

Chemikalien- und Prozess-basierte Prognose der organischen Zu- und Ablaufbelastung von Abwasserreinigungsanlagen in Papierfabriken mit Deinkinganlage

R. Spörl, A. Wagenknecht u. H.-J. Öller

Zusammenfassung

Grafische und Hygienepapiere stellen mehr als die Hälfte der Gesamtpapierproduktion Deutschlands dar und werden mit einer Altpapiereinsatzquote von im Mittel ca. 50%, bei Zeitungsdruckpapier 113% erzeugt. Die Aufbereitung des Altpapiers erfolgt unter Einbeziehung des Deinkingprozesses. Fabriken mit Deinkinganlagen weisen unter den Papiererzeugern, die überwiegend oder ausschließlich Altpapier verarbeiten, eine vergleichsweise hohe produktionsspezifische Abwasserrestbelastung (Rest-CSB) zwischen 2...6 kg/t CSB auf. Inwieweit chemisch-technologische Parameter die Abwasser-Restbelastung nach biologischer Reinigung verändern, ist gegenwärtig nicht bekannt.

Ziel des Projektes war es, durch systematische Erfassung und statistische Auswertung von Prozess- und Abwasserdaten die wesentlichen Faktoren zu identifizieren, die den Rest-CSB von Papierfabriken mit Deinking(DI-)anlagen bestimmen und ein praxisrelevantes Modell zur Rest-CSB-Prognose (rCSB) abzuleiten.

Durch Auswertung von Prozess- und Abwasserdaten aus 6 Werken konnten als Haupteinflussfaktoren die NaOH-, H₂O₂- und Dithionit-Dosis identifiziert werden. Zur Prognose des Rest-CSB wurden mittels multipler linearer Regression bzw. Partial Least Square Methode statistisch signifikante Modelle für die einzelnen Werke und für DI-Fabriken allgemein abgeleitet.

$$rCSB = k_0 + \sum_{i=1}^5 k_i * D_i$$

Die Modelle erlauben eine gute Vorhersage, wie der Vergleich der Modellergebnisse mit Praxisdaten zeigte. Der Einfluss von Faserstoffeigenschaften auf den Rest-CSB ist im Modell nur indirekt enthalten, kann aber durch Kalibrierung unter Bezugnahme auf die Ausgangswerte des rCSB berücksichtigt werden. Die Projektergebnisse führen zu einer deutlich verbesserten Prognose der CSB-Fracht in den Prozessabwässern in Abhängigkeit von den Produktionsparametern.

Der unmittelbare Nutzen für die Industrie ist im Zusammenhang mit notwendigen Investitionen zur Standortsicherung zu sehen: Änderungen/Umstellungen der Produktion, Erhöhung der Produktionskapazität sowie Um- und Ausbau von Abwasserbehandlungsanlagen. Eine gesicherte Prognose des Rest-CSB ist eine Grundvoraussetzung für die optimale Anlagen-dimensionierung bzw. -bewertung. Durch Minimierung von Risikozuschlägen bei der Dimensionierung können bei der Abwasserreinigungsanlagenerweiterung Investitionskosten i. H. von 100 bis 400 T€ eingespart werden.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens INNOWATT IW050272 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm GmbH gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Abstract

Graphic and sanitary papers make up more than half of the total paper produced in Germany. They are produced at a recovered paper utilization rate of approx. 50%, even 113% in the case of newsprint. Recovered paper is also treated using the deinking process. Among paper manufacturers who process recovered paper predominantly or exclusively, paper mills equipped with deinking plants exhibit a relatively high specific effluent residual load (residual COD) ranging from 2 to 6 kg/t COD. The extent to which chemical-technological parameters change the effluent residual load after biological treatment is currently unknown.

The objective of this project is to identify the essential factors that determine the residual COD (rCOD) of paper mills with deinking plants. This objective is to be achieved by acquiring and statistically evaluating process data and effluent data. Yet another project objective is to develop an application-oriented model that will allow residual COD to be predicted.

The evaluation of the process data and effluent data from six paper mills served to identify the dosage of NaOH, H₂O₂ and dithionite as the main contributing factors. Statistically significant models were derived by linear regression or partial least square method according to the following formula for the individual mills and for the deinking plants in order to predict the residual COD:

$$rCSB = k_0 + \sum_{i=1}^5 k_i * D_i$$

The models allow a good prediction to be made as to how the results obtained from the models compare with practical mill data. Although the impact of pulp properties on the residual COD is only indirectly included in the model, it can be taken into consideration by calibration it against the initial rCOD values. The project results give rise to a significantly improved prediction of the COD load in the process effluents as a function of the production parameters.

The immediate benefits to industry are to be seen in connection with the capital expenditures (investment) necessary to protect manufacturing locations. Changes/conversions in production, increases in production capacity as well as rebuilds and effluent treatment plant expansion are all immediate benefits. A statistically significant prediction of residual COD loads is a prerequisite that prevents effluent treatment plants from being over- or under-dimensioned and ensures optimum assessment. Minimising risk premiums when dimensioning the expansion of an effluent treatment plant may result in investment savings ranging from € 100,000 to 400,000.

The results presented in this report were obtained within the scope of research project INNOWATT IW050272 funded by the Federal Ministry of Economics and Technology – under the umbrella of EuroNorm – in the programme for the "Promotion of Research, Development and Innovation in Small and Medium-sized Enterprises and External Industrial Research Institutions in the New German Countries". We would like to express our gratitude for this funding and support.

1 Einleitung

Die in den letzten Jahrzehnten zu verzeichnende Tendenz, die Emissionen der Papierproduktion zu vermindern, hat zusammen mit ökonomischen Erwägungen zu wesentlichen Änderungen in der Produktionstechnologie geführt. Diese spiegeln sich insbesondere wider in

- einer Reduzierung der spezifischen Abwassermenge durch Einengung der Wasserkreisläufe,
- einer Steigerung der Altpapiereinsatzquote,
- der zunehmenden Veredelung der Papiere durch z.B. Streichen,
- der Erhöhung der Papiermaschinengeschwindigkeit und
- dem vermehrten Einsatz von Additiven im Produktionsprozess.

Die gestiegene Altpapiereinsatzquote und die Preisentwicklung auf dem Altpapiermarkt bzw. die mangelnde Verfügbarkeit bestimmter Altpapierqualitäten sowie die kritische Ertragsituation in der Papierindustrie machen den Einsatz minderer Altpapierqualitäten erforderlich. Die Sicherung einer konstanten oder verbesserten Produktqualität verlangt dann einen erhöhten technologischen Aufwand bei der Aufbereitung bzw. einen oft gesteigerten Chemikalieneinsatz. Diese Entwicklungen haben auch Auswirkungen auf die Abwasseremissionen, da bei verändertem Rohstoffeinsatz, intensivierter Aufbereitungstechnologie und einem den neuen Anforderungen angepassten Einsatz von Chemikalien und Hilfsmitteln mit einer veränderten, meist erhöhten Abwasserbelastung zu rechnen ist.

Unter den Papiererzeugern, die überwiegend oder ausschließlich Altpapier verarbeiten, weisen die Fabriken mit Deinkinganlagen eine vergleichsweise hohe produktionsspezifische Abwasserrestbelastung (Rest-CSB) auf. Gegenwärtig liegen Kenntnisse über die Haupteinflüsse auf die Belastung des **Rohabwassers** vor, inwieweit chemisch-technologische Änderungen im Produktionsprozess die Abwasser-**Rest**belastung nach biologischer Reinigung verändern, ist jedoch nicht exakt abschätzbar. Um den steigenden Umweltaforderungen auch zukünftig gerecht werden zu können, sollen im Rahmen dieses Projekts praxisrelevante Grundlagen erarbeitet werden, die die Haupteinflussfaktoren auf den Rest-CSB beschreiben.

Ziel dieser Arbeit war eine verbesserte Prognose der Abwasserbelastung (Abwasserlastenfall und Abwasserrestbelastung) von Papierfabriken mit Deinkinganlagen durch die Ermittlung und Berücksichtigung des Einflusses wesentlicher Rohstoff- und Prozessparameter. Dazu wurden durch die systematische Erfassung und statistische Auswertung umfangreichen Datenmaterials anlagen- und prozessspezifische Modelle erstellt, die eine Vorhersage des Rest-CSB in Abhängigkeit der erkannten Einflussgrößen erlauben.

Eine möglichst präzise Prognose der CSB-Fracht der Prozessabwässer ist in vielen Fällen eine Grundvoraussetzung für die optimale Dimensionierung bzw. Bewertung der Abwasseranlagen. Diese Fragen spielen insbesondere dann eine Rolle, wenn für die Standortsicherung der Werke wichtige Änderungen oder Umstellungen der Produktion bzw. Erweiterungen der Produktionskapazität bewertet werden müssen.

2 Stand des Wissens und der Technik

Grafische Papiere sind ein sich dynamisch entwickelndes Produktionssegment der Papierindustrie in Deutschland: Die Produktion grafischer Papiere stieg in Deutschland von 2003 bis 2005 um ca. 10% von 9,5 auf 10,5 Mio. t /1/. Perspektivisch wird für diesen Produktbereich bis zum Jahr 2010 eine jährliche Steigerung der Produktion um nahezu 4% erwartet /2/. Die Produktion von Hygienepapieren hat einen Anteil von ca. 6% und unterliegt einer etwas geringeren Steigerung.

Der Entwicklungstrend bei der Erzeugung vor allem grafischer Papiere ist gekennzeichnet durch eine weitere Erhöhung der Altpapiereinsatzquote, insbesondere im Bereich der Büro- und Administrationspapiere. Um die gewünschte Produktqualität erzeugen zu können, müssen die im Rohstoff Altpapier enthaltenen Verunreinigungen in einem Prozess der Altpapieraufbereitung, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, entfernt werden.

