

Vermeidung von Biofilmbildung in Stoff- und Wassersystemen durch optimierte Prozessführung in Altpapier verarbeitenden Produktionsanlagen

Dr.-Ing. Dieter Pauly, Dr. Wolfram Dietz

Zusammenfassung

Das größte mikrobielle Problem in der Papierherstellung stellt die Biofilmbildung dar. Stand der Technik bei der Biofilmkontrolle ist der gezielte Einsatz von Bioziden und anderen Additiven. Biozid-Produkte müssen aufgrund der EU-Biozidrichtlinie 98/8/EG hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit und Wirksamkeit überprüft und neu zugelassen werden. Als Folge wird ein Großteil der derzeit eingesetzten Biozid-Produkte nicht mehr erhältlich sein. Daher besteht zwingend die Notwendigkeit, das Wissen auf dem Gebiet der Biofilmbildung zu erweitern und Einflussfaktoren zu identifizieren, um neue Lösungswege zur Biofilmkontrolle zu eröffnen.

Im Forschungsprojekt wurden drei Altpapier verarbeitende Kartonfabriken über längere Zeiträume untersucht. Zur Messung der Biofilmbildung wurden spezielle Messeinrichtungen konzipiert. Die Zusammensetzung von Biofilmen wurde mit konventionellen Methoden und mit Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) untersucht.

Die gewonnenen Daten wurden einer Korrelations- und Regressionsanalyse unterworfen. Diese ermöglichte es, Einflüsse auf das Biofilmwachstum zu identifizieren. Ein Temperaturanstieg von ca. 31 °C auf 36 °C führte zu einer Steigerung der Biofilmbildung auf das 2-3fache. Zudem erhöhte sich der CSB-Wert im Prozesswasser um 25 %, das Redoxpotenzial fiel ab.

Biofilme im Aerosol-Bereich der Papiermaschine wuchsen zum Teil stärker als im Stoff-Wasser-System. Auf ihre Bildung wirken sich insbesondere Luftfeuchte und Nebelstärke der Umgebung aus.

Für die Kontrollanalytik des Biofilmwachstums erwies sich die Gesamtkeimzahl als Messverfahren ungeeignet. Mit manuellen Schleimmess-Einrichtungen ist es mit geringem Aufwand möglich, die Biofilmbildung zu erfassen. Die entwickelte einfache Messvorrichtung für den Aerosolbereich kann die Biofilmbildung an Aufbauten oberhalb von Sieben und Filzen quantifizieren. Die Messdauer für alle manuellen Systeme beträgt jedoch ca. eine Woche. Online-Schleimsensoren können Ergebnisse schon nach zwei bis drei Tagen liefern. Alle Biofilm-Aufwuchsmessungen sind empfindlich gegenüber Störungen wie z. B. Produktionsunterbrechungen.

Anhand der Ergebnisse werden Vorschläge zur Reduzierung der Biofilmprobleme durch optimierte Prozessführung unterbreitet.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF 13669 wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

Summary

Slime formation is the most serious microbial problem in papermaking. State-of-the-art slime control concepts are based on the use of biocides and other additives. The EU Biocide Directive (98/8/EG), however, demands an approval procedure for all biocide products. Even existing agents and products must pass an evaluation process covering their environmental compatibility and performance in order to be admitted for trading. As a result, a major part of the biocide products currently used will disappear from the market. There is an urgent need for further research into slime formation and its influences, and for novel solutions in the area of slime control.

Three industrial plants producing paperboard from recycled fibres were examined for extended periods. Dedicated measuring devices for the measurement of biofilm formation were designed. The composition of biofilms was determined by conventional methods and fluorescence in situ hybridization (FISH).

All data collected was evaluated by means of multivariate correlation and regression analysis. In this way, the influences on biofilm growth could be identified. A temperature increase of about 31 °C to 36 °C was found to enhance biofilm growth by a factor of 2 to 3. Concomitantly, the COD in the process water increased by 25 %, and the redox potential dropped.

Biofilm formation in the aerosol region of the paper machine can exceed the formation in the stock and water system. In particular, humidity and fog intensity have strong influences on this.

To monitor biofilm formation, the total bacterial count is not appropriate. Hand-operated slime measuring devices make it possible to measure biofilm growth with little effort. The device developed for aerosol regions is suitable to easily assess biofilms on machine elements above wires and felts. But the measuring time of these devices is about one week. Online slime sensors can give results already after two to three days. All biofilm growth devices are sensitive towards disruptions such as production breaks.

Suggestions are made to reduce biofilm problems by means of optimized process design.

Acknowledgement

The AiF 13669 research project was sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Labour and carried under the umbrella of the German Federation of Industrial Co-operative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our warmly gratitude for this support.

1 Wissenschaftliche und technische Problemstellung

Der Wasserkreislauf von Papierfabriken ist ein künstlicher Lebensraum für Mikroorganismen, in dem diese ausgezeichnete Überlebens- und Wachstumsbedingungen vorfinden. Ihr exponentielles Wachstum überschreitet in vielen Fällen ein tolerierbares Ausmaß. Das größte mikrobielle Problem in der Papierherstellung ist die Biofilmbildung (Schleimbildung) in der Nasspartie [1]. Sie führt zu kostenintensiven Störungen des Produktionsprozesses und beeinträchtigt die Produktqualität.

1.1 Mikrobiologische Probleme der Papierherstellung

Nach einer europaweiten Umfrage bewertet ein beträchtlicher Anteil der Papierhersteller mikrobielle Probleme als kritisch [2]. An den ersten Stellen genannte negative Effekte sind Papierbahnabrisse (kurz: Abrisse), Flecken und Löcher im Produkt, Runnability-Probleme (Produktionsstörungen) und Geruchsbildung (Abbildung 1).

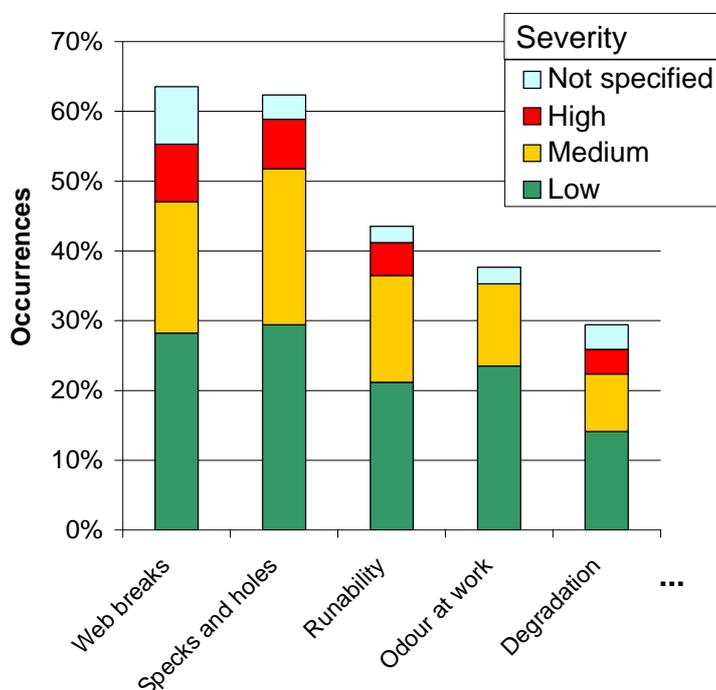


Abbildung 1 Umfrage zur Relevanz mikrobieller Problemen bei der Papierherstellung, Ausschnitt aus den Ergebnissen [2]

Wie bewirken Biofilme diese Probleme? Die Biofilme, die sich an wasserberührten oder wasserbenetzten Oberflächen bilden, neigen zur partiellen Ablösung. Abgelöste Flocken oder Batzen können in die frisch gebildete Papierbahn gelangen und durch eine lokal herabgesetzte initiale Nassfestigkeit zu Abrissen in der Papier- und Kartonmaschine führen, oder Flecken und Löcher im Produkt verursachen.

Ein weiterer Effekt durch Biofilme ist die Entstehung sauerstofffreier (anaerober) Bedingungen an der Basis des Belages. Hier bilden sich sulfatreduzierende und methanogene Bakterien, welche sich durch die Bildung von Schwefelwasserstoff und niedermolekularen organischen Säuren als Geruchsträger bemerkbar machen.

1.4 Biofilmbekämpfung

Biozide und andere Additive

Die gebräuchlichste Maßnahme zur Biofilmbekämpfung ist der Einsatz von Bioziden. Sie ermöglichen es, Mikroorganismen bzw. Keime in ihrem Wachstum zu hemmen bzw. zu zerstören [7]. Weitere Möglichkeiten der Biofilmbekämpfung sind der Einsatz von Biodispersatoren und Enzymen. Biodispersatoren führen durch ihre Dispersionswirkung zu aufgelockerten, instabileren und damit leichter abtragbaren Biofilmen. Enzyme sollen zur Spaltung der extrazellulären polymeren Substanzen im Biofilm führen [8, 9].

Als Folge der Richtlinie über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten (Richtlinie 98/8/EG) unterliegen die Biozid-Produkte in Deutschland seit dem 14. Mai 2000 einer Zulassungspflicht [10]. Alte Wirkstoffe und alte Biozid-Produkte dürfen maximal noch bis Mai 2010 in Verkehr gebracht werden. Als Folge wird ein Großteil der derzeit eingesetzten Biozid-Formulierungen nicht mehr erhältlich sein. Damit wird z. B. ein Biozid-Wechsel wesentlich erschwert, der bei nicht-oxidativen Bioziden nach Adaption der Mikroorganismen regelmäßig notwendig wird.

Verfahrenstechnik

Als verfahrenstechnische Maßnahmen gegen Biofilmbildung werden genannt [3, 11]:

- Kreislaufftrennung und Gegenstromführung zur Reduzierung der organischen Belastung im Papiermaschinen-Wasserkreislauf
- Verkürzung der Verweilzeiten der Suspensionen in Bütten und Lagertanks, Vermeidung toter Ecken
- Regelmäßige Reinigungsstillstände
- Anhebung der Temperaturen der Kreislaufwässer auf über 50 °C, um das Wachstum der Bakterien zu verringern

Durch das zukünftig geringere Angebot an Bioziden ist es dringend notwendig, nach neuen Möglichkeiten zu suchen, um durch die Prozessführung Einfluss auf die Biofilmbildung zu nehmen.

Biofilm-Messung

Voraussetzung für einen effizienten Einsatz von Maßnahmen gegen die Schleimbildung sollte sein, das Biofilmwachstum oder seine Auswirkungen zu erfassen. Dies ist schwierig. Folgende Annäherungen werden in der Praxis eingesetzt:

- Visuelle Bewertung der Sauberkeit der Papiermaschine
- Messung der Gesamtkeimzahl
- andere mikrobiologische Kultiviermethoden (z. B. für Anaerobier)
- Gehalt an Adenosintriphosphat (ATP) als biologischer Indikator
- Bestimmung der Schleimbildung auf einer angebotenen Oberfläche (klassisches Schleimbrett)
- Online-Schleimmessungen über spezielle Geräte [12, 13, 14, 15, 16]

Um Abrissen und weiteren teuren Folgen vorzubeugen, sichern sich Papierfabriken ab, indem Biozide über den Punkt hinaus dosiert werden, der als kritische Schwelle betrachtet wird. Die Einschätzung dieser kritischen Schwelle ist dabei zwangsläufig subjektiv, da ein "Ertasten" im Betriebsversuch wirtschaftlich nicht diskutabel ist.

2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Ursachen für die unerwünschte Biofilmbildung zu identifizieren und deren Problempotenzial wie Abrisse und Qualitätsmängel im Karton zu untersuchen. Weiteres Ziel des Forschungsvorhabens ist es, auf Basis der Ursachenanalyse effektive und wirtschaftliche Maßnahmen zur Reduktion der Biofilmprobleme durch optimierte Prozessführung zu erarbeiten.

3 Methodik

Zur Analyse von verfahrenstechnischen Einflüssen auf die Biofilmbildung wurden jeweils über Wochen bis Monate Daten aus drei Fabriken erfasst, die mehrlagigen Karton aus dem Sekundär-Faserrohstoff Altpapier herstellen. Auf dieser Datenbasis wurden Datenauswertungen durchgeführt, um relevante von nicht relevanten Einflussgrößen zu trennen und die Größe der Einflüsse zu bestimmen. Begleitend wurden Biofilme mikrobiell charakterisiert und der hemmende Einfluss von Bioziden untersucht.

3.1 Prozessanalysen in Papierfabriken

Die zu erhebenden Daten wurden nach Abbildung 3 gegliedert.

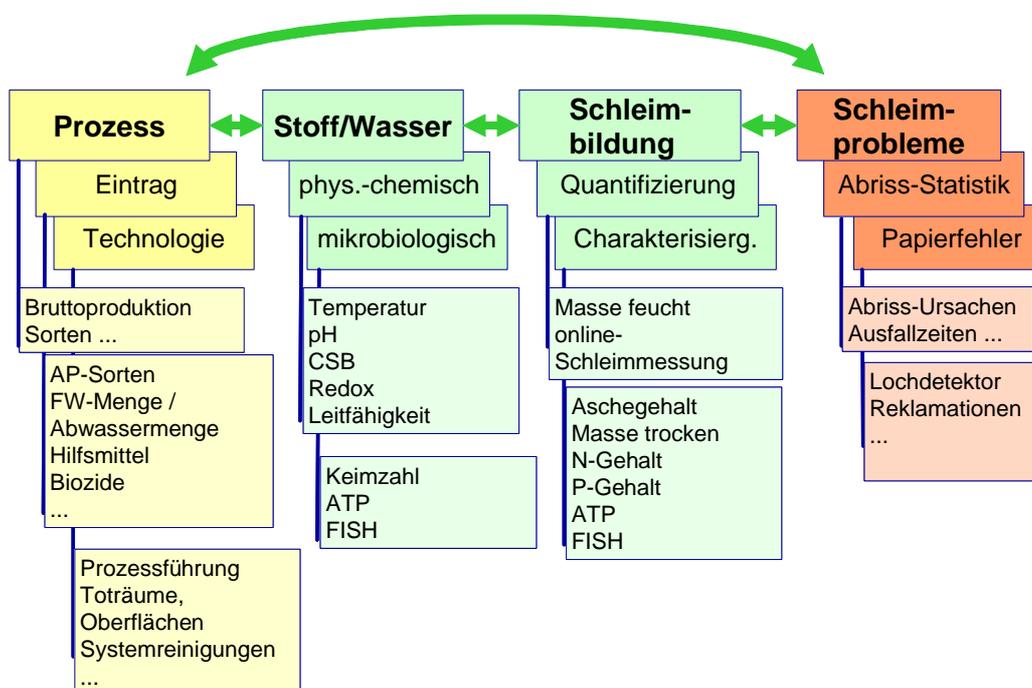


Abbildung 3 Parameter der Datenerfassung

3.1.1 Untersuchte Werke und Untersuchungsschwerpunkte

Für die Untersuchungen wurden drei Werke ausgewählt, die mehrlagigen Karton aus Altpapier herstellen. Um Korrelationen aufzeigen zu können, wurde angestrebt, einmalige oder periodische Änderungen in den Prozess-Einstellungen zu erfassen, die dann mit deutlichen Änderungen in der Biofilmbildung einhergehen.

Für die drei Prozessanalysen wurden unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt:

- Die Untersuchungen in Werk A zielten darauf, die Messmethodik zu testen und zu optimieren, insbesondere verschiedene Biofilm-Messsysteme. Dabei wurden Änderungen im Biozid-Einsatz mitverfolgt.
- Von Werk B wurden Daten über einen längeren Zeitraum aus den gespeicherten Werten des Prozessleitsystems übernommen. Diese wurden ergänzt durch die Aufzeichnungen eines Online-Schleimsensors. Ziel war hier, eine höhere Anzahl von Datensätzen zu gewinnen, indem auf die kontinuierliche werksinterne Datenerfassung zurückgegriffen wird. Es wurden Daten über 6 Monate ausgewertet. Datentechnisch bedingt war ein Teil der Parameter nur über einen 3-Monats-Zeitraum verfügbar. Es gab keine planmäßig geänderten Prozesseinstellungen.
- In Werk C wurde eine planmäßige Anhebung der Wasserkreislauf-Temperatur mitverfolgt. Stoff/Wasser-Parameter und Biofilmbildung wurden über 23 Wochen einmal pro Woche von der Forschungsstelle vermessen.

3.1.2 Produktionsdaten

Produktionsdaten und Prozesseinstellungen wurden von den Werken in Form von Ausdrucken und Dateien oder mündlich zur Verfügung gestellt. Um eine korrekte Interpretation der numerischen Parameter sicher zu stellen, wurden die Anlagentechnik und Betriebsweisen aufgenommen..

3.1.3 Chemisch-physikalische und mikrobiologische Wasseranalytik

In Tabelle 1 sind die chemisch-physikalischen und mikrobiologischen Parameter aufgeführt, die in den Werken gemessen wurden.

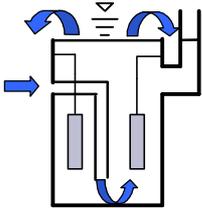
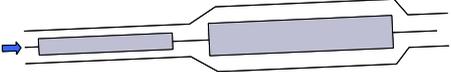
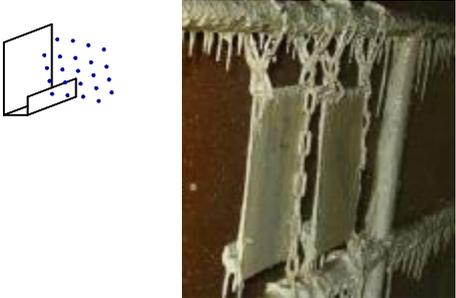
Tabelle 1 Stoff/Wasser-Analytik

	Parameter	Abk.	Einheit	Methode
physikalisch	Redoxpotenzial	–	mV	DIN 38404 Teil 6
	Leitfähigkeit	LF	mS/cm	DEV C8, DIN EN 27888
	Temperatur	T	°C	Sensor oder Sensor/Datenlogger
chemisch	pH-Wert	pH	–	DEV C5, DIN 38404 Teil 5
	Sauerstoffkonzentration	O ₂	mg/l	Sauerstoff-Sonde
	Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	mg/l	ST-CSB, DIN ISO 15705
	Gesamter organischer Kohlenstoff	TOC	mg/l	DEV H3, DIN EN 1484
	Gesamtstickstoff	N _{ges}	mg/l	Küvettestest
mikrob.	Adenosintriphosphat	ATP	relative Einheiten (RLU)	Fluoreszenz-Messung Gerät: Lumac/3M Biocounter M 2010 A
	Gesamtkeimzahl	KbE	KBE/ml	DIN EN ISO 6222

3.1.4 Biofilm-Messsysteme

Um Biofilmwachstum und Biofilm-Eigenschaften zu bestimmen, wurden verschiedene Biofilm-Messsysteme konzipiert (Tabelle 2). Sie wurden mit kurzen englischen Namen benannt.

