. Prinzipiell gibt es dabei zwei Möglichkeiten: zum einen ist ein Standard-Referenzpunkt festgelegt, zum anderen gibt es in BALAS die Möglichkeit, eine Bezugstemperatur festzulegen, bei der sämtliche Enthalpien 0 sind. Diese Bezugstemperatur könnte zum Beispiel die Eintrittstemperatur von Stoffströmen in das System sein. Allerdings ist die freie Festlegung der Bezugstemperatur nur anwendbar, wenn in der Simulation keine Reaktionen stattfinden, da dabei auch die Reaktionsenthalpien berücksichtigt werden müßten.

Die Reaktionsenthalpie ist die Differenz zwischen der Summe der Enthalpien der Reakti-

onsprodukte und der Summe der Enthalpien der Ausgangsstoffe [4-21]:

$$\Delta H = H_{prod} - H_{reac} \\ = \sum_i (N_i \cdot h_i)_{prod} - \sum_j (N_j \cdot h_j)_{reac} \quad (4.4-15)$$

mit: ΔH - Enthalpieänderung bei der Reaktion

H_{prod} - Enthalpie der Reaktionsprodukte (engl.: products)

H_{reac} - Enthalpie der Ausgangsstoffe (engl.: reactants)

N_i - Molanzahl der Komponente i

h_i - Molare Enthalpie der Komponente i

Die Berechnung der Reaktionsenthalpie aus den Enthalpien der einzelnen Komponenten erfolgt auf der Grundlage der Vereinbarung eines Standard Reference State für thermochemische Berechnungen ($T = 298,16 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar} = 101,325 \text{ kPa}$). Für diesen Zustand sind Stoffdaten umfassend tabelliert, ihre Anwendung setzt allerdings voraus, daß die Gesamtenergiebilanz auf den selben Referenzpunkt bezogen wird.

4.4.3.2 Standard-Referenzpunkt in BALAS

Aus den im letzten Abschnitt diskutierten Gründen werden in BALAS standardmäßig sämtliche Enthalpieberechnungen bezogen auf eine modifizierte Standardbildungsenthalpie bei einer Temperatur von $298,16 \text{ K}$ und einem Druck von $1 \text{ bar} = 101,325 \text{ kPa}$ ausgeführt. Für diesen Zustand sind in [4-19] die Standardbildungsenthalpien für verschiedene Stoffe tabelliert.

Die Bildungsenthalpie ist definiert als die Enthalpieänderung, die auftritt, wenn eine chemische Verbindung aus stabilen Elementen bei konstanter Temperatur und konstantem Druck gebildet wird [4-21]:

$$\Delta h_f \equiv h_{\text{compound}} - \sum_i (v_i \cdot h_i)_{\text{stable elements}} \quad (4.4-16)$$

- mit: Δh_f - Enthalpieänderung bei der Reaktion
- h_{compound} - Molare Enthalpie gebildeten Verbindung (engl.: products)
- v_i - Stöchiometrischer Koeffizient der Komponente i
- h_i - Molare Enthalpie der Komponente i

Wird diese Gleichung für den oben beschriebenen Standardzustand angewendet, spricht man von der Standardbildungsenthalpie $\Delta h_{f,298}^0$. Dabei steht der Index "298" für die Temperatur $T = 298,16 \text{ K}$ und der Index "0" für einen konstanten Druck, in diesem Fall 1 bar.

Für die Tabellierung der Standardbildungsenthalpien in [4-19] wurde vereinbart, daß alle stabilen Elemente in diesem Zustand eine Enthalpie von 0 haben. Stabile Elemente sind zum Beispiel molekularer Sauerstoff (O_2) oder molekularer Stickstoff (N_2). Atomarer Sauerstoff oder Stickstoff (O bzw. N) haben demnach eine von 0 verschiedene Standardbildungsenthalpie.

Bei der Entwicklung von BALAS hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, daß nicht die stabilen Elemente als Basis für Enthalpieberechnungen verwendet werden, sondern die Stoffe, die bei der Simulation von verfahrenstechnischen Prozessen der Zellstoff-, Holzstoff- und Papierindustrie den größten Anteil haben. Aus diesem Grund wurden die Enthalpien folgender Stoffe für eine Temperatur von $0^\circ\text{C} = 273,16 \text{ K}$ und einen Druck von 1 bar = 101,325 kPa mit 0 definiert: (Im folgenden wird zur Vereinfachung der Indizes für $T = 273,16 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$ allgemein 273 geschrieben; analog dazu wird $T = 298,16 \text{ K} = 25^\circ\text{C}$ mit 298 abgekürzt.)

gasförmig (v): $\text{CO}_{2(v)}$, $\text{SO}_{2(v)}$, $\text{O}_{2(v)}$, $\text{N}_{2(v)}$
 flüssig (l): $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$

Diese Vereinbarung bedingt eine Modifizierung der Tabelle der Standardbildungsenthalpien in [098]. Als Standard-Referenzpunkt für BALAS wird daher die *Modifizierte Standardbildungsenthalpie* bei 298,16 K und einem Druck von 1 bar angegeben. Im folgenden wird das Schema der Umrechnung dargestellt.

4.4.3.3 Berechnung der Modifizierten Standardbildungsenthalpie

Aufgrund der oben getroffenen Vereinbarung ändern sich die Standardbildungsenthalpien aller Stoffe, die die Elemente C, H, N, O und S enthalten. Die Standardbildungsenthalpien dieser Elemente wurden nach folgenden Vorschriften modifiziert:

$$h^{T,p} = \Delta h_f^0 + \int_0^T c_p^0 \cdot dT + (h - h^0)^{T,p} \quad (4.4-17)$$

$$\Delta h_f^0 = \Delta h_f^{298} - \int_0^{298} c_p^0 \cdot dT \quad (4.4-18)$$

$$h^{T,p} = \Delta h_f^{298} + \int_{298}^T c_p^0 \cdot dT + (h - h^0)^{T,p} \quad (4.4-19)$$

Hierbei ist Δh_f^{298} die Standardbildungsenthalpie und $h^{T,p}$ die Enthalpie eines Stoffes bei der Temperatur T und dem Druck p . Wenn man nun für $T = 273,16 \text{ K}$ und für $p = 1 \text{ bar}$ einsetzt, kann man für die oben genannten Stoffe $\text{CO}_{2(v)}$, $\text{SO}_{2(v)}$, $\text{O}_{2(v)}$, $\text{N}_{2(v)}$ und $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ die Enthalpie $h^{T,p} = 0$ setzen. Die Standardbildungsenthalpie Δh_f^{298} wird damit zur modifizierten Standardbildungsenthalpie $\hat{\Delta h}_f^{298}$:

$$h^{T,p} = 0$$

$$= \Delta \hat{h}_f^{298} + \int_{298}^{273} c_p^o \cdot dT + (h - h^o)^{273K, 1bar} \quad (4.4-20)$$

$$\Delta \hat{h}_f^{298} = - \int_{298}^{273} c_p^o \cdot dT - (h - h^o)^{273K, 1bar} \quad (4.4-21)$$

Die spezifische Wärmekapazität für ideale Gase C_p^o wird dabei wie im schon im Abschnitt 4.3.1 beschrieben aus der Formel für die molare Wärmekapazität (4.3-4) ermittelt. Die Integration dieser Formel ergibt unter Berücksichtigung der molaren Masse M und Umrechnung der Einheit cal in Joule:

$$\int_{298}^{273} c_p^o \cdot dT = 4,1868 \frac{\text{J}}{\text{cal}} \cdot \frac{1}{M} \cdot \left[A \cdot T + \frac{1}{2} \cdot B \cdot T^2 + \frac{1}{3} \cdot C \cdot T^3 + \frac{1}{4} \cdot D \cdot T^4 \right]_{298}^{273} \quad (4.4-22)$$

Die stoffspezifischen Konstanten A, B, C und D können aus [4-17] entnommen werden.

Der Ausdruck $(h - h^o)^{273K, 1bar}$ ist die Departure Function der Enthalpie. Sie schätzt die Abweichung der tatsächlichen Enthalpie von der Enthalpie des Fluids als ideales Gas ab und wird mit der LEE-KESLER Enthalpy Departure Equation berechnet [4-17]:

$$h^o - h =$$

$$= R \cdot T_c \cdot \left(\left(\frac{h^o - h}{R \cdot T_c} \right)^{(0)} + \omega \cdot \left(\frac{h^o - h}{R \cdot T_c} \right)^{(1)} \right) \quad (4.4-23)$$

$$h^o - h = -(h - h^o)^{273K, 1bar} \quad (4.4-24)$$

mit: R - Universelle Gaskonstante, $R = 8,3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T_c - Kritische Temperatur [K]

ω - Pitzer acentric factor

Die Terme $\left(\frac{h^o - h}{R \cdot T_c} \right)^{(0)}$ und $\left(\frac{h^o - h}{R \cdot T_c} \right)^{(1)}$ sind die LEE-KESLER Residual Enthalpies für das einfache Fluid (Index 0) und für die Deviation Function (Index 1). Die Zahlenwerte für die beiden druck- und temperaturabhängigen Ausdrücke sind in [4-17] für verschiedene reduzierte Drücke p_r und reduzierte Temperaturen T_r tabelliert. Dabei gilt:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \text{ sowie } p_r = \frac{p}{p_c} \quad (4.4-25)$$

mit: T, p - Aktuelle Temperatur bzw. aktueller Druck

T_c, p_c - Kritische Temperatur bzw. kritischer Druck

T_r, p_r - Reduzierte Temperatur bzw. reduzierter Druck

Bei Kenntnis dieser stoffspezifischen Daten kann für die Stoffe $\text{CO}_{2(v)}$, $\text{SO}_{2(v)}$, $\text{O}_{2(v)}$, $\text{N}_{2(v)}$ und $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ die modifizierte Standardbildungsenthalpie bei 25 °C berechnet werden. Davon ausgehend werden anschließend sämtliche Einträge der Tabelle "Reference III" in [4-19] modifiziert, in denen die Elemente C, H, N, O und S enthalten sind.

Für die Ermittlung der modifizierten Standardbildungsenthalpie von atomarem Sauerstoff bzw. Stickstoff gilt:

$$\Delta \hat{h}_{f,O}^{298} = \frac{1}{2} \cdot \Delta \hat{h}_{f,O_2}^{298} \quad (4.4-26)$$

$$\text{bzw. } \Delta \hat{h}_{f,N}^{298} = \frac{1}{2} \cdot \Delta \hat{h}_{f,N_2}^{298}$$

Die Berechnung der modifizierten Standardbildungsenthalpie von atomarem Kohlenstoff (Graphit), Wasserstoff und Schwefel erfolgt

unter Einbeziehung der Gleichung (4.4-16). Demnach ist die Enthalpieänderung bei der Bildung eines neuen Stoffes aus stabilen Elementen unabhängig von der Wahl des Be-

zugszustandes, einheitliche Anwendung innerhalb der Gleichung vorausgesetzt. Für zwei Bezugszustände X und Y gilt also:

$$(h_{\text{compound}})_X - \left(\sum_i (v_i \cdot h_i)_{\text{stable elements}} \right)_X = (h_{\text{compound}})_Y - \left(\sum_i (v_i \cdot h_i)_{\text{stable elements}} \right)_Y \quad (4.4-27)$$

Am Beispiel des Schwefeldioxids wird die Ermittlung der modifizierten Standardbildungsenthalpie des stabilen Elements Schwefel (S) erläutert. Die Bezugszustände sind in diesem Fall der Standardzustand, wie er in [4-19] definiert ist, und der modifizierte Standardzustand. Es gilt:

$$\begin{aligned} \Delta h_{f, \text{SO}_2}^{298} - \Delta h_{f, \text{S}}^{298} - \Delta h_{f, \text{O}_2}^{298} \\ = \hat{\Delta h}_{f, \text{SO}_2}^{298} - \hat{\Delta h}_{f, \text{S}}^{298} - \hat{\Delta h}_{f, \text{O}_2}^{298} \end{aligned} \quad (4.4-28)$$

Wie bereits oben erwähnt, sind im Standardzustand die Enthalpien aller stabilen Elemente bei 298,16 K und 1 bar Druck gleich Null.

$$\Delta h_{f, \text{S}}^{298} = \Delta h_{f, \text{O}_2}^{298} = 0 \quad (4.4-29)$$

Nach Umstellung ergibt sich:

$$\hat{\Delta h}_{f, \text{S}}^{298} = \hat{\Delta h}_{f, \text{SO}_2}^{298} - \hat{\Delta h}_{f, \text{O}_2}^{298} - \Delta h_{f, \text{SO}_2}^{298} \quad (4.4-30)$$

Für diese Gleichung kann die Standardbildungsenthalpie für Schwefeldioxid aus [4-19] entnommen werden; die modifizierten Standardbildungsenthalpien für Schwefeldioxid und molekularen Sauerstoff werden nach der oben beschriebenen Vorgehensweise unter Einbeziehung von Gleichung (4.4-21) ermittelt.

Nach diesem Schema können die modifizierten Standardbildungsenthalpien aller Stoffe berechnet werden, die in der Tabelle "Reference III" in [4-19] aufgelistet sind und die Elemente C, H, N, O oder S enthalten. Für alle übrigen Stoffe bleibt die Standardbildungsenthalpie

gleich, da sie nicht von den vereinbarten Abweichungen vom Standardzustand abhängen.

Zusammen mit anderen Stoffdaten sind die nach der oben beschriebenen Methode modifizierten Standardbildungsenthalpien als Bezugspunkt für die Enthalpieberechnung im BALAS-Programmcode eingebettet.

4.4.3.4 Frei gewählte Referenztemperatur

Zusätzlich zum Standard-Bezugszustand gibt es die Möglichkeit, in BALAS im Menü SIMULATOR, Menüpunkt SELECT CASE eine frei gewählte Temperatur als Bezugspunkt zu wählen. Bei dieser Option werden die Enthalpien aller Stoffe bei der Bezugstemperatur mit 0 definiert. Allerdings ist das nur physikalisch sinnvoll, wenn in der Simulation keine Reaktionen stattfinden.

Wie schon unter 4.4.3.1 erwähnt, erfolgt die Berechnung der Reaktionsenthalpie aus den Enthalpien der einzelnen Komponenten auf der Grundlage der Vereinbarung eines Standard Reference State für thermochemische Berechnungen ($T = 298,16 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar} = 101,325 \text{ kPa}$) [4-21].

Die Reaktionsenthalpie ist ein Maß für die Wärme, die bei einer chemischen Reaktion freigesetzt bzw. gebunden wird. Sie kann aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für ein einfaches, kompressibles System entwickelt werden:

$$Q + W_{\text{shaft}} = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \quad (4.4-31)$$

mit: Q - Wärmeenergie
 W_{shaft} - Externer Energieeintrag durch Antrieb etc.
 ΔH - Enthalpieänderung
 ΔKE - Änderung der kinetischen Energie
 ΔPE - Änderung der potentiellen Energie

Unter der Voraussetzung, daß die Änderung von kinetischer bzw. potentieller Energie bei einer Reaktion vernachlässigbar klein ist sowie kein zusätzlicher mechanischer Energieeintrag erfolgt, ergibt sich

$$Q = \Delta H = H_{\text{prod}} - H_{\text{reac}}$$

$$Q = \left(\sum_i N_i \cdot h_i \right)_{\text{prod}} - \left(\sum_j N_j \cdot h_j \right)_{\text{reac}} \quad (4.4-32)$$

Die Enthalpie h_i setzt sich aus der Standardbildungsenthalpie und der Enthalpiedifferenz zwischen dem Standardzustand und dem aktuellen Zustand zusammen:

$$h_{i,T,p} = \Delta h_{f,298}^{\circ} + (h_{T,p} - h_{298,1\text{bar}})_i \quad (4.4-33)$$

In der vereinfachenden Annahme, daß sich die Komponenten bei der Reaktion wie ideale Gase verhalten, sind die Enthalpien druckunabhängig.

$$h_{i,T} = \Delta h_{f,298}^{\circ} + (h_T - h_{298})_i \quad (4.4-34)$$

Daraus ergibt sich für die Energiebilanz aus Gleichung (4.4-32):

$$Q = \left(\sum_i N_i \cdot (\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_T - h_{298})_i \right)_{\text{prod}} - \left(\sum_j N_j \cdot (\Delta h_{f,298}^{\circ} + h_T - h_{298})_j \right)_{\text{reac}} \quad (4.4-35)$$

Die Wärme, die bei der chemischen Reaktion bei gleichbleibender Temperatur von 298,16 K und gleichbleibendem Druck von 1 bar freigesetzt oder gebunden wird, ist die Standard-

reaktionsenthalpie. Die Enthalpien der einzelnen Komponenten sind in diesem Zustand laut Definition die Standardbildungsenthalpien.

$$Q = \Delta h_{R,298}^{\circ} = \left(\sum_i N_i \cdot \Delta h_{f,298,i}^{\circ} \right)_{\text{prod}} - \left(\sum_j N_j \cdot \Delta h_{f,298,j}^{\circ} \right)_{\text{reac}} \quad (4.4-36)$$

Diese Gleichung wiederum kombiniert mit der Energiebilanz ergibt

$$Q = \Delta h_{R,298}^{\circ} + \left(\sum_i N_i \cdot (h_T - h_{298})_i \right)_{\text{prod}} - \left(\sum_j N_j \cdot (h_T - h_{298})_j \right)_{\text{reac}} \quad (4.4-37)$$

Wenn in Gleichung (4.4-36) die freigesetzte bzw. gebundene Wärmeenergie als Standardreaktionsenthalpie definiert ist, so kann man die Wärmeenergie Q in Gleichung (4.4-37)

allgemein als Reaktionsenthalpie für einen Zustand mit beliebiger Temperatur T bezeichnet werden. Die beiden letzten Gleichungen

kombiniert ergeben die Formel für die Reakti-

onsenthalpie bei beliebiger Temperatur.

$$\Delta h_{R,T} = \left(\sum_i N_i \cdot (\Delta h_{f,298}^0 + h_T - h_{298})_i \right)_{\text{prod}} - \left(\sum_j N_j \cdot (\Delta h_{f,298}^0 + h_T - h_{298})_j \right)_{\text{reac}} \quad (4.4-38)$$

Es zeigt sich also, daß bei Simulationen, in denen chemische Reaktionen stattfinden, die damit für die Energiebilanz nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik erforderliche Reaktionsenthalpie die Kenntnis der Bildungsenthalpien der einzelnen Komponenten voraussetzt. Für die meisten Stoffe ermittelt und tabelliert ist die Standardbildungsenthalpie bei einer Temperatur von 298,16 K und einem Druck von 1 bar = 101,325 kPa. Daher ist für die Berechnung der Enthalpiebilanz unumgänglich, den Bezugszustand wie oben definiert zu verwenden. Wenn die Bezugstemperatur beliebig gewählt werden soll, müßten theoretisch für beliebig viele Temperaturen die Bildungsenthalpien der verschiedenen Stoffe der Simulation bekannt sein, was für BALAS nicht der Fall ist und bezogen auf den Aufwand zur Bestimmung auch nicht sinnvoll wäre.

Daher wird im Falle der Wahl einer frei gewählten Referenztemperatur die Reaktionsenthalpie nicht berechnet und für die Energiebilanz berücksichtigt, d.h. die Temperatur der Stoffströme ändert sich durch die stattfindenden Reaktionen nicht, was physikalisch nicht korrekt ist.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es aber trotzdem möglich, die Referenztemperatur frei zu wählen, obwohl Reaktionen stattfinden. Wenn der Anteil der reagierenden Komponenten bezogen auf die Gesamtmasse der jeweiligen Ströme sehr gering ist, kann die bei der Reaktion freiwerdende oder gebundene Wärme vernachlässigt werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ein kleiner Teil einer Zellstoffsuspension bei weiterer Verdünnung in Lösung geht. Die Temperaturänderung durch die Reaktion liegt dabei im Promillebereich, bezogen auf die Temperatur des Eingangsstroms vor dem Lösevorgang.

Ob eine Vernachlässigung der Reaktionsenthalpie gerechtfertigt ist, muß von Fall zu Fall entschieden werden. Dazu kann die Temperatur- bzw. Enthalpieänderung durch die entsprechende Reaktion dahingehend bewertet werden, inwiefern ihre Nichtbeachtung Auswirkungen auf die Gesamtbilanz des betrachteten Systems hat. Sind diese Auswirkungen vernachlässigbar klein, kann die Bezugstemperatur des Gesamtsystems beliebig gewählt werden.

4.5 Betrachtungen zum Energieeintrag in die Module einer Simulation

4.5.1 Grundlagen

Elektromotoren in verfahrenstechnischen Anlagen werden im Allgemeinen dazu eingesetzt, um Transportvorgänge zu ermöglichen, d.h. die notwendige Energie für die Ortsveränderung einer Masse bereitzustellen. Ein großer Teil der aufgewendeten elektrischen Energie wird jedoch von Reibungsvorgängen in Motor und Kraftübertragungselementen beansprucht und somit in Wärmeenergie umgewandelt. Dies führt zur Erwärmung des Motors beziehungsweise der Anlage; im Gleichgewichtszustand wird die Wärme an mit der Anlage in Kontakt stehende Massenströme abgegeben.

Das sind zum einen das zu transportierende Medium, zum anderen die Kühlmedien. Kühlwasser oder Öl werden eingesetzt, um die Temperaturerhöhung von Motoren und Kraftübertragungselementen zu begrenzen. Dazu kommt noch ein Kühlungseffekt durch die Umgebungsluft, die sich dadurch ebenfalls erwärmt.

Die Temperatur des zu transportierenden Mediums erhöht sich außerdem durch die innere Reibung im Medium, d.h. hier wird ein weiterer Teil der mechanischen Energie in Wärme umgewandelt.

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten zur Beschreibung des Energieeintrags beschrieben.

4.5.2 Energieberechnung in BALAS-Modulen

4.5.2.1 Einführung und Begriffe

Zu jedem in BALAS verfügbaren Modul gibt es die Möglichkeit, die elektrische Leistung sowie deren Nutzung relativ zur Gesamtleistung des

Moduls zu definieren. Dies geschieht über das Dialogfeld „Electricity“, in dem die entsprechenden Parameter eingetragen werden (Abb. 4.5-1). Dem selben Dialogfeld können nach der Berechnung der Simulation die ermittelten absoluten Leistungs- bzw. Energiewerte entnommen werden. Die Berechnungen zu diesen Parametern werden mit einer internen Routine namens „Electricity“ ausgeführt, die im BALAS-Programmcode gespeichert ist und bei jeder Berechnung der Simulation für jedes Modul aufgerufen wird.

Sortierer_011009_01.pro - Unit 357518

Parameters | Unit parameter constraints | **Electricity**

Input values

Name	Value	Min	Max	Unit
Installed electrical power	200	0	100000	kW
Loading coefficient	90	0	100	%
Heating coefficient	70	0	100	%
☒ Heat distribution to outlet ports...				
Port [2. Accept: Accept]	55	0	100	%
Port [1. Feed/Reject: Reject]	45	0	100	%
☒ Tuning method for specific consumption	Power law			
Power	1	-3	3	
Reference variable [3. Reject/Feed: Feed]	0,3			
Reference point: variable value	100	0	1000000	
Reference point: specific consumption	0,3	0	1000000	kW

Calculated values

Name	Value	Unit
Electricity consumption	19.2	kW
Generated heat to process	13.44	kW
☒ Heat to outlet ports...		
Port [2. Accept: Accept]	7.392	kW
Port [1. Feed/Reject: Reject]	6.048	kW
Heat loss to surroundings	5.76	kW
Specific consumption	0.24	kW/*

Add parameter
Delete parameter

OK Cancel Help

Abb. 4.5-1: BALAS-Dialogfeld „Electricity“ für einen Sortierer

Im folgenden wird die Bedeutung der einzelnen Punkte des Dialogfeldes zunächst übersetzt und erklärt; anschließend wird die Anwendung

für verschiedene Möglichkeiten zur Beschreibung des spezifischen Energiegebrauchs beschrieben.

Tab. 4.5-1: Begriffe im BALAS-Dialogfeld „Electricity“: Input values

<i>Installed electrical power</i>	Nennleistung eines Motors bzw. Summe der Nennleistungen aller elektrischen Antriebe eines Modules in kW
<i>Loading coefficient</i>	Prozentuale Auslastung der Nennleistung
<i>Heating coefficient</i>	Anteil der elektrischen Energie, der als Wärme an die mit dem Modul verknüpften Stoffströme abgegeben wird, in %
<i>Heat distribution to outlet ports</i>	Verteilung der Wärmeenergie auf die ausgehenden Ströme in % (sollten hier keine Parameter angegeben werden, wird die Wärme so auf alle austretenden Ströme verteilt, daß alle Ausgangsströme die gleiche Temperatur haben)
<i>Tuning method for specific consumption</i>	Möglichkeiten der Veränderung des spezifischen Energiegebrauchs des Moduls: <i>Constant</i> , <i>Power law</i> sowie <i>User specified function</i> (Erklärung siehe unten)
<i>Reference variable</i>	Festlegung eines Parameters, in dessen Abhängigkeit der spezifische Energiegebrauch des Moduls variiert werden kann
<i>Reference point: variable value</i>	Wert des Parameters an einem frei wählbaren Bezugspunkt
<i>Reference point: specific consumption</i>	Spezifischer Energiegebrauch des Moduls im Bezugspunkt

Die Einheit des spezifischen Energiegebrauchs des Moduls im Bezugspunkt ist dabei allgemein kW bezogen auf die Einheit des Bezugsparameters. Diese Nomenklatur ist etwas irreführend, da im Regelfall spezifische Werte auf eine Massen- oder Mengeneinheit bezogen werden.

Der vorliegende Fall erfordert eine andere Betrachtungsweise. Wenn als Parameter der Massenstrom eines Eingangsstromes angegeben wird und sein Wert zum Beispiel 6 kg/s ist, dann bedeutet der Eintrag „40“ im Feld *Reference point: specific consumption* einen spezifischen Energiegebrauch des Moduls im

Bezugspunkt von 40 kW/(kg/s). Analog dazu können auch die Temperatur, der Druck, der Trockengehalt und die Konsistenz sämtlicher Eingangs- und Ausgangsströme sowie die jeweiligen Parameter des Moduls (Unit Parameter) als Bezugsvariablen gewählt werden, auf deren Einheit dann wiederum der spezifische Energiegebrauch bezogen wird.

Nach Berechnung der Simulation können dem Dialogfeld „Electricity“ die folgenden Parameter entnommen werden:

Tab. 4.5-2: Begriffe im BALAS-Dialogfeld „Electricity“: Calculated values

<i>Electricity consumption</i>	Aktueller Energiegebrauch in kW
<i>Generated heat to process</i>	Dem Prozess, also den Ausgangsströmen des Moduls, zugeführte Wärmeenergie in kW
<i>Heat to outlet ports</i>	Aufteilung der <i>Generated heat to process</i> auf die einzelnen Ausgangsströme (in kW)
<i>Heat loss to surroundings</i>	Energie- bzw. Wärmeverluste an die Umgebung in %
<i>Specific consumption</i>	Spezifischer Energiegebrauch des Moduls bezogen auf den im Feld <i>Reference variable</i> vereinbarten Parameter

Wie oben schon erwähnt, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Berechnung bzw. Abschätzung des Energiegebrauchs.

Diese insgesamt vier Varianten werden nun vorgestellt.

4.5.2.2 Konstanter Energiegebrauch

Bei der einfachsten Möglichkeit der Beschreibung des Energiebedarfs eines Moduls wird davon ausgegangen, daß der Energiegebrauch eines Moduls konstant ist.

Diese Variante ist ein Sonderfall für die Option *Tuning method for specific consumption: Constant*, wenn im Feld *Reference point: specific consumption* der Wert 0 eingetragen wird. In diesem Fall wird der Energiegebrauch aus der installierten elektrischen Leistung sowie dem *Loading coefficient* als Wert für die Ausnutzung der installierten Leistung errechnet.

Sollten für diese beiden Parameter keine Angaben bzw. direkten Meßwerte verfügbar sein, kann im Feld *Installed electrical power* auch der aktuelle Energiegebrauch (zum Beispiel die gemessene elektrische Leistung eines Elektromotors) und für den *Loading coefficient* 100 % eingetragen werden.

Damit kann die an den Prozeß übertragene Wärmeenergie, bei Bedarf auch für die einzelnen Ausgangsströme mit unterschiedlicher Gewichtung, errechnet werden. Korrekte Werte werden allerdings nur ermittelt, wenn die Verhältnisse in der Simulation denen bei der Messung gleichen. Wenn also bei der Messung der Leistung des Motors einer Pumpe ein kleinerer Volumenstrom transportiert wurde, als anschließend in der Simulation, ist davon auszugehen, dass sich auch die dazu erforderliche Antriebsenergie, die wiederum durch Umwandlung im Motor aus elektrischer Energie bereitgestellt wurde, geändert hat.

Demnach ist es erforderlich, eine Methode zu finden, wie die Schwankungen von Prozessparametern für die Berechnung des Energiegebrauchs von einzelnen Modulen einer Simulation berücksichtigt werden können. Mit den

Optionen *Constant*, *Power law* und *User specified function* ist dies auf unterschiedliche Art und Weise möglich.

In den folgenden Kapiteln werden diese verschiedenen Optionen für die *Tuning method for specific consumption* sowie deren Anwendungsmöglichkeiten diskutiert.

4.5.2.3 Tuning Method For Specific Consumption: Constant

Bei dieser Option wird davon ausgegangen, daß sich die benötigte Energie direkt proportional zu einer Bezugsvariablen, zum Beispiel dem Massenstrom, ändert. Die Bezugsvariable kann beliebig aus Parametern der mit dem betreffenden Modul verknüpften Ströme sowie aus speziellen Parametern des jeweiligen Moduls ausgewählt werden.

Im Feld *Reference point: specific consumption* wird der spezifische Energiegebrauch festgelegt. Zu beachten ist, daß dieser Wert auf die in BALAS vereinbarte Grundeinheit der Bezugsvariablen bezogen wird. Die Einheit der *Specific consumption* ist somit

- kW/°C für die Bezugsvariable *Temperature*
- kW/kPa für die Bezugsvariable *Pressure*
- kW/(kg/s) für die Bezugsvariable *Total flow*
- kW/% für die Bezugsvariablen *Dry content* und *Consistency*

Der so festgelegte spezifische Energiegebrauch ist für alle Werte der Bezugsvariablen gleich:

$$(Spec. Consumption)_X = (Spec. Consumption)_0 \quad (4.5-1)$$

mit:	$(Spec. Consumption)_0$	-	Spezifischer Energiegebrauch im Referenzpunkt
	$(Spec. Consumption)_X$	-	Spezifischer Energiegebrauch in einem beliebigen Punkt

Der absolute Energieverbrauch kann damit errechnet werden aus:

$$(Electricity\ Consumption)_X = (Spec.\ Consumption)_0 \cdot (Re\ f.\ Var.\ Value)_X \quad (4.5-2)$$

mit: $(Electricity\ Consumption)_X$ - Absoluter Energieverbrauch an einem beliebigen Punkt
 $(Re\ f.\ Var.\ Value)_X$ - Wert der Bezugsvariablen an einem beliebigen Punkt

Diese Methode bietet eine ausreichende Anpassung des Energiegebrauchs an veränderliche Bezugsvariablen, die entweder in direkt proportionalem physikalischen Zusammenhang mit dem Energieverbrauch stehen, oder die in bestimmten Grenzen als solche betrachtet werden können. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn als Bezugsvariable der Massenstrom gewählt wird.

Außerdem kann bei fehlender Kenntnis des wirklichen Zusammenhangs eine Bezugsgröße mit dem Energieverbrauch die Methode des konstanten spezifischen Energiegebrauchs eine gute Näherung darstellen. Sollte dies in bestimmten Fällen nicht ausreichen, kann der

Zusammenhang auch durch eine nichtlineare Abhängigkeit beschrieben werden.

4.5.2.4 Tuning Method For Specific Consumption: Power Law

Wenn der Energieverbrauch und der Wert einer Bezugsvariablen nicht direkt proportional zusammenhängen, ist der spezifische Energieverbrauch nicht konstant. Wenn es gelingt, einen Zusammenhang über eine Potenz-Beziehung herzustellen, kann die Option *Power Law* angewendet werden. Power gibt im englischen den mathematischen Ausdruck Potenz wieder. Der spezifische Energieverbrauch an einem beliebigen Punkt kann dann ermittelt werden aus:

$$(Spec.\ Consumption)_X = (Spec.\ Consumption)_0 \cdot \left(\frac{(Re\ f.\ Var.\ Value)_X}{(Re\ f.\ Var.\ Value)_0} \right)^{Power} \quad (4.5-3)$$

mit: Power - Größe der Potenz
 (Grenzen in BALAS: $-3 \leq Power \leq +3$)
 $(Re\ f.\ Var.\ Value)_0$ - Wert der Bezugsvariablen im Referenzpunkt

Wie aus dieser Gleichung ersichtlich wird, ist die Option *Constant* (4.5.2.3) ein Sonderfall der Option *Power law* für Power = 0. Analog zu

Gleichung (4.5-2) wird anschließend der absolute Energieverbrauch berechnet:

$$(Electricity\ Consumption)_X = (Spec.\ Consumption)_X \cdot (Re\ f.\ Var.\ Value)_X \quad (4.5-4)$$

Diese Methode bietet eine genauere Anpassung des aktuellen Energiegebrauchs an schwankende Werte der Bezugsvariable als die Methode des konstanten spezifischen Energiegebrauchs. Voraussetzung für die Anwendung ist die Kenntnis bzw. bestmögliche Abschätzung der Größe der Potenz.

Für das BALAS-Modul PSET, mit dem eine Pumpe simuliert werden kann, kann der mathematische Zusammenhang zwischen spezi-

fischem Energieverbrauch und Massenstrom bei Bedarf zum Beispiel aus der Produktbeschreibung („Pumpenkurve“) des Herstellers ermittelt werden.

4.5.2.5 Tuning Method For Specific Consumption: User specified function

In bestimmten Fällen kann es sein, daß die Beschreibung der Abhängigkeit des spezifischen Energiegebrauchs von einer einzigen

Bezugsgröße nicht ausreicht. Selbstverständlich wird in keinem Fall die Abhängigkeit von nur einer physikalischen Größe gegeben sein, allerdings kann in den meisten Fällen eine Haupteinflussgröße gefunden werden. Es können aber auch Fälle eintreten, wo dies nicht möglich ist.

Dafür gibt es in BALAS die Möglichkeit, eine frei wählbare Funktion zu definieren. Die Va-

riablen dieser Funktion können dabei Parameter der direkt mit dem entsprechenden Modul verknüpften Stoffströme sowie Parameter des Moduls selbst sein.

Die Berechnung des spezifischen Energiegebrauchs erfolgt dann analog zu Gleichung (4.5-3) nach:

$(Spec. Consumption)_X = (Spec. Consumption)_0 \cdot (Value(Function))_X \quad (4.5-5)$
mit: $(Value(Function))_X$ - Wert der vom Benutzer definierten Funktion an einem beliebigen Punkt

Der absolute Energieverbrauch kann dann mit Gleichung (4.5-4) ermittelt werden.

Die Definition einer solchen Funktion ist allerdings mit großem Aufwand verbunden, daher ist die Anwendung dieser Option nur dann sinnvoll, wenn der dadurch zu erwartende Genauigkeitsvorteil gegenüber einer einfacheren Methode gesichert ist.