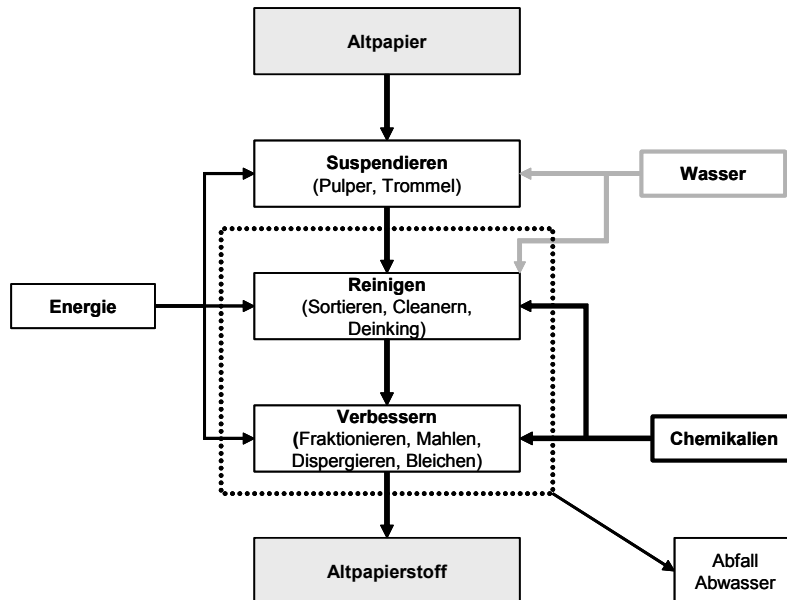


Abbildung 1 Grundprozesse der Altpapieraufbereitung

Dabei werden im wässrigen Medium unter Eintrag von thermischer und mechanischer Energie sowie von Chemikalien die störenden Stoffe durch physikalische und chemische Prozesse vom Faserstoff abgetrennt. Die abtrennbaren Feststoffe werden weitgehend aus dem Prozess ausgetragen, gelöste Stoffe gelangen dagegen ins Prozesswasser und können nur als Abwasser das System verlassen.

Abbildung 2 veranschaulicht stark vereinfacht den Verfahrensfluss der Papiererzeugung unter Einsatz des Deinkingprozesses. Abhängig von der angestrebten Produktqualität wird dieser Prozess auch in zwei bzw. drei Stufen mit integrierter Bleichstufe ausgeführt.

Beim Deinking wird zur Erhöhung des Weißgrades die im Altpapier gebundene Druckfarbe vom Faserstoff entfernt. Die auf den Fasern anhaftenden Druckfarbenpartikel werden durch den Einsatz von Alkali in Lösung gebracht und zusammen mit der zum Deinking eingesetzten Fettsäure durch Luftblasen in den Flotationszellen mit dem entstehenden Flotat ausgetragen. Dies geschieht bei einer Temperatur zwischen 40 und 55°C, bei pH-Werten zwischen 9 und 10,5 sowie bei Stoffdichten von 6 bis 7%. Um der alkaliinduzierten Vergilbung der Fasern entgegenzuwirken wird Wasserstoffperoxid zugesetzt, das durch die gleichzeitige Zugabe von Wasserglas stabilisiert wird.

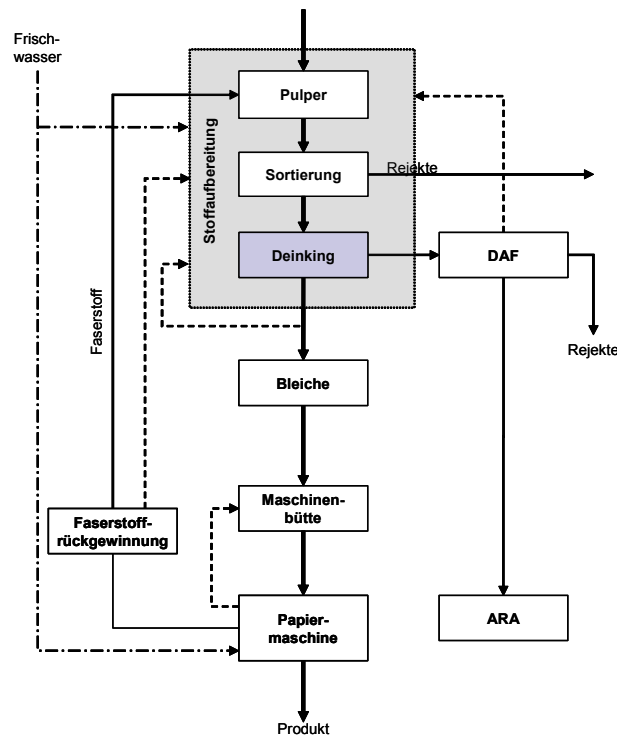


Abbildung 2 Verfahrensprinzip Papiererzeugung mit Deinking

Der Energie- und Chemikalieneinsatz beim Deinken hängt hauptsächlich von der verwendeten Rohstoffqualität und der erzeugten Papierqualität ab. Tabelle 1 enthält eine Übersicht über typische Energie- und Chemikalieneinsätze bei der Herstellung von grafischen bzw. Hygienepapieren /3/.

Tabelle 1 Energie und Chemikalieneinsatz beim Deinking

	ZEITUNGSDRUCK	WEISSES SCHREIB- UND DRUCKPAPIER	TISSUE
Rohstoff	hh' Altpapier		überwiegend hf' Altpapier
Energieeinsatz			
Elektrische Energie	300-380 kWh/t	400-500 kWh/t	
Wärmeenergie	450-900 MJ/t	650-1.100 MJ/t	
Chemikalien			
<i>Deinkingflotation</i>			
H ₂ O ₂	0,5-1,0%		0,0-1,0%
NaOH	0,5-1,0%	0,5-1,2%	
Na ₂ SiO ₃	1,0-2,0%		
Seife, Flotation 1	0,3-0,6%	0,4-0,8%	
Flotation 2	0,2-0,4%		
<i>Bleiche oxidativ</i>			
H ₂ O ₂	1,0-2,0%	1,0-2,5%	1,0-2,0%
NaOH	0,5-1,2%	0,5-1,5%	0,5-1,2%
Na ₂ SiO ₃	1,0-1,8%	1,0-2,0%	1,0-1,8%
<i>reduktiv</i>			
Dithionit	0,4-1,0%		
NaOH	0,2%		

Der Energie- und Chemikalieneinsatz hat neben der gewünschten Ablösung und Stabilisierung der Druckfarbenpartikel auch noch eine Reihe von Nebenwirkungen. So können durch Reaktionen der Chemikalien mit den Fasern und allen im Mehrphasensystem enthaltenen Komponenten auch organische Verbindungen in Lösung gebracht werden, die letztlich zu einer erhöhten CSB-Belastung der Prozess- und Abwässer führen. Angesichts der Spannen im Chemikalien- und Energieeinsatz sowie der verschiedenen Rohstoffqualitäten sind unterschiedliche Lösungsreaktionen organischer Komponenten und damit sehr unterschiedliche CSB-Belastungen im Prozesswasser zu erwarten. Die in Lösung gebrachten Stoffe können, abhängig von ihrer Herkunft, mehr oder weniger gut biologisch abbaubar sein.

Abbildung 3 zeigt mittlere Konzentrationen im Roh- und biologisch gereinigten Abwasser von Papierfabriken mit und ohne Deinkinganlage. Deutlich ist anhand dieser Daten zu erkennen, dass Papierfabriken ohne Deinkingprozess trotz erheblich höherer Zulaufwerte niedrigere Rest-CSB-Werte im gereinigten Abwasser aufweisen. Der Eliminationsgrad des CSB beträgt in diesen Fällen im Mittel fast 97%, in entsprechenden Papierfabriken mit Deinking erreicht die CSB-Elimination im Mittel dagegen nur ca. 80%.

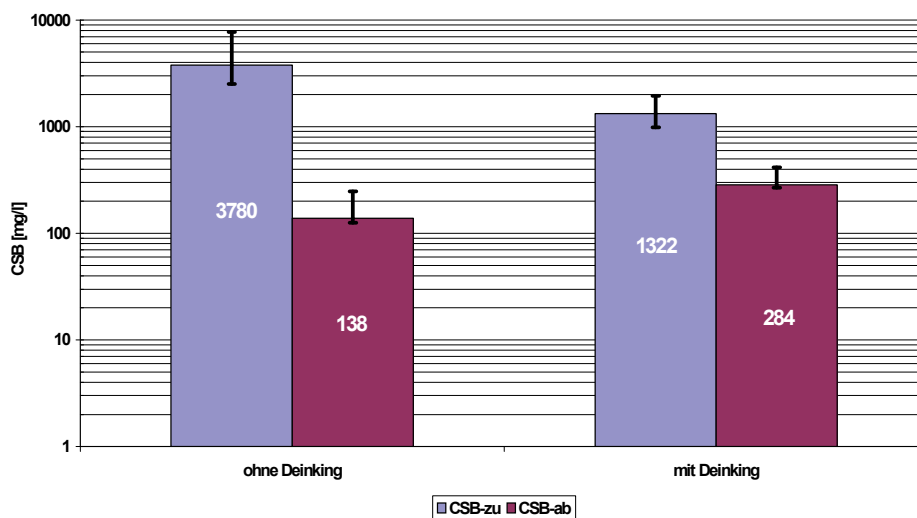


Abbildung 3 Mittlere Zu- und Ablaufkonzentrationen in Abwasserreinigungsanlagen von Papierfabriken mit und ohne Deinkinganlage

Die in Tabelle 2 zusammengestellten Daten zur Abwasserbelastung verschiedener Deinkingfabriken zeigen, dass neben der geringeren Eliminierbarkeit der Abwässer auch noch erhebliche Unterschiede in den produktionsspezifischen Frachten, sowohl im Roh- als auch im gereinigten Abwasser festzustellen sind /4/. Dieser Umstand stellt für viele technische Entscheidungen ein erhebliches Problem dar, da eine hierfür notwendige verlässliche Prognose der zu erwartenden Abwasserbelastung im Falle von Änderungen der Rohstoff- und Produktqualität, technischer Prozessparameter oder beim Neubau bzw. Erweiterungen von Produktionskapazitäten nicht möglich ist.

Tabelle 2 Spezifische Kennziffern verschiedener Papierfabriken mit Deinkinganlagen

	Dim.	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5
Zulauf ARA						
CSB	mg/l	1360	1873	1062	1153	1886
BSB ₅	mg/l	680	893	360	460	802
BSB ₅ /CSB	-	0,50	0,48	0,34	0,40	0,43
Ablauf ARA						
CSB	mg/l	308	324	179	336	172
BSB ₅	mg/l	13	8	2	8	12
CSB-Elimination	%	77	83	83	71	91
spezifische Werte						
Abwassermenge	m ³ /t	9,2	7,5	10,3	10,0	10,1
CSB-Zulauffracht	kg/t	13,8	16,4	13,8	22,0	19,2
CSB-Ablauffracht	kg/t	3,1	2,8	2,3	6,4	1,8

Eine umfassende Darstellung und Wertung von Einflussfaktoren, die insbesondere die Belastung mit schwer eliminierbaren, den „Rest-CSB“ verursachenden Stoffen bestimmen, fehlt bislang. Systematische Arbeiten zum Flotationsdeinking aus der ersten Hälfte der 80er Jahre /5, 6, 7/ zeigten auf der Grundlage von Laborversuchen wesentliche Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und der CSB-Freisetzung in der Deinkingstufe (spezifischer initialer CSB) auf. Als Haupteinflussfaktoren wurden vor allem der pH-Wert beim Deinken sowie weniger stark ausgeprägt die Stoffdichte und die Temperatur identifiziert.