Tabelle 2 Biofilm-Messsysteme

Name und Skizze/Bild	Beschreibung	Einsatz
Blue Pot 	Behälter mit eingehängten Edelstahlcoupons; Wasser-Verweilzeit ca. 3 min	Betrieb im Nebenstrom mit fest eingestelltem Volumenstrom; Coupons mit glatter und aufgerauter Oberfläche
Fins 	Stapel von Edelstahlplatten; verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (turbulent und laminar)	untergetaucht in Prozesswasserbütte
Tube 	Bypass	Betrieb im Nebenstrom mit fest eingestelltem Volumenstrom; Coupons mit glatter und aufgerauter Oberfläche
Plate 	Stahlplatte mit Auffangrinne	Aufhängung neben der Siebpartie im Aerosolbereich

Bei den Plates sind Messwerte zwischen verschiedenen Messorten nur bedingt vergleichbar, da die Aerosol- und Spritzwasserintensität von der Anbringung abhängt. Spritzwasser ist Wasser, das neben den Plates aufgefangen wurde. Auch diese Wasserqualität wurde wie die Prozesswasser analysiert.

Messvorgehen

Pro Messort wurden zwei gereinigte Messsysteme parallel installiert. Das erste wurde planmäßig nach 7, das zweite nach 14 Tagen vermessen. Der Biofilmbewuchs wurde abgeschabt und ausgewogen. Bei der Festlegung der Messphasen wurde darauf geachtet, nicht in Konflikt mit Wartungs- und Reinigungs-Stillständen zu kommen. Dies ließ sich jedoch nicht in jedem Fall vermeiden, auch angesichts ungeplanter Stillstände.

Als einheitlicher Messwert für die Biofilmbildung wurde die Auswaage nach 7 Tagen festgelegt. War eine Auswaage am 7. Tag organisatorisch nicht möglich, wurden Werte anderer Messtage auf den 7. Tag vor- oder rückgerechnet. Hierzu wurde das Biofilmwachstum durch eine logarithmisch-exponentielle Kurve approximiert.

Online-Biofilmmessung

Bei Werk B wurde das Biofilmwachstum über Online-Sensoren erfasst. Es handelte sich um das Gerät BioDeposit Control (BDC) der Firma Kolb Distribution Ltd., Schweiz [12]. Das Messsignal beschreibt Schichtdicken.

3.1.5 Biofilm-Charakterisierung

Biofilmprouben wurden bei 5-10°C gelagert und innerhalb weniger Tage analysiert. In Tabelle 3 sind die Untersuchungs-Parameter aufgeführt. Die Proben wurden zudem mit der Phasenkontrast-Mikroskopie untersucht.

Tabelle 3 Methoden der Biofilm-Charakterisierung

Trockenmasse	TS	g/l	DEV S2, DIN 38414 Teil 2
Glühverlust der Trockenmasse	GV Organik	%	DEV S3, DIN 38414 Teil 3
Calciumcarbonat	CaCO ₃	mg/g	Glühverlustmethode: Glühverlust durch CO ₂ -Abspaltung 550-1100°C
Gesamtstickstoff	N _{ges}	mg/l	Küvettest
Anteil Mikroorganismen	MO		aus N _{ges} , Multiplikation mit Faktor 11

3.1.6 Quantifizierung von schleimbedingten Problemen

Angaben zur Quantifizierung von Biofilmproblemen wurden von den Werken übernommen.

Werk A führt eine Abrissstatistik mit Zeiten, (vermuteten) Abrissursachen, Abrissort und Abrissdauer. Soweit diese aufzufinden sind, werden auch die Papierbahnstücke, die die verantwortliche Unregelmäßigkeit enthalten, inspiziert und gesammelt.

Werk B führt eine tagesbezogene Statistik über Produktionsstörungen mit Abrissen, (vermuteten) Abrissursachen, Abrissorten und ausgefallener Produktionsmenge.

Werk C zeichnet die Anzahl von Abrissen auf.

Papierbahnstücke von Abrissen aus Werk A und C wurden mit 1 %iger wässriger Ninhydrin-Lösung besprüht. Eine violette bis braune Färbung lässt auf Mikroorganismen-Zellen schließen.

Zu Häufigkeit und Art von Beeinträchtigungen der Papierqualität und zu Reklamationen, die auf Schleimprobleme zurückzuführen wären, konnte keines der Werke statistische Angaben machen.

3.2 Datenanalyse und Modellbildung

3.2.1 Datenvorbereitung

Datensichtung und Plausibilitätsprüfung

Erster Schritt der Datenauswertung ist eine umfassende Datensichtung, u. a. mit Mehr-Parameter-Trends und Min-Max-Betrachtungen. Nicht plausible Werte können damit überprüft

und gegebenenfalls eliminiert werden. Eine intensive Kenntnis des Datenbestands ist Voraussetzung für zielführende Entscheidungen im späteren Auswerteprozess.

Zeitraster

Das Biofilmwachstum ist bei den Untersuchungen der Parameter, der die geringste Abtastrate aufweist. Da er der wichtigste Output ist, bestimmt dieser Parameter den Zeitraum, den ein Datensatz umfasst. Für die Werke A und C, in denen mit PTS-Messaufbauten (Fins, Plate und Tube) untersucht wurde, umfasst ein Datensatz in der Regel 7 Tage.

Die Online-Schleimsensoren im Werk B werden nicht manuell gereinigt: Sie erreichen einen Grundzustand mit minimalem Belag bei Produktionsstillständen. Zur Auswertung wurden als erstes anhand der Sensorsignale Zeiträume bestimmt, in denen die Biofilme, ausgehend von minimalem Belag, ungestört wachsen konnten. Diese Zeiträume waren zwischen 1 und 8 Tagen lang. Als Kompromiss zwischen ausreichender Wachstumsdauer und ausreichender Anzahl von Messzeiträumen wurden dann 29 Messzeiträume in die weitere Datenauswertung einbezogen, die eine Mindestlänge von 2,1 Tagen aufwiesen.

Auswertung der Zeitreihen des Online-Schleimsensors

Um einen Wachstums-Kennwert pro Zeitraum zu ermitteln, wurden zwei Auswerteverfahren konkurrierend verwendet:

Auswerteverfahren "BDC": Berechnet wurde die mittlere Biofilm-Dicke zwischen 1,0 und 2,1 Tagen nach Zeitraumbeginn, abzüglich eines Nullwerts (Abbildung 4).

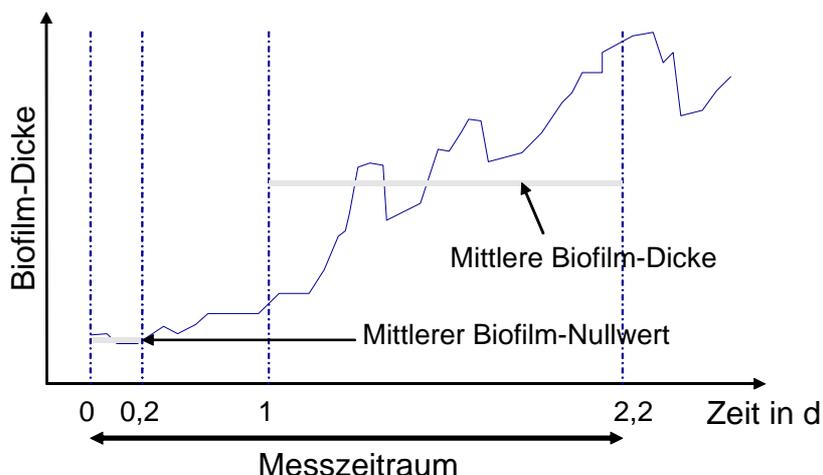


Abbildung 4 Online-Schleimsensor: Auswerteverfahren 1 (BDC)

Auswerteverfahren "BDC_Anst": Um das Messrauschen auszugleichen, wurden 2-Stunden-Mittelwerte des Signals berechnet. Daraus wurden die positiven Anstiege von einem 2-Stundenwert zum nächsten ermittelt. Negative Anstiege (Abfälle) wurden zu 0 gesetzt. Der Kennwert "BDC_Anst" wurde dann als Mittelwert dieser Anstiege im Zeitraum 0,1 bis 2,1 Tage nach Zeitraumbeginn berechnet. Dieser Kennwert gibt damit das Biofilmwachstum wieder, ohne Berücksichtigung von Biofilmaustragungen ("sloughing off").

Anpassung der Daten an das Zeitraster

Für die Prozesseinstellungen und für einige Zustandsgrößen des Stoff-Wasser-Systems standen Tageswerte zur Verfügung, die zu einem Wert pro Messzeitraum aggregiert wurden.

Um eine begrenzte Zahl von CSB- (und TOC-)Messungen auszugleichen, wurde für Werk C noch ein weiteres Verfahren der Mittelwertbildung verwendet: Für die produzierten Sorten wurden typische CSB-Werte im Wasserkreislauf ermittelt. Für den mittleren CSB-Wert wurden dann die Einzelwerte über die Sortenhäufigkeit gewichtet (Parameter W-CSBs und W-TOCs).

3.2.2 Statistischer Vergleich von Prozesszuständen (t-Test)

Für kategorielle statistische Aussagen, ob z. B. die Biofilmbildung an zwei unterschiedlichen Messorten signifikant verschieden ist, wird der ungepaarte Student'sche t-Test angewandt.

3.2.3 Korrelationsanalyse

Den ersten Schritt der Datenanalyse vor der datenbasierten Modellierung bildet die statistische Korrelationsanalyse, um auf diesem Wege alle signifikanten Korrelationen in den Daten herauszufinden und ggf. den Datenraum zu reduzieren. Ziel der Paarkorrelation ist die Schätzung des Grades der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Parametern. Dies erfolgt anhand des Korrelationskoeffizienten nach Pearson mit Werten im Intervall $[-1, 1]$. Im Falle $r \approx 1$ liegt eine lineare Relation zwischen den beiden ausgewählten Variablen vor. Die für $r \approx -1$ vorliegende starke negative Korrelation entsteht eine lineare Beziehung mit einem negativen Anstieg der Geraden. Im Falle $r \approx 0$ liegen keine Paarkorrelationen vor.

Die Darstellung der paarweisen Korrelationskoeffizienten mit Werten im Intervall $[-1, 1]$ kann in übersichtlicher Weise durch ein Farbschema grafisch dargestellt werden, der Korrelationsmatrix.

Da insbesondere Anzahl der Messpunkte einen erheblichen Einfluss auf die Aussagefähigkeit der Korrelationskoeffizienten hat, wird für die Korrelationen zusätzlich die Irrtumswahrscheinlichkeit p über einen F-Test berechnet. Anhand dieser kann entschieden werden, ob die zwischen den Variablen beobachtete Beziehung zufällig ist oder nicht.

Die Auswertung der Daten über Korrelationsmatrizes wurde vorrangig mit eigens entwickelten Excel-Arbeitsmappen durchgeführt. Zur datenbasierten Modellbildung wurde folgend das Programmsystem MATLAB eingesetzt. Neben dem MATLAB-Kern wurden Toolboxen eingesetzt [17, 18].

3.2.4 Datenbasierte Modellbildung

Das Ziel der Modellbildung ist es, den Zusammenhang zwischen einer Zielgröße (Output) und einer oder mehrerer Einflussgrößen (Input) mathematisch zu fassen.

Regressionsmodelle

Die mathematische Form von multivariablen linearen Regressionsmodellen nach der Methode der kleinsten Quadrate ist gegeben durch

$$y = b_0 + \sum_{k=1}^K b_k x_k + f \quad , \quad \text{Gleichung 1}$$

y Output (zu modellierende Größe), x_k ($k = 1, \dots, K$) Inputs (als Einflussgrößen), b_0, b_1, \dots, b_K Regressionskoeffizienten, f als Kalibrierungsfehler.

Stepwise-Verfahren

Im Stepwise-Verfahren werden aus einem angebotenen Parametersatz Inputs so gewählt, dass ein optimales Regressionsmodell entsteht. Ausgehend z. B. von keiner Inputvariable werden schrittweise Inputvariable zusätzlich in das Modell aufgenommen, wenn sie einen signifikanten Beitrag zur Modellgüte leisten, oder wieder eliminiert, wenn sie dies nicht mehr tun.

Kollinearität

In multivariablen Systemen wirken sich so genannte kollineare Variable im Input-Block negativ auf die Bildung von Regressionsmodellen aus. Variable sind kollinear, wenn zwischen ihnen eine starke Korrelation mit Korrelationskoeffizienten nahe den Werten +1 oder -1 besteht, d. h. wenn zwischen diesen Variablen eine lineare Abhängigkeit existiert. Die multivariable lineare Regression liefert in solchen Fällen meist instabile Regressionskoeffizienten und eine mangelhafte Prognosefähigkeit der Modelle.

Ein Ausweg aus dem Problem mit kollinearen Input-Variablen bietet die PLS-Regression [19].

Hauptkomponentenanalyse (PCA) und PLS-Modelle

Die Korrelationsanalyse ist ein wichtiger Schritt der Datenanalyse [20]. Sie kann ergänzt werden durch eine Hauptkomponentenanalyse (Principal Components Analysis – PCA), die ein wirkungsvolles Hilfsmittel darstellt, um die am stärksten miteinander korrelierten Variablen herauszufinden und den Datenraum in weitere Subräume bezüglich der Stärke der Korrelationen zu strukturieren.

Bei der Hauptkomponentenanalyse werden neue Variable, die Hauptkomponenten (PCs), als Linearkombinationen der ursprünglichen Variablen definiert, die orthogonal und unkorreliert zueinander sind. Die ersten Hauptkomponenten mit den größten Eigenwerten beschreiben den Hauptanteil der Variabilität der Originalvariablen des Systems.

In der vorliegenden Untersuchung wird zur Modellbildung vorzugsweise die mit der PCA verwandte PLS (partial least squares)-Regression eingesetzt [21, 22]. Wie bei der Hauptkomponentenanalyse werden neue Variable als Linearkombinationen der Inputs gebildet, die hier als Latente Variable (LV) bezeichnet werden. Die PLS-Regression versucht die Latenten Variablen derart zu finden, dass die Korrelation zum Output maximal wird und dabei der größtmögliche Anteil der Variation im Input-Block berücksichtigt wird. Es gilt hier das Prinzip der maximalen Kovarianz.

Ein wichtiges Auswahlkriterium für die Festlegung der Anzahl der zu berücksichtigenden Hauptkomponenten in der PLS-Regression liefert die Entwicklung der nachfolgend erläuterten Gütemaße (abgedeckte Output-Varianz, mittlerer Kalibrierungsfehler und mittlerer Prognosefehler) über der Zahl der einbezogenen Hauptkomponenten.

Bewertung der Modellgüte

Die Beurteilung der ermittelten Modelle erfolgt anhand des mittleren quadratischen Kalibrierungsfehlers $rmse$ (root mean square error) und des mittleren quadratischen Prognosefehlers $rmsecv$ (root mean square error/cross validation).

Der Prognosefehler für Datensätze, die nicht zur Kalibrierung eingesetzt wurden, wird im Rahmen der PLS-Regression durch „Cross-Validation“ bestimmt. Hierfür werden Datensätze von der Modellkalibrierung ausgenommen. Anhand dieser wird dann die Prognosesicherheit des Modells durch die Berechnung des Prognosefehlers überprüft.

Der mittlere Kalibrierungsfehler der Modellbildung ist ein Analogon zur Standardabweichung:

$$\text{rmse} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \text{Gleichung 2}$$

(\hat{y}_i simulierte Outputwerte, y_i gemessene Outputs).

Er kann als rmse/\bar{y} auf den mittleren Outputwert bezogen werden, als Analogon zum Variationskoeffizienten. Zu unterscheiden ist der mittlere Prognosefehler des Modells, der durch Validierung ermittelt wird und gegeben ist durch

$$\text{rmsecv} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}^p_i - y^p_i)^2} \quad \text{Gleichung 3}$$

(\hat{y}^p_i prognostizierte Outputwerte, y^p_i gemessene Outputs).

Prinzipiell sind die Kalibrierungsgenauigkeit und die Prognosegenauigkeit zwei unterschiedliche Aspekte der Modellgüte. Ein möglichst kleiner Kalibrierungsfehler ist kein Kriterium für eine hohe Prognosesicherheit des Modells. Oft ist eine gegenläufige Tendenz beobachtbar, d. h. sehr genau kalibrierte Modelle zeigen in der Regel eine relativ schlechte Prognosegenauigkeit.

Ein normiertes Gütemaß ist das Bestimmtheitsmaß r^2 . Es beschreibt den Anteil von der gesamten quadratischen Abweichung, der durch das Modell abgedeckt wird, als Prozentangabe. Dem Bestimmtheitsmaß entspricht in der PLS-Regression die abgedeckte Output-Varianz ("Y variance captured"). Um den Einfluss von geringer Stichprobengröße und großer Regressorenzahl auszugleichen, kann eine Korrektur des Bestimmtheitsmaßes über die Anzahl der Datensätze durchgeführt werden. Es resultiert das korrigierte Bestimmtheitsmaß r^2_{kor} .

3.3 Mikrobiologische Laboruntersuchungen

3.3.1 Hemmtest

Durch Hemmtests lässt sich der Einfluss eines Biozids direkt auf die Zellzahl im Biofilm nachweisen. Für den Hemmtest wurde ein Biozid-System Spectrum XD3899 der Firma Herkules eingesetzt. Zu den vorbereiteten Biofilmprouben wird Biozid zugesetzt. Nach 30 min wird für jede behandelte Probe eine Verdünnungsreihe $1:10^2$ bis $1:10^6$ hergestellt und jeweils 100 µl auf eine Agar-Petrischale ausplattiert. Die Petrischalen werden bei 36 °C über 3 Tage inkubiert und anschließend die koloniebildenden Einheiten (KbE) ausgezählt.

