

Optimales Rückwassermanagement in Papierfabriken durch Regelung mit Neuro-Fuzzy-Systemen

D. Somnitz

Inhalt

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 2 |
| 2 | Abstract | 3 |
| 3 | Einleitung | 4 |
| 4 | Gesamtvorgehen | 7 |
| 5 | Systemaufnahmen von zwei Papierfabriken | 8 |
| 5.1 | Methodik | 8 |
| 5.2 | Ergebnisse | 9 |
| 6 | Bau dynamischer Simulationsmodelle | 10 |
| 6.1 | Methodik | 10 |
| 6.2 | Ergebnisse | 11 |
| 7 | Entwicklung von Fuzzy-Regelstrategien, Aufbau des Fuzzy-Systems und Testen und Optimieren des Fuzzy-Systems mit Hilfe Neuronaler Netze | 13 |
| 7.1 | Methodik | 13 |
| 7.2 | Ergebnisse | 16 |
| | 7.2.1 Werk A | 16 |
| | 7.2.2 Werk B | 20 |
| 8 | Praxistest | 26 |
| 9 | Entwicklung systematischer Vorgehensweisen | 29 |
| 10 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 32 |

1 Zusammenfassung

Zielstellung Aufgrund schwankender dynamischer Vorgänge abhängig von verschiedenen Betriebssituationen eröffnen sich in Papierfabriken deutliche Optimierungspotenziale für ein geregeltes Rückwassermanagement. Fuzzy-Regelungen bieten die Möglichkeit der Abbildung komplexer Zusammenhänge und eignen sich zur Mehrgrößenregelung. Durch den Einsatz der im Projekt entwickelten innovativen Regelungskonzepte konnten folgende Ziele erreicht werden:

- Sicherstellung der Verfügbarkeit von Wasser
- Minimierung der Frischwasserzufuhr sowie eine Reduzierung des Abwasseranfalls
- Vergleichmäßigung des Abwasseranfalls
- Reduzierung des Kreislaufwasservolumens

Ergebnisse Anhand von zwei Praxisfällen wurden Fuzzy-Regelstrategien zur Regelung des Rückwassermanagements entwickelt. Dabei wurden Vorgaben für Aufbau und Implementierung der Regler aufgezeigt. Außerdem wurden Systematiken zur Generierung des in der Regelung umzusetzenden Wissens entwickelt. Im ersten Praxisfall (Werk A) begrenzt sich die Problemstellung lokal auf die Wasserverteilung zwischen zwei Rückwasserbüten. Für die schnell wechselnden dynamischen Vorgänge in diesem System erwiesen sich Sugeno-Fuzzy-Regler als schneller und effizienter als Mamdani-Fuzzy-Regler. Für den zweiten Praxisfall (Werk B) wurden Regelkonzepte für ein systemweites Rückwassermanagement entwickelt und miteinander verglichen. Als bestes Regelkonzept stellte sich hier eine Regelung über Bilanzgrößen heraus. Durch den Einsatz dieser Regelstrategie konnte in der Simulation eine Frischwassereinsparung um 4-5 % erreicht werden. Des Weiteren konnte die Abwasserganglinie deutlich vergleichmäßigt werden.

Schlussfolgerung Durch den Einsatz von Fuzzy-Regelungen für ein geregeltes Rückwassermanagement ergeben sich deutliche Optimierungspotenziale.

Fuzzy-Regler sind einfach und eingängig in der Entwicklung und Implementierung. In Beispielrechnungen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis wurden Amortisationszeiten von unter 1,2 a, zum Teil unter 0,75 a, abgeschätzt. Der Nutzen kann erheblich höher sein, wenn Neu-Investitionen in Pufferbehälter vermieden werden können.

Danksagung Das Forschungsvorhaben AiF 14302 wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Papierindustrie für die intensive Unterstützung der Arbeiten.

2 Abstract

Project objectives

Significant optimization potentials for closed-loop process water recirculation systems in paper mills can be tapped as a result of fluctuating dynamic processes that are influenced by various operating conditions. It is possible to map complex coherences with the use of fuzzy controls. Fuzzy control is also suited for multivariable control. The use of innovative control concepts that were developed in the course of the project was able to achieve the following objectives:

- Safeguarding water availability
- Minimisation of fresh water supply and reduction of effluent flow
- Uniform effluent flow
- Reduction of white water volume

Results

Fuzzy control strategies for the process water recirculation system were developed based on two practical applications. Guidelines for developing and implementing the controls were identified. Furthermore, systematic approaches were developed for knowledge generation and transfer into the control system. In a first application (mill A), the problem was limited locally to the water distribution between two buffer tanks. Due to the rapidly varying dynamic processes, Sugeno-type fuzzy controllers were found to operate faster and more efficiently than Mamdani-type controllers. In a second application (mill B), several control strategies for mill-wide process water recirculation management were developed and compared with one other. A control strategy based on balance values turned out to be the best suited for the application. The use of this control strategy achieved a fresh water reduction of 4-5% in the simulation run. In addition, a far more uniform effluent flow could be ensured.

Conclusions

The use of fuzzy control strategies for closed-loop process water recirculation systems created significant optimisation potentials.

Fuzzy controls are easy to develop and to implement. By means of sample cost-benefit calculations, payback periods of less than 1.2 yrs, in some cases even less than 0.75 yrs, could be estimated. The benefit can be significantly greater if net investments for buffer tanks can be avoided.

Acknowledgements

The AiF 14302 research project was sponsored by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and carried out under the umbrella of the German Federation of Industrial Cooperative Research Associations (AiF) in Cologne. We would like to express our gratitude for this support.

We would also like to express our thanks to the German companies that were involved in providing the proper samples and in the project performance.

3 Einleitung

Ausgangssituation

Die verfahrenstechnischen Vorgänge bei der Erzeugung von Papier sind geprägt von einer starken Systemdynamik. Zwar ist die Erzeugung des Papiers auf der Papiermaschine selbst ein kontinuierlicher Prozess, er wird jedoch von einer ganzen Reihe diskontinuierlicher Vorgänge begleitet. Diskontinuierliche Vorgänge sind zum Teil vorhersehbar und planbar, wie z. B. der Stoffansatz im Pulper oder das An- und Abfahren der Maschine. Auch Änderungen von Arbeitsbreite, Flächengewicht, Maschinengeschwindigkeit und Stoffzusammensetzung bewirken eine berechenbare Veränderung der Wasser- und Stoffmassenströme. Durch Überlagerung sind die Auswirkungen dieser Veränderungen auf Volumenströme, Füllstände und letztlich auf die Verfügbarkeit und die Qualität von Prozesswasser jedoch komplex. Hinzu kommen nicht vorhersehbare Störungen z. B. durch Abrisse der Papierbahn oder Ausfall von Anlagenteilen. All diese Umstände haben Auswirkungen auf das Wassermanagement, indem sie zeitweise Wasserüberschuss oder Wassermangel erzeugen. Pufferbehälter im Rückwassersystem sollen dieser Systemdynamik entgegenwirken. Es zeigt sich jedoch, dass die bisher praktizierten Fahrweisen von Pufferbehältern nicht in der Lage sind, den Anforderungen optimal gerecht zu werden, so dass erhebliche technologische und wirtschaftliche Nachteile durch ungünstige Puffernutzung entstehen können.

Folgen ungünstiger Puffernutzung

Durch eine ungünstige Puffernutzung können Situationen auftreten, in denen ein erhöhter Wasserbedarf über einen längeren Zeitraum nicht durch ein entsprechendes Wasserangebot innerhalb der Kreisläufe ausgeglichen werden kann. Um Maschinenstillstände durch Wassermangel zu vermeiden, wird Frischwasser zugeführt und damit folglich ein zusätzlicher Abwasseranfall generiert. Die Folge sind erhöhte Kosten für die Behandlung der nun zusätzlich anfallenden Abwassermengen.