In der Literatur finden sich bezüglich des Einflusses der Prozessparameter auf die Abwasserbelastung und in begrenztem Umfang auch auf den Rest-CSB übertragbar die folgenden Hinweise:

Ein besonders wichtiger Faktor stellt der **Einsatz von NaOH** bzw. der **pH-Wert** im Deinkingprozess dar, da bei höherer Alkalinität auch die Löslichkeit von Holzsubstanzen (Lignin, Hemicellulosen) erhöht wird /8/. Der Einfluss des eingesetzten **Peroxids** ist dagegen weniger stark ausgeprägt /9/. **Stoffdichte** und **Temperatur** sind Faktoren, die die Belastung der Produktionswässer bestimmen. Geringere Stoffdichten und höhere Temperaturen führen zu einer erhöhten Belastung der Prozesswässer. Die Eigenschaften des **Faserrohstoffs** spielen ebenfalls eine Rolle, da das Potenzial zur Ablösung organischer Stoffe im Falle von holzhaltigen Faserstoffen bzw. Hochausbeutestoffen deutlich größer ist als bei Zellstofffasern /10/. Beim mehrfachen Durchlaufen des Deinkingprozesses verringert sich die Abgabe von CSB, da die im Holzstoff enthaltenen löslichen Substanzen von mal zu mal abnehmen /11/. Alterungseffekte im Altpapier spielen hingegen keine Rolle /12/.

Angaben zur biologischen Abbaubarkeit des im Deinkingprozess gebildeten CSB bzw. zum Anteil des refraktären CSB sind in der Literatur kaum zu finden. Untersuchungen an Abwasser einer schwedischen Papierfabrik, die Tissue und DIP aus Altpapier (Zeitungen auf Basis Hochausbeutezellstoff) erzeugt, zeigten, dass ca. 30% des CSB biologisch nicht eliminierbar sind /13/.

3 Methodisches Vorgehen

3.1 Auswahl von Referenzanlagen, Datenerfassung und -aufbereitung

Für die Untersuchungen wurden Daten aus Werken mit 100% DIP-Einsatz, mit DIP- und Holzstoffeinsatz und einem Werk, das Hygienepapiere herstellt, herangezogen.

Untersuchungspläne wurden auf Basis der in Abbildung 4 skizzierten Datenstruktur erstellt. Da in den untersuchten Werken wegen der jeweils gegebenen Anlagenkonfiguration nicht alle in dieser vollständigen Datenstruktur aufgeführten Größen verfügbar waren, wurden im Interesse der Vergleichbarkeit die jeweiligen Chemikalien- und Rohstoffeinsätze der Prozessstufen Deinking und Bleiche zusammengefasst.

Wenn möglich, wurden pro Werk mehr als 30 repräsentative Datensätze für Tagesmittelwerte bzw. Messwerte an Tagesmischproben ausgewertet, um eine große Varianz der Einflussgrößen zu gewährleisten.

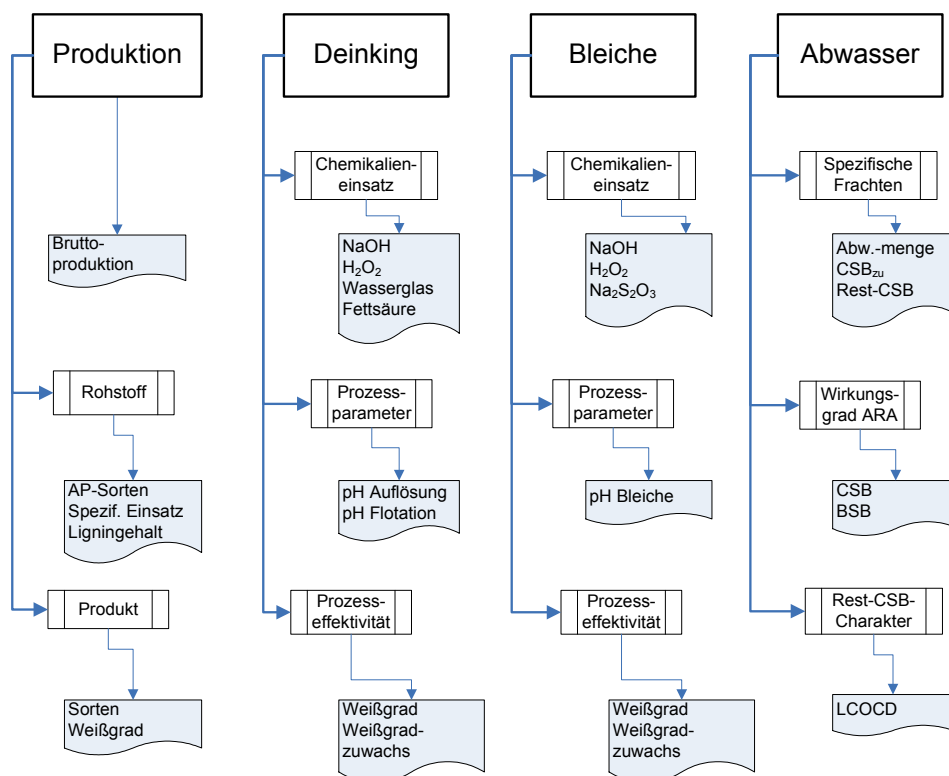


Abbildung 4 Übersicht zur Datenstruktur Bestandsaufnahme

Die relevanten Daten wurden den Prozessdokumentationen entnommen und mit weiteren Informationen aus dem Bereich der Produktions- und Abwasseranlage, die der Plausibilitätsprüfung der Daten dienen, zusammengestellt. Daraus wurden die auf den Rohstoffeinsatz bezogenen spezifischen Werte des Chemikalieneinsatzes und des spezifischen Rest-CSB, wie im nachfolgenden Schema dargestellt, berechnet. Die Prozessdaten (z.B. pH-Werte, Weißgrade, Weißgraddifferenzen etc.) wurden ebenfalls erfasst und dokumentiert.

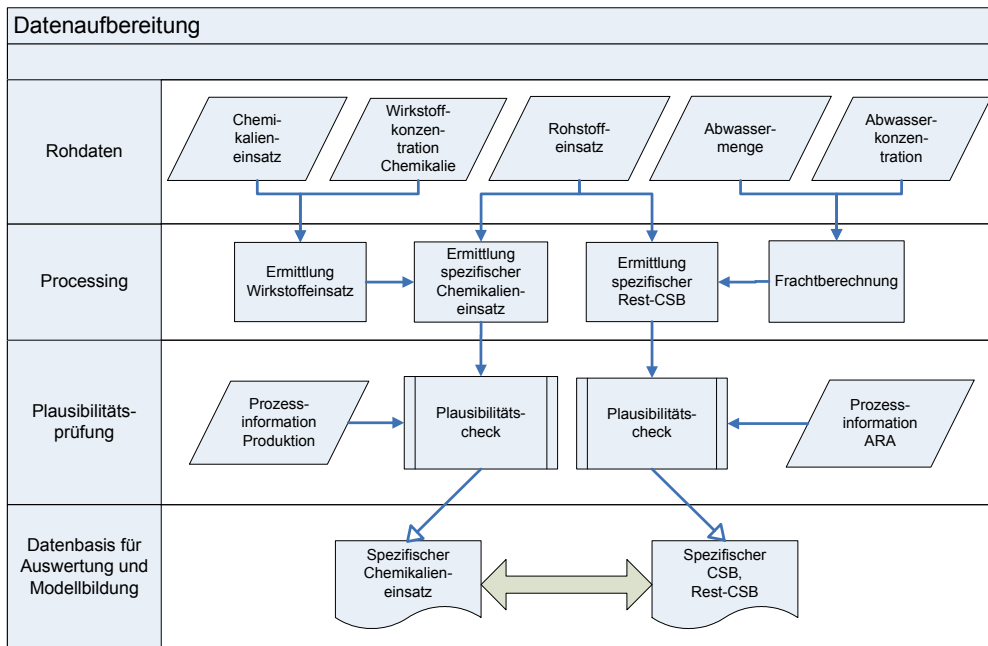


Abbildung 5 Übersicht zur Datenaufbereitung

Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung erfolgte eine erste Elimination von extremen Ausreißern, die z.B. an Stillstandstagen oder bei Prozessstörungen auftraten. Im Rahmen der statistischen Auswertung der Daten erfolgte dann zu einem späteren Zeitpunkt eine weitere Prüfung auf Ausreißer und ggf. deren Elimination.

3.2 Screening Datenmaterial

Die so aufbereiteten Daten wurden im ersten Schritt des Screening einer Korrelationsanalyse unterzogen. Diese erlaubte eine erste Identifikation der Haupteinflussfaktoren und zeigte auf, welche Einflussfaktoren miteinander verwandt sind.

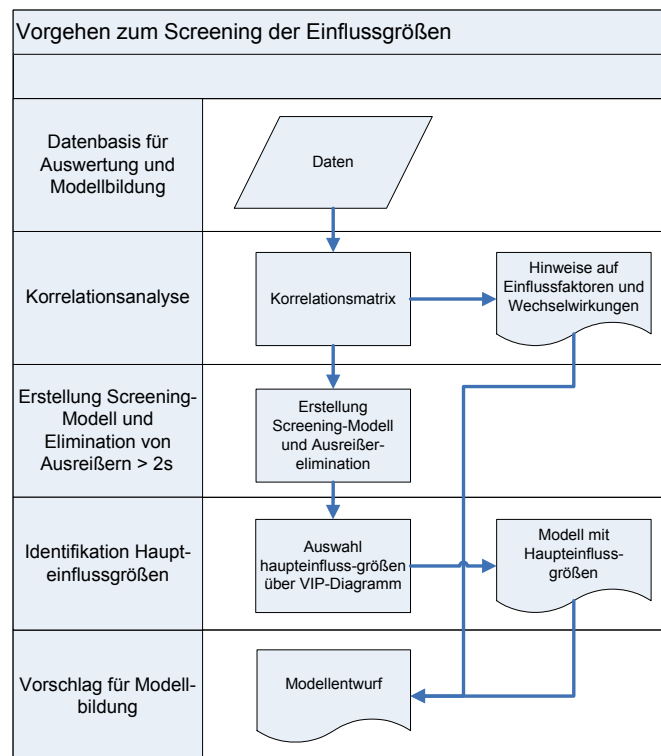


Abbildung 6 Übersicht zum Screening der Einflussgrößen

Im darauf folgenden Schritt wurden die Daten der multiplen linearen Regression unterworfen und ein lineares Modell abgeleitet.