3.3.2 Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH)

Mittels Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) ist die Erfassung aller lebensfähigen Mikroorganismen (also nicht nur der kultivierbaren) oder einzelner Bakteriengruppen/-gattungen möglich. Verschiedene Tests der Firma Vermicon AG wurden verwendet, unter anderem der Kit „VIT-Biofilm“. Dieser wurde im Rahmen eines Europäischen Forschungsvorhabens entwickelt [23]. Er erfasst Bakterien, die immer wieder in Biofilmen aus Papierfabriken nachgewiesen werden konnten. Die Gattung wird als "Biofilm-Indikatorgattung" bezeichnet.

Der Nachweis spezifischer Bakteriengruppen/-gattungen erfolgt direkt in den Biofilmprouben. Zur Auswertung wurde ein Aufsichtfluoreszenzmikroskop genutzt sowie geeignete Filtersätze, mit denen sich Fluoreszenzfarbstoffe spezifisch detektieren lassen.

4 Ergebnisse

4.1 Daten der Prozessanalysen

4.1.1 Produktionsdaten

Häufige Sortenwechsel der produzierten Kartonsorten in Werk A innerhalb der Messzeiträume führten trotzdem zu im Mittel relativ konstanten Rohstoffeinträgen und Prozesseinstellungen. Das im Prozesswasser eingesetzte Biozid wurde in Menge und Dosierort im Laufe der Untersuchungswochen variiert, so dass hierin von vornherein die stärksten Einflüsse auf die Biofilmbildung zu vermuten waren.

Auch in Werk B waren keine signifikanten Unterschiede der Prozessführung zwischen den Messzeiträumen in der ersten Datensichtung zu erkennen. Nach Aussagen des Werkes sind die verschiedenen Sorten in Rohstoffeintrag und Prozessführung ähnlich. Die Dosierorte der eingesetzten Biozide blieben gleich, die Dosiermengen wurden geringfügig verändert. An Prozessparametern erfasst wurden Bruttoproduktionsmenge, Maschinengeschwindigkeit, Flächengewicht, Abwassermenge, Produktionsunterbrechungen, Dosiermengen von Papieradditiven, Dosiermengen von Bioziden an verschiedenen Orten und Stoffdichten in Stoffauflauf, Siebwässern und Klarwasser.

In Werk C wurden Sorten über mehrere Tage nach einem festgelegten Programm produziert. Somit unterscheiden sich die Sorten, ihr Rohstoffeinsatz und ihre Prozesseinstellungen zwischen den Auswertzeiträumen. Die Produktionsleistung pro Tag blieb weitgehend konstant. Ein Biozid wurde in Werk C in konstanter Menge eingesetzt.

4.1.2 Stoff/Wasser-Parameter

In Abbildung 5 sind die betrachteten Prozesswässer durch mittlere Messwerte charakterisiert. In Werk B ließen sich Prozesswasser-Messwerte aufgrund geringer Datendichte nicht auswerten. Nicht geloggt wird im Werk B die Prozesswassertemperatur.

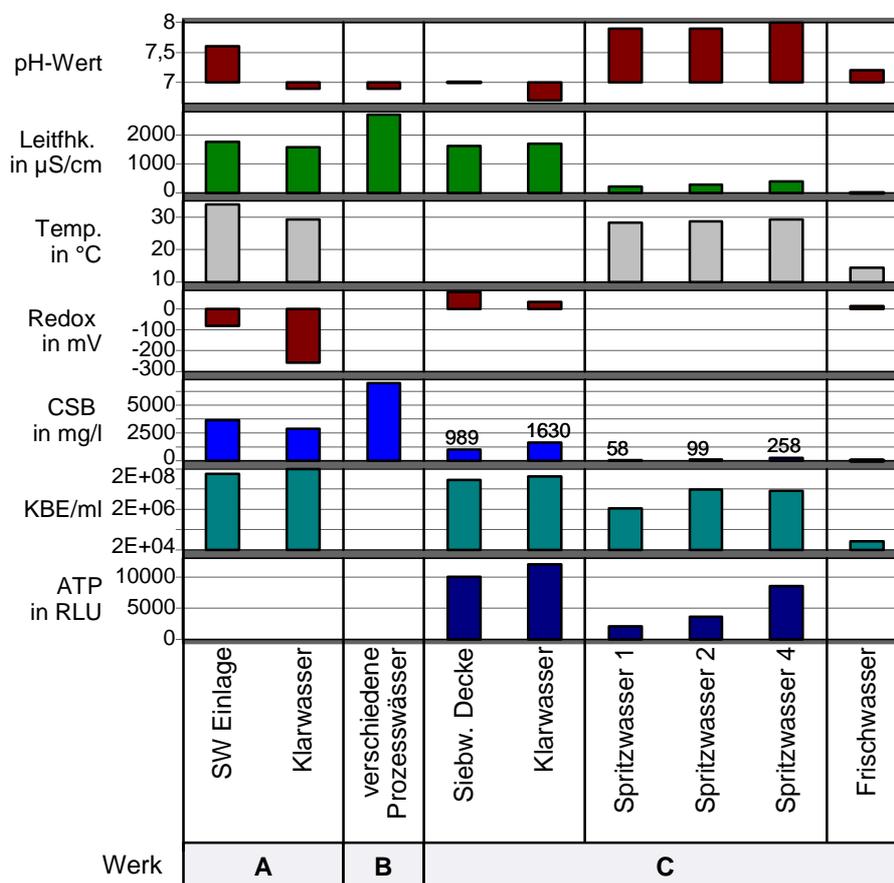


Abbildung 5 Wasser-Charakterisierung

In Abbildung 6 ist der Verlauf ausgewählter Parameter im Klarwasser von Werk C dargestellt. Zu erkennen ist in der Trenddarstellung bereits eine erhöhte Temperatur, ein niedrigeres Redoxpotenzial und ein erhöhter CSB-Wert nach Tag 90. Die Signifikanz dieser Beobachtungen wird in den nächsten Kapiteln bewertet.

Zusätzlich zu den Messwerten wurde die klimatische Situation an den Messsystemen im Aerosolbereich (Plates) als Aerosol-Wert eingestuft:

- Spritzwasser 1: kaum Aerosol, wenige aber große Wassertropfen; Aerosol-Wert 1
- Spritzwasser 2: gut sichtbare Aerosole, kleine Tropfen und Nebel; Aerosol-Wert 3
- Spritzwasser 4: sehr hohe Feuchte, Aerosolwolken, feine Tröpfchen; Aerosol-Wert 10

In den Aerosol-Wert geht sowohl die Luftfeuchte als auch der Wasserniederschlag auf den Plates durch Sprühen ein. Eine Differenzierung dieser Einzelgrößen ist nicht sinnvoll.

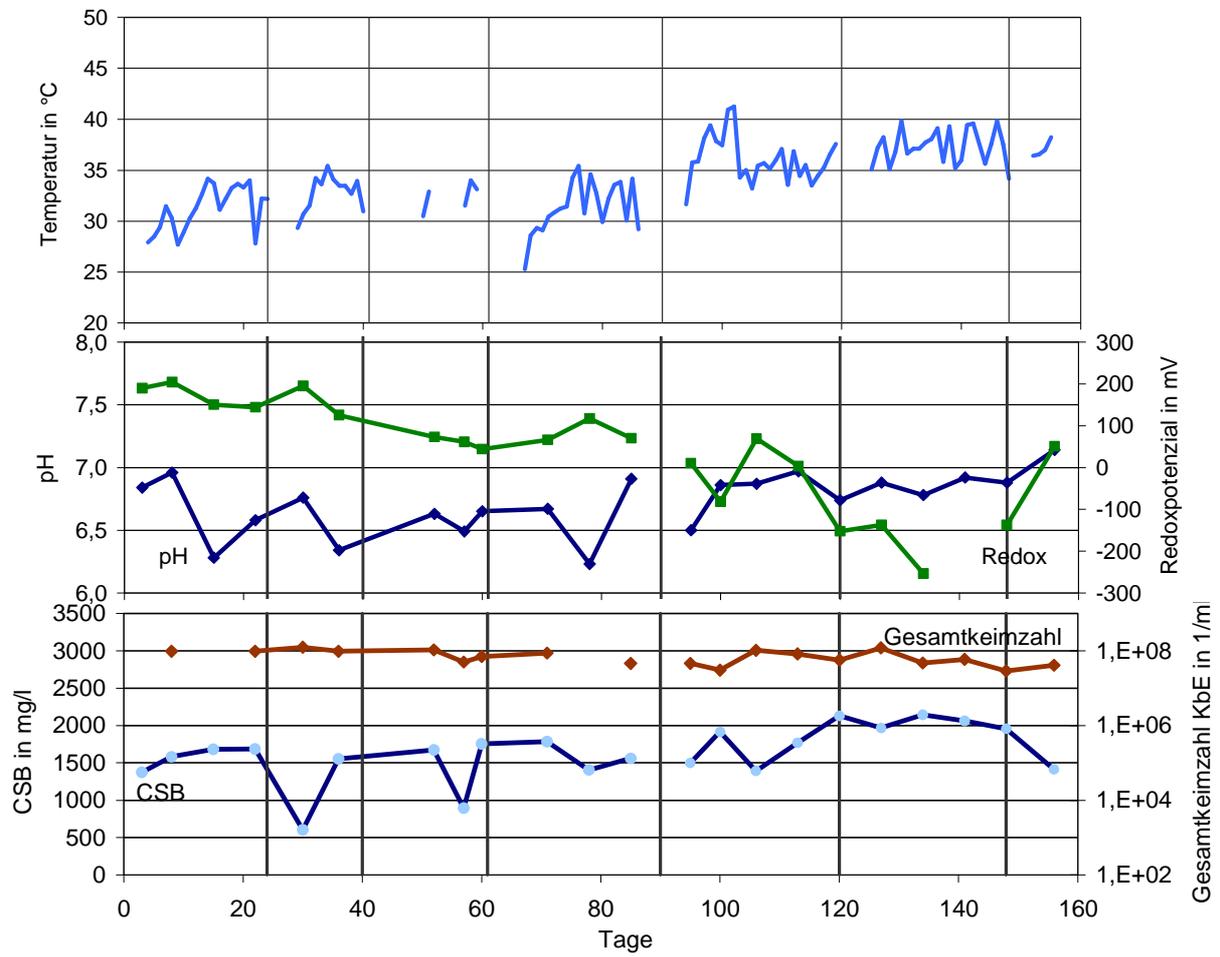


Abbildung 6 Trend ausgewählter Parameter im Klarwasser von Werk C

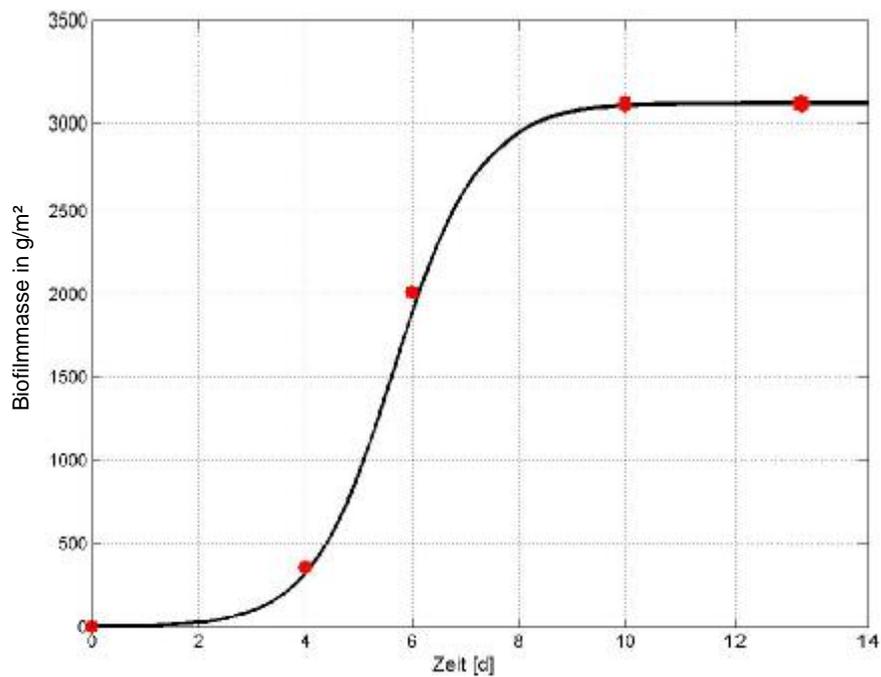


Abbildung 7 Interpolierte Biofilmwachstumskurve (Werk A)

4.1.3 Biofilmwachstum im Prozesswasser

Wachstumskurven

In Werk A und Werk C wurden Einzelwerte der Biofilmbildung in der Regel 7 und ergänzend 14 Tage nach Messbeginn erfasst. Zur Charakterisierung des Wachstums wurden für Abbildung 7 weitere Werte aufgenommen.

Für Werk B wurden kontinuierliche Werte von drei Online-Schleimsensoren an verschiedenen Orten ausgewertet. Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt zwischen zwei Produktionsunterbrechungen. Zu erkennen ist die weitgehende Biofilmaustragung durch die Unterbrechungen. Danach steigt die Filmdicke an, bis es zum teilweisen Abreißen kommt ("sloughing off"). Eine Plaquebildung ist hier wegen der Produktionsunterbrechungen nicht beobachtbar.

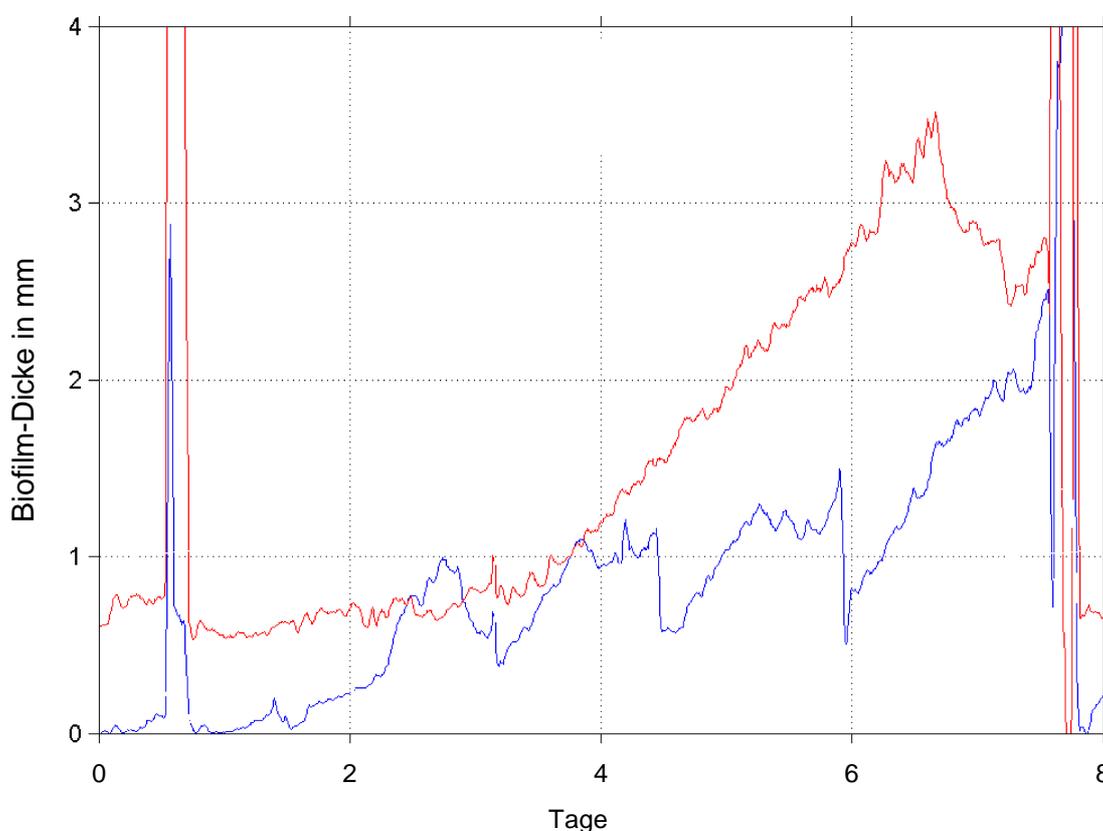


Abbildung 8 Signale von zwei Online-Biofilmsensoren an verschiedenen Messorten, Ausschnitt zwischen zwei Produktionsunterbrechungen (Werk B)

Einfluss von Messorte und Messsysteme auf die Biofilmbildung

Im Abbildung 9 ist die Biofilmbildung für einzelne Messsysteme und -orte von Werk A aufgetragen. Die Tendenz höherer Biofilmbildung in den Blue Pots entspricht der Erwartung, dass bei geringer Überströmung mehr (aber weniger dichte) Biofilmmasse entsteht [24].

Zieht man die Mittelwerte der Messorte heran, zeigt sich im t-Test ein signifikanter Unterschied zwischen Siebwasser Einlage und Klarwasser (Tabelle 4). Dieser muss auf unterschiedliche Wasserparameter und Biozid-Dosierungen zurückgeführt werden.