Folgen zu großer Volumina

Große Puffervolumina sind die Ursache für weitere unerwünschte Folgen:

- Risiko mikrobieller Stoffwechselprozesse mit Geruchsbildung [1, 2, 3, 4, 5, 6].
- Ablagerungen aufgrund langer Verweilzeiten[7].
- Wasser- und Feststoffverlust bei Reinigungs- oder Wartungsstillständen
- Verringerte Flexibilität bei der Papiererzeugung, insbesondere bei Sortenwechseln oder steuernden Eingriffen

Folgen fester Sollwerte für Pufferfüllstände

Pufferbehälter werden häufig mit zeitweisem Überlauf betrieben. Wasserüberschuss führt zur Ausschleusung von Abwasser, bei Wassermangel sinkt der Füllstand ab, es fällt kein Abwasser an. Ist die Wasserabnahme so hoch, dass der Füllstand eine gewisse Grenze unterschreitet, wird Frischwasser zugegeben, welches zu einem späteren Zeitpunkt als zusätzliches Abwasser ausgeschleust werden muss.

Die Regelung von Pufferbehältern lässt damit im Normalfall einen breiten Schwankungsbereich zu, innerhalb dessen nicht geregelt wird. Diese Fahrweise bewirkt eine ungesteuerte Abwasserausschleusung und damit eine unregelmäßige Abwasserganglinie. Ergebnisse aus früheren Untersuchungen der PTS zeigten, dass nur wenige Abwasserteilströme mit konstanter Menge abfließen und dass diese Mengen meist gering sind.

Optimierungspotenziale

Das angeführte Beispiel des Klarwasserpuffers zeigt, dass Vorgänge an Pufferbehältern eine Reihe unerwünschter Folgen nach sich ziehen können. Die übliche Fahrweise mit unregelmäßigen Schwankungsbereichen für den Füllstand entspricht nicht den Anforderungen wechselnder Betriebszustände. Es sind hier eindeutige Optimierungspotenziale zu vermuten, die insbesondere durch Stabilisierung der Systemdynamik mit Hilfe adäquat eingestellter Regelkreise ausgeschöpft werden können.

Stand der Forschung

Eine Literaturrecherche ergab, dass für ein Online-Rückwassermanagement bisher keine allgemein zugänglichen Forschungsergebnisse existieren. Zwar ist die Beherrschung dynamischer Prozesse durchaus Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Forschungsgebiete sind hier jedoch z. B. die Sortenwechselproblematik, Entwässerungsvorgänge oder die Ausschussführung. Zur Beschreibung der Dynamik von Wasserkreisläufen wurden mehrfach erfolgreich Simulationsmodelle eingesetzt [8, 9, 10]. Croteau und Roche beschreiben z. B. die Untersuchung und Bewertung des Ausschuss- und Siebwassermanagements mit Hilfe dynamischer Simulationsmodelle [11]. Der Schritt zur dynamischen Prozesskontrolle wird hier aber nicht vollzogen.

Bonhivers, Perrier und Paris beschreiben die Anwendung eines MPC-Reglers mit einem vereinfachten Modell eines Rückwassersystems [12]. Weitere Ansätze zur Anwendung moderner Optimierungstechniken wie genetische Algorithmen für Rückwassersysteme beschreiben Shafiei, Domenech, Floquet, Koteles und Paris [13,14].

Die Regelung des Rückwassersystems anhand von Fuzzy-Regelstrategien ist ein viel versprechender neuer Ansatz.

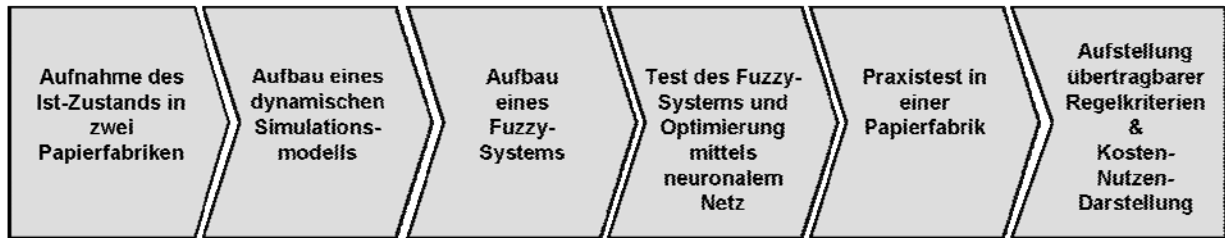
Modellierung von Expertenverhalten

Fuzzy-Systeme und neuronale Netze befassen sich mit der Modellierung von Expertenverhalten mit dem Ziel, „Aktionen von Experten nachzubilden, die diese zur Lösung komplexer Probleme einsetzen“ [15]. Die Kombination beider Ansätze hat sich bewährt, um die jeweiligen Vorteile zu nutzen und um die Nachteile zu kompensieren. Im Folgenden werden die zugrunde liegenden Theorien kurz beschrieben.

| | |
|----------------------------|--|
| Fuzzy-Systeme | Fuzzy-Systeme bieten die Möglichkeit, menschliches Regelverhalten nachzuahmen. In der Literatur wird dies z. B. am Fahren einer Kurve mit dem Fahrrad anschaulich gemacht: „Wenn ich den Lenker leicht nach links bewege und mich etwas zur linken Seite lehne, fahre ich eine Linkskurve“ [15]. Typisch für Fuzzy-Systeme ist dabei die Benutzung unscharfer Ausdrücke wie „leicht nach links“, anstelle von exakten quantitativen Angaben. Außerdem können mehrere Regeln gleichzeitig und in unterschiedlichem Ausmaß zutreffen. |
| Neuronale Netze | „(Künstliche) <i>neuronale Netze</i> (artificial neuronal networks) sind informationsverarbeitende Systeme, deren Struktur und Funktionsweise dem Nervensystem und speziell dem Gehirn von Tieren und Menschen nachempfunden sind. Sie bestehen aus einer großen Anzahl einfacher, parallel arbeitender Einheiten, den sogenannten <i>Neuronen</i> . Diese Neuronen senden sich Informationen in Form von Aktivierungssignalen über gerichtete Verbindungen zu“ [15]. |
| Neuro-Fuzzy-Systeme | Die manuelle Kalibrierung eines Fuzzy-Systems kann bei einem umfangreichen System schwierig und aufwändig sein. In Kombination mit einem neuronalen Netz kann diese Anpassung automatisiert werden. Das im Fuzzy-System vorhandene Expertenwissen wird dabei anhand von Trainingsdaten mittels eines neuronalen Netzes optimal angepasst. |
| Zielstellung | Die Forschungsarbeiten verfolgten die vorrangigen Ziele, durch regelbasierte Nutzung von Wasserqualitäten in der Papierproduktion <ul style="list-style-type: none">▪ die Verfügbarkeit von Wasser sicher zu stellen,▪ einen gleichmäßigen Abwasseranfall sicher zu stellen, um die optimale Funktion der Abwasserreinigungsanlage zu gewährleisten und damit Einleitgrenzwerte stabil einzuhalten,▪ den Investitionsaufwand von Wasser-Pufferbehältern zu reduzieren,▪ Frischwasserbedarf, Abwasseranfall und die damit verbundenen Kosten zu reduzieren und Geruchsprobleme aufgrund überhöhter Verweilzeiten zu vermeiden. |

4 Gesamtverfahren

Übersicht Die Abbildung gibt einen Überblick über die Vorgehensweise:



Vorgehen

Zunächst wurden **Systemaufnahmen in zwei Papierfabriken** durchgeführt. Dabei wurden alle für das **Erstellen der dynamischen Simulationsmodelle** und für die **Konzipierung der Fuzzy-Systeme** benötigten Daten aufgenommen. Es wurden Simulationsmodelle erstellt, um losgelöst vom Realprozess eine technische Machbarkeit ohne Risiken für **Test und Optimierung der Regler** zu erreichen. Der durchgeführte **Praxistest** ermöglichte einen Test einer entwickelten Regelstrategie nahe am Realprozess, so dass eine reale Bewertung der Regler möglich war. Durch die **Aufstellung allgemeiner Regeln und Kriterien sowie Vorgaben für Regelstrategien** wurde eine Übertragbarkeit der Ergebnisse, also die Nutzbarkeit der Ergebnisse für andere Papierfabriken, sichergestellt. In einer **Kosten-Nutzen-Darstellung** wird der Erfolg der Regelstrategie anhand der Ergebnisse und einer Modellrechnung quantifiziert.