3.3 Datenauswertung und Modellbildung

Zur detaillierten Auswertung der Daten kamen die statistischen Methoden der multiplen linearen Regression (MLR) bzw. die PLS-Methode (Partial Least Squares) zur Anwendung. Nachdem im Screening bereits die Haupteinflussfaktoren auf den Rest-CSB für jedes Werk ermittelt wurden, wurde versucht, auf der Basis des vorhandenen Datenmaterials ein Modell für jeden untersuchten Fall und ein für Papierfabriken mit Deinkinganlagen allgemeingültiges Modell zu erstellen. Dabei wurde nach dem in Abbildung 7 dargestellten Ablauf vorangegangen.

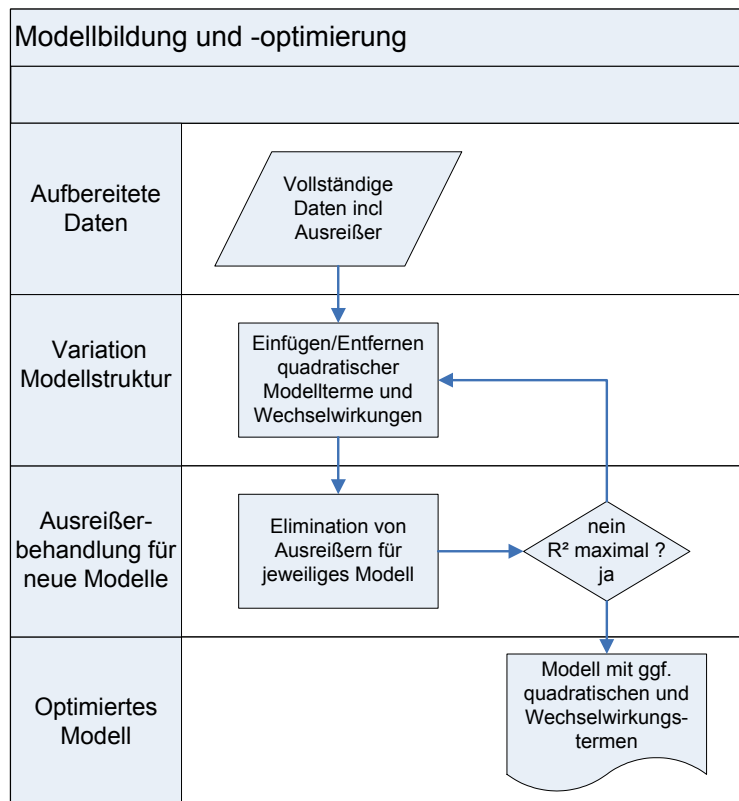


Abbildung 7 Vorgehen zur Modelloptimierung

In den meisten Fällen war es ausreichend, im ersten Schritt den Einfluss der drei wichtigsten Größen auf den Rest-CSB im Modell zu berücksichtigen. Der Einfluss weiterer Faktoren, von Faktorwechselwirkungen bzw. quadratischer Terme wurde im Rahmen dieser Auswertungen geprüft. Im Einzelfall besteht durch deren Berücksichtigung die Möglichkeit, die Modellqualität geringfügig zu verbessern.

4 Ergebnisse

4.1 Übersicht zu den Untersuchungsobjekten und Präzisierung des Vorgehens

In Tabelle 3 sind wesentliche Informationen zu den untersuchten Fällen angegeben. Zur Beschreibung der Struktur der Wasser- und Stoffkreisläufe werden die in /14/ beschriebenen Morphotypen (vgl. S. 25) verwendet.

Tabelle 3 Charakterisierung der untersuchten Werke

Fall	A	B	C	D	E	F
Produktion	ZD bzw. grafische Papiere aus 100% AP				ZD + graf. Pap. aus AP + Holzschliff	Hygienepap. aus 100% AP
Morphotyp	A	A	D	D	C + D	E
ARA	aerob	aerob	anae-rob/aerob	anae-rob/aerob	aerob	aerob
rCSB [kg/t]	1,98	1,43	1,57	1,46	5,10	1,70

Die Angaben für den spezifischen Rest-CSB beziehen sich jeweils auf die eingesetzte Faserrohstoffmenge. Sie weichen daher von den sonst verwendeten, auf die Bruttomaschinenproduktion bezogenen Werten mehr oder weniger stark ab.

Die Sichtung der Anlagen- und Prozessdokumentationen der Untersuchungsobjekte hatte gezeigt, dass die in den Einzelfällen verfügbaren bzw. erfassbaren Informationen sich von Fall zu Fall erheblich unterscheiden und demzufolge unter dem Aspekt einer vergleichenden und der abschließenden gemeinsamen Auswertung der Anlagen eine verhältnismäßig einfache Struktur zur Erfassung der Zusammenhänge genutzt werden muss (vgl. Abbildung 8). Deshalb wurde der Chemikalieneinsatz (in kg/t Wirksubstanz) als summarischer Verbrauch der Auswertung zu Grunde gelegt.

Einflussgröße		Dimension	Typ	Prozess	Zielgröße
Rohstoffqualität			qualitativ		Rest-CSB kg/t
Produktqualität					
Chemikalien	NaOH	kg/t	quantitativ		
	H ₂ O ₂				
	Wasserglas				
	Seife				
	Na ₂ S ₂ O ₄				
Energie		kWh/t			
Prozessparameter	pH	quantitativ			
	Temperatur				
	Stoffdichte			%	
	Verweilzeit			h	
	Weißgrad/-zuwachs		%		
	Energieeintrag		kWh/t		
Störungen, unbekannte Einflüsse					

Abbildung 8 Struktur der Zusammenhänge zwischen wichtigen Prozessgrößen und Rest-CSB

Die Aufbereitung der Daten erfolgte in folgenden Schritten:

- Berechnung der spezifischen Chemikalieneinsätze bezogen auf den jeweiligen Rohstoffeinsatz,
- Berechnung der rohstoffbezogenen spezifischen CSB-Zu- und Ablauffrachten,
- Zuordnung der Frachten und Rohstoffeinsätze auf der Basis der Verweilzeiten im System,
- Überprüfung dieser Zuordnung anhand beispielhafter Korrelationen von Input- und Output-Parametern,
- Elimination von Ausreißern im Zuge der Erstellung des ersten Screeningmodells.

4.2 Screening, Modellbildung und -optimierung

Das prinzipielle Vorgehen beim Screening und der Modellbildung und –optimierung wird nachfolgend am Beispiel des Fall A dargestellt.

4.2.1 Screening zur Ermittlung der Haupteinflussgrößen

Die vorhandenen Daten wurden einem Screening unterworfen, indem mittels einer multiplen linearen Regression Modelle abgeleitet und auf diese Weise die Haupteinflussgrößen (die den Rest-CSB am stärksten beeinflussenden Faktoren) identifiziert wurden. Die Rangfolge der Einflussfaktoren wird nachfolgend in so genannten VIP-Plots (Variable Importance Plot) aufgezeigt. Diese erste Analyse ermöglichte die begründete Auswahl der relevanten Einflussgrößen, die dann in den späteren Schritten für die Modellbildung herangezogen werden konnten.

Die Darstellung der Modellkoeffizienten im Koeffizientenplot erlaubte ebenfalls einen Vergleich des Einflusses der einzelnen Faktoren. Die Darstellung erfolgte skaliert und normiert, was einen direkten Vergleich der Koeffizienten bezüglich ihres Einflusses auf den Rest-CSB ermöglichte. An diesen Darstellungen ließ sich auch die Wirkungsrichtung der einzelnen Faktoren am Vorzeichen erkennen. Wenn die Berechnungsmatrix nicht zu komplex war, d.h. nicht zu viele Faktoren in die Betrachtung einbezogen wurden, wurde in dieser Grafik auch das Vertrauensintervall der Koeffizienten dargestellt, so dass signifikante Koeffizienten erkannt werden konnten.

Eine dritte Darstellung, die die gemessenen mit den vom Modell berechneten Werten gegenüber stellt, diente der Bewertung der Qualität des zugrunde liegenden Modells. Bei einem fehlerfreien Modell liegen alle Punkte auf der Regressionsgeraden, je größer der Modellfehler ist, desto mehr streuen die Punkte um diese Gerade.

Die betrachteten Einflussgrößen im untersuchen Fall sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4 Einflussgrößen

	Einflussgröße	Bezeichnung	Dim.	Parametertyp
Chemikalieneinsatz	Wasserstoffperoxid	Per	kg/t (AP-Einsatz)	quantitativ
	NaOH	NaOH		
	Wasserglas	Was		
	Seife	Seife		
	Dithionit	Dit		
Rohstoffeinsatz Sorte	untere Sorten	D	rel. Anteil	qualitativ
	mittlere Sorten	O		
	bessere Sorten	Q		
Produktqualität	untere Qualität	Qual1	-	
	mittlere Qualität	Qual2		
	bessere Qualität	Qual3		
Prozessparameter	pH Pulper	pHP	-	quantitativ
	pH Flotation	pHF	-	
	pH Bleiche	pHB	-	
	Weißgrad Pulper	WGP	%	
	Weißgrad Flotation	WGF	%	
	Weißgrad ZB	WGB	%	
	Weißgradzuwachs	dWG	%	

Die Wichtung der Einflussgrößen ist in Abbildung 9 gezeigt. Variablen mit einem VIP-Wert größer 1 sind als Haupteinflussgrößen anzusehen.

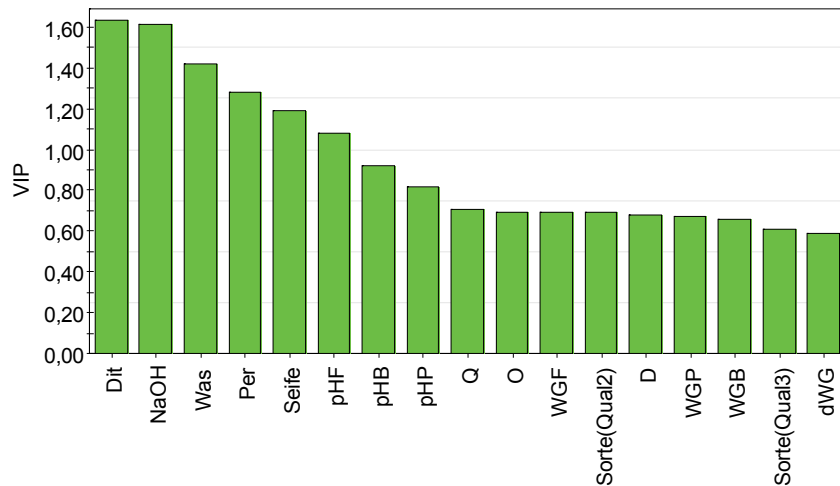


Abbildung 9 Rangfolge der Modellvariablen (VIP-Plot)

Abbildung 10 zeigt die (skalierten und zentrierten) Koeffizienten der untersuchten Einflussgrößen für das abgeleitete Modell. Die Größe der Balken steht für die Stärke des Einflusses der untersuchten Größen.