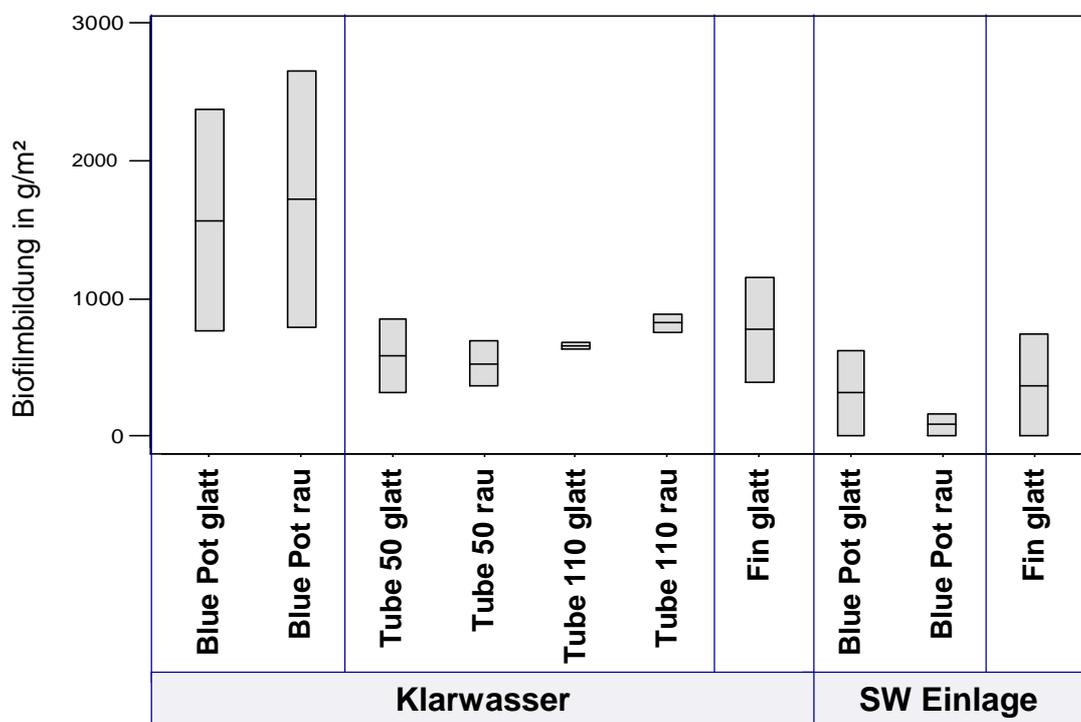


Abbildung 9 Biofilmbildung in Messsystemen von Werk A; Median, 25 %- und 75 %-Quartil (Kasten)

Tabelle 4 Statistischer Vergleich der Biofilmbildung zwischen den Messorten Klarwasser und Siebwasser Einlage in Werk A: ungepaarter beidseitiger t-Test

Messort	N	Mittelwert	Standardabweichung	p-Wert	Ergebnis
Klarwasser	14	951	699	0.008	Biofilmbildung im Klarwasser hochsignifikant höher als im SW Einlage
SW Lage 2	6	255	338		

N Anzahl der Datensätze

Für Werk C zeigt Abbildung 10 die Biofilmbildung an den verschiedenen Messsystemen und Messorten. Eine Prüfung mit t-Tests ergab: Die Messsysteme differierten signifikant. An den Fins lagerte sich mehr Biofilm an als in den Blue Pots. Auch die Messorte unterschieden sich signifikant; im Klarwasser war die Biofilmbildung größer als im Siebwasser Decke.

Die Biofilmbildung auf glatten und rauen Oberflächen zeigte dagegen keine signifikanten Unterschiede. Auch führte turbulente und laminare Strömung im Messsystem Tube nicht zu signifikanten Unterschieden.

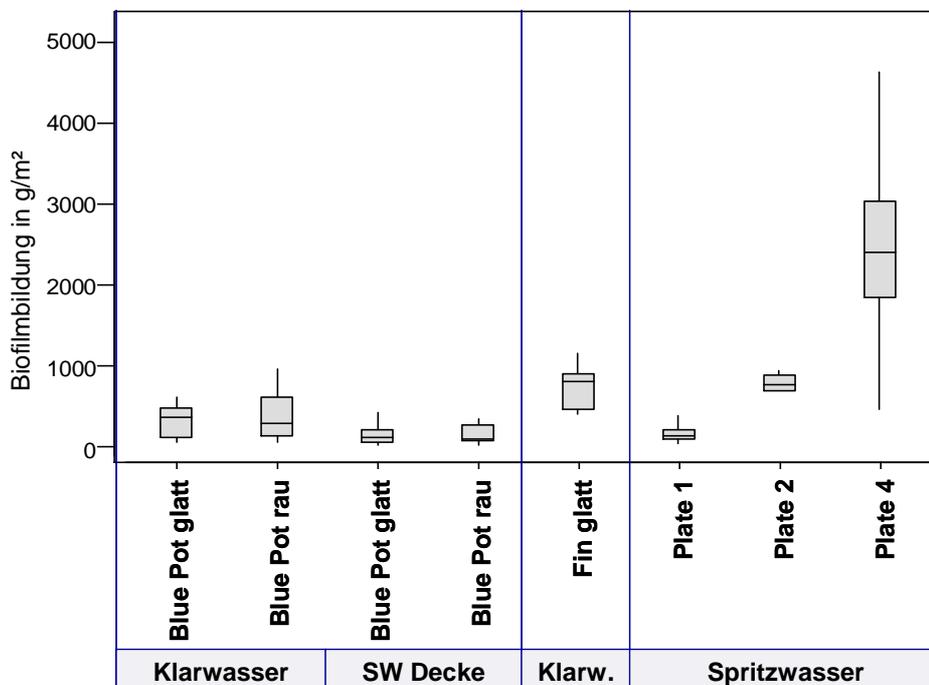


Abbildung 10 Biofilmbildung in Messsystemen (Werk C);
Median, 25 %- und 75 %-Quartil (Kasten) und Min-Max-Bereich (Linie)

Einflüsse auf das Biofilmwachstum im Aerosolbereich

Die Aerosolsysteme unterschieden sich signifikant von den Eintauchsystemen, aber auch untereinander (Abbildung 10).

Das Biofilmwachstum im Aerosolbereich ist vor dem Hintergrund der Spritzwässer-Eigenschaften zu betrachten (vgl. Abbildung 5). Tropfen und Aerosole, die im Bereich von Sieben und Filzen der Papiermaschine die Luft anreichern, entstehen durch hohe Wasser-Luft-Kontaktflächen und der kinetischen Energie durch die Sieb- und Filzfortbewegung sowie durch Reinigungsdüsen. Da in Reinigungsdüsen großteils Frischwasser eingesetzt wird, aus der Papierbahn jedoch Prozesswasser entwässert, ist die Zusammensetzung von Tropfen und Aerosolen stark vom Messort abhängig. Die Belastung der aufgefangenen Spritzwässer liegt entsprechend zwischen Frischwasser und Prozesswasser.

Spritzwasser 4 weist eine hohe mikrobiologische Aktivität (ATP-Wert) auf. Offensichtlich beeinflussen die unterschiedlichen CSB-Werte die mikrobielle Aktivität in den Spritzwässern.

Trotz des geringeren Nährangebots in den Aerosolen, verglichen mit den Prozesswässern, scheint eine hohe Luftfeuchte und der starke Nebelniederschlag ein Vorteil bei der Aufnahme von Nährstoffen und der Bildung von Biofilmen durch Mikroorganismen zu sein.

Einfluss von Messort und Messsystem auf die Biofilmzusammensetzung

Eine Hauptkomponentenanalyse zeigte deutliche Unterschiede in der Biofilm-Zusammensetzung zwischen den Messorten sowohl bei Werk A wie bei Werk C. Die Auswertung soll folgend für Werk C gezeigt werden. Hier werden auch die Messsysteme im Aerosolbereich betrachtet.

Bereits die erste Hauptkomponente deckt 80 % der Varianz ab, die ersten beiden Hauptkomponenten 95 % der Varianz. In Abbildung 11 sind die Loadings der einzelnen Parameter in den

zwei Hauptkomponenten dargestellt, in Abbildung 12 die Scores der Einzelmessungen. Die Loadings beschreiben den korrelativen Einfluss der Einzelvariablen in den Hauptkomponenten. Die Scores beschreiben den Einfluss der Datensätze.

Die erste Hauptkomponente differenziert nach Wassergehalt auf der einen und den Trockenanteilen auf der anderen Seite. Der Gehalt an Mikroorganismen hat keinen Einfluss. Die zweite Hauptkomponente differenziert organische und anorganische Bestandteile.

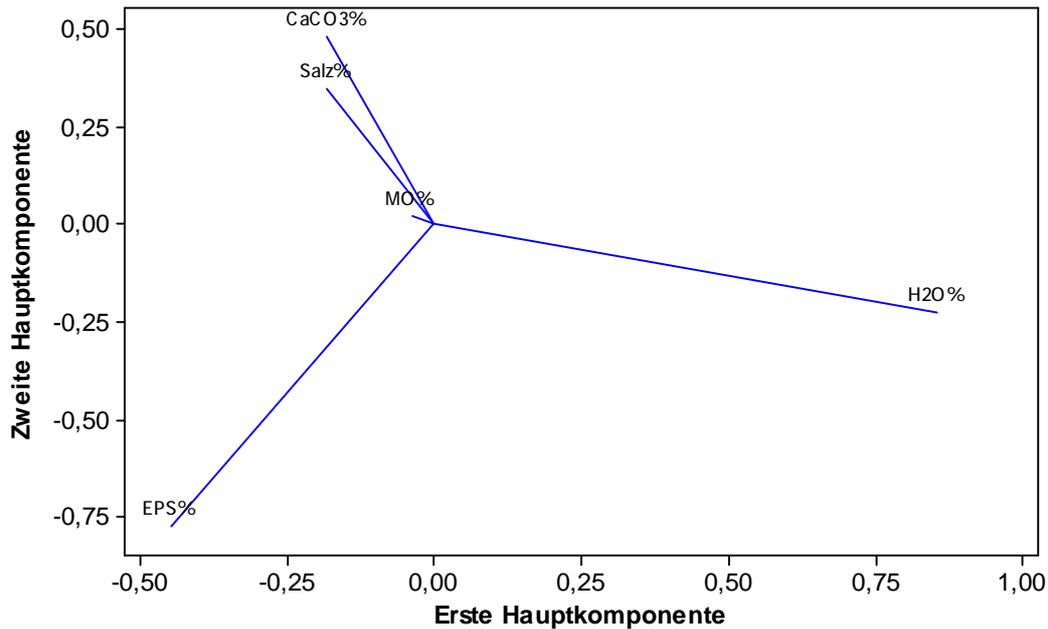


Abbildung 11 Loadings für die Biofilmmzusammensetzung in zwei Hauptkomponenten (Werk C)

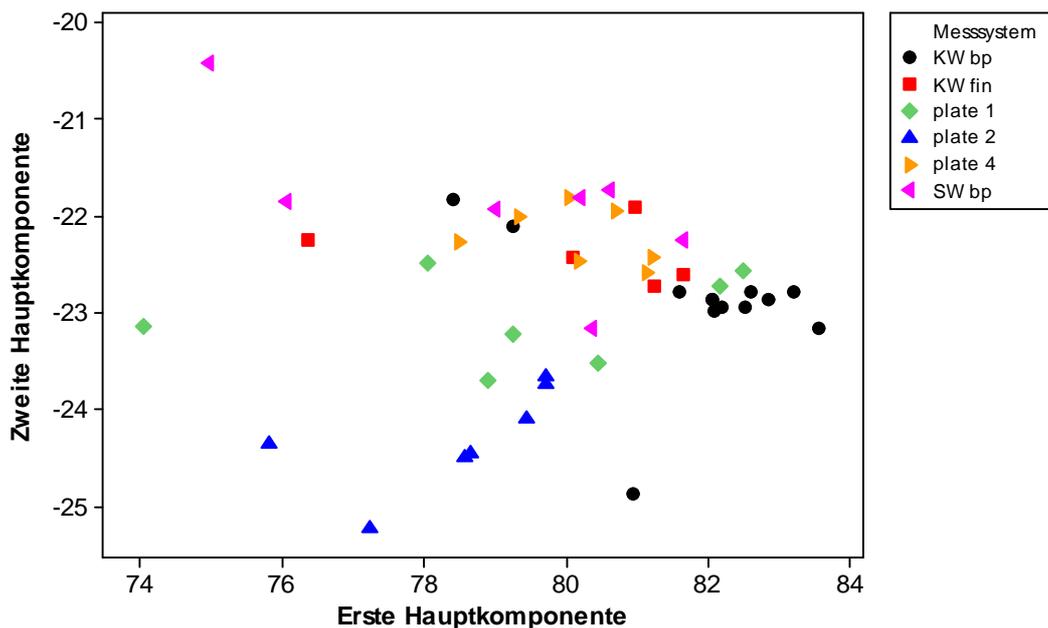


Abbildung 12 Scores für die Biofilmmzusammensetzung in zwei Hauptkomponenten (Werk C)

Die Ausrichtung der Achsen im Scores- entspricht denen im Loadings-Diagramm. So lässt sich ablesen, dass beispielsweise das Messsystem Klarwasser/Blue Pot hohe Wassergehalte im Biofilm aufweist. Warum die Messsysteme Unterschiede aufweisen, ist nur teilweise begründbar. So ist anzunehmen, dass die geringere Stoffdichte im Klarwasser (gegenüber Siebwasser) die Einlagerung von Fasern und Füllstoffen vermindert. In der Deckenlage werden stärker Füllstoff haltige Rohstoffe eingesetzt. Das erklärt einen höheren Calciumcarbonat-Anteil.

4.1.4 Quantifizierung von Schleimproblemen

Verfügbare Angaben zu Abrissen, Maschinenstillständen und Reklamationen wurden ausgewertet.

In Werk A betrug die Abrisszahl während des Untersuchungszeitraumes im Mittel 2,4/Tag. Davon waren durch Biofilm- und Stoffbatzen verursacht im Mittel 0,8 Abrisse/Tag, also ca. 30 %. Die Abrissursachen werden durch das Maschinenpersonal nach Einschätzung von Vorgesetzte, Abrissort und Anschauung eingestuft.

Zur Annäherung an eine objektive Einteilung wurden gesammelte Abriss-Papierbahnstücke (Coupons) mit Ninhydrin angefärbt. Nur zu 33 von 133 Abrissen lag ein Coupon vor. Unter der Annahme, dass die gefundenen Coupons repräsentativ sind, liegt der Anteil schleimbedingter Abrisse bei 18 %.

In der Mitschrift von Produktionsstörungen von Werk B waren Stillstands-Ursachen textlich dokumentiert, jedoch nicht streng kategorisiert. Eine manuelle Filterung nach Abrissen, bei denen Schleim möglicherweise die Ursache war, führte zu nur wenigen Ereignissen innerhalb der Bewertungszeiträume. Von einer weiteren statistische Auswertung wurde deshalb abgesehen.

Für Werk C wurden insgesamt 84 Abrisse im Untersuchungszeitraum ausgewertet. Nach Einschätzung des Betreibers hat Schleim keine Bedeutung als Abrissursache. Der Ninhydrin-Nachweis für 3 Abrisscoupons, die aufgefunden und untersucht wurden, war negativ.

4.2 Statistischer Vergleich von Prozesszuständen

4.2.1 Werte mit und ohne Biozid-Dosierung (Werk A)

Abbildung 13 zeigt die die Biozid-Dosierungen in Werk A an verschiedenen Systemorten im Trend. Die Dosiermengen wurden in den Lagen Decke (D), Rückseite (R) und Einlage (E) im Untersuchungszeitraum nur geringfügig verändert. Mit den Schleimmesssystemen konnte hier Biofilmbildung festgestellt werden, und die Messungen wurden nach 2-3 Wochen abgebrochen.

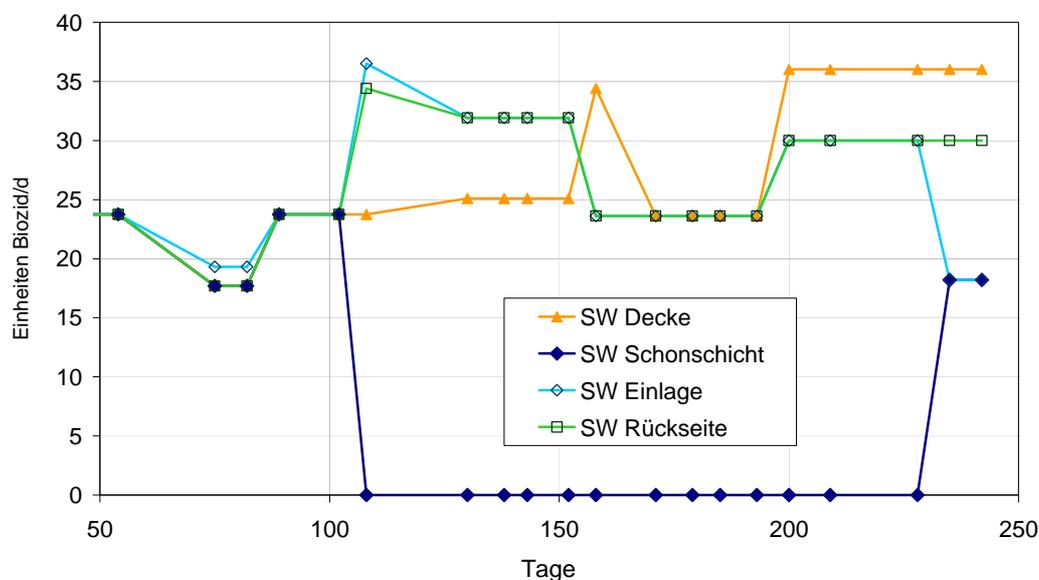


Abbildung 13 Biozid-Dosierung in die Siebwässer (Werk A)

In der Schonschicht-Lage (SL) wurde die Dosierung einige Zeit ausgesetzt. Zur Bewertung kann hier ein kategorieller statistischer Vergleich der Zustände "mit Biozid" und "ohne Biozid" über t-Tests herangezogen werden.

Die Gesamtkeimzahl erniedrigte sich hoch signifikant, im Mittel um 95 %. Das Redoxpotenzial verschob sich aus dem für anaerobe Mikroorganismen günstigen negativen Bereich ohne Biozid-Zugabe (Mittel -19 mV) nach Dosierung in den positiven Bereich (Mittel +144 mV). Bei der eingesetzten Chemikalie handelte es sich um ein oxidierendes Biozid.

Die mikrobiologische Aktivität, ausgedrückt durch den ATP-Wert, erniedrigte sich mit geringerer Signifikanz ($p=0,054$) um ca. 60%. Werden die ATP-Messungen des Biozid-Lieferanten ausgewertet, die zwar nur einmal im Monat gemessen, aber über eine viel längere Zeitspanne aufgenommen wurden, ergeben sich hier mit einem p-Wert von 0 hochsignifikante Veränderungen. Dies gilt auch für die parallel gemessenen Gesamtkeimzahlen.

Die Hemmung des Biofilmwachstums durch das eingesetzte Biozid konnte eindeutig nachgewiesen werden. Vor dem Start der Biozid-Dosierung bauten sich Biofilme an den Messsystemen im Siebwasser Schonlage kontinuierlich auf. Nach dem Beginn der Dosierung konnte in diesem Prozesswasser keinerlei Biofilmwachstum mehr festgestellt werden.