5 Systemaufnahmen von zwei Papierfabriken

5.1 Methodik

Ziel und Prinzip Die Forschungsarbeiten verwendeten zwei Praxisfälle als Arbeitsbasis. Um alle nötigen Daten für die Erstellung dynamischer Simulationsmodelle und für die Konzipierung der Fuzzy-Regeln zu erheben, wurden strukturierte Systemaufnahmen in zwei Werken durchgeführt.

Systemaufnahmen Das Aufstellen von Fuzzy-Regeln beruht auf Expertenwissen. Bei der Systemaufnahme wurde dieses Expertenwissen durch Sammlung von Daten, Interviews mit dem Anlagenpersonal und durch die Erfassung der Regelkreise sowie kausaler Zusammenhänge der Anlage generiert. Außerdem wurden in diesem Schritt alle Daten aufgenommen, die zur Erstellung eines dynamischen Simulationsmodells der Anlage notwendig sind.

Während der Bestandsaufnahme wurden die Wasserkreislaufschaltung, relevante Produktionsdaten und wichtige Randbedingungen erfasst. Des Weiteren wurden Online-Datenreihen wie Volumenströme und Füllstände zur Erfassung wesentlicher Stoff-, Frisch-, Klar- und Abwassermengen erfasst. Auf der Basis der erfassten Daten wurden statische Bilanzen für die Frisch- und Abwassersysteme erstellt. Mess- und Regelkonzepte sowie grundlegende Betriebsabläufe und Fahrweisen des Systems wurden aufgenommen. Für das Wassersystem wesentliche Ereignisse wie Abrisse der Papierbahn oder der zyklische Betrieb von Pulpnern wurden aufgezeichnet. Die Aufnahme von Volumenströmen, Fahrweisen und Ereignissen führt zur Identifikation von Zuständen mit Wassermangel oder -überschuss. Durch Gespräche mit dem Anlagenpersonal wurden die Gründe hierfür aufgeklärt. Vorhandene Störeinflüsse wurden identifiziert und bekannte Betriebsprobleme mit den Verantwortlichen diskutiert. Einflussgrößen, die Wassermangel oder -überschuss bewirken, wurden qualitativ und quantitativ benannt. In Kombination mit dem Verständnis von Schaltung und Fahrweisen entstand das Expertenwissen, das für die aufzustellende Regelstrategie benötigt wurde.

5.2 Ergebnisse

Werk A

Werk A produziert Wickelpappe auf zwei Maschinen. Das Werk fährt mit einem geschlossenen Kreislauf. Als Rohstoff wird 100% Altpapier eingesetzt. Der Pulper wird diskontinuierlich vom Pulperführer betrieben. Das Rückwassersystem besteht aus zwei Rückwasserbehältern, die die Stoffaufbereitung und den Turbolöser versorgen.

Folgende Arbeiten wurden auf der Grundlage der Datenaufnahme in Werk A durchgeführt:

- Erstellung eines Prozessschemas.
 - Aufstellung einer Datenbasis aus Laborergebnissen (Stoffdichten) und Langzeitdaten zu Füllständen und Betriebsweise.
-

Werk B

In Werk B wird auf einer Papiermaschine dreilagiges Verpackungspapier hergestellt mit drei Stoffaufbereitungslinien, die Grundsicht, Schonsicht und weiße Decksicht versorgen.

Es gibt einen großen Rückwasserbehälter im Maschinenbereich und für jede Schicht einen Rückwasserbehälter

Folgende Arbeiten wurden auf der Grundlage der Datenaufnahme in Werk B durchgeführt:

- Erstellung eines Prozessschemas.
 - Aufstellung einer Datenbasis aus Laborergebnissen (Stoffdichten) und Online-Daten zu Füllständen, Volumenströmen und Betriebsweise, sowie Reglereinstellungen.
 - Erstellung einer Wasser- und Stoffbilanz für das gesamte Werk.
 - Erstellung einer Volumenanalyse [3].
-

6 Bau dynamischer Simulationsmodelle

6.1 Methodik

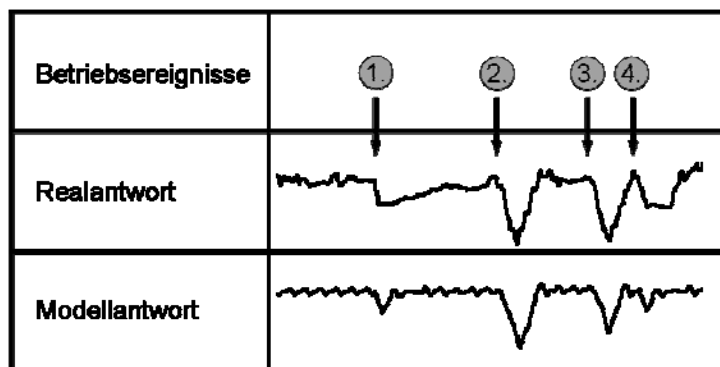
| | |
|-----------------------------|--|
| Ziel und Prinzip | <p>Dynamische Simulationsmodelle bilden die zu regelnden Realprozesse strukturell ab. Mit Simulationsmodellen war es möglich, losgelöst vom Realprozess und ohne technische Risiken, die in den nachfolgenden Arbeitspaketen entwickelten Regelstrategien zu testen.</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Auf der Basis des Softwarepaketes IDEAS™ [16] wurden objektorientierte dynamische Simulationsmodelle erstellt.▪ Die Modelle wurden zunächst statisch kalibriert. Die statische Kalibrierung umfasste die Einstellung von Stoffdichten, die Eingabe von geometrischen Daten wie Behältergeometrien und gegebenenfalls hydraulischen Daten, wie Pumpeneinstellungen. Des Weiteren werden die Regelemente, wie z.B. PI-Regler eingestellt.▪ Als nächster Schritt erfolgte die dynamische Kalibrierung. Die in Arbeitspaket 1 erfassten Betriebsereignisse sowie Fahrweisen und Störgrößen wurden im Simulationsmodell abgebildet.▪ Bei der Kalibrierung wurde die Strategie verfolgt, eine hohe Übereinstimmung der realen Prozessdaten mit den Simulationsdaten zu erreichen. Auf dieser Grundlage konnten die Modelle validiert werden und verschiedene Regelstrategien auf ihre Wirksamkeit getestet werden. |
| Aufbau eines Modells | <p>Die dynamischen Simulationsmodelle wurden mit dem IDEAS™ Dynamic Simulator aufgebaut. Der IDEAS™ Dynamik Simulator ist ein dynamisches Simulationsprogramm, das es ermöglicht, eine vollständige Anlage zu planen, den Betrieb zu simulieren und zu optimieren. Die Struktur eines Simulationsmodells wird durch das Zusammenfügen von Blöcken aus verschiedenen Bibliotheken erstellt. Die einzelnen Objekte wie beispielsweise Pumpen, Behälter und Ventile wurden anhand der erfassten Realdaten in Dialogfeldern parametrisiert.</p> |
| Abstrahierungen | <p>Die Modelle wurden gegenüber dem Realprozess vereinfacht. Für die Vereinfachung wurden zwei Ansätze gewählt:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ eine physikalische Vereinfachung der zu simulierenden Aggregate und▪ eine Verringerung der Anzahl der zu simulierenden Aggregate. |