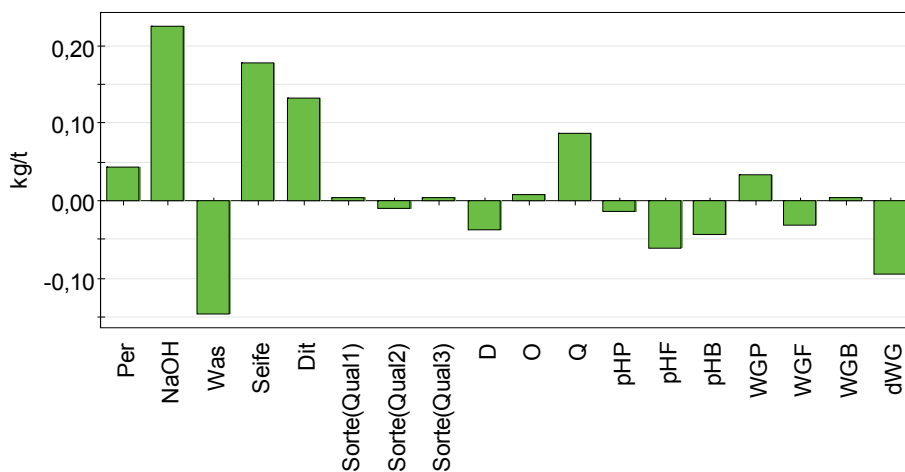


Abbildung 10 Koeffizientenplot des Screeningmodells (Ausreißer eliminiert)

Abbildung 11 stellt die gemessenen und die vom linearen Screeningmodell berechneten Werte nach Elimination der Ausreißer dar.

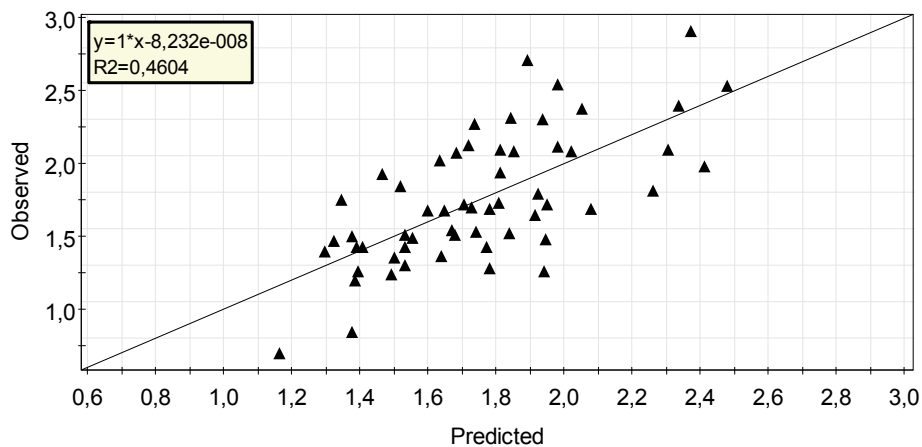


Abbildung 11 Gemessene und berechnete Werte (Screeningmodell (Ausreißer eliminiert))

Abbildung 12 zeigt das in einem iterativen Prozess, wie unter Punkt 3.3 beschrieben, auf der Basis der drei Hauptfaktoren erstellte Modell anhand seiner Koeffizienten.

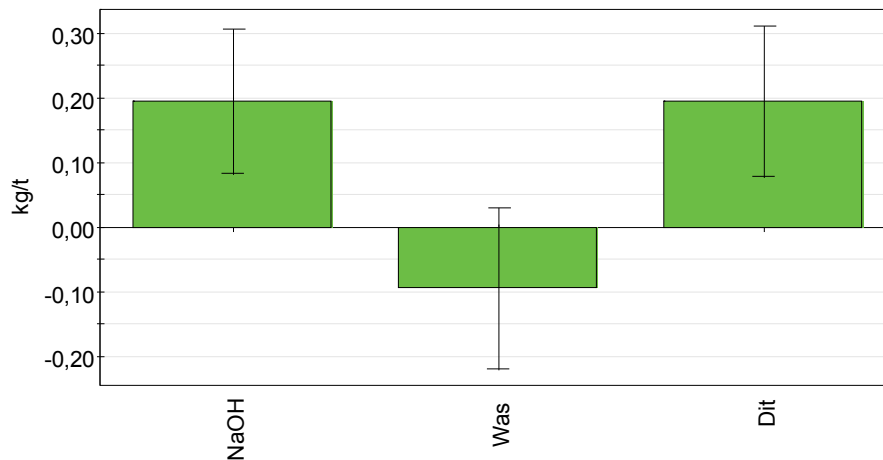


Abbildung 12 Koeffizienten Hauptfaktorenmodell

Die Gegenüberstellung der der gemessenen und berechneten Werte ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Modellqualität dieses Hauptfaktorenmodells ist im Vergleich zum Screeningmodell etwas schlechter, wie anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 der Korrelation ablesbar ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur drei der insgesamt 17 Einflussgrößen benötigt werden, um die Zusammenhänge mit ähnlicher Genauigkeit darzustellen.

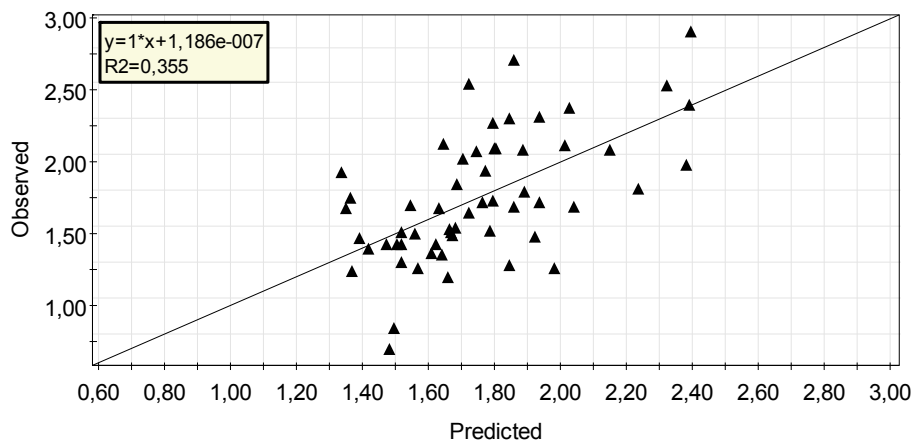


Abbildung 13 Gemessene und berechnete Werte (Hauptfaktorenmodell)

Der Einfluss der ermittelten Hauptfaktoren auf den spezifischen Rest-CSB wird beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt. Der Modellfehler wird durch die Angabe des Vertrauensbereichs veranschaulicht.

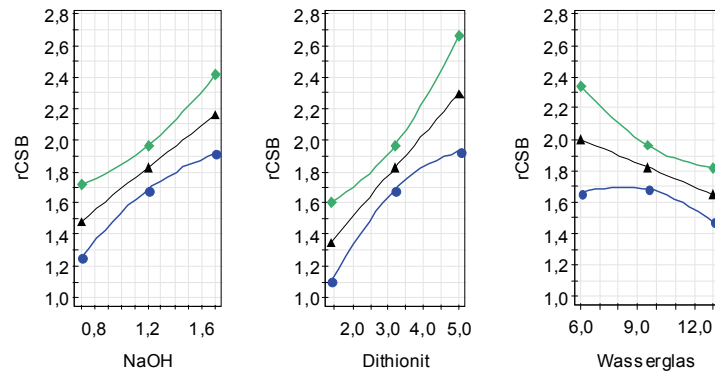


Abbildung 14 Vorhersageplot Hauptfaktoren

4.2.2 Modelloptimierung

Die weitergehende Auswertung der Daten und die darauf basierende Modellbildung erfolgte zunächst auf der Basis der im Screening identifizierten Haupteinflussgrößen. Zielstellung war dabei, die statistischen Qualitätskennziffern der Modelle (Modellgültigkeit, Reproduzierbarkeit) für den untersuchten Fall zu optimieren, um eine möglichst exakte Prognose des Rest-CSB zu gewährleisten. Dazu wurde im Wesentlichen nach dem im Punkt 3.3 beschriebenen Procedere verfahren. Zum Teil wurden Faktoren, die im Rahmen des unter Punkt 4.2.1 erfolgten Screenings ausgeschlossen wurden, wieder in die Modelle aufgenommen, wenn z.B. entsprechende Wechselwirkungen zu berücksichtigen waren.

Diese Optimierung führte zu einem Modell, das neben der NaOH- und Dithionit-Dosis den pH-Wert in der Flotation sowie einen quadratischen Term der Dithionit-Dosis enthält. Abbildung 15 zeigt den entsprechenden Koeffizientenplot.

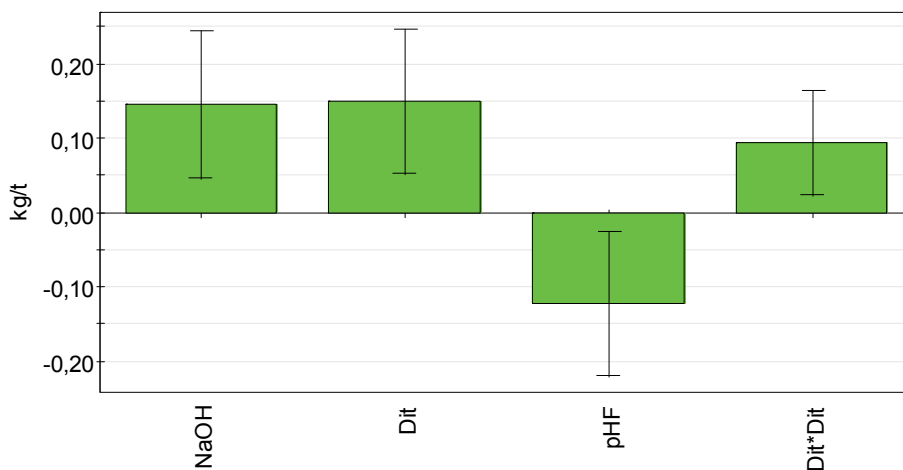


Abbildung 15 Koeffizienten optimiertes Modell

Das erstellte Modell ist statistisch signifikant, alle Koeffizienten sind signifikant ungleich Null. Die Gegenüberstellung von gemessenen und vom Modell berechneten Werten in Abbildung 16 bzw. das Vorhersageplot Abbildung 17 charakterisieren die Modellqualität. Tabelle 5 enthält die Koeffizienten der Modellgleichung.