Diese Wirkung von Bioziden zu belegen, steht nicht im Fokus des Forschungsvorhabens. Es konnte mit den Messungen jedoch gezeigt werden, dass die Messsysteme geeignet sind.

Ist kein Biofilmwachstum nachweisbar, stellte sich die Frage, ob Biozide überdosiert sein könnten. Ziel des Betreibers ist es, schleimbedingte Probleme mit hoher Sicherheit auszuschließen. Eine testweise Reduzierung der Biozid-Dosierungen bis hin zu erstem nachweisbarem Biofilmwachstum war daher nicht möglich.

4.2.2 Werte vor und nach Temperaturerhebung (Werk C)

Auch die Temperaturerhebung in Werk C wurde in einem ersten Ansatz als kategorielle Änderung bewertet.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der ungepaarten beidseitigen t-Tests auf die Nullhypothese "keine Änderung". Die Parameter Temperatur, Redoxpotenzial, pH-Wert, ATP und CSB ver-

schieben sich im Klarwasser nach Temperaturanhebung signifikant. Der CSB-Wert erhöhte sich um ca. 25 %. Für die restlichen Parameter sind die Veränderungen nicht signifikant.

Tabelle 5 Statistischer Vergleich der Werte vor und nach Temperaturanhebung (Werk C): ungepaarter beidseitiger t-Test

Parameter	Messort	Temp.anhebung	N	Mittelwert	Standardabw,	p-Wert	Ergebnis
Temp. °C	Klarwasser	vor	61	30,6	4,3	0,000	hochsignifikanter Anstieg um ca. 5 °C
		nach	57	35,9	3,6		
	SW Decke	vor	66	33,1	4,2	0,000	hochsignifikanter Anstieg um ca. 4 °C
		nach	57	36,9	4,3		
Redox mV	Klarwasser	vor	12	119	57,2	0,001	hochsignifikante Erniedrigung
		nach	9	-83	125		
	SW Decke	vor	13	126	64	0,037	signifikanter Anstieg
		nach	9	18	125		
Leitfähigkeit µS/cm	Klarwasser	vor	12	1711	276	0,830	-
		nach	10	1690	172		
	SW Decke	vor	13	1664	474	0,477	-
		nach	10	1545	310		
pH	Klarwasser	vor	12	6,61	0,24	0,019	signifikanter Anstieg
		nach	10	6,84	0,17		
	SW Decke	vor	13	6,93	0,32	0,387	-
		nach	10	7,03	0,21		
CSB mg/l	Klarwasser	vor	12	1463	361	0,018	signifikanter Anstieg
		nach	10	1825	291		
	SW Decke	vor	12	895	535	0,456	-
		nach	10	1103	711		
GKZ KbE/ml	Klarwasser	vor	10	1,0E08	5,5E07	0,063	-
		nach	10	6,1E07	3,1E07		
	SW Decke	vor	10	6,2E07	6,5E07	0,514	-
		nach	10	4,5E07	4,7E07		
ATP RLU	Klarwasser	vor	11	8187	6173	0,024	signifikanter Anstieg
		nach	8	16511	7561		
	SW Decke	vor	10	6093	3833	0,245	-
		nach	8	11561	11842		

N Anzahl der Datensätze

Im Siebwasser Decke wurde neben der Temperatur nur für das Redoxpotenzial eine Signifikanz ermittelt. Der TOC-Wert verhielt sich insgesamt analog zum CSB-Wert bei einem Verhältnis von TOC:CSB von 0,35. Es konnte keine signifikante Veränderung der Gesamtkeimzahl nachgewiesen werden.

Im Messsystem Klarwasser/Blue Pots war eine hochsignifikante Steigerung der Biofilmbildung nach Anhebung der Wasserkreislauf-Temperatur auf etwa das Dreifache zu verzeichnen (Tabelle 6).

Das Messsystem Klarwasser/Fins wird aufgrund vermuteter Messstörungen nicht ausgewertet.

Die Biofilmbildung im Siebwasser Decke/Blue Pot erhöhte sich, jedoch nicht signifikant.

Tabelle 6 Wirkung der Temperaturerhöhung auf die Biofilmbildung in g/m² (Werk C): ungepaarter beidseitiger t-Test

Messort/ Messsystem	Temperatur- anhebung	N	Mittel- wert	Standard- abweichung	p-Wert	Ergebnis
Klarwasser Blue Pot	vor	10	180	111	0,001	hochsignifikanter Anstieg
	nach	9	537	208		
SW Decke Blue Pot	vor	10	100	521	0,067	nichtsignifikanter Anstieg
	nach	9	207	147		
Plate 1	vor	5	128	51	0,337	-
	nach	5	203	144		
Plate 2	vor	4	943	349	0,305	-
	nach	5	709	215		
Plate 4	vor	5	224	106	0,612	-
	nach	4	269	133		

Betrachtet man die Abrisszahlen vor und nach der Temperaturerhöhung, so ergibt sich eine signifikante Steigerung auf etwa das Doppelte (Tabelle 7). Inwieweit Abrisse dabei durch Schleim bedingt waren oder andere produktionstechnische Gründe hatten, kann nicht ausgesagt werden. Nach Aussagen des Betriebspersonals traten nach der Temperaturerhöhung deutlich mehr Abrisse aufgrund von Batzen aus der Nasspartie auf, als dies sonst der Fall war. Eine Objektivierung durch Bewertung der ursächlichen Papierbahnstücke war nicht möglich.

Tabelle 7 Wirkung der Temperaturerhöhung auf die Abrissanzahl pro Tag (Werk C): ungepaarter beidseitiger t-Test

Temperatur- anhebung	N	Mittelwert	Standard- abweichung	p-Wert	Ergebnis
vor	72	0,57	0,87	0,039	signifikanter Anstieg
nach	65	1,02	1,51		

Nicht in allen Messsystemen finden sich in gleicher Weise signifikante Änderungen mit einer Temperaturerhöhung. Dennoch ergibt sich ein klares Bild:

- Mit der Temperaturerhöhung steigt der CSB-Wert im Prozesswasser, bei konstanter Abwassermenge also der CSB-Eintrag.
- Gleichzeitig fällt das Redoxpotenzial. Der ATP-Wert erhöht sich.
- Die Gesamtkeimzahl ändert sich nicht signifikant.
- Die Temperaturerhöhung führt zu deutlich stärkerem Biofilmwachstum im Prozesswasser.

4.3 Korrelationsanalyse und Modellbildung

Ziel der Korrelationsanalyse ist es, relevante Einflussgrößen (Inputs) auf das Biofilmwachstum und auf Schleim-bedingte Probleme auszuweisen. Auf dieser Basis erfolgt die Regressionsanalyse, bei der Regressionsmodelle und PLS-Modelle gebildet werden.

4.3.1 Werk A

Für Werk A wurden für insgesamt 30 Parameter Paarkorrelationen für den Messort Klarwasser berechnet. Unter der Annahme, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messsystemen bestehen (vgl. Abbildung 9), wurden die Ergebnisse von Blue Pot, Tube und Fins gemittelt. Für den Messort Siebwasser Schonschicht liegen nach Mittelwertbildung nur drei Datensätze vor; auf eine weitere Auswertung musste verzichtet werden. Auch die dann ermittelten Korrelationen, die rechnerisch eine Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,05$ aufweisen, ist kritisch zu betrachten. Von den heraustretenden Korrelationen sind folgende plausibel:

- Prozesswassertemperatur (W-Temp7) mit CSB-Wert zur Abwasserreinigungsanlage (W-CSBbio7): positive Korrelation, die ähnlich später auch bei Werk C gefunden wird.
- Biozid-Dosiermenge mit Gesamtkeimzahl: negative Korrelation

Für Werk A ergab die anschließende mathematische Modellierung der Biofilmbildung keine Modelle mit akzeptablen Gütekriterien.

4.3.2 Werk B

Korrelationsanalyse

Für Werk B wurden insgesamt 45 Parameter betrachtet (Tabelle 8). Tabelle 9 gibt die Korrelationsmatrix mit ausgewählten Parametern wieder.

Tabelle 8 Parameter in Werk B

Parameter		
Produktion	Produktionsmenge	t/d
Geschw	Maschinengeschwindigkeit	m/min
FLG	flächenbezogene Masse des Papiers	g/m ²
Abw_Spez	spezifische Abwassermenge	l/kg
RetM_I	Dosierung Retentionsmittel in Lage I	
RetM_II	Dosierung Retentionsmittel in Lage II	
Entschäum_I	Dosierung Entschäumer in Lage I	
Entschäum_II	Dosierung Entschäumer in Lage II	
Leim	Dosierung Leim	
Sprühstärke	Dosierung Sprühstärke	
SD_SW	Stoffdichte im Siebwasser	%
Retention	Retention	%
STf_I	Stoffdichte im Stoffauflauf Lage I	%
SW_I	Stoffdichte im Siebwasser Lage I	%
STf_II	Stoffdichte im Stoffauflauf Lage II	%
SW_II	Stoffdichte im Siebwasser Lage II	%
Biozid	Dosiermenge Biozid	
BDC	Auswertung Online-Schleimsensor	
BDC_Anst	Auswertung der Anstiege des Online-Schleimsensors	
Suffix		
1-5	Ort der Bioziddosierung/Schleimmessung: 1-3 Konstantteil, 4 Rückwasser, 5 Frischwasser	

Tabelle 9 Korrelationsmatrix ausgewählter Parameter (Werk B)
 oben: Anzahl N der für die Paare jeweils auswertbaren Datensätze
 unten: Korrelationskoeffizienten mit Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$
 ##### = nicht auswertbar, da mindestens ein Parameter konstant ist

Anzahl	Produktion	Geschw	FLG	Abw_Spez	RetM_I	RetM_II	Entschäum_I	Entschäum_II	Leim	Sprühstärke	SD_SW	Retention	STf_I	SW_I	STf_II	SW_II	Biozid1	Biozid2	Biozid3	Biozid4	Biozid5	BDC1	BDC3	BDC5	BDC_Anst1	BDC_Anst3	BDC_Anst5	
Produktion	29																											
Geschw	8	29																										
FLG	8	8	29																									
Abw_Spez	8	8	8	29																								
RetM_I	8	8	8	8	29																							
RetM_II	8	8	8	8	8	29																						
Entschäum_I	8	8	8	8	8	8	29																					
Entschäum_II	8	8	8	8	8	8	8	29																				
Leim	8	8	8	8	8	8	8	8	29																			
Sprühstärke	8	8	8	8	8	8	8	8	8	29																		
SD_SW	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	29																	
Retention	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	29																
STf_I	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	29															
SW_I	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	24	29														
STf_II	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	24	24	29													
SW_II	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	24	24	24	29												
Biozid1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	24	24	24	24	29											
Biozid2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	24	24	24	24	29	29										
Biozid3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	24	24	24	24	29	29	29									
Biozid4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	24	24	24	24	29	29	29	29								
Biozid5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	24	24	24	24	29	29	29	29	29							
BDC1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	23	23	23	28	28	28	28	28	28	29						
BDC3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	20	20	20	20	23	23	23	23	23	23	29					
BDC5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	19	19	19	19	22	22	22	22	22	22	21	19	29			
BDC_Anst1	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	23	23	23	23	28	28	28	28	28	28	28	23	21	29		
BDC_Anst3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	20	20	20	20	23	23	23	23	23	23	23	23	19	23	29	
BDC_Anst5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	19	19	19	19	22	22	22	22	22	22	21	19	23	29	29	

p<0,05	Produktion	Geschw	FLG	Abw_Spez	RetM_I	RetM_II	Entschäum_I	Entschäum_II	Leim	Sprühstärke	SD_SW	Retention	STf_I	SW_I	STf_II	SW_II	Biozid1	Biozid2	Biozid3	Biozid4	Biozid5	BDC1	BDC3	BDC5	BDC_Anst1	BDC_Anst3	BDC_Anst5		
Produktion	1,00																												
Geschw		1,00																											
FLG			1,00																										
Abw_Spez				1,00																									
RetM_I					1,00																								
RetM_II						1,00																							
Entschäum_I							1,00																						
Entschäum_II								1,00																					
Leim									1,00																				
Sprühstärke										1,00																			
SD_SW											1,00																		
Retention												1,00																	
STf_I													1,00																
SW_I														1,00															
STf_II															1,00														
SW_II																1,00													
Biozid1																	1,00												
Biozid2																		1,00											
Biozid3																			1,00										
Biozid4																				1,00									
Biozid5																					1,00								
BDC1																						1,00							
BDC3																							1,00						
BDC5																								1,00					
BDC_Anst1																									1,00				
BDC_Anst3																										1,00			
BDC_Anst5																												1,00	

Es zeigen sich signifikante und zu erwartende Korrelationen innerhalb des Input-Block, so

- zwischen KM-Geschwindigkeit und Flächengewicht des produzierten Kartons und
- zwischen Retention und Stoffdichte im Siebwasser.

Andere zu erwartende Korrelationen fehlen, etwa zwischen Produktionsmenge und Geschwindigkeit. Weitere Korrelationen, wie die zwischen Sprühstärke-Dosiermenge und Stoffdichte im Stoffauflauf der Lage II, sind nicht plausibel und als zufällig einzustufen.

Im Outputblock korrelieren die zwei Auswerteverfahren der Schleimsensor-Signale BDC1 und BDC_Anst1 bzw. BDC3 und BDC_Anst3 jeweils gut miteinander. Für den Sensor BDC5 zeigt sich mit $r=0,44$ nur eine geringe Korrelation. Dies deutete sich bereits im Messsignal an: An diesem Sensor bildete sich durchgehend nur in sehr geringem Maße Biofilm, so dass das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis eine Auswertbarkeit in Frage stellt.

Ohne weitere Betrachtung des Schleimsensors 5 zeigen sich folgende Korrelationen mit $r>0,6$ zwischen Input- und Outputgrößen:

- BDC3 und BDC_Anst3 mit spezifischer Abwassermenge (Abw_spez): negative Korrelation ist plausibel, aber: $N=4$.
- BDC_Anst3 mit Dosiermenge eines Retentionsmittels (Retm_II) sowie mit Dosiermenge eines Leimungsmittels (Leim): die negative Korrelation ist nicht ohne weiteres interpretierbar, $N=4$.
- BDC1 und BDC_Anst1 mit Stoffdichte in Stoffauflauf und Siebwasser der Lage I: Die negative Korrelation könnte z. B. durch einen Schleim-Abrieb bei stärker feststoffhaltigem Prozesswasser erklärt werden, $N=23$.
- diverse Biofilm-Werte mit Biozid-Einsatzmengen: positive Korrelationen sind nicht plausibel.

Modellbildung

Regressionsmodelle für Werk B wurden nach dem Stepwise-Verfahren ausgehend von vorausgewählten Input-Parametern gebildet. Durch das Verfahren abgeleitete Modelle für die verschiedenen Outputs sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Für den Parameter BDC1 konnte kein Input mit signifikantem Einfluss ermittelt werden. Für BDC_Anst1 wurde in der Korrelationsanalyse eine signifikante Korrelation mit der Stoffdichte im Siebwasser ermittelt. Das Modell mit dieser einen Input-Variablen deckt jedoch nur 43 % (r^2_{kor}) der Varianz im Parameter BDC_Anst1 ab.

Für BDC3 wird nur die spezifische Abwassermenge als Input ermittelt. Nur 4 Datensätze stützen diese Aussage. Abbildung 14 visualisiert die Beziehung. Die Steilheit der Regressionsgeraden entspricht nicht den Erfahrungen von Kreislaufeinengungen in der Papierindustrie. Wenngleich die Tendenz – Kreislaufeinengung führt zu höherem Schleimwachstum – plausibel ist, erscheint der hier ermittelte Anstieg der Geraden zu groß. Die Anzahl der auswertbaren Datensätze ist jedoch zu gering für eine abgesicherte Modellaussage.

Auf Basis der geringen Anzahl von Datensätzen konnten für Werk B keine PLS-Modelle mit akzeptabler Güte erstellt werden.

Tabelle 10 Durch das Stepwise-Verfahren abgeleitete Regressionsmodelle (Werk B)

Output	vor- ausgewählte Inputs	"stepwise" aus- gewählte Inputs	N	rmse/ y	r ²	r ² _{korr}	Anmerkung
BDC1	SW_I STf_I Biozid1 und andere Kombinationen	-	-	72 %	0 %	-20 %	kein Einfluss nachweisbar
BDC_Anst1	SW_I Biozid1	SW_I	23	45 %	48 %	43 %	
BDC3	Abw_Spez STf_II Biozid2 Biozid3	Abw_Spez	4	20 %	95 %	89 %	
BDC_Anst3	Abw_Spez Retm_II Leim Biozid2 Biozid3	Retm_II	4	10 %	98 %	96 %	
BDC_Anst3	Abw_Spez Retm_II Leim Biozid2 Biozid3	Abw_Spez	4	15 %	96 %	91 %	
BDC5	39 Inputs	verschiedene Kombinationen	5	0 %	100 %	100 %	keine plau- siblen Inputs

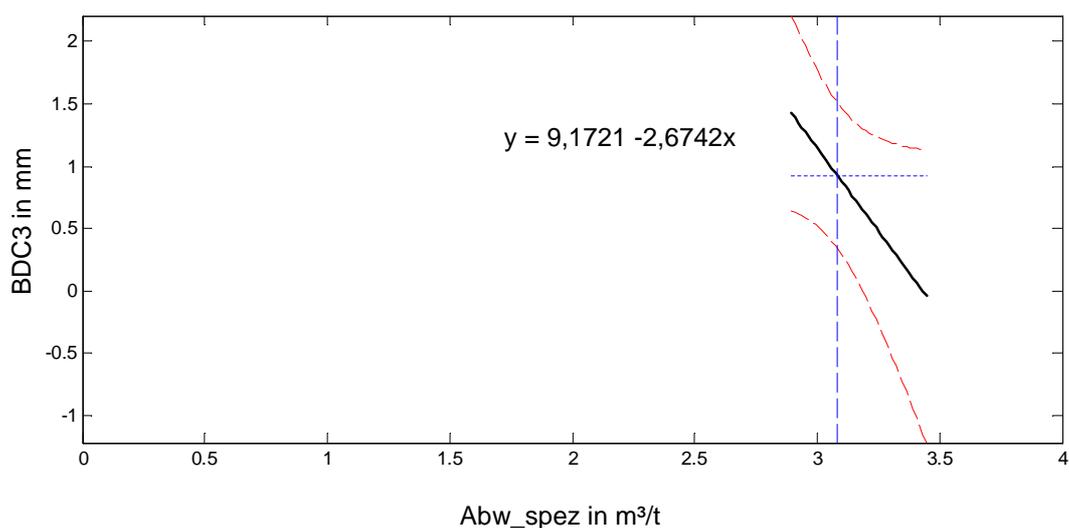


Abbildung 14 Ermittelte Beziehung zwischen spezifischer Abwassermenge und Parameter BDC3

4.3.3 Werk C – Biofilmbildung im Prozesswasser

Korrelationsanalyse

In einer zusammenfassenden Korrelationsmatrix sind in Tabelle 12 die Aussagen für die Messsysteme/Messorte im Prozesswasser von Werk C zusammengefasst. Die Anzahl der zu Grunde liegenden Wertepaare liegt zumeist zwischen 7 und 11.