Definition der Basissequenz

Als so genannte Basissequenz wurde für die dynamische Kalibrierung der Simulationsmodelle eine zeitliche Folge von Betriebsereignissen, sowie Fahrweisen oder Störgrößen, festgelegt, die exemplarisch aber typisch für das Prozessgeschehen sind und einen hohen Einfluss auf die Systemdynamik haben. Die Ereignisse der Basissequenz wurden für einen ausgewählten Zeitraum, den das Simulationsmodell abbildet, den aufgezeichneten Prozessdaten entnommen. Fahrweisen oder Betriebsereignisse wie z.B. Abriss werden mit Hilfe von Input-Zeitreihen im Modell vorgeben. Wichtige Handregelungen können mit Gleichungsoperatoren, sog. „Equations“, denen Funktionen hinterlegt werden können, oder z.B. Min/Max-Regelungen oder An/Aus-Schalten umgesetzt werden.

Dynamische Kalibrierung

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Strategie des Vorgehens. Die Betriebsereignisse haben Einfluss auf die Dynamik des Systems. Anhand der Realdaten wird die Realantwort, also die Reaktion des Prozesses auf die auslösenden Faktoren, identifiziert. Das Simulationsmodell wird so betrieben, dass eine hohe Übereinstimmung der Modellantwort mit der Realantwort erreicht wird:

**6.2 Ergebnisse****Werk A**

Die Daten zur Definition der Basissequenz im Simulationsmodell wurden direkt den aufgenommenen Realdaten entnommen und bilden einen Zeitraum von 24 Stunden ab. Die Dynamik des Systems wird hauptsächlich durch die Produktionsmengen an den beiden Maschinen (WPA1 und WPA2) bestimmt. Eine weitere wichtige Einflussgröße für die Dynamik des Systems ist der Pulper-Betrieb, wiedergegeben durch den An-Aus-Zustand ($A_n = 1$, $A_{us} = 0$) der Pulper-Ableerpumpe.

Die Regelungsaufgabe bestand hier vor allen Dingen in der Vermeidung von Über- oder Leerlaufen von Behältern, da das Werk A einen geschlossenen Wasserkreislauf hat.

Werk B

Das Simulationsmodell des Werkes B wurde wie folgt vereinfacht:

- Die Hydrodynamik des Pressure-Flow-Netzwerks wurde nicht physikalisch abgebildet. Stattdessen wurden über den Elementtyp „Flow Set“ Volumenströme gesteuert und geregelt. Durch dieses Vorgehen wurde der Aufwand bei der Datenaufnahme handhabbar und Fehlerquellen verringert.
- Es wurden Behälter, zwischen denen keine oder wenig auf die Dynamik des Systems einflussnehmende Veränderungen passieren, in einen Behälter zusammengelegt und das Volumen aggregiert.

Zur Stoffdichteregelung werden Mischer sowie Trennaggregate eingesetzt, denen feste Ausgangskonsistenzen vorgegeben werden können.

Als wichtigste Ereignisse für die Wasserkreislaufdynamik und den Abwasseranfall wurden für das Werk B Abrisse herausgestellt. Die Regelung hat die Aufgabe, die vorher hauptsächlich manuellen Eingriffe bei kritischen Betriebssituationen mit einer automatischen Regelung zu ersetzen.

7 Entwicklung von Fuzzy-Regelstrategien, Aufbau des Fuzzy-Systems und Testen und Optimieren des Fuzzy-Systems mit Hilfe Neuronaler Netze

7.1 Methodik

Ziel und Prinzip Das während der Systemaufnahme gewonnene Expertenwissen wurde in einem Fuzzy-System umgesetzt. Zur Bewertung der entwickelten Regelstrategien wurden diese in verschiedenen Sequenzen getestet, gegebenenfalls optimiert und der Erfolg der Regelstrategie beurteilt.

Reglerentwurf Zur Erstellung der Fuzzy-Regler wurde folgende strukturierte Vorgehensweise angewandt:

| | | |
|---|-----------------------|---|
| 1 | Reglerstruktur | Aus Expertengesprächen mit dem Betriebspersonal, externen Experten sowie PTS-Experten erfolgte die Festlegung der Ziele der Regelung und die Definition der Input/Output-Struktur. Die für die Erreichung der Ziele erforderlichen Stellgrößen wurden als Outputs des Reglers festgelegt, die einflussnehmenden Größen als Inputs. |
| 2 | Parametrierung | Den Inputs und Outputs wurden so genannte Membership-Funktionen zugewiesen. Diese wurden im ersten Schritt mit Erfahrungswerten eingestellt. Für die Membership-Funktionen wurde Anzahl, Form, Lage und Ausdehnung definiert. Die Membership-Funktionen für jeden Input müssen den gesamten möglichen Wertebereich des Parameters abdecken, sonst kann es zu Schwierigkeiten bei der Inferenz kommen. |
| 3 | Regelwerk | Mit dem Regelwerk wurde die Wissensstruktur der Regelung festgelegt. Hierbei wurden alle möglichen Kombinationen der Eingangsgrößen erstellt und mit den Ausgangsgrößen per WENN-DANN-Prinzip verknüpft. Hieraus ergab sich die Übertragungscharakteristik. |
| 4 | Typ des Fuzzy-Systems | Beim Typ des Fuzzy-Systems unterscheidet man grundsätzlich zwischen Mamdani- oder Sugeno-Reglern. Der Hauptunterschied beider Reglertypen ist, dass beim Sugeno-Reglertyp der aufwändige Schritt der Defuzzifizierung entfällt. Die Output-Membership-Funktionen sind bei Systemen 0. Ordnung Konstanten und bei Systemen 1. Ordnung Linearkombinationen der Inputs. Sugeno-Systeme sind in der Regel effizienter und reagieren schneller als Mamdani-Systeme. Außerdem eignen sie sich gut für Optimierungsmethoden. Mamdani-Systeme sind dagegen intuitiver zu erstellen. |

Implementierung Als Plattform für die Entwicklung der Fuzzy-Regler stand die Software MATLAB® [17] mit der Fuzzy-Logic-Toolbox als Erweiterung zur Verfügung.

Zwischen dem Fuzzy-Regler auf Basis von MATLAB® und dem Simulationsmodell auf Basis von IDEAS™ wurde eine Schnittstelle implementiert, die den Datentransfer in beide Richtungen erlaubt. Die aus dem Modell laufend entnommenen Simulationsdaten dienen als Eingang in den Fuzzy-Regler. Die Datenübergabe zwischen dem IDEAS™-Modell und dem MATLAB®-Fuzzy-Regler erfolgte mit Hilfe des IDEAS™-MATLAB®-Link.

Performance Tests

- **Test mit der Basissequenz**

Die im Arbeitspaket 3 entwickelten Regler wurden auf ihre Performance hin mit dem Simulationsmodell und der in Arbeitspaket 2 festgelegten Basissequenz getestet.

- **Test auf Robustheit**

In einem weiteren Schritt werden Testsequenzen erstellt, die dem Modell ein anderes dynamisches Verhalten vorgeben. Diese neuen Testsequenzen können einerseits andere Zeitbereiche aus dem aufgenommenen Datensätzen darstellen oder können kritische Betriebssituationen beinhalten, die bei der Datenaufnahme nicht online erfasst wurden, aber typisch sind. Die Testsequenzen sollten damit einen möglichst breiten Bereich an kritischen Betriebssituationen beinhalten, damit gewährleistet ist, dass die Robustheit der Regler ausreichend für die Anwendung ist.