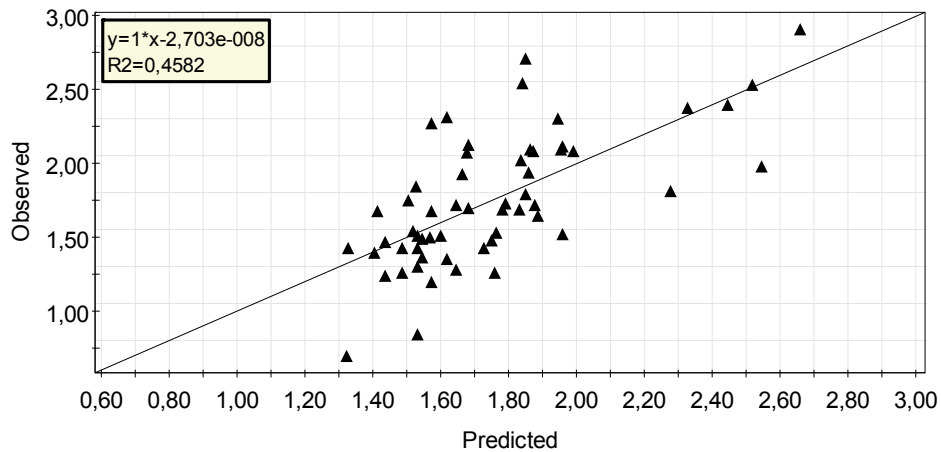


Abbildung 16 Gegenüberstellung beobachteter und mittels optimiertem Modell berechneter Werte

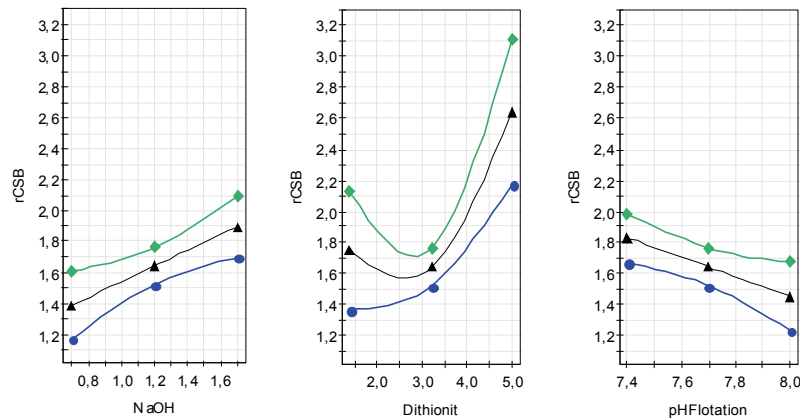


Abbildung 17 Vorhersageplot

Tabelle 5 Modellkoeffizienten optimiertes Modell

	Optimiertes Modell	
	skaliert & zentriert	unskaliert
Constant	1,66	6,81
NaOH	0,145	0,508
Dit	0,149	-0,846
pHF	-0,122	-0,625
Dit*Dit	0,0945	0,171

(Skalierte & zentrierte Koeffizienten erlauben einen direkten Vergleich der Intensität der Einflüsse, unskalierte Koeffizienten sind die Koeffizienten der Modellgleichung).

4.3 Werksübergreifende Auswertung (allgemeines Modell)

4.3.1 Modellerstellung

Um ein fallunabhängiges Modell zu erstellen, wurde das vorhandene Datenmaterial aufgearbeitet und eine Matrix für eine geschlossene Auswertung aller Daten zusammengestellt. Da die vorangegangenen Untersuchungen gezeigt hatten, dass der Chemikalieneinsatz die wesentlichste Einflussgröße auf den Rest-CSB darstellt und geeignete, für alle Werke ver-

gleichbare Prozessdaten nicht verfügbar waren, wurde diese Auswertung auf den Chemikalieneinsatz beschränkt.

Zur Erstellung dieses Modells für den Einfluss des Chemikalieneinsatzes wurden deshalb die Daten der Fälle A bis D und F nach der gleichen Auswerteprozedur wie die Einzelfälle ausgewertet. Ausreißer die größer als das zweifache der Standardabweichung waren, wurden eliminiert. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die Koeffizienten für NaOH, Peroxid und Dithionit sind signifikant, Seife und Wasserglas haben nur eine untergeordnete Bedeutung.

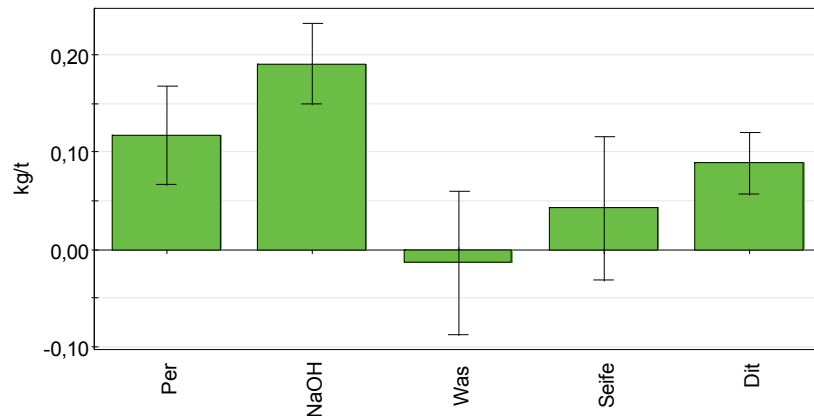


Abbildung 18 Koeffizientenplot des allgemeinen Modells

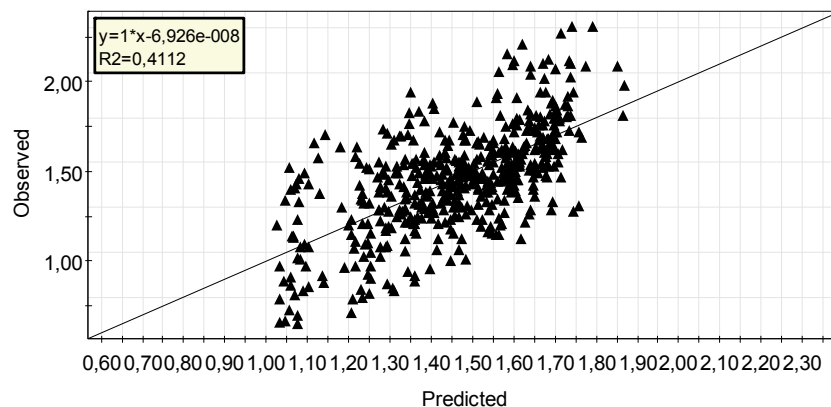


Abbildung 19 Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte

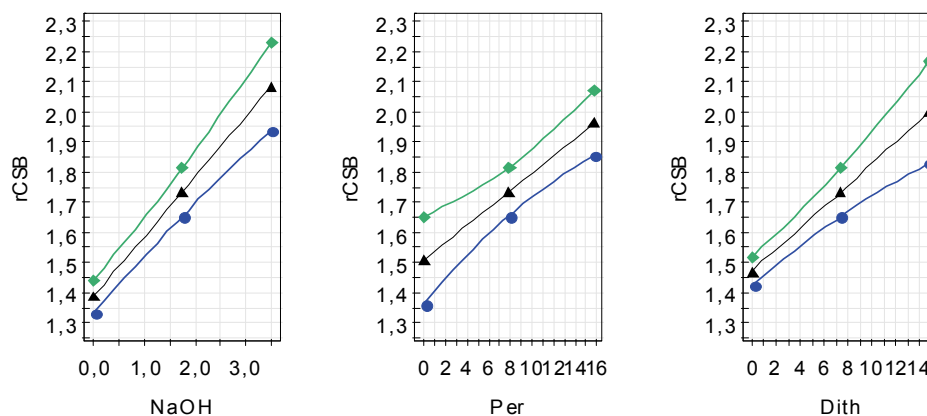


Abbildung 20 Vorhersageplot allgemeines Modell

4.3.2 Bewertung des allgemeinen Modells

Zur Bewertung der Güte von Modellen kommen mehrere Kriterien zur Anwendung. Diese bewerten:

- Die Anpassung des Modells an die zugrunde liegenden Daten,
- die Vorhersagegenauigkeit unbekannter Daten durch das Modell sowie
- die Modellgültigkeit und
- die Reproduzierbarkeit.

Der für die Datenauswertung gewählte Ansatz einer statistischen Auswertung geht von der Annahme aus, dass die wichtigsten Einflussfaktoren erfasst werden, aber eine Reihe unbekannter oder nicht quantifizierbarer Einflüsse unberücksichtigt bleiben (müssen). Diese tragen zum Gesamtfehler des Modells bei. Es ist daher nicht zu erwarten, dass das Modell die ersten beiden Kriterien in hohem Maße erfüllt. Wichtig ist jedoch das dritte Kriterium, das heißt, das Modell sollte statistisch abgesichert sein. Da dies gegeben ist, bildet es das grundsätzliche Verhalten der untersuchten Systeme ab, ist aber im Einzelnen relativ unscharf. Das Modell ist demzufolge geeignet, Änderungen der Abwasserrestbelastung, die durch Änderung des Chemikalieneinsatzes verursacht werden, als zu erwartende Durchschnittswerte zu prognostizieren.

Um eine derartige Anwendung zu demonstrieren, wurden die Mittelwerte der untersuchten Fälle (A-F) sowie vorhandene Praxisdaten (W1-W6) in Abbildung 21 zusammengestellt und mit den entsprechenden berechneten Modellwerten verglichen. Die Fälle E, W3 und W6, die eine vergleichbare Produktion aufweisen (Werke mit Holzstofferzeugung), zeigen, dass das Modell für eine Prognose hier nicht geeignet ist.