Die Ergebnisse für die drei Messorte/-systeme Klarwasser/Blue Pot, Klarwasser/Fins und Siebwasser Decke/Blue Pot sind jeweils übereinander in einer Tabellenzelle dargestellt. Die Ergebnisse für das Messsystem Klarwasser/Fins sind wegen nicht auszuschließender Messstörungen (Wasserpegelschwankungen im Klarwassertank) mit Vorsicht zu betrachten. Als relevant betrachtet werden Korrelationen, bei denen mindestens einer der Korrelationskoeffizienten im Betrag größer 0,6 ist oder mindestens zwei gleichgerichtete Korrelationskoeffizienten im Betrag größer 0,5.

Tabelle 11 Untersuchte Parameter in Werk C

Präfix=Medium		
W	Prozesswasser	
S	Biofilm (Schleim)	
Parameter		
Lf	Leitfähigkeit	μS/cm
pH	pH-Wert	
RED, REDOX	Redoxpotenzial	mV
Temp	Temperatur	°C
KbE	Gesamtkeimzahl	KbE/ml
ATP	ATP-Wert	RLU
CSB	CSB-Wert	mg/l
TOC	Gesamt-Kohlenstoff	mg/l
Biozid	Biozid-Dosiermenge (alle Lagen)	Einheiten/d
Produktion	Produktionsmenge	t/d
Abwasser	Abwassermenge	m ³ /d
Abriss	Anzahl Abrisse	/d
Re	Reynoldszahl	
TM	Trockenmassebildung des Biofilms	g/m ²
H ₂ O%	Wassergehalt im Biofilm	%
CaCO ₃ %	Calciumcarbonat-Anteil von TM	%
Salz%	Anorganikanteil (Asche) von TM	%
MO%	Mikroorganismen-Anteil von TM	%
EPS% o. Organik	Organikanteil (Glühverlust) von TM	%
Aerosol	Bewertung der Aerosolstärke	
NM	Biofilmbildung (Schleim-Nassmasse)	g/m ²
Suffix		
ohne	Messwert am Ende der Biofilmwachstumsphase	
m	Mittelwert über Biofilmwachstumsphase	
s	über das Sortenprogramm berechneter Mittelwert	

Tabelle 12 Korrelationsmatrix für Prozessparameter (Werk C);
 Korrelationskoeffizienten mit Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$;
 in jeder Zelle von oben nach unten: Messorte/-systeme Klarwasser/Blue Pot,
 Klarwasser Fins und Siebwasser Decke/Blue Pot

	S-NM	S-TM	H2O%	CaCO3%	Salz%	MO%	EPS%	W-Lf	W-pH	W-REDOX	W-RED7	W-TEMP7	W-KBE	W-KBE7	W-ATP	W-ATP7	W-CSB	W-TOC	W-CSB7	W-TOC7	W-CSBs	W-TOCs	Abriss7
S-TM	0,87																						
H2O%	-0,53	-0,85																					
CaCO3%	0,53	0,82	-0,98																				
Salz%	0,68	0,90	-0,99	0,96																			
MO%			-0,98	0,97																			
EPS%			-0,89	0,98	0,92	0,75																	
W-Lf			-0,85	0,80																			
W-pH	0,58	0,57	-0,53		0,59																		
W-REDOX	-0,59	-0,49		-0,58	-0,66																		
W-RED7	-0,58	-0,61			-0,86																		
W-TEMP7	-0,51																						
W-KBE	-0,69	-0,68			-0,86																		
W-KBE7	0,66	0,53			0,59																		
W-ATP						0,66																	
W-ATP7						-0,58																	
W-CSB	-0,83	0,51			0,52																		
W-TOC	0,77	0,66	-0,59	0,64	0,64																		
W-CSB7																							
W-TOC7	0,70	0,60	-0,46		0,59																		
W-CSBs	0,49																						
W-TOCs	0,61	0,54			0,51																		
Abriss7	0,48																						
Prod																							

Signifikante Korrelation mit der Biofilmbildung (S-NM) sind in der ersten Spalte von Tabelle 12 wiedergegeben. Im Einzelnen sind dies:

- Wassertemperatur: signifikante positive Korrelation im System Klarwasser/Blue Pot. Die Temperatur muss als manipulierte Input-Größe als kausale Einflussgröße bewertet wer-

den, unter der Annahme, dass keine anderen als die erfassten Parameter signifikant Einfluss nehmen. Ein Einfluss der Temperatur auf das Biofilmwachstum ist plausibel.

- CSB/TOC: Die über das Sortenprogramm der Papierfabrik errechneten Werte W-CSBs/W-TOCs korrelieren besser als die Momentaufnahmen W-CSB/W-TOC. Ein Mechanismus der Wirkung der Temperatur auf die Biofilmbildung kann die Erhöhung des CSB-Wertes mit der Temperatur sein. Diese Prozessparameter korrelieren gut miteinander. Höhere Temperatur führt zu höherer CSB-Auslösung aus dem Altpapier-Rohstoff.
- Das Redoxpotenzial korreliert negativ mit der Biofilmbildung und gleichzeitig – wie zu erwarten – mit der Temperatur. In der Kausalkette Temperatur–Biofilmbildung ist ebenso das Redoxpotenzial zu diskutieren.

Eine Korrelation mit der Keimzahl konnte nicht nachgewiesen werden. Für den ATP-Wert zeigte sich keine einheitliche Korrelationsrichtung.

Mit der Abrisszahl korrelieren folgende Parameter:

- Biofilmbildung: Diese Korrelation zeigt sich nur für Siebwasser Decke/Blue Pot. Dies ist als Hinweis zu werten, dass sich Biofilmbildung in der Deckenlage mehr auf die Abrisszahl auswirkt als im Klarwasser. Die Aussage ist plausibel.
- Die Temperatur in der Deckenlage korreliert stark positiv mit der Abrisszahl. Eine Wirkung über die Biofilmbildung ist plausibel, jedoch dürfen Erklärungsansätze z. B. über Entwässerungsgeschwindigkeit und initiale Nassfestigkeit nicht ausgeschlossen werden.
- ATP-Wert: positive Korrelation im Siebwasser Decke, jedoch keine signifikante Korrelationen mit der Gesamtkeimzahl
- Redoxpotenzial: Negative Korrelation. Ein Zusammenhang über verschiedene Wirkmechanismen ist plausibel.

Zudem treten zahlreiche Korrelationen der Prozessparameter untereinander hervor, die insgesamt plausibel sind.

Modellbildung

Für Werk C wurden in einem ersten Ansatz Modelle für die Biofilmbildung über das Stepwise-Verfahren aufgestellt. Hierbei stellte es sich als problematisch heraus, dass die Input-Variablen untereinander korrelieren. Daher wurde folgend auf die PLS-Modellbildung fokussiert, die das Problem kollinearere Inputs beseitigt. Ziel war es, angesichts einer begrenzten Zahl von Datensätzen ein einfaches Modell zu bilden, dessen Inputs einen plausiblen Einfluss ausüben und das geringe Kalibrierungs- und Prognosefehler aufweist.

Zur Modellierung der Biofilmbildung im Prozesswasser wurden alle Datensätzen der drei Messorte/-systeme Klarwasser/Blue Pot, Klarwasser/Fins und Siebwasser Decke/Blue Pot verwendet. Gemäß den Ergebnissen der Korrelationsanalyse wurden eingangs 9 Inputs gewählt: Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotenzial, Wassertemperatur, Gesamtkeimzahl, ATP-Wert, CSB-Wert (testweise W-CSBm und W-CSBs) und Produktionsmenge.

Nach mehreren Modellierungsvarianten wurde als bestes ein PLS-Modell mit 5 Inputs und 2 Latenten Variablen bestimmt (Abbildung 15, Abbildung 16). Es erfasst jedoch nur 31 % der Output-Varianz und ist damit wenig leistungsfähig.

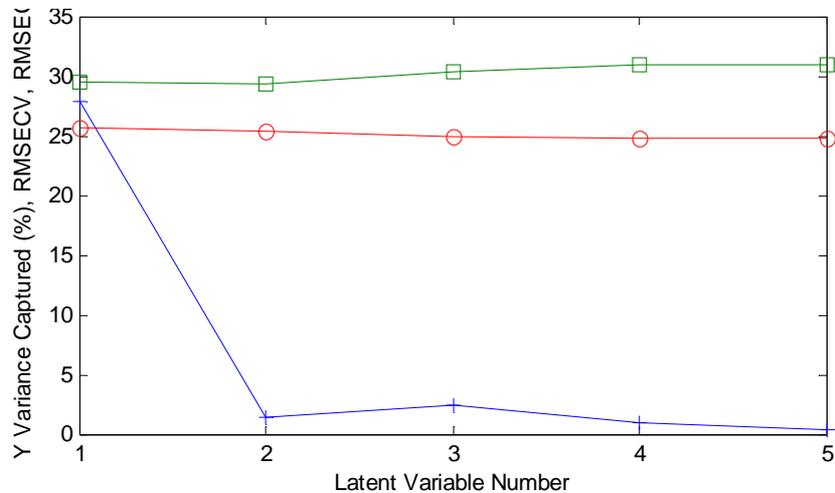


Abbildung 15 PLS-Modell der Biofilmbildung im Prozesswasser, Werk C: abgedeckte Output-Varianz (+), Kalibrierungsfehler (o) und Prognosefehler (□)

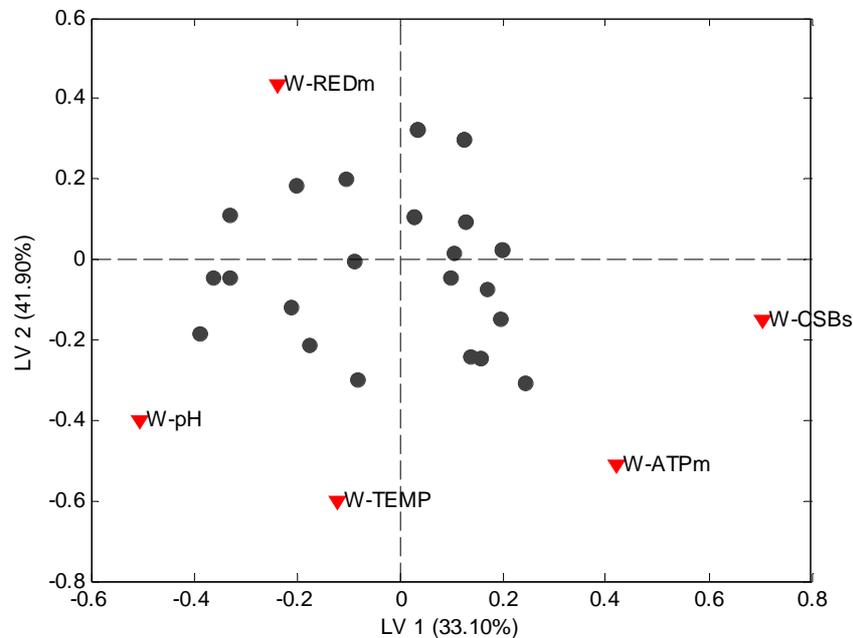


Abbildung 16 PLS-Modell der Biofilmbildung im Prozesswasser, Werk C: Scores der Datensätze (●) und Loadings der Input-Parameter (▼) in zwei Latenten Variablen

Für die Abrisszahl konnte weder mit dem Stepwise-Verfahren noch mit PLS-Modellierung ein Modell mit akzeptabler Güte erstellt werden. Dies geht einher mit der Einschätzung des Betriebspersonals, dass Abrisse im Allgemeinen nicht durch Schleim bedingt sind.

4.3.4 Werk C – Biofilmbildung im Aerosolbereich

Korrelationsanalyse

Tabelle 13 zeigt die Korrelationsmatrix für die Biofilmbildung und -zusammensetzung im Aerosolbereich. Die Biofilmbildung korreliert mit CSB, Leitfähigkeit und mikrobiologischer Belastung

des Spritzwassers sowie mit dem Aerosol-Wert. Diese Werte korrelieren jedoch auch stark untereinander, so dass eine Differenzierung schwierig ist. Zur Abrissanzahl zeigen sich wiederum keine signifikanten Korrelationen.

Tabelle 13 Korrelationsmatrix für die Biofilmbildung im Aerosolbereich (Werk C);
oben: Anzahl N der Wertepaare
unten: Korrelationskoeffizienten mit Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$

Anzahl	Prod	W-Lf	W-pH	W-KBEm	W-ATPm	W-CSBm	Aerosol	S-TM	H2O %	CaCO3 %	Salz%	MO%	Organik%	S-NM	Abrisse
Prod	28														
W-Lf	16	28													
W-pH	16	16	28												
W-KBEm	14	14	14	28											
W-ATPm	8	8	8	8	28										
W-CSBm	16	15	15	14	8	28									
Aerosol	28	16	16	14	8	16	28								
S-TM	28	16	16	14	8	16	28	28							
H2O %	28	16	16	14	8	16	28	28	28						
CaCO3 %	23	11	11	11	8	12	23	23	23	28					
Salz%	23	11	11	11	8	12	23	23	23	23	28				
MO%	21	9	9	9	6	10	21	21	21	21	21	28			
Organik%	21	9	9	9	6	10	21	21	21	21	21	21	28		
S-NM	28	16	16	14	8	16	28	28	28	23	23	21	21	28	
Abrisse	28	16	16	14	8	16	28	28	28	23	23	21	21	28	28

p<0,05	Prod	W-Lf	W-pH	W-KBEm	W-ATPm	W-CSBm	Aerosol	S-TM	H2O %	CaCO3 %	Salz%	MO%	Organik%	S-NM	Abrisse
Prod	1,00														
W-Lf		1,00													
W-pH			1,00												
W-KBEm		0,83		1,00											
W-ATPm		0,90		0,89	1,00										
W-CSBm		0,89		0,89	0,98	1,00									
Aerosol		0,92		0,86	0,83	0,83	1,00								
S-TM		0,86		0,86	0,96	0,92	0,81	1,00							
H2O %			0,64						1,00						
CaCO3 %			-0,61				0,42		-0,51	1,00					
Salz%					0,71		0,47		-0,58	0,82	1,00				
MO%												1,00			
Organik%		-0,68					-0,46		-0,81				1,00		
S-NM		0,89		0,79	0,98	0,87	0,83	0,95					-0,45	1,00	
Abrisse															1,00

Modellbildung

Die Modellierung der Biofilmbildung S-NM im Aerosolbereich ist mit mehreren PLS-Modellen möglich, die im Vergleich zu diskutieren sind.

Nach Prüfung wurden die Variablen pH-Wert und Klarwasser-Temperatur aus dem Datenset herausgenommen, da sie nur geringe Loadings in den Latenten Variablen erzielen. Zudem wurde die Gesamtkeimzahl KBEm herausgenommen. Das PLS-Modell mit 4 Inputs beschreiben Abbildung 17 und Abbildung 18. Wegen der geringen zusätzlich abgedeckten Output-Varianz ab der zweiten Latenten Variablen wurde nur eine Latente Variable gewählt. Das Modell deckt damit 92 % der Output-Varianz ab (Modell 1 in Tabelle 14).

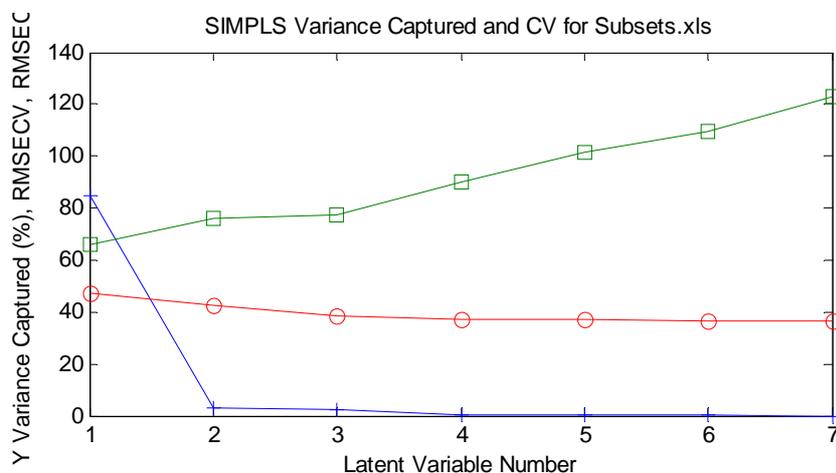


Abbildung 17 PLS-Modell 1 der Biofilmbildung im Aerosolbereich, Werk C: Erfasste Output-Varianz (+), Kalibrierungsfehler (o) und Prognosefehler (□)

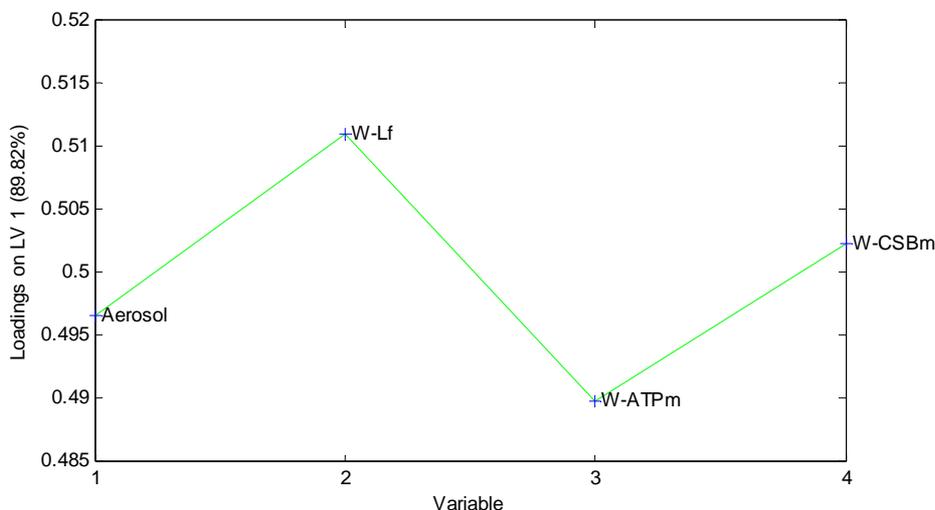


Abbildung 18 PLS-Modell 1 der Biofilmbildung im Aerosolbereich, Werk C: Loadings der Parameter

Allein mit CSB und Aerosol-Wert können immerhin noch 86 % der Output-Varianz abgedeckt werden (Modell 2 in Tabelle 14).