4.5.2.6 Auswahl einer Methode für das laufende Projekt

Von den vorgestellten vier Möglichkeiten ist die Option *Constant* offensichtlich die sinnvollste für das aktuelle Projekt. Bei der Vielzahl der eingebauten Module bedeutet die Ermittlung der Potenzen für die Option *Power law* einen

enormen Arbeitsaufwand, ganz zu schweigen von der Erstellung einer benutzerdefinierten Funktion für jedes Modul. Die Massenströme schwanken zumindest im Hauptstoffstrom in relativ engen Grenzen, weshalb mit der Option *Constant* eine gute Näherungsmöglichkeit gegeben ist.

4.5.3 Grenzen der Energieberechnung in der Software

Mit der oben beschriebenen Methode kann lediglich der Betrag an elektrischer Energie ermittelt werden, der als Wärme in die mit dem entsprechenden Modul direkt verknüpften Ausgangsströme übergeht. Diese Energie wird aus dem aktuellen Energieverbrauch und dem Heating coefficient berechnet:

$\left(\frac{Generated\ heat}{to\ process\ [kW]} \right) = \frac{Heating\ coefficient\ [\%]}{100\%} \cdot Electricity\ consumption\ [kW] \quad (4.5-6)$
--

Die Wärme, die in die Ausgangsströme übergeht, kann mit der Option *Heat distribution to outlet ports* bei Bedarf noch unterschiedlich auf die einzelnen Ströme prozentual verteilt werden, wie oben bereits erwähnt.

Die Differenz zwischen dieser Wärme und dem aktuellen Energieverbrauch bzw. der Aufnahme an elektrischer Energie wird in BALAS als *Heat loss to surroundings* bezeichnet. Dieser Begriff beinhaltet also sowohl den in mechanische (kinetische und potentielle) Energie der Aus-

gangsströme umgewandelten Anteil, als auch die tatsächlichen Wärmeverluste an die Umgebungsluft bzw. den gewünschten Wärmeübergang an Kühlmedien.

Es ist daher nicht möglich, direkt im Modul die erforderlichen Massenströme der Kühlmedien explizit zu berechnen. Auch die Energie, die als Abwärme an das Hallenluftsystem abgegeben wird, kann nicht mit der im Programmcode eingebetteten Routine „Electricity“ ermittelt werden.

Für diese Aufgabe muß ein anderes Modul (Thermal Duty) verwendet werden, daß einen direkten Energieeintrag an einen Strom abgibt.

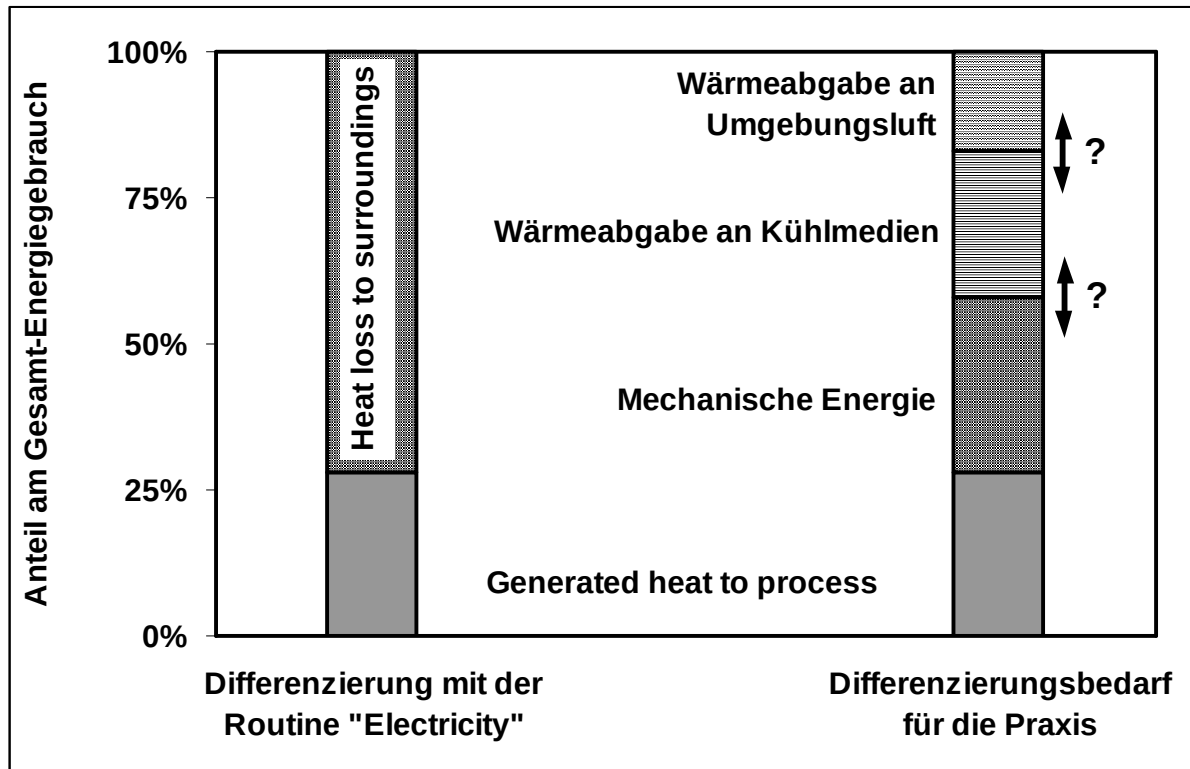


Abb. 4.5-3: Möglichkeiten und Einschränkungen der Routine „Electricity“

Es kann lediglich eine Abschätzung vorgenommen werden, wie groß die jeweiligen Anteile sind, und diese Daten können wiederum als Inputparameter in parallele Teile der Simulation, zum Beispiel Kühlwasserkreisläufe oder das Hallenluftsystem, eingesetzt werden. Dies kann aber wiederum nur iterativ geschehen, d.h. nach Berechnung der Simulation müssen die sogenannten „Wärmeverluste“ jedes einzelnen Moduls in die unterschiedlichen Komponenten aufgeteilt und diese Daten dann in die Kühlsysteme etc. eingetragen werden. Anschließend ist die Simulation wieder zu starten; erst bei diesem Durchlauf werden auch die Wärmeströme in den Kühlkreisläufen korrekt berechnet.

Diese Vorgehensweise bedeutet einen enormen Arbeitsaufwand, da sich bei jeder Änderung im System auch der Energieverbrauch

und damit die absoluten Energieverluste ändern können. Nach jeder dieser Änderungen müßten dann die tatsächlichen Wärmeübergänge an Kühlmittelströme, die Umgebungsluft etc. neu berechnet werden.

Da allerdings die prozentuale Aufteilung der Energie im Allgemeinen nicht genau bestimmbar ist, kann es ausreichend sein, wenn die Korrektur der in die parallelen Systeme übertragenen Parameter nur bei verhältnismäßig großen Schwankungen im Hauptstoffstrom erfolgt.

4.6 Anmerkungen zur Verwendung der Begriffe „Dry Content“ und „Consistency“

4.6.1 Allgemeines

Die in BALAS verwendeten Begriffe *Dry Content* und *Consistency* zur Charakterisierung der Eigenschaften von Stoffsuspensionen drücken unterschiedliche Verhältnisse von festen und flüssigen Inhaltsstoffen aus. Eventuell vorkommende gasförmige Stoffe oder Komponenten

werden für die Berechnung der beiden Werte nicht berücksichtigt.

4.6.2 Dry Content

Der Ausdruck *Dry Content*, zu deutsch Trockengehalt, kennzeichnet den Anteil der Feststoffe und nicht flüchtigen Flüssigkeiten an der Summe der festen und flüssigen Phase des Gesamtmassenstroms:

$$\text{Dry Content} = \frac{\dot{m}_{\text{solid}} + \dot{m}_{\text{liquid, non volatile}}}{\dot{m}_{\text{solid}} + \dot{m}_{\text{liquid}}} \cdot 100\% \quad (4.6-1)$$

mit:	$\dot{m}_{\text{solid}}$	-	Massenstrom der festen Phase [kg/s]
	$\dot{m}_{\text{liquid}}$	-	Massenstrom der flüssigen Phase [kg/s]
	$\dot{m}_{\text{liquid, non volatile}}$	-	Massenstrom der nicht flüchtigen Komponenten der flüssigen Phase [kg/s]

Als nicht flüchtige Flüssigkeiten sind in BALAS alle Komponenten definiert, die sich nicht eindampfen lassen. Im Bezug auf die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Massenströme handelt es sich dabei um gelöste organische und anorganische Substanzen und flüssige Prozeßhilfsstoffe wie zum Beispiel Natriumhydroxid. Diese liegen in der Stoffsuspension in gelöster Form vor und werden daher in BALAS als Flüssigkeiten betrachtet. Bei der Eindampfung wird das für die Lösung erforderliche Wasser entzogen; die gelösten Stoffe fallen dadurch als feste Bestandteile an. Dadurch wird die Masse und damit der Anteil der gelösten organischen und anorganischen Stoffe meßbar.

Die Berechnungen in der Simulation erfordern aber, daß diese Bestandteile weiterhin als Flüssigkeiten betrachtet werden, da mit BALAS keine Kristallisierung von Salzen oder ähnliches simuliert werden kann. Daraus resultiert die etwas irreführende Bezeichnung als nicht flüchtige Flüssigkeiten (non volatile liquids).

4.6.3 Consistency

Die *Consistency* (deutsch: Konsistenz) kennzeichnet den Anteil der Feststoffe an der

Summe der festen und flüssigen Phasen des Gesamtmassenstroms:

$$\text{Consistency} = \frac{\dot{m}_{\text{solid}}}{\dot{m}_{\text{solid}} + \dot{m}_{\text{liquid}}} \cdot 100\% \quad (4.6-2)$$

mit:	$\dot{m}_{\text{solid}}$	-	Massenstrom der festen Phase [kg/s]
	$\dot{m}_{\text{liquid}}$	-	Massenstrom der flüssigen Phase [kg/s]

Bei der Berechnung der *Consistency* in BALAS werden also nur die Feststoffe berücksichtigt, die auch als solche in der internen Datenbank gekennzeichnet sind. Der so ermittelte Wert ist also eine reine Rechengröße, da hier zum Beispiel gelöste anorganische Stoffe, die bei der Eindampfung als Salze ausfallen, nicht mit berücksichtigt werden.

4.6.4 Konsequenzen der unterschiedlichen Definitionen für die Datenerfassung

Rein formal unterscheiden sich die beiden Kenngrößen *Dry Content* und *Consistency* also in ihrer unterschiedlichen Berücksichtigung der sogenannten nicht flüchtigen Flüssigkeiten für die Feststoffbilanz. In den Modulen von BA-

LAS, in denen die Festlegung eines Feststoffanteiles am Ausgang möglich ist (z.B. Pulper, Separationsmodule etc.) wird für die Angabe des Feststoffanteiles der Begriff *Consistency* verwendet, da die erwähnten gelösten Stoffe als Flüssigkeiten vorliegen.

Bei der Beurteilung von Prozeßdaten hat dies unterschiedliche Auswirkungen, die hauptsächlich von der Größenordnung des Feststoffanteils abhängig sind. Dies soll im folgenden in zwei Beispielen verdeutlicht werden. Die Werte wurden aus einer Simulation einer Feinpapier-Produktionslinie entnommen, haben hier jedoch nur beispielhaften Charakter.

Tab. 4.6-1: Beispiel für die Auswirkung der unterschiedlichen Berechnungsvorschriften

	Papierbahn nach der Nachtrockenpartie	Siebwasser 1
$\dot{m}_{solid} + \dot{m}_{liquid}$	6,5900 kg/s	962,5100 kg/s
$\dot{m}_{solid}$	6,3209 kg/s	5,5100 kg/s
$\dot{m}_{liquid, non\ volatile}$	0,0037 kg/s	0,9865 kg/s
$\frac{\dot{m}_{liquid}}{\dot{m}_{solid}}$	0,0408 kg/kg	173,6842 kg/kg
$\frac{\dot{m}_{liquid, nonvolatile}}{\dot{m}_{solid}}$	0,0058 kg/kg	0,1790 kg/kg
<i>Dry Content</i>	96,000 %	0,674 %
<i>Consistency</i>	95,895 %	0,572 %
<i>Dry Content – Consistency</i>	0,105 %	0,102 %
$\frac{Dry\ Content - Consistency}{Dry\ Content}$	0,109 % (relativ)	15,2 % (relativ)
$\frac{Dry\ Content - Consistency}{Consistency}$	0,109 % (relativ)	17,9 % (relativ)

Bei geringen Stoffdichten können sich also große Unterschiede zwischen den Werten von *Consistency* und *Dry Content* ergeben, im obigen Beispiel beim Siebwasser über 15 %. Deshalb ist es bei der Einarbeitung von Laboraten in die Simulation unbedingt erforderlich zu wissen, ob angegebene Feststoffgehalte als Stoffdichtemessungen (über Filter) oder als Trockengehaltsmessung (Eindampfung, Trocknung im Trockenschrank) ermittelt wurden.

4.7 Erweiterungen der Software

4.7.1 Einführung

Die Simulationssoftware BALAS enthält eine Vielzahl von Berechnungsmodulen und Symbolen für die Darstellung von Prozessen der Zellstoff-, Holzstoff- und Papierindustrie. Es besteht außerdem die Möglichkeit, die Symboldatenbanken und die Datenbank der Berechnungsmodule zu erweitern.

Grundsätzlich sind dabei zwei Arten der Erweiterung zu unterscheiden: zum einen die Erstel-

len neuer Berechnungsmodule, zum anderen das Hinzufügen von neuen Symbolen für die grafische Benutzeroberfläche *Flosheet*. Neue Berechnungsmodule werden mit einer Entwicklungssoftware programmiert und in die Datenbank *udf.dat* eingefügt. Der Zugriff auf diese Datenbank ist den Entwicklern vorbehalten; Änderungen sind daher nur nach Absprache möglich und erfordern zudem Kenntnisse der Programmiersprache FORTRAN und der Struktur des Quellcodes von BALAS.

Das Einbinden von neuen Symbolen gestaltet sich hingegen einfacher. Sie können direkt in der grafischen Benutzeroberfläche *Flosheet* erstellt und in eine entsprechende Symbolbibliothek eingefügt werden. Die genaue Vorgehensweise wurde im Rahmen dieser Arbeit analysiert und ist in Form einer Bedienungsanleitung im **Anhang B.1** angefügt.

Es ist jedoch zu beachten, daß durch die Bereitstellung neuer Symbole keine zusätzlichen Berechnungsmöglichkeiten für die Simulationssoftware BALAS entstehen. Die Symbole dienen lediglich dazu, die Bedeutung der mit ihnen verknüpften Module zu verdeutlichen. Daher sind die Erfordernisse des zuzuordnenden Moduls (Schnittstellendefinition etc.) bei der Erstellung eines Symbols unbedingt zu berücksichtigen.

4.7.2 Im Rahmen des Projektes neu erstellte Symbole

Um das optische Erscheinungsbild der für die Simulation erforderlichen *Flosheet*-Datei verständlicher zu gestalten, wurden für verschiedene Module neue Symbole entwickelt. Dabei wurde zunächst ein Berechnungsmodul gesucht, mit dem die zu beschreibende Systemkomponente simuliert werden kann. Anschließend wurde ein relativ einfaches, aber dennoch sinnfälliges Symbol dazu gezeichnet, in die entsprechende Bibliothek eingefügt und durch das sogenannte Mapping mit dem zugehörigen Berechnungsmodul verknüpft.

Die Leimpresse bzw. der SymSizer werden mit dem Modell einer Verbindung von zwei Massenströmen simuliert. Dies ist im Grunde eine

hinreichende Methode für die Darstellung der Verbindung der Stärkelösung mit der Papierbahn, außerdem können wie bei jedem Modul Daten für den Gebrauch an Elektroenergie ermittelt werden. Als Symbole zu diesem Modul standen allerdings nur Rechtecke in verschiedenen Größen zur Verfügung. Die Oberflächenleimung zwischen Vor- und Nachtrockenpartie stellt jedoch einen wichtigen Verfahrensschritt im Prozeß der Basispapierherstellung dar, daher wurde ein Symbol entwickelt, mit dessen Hilfe die Leimpresse im Fließschema relativ leicht wiederzufinden ist.

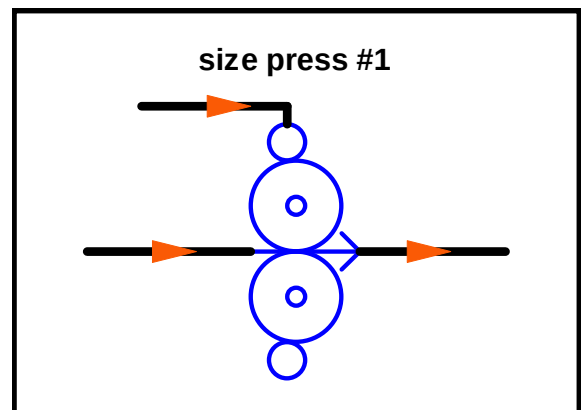


Abb. 4.7-1: Neues Symbol für Leimpresse bzw. Symsizer

Auch für die Veredelung der Papierbahn nach der Nachtrockenpartie ist in der Originalsoftware kein sinnfälliges Symbol vorhanden. Die einfachste Möglichkeit der Simulation eines Maschinenglättwerks besteht in einem Modul, das eigentlich für die Modellierung einer Pumpe programmiert wurde. Es hat einen Eingangsstrom, einen Ausgangsstrom und die Möglichkeit, den Energiegebrauch zu berechnen. Wie bei einer Pumpe wird beim Maschinenglättwerk lediglich Masse in Form von Papier transportiert; für die Simulation spielt dabei der Feststoffgehalt keine Rolle. Das neue Symbol wurde deshalb wie eine Pumpe mit jeweils einer Schnittstelle für Eingangs- und Ausgangsstrom versehen.

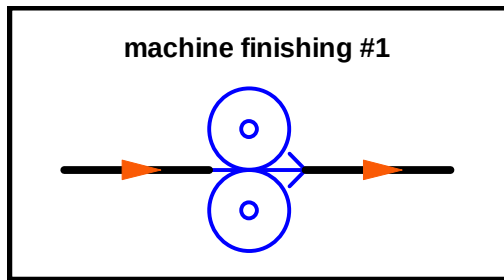


Abb. 4.7-2: Neues Symbol für ein Maschinenglättwerk

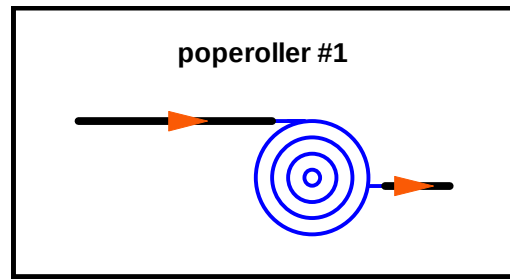


Abb. 4.7-3: Neues Symbol für einen Poperoller

Zwei Anlagenteile, denen in der Simulation eine weitaus geringere Bedeutung zukommt als in der Realität, sind die Abrollung bei der Streichmaschine und der Poperoller. In der realen Anlage sind dies selbstverständlich wesentliche Komponenten der Verfahrenskette, da sie gewissermaßen Schnittstellen des Systems darstellen. Bei einer Streichmaschine stellt die Abrollung den Massenstrom des Basispapiers zur Verfügung, mit den Poperollern bei Papiermaschine und Streichmaschine wird das produzierte Papier aus dem kontinuierlichen Prozeß entfernt.

Diese Funktionen werden bei der Simulation aber nicht von Modulen erfüllt, sondern von Strömen, d.h. aus einem Modul kann weder ein Massenstrom neu entstehen, noch kann er dort enden. Um jedoch den Energiegebrauch eines Poperollers bzw. einer Abrollung mit in die Simulation einbringen zu können, wird ein Modul eingesetzt, durch das ein Massenstrom direkt durchgeleitet werden kann und bei dem die Berechnung von energiebezogenen Parametern möglich ist. Wie schon beim Maschinenglättwerk bot sich dafür das Modul PSET an, das ursprünglich für Pumpen programmiert wurde. Anders als bei realen Anlagen gibt es hierbei einen kontinuierlichen Ausgangsstrom beim Poperoller, bzw. einen kontinuierlichen Eingangsstrom bei der Abrollung.

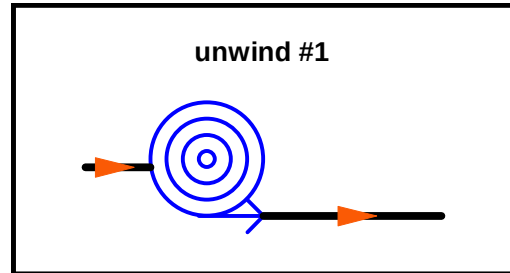


Abb. 4.7-4: Neues Symbol für eine Abrollung

Ein weiterer wichtiger Teil einer Produktionslinie ist der Kalandrier [4-22]. Da in der für das Projekt verfügbaren Version von BALAS kein Modul für einen Kalandrier vorhanden ist, wurde ein Modell entwickelt, für das bereits vorhandene Module verwendet werden. Die einfachste Möglichkeit zur Modellierung eines Kalandriers besteht in der Aufteilung in ein Heiz- und ein Kühlsystem unter Verwendung von Wärmetauscher-Modulen. Dabei kann die für den realen Kalandrier eingesetzte Elektroenergie mit der Routine ELECTRICITY ebenfalls berücksichtigt werden.

Im Falle der Produktionslinie C mit Sattdampf als Heizmedium ist ein einfacher Wärmetauscher ungeeignet für die Simulation. Daher wird hier das Modul für eine Trockenpartie genutzt. Da die vorhandenen Symbole für die Darstellung von Kalandrern ungeeignet erscheinen, wurden neue Symbole entworfen und mit den entsprechenden Modulen verknüpft. Nachfolgend sind die neuen Symbole dargestellt; ergänzend dazu werden die damit verbundenen Berechnungsmodule angegeben.

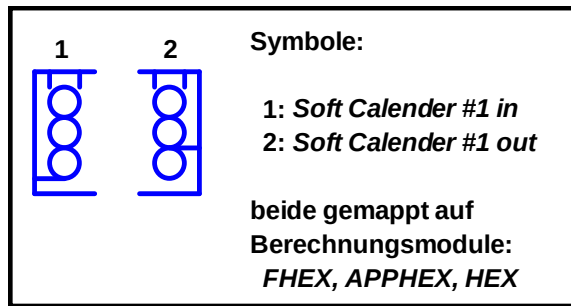


Abb. 4.7-5: Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie A

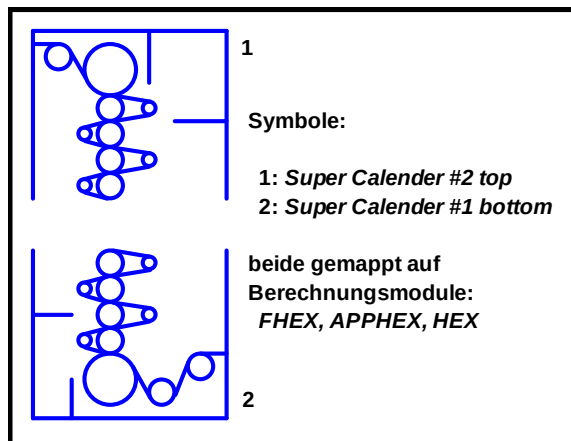


Abb. 4.7-6: Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie B

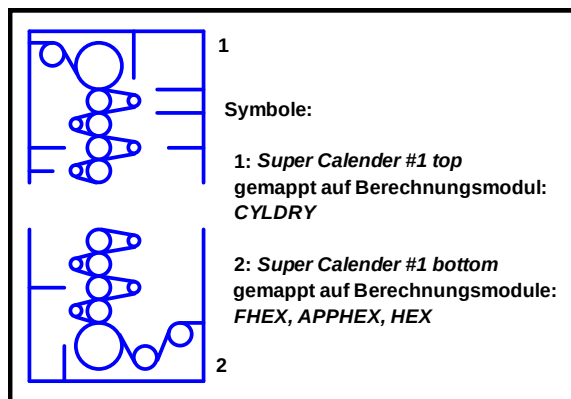


Abb. 4.7-7: Symbole zur Darstellung des Kalenders der Produktionslinie C

Die neuen Symbole wurden in der Bibliothek *Fiber_processing.cmp* gespeichert; die dazugehörigen Verknüpfungen zu den Berech-

nungsmodulen sind in der Datei *Fiber_processing.map* hinterlegt.

Zu beachten ist, daß die Kalender aus zwei Modulen zusammengesetzt sind. Daher ist es unbedingt notwendig, beide Teile durch den Hauptstoffstrom, also die Papierbahn, miteinander zu verbinden, da sonst die notwendigen Berechnungen nicht ausgeführt werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen die zusammengesetzten Modelle für die Kalender der drei Produktionslinien.

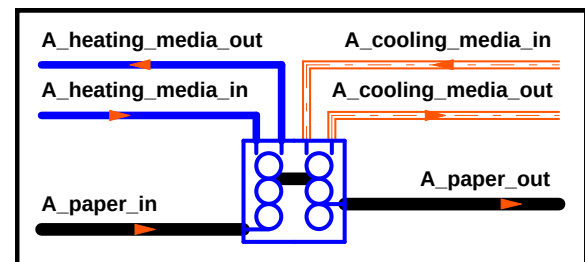


Abb. 4.7-8: Kalender der Produktionslinie A mit Ein- und Ausgangsströmen

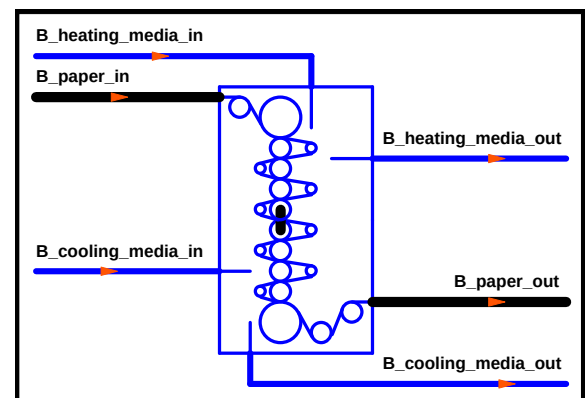


Abb. 4.7-9: Kalender der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen

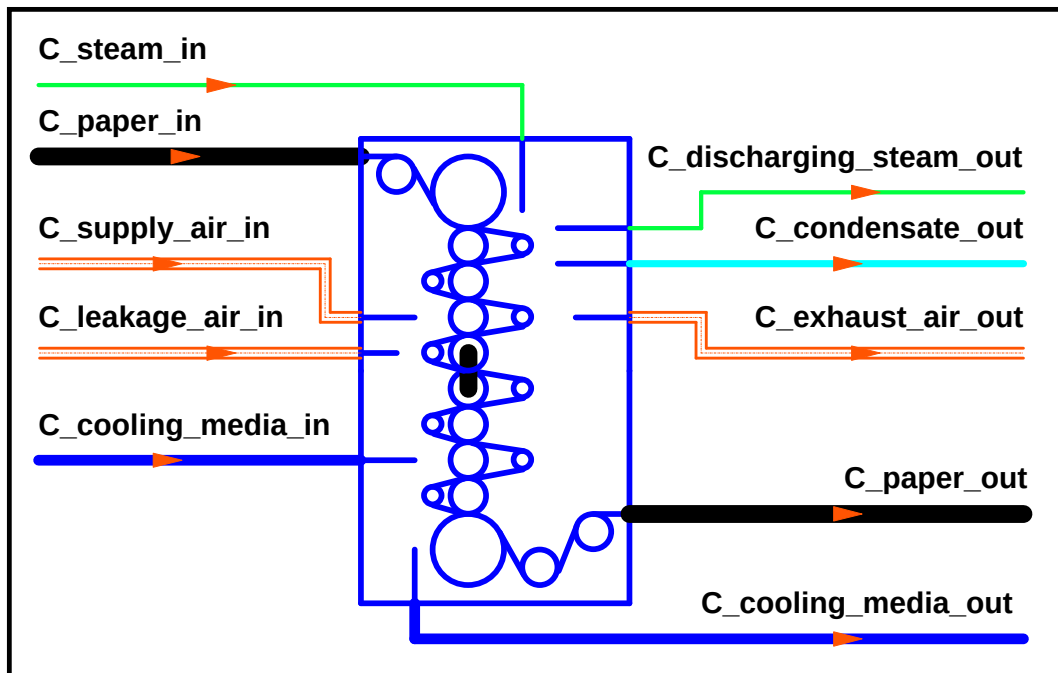


Abb. 4.7-10: Kalanders der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen

Für die Simulation der Streichmaschine der Produktionslinie C wird das Modell einer Kühlzylindergruppe benötigt. Diese schließt sich an die Zylindertrockengruppe der vierten Streicheinheit an und dient der Abkühlung der Papierbahn. Als Berechnungsmodul kann ein bereits in BALAS vorhandener Wärmetauscher genutzt werden. Zur Verdeutlichung der Funktion des Moduls in der grafischen Benutzeroberfläche *Flosheet* wurde ein neues Symbol entworfen (**Abb. 4.7-11**), welches in der Bibliothek *Heat_exchange.cmp* hinterlegt wurde. Die Verknüpfungen zu verschiedenen Wärmetauscher-Modulen sind in der Datei *Heat_exchange.map* gespeichert. **Abb. 4.7-12** zeigt die Anwendung des neuen Symbols in der Simulation der Produktionslinie C.

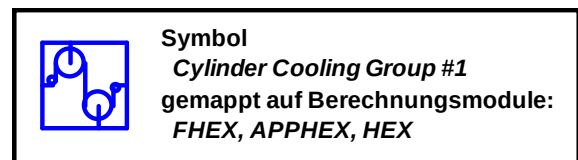


Abb. 4.7-11: Symbol zur Darstellung des Kühlzylinders der Produktionslinie C

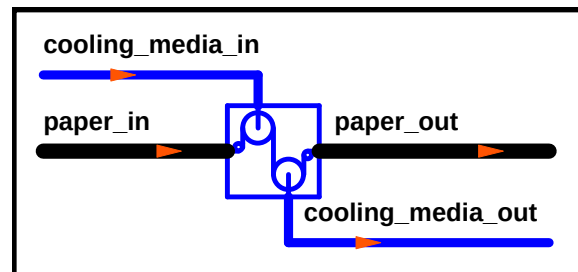


Abb. 4.7-12: Kühlzylinder der Produktionslinie C mit Ein- und Ausgangsströmen

5 Lösungswege zur Systemoptimierung

5.1 Verfahrenstechnische Lösungswege

5.1.1 Schaffung von Hochtemperaturkreisläufen

Die Voraussetzung zur Schaffung von Hochtemperaturkreisläufen ist eine Unterteilung des Gesamtsystems in verschiedene Teilkreisläufe. Die Trennung der Kreisläufe ist durch eine Eindickung, z. B. mit Scheibenfiltern, gut zu realisieren. Das dabei abgetrennte Wasser kann so im entsprechenden Teilkreislauf zurückgehalten werden und fließt nicht mit dem Stoff durch das Gesamtsystem. Mit dem zurückgehaltenen Wasser wird auch die in ihm vorhandene thermische Energie zurückgehalten. Im Rahmen dieser Teilkreisläufe können so unterschiedliche Konzentrationsniveaus, über das Gesamtsystem verteilt, geschaffen werden. Die Schaffung von Hochtemperaturkreisläufen begünstigt eine die Wirtschaftlichkeit von Niedertemperatureindampfern ggf. in Verbindung mit Thermokompression. Außerdem besteht so die Möglichkeit, daß die im System vorhandene Energie aufgrund der höheren Temperatur weiter genutzt werden kann.

5.1.2 Niedertemperatureindampfung

Eine Eindampfung von Wasser ist bei atmosphärischem Druck erst ab einer Temperatur von 100°C möglich. Die Verdampfung des Wassers hat hohe Energiekosten zur Folge. Wird der Druck jedoch, z. B. durch Vakuumpumpen, verringert, dann fällt die Siedetempe-

ratur und eine Verdampfung kann mit der Temperatur ausgewählter Teilkreisläufe realisiert werden. Der benötigte Energieaufwand von Erhitzung und Verdampfung des Wassers ist in **Tab. 5.1-1** dargestellt. Die **Abb. 5.1-2** verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Verdampfungswärme und Temperatur des Wassers. Allerdings sind in diesem Zusammenhang die Kosten zum Betrieb der Vakuumpumpen nicht zu vernachlässigen, da das niedrigere Temperaturniveau durch notwendige Druckminderung „erkauft“ werden muß.

Bei weiterer Schließung der Wasserkreisläufe erhöhen sich Ceteris-Paribus die Konzentrationen im Wasser. Dies kann insbesondere im Blick auf gelöste Stoffe zu einer negativen Beeinflussung der Runability führen.

In diesem Fall müssen interne Reinigungsstufen in die Teilkreisläufe integriert werden. Eine Eindampfung bietet neben den Energiesparpotentialen auch effektive Reinigungsmöglichkeiten. Abweichend von der traditionellen Sichtweise, die gelöste Stoffe Störstoffen gleich setzt, muß im Feinpapierbereich eine differenziertere Betrachtungsweise Anwendung finden. Viele Prozeß- und Produkthilfsmittel liegen in den Kreislaufwässern in gelöster Form vor und ihre Entfernung ist zu vermeiden, um die optimale Ausnutzung dieser Substanzen zu gewährleisten.

Im Blick auf die Optimierung der Systeme muß berücksichtigt werden, daß die Verdampfungs-

Tab. 5.1-1: Wasser-, Dampf- und Luftdaten für Wärmetauscher [5-6]

	Sattdampf 1,013 bar, 100°C	Wasser 100°C (Sättigung)	Luft 1,013 bar, 100°C
Verdampfungswärme [Wh/kg]	627	627	-
Spezifische Wärme [Wh/(kg · °C)]	0,56	1,17	0,28
Gesamte Wärmedurchgangszahl [W/(m ² · °C)] mit Wasser	1500-4000 (Kondensator)	300-1400 (Doppelrohr)	15-17 (Rohrbündel)
Dichte [kg/m ³]	0,60	958	0,93

wärme nicht konstant ist. **Abb. 5.1-2** zeigt die Verdampfungswärme des Wassers in Abhängigkeit der Temperatur. Dabei zeigt sich, daß

ten Konzentrationsschwankungen ausgleichen werden, ohne daß es aufwendiger Regelungstechnik bedurfte.