- **Test zur Reduzierung des Kreislaufwasservolumens**

Des Weiteren wurde getestet, ob eine Reduzierung des Kreislaufwasservolumens möglich ist. Wird das Puffervolumen nur zum Teil ausgenutzt, kann das aktive Volumen minimiert werden.

**Regler-
optimierung**

Als Optimierungsverfahren wurde das ANFIS-Lernverfahren verwendet. ANFIS steht für Adpative Neuro-Fuzzy Inferece System.

ANFIS benutzt neuro-adaptive Lernverfahren, die denen Neuronaler Netzwerke ähnlich sind. Ist ein Input/Output-Datensatz (Trainingsdatensatz) gegeben, der einen optimalen Zustand des Systems darstellt, werden mit dem Verfahren die Parameter der Membership-Funktionen des zu optimierenden Fuzzy-Systems angepasst. Dabei werden entweder ein Backpropagations-Algorithmus allein oder in Kombination mit einer Methode der kleinsten Quadrate (hybride Methode) verwendet. Im Ergebnis kann das Fuzzy-System damit die vorgegebenen Input/Output-Daten optimal wiedergeben.

Für die Optimierung kann die Struktur des Fuzzy-Systems entweder selbst erstellt werden oder man kann eine Struktur generieren lassen. Es stehen zwei Partitionierungsmethoden zur Erstellung der Struktur bereit: „grid partitioning“ und „subtractive clustering“. Bei der „grid partitioning“-Methode werden für die Erstellung der Regeln alle möglichen Kombinationen der Input-Membership-Funktionen gebildet. Das Problem ist hierbei, dass mit steigender Inputzahl die Anzahl der Regeln exponentiell ansteigt. Diese Methode eignet sich für Daten mit wenigen Inputs (< 5 Inputs) und vielen Datensätzen. Zweck der „subtractive clustering“-Methode ist es, Datengruppierungen aus einem großen Datensatz zu extrahieren. Der exponentielle Anstieg der Anzahl der Regeln wird damit vermieden. Es werden Cluster-Center nach der Dichte der sie umgebenden Datenpunkte gebildet. Die „subtractive clustering“-Methode eignet sich am besten für Systeme mit vielen Inputs.

Erfolgskritisch ist die Bereitstellung geeigneter Trainingsdaten. Die Trainingsdaten sollen einen optimalen Zustand des Systems darstellen. Da dieser meistens nicht aus Online-Daten zu gewinnen ist, müssen diese Trainingsdatensätze selbst im Modell erstellt werden.

Im Wiedergabetest werden die Trainingsdaten mit den Daten aus den Läufen mit den trainierten Reglern visuell und anhand verschiedener Kennwerte verglichen. Ist die Übereinstimmung gut, war die Trainingsmethode erfolgreich.

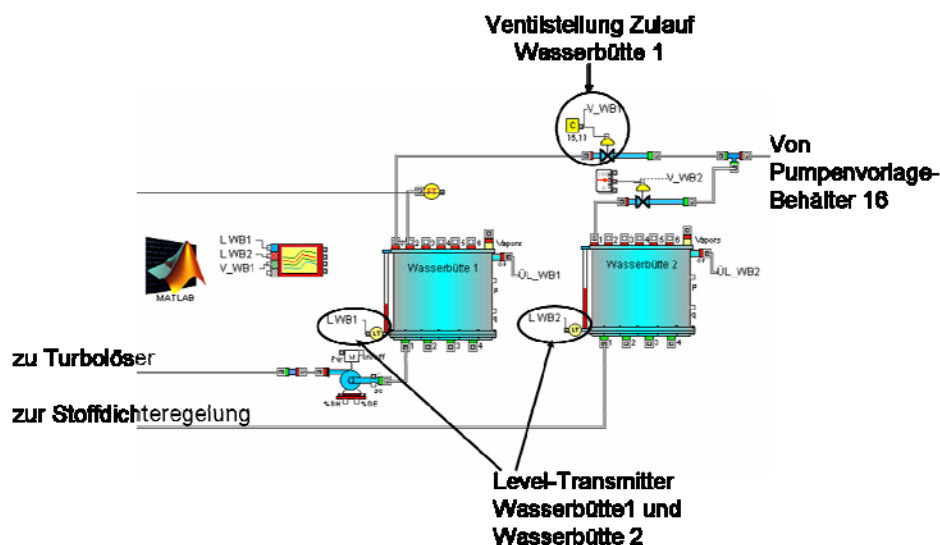
7.2 Ergebnisse

7.2.1 Werk A

Regelungs- aufgabe

Im Werk A erfolgt das Rückwassermanagement über zwei Wasserpuffer. Die Wasserbütte 1 dient als Pulpervorlage, die Wasserbütte 2 als Wasserpuffer für Verbraucher in der Stoffaufbereitung. Die Verteilung des Zulaufs zu beiden Behältern wird im realen Betrieb manuell durch das Personal geregelt.

Die Abbildung zeigt den relevanten Modellausschnitt:



Nutzen

Eine optimale Regelung der Rückwasserverteilung auf die zwei Behälter ersetzt das Operatorenverhalten oder eine feste Zulaufeinstellung und ergibt folgende Vorteile:

1. Vermeidung von Über- und Leerläufen der beiden Wasserpuffer und damit eine Minimierung des Wasserverlusts
2. Möglichkeit einer Reduzierung des Kreislaufwasservolumens und damit geringere Wasser-Verweilzeiten

Dabei ist die Verfügbarkeit von Rückwasser in allen Betriebssituationen sicherzustellen. Da das Werk A einen geschlossenen Wasserkreislauf hat, ist die Verfügbarkeit von Wasser sowie die Vermeidung von Überläufen zeitweise problematisch. Durch den übersichtlichen Aufbau des Werkes A eignete sich das Werk sehr gut, um die Funktionalitäten von Fuzzy-Regelungen zu untersuchen.

| | |
|------------------------------|--|
| Reglerstruktur | Die aktuellen Füllstände beider Wasserbütten wurden in jedem Simulationsschritt an den Fuzzy-Regler übergeben. Zudem wurde die Änderungsrate der Füllstände ($\text{Rate} = \text{Füllstand}(t) - \text{Füllstand}(t-1)$) berechnet. Die Änderungsraten der Füllstände geben nicht nur Auskunft über das Steigen bzw. Fallen des Füllstands, sondern auch über die Geschwindigkeit der Änderung. Dies gibt dem Regler eine zusätzliche Information zur Schnelligkeit der Schwankungen. Die Füllstandswerte und Änderungsraten der Wasserbütten stellten die Inputs für den Fuzzy-Regler dar. Die Öffnung des Zulaufsventils zur Wasserbütte 1 stellte den Output aus dem Fuzzy-Regler dar. |
| Typ des Fuzzy-Systems | In Vorversuchen wurden sowohl Mamdami- als auch Sugeno-Regler getestet. Es zeigte sich, dass Sugeno-Regler effizienter arbeiten. Da das System sehr schnell wechselnden dynamischen Zuständen unterstand, wurde als Reglertyp ein Sugeno-System gewählt. |
| Performance-Tests | <ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="427 851 1423 1075">▪ Test mit der Basissequenz: In der Basissequenz wurde dem Modell ein aus Originaldaten entnommenes dynamisches Laufverhalten des Pulpers sowie Produktionsmengen der beiden Maschinen vorgegeben. Ein Vergleich der unregelmäßigen Läufe mit den Läufen mit Fuzzy-Regelung ergab eine verminderte Standardabweichung in den Füllständen für die fuzzy-geregelten Läufe um ca. 25-35%.<li data-bbox="427 1086 1423 1344">▪ Test zur Reduzierung des Kreislaufwasservolumens: Mit einer Herabsetzung des Sollwertbereichs für die Regler sowie der Initialfüllstände beim Start der Simulation wurde eine Reduzierung des Kreislaufwasservolumens erreicht. Beide Wasserbütten wurden von einem Startwert von 45% (Wasserbütte 1) bzw. 40% (Wasserbütte 2) auf einen Initialfüllstand von 30% gebracht. Dies war generell möglich, da die Schwankungsbreite der Füllstandsverläufe in den geregelten Läufen niedriger war.<li data-bbox="427 1355 1423 1686">▪ Test auf Robustheit: Es wurden neue Testsequenzen aus den Online-Daten anderer Zeitbereiche erstellt. Es wird jeweils die Produktionsmenge der beiden Kartonmaschinen und das Pulperlaufverhalten vorgegeben. In einer weiteren Testsequenz wurde dem Pulper ein empirisch erstelltes Laufverhalten vorgegeben. Die erstellten Regler konnten in allen Testsequenzen überzeugen. Ein Über- oder Leerlaufen der Wasserbütten konnte in jedem Fall vermieden werden. Die Standardabweichung für beide Wasserbütten gemittelt sinkt durch den Einsatz der Fuzzy-Regelung im Vergleich zu den Originaldaten von 13,5% auf 9,5%. |