Nur mit dem CSB oder nur mit dem Parameter Aerosol als Input ergeben sich die Modelle 3 und 4, die immer noch 83 % bzw. 76 % der Output-Varianz abdecken. Die nur geringe Verschlechterung gegenüber Modell 2 erklärt sich daraus, dass CSB, ATP und Leitfähigkeit kollinear sind. Eine rechnerische Abgrenzung ist nicht möglich. Der CSB-Wert wird als Input-Variable ausgewählt, weil er am nächsten an manipulierbare Größen des Prozesses herankommt. Er ist unabhängig vom Aerosol-Klima.

Modell 2 mit CSB und Aerosol-Wert als Input erweist sich als plausibles und hinsichtlich der Güte akzeptables Modell. Die beiden Inputs haben vergleichbare Loadings (Abbildung 19). Zu bedenken ist, dass das Gewicht dieser kollinearen Parameter für die Biofilmbildung anhand der erfassten Daten nicht differenzierbar ist. Gemessene und mit diesem Modell berechnete Werte sind in Abbildung 20 gegenüber gestellt.

Tabelle 14 PLS-Modelle für die Biofilmbildung im Aerosolbereich, Werk C

Modell	Inputs	Anzahl Latente Variable	Abgedeckte Output-Varianz	rmse/ \bar{y}	rmsecv/ \bar{y}
1	Aerosol W-Lf W-ATPm W-CSBm	1	92 %	31 %	39 %
2	Aerosol W-CSBm	1	86 %	41 %	52 %
3	W-CSBm	1	83 %	45 %	66 %
4	Aerosol	1	76 %	53 %	70 %

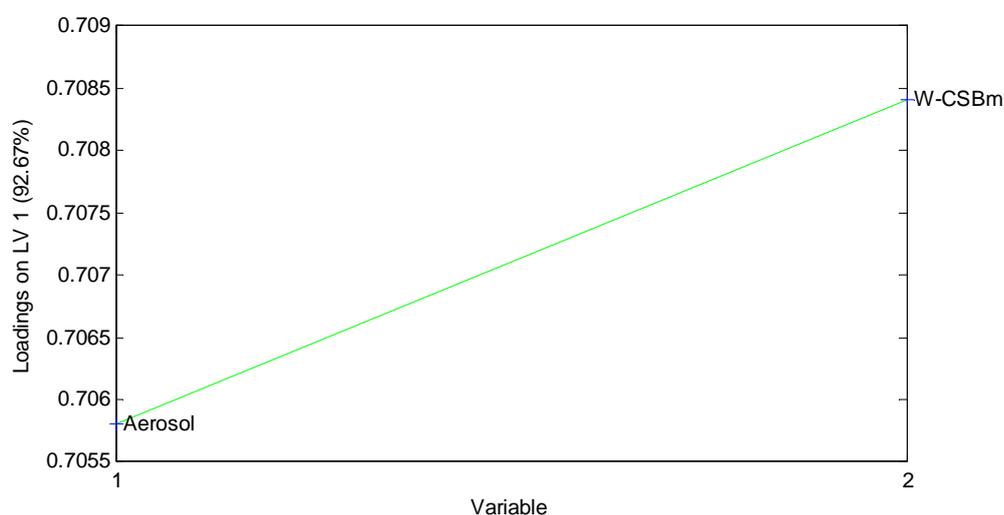


Abbildung 19 PLS-Modell 2 der Biofilmbildung im Aerosolbereich, Werk C: Loadings der Input-Parameter

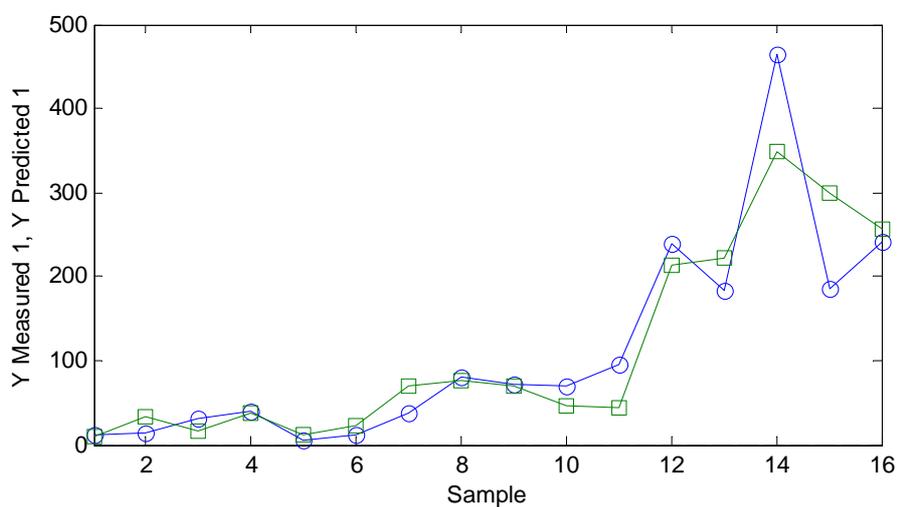


Abbildung 20 PLS-Modell 2 der Biofilmbildung im Aerosolbereich, Werk C: Gemessene (o) und prognostizierte (□) Werte für die Biofilmbildung

4.3.5 Schlussfolgerungen zur Methodik der Modellierung

In den Untersuchungen wurde über viele Monate eine Datensammlung für drei Papierfabriken erarbeitet, auf deren Basis über multivariate Datenanalyse Einflussgrößen der unerwünschten Schleimbildung identifiziert wurden. Dieses Vorgehen stößt an Grenzen, die für die Aussagekraft der Ergebnisse und für zukünftige ähnliche Forschungsarbeiten zu beachten sind:

- Die Messung des Schleimwachstums erfordert mehrere Tage, und sie ist empfindlich gegenüber Störungen. Auch bei Datenaufnahmen über mehrere Monate kann so nur eine begrenzte Anzahl von Messwerten erhoben werden.
- Die Produktionsprozesse sind auf Konstanz optimiert, Einstell- und Messgrößen variieren vielfach nur unwesentlich. Prozesseinstellungen, die stärker variieren, wie etwa das Sortenprogramm, werden angesichts der durch die Schleimmessung vorgegebenen mehrtägigen Messdauer durch Mittelwertbildung nivelliert. Betriebsversuche mit bewusst geänderten Einstellungen sind im Bereich der Schleimproblematik für die Werke wirtschaftlich nicht akzeptabel.

In der Folge wird für einige Parameter eine geringe prozessbedingte Varianz durch die rein stochastische Varianz überlagert. Dies führt zu einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis.

- Aussagen, die den Einfluss mehrerer Variabler differenzieren, sind daher insgesamt nicht möglich. Die zentralen Aussagen, die in Kap. 5.1 resümiert werden, sind bereits durch statistische Hypothesentests (t-Test) möglich. Die Ergebnisse der Modellierung bestätigen diese und liefern bei begrenzter Modellgüte darüber hinaus Hinweise, jedoch keine prognosesicheren Belege.

4.4 Mikrobiologische Charakterisierung von Biofilmen

Mikroskopische Untersuchung

Die Zusammensetzung der geernteten Biofilme variierte stark, insbesondere aufgrund der eingelagerten Feststoffe. Mittels Phasenkontrast-Mikroskopie konnten sowohl Fasern, Farbpigmente, Extrazelluläre Polymere Substanzen EPS wie auch diverse Fadenbakterien, Stäbchen und Kokken bestimmt werden.

Hemmtest

Mit Biofilmproben der drei untersuchten Kartonfabriken wurde die Wirkung eines Biozids auf die mikrobiologische Aktivität geprüft. Die gewählten Dosierungen reduzierten die Gesamtkeimzahlen um bis zu zwei Zehnerpotenzen, wobei die Biofilmproben stark unterschiedlich auf das Biozid reagierten.

FISH-Test

Eine Spezifizierung der Biofilmzusammensetzung erfolgte mittels der Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH), basierend auf spezifischen Gensonden. 35 Biofilmproben aus den Kartonfabriken wurden im Rahmen der Untersuchungen entnommen und analysiert. Nachfolgend sind ausgewählte Ergebnisse einer Biofilmprobe aus Werk C dargestellt.

In Abbildung 21 im linken Bild ist in der Biofilm-Matrix eine hohe Dichte an lebenden Mikroorganismen erkennbar (im Kreis: Nachweis aller lebensfähigen Bakterien). Gleiches gilt für die Biofilm-Indikatorgattung, die im rechten Bild mit Hilfe eines Filters sichtbar gemacht wurde. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die sichtbar gemachten Hauptgruppen Alpha-Proteobacteria und Sulfatreduzierende Bakterien.

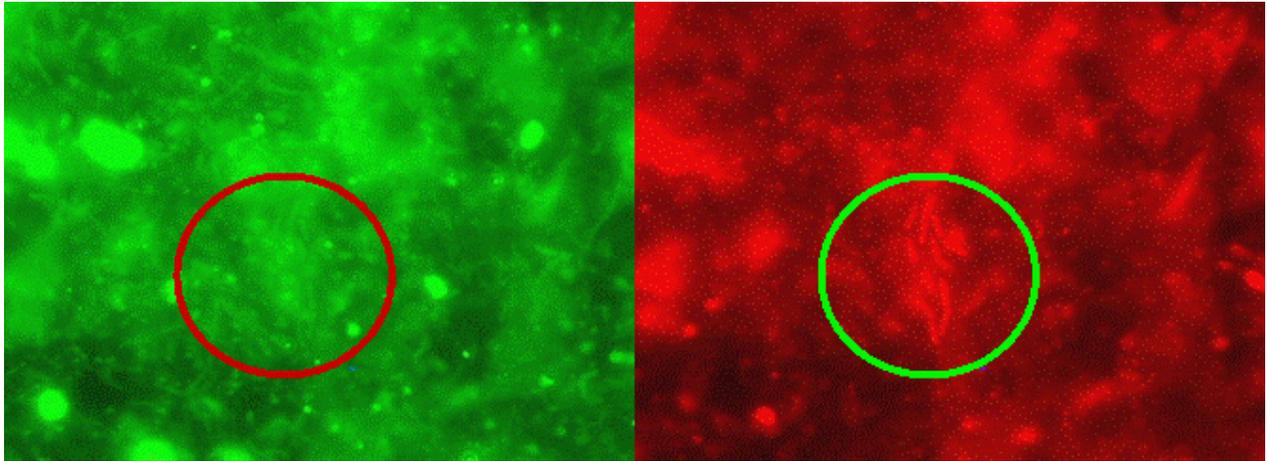


Abbildung 21 Vergleich aller lebender Mikroorganismen (linker Kreis) mit Biofilm-Indikatorgattung (rechter Kreis)

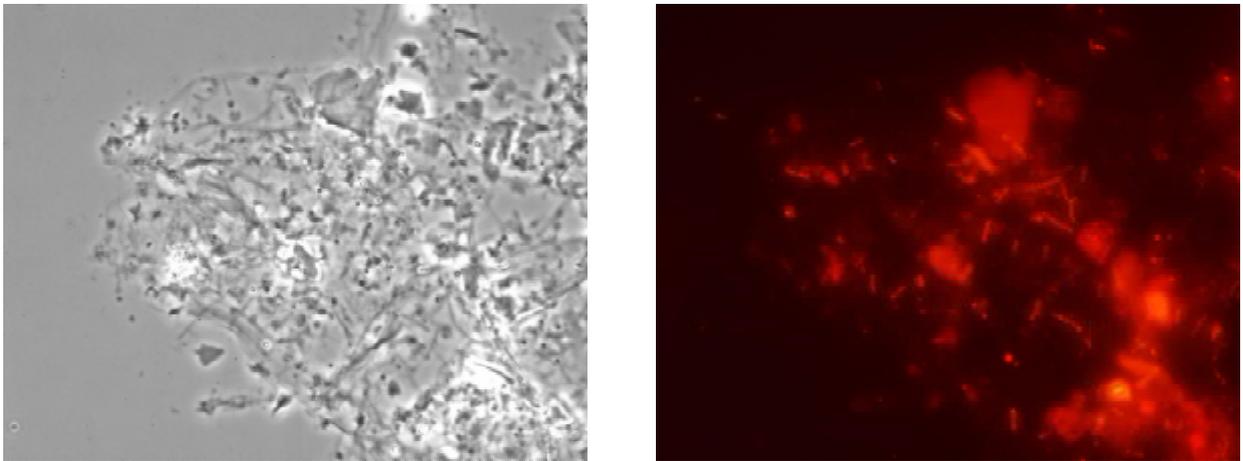


Abbildung 22 Nachweis der dominanten Gruppe der Alpha-Proteo-Bacteria; links: Phasenkontrast; rechts: identischer Ausschnitt mit Fluoreszenz-Detektion

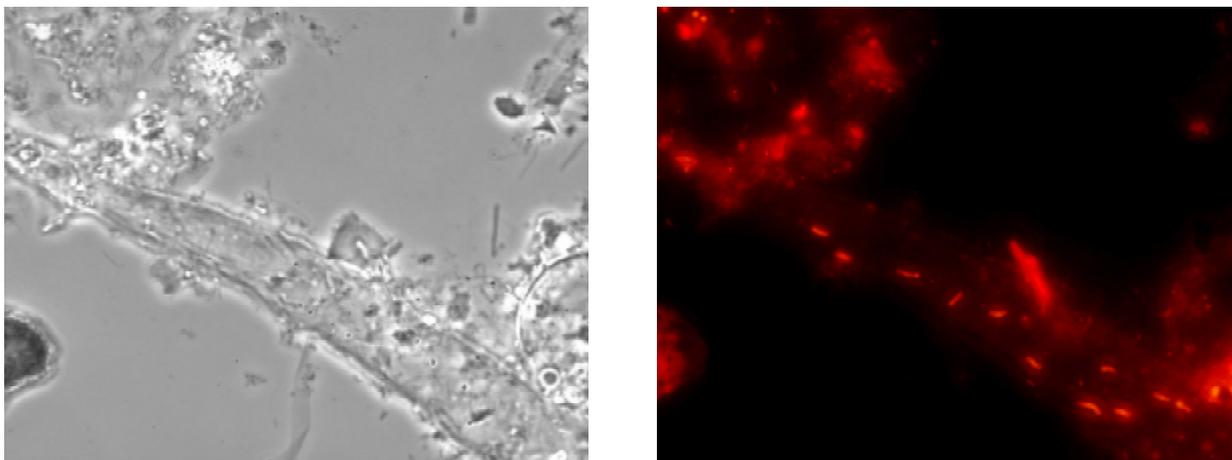


Abbildung 23 Nachweis Sulfatreduzierenden Bakterien, Einzelzellen in Stäbchenform; links: Phasenkontrast; rechts: identischer Bildausschnitt bei Fluoreszenz

In der Biofilmprobe ermittelte Bakteriengruppen sind in Tabelle 15 aufgelistet. Zellen der spezifischen Biofilm-Indikatorgattung konnten mit einem sehr hohen Anteil von 10 % nachgewiesen werden. In anderen Biofilmproben von Kartonfabrik C lag der Anteil der Biofilm-Indikatorgattung zumeist bei 2-3 % der Gesamtpopulation. Die Untersuchung der Biofilme aus Werk A ergab einen Biofilm-Indikator-Anteil bis 1 % für alle Messorte.

Tabelle 15 FISH-Analyse einer Biofilm-Probe aus Werk C

Spezifität	Angaben zur Physiologie	Anteil
Alpha-Proteobacteria	Gruppe mit erhöhten Anteilen heterotropher Organismen	30 %
Beta-Proteobacteria	Gruppe; besteht v. a. aus Mitgliedern der β 1-Gruppe (vermehrt fädige Bakterien) und der β 2-Gruppe (viele Ammoniumoxidierer); meist dominierende Population in belebten Schlämmen kommunaler Anlagen	10 %
Gamma-Proteobacteria	Gruppe, bestehend u. a. aus typischen Vertretern heterotropher Organismen, z.B. <i>Acinetobacter</i> , <i>Aeromonas</i> , <i>Escherichia coli</i>	5 %
Sulfatreduz. Bakteriengruppe	Gruppe, enthält viele Sulfatreduzierende Bakterien	10 %
Gram-positiv Bakterien mit einem hohen DNA G+C Gehalt	Gruppe, u. a. mit hohen Anteilen von Bakterien aus schwach belasteten Anlagen, kennzeichnend für Anlagen mit erhöhter Denitrifikation und Bio-P,	<1 %
Gram-positive Bakterien mit einem niedrigen DNA G+C Gehalt	Gruppe, bestehend aus nicht-fädigen und fädigen Vertretern, die als "Streptokokken-Fäden" bezeichnet werden	<1 %
Cytophaga-Flexibacter Subphylum	Gruppensonde, umfasst viele fädige Organismen; nicht-fädige Vertreter dieser Gruppe wachsen in enger Assoziation mit fädigen Organismen; in Anlagen mit Nährstoffelimination höherer Anteil, saisonal schwankend	10 %
Planctomyceten	In kommunalen Kläranlagen vorhandene Bakteriengruppe; Vertreter dieser Gruppe sind an der autotrophen Denitrifikation beteiligt, an niedrige O_2 -Konzentrationen angepasst	5 %
Spezifische Biofilm-Gattung		10 %

Die Biofilm-Indikatorgattung stellt damit nach den Alpha-Proteobakterien zusammen mit anderen kompletten Bakterienstämmen eine der Hauptpopulationen in der untersuchten Probe dar.

Angesichts einer üblicherweise breiten Diversität an Bakteriengattungen ist die Biofilm-Indikatorgattung in deutlichen Anteilen vertreten.