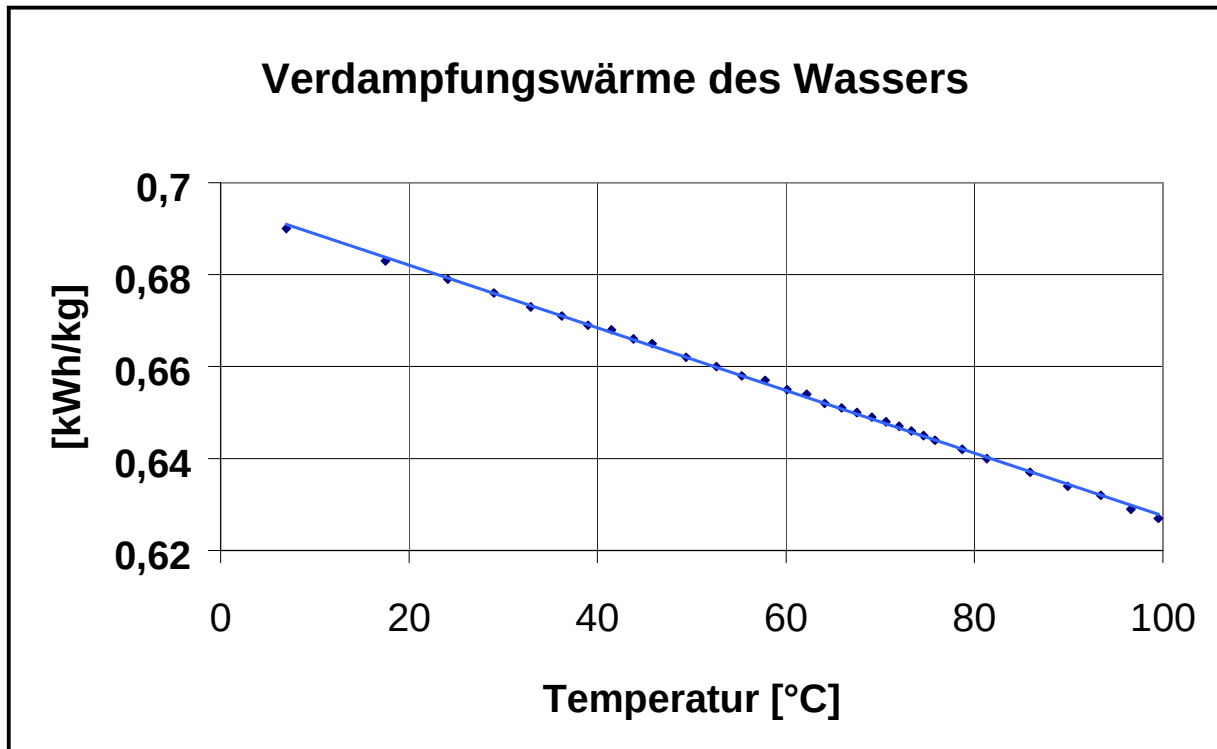


Abb. 5.1-1: Verdampfungswärme des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur [5-6]

ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen Temperatur und Verdampfungswärme des Wassers besteht.

5.1.3 Luftfreie Papiertrocknung

Trocknung von Papier im Vakuum hat keine negativen Einflüsse auf die Produkteigenschaften, der Trocknungsvorgang kann auf geringerem Temperaturniveau durchgeführt werden und die bei atmosphärischem Druck benötigte Verdampfungswärme kann eingespart werden (vgl. **Kapitel 5.1.2**). Außerdem bilden sich im Vakuum keine Grenzschichten, die den Wärmeübergang in der Trockenpartie hemmen.

5.1.4 Verringerung der rechnerischen Austauschzeiten

In der Vergangenheit wurden in der Papierindustrie große Volumen eingeführt, da Prozeßleittechnik nicht vorhanden war und Wasser als unbegrenzt vorhandenes Gut angesehen wurde. Durch möglichst große Pufferbehälter konn-

Durch die verfügbare Prozeßleittechnik sind große Volumen nicht mehr notwendig und durch die Konzentrationssteigerungen der Kreislaufwässer im Rahmen der Kreislaufeinengung, sowie häufiger Sortenwechsel entstehen eine Reihe von Nachteilen.

Mit gestiegener Temperatur- und CSB-Konzentration ist es wichtig, daß die Kreislaufwässer permanent in Bewegung sind, da die biologische Aktivität in den Wässern sonst den Produktionsprozeß negativ beeinträchtigt. Durch kleinere Volumina erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und die rechnerische Austauschzeit wird verringert. Dieser Zusammenhang wird in **Abb. 5.1-2** dargestellt. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten verringern wiederum die biologische Aktivität.

Im Blick auf Sortenwechsel, verringert sich die benötigte Umstellzeit proportional zu den vorhandenen Volumen, da der Sortenwechsel erst mit dem Erreichen eines stabilen und damit eingeschwungenen Zustands abgeschlossen ist.

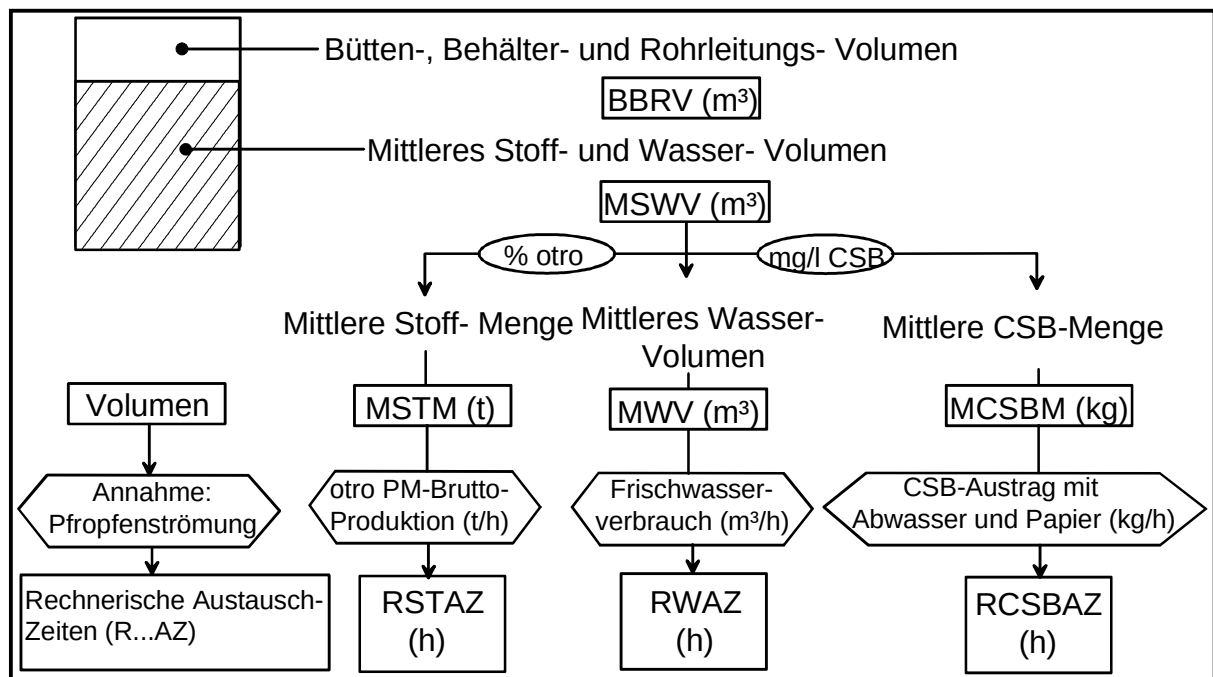


Abb. 5.1-2: Kennzeichnung des Stoff-Wassersystems einer Papierfabrik durch rechnerische Austauschzeiten [5-30]

5.2 Produktionstechnische Lösungswege

5.2.1 Erhöhung der Verfügbarkeit (Run-ability)

Jede Produktionsstörung erhöht die spezifischen Gebräuche, da nur bei geplanten Stillständen die gesamte Produktionslinie abgeschaltet wird. Im Fall einer ungeplanten Produktionsunterbrechung laufen die Maschinen und Aggregate weiter, obwohl die Produktionsmenge ggf. bis auf Null abfällt. Damit ergibt sich für die spez. Gebräuche in diesen Momenten ein undefiniert hoher Wert und auch die mittleren Gebrauchswerte z. B. für einen Monat erhöhen sich so.

Neben den Produktionsstörungen werden die spez. Gebräuche auch durch Sortenwechsel des Papiers erhöht. Bis der Sortenwechsel vollzogen ist, wird i. d. R. nur Ausschuß produziert und die Produktion sinkt damit ebenfalls auf Null ab. Entsprechend der o. g. Erklärung steigen in diesen Phasen die spez. Gebräuche stark an.

Weder im Fall einer Produktionsstörung noch im Fall eines Sortenwechsels existieren Lösungsansätze zur Reduzierung der spez. Gebräuche. Damit wird klar, daß im Blick auf mögliche Einsparungen der Wartung und Instand-

haltung, sowie der Produktionsplanung größere Bedeutung zu kommt.

5.3 Maschinentechnische Lösungswege

5.3.1 Nutzung der Abwärme großer Elektromotoren

Elektromotoren setzen die ihnen zugeführte Energie zum Teil in Wärme um. Dieser Anteil ist abhängig vom Wirkungsgrad des Motors. Die anfallende Wärme wird über ein Lüfterrad vom Motor abgeführt, diffus im Raum verteilt und kann nicht weiter genutzt werden. Zusätzlich müssen in Produktionshallen Belüftungssysteme installiert und betrieben werden, um eine Überhitzung der Motoren auszuschließen. Sollte es gelingen diese Wärme konzentriert in ein Kühlsystem einzuspeisen, würden sich neue Potentiale zur Nutzung der Abwärme ergeben.

In diesem Bereich werden z. Z. Untersuchungen angestellt, um beispielsweise Elektromotoren zukünftig mit Wasser zu kühlen. Veröffentlichungen sind dazu aber noch nicht vorhanden.

5.3.2 Verringerung des Antriebsbedarfes durch Drehzahlregelung

Die Walzenantriebe der PM und der SM werden heute üblicherweise alle mit Frequenzumrichtern gesteuert, aber für Pumpen hat sich eine solche Regelung noch nicht überall durchgesetzt.

Traditionell werden Durchflußmengen über Schieber gesteuert. In dieser Anordnung läuft eine Pumpe permanent mit maximaler Leistung und der Schieber kann durch seine Öffnung die Durchflußmenge regeln. Die nicht benötigte, aber erzeugte Förderleistung wird so am Schieber durch Reibung in Wärme umgewandelt und über den gepumpten Stoff abgeführt.

Mit Frequenzumrichtern läßt sich die Pumpenleistung direkt steuern. Es wird so keine unnötige Pumpenergie erzeugt und die Regelzeiten sind gering. Bei Neuanlagen werden deshalb fast ausschließlich drehzahlgeregelte Pumpen eingesetzt. Nur bei besonders kleinen Pumpen ist die Anschaffung der Regelungselektronik nicht immer wirtschaftlich.

Bei älteren Werken sind aber auch heute oft noch Pumpen, die über Schieber geregelt werden müssen im mittleren Leistungsbereich in Betrieb. Eine Umstellung auf drehzahlgeregelte

einzusparen, ohne daß Nachteile für die Produktion und/oder Produkt entstehen.

In diesem Zusammenhang müssen drei Einflußfaktoren unterschieden werden:

a) Die Auslegung des Elektromotors.

Bei der Auslegung von Anlagen werden alle Motoren mit einem Sicherheitsaufschlag dimensioniert. In der Praxis kann häufig beobachtet werden, daß Motoren mit weniger als 50 % ihrer Maximalleistung arbeiten. Erste Untersuchungen lassen deshalb auf weiteres Optimierungspotential in diesem Bereich schließen.

b) Neben der Auslegung der Motoren, ist ihr Wirkungsgrad entscheidend für den Energieeinsatz. Für das Betriebsverhalten einer Asynchronmaschine gilt:

Die mechanische Leistung an der Welle ergibt sich aus dem Produkt des Drehmoments M , dem Faktor 2, der Kreiskonstanten π und der Drehzahl n . Es ergibt sich somit:

$$P_{mech} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

Die elektrische Wirkleistung P_{el} errechnet sich als Produkt aus der Spannung U , dem Strom I , dem Kosinus des Phasenwinkels φ und dem Faktor 3:

$$P_{el} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 3$$

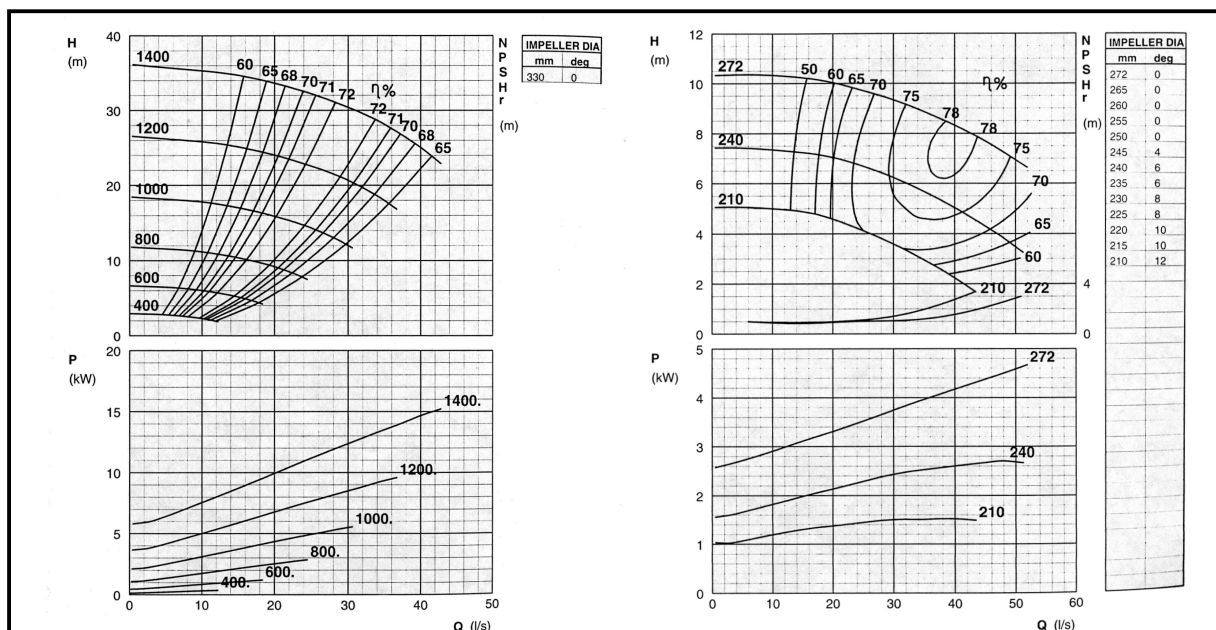


Abb. 5.3-1: Pumpenkennlinien von zwei Prozeßpumpen [5-67]

Pumpen bietet hier die Möglichkeit Energie

Der Wirkungsgrad der Maschine ist durch

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$$

festgelegt.

c) Der Wirkungsgrad einer Pumpe, wird neben dem Wirkungsgrad des angeschlossenen Elektromotors außerdem von der Pumpengeometrie beeinflusst. Dieser Gesamtwirkungsgrad ist aus so genannten Pumpenkurven ersichtlich. In **Abb. 5.3-1** sind exemplarisch zwei Pumpenkurven gegenüber gestellt. Als erster Schritt wird die aufgenommene Leistung in Abhängigkeit der Fördermenge und des eingesetzten Schau-felrads dargestellt. Außerdem kann die Pump-höhe und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit dieser beiden Faktoren dargestellt werden.

5.3.3 Einsatz von Dampfstrahlpumpen

Funktionsweise

Dampfstrahlpumpen sind Aggregate zum För-dern, Verdichten oder Mischen von Dämpfen, wobei zum Antrieb ein gasförmiges oder flüssi-ges Medium dient.

Die Dampfstrahlpumpen (**Abb. 5.3-2**) leisten ihre Arbeit allein dadurch, daß die thermische Energie des Treibmediums in einer geeigneten Düse in kinetische Energie umgesetzt wird. Das Treibmedium (Druck p_1) tritt mit einer hohen

bende Saugmedium (Druck p_3) mit. Dabei ent-steht eine Mischung aus treibendem und mitge-rissenem Dampf.

Diese Mischung wird anschließend durch die Kombination einer Fangdüse und eines Diffu-sors (Lavaldüse) auf den Druck p_2 erhöht, wo-bei sich damit die Strömungsgeschwindigkeit verringert. Das Treibmedium gibt bei der Ver-mischung in der Lavaldüse einen Teil seiner kinetischen Energie durch Impulstausch an das Saugmedium ab, welches dabei beschleunigt wird. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit des Treibmediums ist, desto geringer ist der Verbrauch an Hochdruckdampf [5-16].

Die Besonderheit aller Strahlpumpen liegt darin, daß sie ohne bewegte Teile funktionieren.

Die **Abb. 5-3.2** zeigt den Aufbau eines solchen Gerätes.

Einsatzzweck

Der Sinn des Einsatzes von Dampfstrahl-pumpen liegt darin, den im Produktionsprozeß anfallenden Niederdruckdampf mit Hilfe von Hochdruckdampf so zu verdichten, daß er dem Prozeß auf einem mittleren Druckniveau wieder zur Verfügung stehen kann. Somit wird die thermische Energie des Niederdruckdampfes wieder nutzbar gemacht, was die Effizienz des gesamten Prozesses erhöht.

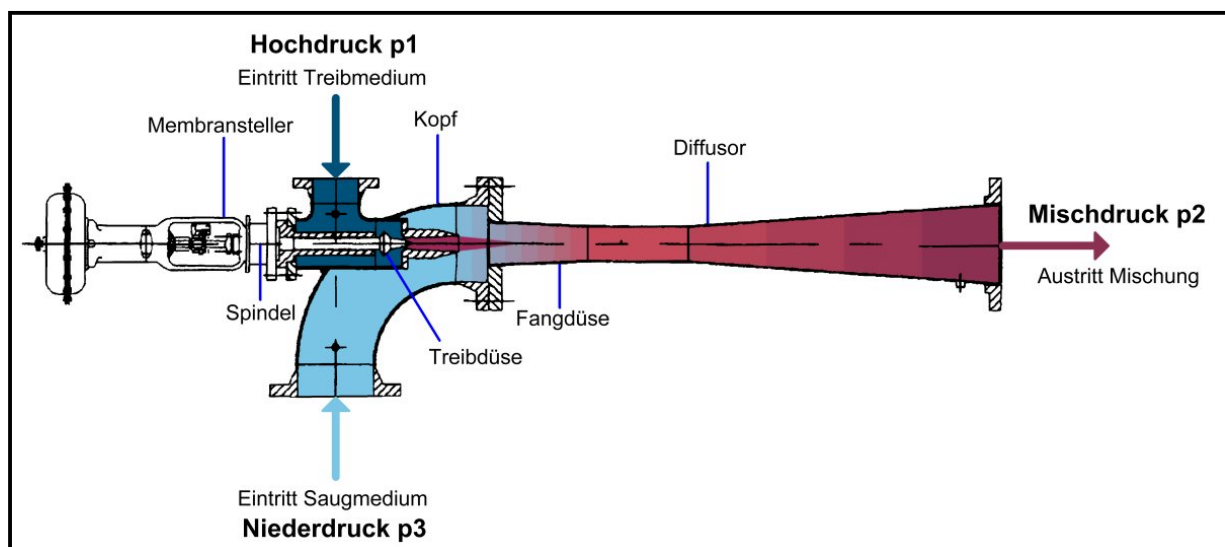


Abb. 5.3-2: Aufbau einer regelbaren Dampfstrahlpumpe mit pneumatischem Stellantrieb

Geschwindigkeit im entspannten Zustand aus der Treibdüse aus und reißt dabei das umge-

Typische Verfahren für den Einsatz von Dampfstrahlpumpen sind Eindampfen, Destillieren, Kühlen, Entgasen, Trocknen unter Vakuum, Kristallisieren und Desodorieren (geruchlos machen). In der Papierindustrie wird komprimierter Niederdruckdampf zum Beispiel als Heizdampf in der Trockenpartie eingesetzt. Mittels Dampfstrahlpumpen wird auch in der chemischen Industrie, in der Holz- und Zellstoffindustrie sowie in der Lebensmittelindustrie Dampf aus dem Prozeß zurückgewonnen.

Berechnungsgrundlagen

Die physikalische Betrachtung der Dampfstrahlpumpe ergibt sich im wesentlichen aus den Gesetzen der Erhaltung der Masse und des Impulses.

Es gilt zum einen die Kontinuitätsgleichung:

„Treibstrom + Saugstrom = Mischstrom“

$$\rho_1 c_1 A_1 + \rho_3 c_3 A_3 = \rho_2 c_2 (A_1 + A_3)$$

Weiterhin gilt auch der Impulserhaltungssatz:

„Treibkraft + Saugkraft = Mischkraft“

$$\rho_1 c_1^2 A_1 + \rho_3 c_3^2 A_3 + p_1 (A_1 + A_3) = \rho_2 c_2^2 (A_1 + A_3) + p_2 (A_1 + A_3)$$

ρ	Dichte	Index
c	Strömungsgeschwindigkeit	1 : Treibmedium
p	Statischer Druck	2 : Mischung
A	Ein- bzw. Austrittsquerschnitt	3 : Saugmedium

Mit diesen zwei Gleichungen kann man für jede Dampfstrahlpumpe die speziellen Kennlinien der Drücke, Strömungsgeschwindigkeiten und Massenströme berechnen.

Bild 1 im **Anhang 9.2.2** zeigt ein Beispiel von Massenströmen und Drücken für eine spezielle Dampfstrahlpumpe mit integriertem Niederdruckbehälter.

In **Bild 2** des **Anhanges 9.2.2** lassen sich die Durchmesser der Ein- und Austrittsflächen einer Dampfstrahlpumpe bei gegebener Tem-

peratur und Menge des jeweiligen Stromes ablesen.

Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Einfache Bauweise
- Geringe Investitionskosten
- Geringer Platzbedarf
- Keine bewegten Teile
- Einfache Wartung
- Sehr guter Mischeffekt
- Sehr geringer Verschleiß
- Unempfindlich gegen Verschmutzung
- Hohe Betriebssicherheit
- Einsatz auch bei aggressiven Medien

Nachteile:

- Hochdruckdampf erforderlich
- Hochdruckleitung an jeder Dampfstrahlpumpe notwendig
- Begrenztes Förderverhältnis von Saug- und Treibmedium

5.3.4 Nutzung von Abwärmequellen durch Wärmepumpen

In der betrieblichen Praxis wird Abwärme bisher hauptsächlich nur dann genutzt, wenn das Temperaturniveau der Wärme hoch genug ist, um sie direkt über Wärmetauscher zu nutzen. Ist das Temperaturniveau der Abwärme zu gering um es direkt über Wärmetauscher zu nutzen, so kann es mit Hilfe von Wärmepumpen auf das benötigte Temperaturniveau angehoben werden.

Das Prinzip der Wärmepumpe ist ein geschlossener Kreislauf, dem Wärme zu- und abgeführt

wird. **Abb. 5.3-3** zeigt den Aufbau einer Wärmepumpe. Dem System wird über ein Wärmetauscher die Wärmemenge $\dot{Q}_{zu}$ zugeführt. In Abschnitt 1 ist der Kreislaufstrom so auf niedrigem Temperaturniveau vorgewärmt. Durch einen Kompressor mit Motor wird der Strom auf das notwendige Temperaturniveau aufgeheizt und anschließend in Abschnitt 2 in einen zweiten Wärmetauscher geführt. Hier wird der Wärmestrom $\dot{Q}_{ab}$ abgegeben. Dabei kühlt sich der Strom ab und wird nach Abschnitt 3 in einem Ventil entspannt. Hier kühlt sich der Strom nochmals ab und wird nach Abschnitt 4 wieder im Wärmetauscher aufgeheizt. Der Vorgang wiederholt sich.

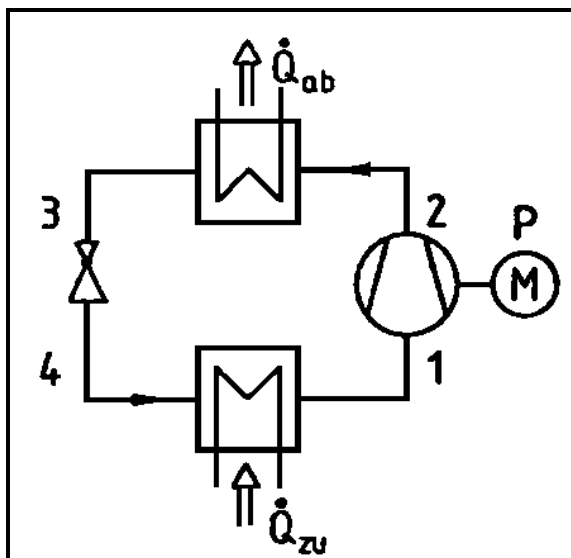


Abb. 5.3-3: Grundprinzip der Wärmepumpe [5-1]

In der **Abb. 5.3-4** ist eine Wärmebilanz der Wärmepumpe dargestellt. Die durch die Pumpe zugeführte mechanische Arbeit P ergibt sich aus der Differenz der abgeführten Wärme Q_{ab} und der zugeführten Wärme Q_{zu} .

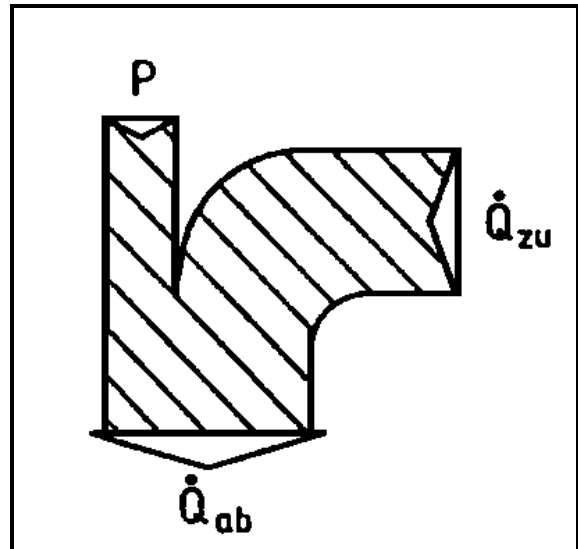


Abb. 5.3-4: Sankey-Diagramm der Wärmepumpe [5-1]

5.3.5 Verringerung der Masse von bewegten Teilen

Mit einer Verringerung der Masse von bewegten Teilen würde der Antriebsbedarf insbesondere beim Beschleunigen sinken. Dies ist z. B. in der Anfahrphase der Fall, bei der üblicherweise der höchste Bedarf an elektrischer Antriebsenergie besteht.

Daneben sind durch geringere Massen auch Veränderungen in der Maschinengeschwindigkeit schneller zu erreichen. Dies hat einen positiven Einfluß auf die Verringerung des Zeitbedarfs bei Sortenwechseln. (vgl. hierzu auch **Kapitel 5.2.1**)

5.4 Zusammenfassung

Einige Lösungsansätze aus der Verfahrens- und Anlagentechnik, Maschinentechnik und Produktionstechnik sind in der **Anlage 9.2.5** zusammengefaßt und nach Optimierungen und Innovationen gegliedert.

6 Prozeß- und Investitionskosten

6.1 Konzept der Kostenangaben

Um Maßnahmen zur Verringerung des Energie-Wasser-, Luft- und Stoffgebrauchs zu bewerten, wird in diesem Kapitel eine Investitions- und Betriebskostenrechnung durchgeführt.

Für die Betrachtung der Betriebskosten werden die in der **Tab. 3.2-3** zusammengestellten Energie-, Rohstoff- und Entsorgungspreise zugrunde gelegt.

Um die Investitions- und Betriebskosten möglichst einfach zu ermitteln und übersichtlich darstellen zu können, werden die bereits in **Kapitel 3** definierten Subsysteme verwendet.

Die Definition der Subsysteme wurde in diesem Pilot-Projekt so allgemein gehalten, daß sie über den betrachteten Production-Line-Systems für alle Produktionslinien gültig sind. Eventuell müssen für andere Papiersorten weitere Subsysteme hinzugefügt werden.

6.2 Einordnung

Neben der bereits in Einleitung dargestellten wirtschaftlichen Bedeutung aus strategischer Sicht, wird in diesem Kapitel eine Investitions- und Betriebskostenrechnung für Maßnahmen zur Verringerung des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffgebrauchs durchgeführt.

Zur Berechnung wird die Kapitalwertmethode angewendet, um eine prinzipielle Aussage über die Wirtschaftlichkeit eines Vorhabens zu bekommen. Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit haben Investitionsvorhaben innerhalb der Finanzierungsrichtlinien der Forstkonzerne i. d. R. dann Aussicht auf Realisierung, wenn die Amortisationszeit unter zwei Jahren liegt. Neu- und Großinvestitionen werden allerdings abweichend beurteilt.

Da die Investitionskosten von Unternehmen zu Unternehmen aufgrund der unterschiedlichen Verhandlungsposition starken Schwankungen unterworfen sind, ist es nicht möglich allgemeine Optimierungslösungen mit den spezifischen Investitionskosten und Einsparmöglichkeiten zu berechnen. Entscheidend ist in die-

sem Zusammenhang auch die Tatsache, daß die einzelnen Unternehmen ihre Lieferantenkonditionen vertraulich behandeln, um so den Lieferanten zu schützen und sich langfristig gute Konditionen zu sichern. Da die Investitionskosten auf dieser Basis als Unbekannte definiert sind, stellt sich im Umkehrschluß die Frage, wie hoch diese sein dürfen, um einen positiven Kapitalwert zu realisieren, wenn damit eine Einheit Energie oder Wasser eingespart werden kann.

Die Berechnung kann zur Entscheidungsunterstützung einfach auf konkrete Investitionsvorhaben übertragen werden. Der hier errechnete maximale Investitionswert ist mit der tatsächlichen Einsparung der Maßnahme zu multiplizieren und man erhält die maximale Investitionssumme des konkreten Projekts.

Die zugrunde gelegten Kosten wurden dem **Kapitel 3** entnommen. Um die Einflußgröße der Kosten und Einsparungen in den Ergebnissen darstellen zu können, sowie die kritischen Einflußparameter auszuweisen, wurden die Ergebnisse zu einer Höchster Spinne verdichtet.

Luft- und Stoffgebräuche sind in diesem Kapitel nicht berücksichtigt. Der Gebrauch von Luft ist nicht mit staatlichen Abgaben belegt und wird deshalb in den Werken bisher nicht erfaßt.

6.3 Berechnung

6.3.1 Berechnungsmethode

Der Kapitalwert C_0 , auch Barwert genannt, wird aus der Summe des Investitionsbetrags I_0 der Periode Null und der abgezinsten Einzahlungsüberschüssen der folgenden Perioden berechnet. Die Einzahlungsüberschüsse ergeben sich aus der Differenz zwischen den Einzahlungen E_t und den Auszahlungen A_t der Periode t .

$$C_0 = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+i)^t} \quad (6.3-1)$$

da durch Einsparmaßnahmen konstante Einzahlungsüberschüsse zu erwarten sind, kann die wie folgt umgeformt werden.

$$C_0 = I_0 + Q \cdot \left[\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+i)^t} \right] \quad (6.3-2)$$

die Summe in der eckigen Klammer entspricht dem Rentenbarwertfaktor RBF , der wie folgt berechnet wird.

$$RBF = \frac{q^n - 1}{q^n \cdot i} \quad (6.3-3)$$

mit $q = i + 1$

Aus den Gleichungen 6.3-2 und 6.3-3 ergibt sich:

$$C_0 = I_0 + Q \cdot RBF \quad (6.3-4)$$

umgestellt nach I_0 erhält man

$$I_0 = C_0 - Q \cdot RBF$$

entsprechend der Vorgabe aus **Kapitel 6.3.1** kann $C_0 = 0$ gesetzt werden. Unabhängig von der Einsparung ist festzuhalten, daß als Einflußfaktoren auf die Berechnung die Laufzeit n und der Zinssatz i zu nennen sind.

Die Kapitalwertmethode berücksichtigt ausschließlich quantifizierbare Aspekte. Es wird davon ausgegangen, daß alle Größen auf einzelne Investitionsprojekte zurechenbar sind, daß Sicherheit bezüglich zukünftiger Ein- und Auszahlungen herrscht und daß alle Zahlungen am Ende der Perioden anfallen. Ferner ist die Sicht auf die Eigenkapitalgeber beschränkt und es wird ein vollkommener Kapitalmarkt unterstellt. Die Annahme des vollkommenen Kapitalmarktes unterstellt:

- o Keine Transaktionskosten
- o Unbeschränkter Marktzutritt
- o Unbeschränkte Möglichkeit der Geldanlage und -aufnahme
- o Vollkommen transparenter Markt
- o Marktteilnehmer sind Preisnehmer
- o Beliebige Teilbarkeit aller gehandelten Titel
- o Keine Steuern

6.3.2 Optimierung des Energiegebrauchs

Die Berechnung des Kapitalwertes wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

Die sich ergebenden Einzahlungsüberschüsse Q entsprechen den Kosteneinsparungen. Sie ergeben sich aus der Einsparung von einem kW elektrischer Energie multipliziert mit der

jährlichen Betriebsdauer BD und dem Strompreis P_{Strom} pro kWh.

$$Q = BD \cdot 24 \cdot P_{Strom} \quad (6.3-5)$$

Weitere Einflußgrößen sind die Periodenanzahl und der Zinssatz, sie fließen in den RBF ein.

Die **Abb. 6.3-1** stellt die maximalen Investitionskosten zur Einsparung von einem kW elektrischer Energie in Abhängigkeit von den Einflußfaktoren dar. Dabei wird ersichtlich, daß der Strompreis und die Betriebsdauer den größten Einfluß aus den Kapitalwert haben. Der geringste Einfluß geht von der Periodendauer aus. Somit bleibt festzuhalten, daß die Umsetzung von Sparmaßnahmen von elektrischer Energie wesentlich von den Strompreisen beeinflusst werden.

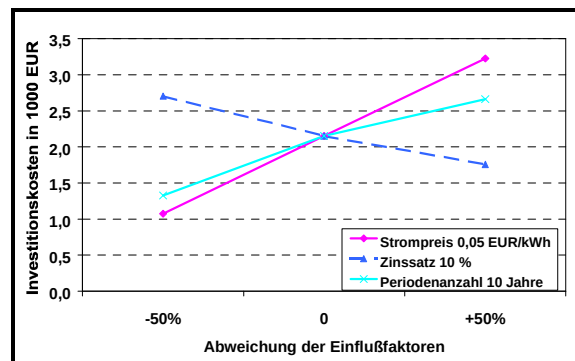


Abb. 6.3-1: Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem kW elektrischer Energie nach der Kapitalwertmethode

6.3.3 Optimierung des Wassergebrauchs

Bei der Optimierung des Wassergebrauchs sind drei unterschiedliche Kostenverursacher zu berücksichtigen:

- o Kosten zur Rohwasseraufbereitung und Abwasserreinigung
- o Kosten zur Erzeugung der thermischen Energie, die mit dem Abwasser verloren geht
- o Kosten durch den Verlust von chemischen Hilfsmitteln, sowie Faser- und Mineralstoffen mit dem Abwasser. Wie in **Kapitel 6.2** dargestellt, sind diese Größen bisher aber nicht

ausreichend quantifizierbar, um sie in die wirtschaftliche Betrachtung einfließen zu lassen.

Daher sind die Einzahlungsüberschüsse Q aus der Summe der Kosteneinsparung für die Wasserbehandlung K_{WA} und der thermischen Energie H_{Th} multipliziert mit den Kosten zur Herstellung der thermischen Energie definiert. K_{WA} schließt die Frischwasser und die Abwasseraufbereitungskosten mit ein.

$$Q = K_{WA} + H_{Th} \cdot P_{Th} \quad (6.3-6)$$

Diese Formel impliziert zwei Grundannahmen:

- o Die Kosten der Abwasserklärung sind zu 100% variabel.
- o Die thermische Energie des Abwassers ist mit der thermischen Energie von Frischdampf gleich zu setzen, obwohl sie auf einem wesentlich geringeren Temperaturniveau vorliegt, bzw. die eingesparte Energiemenge des Abwassers kann in Form von Frischdampf eingespart werden. Ein kg Abwasser mit 30 °C, 1 bar entspricht dabei 0,17 kg Frischdampf mit 179,88 °C, 10 bar.

Die maximalen Investitionskosten nach der Kapitalwertmethode, um einen Liter Abwasser einzusparen, ist in Abhängigkeit der Einflußgrößen in **Abb. 6.3-2** dargestellt.