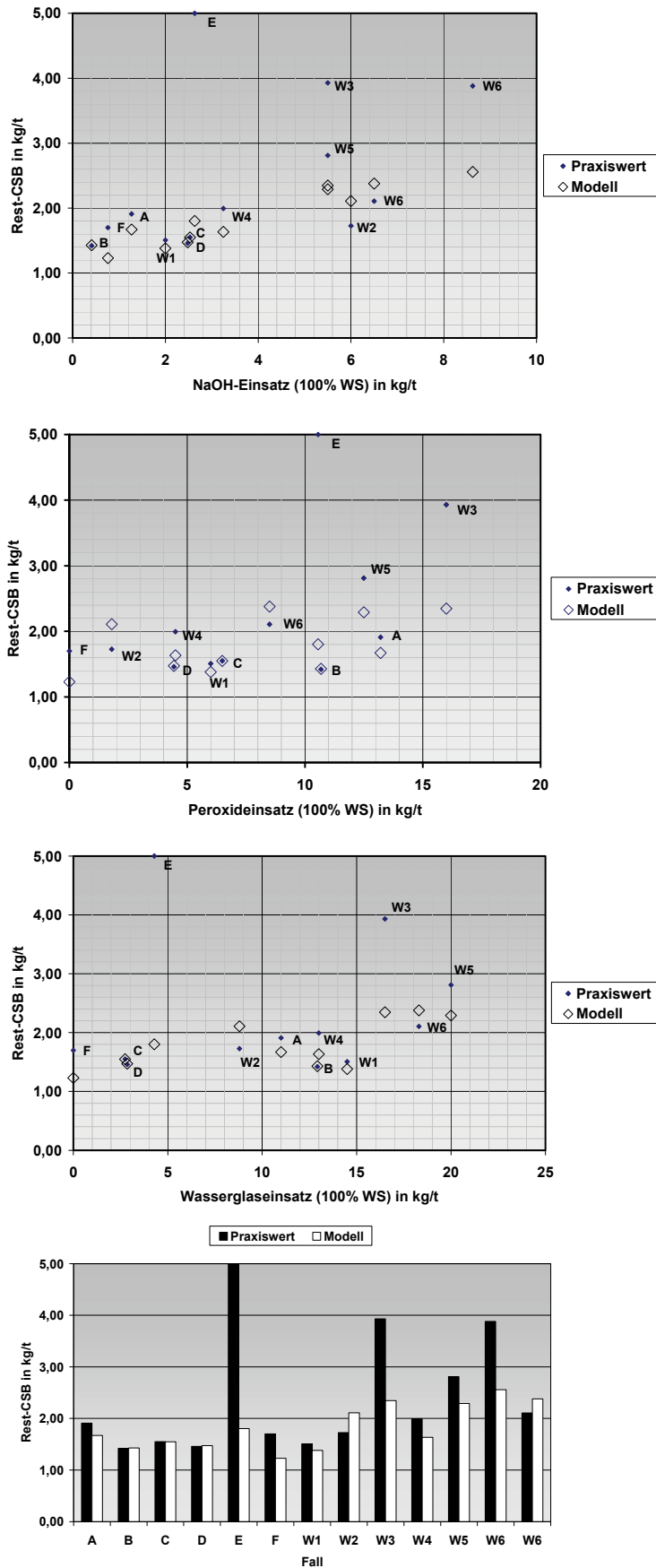


Abbildung 21 Übersicht zum Vergleich von Modellwerten mit entsprechenden Praxiswerten

4.4 Schlussfolgerungen

4.4.1 Vergleichende Bewertung der Einflussgrößen

Die Übersicht in Abbildung 22 zum Einfluss der Chemikaliendosis auf die Abwasserbelastung und -restbelastung im Deinkingprozess zeigt, dass in den untersuchten Fällen in Teilen Übereinstimmung, jedoch auch Unterschiede bestehen. Bezüglich des CSB-Anfalls (CSB_{zu}) lässt sich kaum eine Systematik erkennen. Auf den Rest-CSB wirkt die Alkalidosis und der Dithionit- und Seifeneinsatz Fracht erhöhend. Die für die Fälle B und E dargestellten negativen Effekte für die Alkalidosis sind nicht signifikant, da sie nur einen sehr engen und den unteren Bereich betreffen. Die Wirkung des Peroxideinsatzes ist eher unbedeutend und in den einzelnen Fällen nicht gleich gerichtet, während der Wasserglaseinsatz überwiegend Fracht senkend wirkt. Diese halbquantitativen Darstellungen beschreiben jedoch die Situation nur unvollkommen, da hiermit der mehrdimensionale Charakter der Modellergebnisse nicht wiedergespiegelt werden kann.

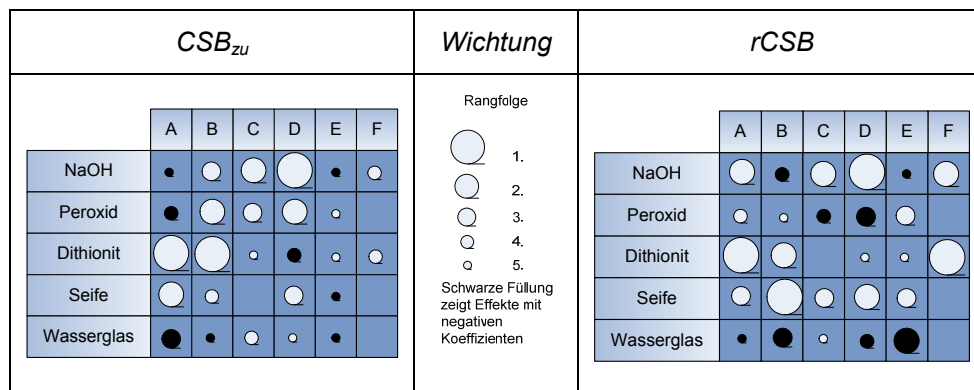


Abbildung 22 Bewertung der Haupteinflussgrößen auf die Abwasserbelastung (CSB und $rCSB$)

4.4.2 Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen

Ein wesentlicher Inhalt des Projekts bestand in der Identifizierung der den Rest-CSB des Abwassers von Deinkingfabriken beeinflussenden Parameter. Ausgehend von allgemeinen Überlegungen zu möglichen Einflussgrößen wurden Untersuchungspläne erstellt, die die Erfassung und das Screening einer Vielzahl von Daten (Rohstoffqualitäten und Chemikalieneinsätze, technologische und Produktqualitätsparameter) aus technischen Anlagen vorsahen.

Wesentliche Erkenntnis des Screening war, dass die Prozessparameter und Rohstoffeigenschaften nur von zweitrangiger Bedeutung sind und Korrelationen vor allem zwischen dem Chemikalieneinsatz und dem Rest-CSB bestehen.

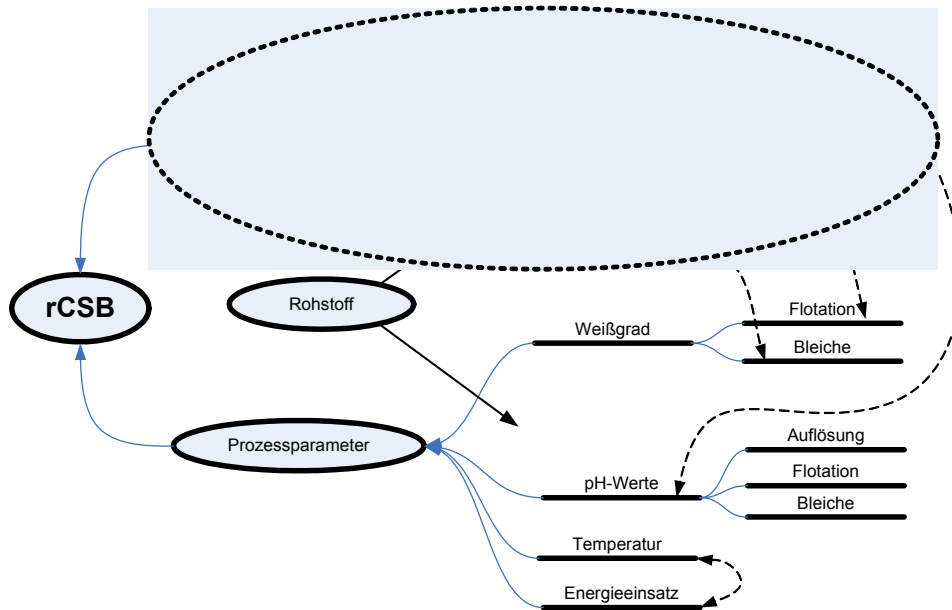


Abbildung 23 Schematische Darstellung wichtiger direkter und indirekter Zusammenhänge zwischen Rest-CSB und Chemikalieneinsatz u. Prozessparametern

Eine Erklärung hierfür liefern die in Abbildung 23 gezeigten Zusammenhänge. So werden zum Beispiel die Prozessbedingungen oft auf die Rohstoffeigenschaften zugeschnitten bzw. durch den Chemikalieneinsatz eingestellt (pH-Werte). Ebenso kann die Produktqualität (z.B. Weißgrad) durch den Bleichmitteleinsatz gesteuert werden. Die Chemikalieneinsätze sind demnach die direkten Wirkfaktoren, während die übrigen Prozessgrößen meist indirekt und häufig über den Chemikalieneinsatz wirken. Da des Weiteren angestrebt wird, die Produktionsprozesse stabil zu fahren, weisen die Prozessparameter oft nur geringe Varianzen auf, was den Nachweis von Zusammenhängen erschwert.

4.4.3 Allgemeines Modell für Papierfabriken mit Deinking

Für die einzelnen untersuchten Fallbeispiele konnten Modelle abgeleitet werden, die eine Abschätzung des Rest-CSB in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen, hauptsächlich der Chemikaliendosis ermöglichen. Die Genauigkeit der Vorhersage hängt stark von der Komplexität der untersuchten Anlagen und von der Variabilität der Prozesse ab. Die Ergebnisse sind daher hauptsächlich für die Ableitung von Trends geeignet. Das gilt insbesondere für das auf der Datenbasis der Fallbeispiele A–D und F abgeleitete „allgemeine“ Modell, auf das nachfolgend Bezug genommen wird.

Der Rest-CSB wird durch folgende Faktoren signifikant beeinflusst:

- NaOH-Dosis
steigender NaOH-Einsatz erhöht den Rest-CSB (max. 50%*)
- Peroxid-Dosis
steigender Peroxid-Einsatz erhöht den Rest-CSB (max. 30%*)
- Dithionit-Dosis
steigender Dithionit-Einsatz erhöht den Rest-CSB (max. 30%*)

* - Durchschnittlicher Effekt bei maximaler Dosis

Die Faktoren Wasserglas-Dosis und Seifen-Dosis werden im Gesamtmodell berücksichtigt, sind aber nicht signifikant, d.h. sie zeigen einen vergleichsweise nur geringen Einfluss.

$$rCSB = k_0 + \sum_{i=1}^5 k_i * D_i$$

k_i – Modellkoeffizienten

D_i – Chemikaliendosis

i	Dosis in kg/t
0	Modellkonstante
1	NaOH
2	Peroxid
3	Dithionit
4	Wasserglas
5	Seife

Dieses Modell berücksichtigt ausschließlich den Effekt der Chemikaliendosierung. Der Koeffizient k_0 entspricht theoretisch in erster Näherung der Rest-CSB-Belastung des Abwassers, die bei der Auflösung der Rohstoffe ohne Chemikalieneinsatz entsteht. Die über die Einzelmodelle ermittelten Konstanten k_0 liegen im Bereich zwischen 0,5 und 1,7 kg/t und entsprechen in dieser Größenordnung Rest-CSB-Frachten, die im Rahmen anderer Untersuchungen zur Altpapierauflösung gefunden wurden.