Daten der Probenahmestellen und der damit verbundenen Randbedingungen sind in Tabelle 16 aufgeführt. Der Anteil der Biofilm-Indikatorgattung geht nicht mit der Biofilmbildung einher.

Tabelle 16 Anteil der spezifischer Biofilm-Indikatorgattung auf den Plates-Biofilmen, Biofilmbildung und Spritzwassercharakterisierung

Messsystem	Anteil Biofilm-Indikatorgattung	Aerosol-Wert	CSB mg/l	Biofilmbildung g/m ²	Gesamtkeimzahl KbE/ml	ATP-Werte RLU	Organische Anteile %
Plate 1	2 %	1	64	203	2,7E+06	2054	2,4
Plate 2	7 %	3	121	709	1,8E+07	3627	3,4
Plate 4	1 %	10	298	2686	1,5E+07	8495	1,6

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Einflüsse auf die Biofilmbildung

Die Biofilmbildung basiert auf dem komplexen Zusammenspiel physikalischer, chemischer und mikrobiologischer Parameter. Folgende Einflüsse konnten in den Arbeiten gefunden werden:

- Ein Temperaturanstieg von ca. 31 °C auf 36 °C im Klarwasser eines untersuchten Werkes führte zu einer Steigerung der Biofilmbildung auf das 2-3fache. Die Temperatur hat damit starken Einfluss auf Schleim-bedingte Probleme.
- Zusammen mit dem Temperaturanstieg erhöhte sich der CSB-Wert im Prozesswasser um 25 %, das Redoxpotenzial fiel ab. Eine Differenzierung, welcher der Parameter Temperatur, CSB-Wert und Redoxpotenzial welchen Einzel-Einfluss auf die Biofilmbildung hat, ist nicht möglich.
- Biofilme im Aerosol-Bereich der Papiermaschine können höhere Bildungsraten aufweisen als im Stoff-Wasser-System. Auf ihre Bildung wirken sich Luftfeuchte und Nebelstärke der Umgebung aus.
- Eine spezifische Biofilm-Indikatorgattung konnte nachgewiesen werden, die regelmäßig in Biofilmen von Papierfabriken mit deutlichem Anteil anzutreffen ist.

5.2 Kontrollanalytik

Um optimale Biozid-Dosiermengen und die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen wie etwa Reinigungsstillstände zu ermitteln, bedarf es einer praktikablen und aussagekräftigen Kontrollanalytik. Aus den Ergebnissen ist abzuleiten:

- Die Bestimmung der Gesamtkeimzahl ist als alleiniges Messverfahren unzureichend. ATP-Messungen können Hinweise auf ein erhöhtes Biofilmbildungspotenzial geben.
- Manuelle Schleimmess-Einrichtungen sind geeignet, die Biofilmbildung zu bewerten. Sowohl Eintauch- als auch Bypass-Systeme sind geeignet. Eine im Forschungsvorhaben entwickelte einfache Messvorrichtung erlaubt die Schleim-Quantifizierung an Flächen im Aerosolbereich oberhalb von Sieben und Filzen. Die Messdauer von mindestens einer Woche

steht jedoch kurzfristigen Reaktionen entgegen und macht Rückschlüsse auf negative Einflüsse aus dem Prozess schwierig.

- Online-Schleimmesssysteme können Ergebnisse schon nach zwei bis drei Tagen liefern. Ein Abbruch der Messungen durch Produktionsstörungen während der Messperiode ist damit weniger wahrscheinlich als bei manuellen Systemen. Zusätzlich zum Trend der Biofilmdicke, der nur optisch ausgewertet wird, ist eine Signalauswertung anzustreben, die die Bildungsrate als Wert errechnet.
- Die Abrissstatistik ist ausreichend, um das Versagen eines getesteten Biozids, den Wirkungsausfall eines Biozids nach Adaption der Mikroorganismen oder die mikrobielle Verschmutzung gegen Ende einer Produktionsperiode anzuzeigen. Aufgrund zahlreicher anderer möglicher Abrissgründe und der Tatsache, dass Schleim als Ursache schwer identifizierbar ist, ist sie nicht geeignet, die Gegenmaßnahmen genau zu konzipieren oder gar zu regeln. Allerdings kann der konsequente Einsatz des Ninhydrin-Nachweises die Aussagen der Abrissstatistik verbessern, wenn es produktionstechnisch möglich ist, einen Großteil der ursächlichen Abriss-Papierbahnstücke aufzufinden.

5.3 Biofilmvermeidung

Basierend auf den gefundenen Parametern, die das Biofilmbildungspotenzial maßgeblich beeinflussen, werden Ansätze für Vermeidungs- und Kontrollmethoden vorgeschlagen.

Anlagengestaltung

Eine geeignete Anlagengestaltung ermöglicht, Ablagerungen und Stoffansätze zu vermeiden. Beispielsweise wird hiermit die Umgebungsfeuchte im Spritzwasserbereich festgelegt.

Zudem ist im Stoff-Wasser-System die Auslegung und Gestaltung des Rohrleitungssystems für Stoff und Rückwasser so zu optimieren, dass eine Überdimensionierung der Anlagen sowie Totzonen vermieden werden. Genauso wichtig ist die Geometrie von Wasserbehältern inklusive deren Durchströmung von Lufteinzug und Schaumbildung, da gerade Grenzflächen (z. B. Schaum) an Behälterwandungen und Abdeckungen Ablagerungen begünstigen und damit auch Verkeimungsherde fördern. Alle Bereiche mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten bieten zudem günstige Voraussetzungen für nicht-biologischen Primär-Ablagerungen und in Folge für die mikrobielle Besiedelung.

Organische Belastung

Die organische Belastung des Prozesswassers ist eine weitere wichtige Einflussgröße für die Biofilmbildung. Je geringer der Nährstoffgehalt, ausgedrückt durch den CSB- bzw. TOC-Wert im Wasser, desto weniger Substrat zum Wachstum und für extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) steht den Biofilm-Bildnern zur Verfügung. Die organische Belastung des Prozesswassers wird neben der Rohstoffqualität durch den Grad der Kreislaufeinengung und die Kreislaufschaltung bestimmt. Damit tragen

- die Rohstoffauswahl,
- branchenweite Maßnahmen zur Entlastung des Altpapierkreislaufs,
- die Implementierung einer Kreislauftrennung mit Gegenstromführung [25] und
- die Integration einer CSB-eliminierenden Kreislaufwasserreinigung [26, 27]

zur Entlastung des Papiermaschinen-Kreislaufs bei und folglich zur Begrenzung der mikrobiologischen Aktivität.

Prozessführung

Bei der Prozessführung ist die Temperatur als wichtiger Faktor zu beachten. Damit kann die Mikrobiologie im Prozesswasser beeinflusst werden. Das Temperaturoptimum der Schleimbildung in Papierfabriken liegt nach den Projektergebnissen über 35 °C. Für Temperaturen über 50 °C ist dann wiederum ein verringertes Biofilmwachstum zu erwarten, da bereits ab 45 °C die biologische Aktivität mesophiler Bakterien stark eingeschränkt ist.

Rohstoffauswahl

Eine geänderte Rohstoffauswahl könnte neben dem CSB-Eintrag den mikrobiellen Eintrag in die Fabrik reduzieren. Diese Maßnahme ist wirtschaftlich wenig attraktiv. Einfluss genommen werden kann jedoch auf die Lagerbedingungen für Altpapier.

Systemreinigungen

Durch den Produktionsausfall kostenintensiv, aber sehr wirksam sind Systemreinigungen. Optimierungspotenziale sind darin zu vermuten, wie effizient Systemreinigungen durchgeführt werden [28]. Durch "Gute Produktionspraxis" kann gleichfalls das Biofilmbildungspotenzial gesenkt werden. Bei Abrissen oder Stillständen können kleine Reinigungsmaßnahmen an kritischen Stellen, insbesondere auch im Aerosolbereich oberhalb von Sieben und Filzen, Biofilmprobleme vermindern.

Abbildung 24 schematisiert die vorgeschlagenen Maßnahmen.

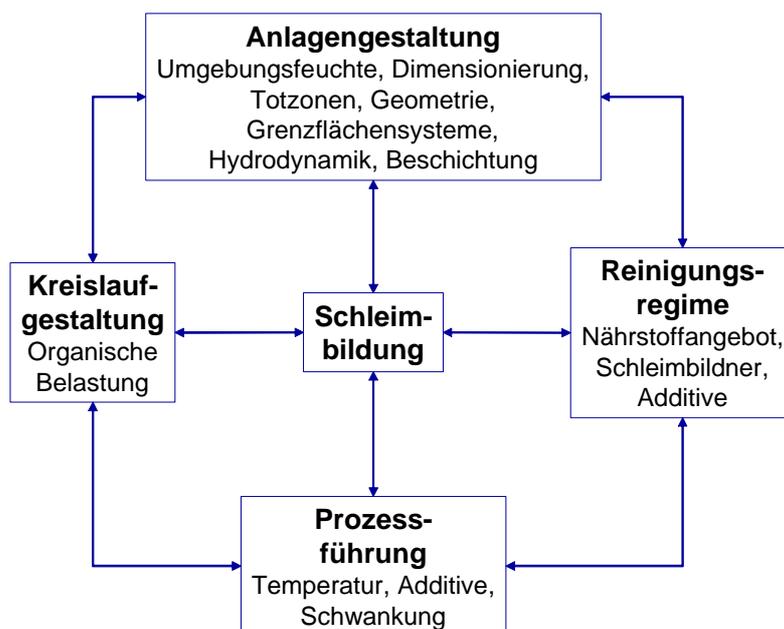


Abbildung 24 Verknüpfung des Biofilmbildungspotenzials mit Ansätzen zur Einflussnahme auf Milieubedingungen und Produktionsparameter

Vor einer Entscheidung für einen oder mehrere der vorgeschlagenen Ansätze zur Biofilmbildungskontrolle sind für den Einzelfall alle spezifischen Randbedingungen und die Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

Ansprechpartner

Dr. Dieter Pauly
Tel 089/12146-160
d.pauly@ptspaper.de

Dr. Hans-Jürgen Öller
Tel 089/12146-465
h.-j.oeller@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Heißstraße 134
D-80797 München
Tel. (089) 12 146-0
Fax (089) 12 146-36
e-Mail: info@ptspaper.de
Internet: www.ptspaper.de

Danksagung

Das Forschungsvorhaben AiF 13669 wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gefördert. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

Literaturverzeichnis

- 1 Lustenberger M., Fuchsegge J., Wydenbach K.
Mikrobielle Phänomene in der Papier-, Karton- und Pappenerzeugung
Das Papier 52, V42-V47(1998) Nr. 10A
- 2 Pauly D., Ronninger C.
COST E17 - 2002 Europe-wide analysis of paper mill microbial problems
unveröffentlicht
- 3 Hüster R.
Bildung von Biofilmigen Ablagerungen in Wasserkreisläufen von Papierfabriken
Deidesheim: 2. Papierchemikaliensymposium, 04.11.1999
- 4 Schenker A.P., Henkel, W.D., van Poele J.
Mechanismus der Biofilmbildung und Möglichkeiten der Beeinflussung. Wochenblatt für
Papierfabrikation 123, 384-389, Nr. 9 (1995)
- 5 Kanto Öqvist L., Salkinoja-Salonen M., Pelzer R.
Eine neue Methode zur Bestimmung der Ablagerungsneigung in Papiermaschinenkreisläufen
Wochenblatt für Papierfabrikation 9, 481-489 (2005)
- 6 Flemming H.C., Wingender J.
Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) - der Baustoff für Biofilme
Vom Wasser 94, 245-266 (2000)
- 7 Schenker A.
Übersicht über Technologien und Strategien zur mikrobiologischen Kontrolle in der Papier-
industrie. In: Wasserkreisläufe in der Papiererzeugung: Verfahrenstechnik und Mikrobiologie. J.
Kappen, D. Pauly (Hrsg.). In: PTS-Manuskript: PTS MP-50 217 M, München, PTS Verlag 2004,
6/7 Dezember 2004, 14/1-14/20 (2004)
- 8 Siika-aho M.
Enzymes in the control of paper machine slime problems: In: CTP-COST 17 conference. G.
Lennon (ed.) Grenoble: CTP 15th/16th January 2004, conference proceedings; session 4:
biotechnological approaches to microbial control (2004)
- 9 Dürkes F.
Biofilm: Entstehung, Entfernung, Verhinderung; München: PTS-Verlag. PTS-Manuskript MS
2017/00(2000)
- 10 N.N
Zulassungsverfahren für Biozid-Produkte. In: Umwelt, 107-108 (2001) Nr. 2
- 11 Pauly D.
Review on available monitoring techniques for mill perturbation and water re-use managment
related to microbial activities. COST action E 17 – Microbiology in Papermaking; EU Conference,
applied research developments, Madrid, 10/11.5.2001
- 12 Hilbert H., Saner M., Bunk M.
Continuous recording of the growth kinetics of interfacial deposits
Paper Technology 43:3; 41-46 (2002)
Schleimsensor BDC, Firma Kolb, Schweiz
- 13 Lie F., Johnsrud C., Samuelsson B. et al.
A new early warning system for slime formation in paper machines
Paper Technology 43:8, 43-46 (2002)
Schleimsensor QCM-D, Firma Q-Sense, Schweden
- 14 Klahre J., Flemming H.C.
Monitoring of biofouling in papermill process waters
Water Research 34:14, 3657-3665 (2000)
- 15 Schleimsensor Oekomom, Firma Oekophil Nalco, Schweiz

- 16 Dickinson W.H.
Biofouling assessment using an on line monitor
In: 1999 TAPPI Papermakers Conference; Recycling Symposium; Process Control; Electrical and Informat. Conference. Vol. 2, TAPPI; Atlanta(Hrsg.)
Atlanta: TAPPI Press. S. 449 - 457 (1999)
- 17 The MathWorks, Inc.
MATLAB, Statistics Toolbox, Neural Network Toolbox,
www.mathworks.com
- 18 Eigenvector Research, Inc.
PLS_Toolbox 2.1 for use with MATLAB, www.eigenvector.com
- 19 Næs T., Isaksson T., Fearn T., Davies T.
A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification
NIR Publications Chichester, 2002
- 20 Wang Xue Z.
Data Mining and Knowledge Discovery for Process Monitoring and Control
Springer-Verlag London Limited 1999
- 21 Russel E., Chiang L.H., Braatz R.D.
Data-driven Methods for Fault Detection and Diagnosis in Chemical Processes
Springer-Verlag London Limited 2000
- 22 Chiang L.H., Russel E.L., Braatz R.D.
Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems
Springer-Verlag London Limited 2001
- 23 Pauly D. et al.
EU-Forschungsprojekt „Biotech Control“, Nr. QLRT-1999-01389, abgeschlossen 2003
- 24 Horn H., Staudt C., Neu T. et al.
Untersuchungsmethoden für Biofilmsysteme
Chemie Ingenieur Technik 73:3, 333-337 (2004)
- 25 Kappen J.
Bestandsaufnahme und Verbesserung von Wasserkreisläufen in Papierfabriken mit integrierter Altpapierstofferzeugung; Abschlussbericht AiF 9584 / PTS-Forschungsbericht 03/96
München: PTS 1996
- 26 Demel I., Dietz W., Bobek B., Hamm U.
Kriterien für die Rückführung biologisch gereinigter Wässer in die Produktion
ipw – Das Papier 1, 37-40 und 2, 33-35 (2004)
- 27 Bülow C., Pinggen G., Hamm U.
Schließung des Wasserkreislaufs einer Altpapier verarbeitenden Papierfabrik unter besonderer Berücksichtigung der Calcium-Problematik
ipw - Das Papier 1, 31-38 (2003)
- 28 Blanco A., Negro C., Viced B., Gaspar I., Bodas D., Tijero J.
Evolution of the Microflora of Slimes from a Board Machine
1st CTP-PTS Packaging Paper & Board Recycling Symposium Nov. 99
CTP Grenoble France (1999)

Glossar

Abkürzung	Bezeichnung
A	Außenluft
Abriss	Anzahl Abrisse
Abw_Spez	spezifische Abwassermenge
Abwasser	Abwassermenge
Aerosol	Bewertung der Aerosolstärke
ATP	Adenosintriphosphat, ATP-Wert
BDC	Auswertung Online-Schleimsensor
BDC_Anst	Auswertung der Anstiege des Online-Schleimsensor s
Bio	Biologische Reinigung
Biozid	Dosiermenge Biozid
CaCO ₃	Calciumcarbonat-Anteil in der Trockenmasse
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSBbio	CSB-Wert im Zulauf zur Abwasserreinigungsanlage
DNA	Desoxyribonukleinsäure
D	Deckenlage
E	Einlage
Entschäum	Dosierung Entschäumer
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen; als Parameter: Organik-Anteil (Glühverlust) der Trockenmasse
FISH	Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung
FLG	flächenbezogene Masse des Papiers
FW	Frischwasser
Geschw	Maschinengeschwindigkeit
H ₂ O	Wassergehalt
KbE	Gesamtkeimzahl, Kolonie bildende Einheiten
KW	Klarwasser
Leim	Dosierung Leim
Lf	Leitfähigkeit
MO	Mikroorganismen-Anteil von TM
N _{ges}	Gesamtstickstoff
NM	Biofilmbildung (Schleim-Nassmasse)
O ₂	Sauerstoffkonzentration
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
PCA	Hauptkomponentenanalyse (principal components analysis)
pH	pH-Wert
PLS	partial least squares, Regressionsverfahren
PM	Papiermaschine
Produktion	Produktionsmenge
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
r ²	Bestimmtheitsmaß

RED, REDOX	Redoxpotenzial
Retention	Retention
RetM	Dosierung Retentionsmittel
rmse	Kalibrierungsfehler (root mean square error)
rmsecv	Prognosefehlers (root mean square error/cross validation)
RNA	Ribonukleinsäure
S	Biofilm (Schleim)
Salz	Anorganik-Anteil (Asche) von TM
SD_SW	Stoffdichte im Siebwasser
Sprühstärke	Dosierung Sprühstärke
STf	Stoffdichte im Stoffauflauf
SW	Siebwasser; Stoffdichte im Siebwasser
Temp	Temperatur
TM	Trockenmassebildung des Biofilms
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
W	Prozesswasser
x	Inputgröße
y	Outputgröße