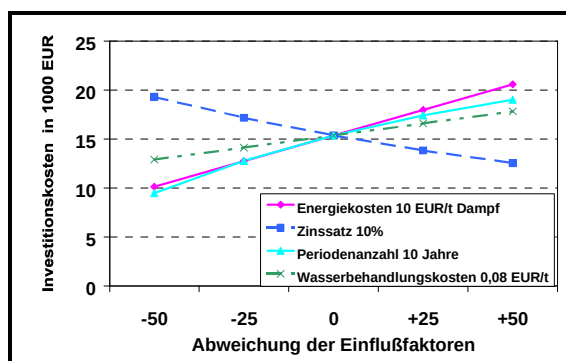


Abb. 6.3-2: Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem m³ Abwasser

6.4 Durchführbarkeit

Wie bereits in **Kapitel 6.2** dargestellt, muß zur Genehmigung von Investitionsvorhaben nach Konzernvorgaben neben der Wirtschaftlichkeit auch eine geringe Amortisationszeit gewährleistet sein. Da die Papierindustrie sehr kapitalintensiv ist, wird dem Risiko der hohen Investitionssummen so Rechnung getragen.

Die **Abb. 6.4-1** und **Abb. 6.4-2** stellen auf Basis der Berechnungen aus **Kapitel 6.3.2** und **6.3.3** die maximalen Investitionskosten bei einer Amortisation von zwei Jahren dar. Erwartungsgemäß zeigt sich, daß die maximalen Investitionsbeträge deutlich geringer sind, als bei einer reinen Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mit einer Laufzeit von zehn Jahren.

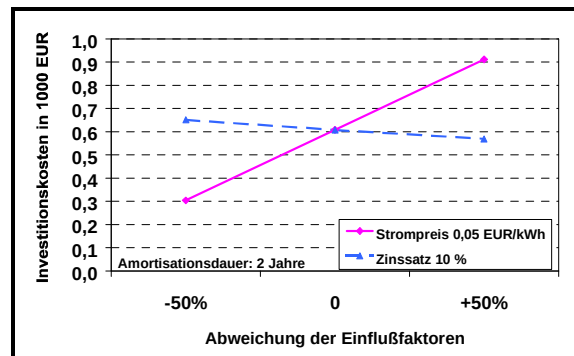


Abb. 6.4-1: Maximale Investitionskosten zur Einsparung von einem kW elektrischer Energie bei einer Amortisationszeit von zwei Jahren

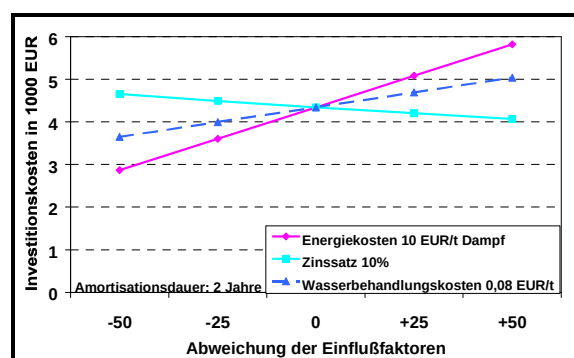


Abb. 6.4-2: Maximale Investitionskosten zur Einsparung eines m³ Abwassers bei einer Amortisationszeit von zwei Jahren

7 Zusammenfassung

Die deutsche Papierindustrie hat in den vergangenen Jahren mit großem Aufwand den spez. Energie-, Wasser-, Stoff- und Luftgebrauch verringert. Trotzdem kommt einer weiteren Optimierung - insbesondere aus strategischer Sicht - eine große Bedeutung zu.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden Konzepte zur Optimierung dieser Gebräuche erarbeitet.

Dazu wurden drei Feinpapier-Produktionslinien in verschiedenen Werken ausgewählt und in der ungestörten Produktionsphase untersucht. Der Aufbau der untersuchten Anlagen wurde systematisiert und dem Hauptstoffstrom folgend von der Stoffauflösung bis zur Rollenverpackung untersucht. Die einzelnen Produktionslinien wurden in Produktions- und Supportsysteme unterteilt. Diese Unterteilung umfaßt folgende Produktionssysteme:

Pulp Systems (PS):

- Chemical Pulp System (CEPUS)
 - Hardwood Pulp System (HWPUS)
 - Softwood Pulp System (SWPUS)
- Mineral Pulp System (MIPUS)
- Amylo Pulp System (AMPUS)
- Additives System (ADDIS)
- Return Pulp System (REPUS)
- Coating Colour System (COCOS)

Paper Machine (PM):

- Approach System (APROS)
- Wet End Section (WETES)
- Wet End Water System (WEWAS)
- Wire System (WIRES)
- Press System (PRESS)
- Dryer Section (DRYES)
- Pre Dryer System (PREDS)
- Sizer System (SIZES)
- Post Dryer System – including Online Calender and Pope Roller (PODYS)

Coating Machine (CM):

- Front Pre Coater and Dryer Systems - including Unwinder (FPCDS)
- Front Top Coater and Dryer Systems (FTCDS)

- Back Pre Coater and Dryer Systems (BPCDS)
- Back Top Coater and Dryer Systems – including Pope Roller (BTCDS)

Finishing Systems (FS):

- Super Calender System (SUCAS)
- Reel Cutter and Packer System (RECPS)

Weiterhin wurden folgende Hilfssysteme unterschieden:

Support Systems (SS):

- Fresh Water System (FEWAS)
- Cooling Water System (COWAS)
- Water Cleaning System (WACES)
- Steam System (STEAS)
- Compressed Air System (COMAS)
- Hall Air System (HALAS)
- Electrical Energy System (ELENS)
- Drying Air System (DRYAS)
- Vacuum System (VACUS)

Die Untersuchung wurde jeweils auf eine festgelegte Papiersorte, zweiseitig gestrichenes Bilderdruckpapier eingegrenzt. Die Produktionslinien und die Papiersorten wurden so gewählt, daß eine hohe Vergleichbarkeit gegeben ist.

In der anschließenden Analyse wurden die Masseströme: Zellstoff, Mineralstoff, Hilfsstoffe, Wasser, Luft, Dampf und Kondensat betrachtet. Zusätzlich wurden die elektrische Energie und die thermische Energie erfaßt. Die thermische Energie wurde als Enthalpie der Masseströme ermittelt.

Die ausgewählten Produktionslinien wurden mit der Simulationssoftware "BALAS" detailliert modelliert. BALAS simuliert als "steady state"-Zustand die Massen- und Energieströme der Systeme.

Bei der Modellierung der Produktionslinien zeigte sich, daß eine systemverfahrenstechnische Einteilung der Teilsysteme unbedingt für die Bewertung des Optimierungspotentials notwendig ist.

Bei der Aufnahme der Prozeßdaten wurde deutlich, daß diese einen enormen Arbeitszeitaufwand erfordert. Um die statistische Sicherheit der Simulationen zu erhöhen und um weitere Papiersorten in die Simulationen aufzunehmen ist die ständige Übernahme der Prozeßdaten aus der Produktion Voraussetzung für die Anwendung der Simulationen auf breiter Ebene. Mit den Simulationen besteht die Möglichkeit, gewachsene Produktionslinien, die technisch-ökonomisch erfolgreich sind, verständlich und begreifbar darzustellen und den Technikern in der Produktion als Werkzeug für die laufende Optimierung zur Verfügung zu stellen.

Für die Interpretation der Daten ist ein umfangreiches Detailwissen über den Aufbau der einzelnen Production Line Systems sowie die Verknüpfung des untersuchten Production Line Systems mit anderen Production Line Systems notwendig. Daher wurde auf eine direkte Gegenüberstellung der Gesamtbilanzen der 3 Produktionslinien verzichtet, da eine solche Gegenüberstellung zu Fehlinterpretationen führen würde (**siehe Kapitel 3.5**).

Es wurden verfahrenstechnische, produktionstechnische und maschinentechnische Lösungswege zur Optimierung der Produktionslinien vorgestellt und diese wurden wirtschaftlich bewertet. (**Kap. 5 und 6, Anhang 9.2.5**)

Die Papierindustrie kann auf eine lange und erfolgreiche techno-ökonomische Entwicklung zurückblicken. Wegen dieser technisch-ökonomisch erfolgreichen Entwicklung ist es sinnvoll, die Produktionslinien mit den Subsystemen im Detail zu modellieren, sowie Vorteile und Nachteile der Produktionslinien mit ihren Subsystemen zu analysieren. Die Nutzung dieser erfolgreichen systemverfahrenstechnischen Lösungen kann dann die Basis optimaler Modelle für neue Produktionslinien und ihrer Subsysteme sein.

Bei der Modellierung der drei Produktionslinien zeigte sich, daß der Arbeitszeitaufwand für die Simulation einer Produktionslinie, der im wesentlichen einmal geleistet werden muß bzw.

zukünftig Bestandteil der Planung von Prozeßverbesserungen sein wird, und der Arbeitszeitaufwand für die Aufnahme der relevanten Daten einer Papiersorte im stabilen Prozeßzustand liegen in der gleichen Größenordnung liegen. Dabei müssen diese Daten für alle wichtigen Papiersorten einer Produktionslinie ermittelt werden - nicht nur als Mittelwerte im stabilen Prozeßzustand, sondern auch in der Schwankungsbreite sowie in der Umstellungsphase und das nicht einmalig, sondern für jede neue Produktionsphase der jeweiligen Papiersorte.

Die angestrebte ständige Optimierung von Produktionslinien ist nur möglich, wenn die Daten mit einem drastisch reduzierten Arbeitszeitaufwand in die Simulation einfließen.

Dies führte zu einem neuen Projekt. Es soll an Feinpapier-Produktionslinien die Nutzung des jeweiligen Prozeßleitsystems (PLS) bzw. der Datenbank erprobt werden. Im Regelfall wird man auf die PLS unabhängigen Datenbanken zurückgreifen - wie z.B. FTP (File Transfer Protocol) in älteren Anlagen oder OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control) in neueren Anlagen. Vorteilhaft ist, daß übliche Simulationsprogramme und Datenbanken meist über MS-Excel[®]-Tabellenskalkulation verbunden werden können. Dies soll in enger Zusammenarbeit mit VTT-Processes geschehen. Dabei muß eine intensive Überprüfung der strukturierten Daten geschehen.

Ziel des Projektes ist die erfolgreiche Nutzung der drei Prozeßleitsysteme bzw. ihrer Datenbanken für die ständige Aktualisierung der sortenspezifischen BALAS-Simulationen für Mittelwerte und Standardabweichungen sowie in der Umstellungsphase.

Das vorrangige Ziel des Folgeprojektes ist die Erarbeitung einer kostengünstigen Methodik zur ständigen sortenspezifischen Optimierung der Produktionslinien hinsichtlich spez. Energie-, Abwasser-, Reststoff-, Abdampf- und Abluftmenge am Beispiel der BALAS-Simulationen von drei Feinpapier-Produktionssystemen durch Übernahme der PLS-Daten aus der Datenbank (z.B. FTP, OPC) über Excel und ihre Nutzung

direkt in der Produktion sowie in der Prozeß- und Produkt-Entwicklung.

Da das Folgeprojekt eine Fortführung des abgeschlossenen Pilotprojektes ist, wird der vorliegende Bericht als Grundlage für das Folgeprojekt dienen und die Ergebnisse des Folgeprojektes in diesen eingearbeitet.

Die Vision ist, daß die Simulationen der jeweiligen Produktionslinien von den Maschinenherstellern zukünftig mitgeliefert werden und das zukünftig neue Produktionslinien oder Teile von Produktionslinien evtl. gemeinsam von Maschinenherstellern und Betreibern modelliert werden und die Produktionslinie dann eine Simulation der Modellierung ist.

Die Simulation muß am Anfang stehen, um den erreichten technischen Stand verständlich darzustellen. Der nächste Schritt ist die Modellierung und Optimierung der Produktionslinien mit allen Subsystemen.

Die Ergebnisse der Projekte liefern das notwendige Werkzeug, um diesen Weg erfolgreich zu meistern.

8 Literaturverzeichnis**Literatur zu Kapitel 1**

- [1-1] Baum, Heinz-Georg; Coenenberg, Adolf G.; Günther, Thomas: *Strategisches Controlling*, 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer- Poeschel, 1999

Literatur zu Kapitel 2

- [2-1] N.N., *Papier 2001.:– Ein Leistungsbericht der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie*, Verband Deutscher Papierfabriken e. V., Bonn, Juni 2001 S. 66
- [2-2] N.N., *Papier 2000.:– Ein Leistungsbericht der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie*, Verband Deutscher Papierfabriken e. V., Bonn, Juni 2000, S. 61
- [2-3] Schneider, Dieter; Vorwerk, Joachim; Rixen, Werner; Harz, Karl: *Verein ZELLCHEMING-95. Hauptversammlung 2000. Vortragsreihe: Bei der Papiererzeugung – produktgruppen- und prozessstufenbezogen – Vergleich unter den Sorten.* ipw 1, S. T184-T190 (2000) Nr. 11
- [2-4] Hoppe, J.; Baumgarten, H.L.; *Die Zukunft des Papiers im elektronischen Zeitalter auf dem Weg in sein 3. Jahrtausend*; Wochenblatt für Papierfabrikation 125, S. 860-871 (1997) Nr. 18; S. 918-927 (1997) Nr. 19
- [2-5] N.N., *Papier ,96.:– Ein Leistungsbericht der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie*, Verband Deutscher Papierfabriken e. V., Bonn, Juni 1996
- [2-6] K.H. Klemm, *Faserrückgewinnung und Wasserhaushalt in Papierfabriken*, Dr. Sändig Verlag KG, Wiesbaden, 1995
- [2-7] Zippel, Fridolin: *Wasserhaushalt von Papierfabriken*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Dt. Fachverlag, 1999, S. 104-112

- [2-8] Demel, I.; Kappen, J.; *Verfahrenstechnik zur Optimierung von Wasserkreisläufen*; Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 141-145 (1999) Nr. 3
- [2-9] Brecht, W.: *Herstellung des Papiers in den vergangenen 100 Jahren – Forschung – technische Entwicklung und Ausbildung*, Wochenblatt für Papierfabrikation 98, S. 273-296 (1970), Nr. 7
- [2-10] Lassenius, F.: *Unterlagen über „Changes in the global Pulp and Paper Industry“*, 1996/1997, UPM-Kymmene Group, Helsinki
- [2-11] Naydowsky, Ch.: *Unterlagen über „Technische und ökonomische Trends in der Papiertechnologie“*, 1996, 1997, Omya-Plüss-Staufer AG Oftringen /Schweiz
- [2-12] Baumgarten, H. L.; Welcker, U.: *Zur Technologie des Wassergebrauchs in Papierfabriken*. Das Papier 40, S. V181-V192 (1986) Nr. 10A
- [2-13] Mohr, M.; Zoilek, A.; Gernhardt, D.; Skiba, M.; Unger, H.; Ziegelmann, A.; *Zukunftsfähige Energietechnologien für die Industrie: Technische Grundlagen, Ökonomie, Perspektiven*. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer 1998
- [2-14] Rixen, W.; Harz, Karl; Götz, Bernd; Schneider, Dieter; Vorwerk, Joachim: *Verein ZELLCHEMING-95. Hauptversammlung 2000, Vortragsreihe: Energieeinsatz in der Papierindustrie*. ipw 1, S. T159-T182 (2000) Nr. 11
- [2-15] Drasdo, P.; Starrmann, F.: *Analyse und Prognose des Energieeinsatzes, des Energieaufkommens und der CO2-Emmissionen der Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland*. EWI-Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln, März 2000
- [2-16] Weidenmüller, Jürgen: *“Valmet Ventilation Days” in Bamberg*. apr 123, S. 18-22 (1999) Nr. 1

- [2-17] APV – Jahrestreffen Darmstadt 1978. Vortragsreihe: Analyse und Bedeutung des Energieverbrauchs in der Zellstoff- und Papierindustrie. Sonderdruck aus dem „Wochenblatt für Papierfabrikation“ (1979). Biberach: Güntter-Staib Verlag
- [2-18] Talja, R.; Kerttula, R.; Karlsson, M.: *Future Paper Production Line Concepts Regarding Energy and Environmental Aspects*. Das Papier 51, S. V203-V207 (1997) Nr. 6A
- [2-19] APV – Jahrestreffen Darmstadt 1998: *Innerbetriebliche Wassersysteme*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 134-145 (1999) Nr. 3; S. 223-226 (1999) Nr. 4; S. 303-317 (1999) Nr. 5
- [2-20] Brecht, W.; Dalpke, H.L.: *Wasser, Abwasser, Abwasserreinigung*. Biberach an der Riß: Güntter-Staib Verlag, 1980
- [2-21] Lambrecht, Gerhard; Egenes, Tom H.; Bendiksen, Pål: *Faserstoffversorgung der Papierindustrie nach der Jahrtausendwende*. Das Papier 51, S. V68 (1997) Nr. 6A
- [2-22] Häggblom, Rainer: *Supply on Virgin Pulps and Recycled*. Das Papier 51, S. V63-V67 (1997) Nr. 6A
- [2-23] Frenthelm, Kristen: *The Challenge of Maximizing Raw Material Utilization*. Das Papier 51, S. V24-V27 (1997) Nr. 6A
- [3-3] Rubik, Frieder: *Ökologische Produktpolitik: Von der Beseitigung von Stoffen und Materialien zur Rückgewinnung in Kreisläufen*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1997
- [3-4] Weizäcker von, Ernst Ulrich: *Nachhaltigkeit – Herausforderung für die Papierwirtschaft*. Das Papier 51, S. V1-V4 (1997) Nr. 6A
- [3-5] Wollny, Volrad: *Umsetzung der Ziele des Sustainable Development in der Papierindustrie*. Das Papier 51, S. V4-V8 (1997) Nr. 6A
- [3-6] Meißner, St.: *Der nachhaltige Papierkreislauf – Antwort seitens der Gesetzgebung*. Das Papier 51, S. V9-V14 (1997) Nr. 6A
- [3-7] Frenthelm, Kristen: *The Challenge of Maximizing Raw Material Utilization*. Das Papier 51, S. V24-V27 (1997) Nr. 6A
- [3-8] Stark, Helmut: *Nachhaltigkeit für eine zukunftsorientierte Papiererzeugung heißt bessere Rohstoffnutzung, Energieeinsparung und Kreislaufschließung*. Das Papier 51, S. V128-V131 (1997) Nr. 6A
- [3-9] Meinecke, Albrecht: *Die Papiermaschine der Zukunft im Hinblick auf den nachhaltigen Papierkreislauf*. Das Papier 51, S. V132-V137 (1997) Nr. 6A
- [3-10] Umweltbundesamt: *Ökobilanzen für grafische Papiere*. Texte des Bundesumweltamtes Nr. 22/2000. Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin

Literatur zu Kapitel 3

- [3-1] Macharzina Klaus: *Unternehmensführung: Das internationale Managementwissen*, 3. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 1999
- [3-2] Baum, Heinz-Georg; Coenenberg, Adolf G.; Günther, Thomas: *Strategisches Controlling*, 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer- Poeschel, 1999
- [3-11] OECD: *Rethinking Paper Consumption*. Oslo: Report Of The OECD Workshop 14.11.1996, OCDE/GD(97)111
- [3-12] OECD: *Environmental Requirements For Industrial Permitting, Case Study On The Pulp And Paper Sector, Part One*. ENV/EPOC/PPC(99)8, FINAL/PART 1, 1999

- [3-13] OECD: *Environmental Requirements For Industrial Permitting, Case Study On The Pulp And Paper Sector, Part Two*. ENV/EPOC/PPC(99)8, FINAL/PART 2, 1999
- [3-14] Lambrecht, Gerhard; Egenes, Tom H.; Bendiksen, Pål: *Faserstoffversorgung der Papierindustrie nach der Jahrtausendwende*. Das Papier 51, S. V68 (1997) Nr. 6A
- [3-15] Häggblom, Rainer: *Supply on Virgin Pulps and Recycled*. Das Papier 51, S. V63-V67 (1997) Nr. 6A
- [3-16] Frenthelm, Kristen: *The Challenge of Maximizing Raw Material Utilization*. Das Papier 51, S. V24-V27 (1997) Nr. 6A
- [3-17] DIN 4710 (1982): *Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauches von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen*
- [3-18] APV-Jahrestreffen 1983. *Vortragsreihe: Einengen und Schließen von Wasserkreisläufen in Papierfabriken*. Sonderdruck aus dem „Wochenblatt für Papierfabrikation“ (1984) Nr. 1, 2, 3, 4; Herausgegeben vom Güntter-Staib Verlag, Postfach 14 52, 7950 Biberach 1
- [3-19] Baumgarten, H. L.: *Energy Usage in paper technology and its development prospects*. TUD-Manuskript: Technologie der Wassernutzung in Papierfabriken, Dresden: Selbstverlag für Papiertechnik, 2000. Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
- [3-20] Baumgarten, H. L.; Welcker, U.: *Zur Technologie des Wassergebrauchs in Papierfabriken*. Das Papier 40, S. V181-V192 (1986) Nr. 10A
- [3-21] Lucas, Klaus: *Thermodynamik, Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer, 2000, S. 486-578

Literatur zu Kapitel 4

- [4-1] Macharzina Klaus: *Unternehmensführung: Das internationale Managementwissen*. 3. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 1999
- [4-2] Baum, Heinz-Georg; Coenenberg, Adolf G.; Günther, Thomas: *Strategisches Controlling*, 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer- Poeschel, 1999
- [4-3] Töpfer, Armin (Hrsg.): *Benchmarking – Der Weg zu Best Practice*. Berlin: Springer, 1997
- [4-4] Kugeler, Kurt; Phlippen, Peter- W: *Energietechnik: Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen*, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, S. 19-38
- [4-5] VTT Energy: *Balas Process Simulation Software: Balas 2.0, User Guide*. P.O.Box 1603, FIN-40101 Jyväskylä, Finnland
- [4-6] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*, 5. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988, S. Db 1 – Db 20
- [4-7] Lucas, Klaus: *Thermodynamik, Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer, 2000, S. 486-578
- [4-8] Lucas, Klaus: *Thermodynamik, Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung*. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer, 1995
- [4-9] Ashton, J.; Cripps, H. R.; Spriggs, J. D.: *Application of "pinch" technology to the pulp and paper industry*. Tappi Journal 70, S. 81-85 (1987) Nr. 8
- [4-10] Noël, G.; Boisvert, G.: *Project design in energy efficiency using Pinch analyses*. Pulp & Paper Canada 100, S. 103 (T409) – 105 (T411) (1999) Nr. 12

- [4-11] Diggelmann, D.: *Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode (PDM) bei der Ziegler Papier AG Grellingen /CH*. Wochenblatt für Papierfabrikation 123, S. 652-653 (1995) Nr. 14/15
- [4-12] Schaareman, M.; Verstraeten, E.; Blaak, R.; Hooimeijer, A.; Chester, I.: *Energy and Water Pinch study at the Parenco Paper mill*. Paper Technology 41, p 47-52 (February 2000)
- [4-13] Vauck, Wilhelm R. A.; Müller, Hermann A.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. 10. Auflage. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1994
- [4-14] Edelman, K.; Kaijaluo, S.; Karlsson, M.: *Toward Effluent Free Paper Mill*. Das Papier 51, S. V138-V145 (1997) Nr. 6A
- [4-15] Hirschberg, Hans Günther: *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit*. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer 1999
- [4-16] Kappen, Johannes; Dietz, Wolfram; Demel, Ingrid: *Simulationstechnik als Werkzeug zur Prozessoptimierung bei der Papiererzeugung*. ipw 2, S. T23-29 (2001) Nr. 2
- [4-17] Reid, Robert C.; Prausnitz, John M.; Sherwood, Thomas K.: *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw-Hill Book Company, New York, 3rd Edition 1977
- [4-18] McCabe, Warren L.; Smith, Julian C.; Harriott, Peter: *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill Higher Education, New York, 6th Edition 2001
- [4-19] Paccot, Christian: *Analyse Exergetique Des Usines De Pate A Papier Par Simulation*. L'Institut National Polytechnique De Grenoble, Dissertation, Grenoble 1987
- [4-20] Dittmann, A.; Böhmer, P.: *Kompensations Technische Thermodynamik / Energielehre*. Technische Universität Dresden, 1. Auflage 1997
- [4-21] Wark Kenneth, Jr.: *Thermodynamics*. McGraw-Hill Book Company, New York, 5th Edition 1988
- [4-22] Baumgarten, H.L.: *Über die Satinage von Druckpapieren*. Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, Darmstadt 1978
- ### Literatur zu Kapitel 5
- [5-1] Kugeler, Kurt; Philippen, Peter- W: *Energietechnik: Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen*, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, S. 61-63, 189-194, 272-273
- [5-2] Lucas, Klaus: *Thermodynamik, Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung*, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer, 2000, S. 486-578
- [5-3] Hirschberg, Hans Günther: *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit*. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer 1999
- [5-4] Vauck, Wilhelm R. A.; Müller, Hermann A.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*, 10. Auflage. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1994, S. 458-461
- [5-5] Schlichting, Hermann; Gersten, Klaus: *Grenzschichttheorie*, 9. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. a.: Springer 1997
- [5-6] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*, 5. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988, S. Db 1 – Db 20
- [5-7] Spring, Eckhard: *Elektrische Maschinen: Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer, 1989

- [5-8] Mohr, M.; Zoilek, A.; Gernhardt, D.; Skiba, M.; Unger, H.; Ziegelmann, A.: *Zukunftsfähige Energietechnologien für die Industrie: Technische Grundlagen, Ökonomie, Perspektiven*. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer 1998
- [5-9] Rixen, W.; Harz, Karl; Götz, Bernd; Schneider, Dieter; Vorwerk, Joachim: *Verein ZELLCHEMING-95. Hauptversammlung 2000: Vortragsreihe: Energieeinsatz in der Papierindustrie*. ipw 1, S. T159-T182 (2000) Nr. 10
- [5-10] Schneider, Dieter; Vorwerk, Joachim; Rixen, Werner; Harz, Karl: *Verein ZELLCHEMING-95. Hauptversammlung 2000: Vortragsreihe: Bei der Papiererzeugung – produktgruppen- und prozessstufenbezogen – Vergleich unter den Sorten*. ipw 1, S.T184-T190 (2000) Nr. 11
- [5-11] Drasdo, P.; Starrmann, F.: *Analyse und Prognose des Energieeinsatzes, des Energieaufkommens und der CO₂-Emissionen der Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland*. EWI-Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln, März 2000
- [5-12] Talja, R.; Kerttula, R.; Karlsson, M.: *Future Paper Production Line Concepts Regarding Energy and Environmental Aspects*. Das Papier 51, S. V203-V207 (1997) Nr. 6A
- [5-13] APV – Jahrestreffen Darmstadt 1978: *Vortragsreihe: Analyse und Bedeutung des Energieverbrauchs in der Zellstoff- und Papierindustrie*. Sonderdruck aus dem „Wochenblatt für Papierfabrikation“ (1979). Biberach: Gütter-Staib Verlag
- [5-14] Sundqvist, Hans: *Dryer Section Heat Recovery Improves Profitability*. Fiber&Paper, Volume 2, Issue 3, 2000
- [5-15] Schaareman, M.; Verstraeten, E.; Blaak, R.; Hooimeijer, A.; Chester, I.: *Energy and Water Pinch study at the Parenco Paper mill*. Paper Technology 41, p 47-52 (February 2000)
- [5-16] Markku Karlsson: *Papermaking Science and Technology: Papermaking Part 2, Drying*. Helsinki: Fapet Oy, 2000, S. 276-284
- [5-17] Diggelmann, D.: *Energiestudie mit der Pinch-Design-Methode (PDM) bei der Ziegler Papier AG Grellingen /CH*. Wochenblatt für Papierfabrikation 123, S. 652-653 (1995) Nr. 14/15
- [5-18] Ashton, J.; Cripps, H. R.; Spriggs, J. D.: *Application of “pinch” technology to the pulp and paper industry*. Tappi Journal 70, S. 81-85 (1987) Nr.8
- [5-19] Worrell, Ernst: *A Large Potential to Improve Energy Efficiency*. ipw 2, S. 18-22 (2001) Nr. 4
- [5-20] ABB: *Manage Your Energy Resources and Reduce Costs*. ipw 2, S. 23-26 (2001) Nr. 4
- [5-21] Helble, Alfred; Möbius, Christian H.: *Kreislaufeinengung und –schließung mit Hilfe interner und externer Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung*. ipw 1, T206 (2000) Nr. 12
- [5-22] PTS-RH 014/93, 1993-11: *Halbstoffprüfung: Bestimmung der Abgabe von oxidierbaren Stoffen an das Wasser beim Suspendieren von Halbstoffen (CSB-Abgabe)*
- [5-23] DIN 38409 T41, 1980-12: *Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H)*
- [5-24] DIN 38409 T43, 1981-12: *Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H)*
- [5-25] DIN 38409 T44, 1992-05: *Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H)*

- [5-26] Baumgarten, H. L.: *Energy Usage in paper technology and its development prospects*. TUD-Manuskript: Technologie der Wassernutzung in Papierfabriken, Dresden: Selbstverlag für Papiertechnik, 2000, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
- [5-27] Edelmann, K.; Kaijaluoto, S.; Karlsson, M.: *Toward Effluent Free Paper Mill*. Das Papier 51, S. V138-V145 (1997) Nr. 6A
- [5-28] APV – Jahrestreffen Darmstadt 1998: *Innerbetriebliche Wassersysteme*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 134-145 (1999) Nr. 3; S. 223-226, (1999) Nr. 4; S. 303-317 (1999) Nr. 5
- [5-29] Nuortila-Jokinen, J.; Heiskanen, P.; Matula, J.: *Practical Methods to Reduce Water Consumption in a Printing Paper Mill*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 1392-1395 (1999) Nr. 21
- [5-30] Baumgarten, H. L.; Welcker, U.: *Zur Technologie des Wassergebrauchs in Papierfabriken*. Das Papier 40, S. V181-V192 (1986) Nr. 10A
- [5-31] APV-Jahrestreffen 1983: *Vortragsreihe: Einengen und Schließen von Wasserkreisläufen in Papierfabriken*. Sonderdruck aus dem „Wochenblatt für Papierfabrikation“ (1984) Nr. 1, 2, 3, 4; Herausgegeben vom Gütnter-Staib Verlag, Postfach 14 52, 7950 Biberach 1
- [5-32] Mönningmann, R., Schwarz, M.: *Abwasserfreie Papierfabrik – Traum oder Alptraum*. Das Papier 50, S. 357-365 (1996) Nr.6
- [5-33] Münster, Heinrich; Fuchs, Andreas: *Kreislaufschließung und integrierte Behandlung hochbelasteter Abwässer mittels Vakuumverdampfung*. ipw 1, S. T139-T146 (2000) Nr. 9
- [5-34] Schaareman, M.; Verstraeten, E.; Blaak, R.; Hooimeijer, A.; Chester, I.: *Energy and Water Pinch study at the Parenco Paper mill*. Paper Technology 41, p 47-52 (February 2000)
- [5-35] Göttching, L.; Lüttgen, W.: *Organische Hilfsstoffe als eine Quelle der Wasserbelastung bei der Papierherstellung*. Das Papier 32, S. V46-53 (1978) Nr. 10A
- [5-36] Lüttgen, W.; Göttching, L.: *Über die durch gelöste Substanzen verursachte Belastung des Fabrikationswassers bei der Papierherstellung, Teil II*. Das Papier 43, S. 504-510 (1979) Nr. 11
- [5-37] Göttching, L.; Lüttgen, W.; Dalpke, H.-L.: *Über die durch gelöste Substanzen verursachte Belastung des Fabrikationswassers bei der Papierherstellung, Teil I*. Das Papier 31, S. 257-263 (1977) Nr. 7
- [5-38] Fischer, H.; Ruckendorfer, J.: *Abwassertemperaturprobleme durch Reduktion des Frischwasserbedarfs einer Papierfabrik*. Wochenblatt für Papierfabrikation 126, S. 158-160 (1998) Nr. 4
- [5-39] Geistbeck, M.: *Der optimale Wasserkreislauf im Spannungsfeld zwischen Produktivität und Kosten*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 231-236 (1999) Nr. 4
- [5-40] Schmidt, T.: *Kreislaufschließung – Maßnahmen und Folgen*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 227-230 (1999) Nr. 4
- [5-41] Baumgarten, D.; Ewert, A.: *Anforderungsprofile innerhalb der Wassersysteme einer Feinpapierfabrik*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 308-310 (1999) Nr. 5
- [5-42] Demel, I.; Kappen, J.: *Verfahrenstechnik zur Optimierung von Wasserkreisläufen*. Wochenblatt für Papierfabrikation 127, S. 141-145 (1999) Nr. 3

- [5-43] Schmidt, Thomas; Demel, Ingrid; Lange, Steffen: *Weitergehende Abwasserreinigung von Papierfabriksabwässern mit Ozon: Konzeption und erste Betriebserfahrungen*. ipw 2, S. T30-34 (2001) Nr. 2
- [5-44] Zippel, Fridolin: *Wasserhaushalt von Papierfabriken*, 1. Aufl. Frankfurt am Main: Dt. Fachverlag, 1999
- [5-45] Brecht, W.; Dalpke, H.L.: *Wasser, Abwasser, Abwasserreinigung*. Biberach an der Riß: Güntter-Staib Verlag, 1980
- [5-46] Möbius, Ch. H.: *Abwasser der Papier- und Zellstoffindustrie: Biologische Reinigung von Abwässern aus der Erzeugung von Papier und Zellstoff*. Heusenstamm: Keppler Verlag, 1994
- [5-47] Möbius, Christian H.; Cordes-Tolle, Maria: *Paradigmenwechsel in der Vermeidung von Abwasseremissionen der Papierindustrie*. Das Papier 51, S. V160-V165 (1997) Nr. 6A
- [5-48] Diedrich, Karl; Hamm, Udo; Knelissen, Johannes Hendrik: *Biologische Kreislaufwasserbehandlung in einer Papierfabrik mit geschlossenem Wasserkreislauf*. Das Papier 51, S. V153-V159 (1997) Nr. 6A
- [5-49] Bourgogne, Gilles; Laine, Jaakko E.: *A review of the effects of reduced water consumption on the wet end of the paper machine and the quality of paper*. Paperi ja Puu – Paper and Timber Vol. 83, page 190 – 203 (2001) No. 3
- [5-50] Ebling, Norbert: *Abluft und Abgas: Reinigung und Überwachung*. Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto: Wiley-VCH, 1999
- [5-51] Weidenmüller, Jürgen: *“Valmet Ventilation Days” in Bamberg*. apr 123, S. 18-22 (1999) Nr. 1
- [5-52] Ochsner, Karl: *Wärmepumpen in der Heizungstechnik: Praxishandbuch für Installateure und Planer*. Heidelberg: Müller Verlag, 2000
- [5-53] Saito, Takamoto; Igarashi Yoshio: *Heat Pumps - Solving Energy and Environmental Challenger*. Oxford, New York, Beijing, Frankfurt, u. a.: Pergamon Press, 1990
- [5-54] Kruse, Horst; Heidelck, Rudolf: *Heizen mit Wärmepumpen: ein Informationspaket*, 2. Auflage. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1997
- [5-55] Kirn, Herbert: *Wärmepumpen Band 1, Grundlagen der Wärmepumpentechnik*, 6. Auflage. Karlsruhe: Müller, 1983
- [5-56] Kirn, Herbert; Hadenfeldt Alfred: *Wärmepumpen Band 2, Anwendung der Elektrowärmepumpe*, 3. Auflage. Karlsruhe: Müller, 1979
- [5-57] VDI-Gesellschaft Energietechnik: *Wärmepumpen: Energieeinsparung und Umweltschutz: Tagung Kassel 16. Mai 1995 (VDI-Berichte: 1177)*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- [5-58] VDI-Gesellschaft Energietechnik: *Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen: Tagung: Cogeneration power plants and heat pumps (VDI-Berichte: 1019)*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993
- [5-59] Jorisch, Wolfgang (Hrsg.): *Vakuumtechnik in der chemischen Industrie*. Weinheim, New York, Chichester u. a.: Wiley- VCH, 1999, S. 185-206
- [5-60] Lafferty, James M.: *Foundations Of Vacuum Science And Technology*. New York, Chichester, Weinheim u. a.: John Wiley & Sons Inc., 1998
- [5-61] Wutz, Max; Adam, Hermann; Walcher, Wilhelm: *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*, 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1992
- [5-62] Pupp, Wolfgang; Hartmann, Heinz K.: *Vakuumtechnik: Grundlagen und Anwendungen*. München, Wien: Hanser Verlag, 1991