**Optimierung der
Regler mittels
ANFIS**

Es wurde versucht, eine weitere Verbesserung der Regler zu erreichen. Hierzu wurde das ANFIS-Optimierungsverfahren angewendet. Da keine Online-Daten vorlagen, die einen optimalen Lauf repräsentieren würden, wurden verschiedene Trainingsdatensätze direkt am Simulationsmodell erstellt:

1. Empirische Erstellung einer Steuerdatenreihe für den Output:

Anhand eines Referenzdatensatzes eines ungeregelten Laufs wurde eine Datenreihe für den Output erstellt, die eine optimalere Wasserverteilung auf beide Büten bewirkt.

2. PI-Regelung für den Füllstand der Wasserbütte 2:

Der Füllstand der Wasserbütte 2 wurde durch einem PI-Regler mit Sollwertvorgabe geregelt.

3. Manuelle Einstellung des Outputs während des Laufs mit Schieberegler:

Das Simulationsmodell wurde im Lauf verlangsamt und mit einem kontinuierlichen Schieberegler auf MATLAB[®]-Basis für den Output versehen. Hierbei wurde die Strategie verfolgt, den Füllstand der Wasserbütte 2 konstant zu halten.

4. Manuelle Einstellung des Outputs während des Laufs mit Stufenregler:

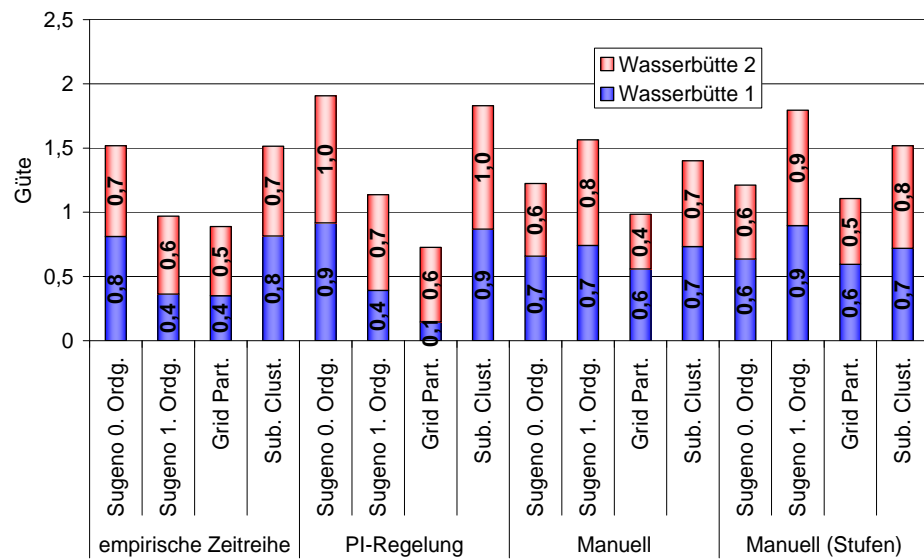
Wie 3., wobei der Schieberegler nicht kontinuierlich variiert werden kann, sondern in 5 festen Stufen.

Diese Trainingsdatensätze wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Natur bewusst gewählt, um die Fähigkeiten des ANFIS-Optimierungsverfahrens kennen zu lernen.

Wiedergabetest

Die Performance der trainierten Regler wurde nun anhand der Übereinstimmung der Simulationsläufe mit den Trainingsdaten bewertet. Der Güteindex wurde hier aus dem Korrelationskoeffizienten und der Übereinstimmung des Mittelwerts, der Standardabweichung und des Datenbereichs aggregiert. Der Güteindex wurde getrennt für die Füllstandsverläufe der Wasserbütten 1 und 2 berechnet und erreicht pro Behälter einen Wert zwischen 0 und 1, wobei ein Wert von 1 eine perfekte Übereinstimmung der Trainingsdaten mit den Simulationsdaten bedeutet.

Die Abbildung zeigt die ermittelten Güteindizes für die einzelnen Regler und die zugrunde liegenden Trainingsdatensätze.



Für jeden Trainingsdatensatz ergibt sich ein Regler mit dem höchsten Güteindex (siehe obige Abbildung) :

| Nr | Trainingsdatensatz | Bester trainierter Regler |
|----|----------------------|---------------------------|
| 1 | Empirische Zeitreihe | Sugeno 0. Ordnung |
| 2 | PI-Regelung | Sugeno 0. Ordnung |
| 3 | Manuell | Sugeno 1. Ordnung |
| 4 | Manuell (Stufen) | Sugeno 1. Ordnung |

Zusammenfassung

Mit Einsatz der Fuzzy-Regler kann eine eindeutige Verbesserung zum Ausgangszustand erreicht werden. Die Regler adaptieren gut an das System. Aufgrund der schnell wechselnden dynamischen Zustände sind schnelle Regelsysteme von Vorteil. Sugeno-Fuzzy-Regler reagieren hier schneller als Mamdani-Fuzzy-Regler. Weiterhin sind scharfe Formen sowie Abgrenzungen der Membership-Funktionen vorteilhaft für schnell reagierende Regelungen.

In den Tests zur Untersuchung der Robustheit der Regler stellte sich heraus, dass alle erstellten Regelkonzepte sehr stabil laufen.

Die Optimierung mit dem ANFIS-Lernverfahren stellte sich zwar als effektiv heraus, jedoch kann die Bereitstellung geeigneter Trainingsdaten ein Problem darstellen.

7.2.2 Werk B**Regelaufgabe**

Im Werk B erfolgt das Rückwassermanagement über den großen Wasserpuffer an der Papiermaschine und verschiedene Wasserbüten in der Stoffaufbereitung. Der eigentliche Pufferbehälter ist hier der Rückwasserbehälter PM an der Maschine. Die Deckschicht wird separat mit Frischwasser ergänzt. Die Rückwasserbehälter in der Schonschicht und Grundsicht werden aus dem Rückwasserbehälter PM ergänzt.