Wie der Vergleich der mit dem „Allgemeinen Modell“ berechneten Werte mit den entsprechenden Praxisdaten zeigte, gibt es in einzelnen Fällen Abweichungen. Um diese „Fehler“, die auf unberücksichtigte Einflüsse (z.B. Rohstoffqualität) bzw. die starke Vereinfachung im Rahmen der Modellbildung zurückzuführen sind, teilweise auszugleichen, bietet sich eine Bezugnahme auf den Ausgangswert (Chemikaliendosis, Rest-CSB-Fracht) an. Die Berechnung kann nach folgender Formel erfolgen, wobei $rCSB_{IST}$ den spezifischen Rest-CSB der zu prognostizierenden Anlage, $D_{i,IST}$ und $D_{i,P}$ die Chemikaliendosierung im Ausgangs- und Prognosefall darstellen:

$$rCSB = rCSB_{IST} * \frac{k_0 + \sum_{i=1}^5 k_i * D_{i,P}}{k_0 + \sum_{i=1}^5 k_i * D_{i,IST}}$$

Durch diese „Kalibration“ können in bestimmten Umfang die Einflüsse der eingesetzten Rohstoffe auf den Rest-CSB mit berücksichtigt werden.

Weitere Informationen: rainer.spoerl@ptspaper.de

Dr. Rainer Spörl

Tel. 03529 - 551 642

PTS Heidenau

Pirnaer Str. 37

01809 Heidenau/Sa.

Tel. 03529 - 551000

Fax 03529 - 551899

Dipl.-Chem. A. Wagenknecht

Tel. 03529 - 551 689

Dr. H.-J. Öller

Tel. 089 - 12146 465

PTS München

Heßstraße 134

80797 München

Tel. 089 - 12146 0

Fax. 089 - 12146 36

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens INNOWATT IW050272 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in kleinen und mittleren Unternehmen und externen Industrieforschungseinrichtungen in den neuen Bundesländern" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm GmbH gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Grundprozesse der Altpapieraufbereitung	4
Abbildung 2	Verfahrensprinzip Papiererzeugung mit Deinking	5
Abbildung 3	Mittlere Zu- und Ablaufkonzentrationen in Abwasserreinigungsanlagen von Papierfabriken mit und ohne Deinkinganlage	6
Abbildung 4	Übersicht zur Datenstruktur Bestandsaufnahme	8
Abbildung 5	Übersicht zur Datenaufbereitung	9
Abbildung 6	Übersicht zum Screening der Einflussgrößen	9
Abbildung 7	Vorgehen zur Modelloptimierung	10
Abbildung 8	Struktur der Zusammenhänge zwischen wichtigen Prozessgrößen und Rest-CSB	11
Abbildung 9	Rangfolge der Modellvariablen (VIP-Plot)	13
Abbildung 10	Koeffizientenplot des Screeningmodells (Ausreißer eliminiert)	13
Abbildung 11	Gemessene und berechnete Werte (Screeningmodell (Ausreißer eliminiert))	13
Abbildung 12	Koeffizienten Hauptfaktorenmodell	14
Abbildung 13	Gemessene und berechnete Werte (Hauptfaktorenmodell)	14
Abbildung 14	Vorhersageplot Hauptfaktoren	15
Abbildung 15	Koeffizienten optimiertes Modell	15
Abbildung 16	Gegenüberstellung beobachteter und mittels optimiertem Modell berechneter Werte	16
Abbildung 17	Vorhersageplot	16
Abbildung 18	Koeffizientenplot des allgemeinen Modells	17
Abbildung 19	Gegenüberstellung gemessener und berechneter Werte	17
Abbildung 20	Vorhersageplot allgemeines Modell	17
Abbildung 21	Übersicht zum Vergleich von Modellwerten mit entsprechenden Praxiswerten	19
Abbildung 22	Bewertung der Haupteinflussgrößen auf die Abwasserbelastung (CSB und rCSB)	20
Abbildung 23	Schematische Darstellung wichtiger direkter und indirekter Zusammenhänge zwischen Rest-CSB und Chemikalieneinsatz u. Prozessparametern	21

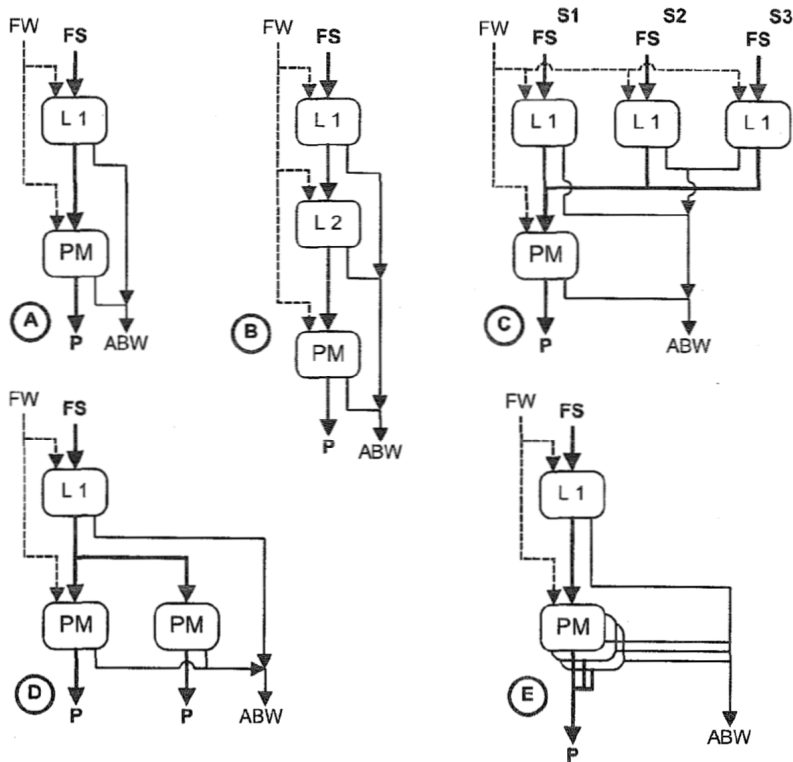
Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Energie und Chemikalieneinsatz beim Deinking	5
Tabelle 2	Spezifische Kennziffern verschiedener Papierfabriken mit Deinkinganlagen	7
Tabelle 3	Charakterisierung der untersuchten Werke	11
Tabelle 4	Einflussgrößen	12
Tabelle 5	Modellkoeffizienten optimiertes Modell	16

5 Literatur

- 1 N. N.
Papier 2006, Ein Leistungsbericht der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie
Verband deutscher Papierfabriken (VdP), Bonn 2006
- 2 KIBAT K.-D
Der Altpapiereinsatz der europäischen Papierindustrie-Entwicklungen und veränderte
politische Rahmenbedingungen
Wochenblatt für Papierfabrikation 130 (2002) Nr.11/12, S. 723 – 731
- 3 GÖTTSCHING L. u. H. PAKARINE
Recycled Fiber and Deinking
Tappi Press, Atlanta; Finnish Paper Engineers' Association (Fapet), Helsinki, 2000
- 4 DEMEL I. u. U. HAMM
Benchmarking bei Abwasserreinigungsanlagen
Vortrag Zellcheming Hauptversammlung, Wiesbaden, 28.06. - 01.07.2004
- 5 PUTZ H.-J. u. L. GÖTTSCHING
Weißgrad und Reinheit deinkter Faserstoffe sowie Abwasserbelastung beim Flota-
tionsverfahren. Teil I: Verfahrenstechnische Einflussgrößen
Das Papier 36 (1982) Nr.10, S. 487-494
- 6 PUTZ H.-J. u. L. GÖTTSCHING
Weißgrad und Reinheit deinkter Faserstoffe sowie Abwasserbelastung beim Flota-
tionsverfahren. Teil II: Einfluss der Altpapiersorten und Chemikalieneinträge
Das Papier 37 (1983) Nr.2, S. 49-57
- 7 PUTZ H.-J. u. L. GÖTTSCHING
Weißgrad und Reinheit deinkter Faserstoffe sowie Abwasserbelastung beim Flota-
tionsverfahren. Teil III: Einfluss von Flotationshilfsmitteln und Bestandsaufnahme von
industriellen Deinking-Anlagen
Das Papier 37 (1983) Nr. 3, S. 97-106
- 8 SÜSS H.U.;SCHMIDT K. u. B. HOPF
Optionen zur Bleiche von Holzstoffen mit verminderter CSB-Fracht
Internationale Papierwirtschaft -;2001;12;(52-58)
- 9 ROERING A. u. E. WACKERBERG
Characterization of deinking white water - influence on flotation and bleaching effi-
ciency
Pulp and Paper Canada 98 (1997) Nr.5, S.17 - 21
- 10 KAPPEL J. u. P. BRAUER
Proper hydrogen peroxide application proves effective for DIP bleaching
Pulp and Paper (USA) 70 (1996) Nr.3, S. 105 - 117
- 11 SÜSS H.U., NIMMERFROH N. u. B. HOPF
Die Bleiche von deinkten Fasern
Wochenblatt für Papierfabrikation 122 (1994) Nr.20, S. 802-808
- 12 PEKAROVIC J.
Deinking of Aged Soy Ink Printed Offset-Environmental and Technological Aspects
Progress in Paper Recycling - (1999) May, S.13-21
- 13 SOLYOM P.; HYNNING P.Ae.; REMBERGER M. u.a.
Biological and chemical characterisation of an effluent from production of deinked
pulp and tissue
Paperi ja Puu 77 (1995) Nr.4, S. 209 - 214
- 14 KAPPEN J.
Kennwerte als Werkzeuge zur Minimierung des Wasserbedarfs bei der Papiererzeu-
gung – ein Beitrag zum Prozessintegrierten Umweltschutz
Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft
Technische Universität München, 2001

Beschreibung der Morphotypen von Wasser- und Stoffkreisläufen nach Kappen /14/



Grundtypen der Morphologie (Morphotypen) der Stoff- und Wasserkreisläufe in Papierfabriken; Beschreibung in Tab. 6; L = Loop, S = Strang, PM = Papiermaschine, FW = Frischwasser, FS = Faserstoff, ABW = Abwasser, P = Papier