- [5-63] Kerspe, Jobst H.: *Vakuumtechnik in der industriellen Praxis*, 2. Auflage. Ehningen: expert-Verlag, 1993
- [5-64] Münster, Heinrich; Fuchs, Andreas: *Kreislaufschließung und integrierte Behandlung hochbelasteter Abwässer mittels Vakuumverdampfung*. ipw 1, S. T139-T146 (2000) Nr. 9
- [5-65] Baumgarten, H. L.; Militzer, K.-E.; v. Papen, M.; De Giuli, P.: *Beeinflussung der Papiereigenschaften durch die Trocknungsbedingungen bei der Vakuumtrocknung*, Forschungsbericht TUD-LPT 01/97. Dresden: Selbstverlag für Papiertechnik 1997
- [5-66] Klein, Harald: *Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines Thermokompressors*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 91. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996
- [5-67] Ahlstrom Corporation: *Ahlstrom Pump Curves*. A. Ahlstrom Corporation, Pump Industry, 48601 Karhula, Finnland, S. 386
- [5-68] N.N.: *Elektrische Antriebe – Energiesparmotoren: Kosteneinsparung statt Regulierung*; Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. ZVEI; Fachverband elektrische Antriebe; Juni 2000

Literatur zu Kapitel 6

- [6-1] Perridon, L.; Steiner, M.: *Finanzwirtschaft der Unternehmung*, 9. Auflage. München: Vahlen, 1997
- [6-2] Baum, Heinz-Georg; Coenenberg, Adolf G.; Günther, Thomas: *Strategisches Controlling*, 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer- Poeschel, 1999
- [6-3] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Wärmeatlas*, 5. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- [6-4] Macharzina Klaus: *Unternehmensführung: Das internationale Managementwissen*, 3. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 1999

9 Anhang

9.1 Darstellungen der einzelnen Feinpapier-Produktionslinien 9-2

Produktionslinie A: PM2 (480 t/d), CM2 (770 t/d) (135 g/m²)

Produktionslinie B: PM2 (517 t/d), CM1 (862 t/d) (150 g/m²)

Produktionslinie C: PM3 (540 t/d), CM3 (557 t/d) (150 g/m²)

9.1.1 Flowsheet der Feinpapier-Produktionslinie B nach Umbau einer bestehenden fiktiven Feinpapierfabrik 9-2

9.1.2 Flowsheet der Feinpapier-Produktionslinie B nach erster Systematisierung mit eingezeichneten Systemgrenzen der Subsysteme 9-3

9.1.3 Beispiele zum Stand der Simulation und Bilanzierung – 07/2001 9-4

9.1.4 Specific mass and energy balances – 08/2001 der Produktionslinie C 9-5

9.1.5 Specific mass and energy flows between subsystems and support systems – 08/2001 der Produktionslinie A 9-6

9.1.6 Production Line System der Produktionslinie B 9-7

9.1.7 Terms, definitions and shortcuts 9-8

9.1.8 Subsystemdarstellung: Chemical Pulp System (CEPUS) der Produktionslinie B 9-9

9.1.9 Dryer Section (DRYES) der Produktionslinie C 9-10

9.1.9.1 Subsystemdarstellung: Pre Dryer System (PREDS) 9-10

9.1.9.2 Subsystemdarstellung: Sizer System (SIZES) 9-11

9.1.9.3 Subsystemdarstellung: Post Dryer System (PODYS) 9-12

9.1.9.4 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/DRYES) 9-13

9.1.10 Wet End Section (WETES) der Produktionslinie A 9-14

9.1.10.1 Subsystemdarstellung: Wire System (WIRES) 9-14

9.1.10.2 Subsystemdarstellung: Press System (PRESS) 9-15

9.1.10.3 Subsystemdarstellung: Fresh Water System (FEWAS/WETES) 9-16

9.1.10.4 Subsystemdarstellung: Steam System (STEAS/WETES) 9-17

9.1.10.5 Subsystemdarstellung: Return Pulp System (REPUS/WETES) 9-18

9.1.11 Coating Machine (CM) der Produktionslinie B 9-19

9.1.11.1 Subsystemdarstellung: Front Pre Coater and Dryer System 9-19

9.1.11.2 Subsystemdarstellung: Front Top Coater and Dryer System 9-20

9.1.11.3 Subsystemdarstellung: Back Pre Coater and Dryer System 9-21

9.1.11.4 Subsystemdarstellung: Back Top Coater and Dryer System 9-22

9.1.11.5 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/CM) 9-23

9.2 Technische Erläuterungen 9-24

9.2.1 Vorgehensweise beim Einbinden neuer Module in Systembibliotheken der grafischen Benutzeroberfläche FLOSHEET für die Simulationssoftware BALAS 9-24

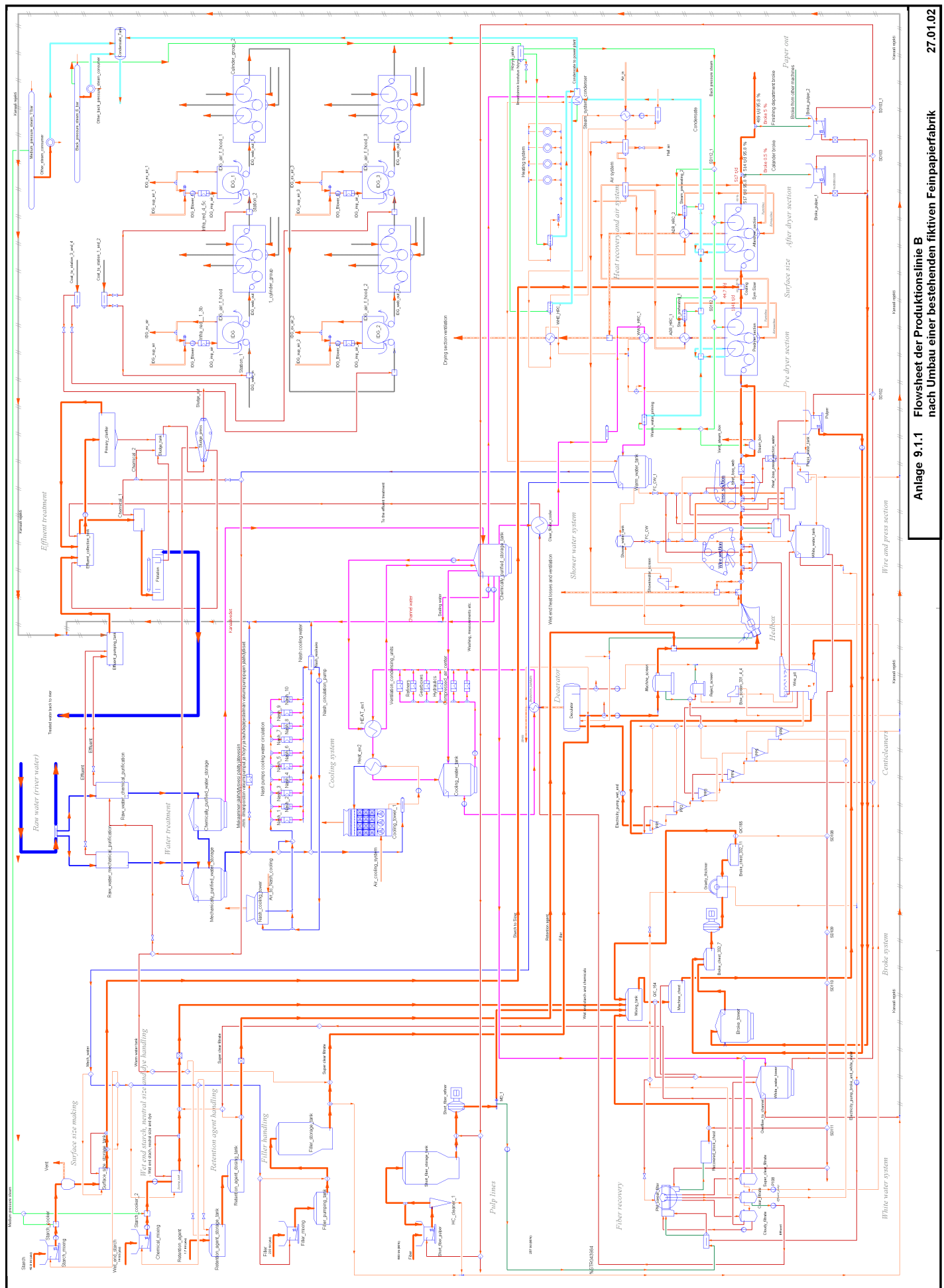
9.2.2 Einsatz- und Ausführungsbeispiele von Dampfstrahlpumpen 9-29

9.2.3 Kosteneinsparung durch richtige Motorenauswahl 9-32

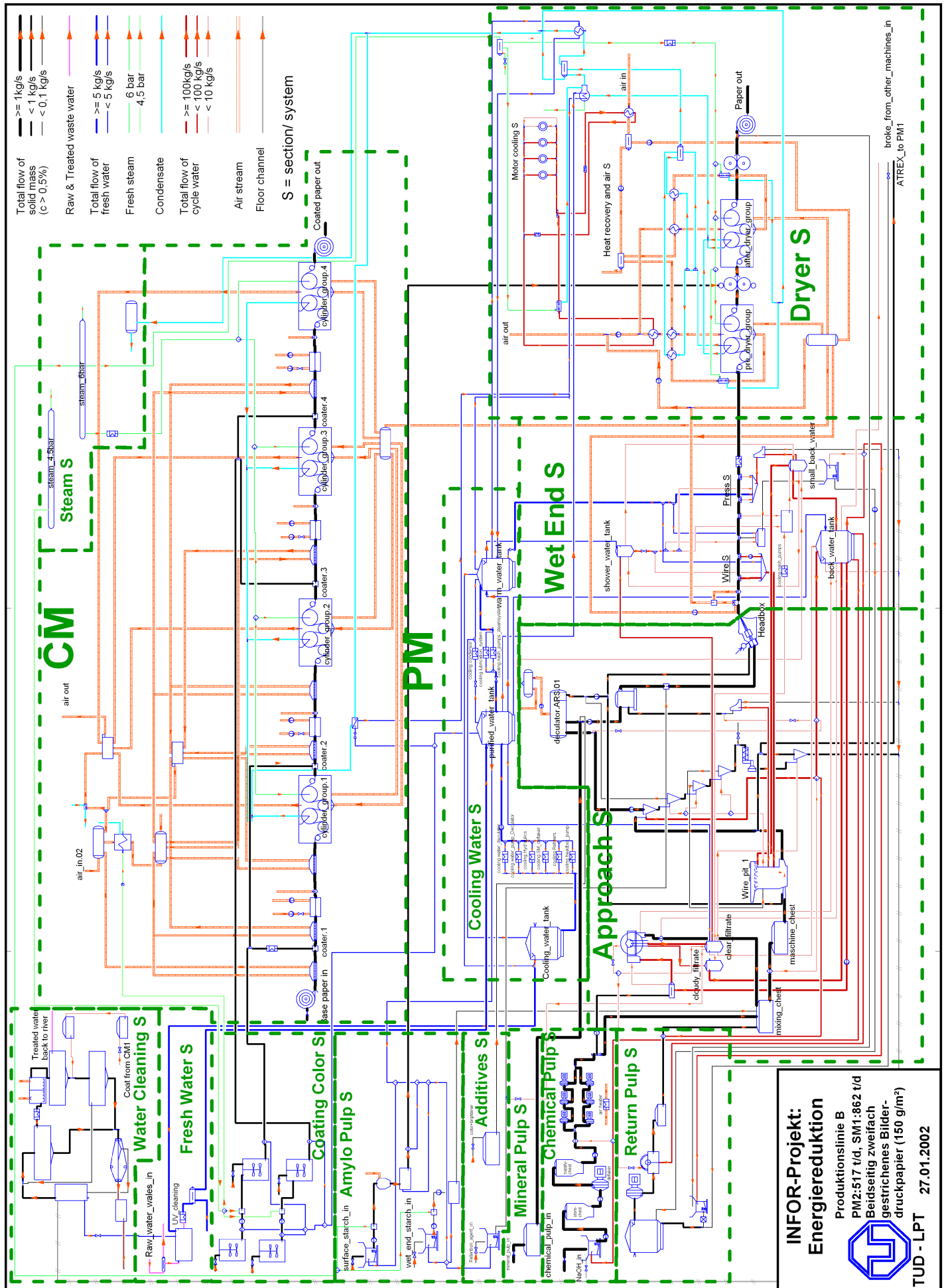
9.2.4 Umrechnung der Dampferzeugungskosten je Tonne Dampf in Euro-Cent je kWh 9-36

9.2.5 Themenvorschläge aus dem Bereich: Energie/Energienutzung 9-38

9.1.1 Flowsheet der Feinpapierproduktionslinie B nach Umbau einer bestehenden fiktiven Feinpapierfabrik



9.1.2 Flowsheet der Feinpapier-Produktionslinie B nach erster Systematisierung mit eingezeichneten Systemgrenzen der Subsysteme



9.1.3 Beispiele zum Stand der Simulation und Bilanzierung – 07/2001

Chemical Pulp System (CEPUS) of Production Line A

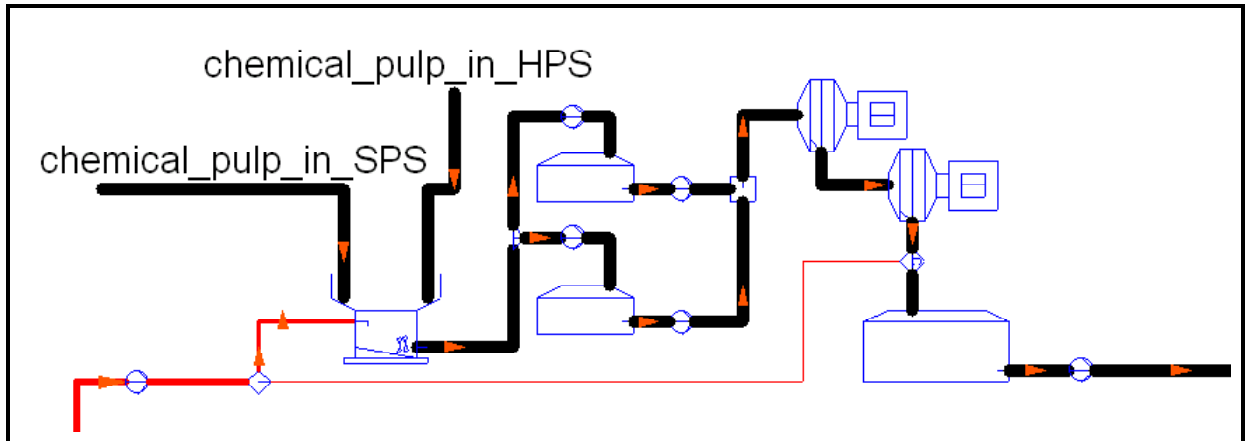


Abb. 1: Flowsheet of Chemical Pulp System (CEPUS) of Production Line A

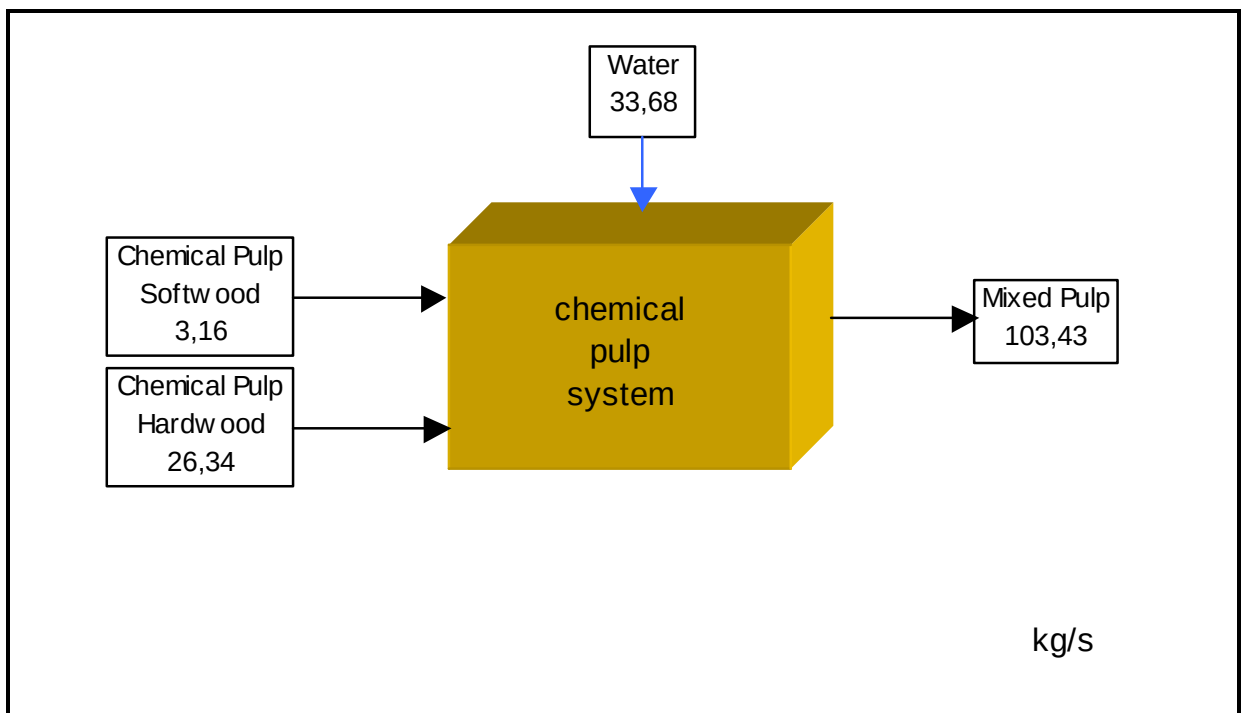
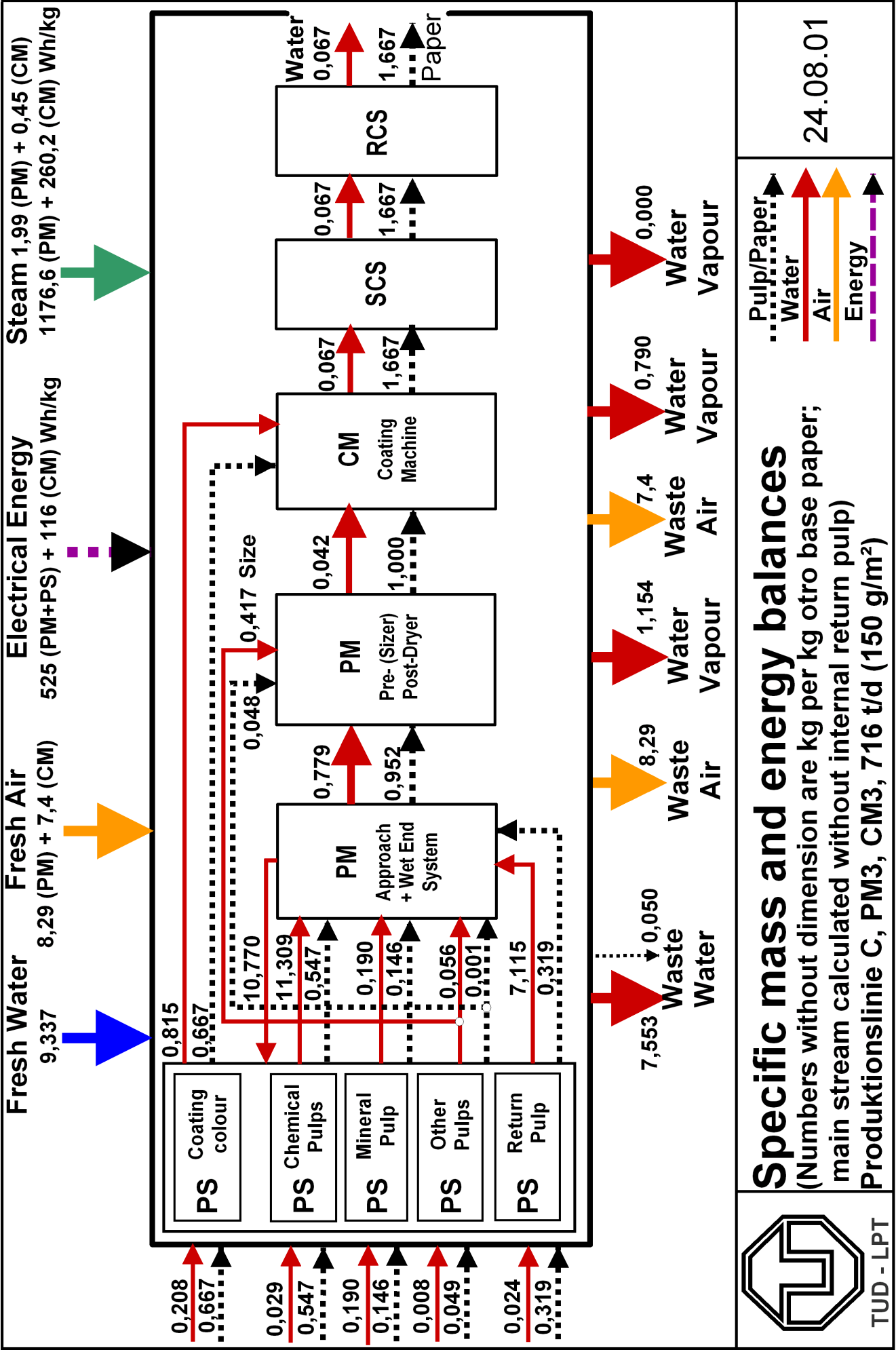
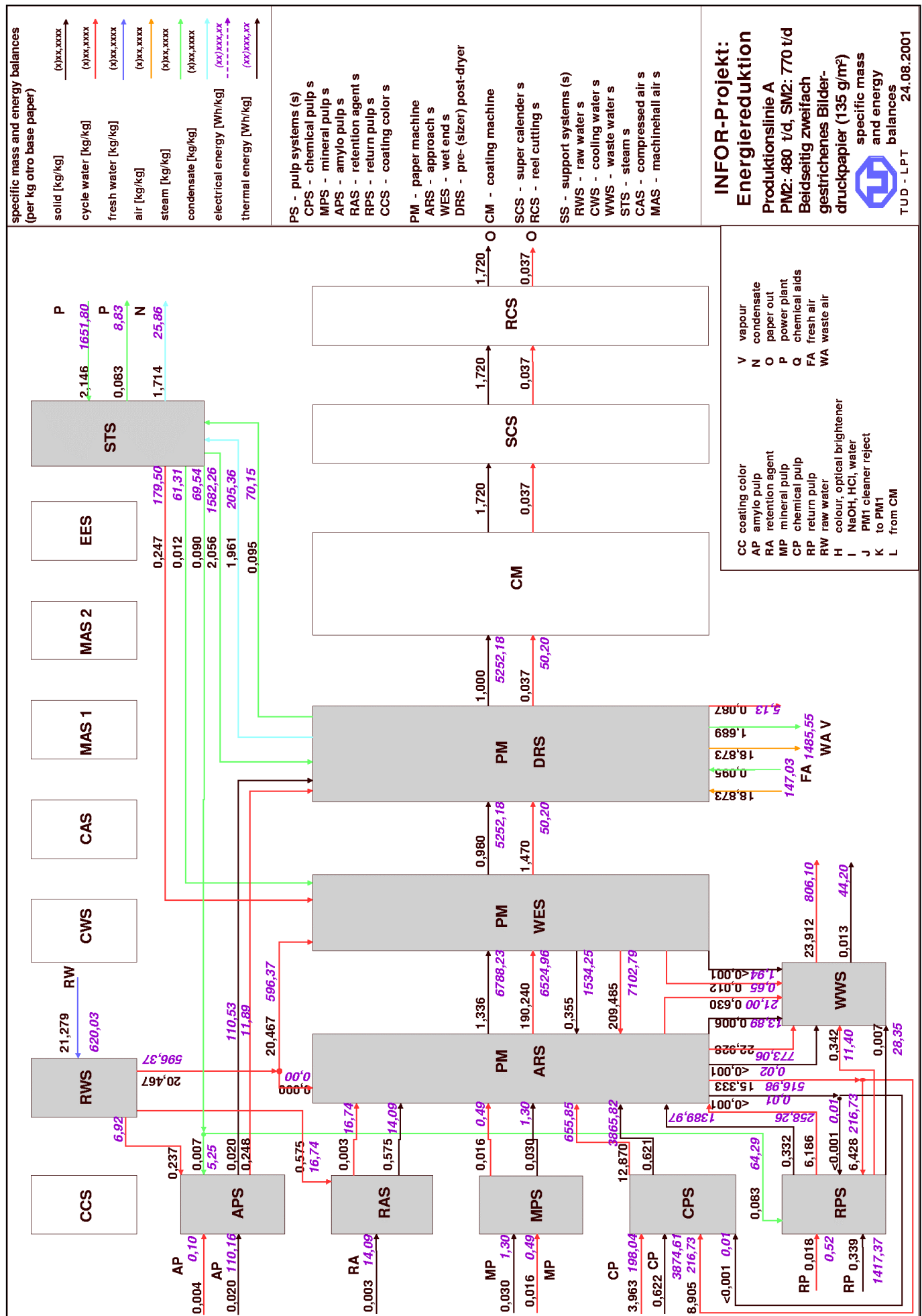


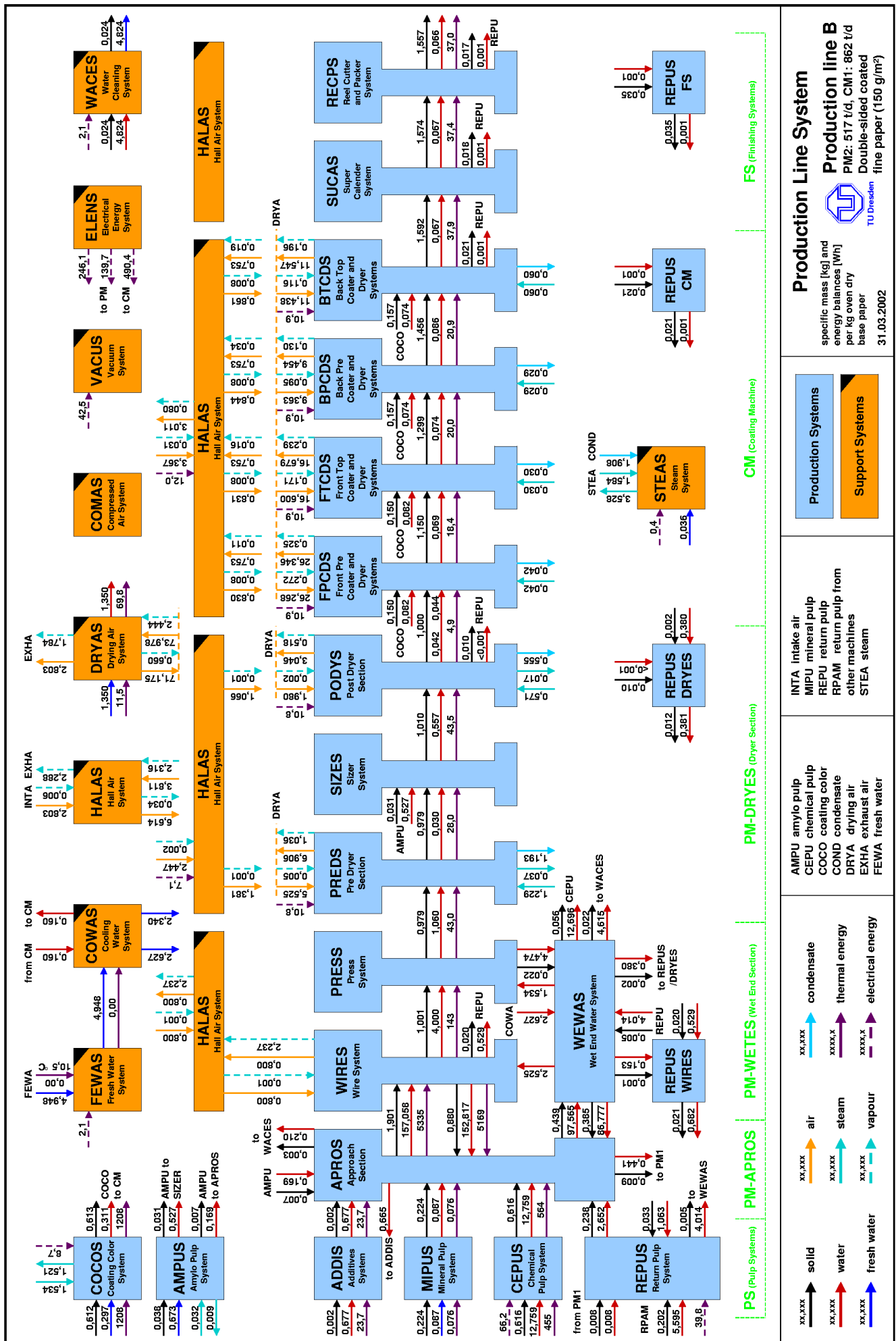
Abb. 2: Total mass flows of Chemical Pulp System of Production Line A



9.1.5 Specific mass and energy flows between subsystems and support systems – 08/2001 der Produktionslinie A



9.1.6 Production Line System der Produktionslinie B



9.1.7 Terms, definitions and shortcuts

1 PS Pulp Systems

- 1.1 CEPUS Chemical Pulp System
- 1.1.1 HWPUS Hardwood Pulp System
- 1.1.2 SWPUS Softwood Pulp System
- 1.2 MIPUS Mineral Pulp System
- 1.3 AMPUS Amylo Pulp System
- 1.4 ADDIS Additives System
- 1.5 REPUS Return Pulp System
- 1.6 COCOS Coating Color System

2 PM Paper Machine

- 2.1 APROS Approach System
- 2.2 WETES Wet End Section
- 2.2.1 WEWAS Wet End Water System
- 2.2.2 WIRES Wire System
- 2.2.3 PRESS Press System
- 2.3 DRYES Dryer Section
- 2.3.1 PREDS Pre Dryer System
- 2.3.2 SIZES Sizer System
- 2.3.3 PODYS Post Dryer System (includes Online Calender and Pope Roller)

3 CM Coating Machine

- 3.1 FPCDS Front Pre Coater and Dryer Systems (includes Unwinder)
- 3.2 FTCDS Front Top Coater and Dryer Systems
- 3.3 BPCDS Back Pre Coater and Dryer Systems
- 3.4 BTCDS Back Top Coater and Dryer Systems (includes Pope Roller)

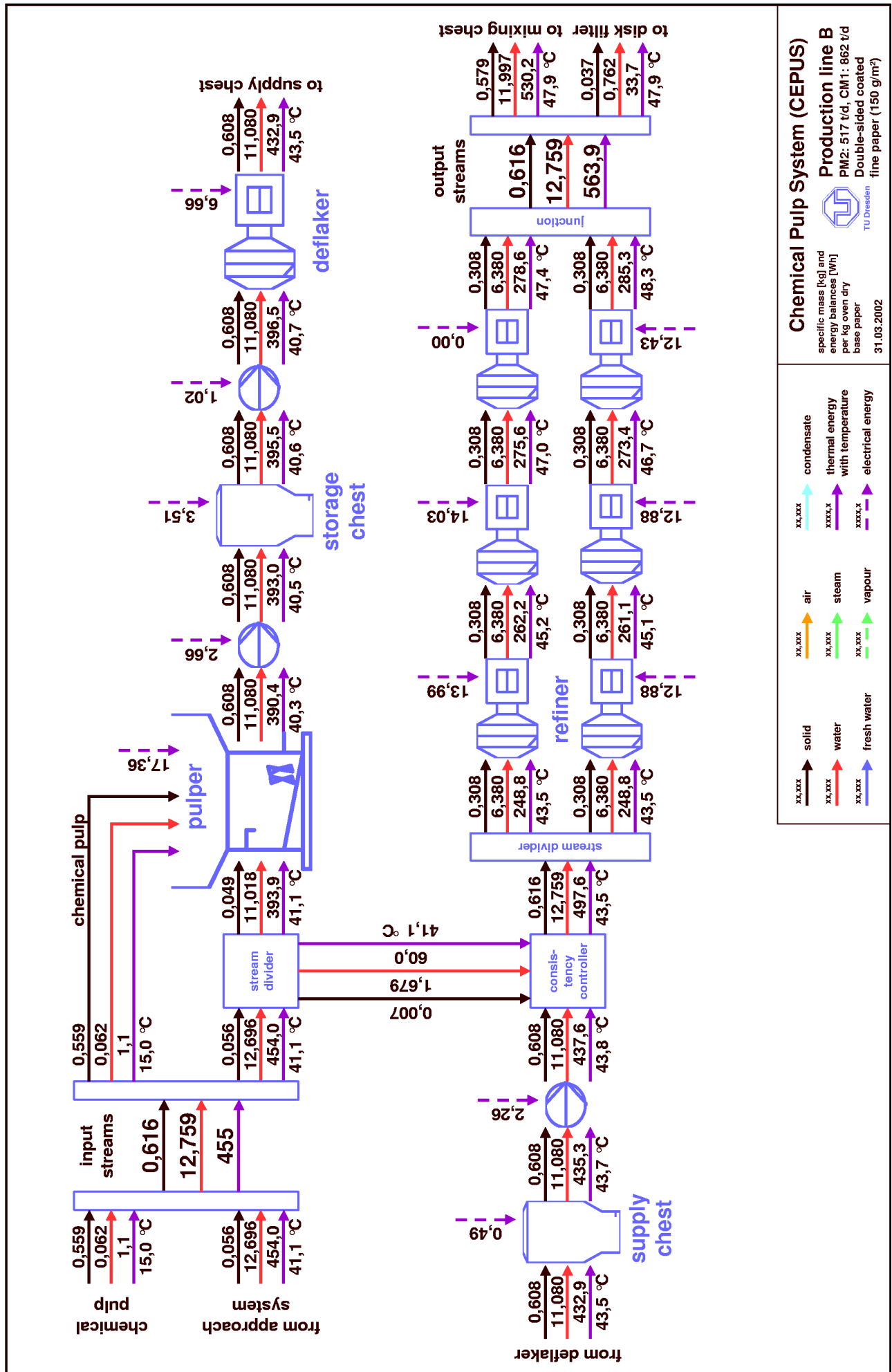
4 FS Finishing Systems

- 4.1 SUCAS Super Calender System
- 4.2 RECPS Reel Cutter and Packer System

5 SS Support Systems

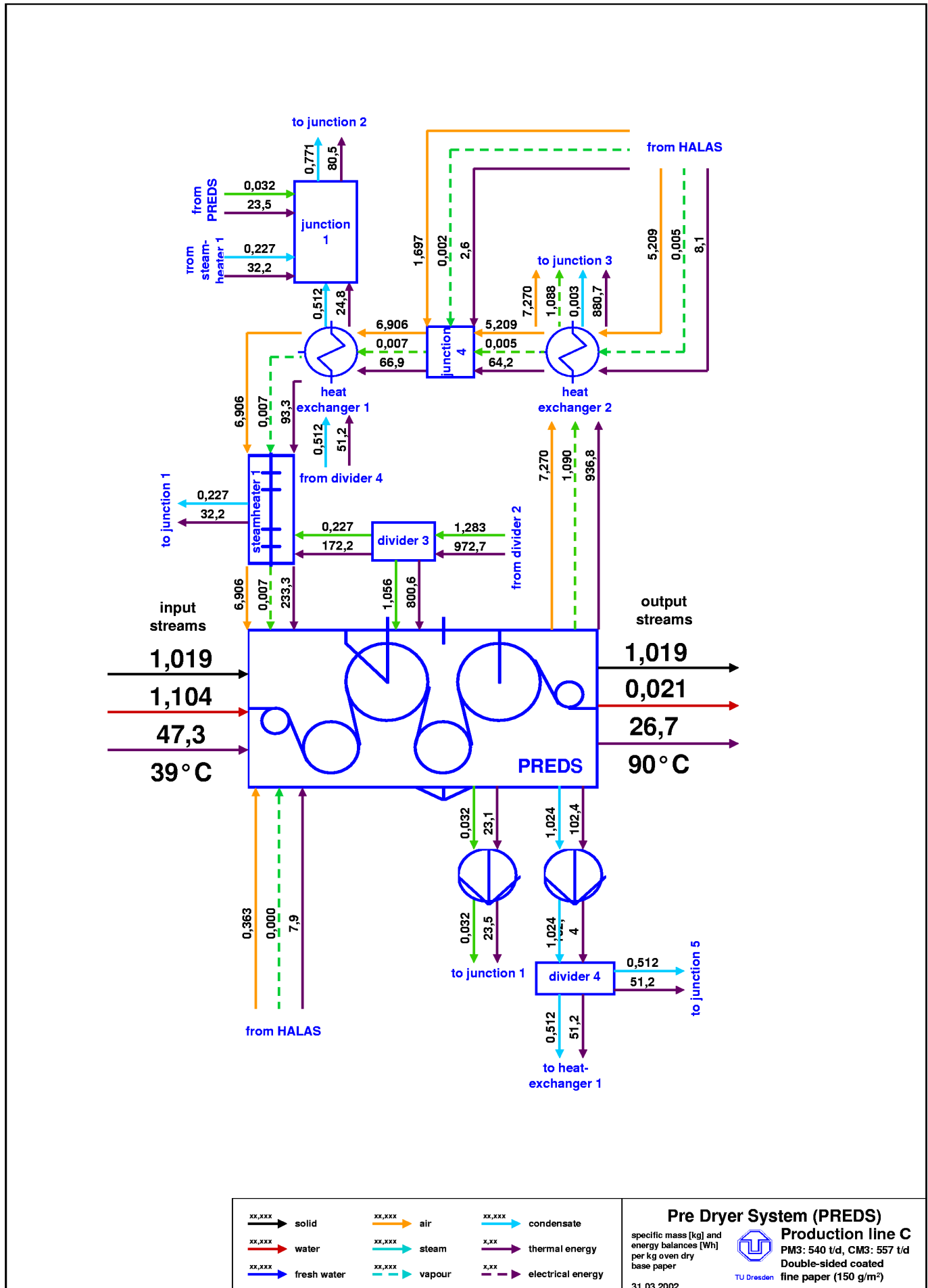
- 5.1 FEWAS Fresh Water System
- 5.2 COWAS Cooling Water System
- 5.3 WACES Water Cleaning System
- 5.4 STEAS Steam System
- 5.5 COMAS Compressed Air System
- 5.6 HALAS Hall Air System
- 5.7 ELENS Electrical Energy System
- 5.8 DRYAS Drying Air System
- 5.9 VACUS Vacuum System