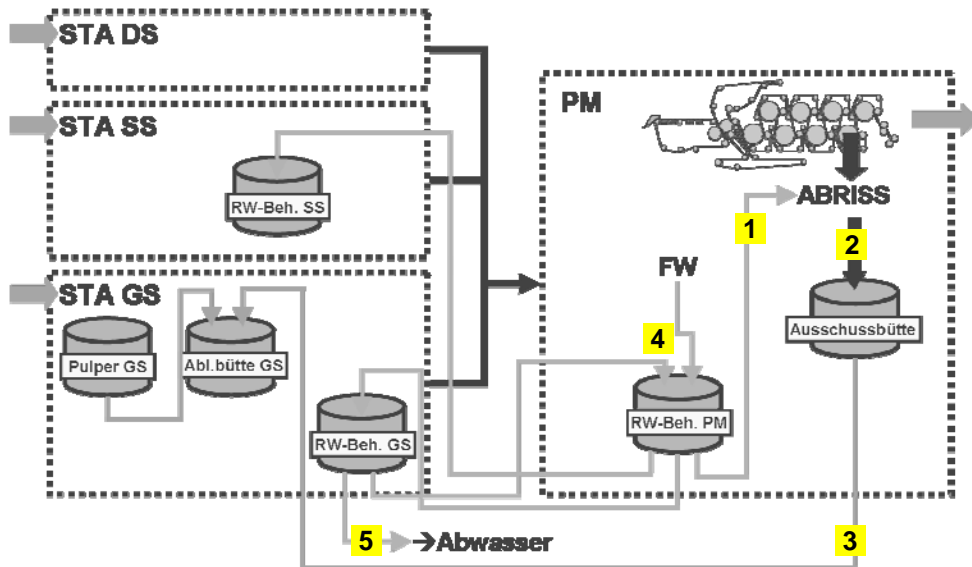
Besonders im Abrissfall entsteht ein hoher Wasserbedarf zur Auflösung des entstehenden Ausschusses. Der Fuzzy-Regler sollte in der Lage sein:

- Frischwasserergänzungen an den Wasserpuffern zu minimieren und
- eine gleichmäßige Abwasserganglinie zu erzielen.

Dabei ist die Verfügbarkeit von Prozesswasser sicherzustellen.

Modellschema und Abrissereignisse

Die Abbildung zeigt ein vereinfachtes Modellschema, in dem nur die für die Regelung wichtigsten Aggregate dargestellt sind:



Die zu erstellende Regelung soll auch während eines Abrissfalls automatisch regeln. Im Abrissfall sind folgende Vorgänge relevant:

| | |
|----------|---|
| 1 | Zur Auflösung des Ausschusses wird Wasser aus dem Rückwasserbehälter PM entnommen. |
| 2 | Der aufgelöste Ausschuss gelangt in die Ausschussbütte. |
| 3 | Von der Ausschussbütte wird in die Ableerbütte der Grundsicht gepumpt. |
| 4 | Wegen des hohen Wasserbedarfs des Rückwasserbehälters PM kann der Behälter mit Frischwasser und/oder einer Rückführung von Wasser aus dem Rückwasserbehälter der Grundsicht ergänzt werden. |
| 5 | Eine weitere wichtige Größe für das Rückwassermanagement ist die Ausschleusung von Superklarfiltrat aus der Grundsicht ins Abwasser. Diese Ausschleusung nimmt direkt Einfluss auf die Wassersituation im Werk. |

Die Frischwasserergänzung des Rückwasserbehälters, die Rückführung von Kreislaufwasser aus der Grundsicht in den Rückwasserbehälter und das Leeren der Ausschussbütte in die Ableerbütte der Grundsicht wurden in einem Grundkonzept umgesetzt. Die Führungsgrößen für diese Größen sind die Füllstände des Rückwasserbehälters PM und der Ausschussbütte. Die Ausschleusung von Abwasser aus dem Superklarfiltratbehälter der Grundsicht nimmt großen Einfluss auf das Wassersystem, weshalb sie in einer separaten Regelung umgesetzt wurde. Es wurden zwei verschiedene Regelkonzepte erstellt. Das Grundkonzept ist dabei in beiden Konzepten vorhanden, die Abwasserausschleusung wurde unterschiedlich geregelt. Es wurden für die Regelkonzepte jeweils andere Führungsgrößen gewählt.

Performance-Tests**▪ Test mit der Basissequenz:**

Beide Regelkonzepte erreichten eine hohe Übereinstimmung mit dem unregulierten Lauf, da hier das manuelle Bedienverhalten des Betriebspersonals in weiten Teilen nachgestellt wird. Der Unterschied zwischen dem unregulierten Lauf, der den normalen Zustand in der Fabrik repräsentiert, und den geregelten Läufen bestand in der bei den geregelten Läufen nicht zum Einsatz kommenden Frischwasserergänzung zum Rückwasserbehälter PM. Im Realbetrieb wurde so verfahren, dass bei einem Sinken des Füllstands des Rückwasserbehälters PM unter seinen Sollwert von 80% die Frischwasserergänzung sofort öffnet und erst wieder schließt, wenn der Sollwert des Füllstandes wieder erreicht ist. Für die Regelkonzepte wurde diese Grenze niedriger, ab einem Füllstandsabfall unter 30%, gesetzt. Die Abwasserausschleusung aus der Grundsicht bestimmt maßgeblich die Abwasserganglinie. In der Basissequenz musste der zusätzliche Frischwasserinput durch diese Ausschleusung wieder ausgeglichen werden, weshalb es zu einem starken Anstieg der Ausschleusung zu Abrissende kommt. Hingegen waren die Abwasserganglinien aus den geregelten Läufen sehr stabil, da kein Frischwasserinput ausgeglichen werden musste.

▪ Test zur Reduzierung des Kreislaufwasservolumens:

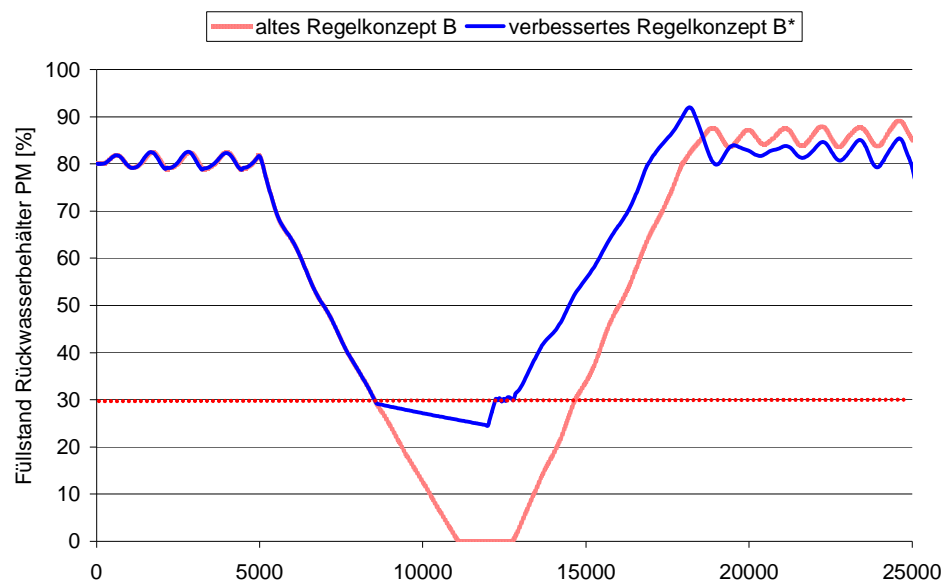
Die Basissequenz ist direkt an Originaldaten angelehnt und repräsentiert eine typische Systemdynamik, in der das Puffervolumen nur gering genutzt wurde. Die Basissequenz ist direkt an Originaldaten angelehnt und repräsentiert eine typische Systemdynamik, in der das Puffervolumen nur gering genutzt wurde.