9.1.8 Subsystemdarstellung: Chemical Pulp System (CEPUS) der Produktionslinie B

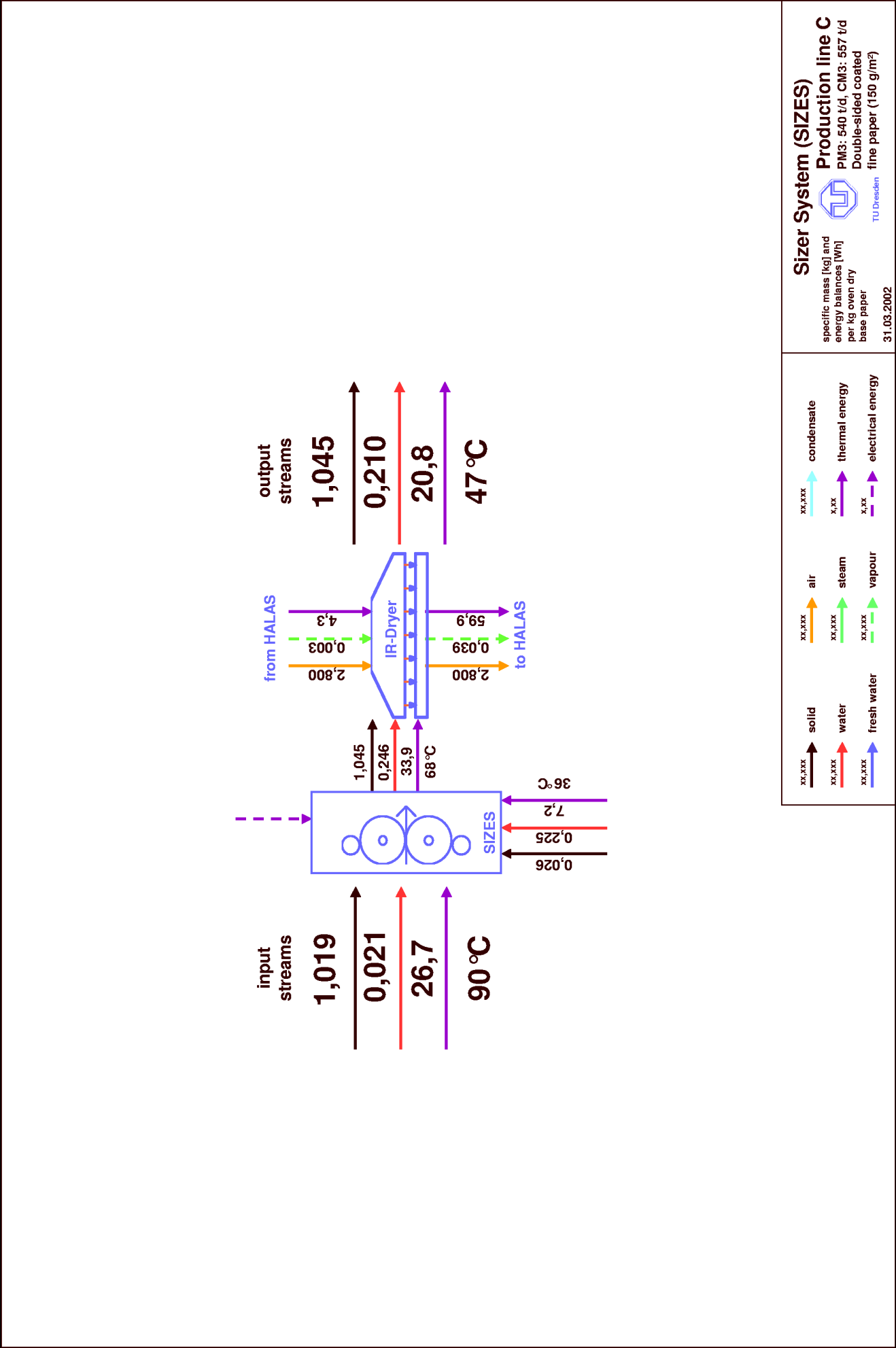


9.1.9 Dryer Section (DRYES) der Produktionslinie C

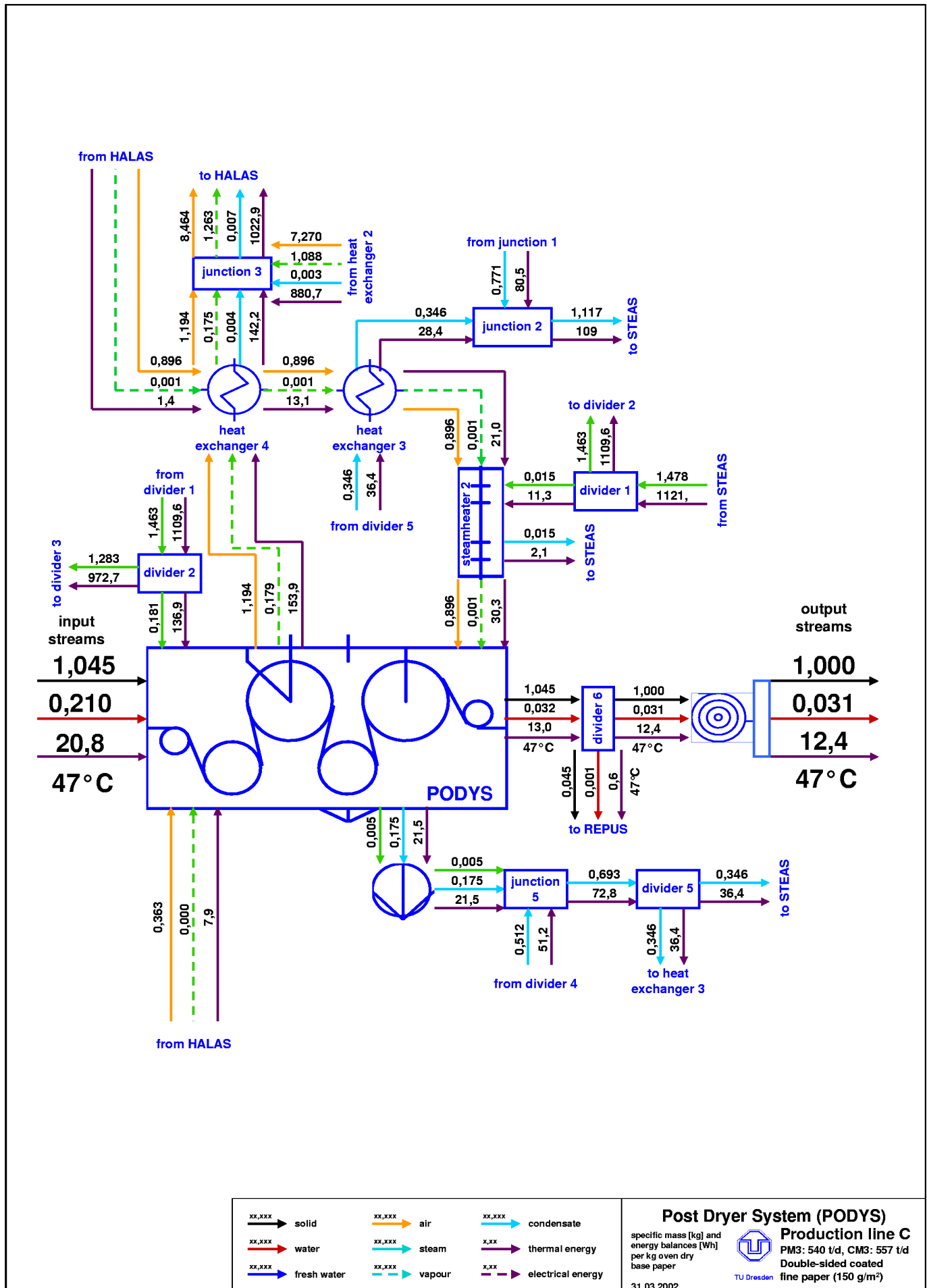
9.1.9.1 Subsystemdarstellung: Pre Dryer System (PREDS)



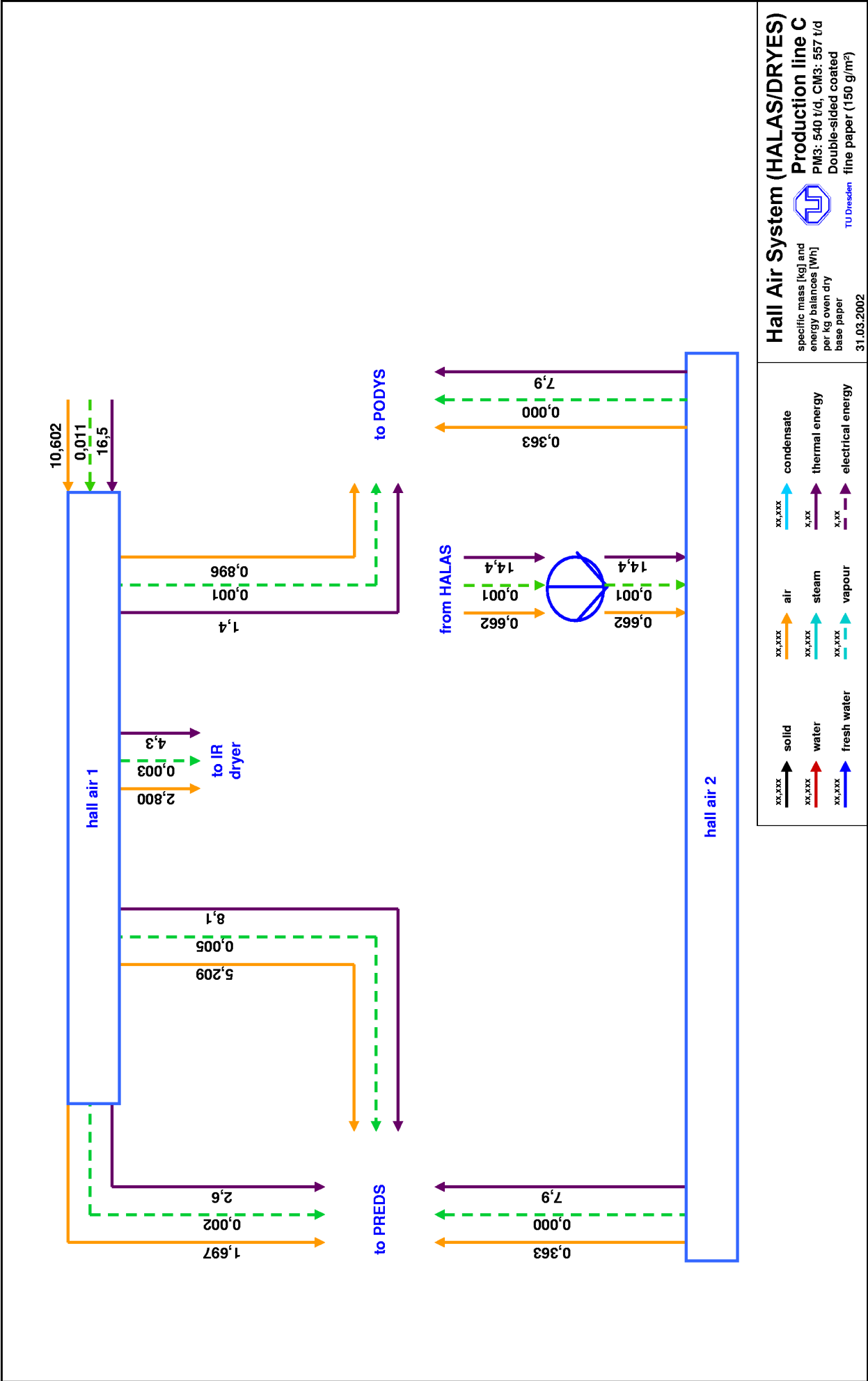
9.1.9.2 Subsystemdarstellung: Sizer System (SIZES)



9.1.9.3 Subsystemdarstellung: Post Dryer System (PODYS)

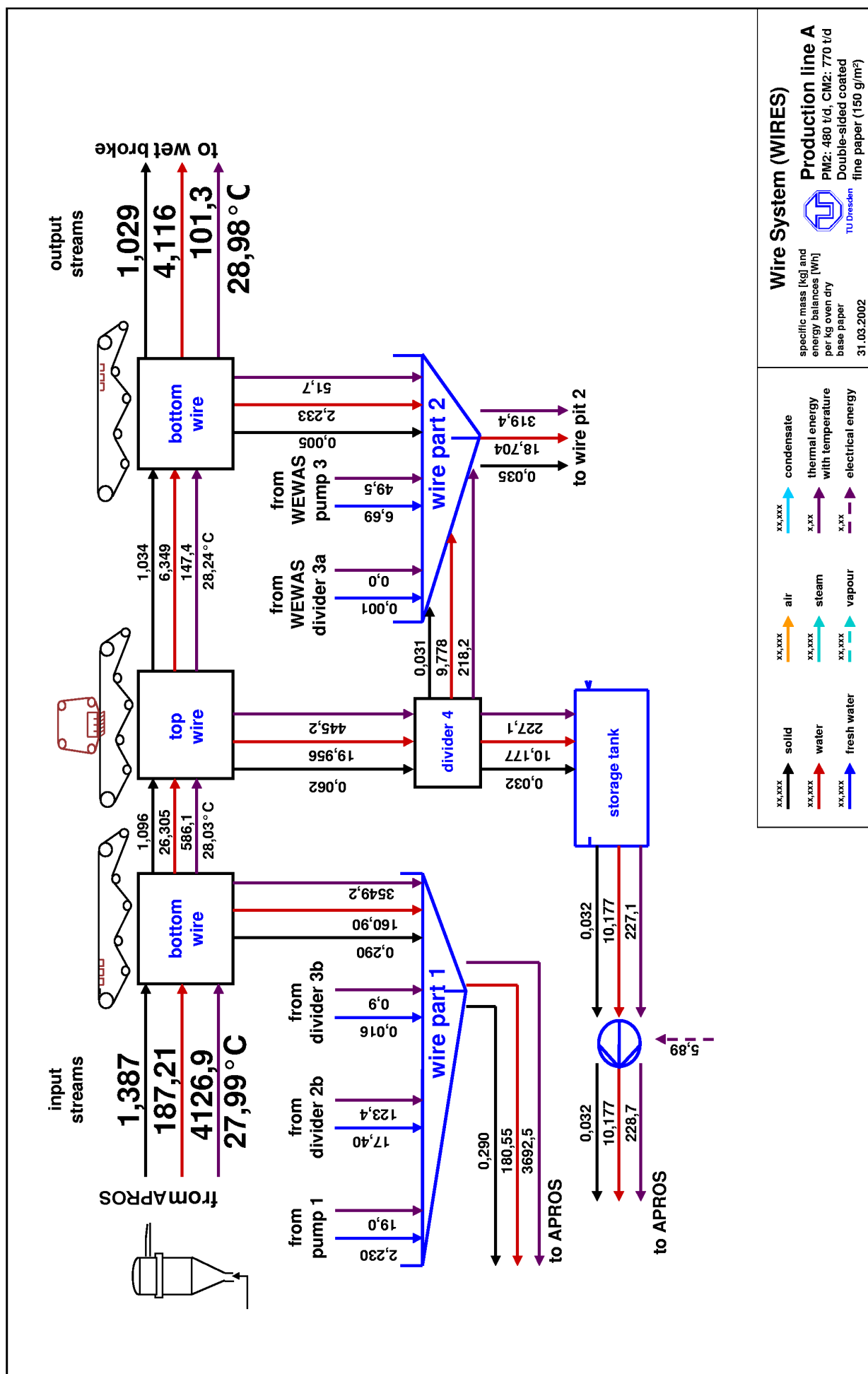


9.1.9.4 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/DRYES)

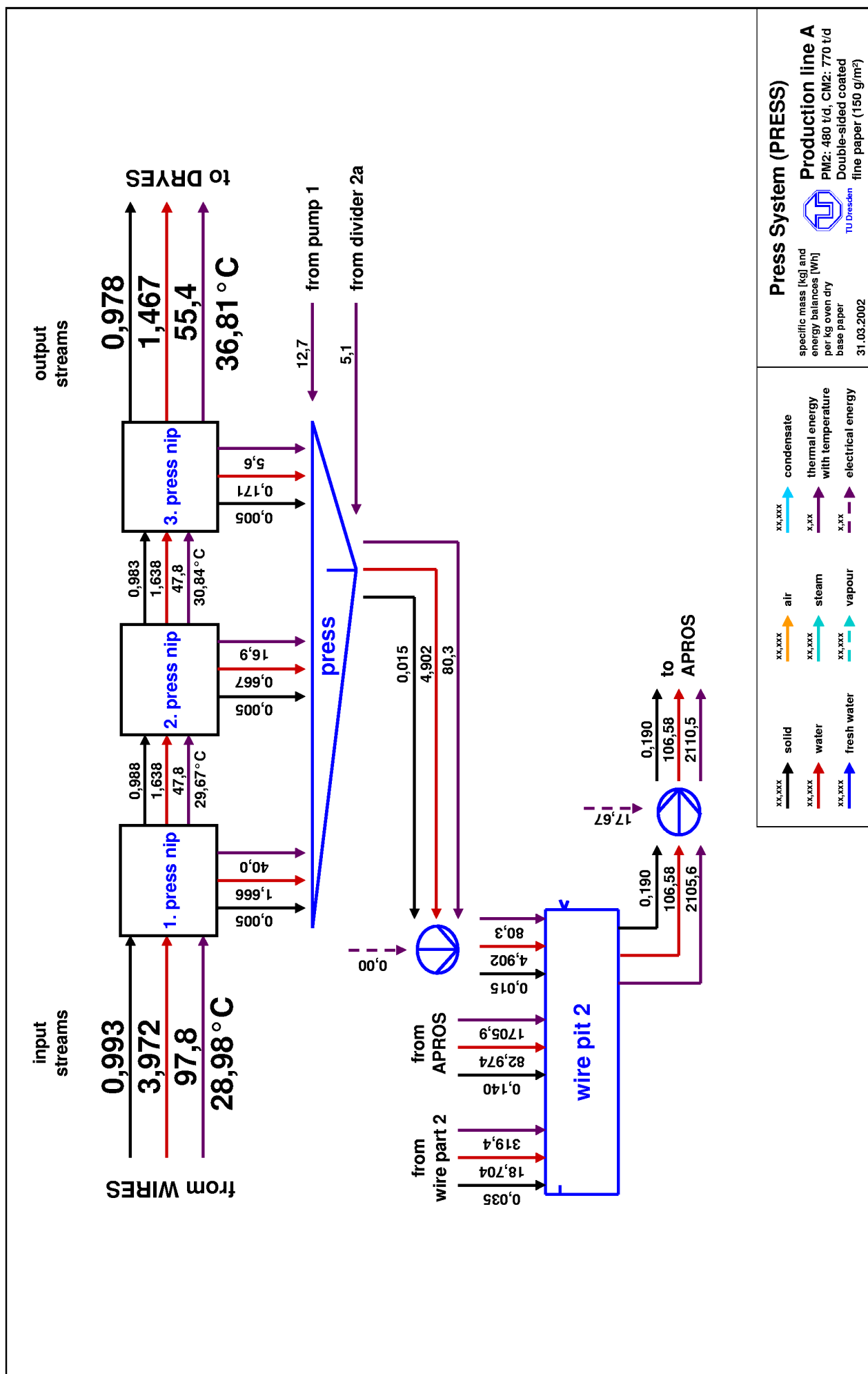


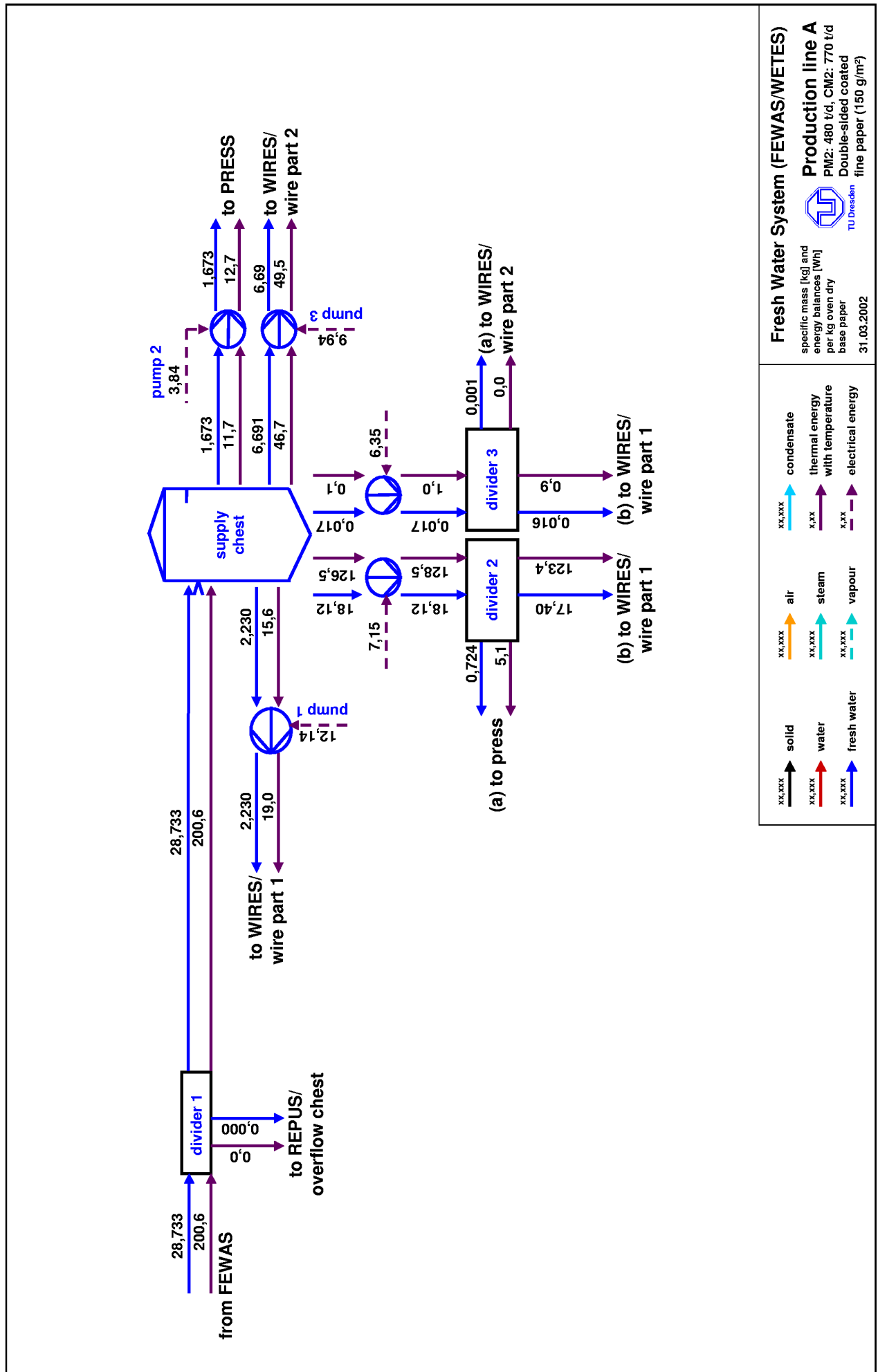
9.1.10 Wet End Section (WETES) der Produktionslinie A

9.1.10.1 Subsystemdarstellung: Wire System (WIRES)

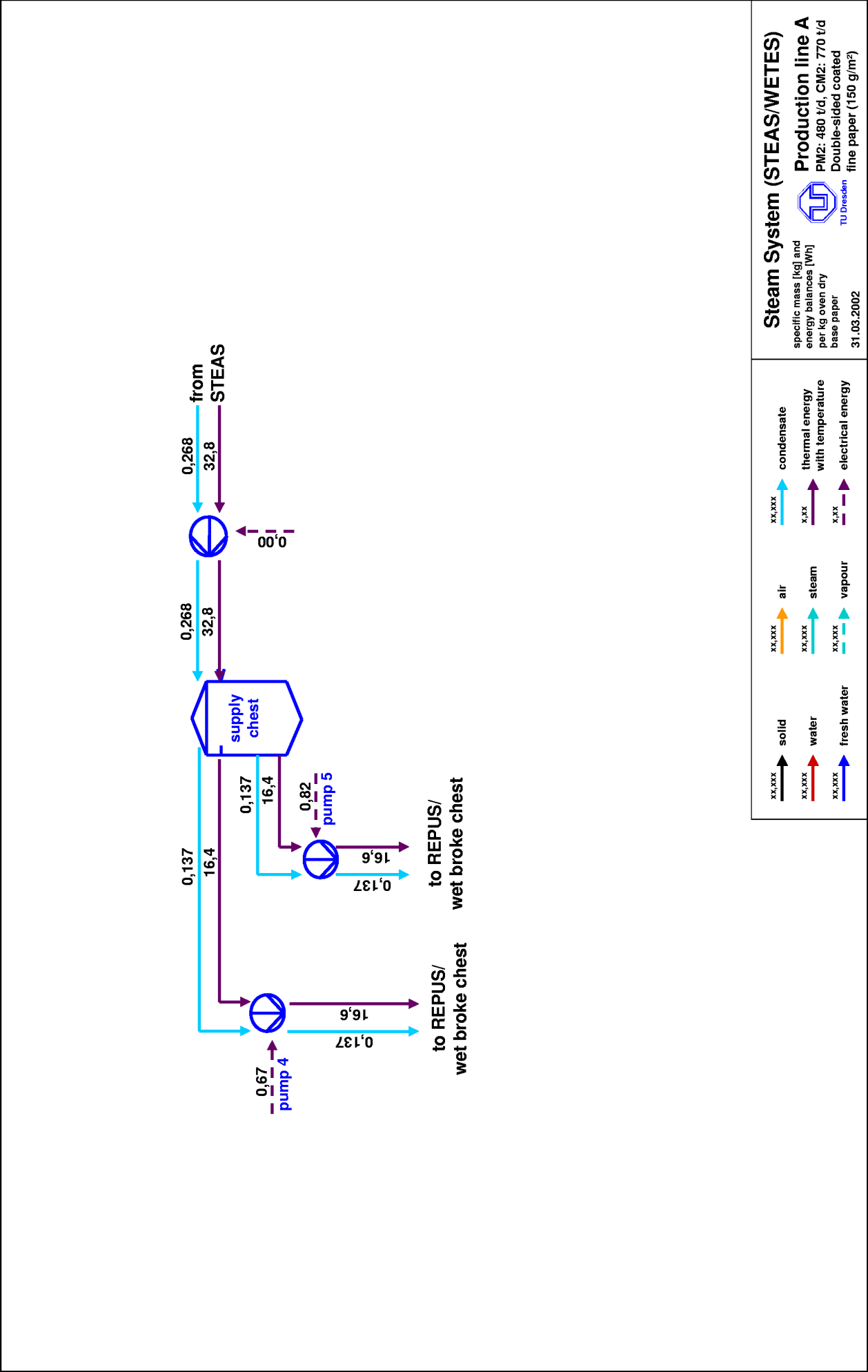


9.1.10.2 Subsystemdarstellung: Press System (PRESS)

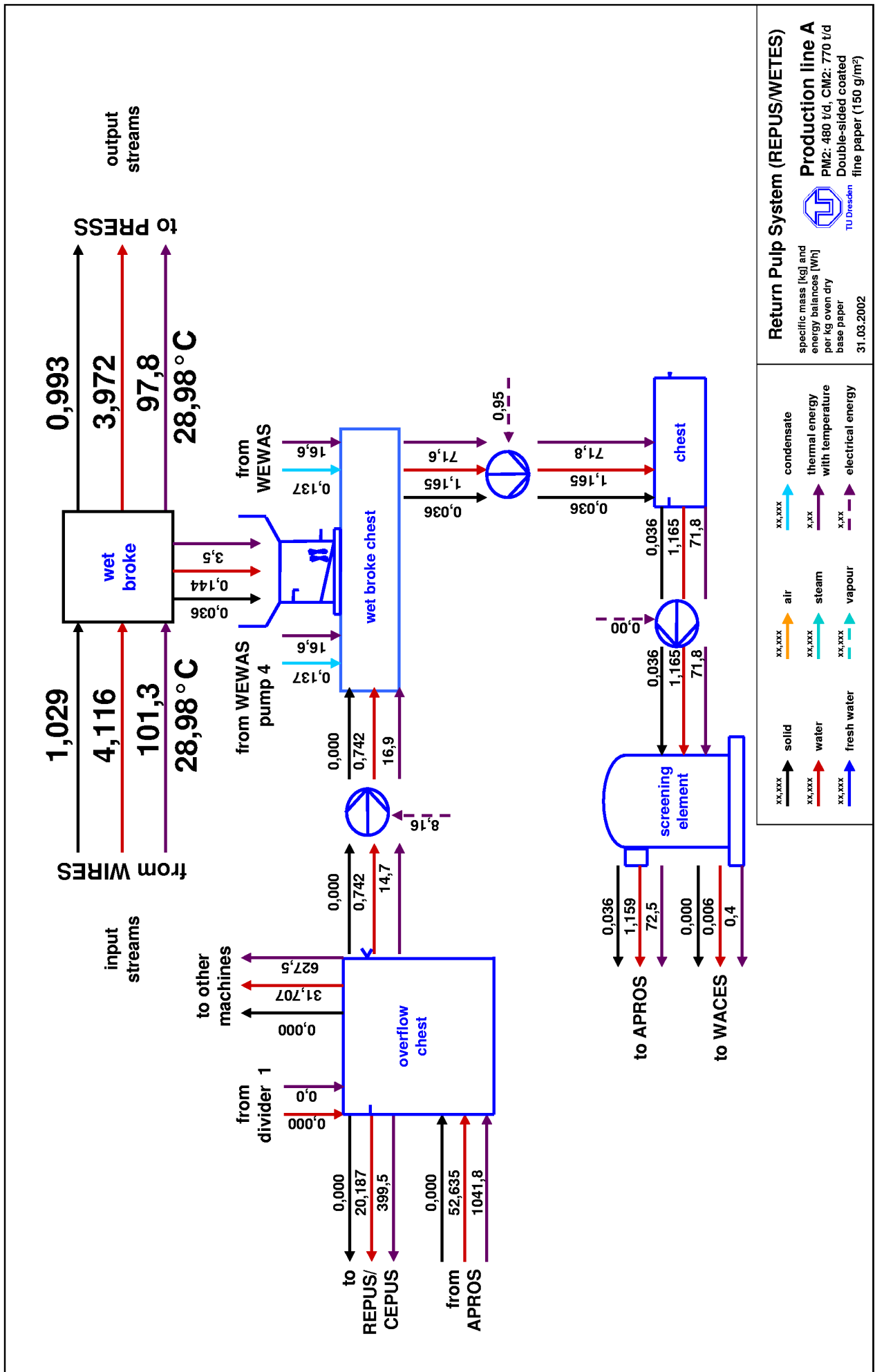




9.1.10.4 Subsystemdarstellung: Steam System (STEAS/WETES)

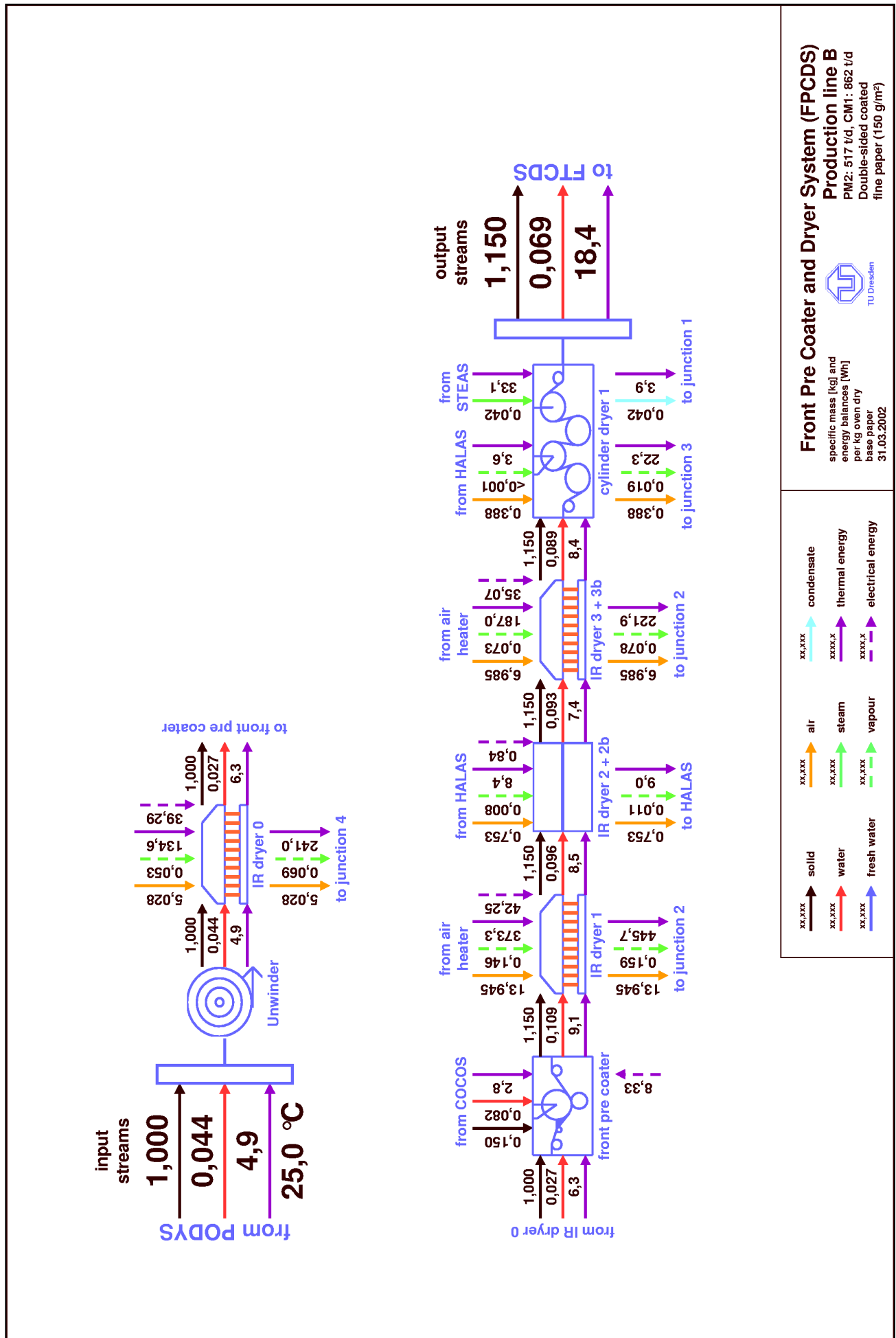


9.1.10.5 Subsystemdarstellung: Return Pulp System (REPUS/WETES)

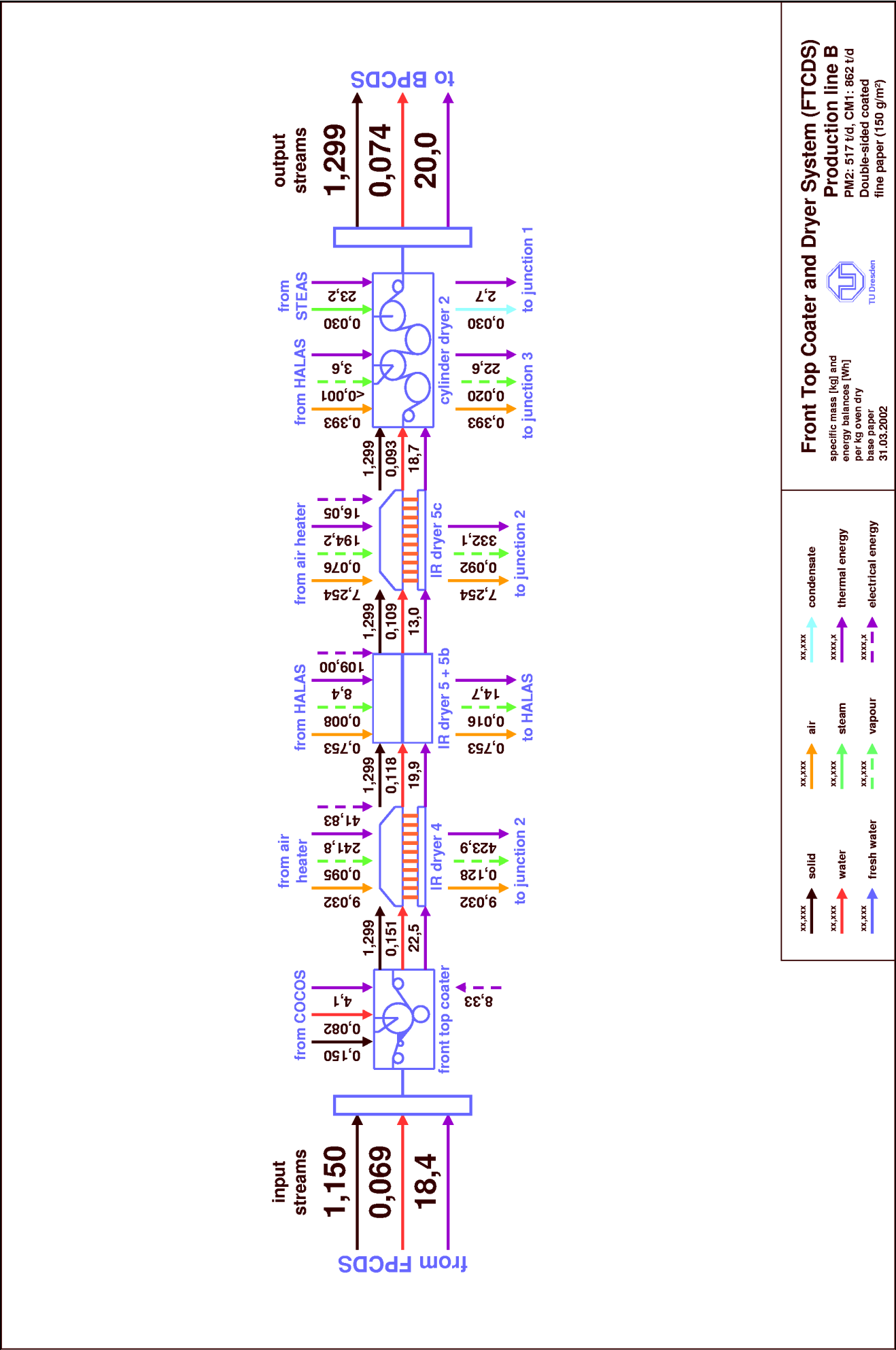


9.1.11 Coating Machine (CM) der Produktionslinie B

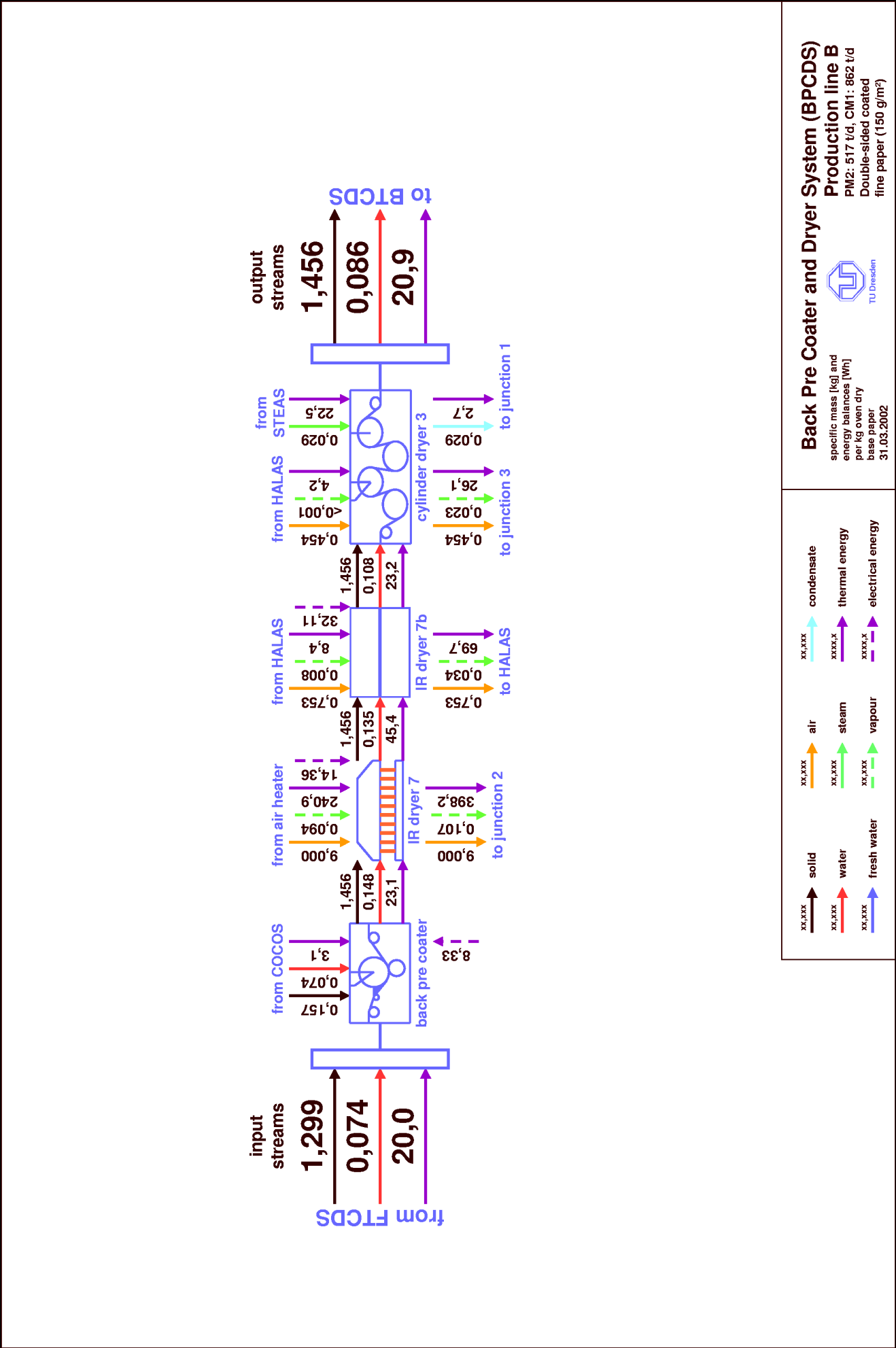
9.1.11.1 Subsystemdarstellung: Front Pre Coater and Dryer System (FPCDS)



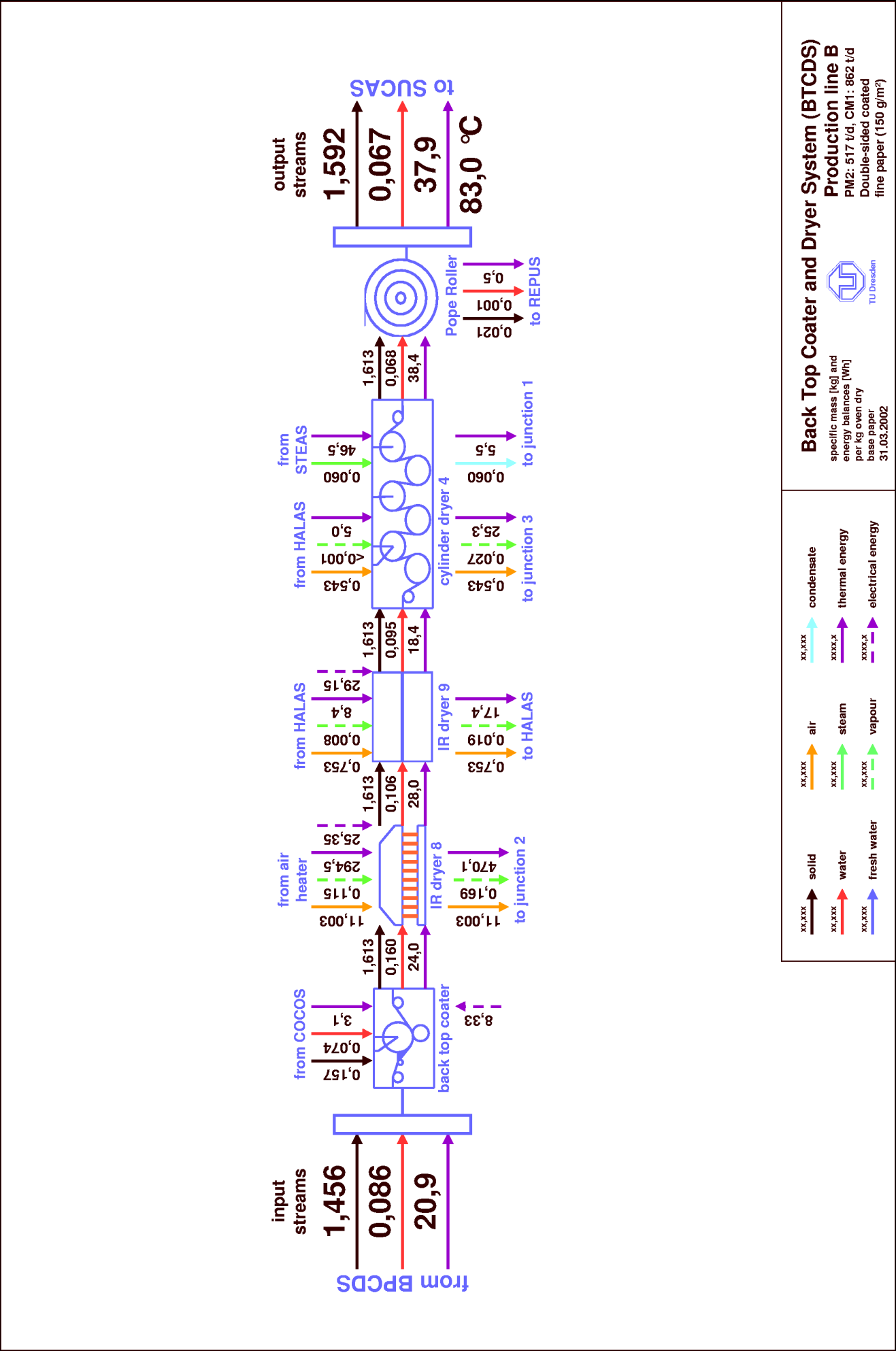
9.1.11.2 Subsystemdarstellung: Front Top Coater and Dryer System (FTCDS)



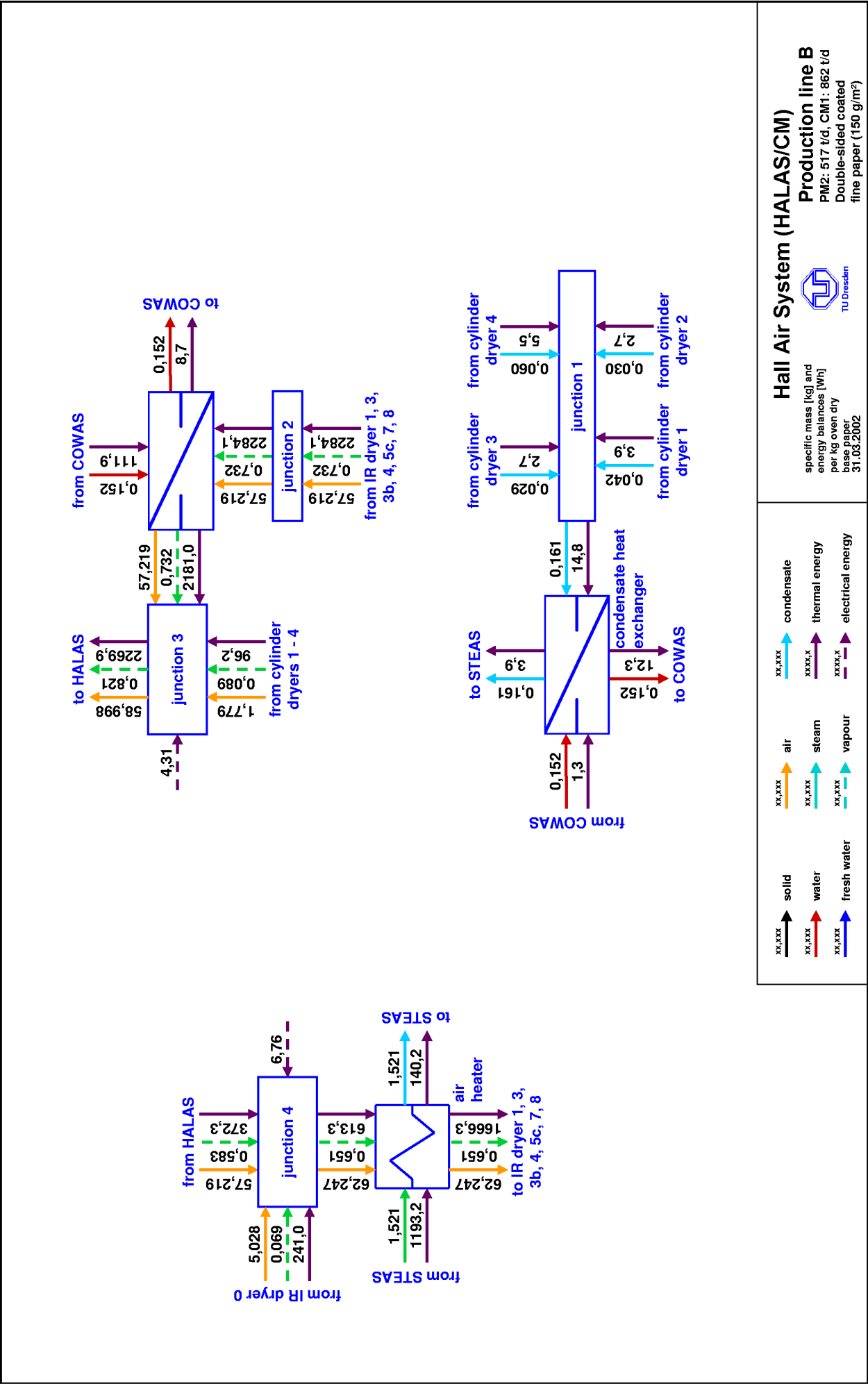
9.1.11.3 Subsystemdarstellung: Back Pre Coater and Dryer System (BPCDS)



9.1.11.4 Subsystemdarstellung: Back Top Coater and Dryer System (BTCDS)



9.1.11.5 Subsystemdarstellung: Hall Air System (HALAS/CM)



Hall Air System (HALAS/CM)

Production line B
PM2: 517 t/d, CM1: 862 t/d
Double-sided coated
fine paper (150 g/m²)



specific mass [kg] and
energy balances [W/h]
per kg oven dry
base paper
31.03.2002

9.2 Technische Erläuterungen

9.2.1 Vorgehensweise beim Einbinden von neuen Symbolen in Symbolbibliotheken der grafischen Benutzeroberfläche Flosheet für die Simulations-Software BALAS

Inhalt:

0 Einführung

1 Zeichnen des Symbols und Festlegung der Snap-Points

2 Einbindung des Symbols in eine Bibliothek

3 Verknüpfen des Symbols mit einem bestehenden Berechnungsmodul (Mapping)

4 Aktivieren des neuen Symbols in der Simulation

0 Einführung

In der zur Simulations-Software BALAS gehörenden grafischen Benutzeroberfläche "Flosheet" sind eine Vielzahl von Symbolen enthalten, die die Funktion der dahinter verborgenen Berechnungsmodule verdeutlichen sollen. Allerdings haben nicht alle dieser Symbole die erforderliche Aussagekraft, um die jeweilige Funktion auf den ersten Blick erkennbar zu machen.

Es besteht aber die Möglichkeit, die vorhandenen Symboldatenbanken mit selbst erstellten Bildern zu ergänzen und diese zur Einbindung in Simulationen vorzubereiten. Die Vorgehensweise dazu wird in diesem Dokument beschrieben.

Das Einbinden von neuen Symbolen in die Symbolbibliotheken erfordert die Ausführung einer Vielzahl von Operationen sowohl in der Simulationssoftware BALAS als auch in der grafischen Benutzeroberfläche Flosheet. Beide Programme

werden im Wechsel benötigt, deshalb sollten beide während des gesamten Vorganges geöffnet bleiben. Grundsätzlich besteht die Einbindung eines neuen Symbols in die Software aus vier Schritten:

- (1) Zeichnen und Festlegung der Snap-points
- (2) Einbindung in eine Bibliothek
- (3) Verknüpfen mit einem bestehenden Berechnungsmodul (Mapping)
- (4) Aktivieren des neuen Symbols in der Simulation

1 Zeichnen des Symbols und Festlegung der Snap-Points



Flosheet

- Im Menü EDIT mit dem Befehl EDIT SYMBOL oder mit dem Icon  "SymGen Mode" einstellen.
- Modul zeichnen (Zeichenhilfsmittel befinden sich unten im Fenster).
- Snap-points hinzufügen (Befehl ADD SNAP POINTS im Menü SELECT).



BALAS

- Im Menü OPTIONS, Menüpunkt DATABASE MANAGER, Fenster UNIT MODULE DEFINITION auswählen (**Abb. 3**).
- Beim entsprechenden Modul überprüfen, wie die Snap-points definiert sind (Zuordnung zu Nummern). Die Informationen erhält man durch Doppelklick auf das entsprechende Modul, im darauf erscheinenden Fenster sind ganz unten die Definitionen der einzelnen Snap-points zu sehen (**Abb. 4**).
- Mit OK bzw. CLOSE werden die BALAS-Fenster geschlossen.

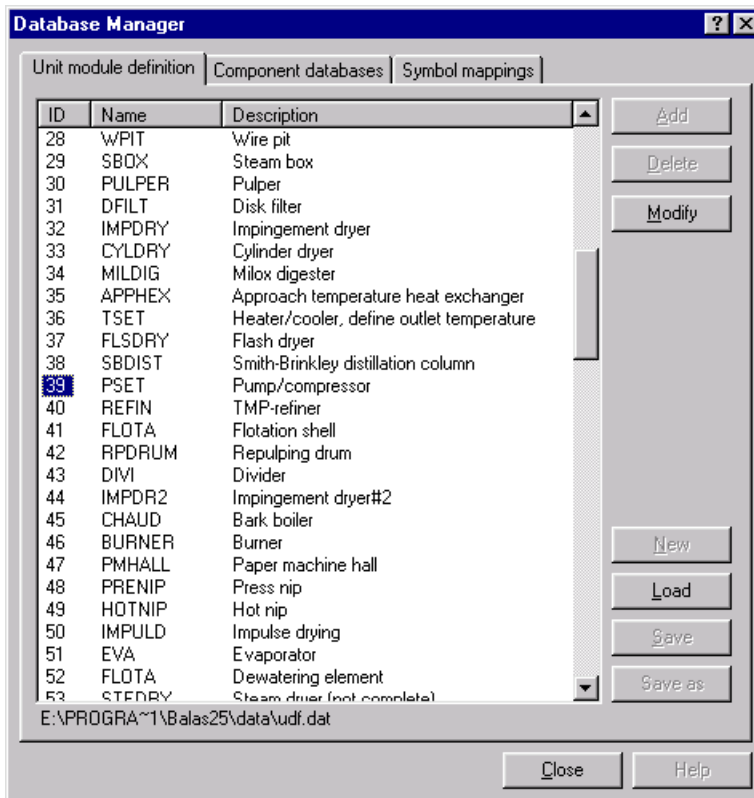


Abb. 3: BALAS-Fenster "UNIT MODULE DEFINITION"

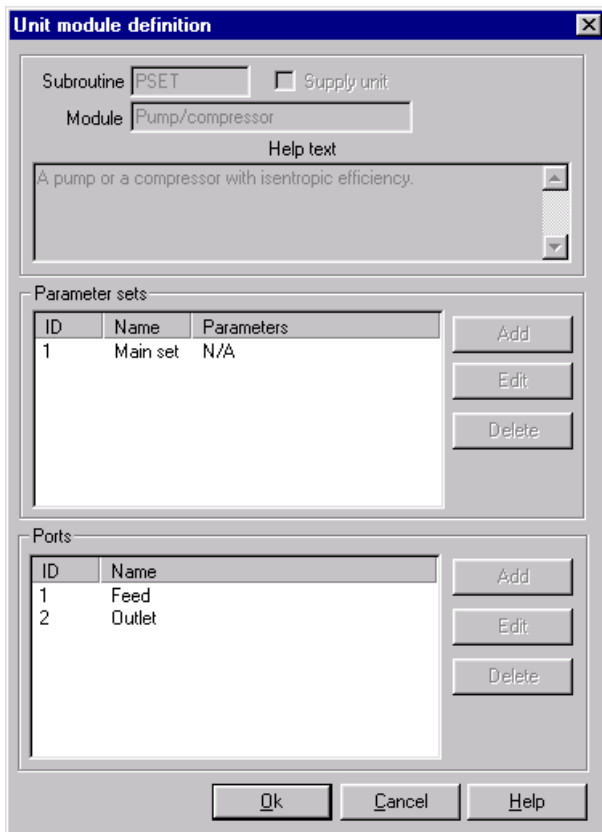


Abb. 4: Dialogfeld "UNIT MODULE DEFINITION" für das Modul PSET



Flosheet

- Im Menü EDIT Menüpunkt EDIT SNAP-POINTS wählen.

•

2 Einbindung des Symbols in eine Bibliothek



Flosheet

- Das komplette Symbol markieren, im Menü SELECT den Menüpunkt BUILD SYMBOL IN öffnen, dort die entsprechende Bibliothek (*.cmp-Datei) auswählen.
- Im darauf erscheinenden Fenster einen Namen für das neue Symbol festlegen und mit OK bestätigen (**Abb. 5**).

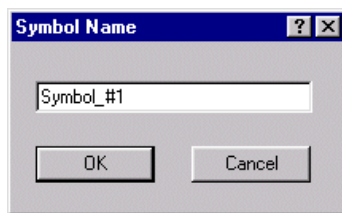


Abb. 5: Flosheet-Dialogfeld zur Benennung eines Symbols (Beispiel)

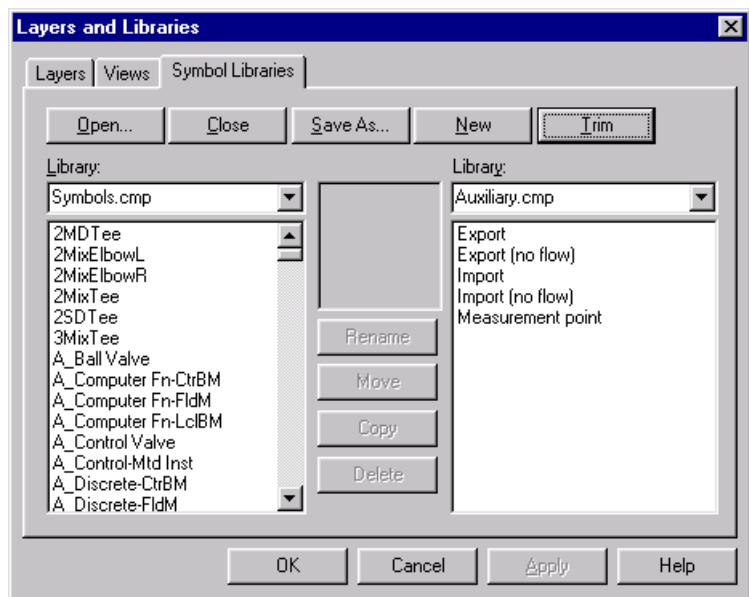


Abb. 6: Fenster "SYMBOL LIBRARIES" in Flosheet

- Diese Bibliothek mit SAVE AS speichern, im darauf erscheinenden Fenster einfach den bestehenden Namen mit SAVE bestätigen. Die Frage, ob die bestehende Datei ersetzt werden soll, mit YES beantworten. Das neue Symbol ist jetzt in der für die weitere Arbeit verfügbar.

- Die Snap-points am Modul in der erforderlichen Reihenfolge (analog zur UNIT MODULE DEFINITION) anklicken. Informationen werden dabei in der Fußzeile angezeigt.

- Im Menü FORMAT, Menüpunkt LAYERS AND LIBRARIES das Fenster SYMBOL LIBRARIES aktivieren, dort die entsprechende Bibliothek auswählen (**Abb. 6**).

Wenn die Bibliothek nicht gespeichert wird, kann das Symbol nur in der aktuellen Simulationsdatei genutzt werden.

- Das Fenster SYMBOL LIBRARIES mit OK schließen.

3 Verknüpfen des Symbols mit einem bestehenden Berechnungsmodul (Mapping)



BALAS

- Im Menü OPTIONS, Menüpunkt DATABASE MANAGER das Fenster SYMBOL MAPPINGS auswählen (**Abb. 7**).
- Im Fenster links die entsprechende Bibliothek auswählen, darunter das neue Symbol markieren.
- Im Fenster rechts das gewünschte Modul auswählen und markieren.
- Berechnungsmodul durch MAP mit dem Symbol verbinden.
- Verbindung mit SAVE MAPPINGS speichern, die Frage nach Überschreiben der bestehenden Datei mit YES beantworten
- Fenster mit CLOSE schließen.

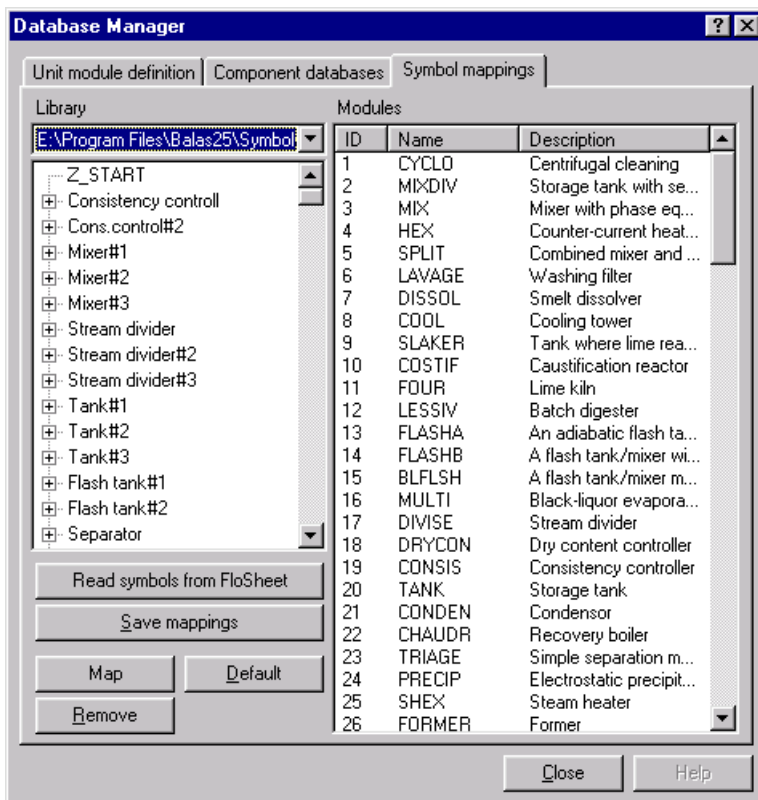


Abb. 7: Fenster "SYMBOL MAPPINGS" in Flosheet

Das neue Symbol ist jetzt in der entsprechenden Bibliothek verfügbar, jedoch noch nicht in einer bereits bestehenden Simulationsdatei und ebenfalls

nicht in der Dokumentvorlage (Template). Wenn es genutzt werden soll, muß es in den Layer PROCESS EQUIPMENT eingefügt werden.

4 Aktivieren des neuen Symbols in der Simulation



Flosheet

Gewünschte Simulationsdatei öffnen

Im Menü FORMAT, Menüpunkt LAYERS AND LIBRARIES das Fenster LAYERS auswählen (**Abb. 8**).

Auf der rechten Seite die entsprechende Bibliotheksdatei aktivieren, darunter das neue Symbol markieren.

Das neue Symbol mit ADD in den Layer PROCESS EQUIPMENT einfügen, mit OK den Vorgang bestätigen und das Fenster schliessen.

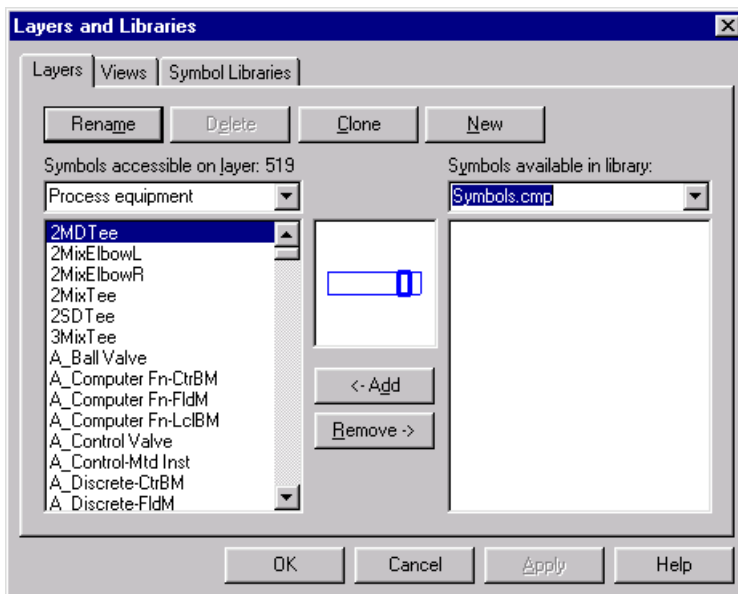


Abb. 8: Fenster "LAYERS" in Flosheet

Jetzt kann das neue Symbol in die Simulation eingefügt werden. Nach Anschluß der erforderlichen Ströme und Festlegung der Modulparameter besitzt es alle Eigenschaften, die auch ein standardmäßig vorhandenes Symbol hat.

9.2.2 Einsatz- und Ausführungsbeispiele von Dampfstrahlpumpen

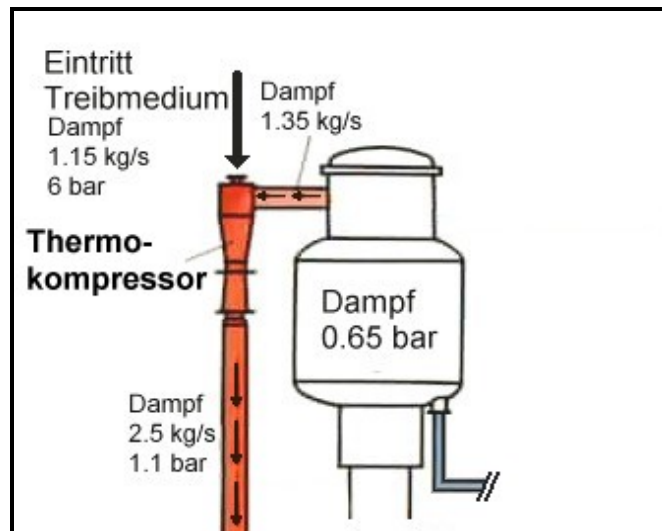


Abb. 1: Beispiel des Einsatzes eines Thermokompressors
als Dampfstrahlverdichter

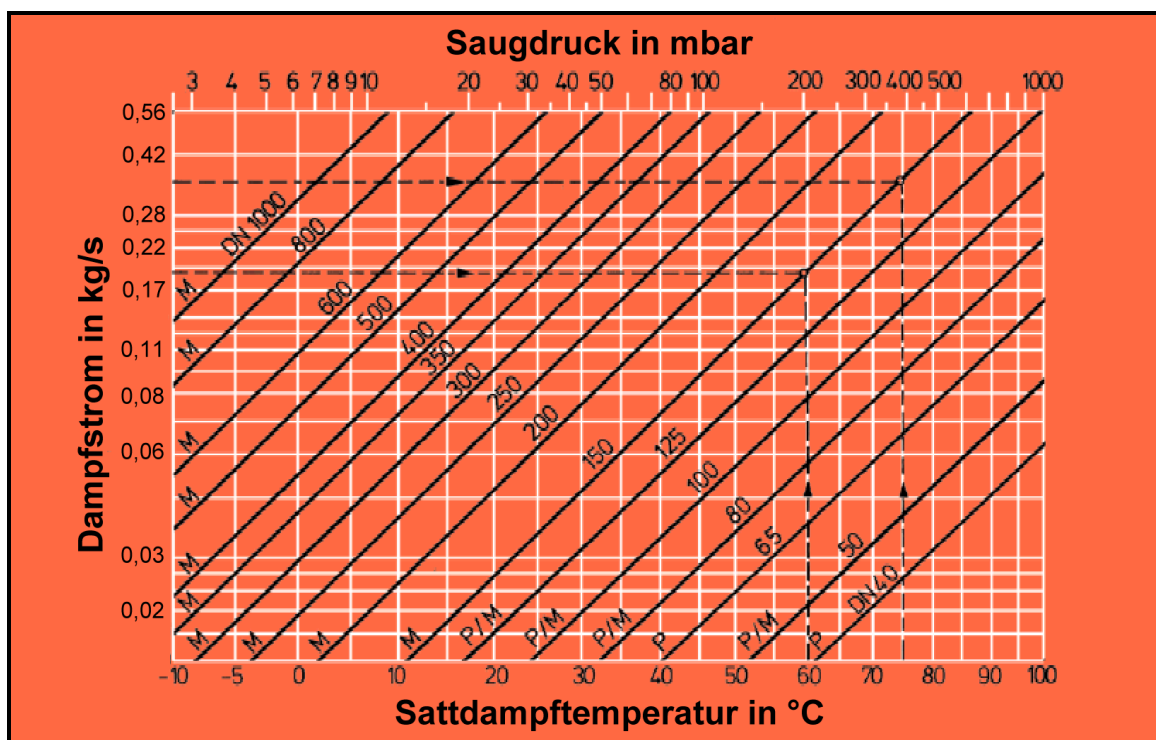


Abb. 2: Beispiel zur Dimensionierung der Ein- und Austrittsflächen
von Dampfstrahlpumpen bei Massenströmen bis 0,56 kg/s
(DN = Normdurchmesser des jeweiligen Ein- bzw. Austritts
M = Metallausführung, P = Porzellanausführung)

Ausführungen von Dampfstrahlpumpen (1)

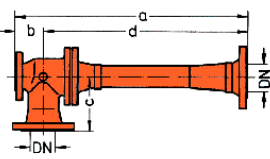
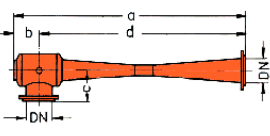
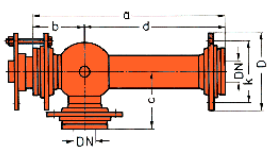
Anschlüsse, Abmessungen und Gewichte							
		Gegossene Ausführung					
		DN	a	b	Baumaße in mm		Gewicht kg
					c	d	
		25 I	210	30	100	180	5
		II	300	30	100	270	7
		50 I	440	50	110	390	10
		II	550	50	110	500	15
		80 I	750	90	175	660	32
		II	930	90	175	840	38
Bild 4 Standardausführung: Gußeisen mit Treibdüse aus nichtrostendem Stahl Nichtrostender Stahlguß mit Treibdüse aus nichtrostendem Stahl, Losflansche aus Stahl DN 25 und 50 : Gehäuse und Diffusor verschraubt DN 80: Gehäuse und Diffusor geflanscht, Diffusor geschweißt Flansche nach DIN PN 10 oder ANSI 150 lb		Geschweißte Ausführung					
		DN	a	b	Baumaße in mm		Gewicht (Richtwerte)
					c	d	Stahl kg Nichtrost. Stahl kg
		80	750 - 950	90	175	660 - 860	30 20
		100	900 - 1200	100	175	800 - 1100	35 25
		125	1100 - 1500	120	175	980 - 1380	45 32
		150	1300 - 1800	140	225	1160 - 1660	55 40
		200	1600 - 2400	220	250	1380 - 2180	70 50
		250	2000 - 3000	260	300	1740 - 2740	100 70
		300	2500 - 3600	290	300	2210 - 3310	150 100
		350	3000 - 4200	330	350	2670 - 3870	200 130
		400	3400 - 4800	380	400	3020 - 4420	280 180
		500	4400 - 6000	450	425	3950 - 5550	400 310
		600	5200 - 7200	550	475	4650 - 6650	550 410
Bild 5 Standardausführung: Stahl oder nichtrostender Stahl, geschweißt Losflansche aus Stahl Treibdüse: nichtrostender Stahl Flansche: DIN PN 10 oder ANSI 150 lb		Porzellan Ausführung					
		DN	a	b	Baumaße in mm		Gewicht kg
					c	d	k D
		40	405	100	110	305	120 150 5
		50	510	100	110	410	140 170 7
		65	653	130	120	523	160 185 10
		80	810	145	135	665	185 215 15
		100	1035	160	150	875	210 240 22
		125	1270	170	175	1100	235 265 30
Bild 6 Standardausführung: Temperaturwechselbeständiges Porzellan Anschlußschellen: Aluminiumguß Dampfanschluß: Aluminiumguß Größere Nennweiten auf Anfrage		Die genauen Einbaumaße für geschweißte Dampfstrahl-Verdichter nach Bild 5 sind abhängig von den Betriebsbedingungen. Sie werden im Auftragsfall mit der Auftragsbestätigung bekannt gegeben. Die Treibdampfanschlüsse sind in obestehender Übersicht nicht angegeben, weil diese ebenfalls von den Betriebsbedingungen abhängen. Neben den Standardausführungen werden Sonderausführungen mit anderen Anschlußstutzen, anderen Nenndruckstufen der Flansche sowie anderen Werkstoffen geliefert. Bei Bedarf werden die Köpfe der Dampfstrahl-Verdichter mit Handlochdeckel zur leichten Reinigung ausgestattet.					
 GEA Jet Pumps GmbH		Wiegand Technologie					

Abb. 3: Ausführungsbeispiel (Quelle: GEA Jet Pumps GmbH Ettlingen)

Ausführungen von Dampfstrahlpumpen (2)

(Quelle: ANA GmbH Merseburg)



Abb. 4: Ausführung in Titan: Baulänge 210-930 mm (ca. 5-38 kg)

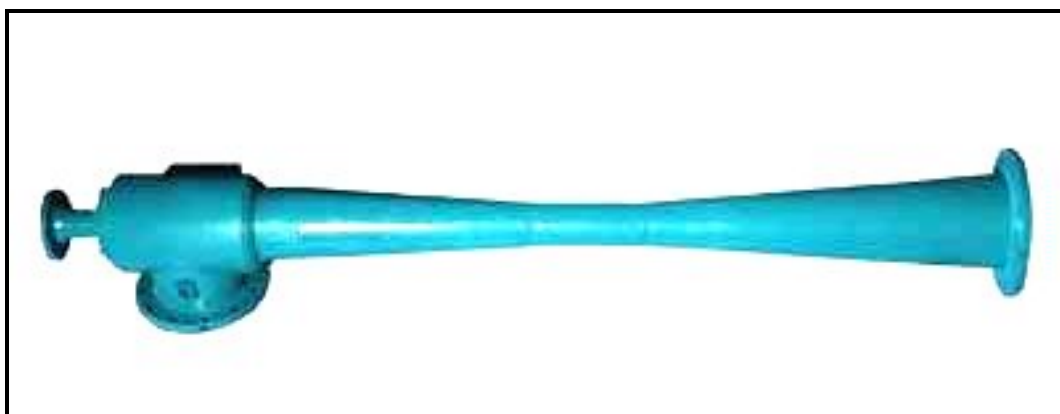
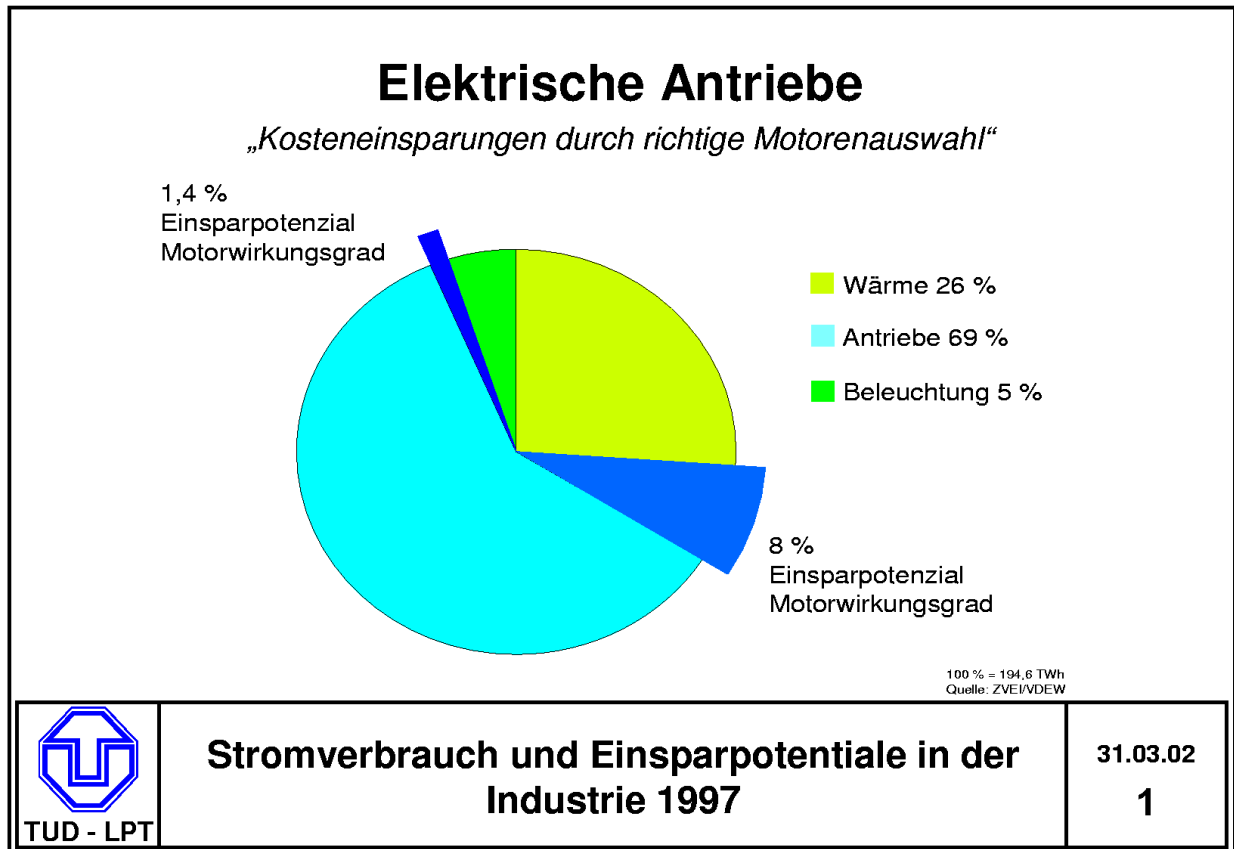


Abb. 5: Geschweißte Ausführung: Baulänge 4400-6000 mm (ca. 400 kg)



Abb. 6: Verschiedene kleinere Ausführungen

9.2.3 Kosteneinsparung durch richtige Motorenauswahl



 TUD - LPT	Klassifizierung der 2- und 4-poligen Niederspannungs-Drehstrommotoren von 1 bis 100 kW nach ihrem Wirkungsgrad	31.03.02 2
---	---	---------------------------------

EFF 1

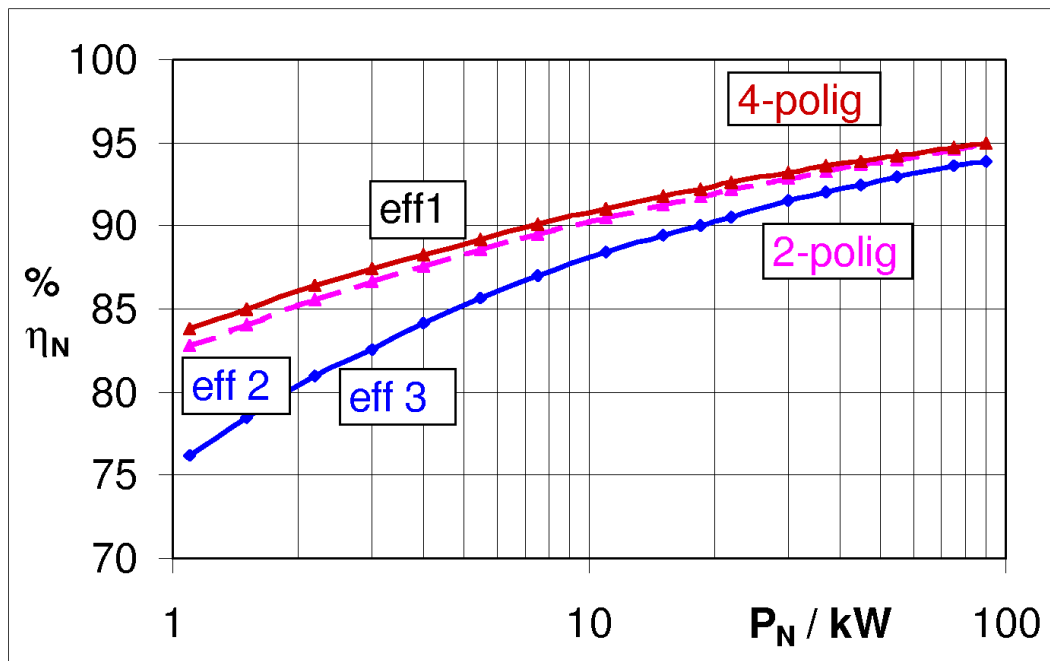
hocheffiziente Motoren

EFF 2

im Wirkungsgrad verbesserte Motoren

EFF 3

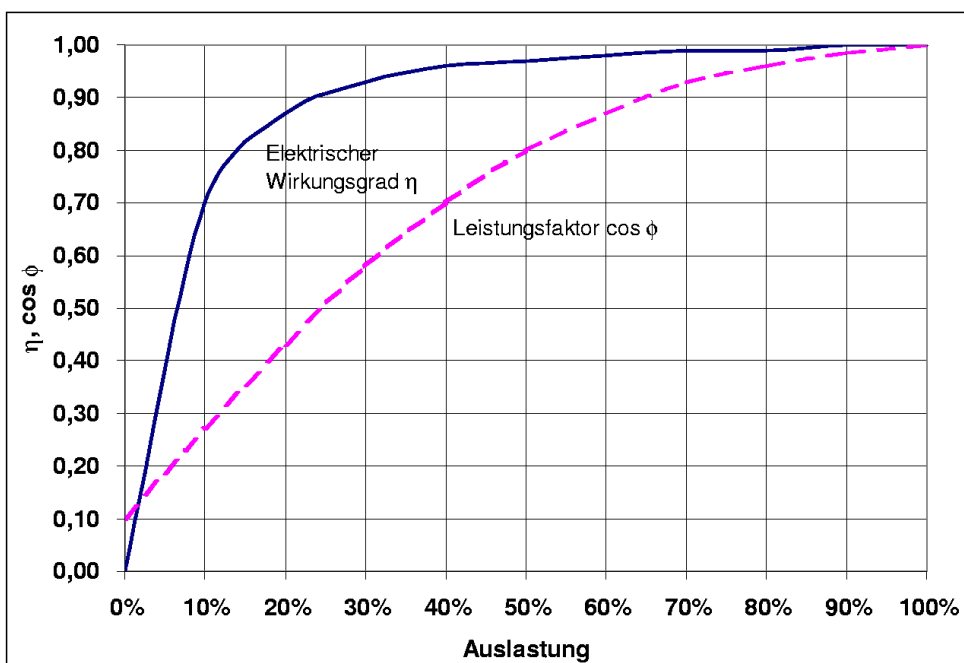
Motoren mit derzeit üblichen Wirkungsgraden



Wirkungsgradklassen für Niederspannungsdrehstrommotoren

31.03.02

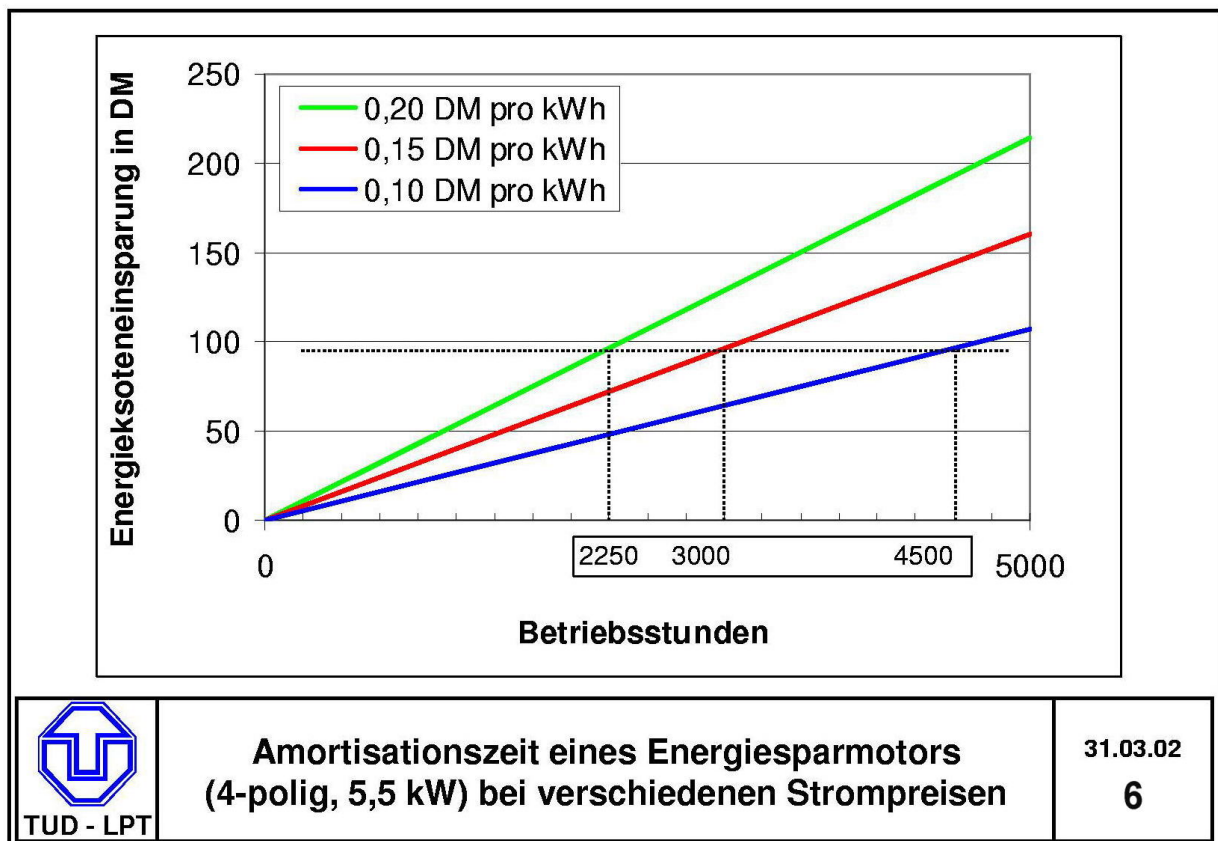
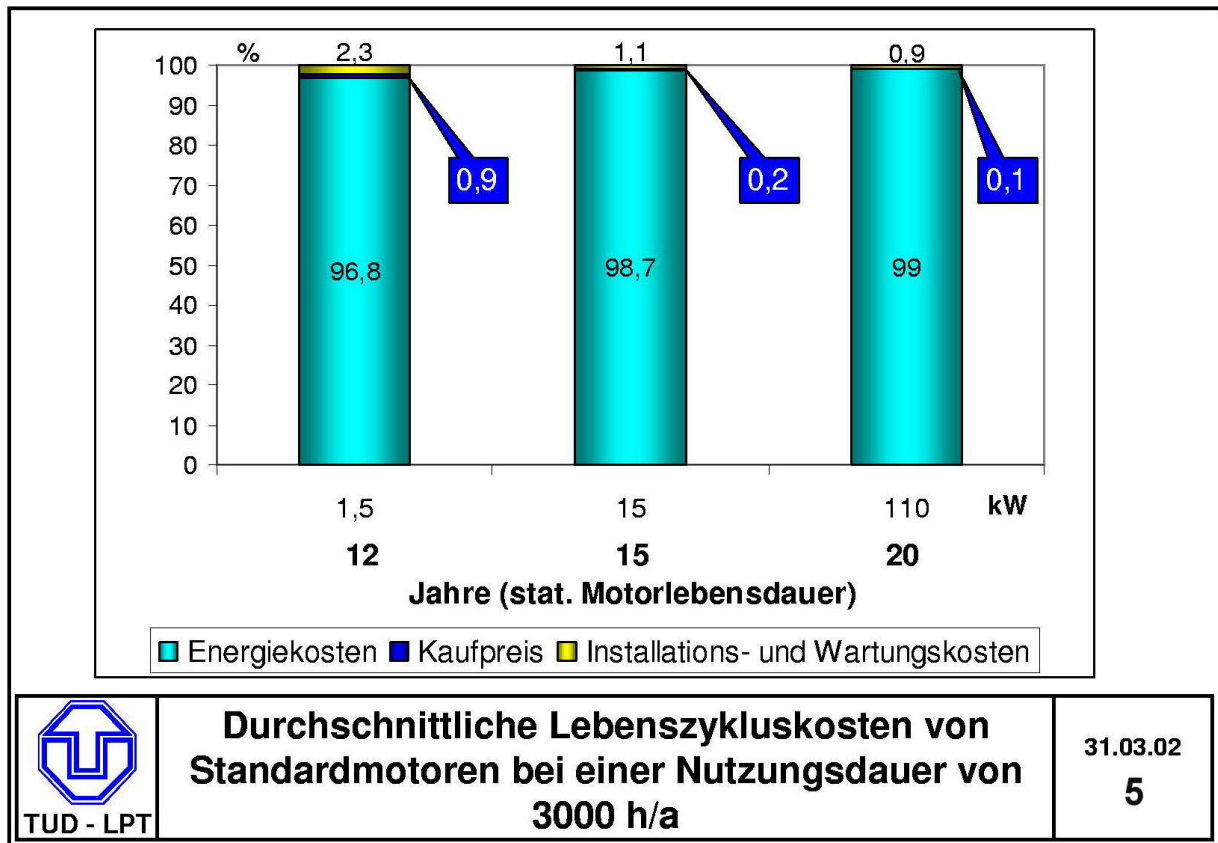
3



Typische Kennlinien einer Drehstrom- Asynchronmaschine mit Käfigläufer

31.03.02

4



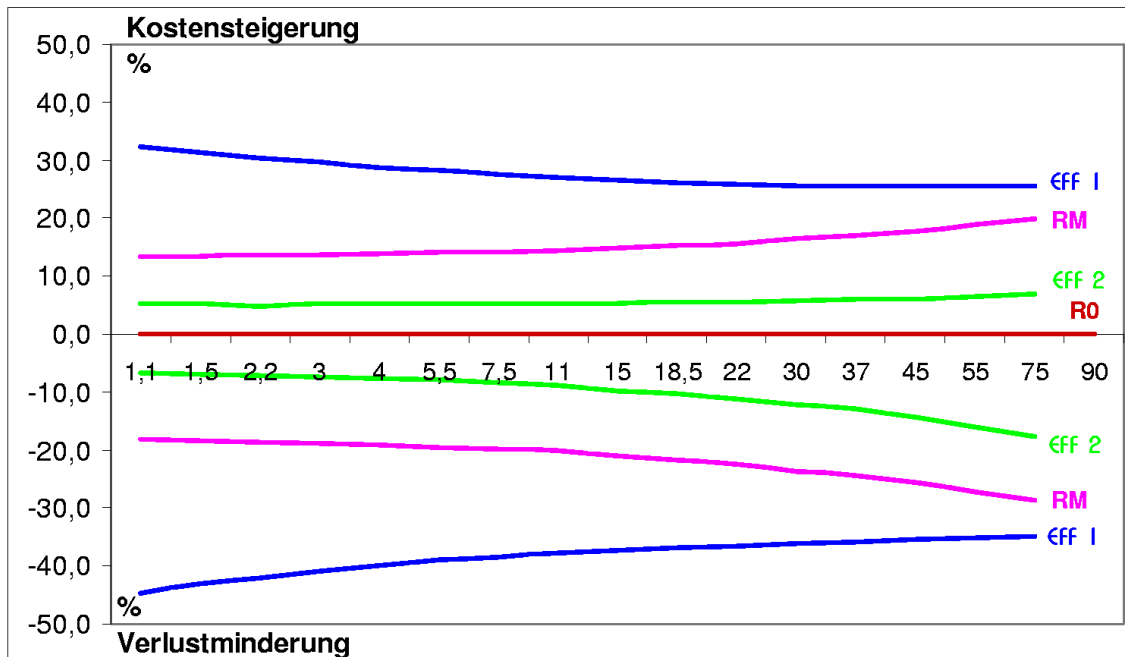
- Stromfluß in den Wicklungen
- Ummagnetisierungsvorgänge und Wirbelströme
- mechanische Reibungsverluste
- Parasitäreffekte (Zusatzverluste)



Ursachen für Verluste im Elektromotor

31.03.02

7



Mehrkosten für Wirkungsgradverbesserung (basierend auf dem Abschlußbericht der L'Aquila-Studiengruppe)

31.03.02

8

9.2.4 Umrechnung der Dampferzeugungskosten je Tonne Dampf in Euro-Cent je kWh

Grundlage für die Umrechnung des Dampfpreises bezogen auf eine Tonne Dampf auf die Bezugsbasis kWh sind folgende Randbedingungen:

Randbedingungen	Werte
Wassereinlauftemperatur:	15 °C
Wassereinlaufdruck:	1 bar
Spezifische Wärmekapazität des Wassers bei 15 °C und 1 bar	4,186 kJ/(kg K)
Dampfdruck	10 bar
Verdampfungstemperatur	180 °C
Spezifische Wärmekapazität des Wassers bei 180 °C und 10 bar	4,408 kJ/(kg K)
Spezifische Wärmekapazität des Dampfes bei 180 °C und 10 bar	2,615 kJ/(kg K)

Zu Grunde gelegt wird überhitzter Dampf bei 10 bar und 200 °C. Damit besteht die Dampferzeugung aus drei Stufen:

a) Erwärmung des Wassers von 15 °C auf 180 °C

Die spezifische Wärmekapazität ist bei den verschiedenen Drücken nicht konstant. Für die Erwärmung von 1 bar auf 10 bar wird ein mittleres c'_p interpoliert:

$$\bar{c}'_p = c'_{p_{1bar}} + \frac{c'_{p_{10bar}} - c'_{p_{1bar}}}{2} = \left(4,186 + \frac{4,408 - 4,186}{2} \right) \frac{kJ}{kg K} = 4,297 \frac{kJ}{kg K}$$

Dies entspricht: $1,194 \frac{Wh}{kg K}$ bzw. $1,194 \frac{Wh}{kg \text{ grd}}$. Daraus ergibt sich für die Erwärmung von 15 °C auf 180 °C eine spezifische Enthalpie von:

$$\Delta h_{15^\circ C \rightarrow 180^\circ C} = (180 - 15) K \cdot 1,194 \frac{Wh}{kg K} = 197 \frac{kWh}{t}$$

b) Verdampfung des Wassers

Die Verdampfungsenthalpie kann direkt aus der Dampfdrucktabelle abgelesen werden:

$$\Delta h_{v_{10bar}} = r_{10bar} = 2014 \frac{kJ}{kg} = 559,4 \frac{Wh}{kg}$$

c) Überhitzung des Dampfes von 180 °C auf 220 °C

Für die Überhitzung des Dampfes wird die spez. Wärmekapazität direkt aus der Dampfdrucktabelle entnommen:

$$c''_{p_{10\text{ bar}}} = 2,615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 0,726 \frac{\text{Wh}}{\text{kg K}} \text{ bzw. } 0,726 \frac{\text{Wh}}{\text{kg grd}}$$

Daraus ergibt sich eine spezifische Enthalpie für die Erwärmung des Dampfes von 180 °C auf 220 °C von:

$$\Delta h_{180^\circ\text{C} \rightarrow 220^\circ\text{C}} = (220 - 180) \text{ K} \cdot 0,726 \frac{\text{Wh}}{\text{kg K}} = 29,06 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$

Die Teilprozesse a) bis c) ergeben für den Gesamtprozess der Dampferzeugung aus Frischwasser eine spezifische Enthalpie von $785,46 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$.

Bei einem Preis von $10 \frac{\text{EURO}}{\text{t}}$ Dampf beträgt der Preis für eine kWh dann:

$$\frac{1000 \text{ Cent}}{\text{t}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{785,46 \text{ kWh}} = 1,25 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}.$$

/1/ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas, 5. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988

9.2.5 Themenvorschläge aus dem Bereich: **Energie/Energienutzung**

INFOR-Projekt TUD-LPT 01/01: „Konzept zur Reduktion des Energie-, Wasser-, Luft- und Stoffbedarfs von Feinpapierfabriken“

Verfahrens- und Anlagentechnik

Optimierungen

Kreislauftrennung zwischen hohen und niedrigen Konzentrationen (Temperaturen, gelöste organische und anorganische Substanzen, Feststoffkonzentrationen); insbesondere zwischen Zellstoff- oder Mineralstoffaufbereitung und PM

- **Niedertemperatureindampfung** von Teilströmen mit Rückkondensation zur Entsalzung der Kreisläufe, Reduzierung des Restabwassers und des Klärschlammes sowie Gewinnung von Frischwasserersatz durch Nutzung des Niedertemperatur-Sekundärdampf-Kondensates
- **Hochtemperaturmahlung** mit Wärmerückgewinnung, Kreislaufwasserreinigung und Zellstoffwäsche
- **Optimierung der Zellstoffaufbereitung (Chemical Pulp System - CEPUS)** ohne maschinentechnische Änderungen z.B. durch Erhöhung der Auslastung der Refiner (Leerlaufleistung ca. 11 % bis 17 %); Kreislauftrennung und Nutzung der erhöhten Energiekonzentration zur Niedertemperaturdampferzeugung und aufbauend auf den Erfahrungen die Entwicklung neuer Lösungen zur Reduzierung des Energie-, Wasser- und Stoffbedarfs von Papierproduktionslinien (Energiebedarf des CEPUS: ca. 100 Wh/kg otro ungestrichenes Basispapier; dies entspricht: 10 % - 15 % des gesamten Elektroenergiebedarfs)
- Optimierung des Return Pulp Systems (REPUS) durch **Return Pulp Management** ohne maschinentechnische Änderungen: Erfassung aller unterschiedlichen Return Pulp Qualitäten mit Schwankungsbreiten im Trockengehalt, Mineralstoffgehalt, Stärkegehalt etc.; Kreislauftrennung zwischen feuchtem und trockenem Return Pulp sowie Kreislauftrennung zwischen gestrichenem und ungestrichenem Return Pulp

Innovationen

- **Luftfreie Niedertemperatur-Hochgeschwindigkeits-Papiertrocknung** (60 – 90 °C) bei Siedetemperaturen von 20 - 60 °C mit Rückkondensation zur Reduzierung des Trocknungsenergiebedarfes (insgesamt ca. 2 KWh/kg Papier) und des Abdampfes (ca. 1 bis 2 kg Wasser je kg Papier) durch Nutzung des Niedertemperatur-Sekundärdampfes

Maschinentechnik

OPTIMIERUNGEN

- Verringerung des Energiebedarfes von Elektromotoren (> 30 kW) bei Antrieben von Pumpen, Rührwerken und Ventilatoren durch Nutzung von **frequenzgesteuerten Antrieben** (z. B. statt Schieber-Drosselung); Beachtung der notwendigen Reserven im Falle von Beschleunigungen und Drehmomentenstößen
- Optimales Antriebs- und Pumpsystem: Minimierung von Ventil- und Schieber- sowie Leitungs-Druckverlusten; Einsatz von Schiebern mit geringem Druckverlustbeiwert ξ_{PV} bei offenen Schiebern; Verringerung des Anteils der mechanischen Energie, der in Wärme umgewandelt wird
- Einführung eines Elektromotoren-Managements, d.h.
 - Einsatz von **Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad bei geringer Auslastung**;
 - Überprüfung und Anpassung der **Dimensionierung** aller Motoren mit Austausch der Motoren mit geringer Effizienzklasse (geringer Wirkungsgrad) gegen neuere Motoren mit hoher Effizienzklasse (Einsparpotential ca. 1,4 % der Energiekosten je Motor);
 - Aufnahme des Energiebedarfs der Motoren zur Ermittlung des Arbeitsbereiches: Minima und Maxima (Belastungsspitzen) sowie Leistungsaufnahme im normalen Betrieb, um in Abhängigkeit von Anforderungen und Laufzeit den günstigsten Motor zu ermitteln
- **Isolieren** von Rohrleitungen zur Reduktion der Wärmeabgabe an die Hallenluft und damit gleichzeitig Verringerung des Elektroenergiebedarfs für die Hallenbelüftung (Energieanteil der Hallenbelüftung: 20 Wh/kg otro Basispapier, d.h. ca. 2,5 % des gesamten Elektroenergiebedarfs)
- **Abdecken von Bütten und Behältern** um Verdunstungskühlung, diffuse Wasserverluste, Antrocknen von Stoff und Belastung der Hallenbelüftung zu reduzieren
- **Reduktion** von Bütten-, Behälter- und Rohrleitungsvolumina zur Verringerung der rechnerischen Austauschzeiten (damit wird bei Sortenwechseln schneller der neue Gleichgewichtszustand erreicht) und Verringerung des Energiebedarfes von Rührwerken und Zirkulationspumpen
- Erzeugung von Unterdruckdampf (z. B. zur Kühlung) und energetische Aufwertung des Dampfes durch den Einsatz von **Dampfstrahlpumpen** (Thermokompressoren) mit 10 – 15 bar
- Teil-Rückgewinnung der Stoffauflauf-Pumpenenergie bei PM-Geschwindigkeiten über 1500 m/min durch geschlossene Wasserführung

Innovationen

- Nutzung der Abwärme großer Elektromotoren (> 100 kW), der Lager-, Schuhpressen- und Papierbahnkühlung zur **Niedertemperaturdampferzeugung**
- **Ersetzen der Luftkühlung durch Wasserkühlung** im Kreislauf bzw. durch eigene Kühlsysteme ohne Wärmeabgabe an die Hallenluft, d.h. Verringerung des Elektroenergiebedarfes für die Hallenbelüftung (Energieanteil der Hallenbelüftung: 20 Wh/kg, d.h. ca. 2,5 % des gesamten Elektroenergiebedarfs)

Produktionstechnik

- Erhöhung des Laufzeitwirkungsgrades durch **Minimierung von Stillstandszeiten** z.B. durch vorbeugende Instandhaltung und Wartung
- Kurze bis rückstofffreie Sortenwechsel durch kleine SW I- und SW II-Kreisläufe und gesteuerte Konzentrations-Änderung im SW I