▪ Test auf Robustheit:

Die in den Testsequenzen dargestellten kritischen Betriebssituationen resultieren aus Papierbahnabrissen. Im Simulationsmodell werden die Abrissquellen zu Nassausschuss (Gautschbruch, Pressenbruch) und Trockenausschuss (Leimpresse, Fertigpapier) zusammengefasst. Unterschiedlich ist hier die Stoffdichte. In den Nassausschusspulpern wird eine geringere Stoffdichte eingestellt (2,5%) als in den Trockenausschusspulpern (3,5%). Dies bedeutet einen weitaus höheren Wasserbedarf zum Auflösen des Ausschusses. Des Weiteren wurden längere Abrisse untersucht. Es wurden Abrisslängen von bis zu 2 Stunden für die Abrissquelle Trockenausschuss und bis zu 0,75 Stunden für die Abrissquelle Nassausschuss in zwei Testsequenzen untersucht. Mit dem Einsatz der Fuzzy-Regler konnte eine deutliche Einsparung in der Frischwasserzufuhr erreicht werden konnte. Des Weiteren ließ sich in den Füllstandsverläufen schon eine bessere Performance des Regelkonzepts B feststellen. Dies äußerte sich außerdem in einer geringeren Standardabweichung der Abwasserausschleusung. Das Regelkonzept B stellte sich demnach als vorerst bestes Regelkonzept heraus. Jedoch ist die Performance in extremen Situationen, wie sie in den Testsequenzen vorkommen, noch verbesserungswürdig.

Verbesserung des Regelkonzepts B

Für Abrisse mit einer Länge oberhalb der festgestellten kritischen Abrisslängen soll eine Verbesserung des Regelkonzepts B erfolgen, nachfolgend als B* benannt. Ab einem Absinken des Füllstandes des Rückwasserbehälters PM unter eine Grenze von 30% wurden die durch PI-Regelung abgesicherten Rückwasserbehälter der Schonschicht und Grundsicht, die aus dem Rückwasserbehälter PM ergänzt werden, mit in die Regelung einbezogen. Bei einem zu niedrigen Füllstand des Rückwasserbehälters PM wurden zusätzlich die Sollwerte der Füllstandsregelungen für die Rückwasserbehälter in der Schonschicht und Grundsicht herabgesetzt. Dadurch bestand für diese Behälter kein Bedarf mehr, aus dem Rückwasserbehälter PM ergänzt zu werden, weshalb folglich für den Rückwasserbehälter PM mehr Wasser zur Verfügung stand. Dies äußerte sich in einer deutlichen Minderung der Steigung im Abfall der Füllstandskurve unter einem Niveau von 30% im Vergleich zum Simulationslauf mit dem ursprünglichen Regelkonzept B:

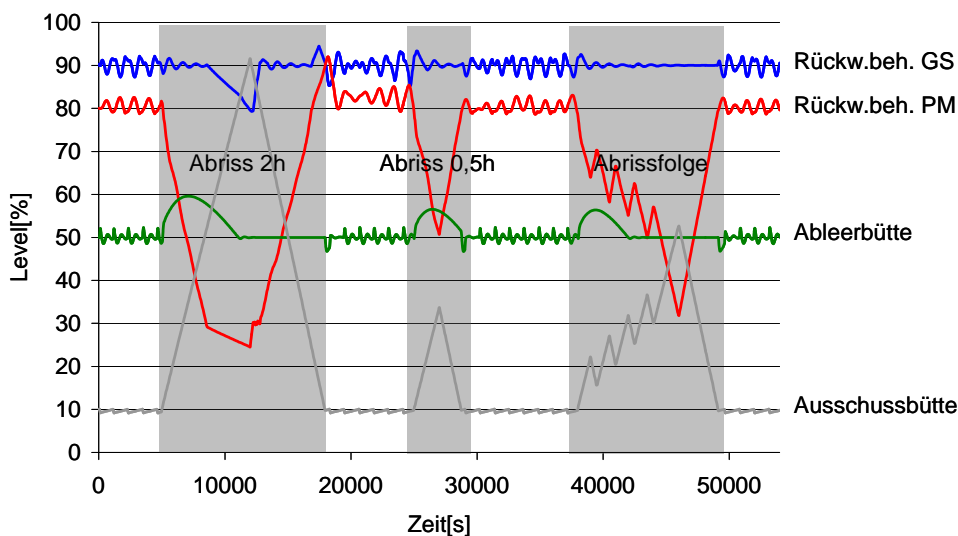


Weitere Regelkonzepte

Auf der Grundlage von Gesprächen mit Experten der Forschungsstelle wurden alternative Regelkonzepte entwickelt. Hierbei wurden andere Führungsgrößen für den Regler vorgegeben. Die Grundidee war, dass durch die Balance zwischen Teilsystemen die Dynamik des Wasserhaushalts summarisch beschrieben werden kann. Getrennt wurde dabei zum einem zwischen Wasser- und Stoffsystem (Konzepte C und D), zum anderen zwischen Papiermaschine und Stoffaufbereitung (Konzept E).

Neue Testsequenz

Zur Prüfung der alternativen Regelkonzepte wurde eine anspruchsvollere Testsequenz definiert, die mehr mögliche extreme Dynamiken aufweist. Die Abbildung zeigt die Füllstandsverläufe für den Lauf mit dem Regelkonzept B*:



Optimierung mittels ANFIS

Zur Kalibrierung der Regler C, D und E wurde das ANFIS-Lernverfahren verwendet. Da das Regelkonzept B* für die Regelung des Rückwassermanagements gute Ergebnisse erzielte, wurde dieses als Grundlage für die Trainingsdaten verwendet. Die Führungsgrößen sowie die Stellgröße für die Regelkonzepte C-E wurden im Simulationslauf mit dem Regelkonzept B* mitgeloggt und dann als Trainingsdaten verwendet.

Regelkonzepte C-E

▪ Regelkonzept C:

Für das Regelkonzept C wird als Führungsgröße der aufsummierte Wasseranteil in allen Stoffbüten verwendet.

▪ Regelkonzept D:

Für das Regelkonzept D wurde als Führungsgröße das Verhältnis der aktuellen dynamischen Wasservolumina zu den aktuellen dynamischen Stoffvolumina aufgezeichnet.

▪ Regelkonzept E:

Im Regelkonzept E wurden Teilbilanzen für die beiden Systeme Papiermaschine (PM) und Stoffaufbereitung (STA) berechnet. Dazu wurde das System an der Grenze geschnitten und jeweils die Wasserinputs und Wasseroutputs berechnet und akkumuliert. Diese Größen geben damit die Gesamtfüllstandsänderung der Teilsysteme wieder.

Zusammenfassung

Alle Regelkonzepte erfüllten die Regelaufgabe. Das Grundkonzept konnte das Operatorenverhalten ersetzen, indem Handregelungen oder typische Verhaltensweisen in die Regelung integriert wurden. Die Fuzzy-Regler können auch kritische Zustände, wie sehr lange Abrisse, gut ausregeln. Die Einstellung des Regelkonzeptes A war im Vergleich zum Regelkonzept B sehr aufwendig. Das liegt daran, dass das Regelkonzept A mit Erfahrungswerten kalibriert werden musste, wohingegen das Regelkonzept B auf einer Berechnung des Stellwertes über eine Bilanz beruht. Mit dem Regelkonzept B bzw. B* wurden die besten Ergebnisse erzielt, weshalb die Daten aus den Läufen mit diesem Regelkonzept als Grundlage für die Erstellung der Trainingsdaten für das Training der Regelkonzepte C-E herangezogen werden konnten. Auch die Regelkonzepte C-E erzielten gute Ergebnisse.

In den Regelkonzepten B-E sind jeweils die Führungsgrößen unterschiedlich. Hieraus ergibt sich für den Einsatz der Regelung im Betrieb die Option, das Regelkonzept zu implementieren, für welches die Führungsgrößen direkt dem Prozessleitsystem zu entnehmen bzw. berechenbar sind.

8 Praxistest

Ziel und Prinzip Um den Erfolg der entwickelten Regelstrategie zu belegen, wurde für das Werk B ein Praxistest durchgeführt.

Die Basissequenz, in der das regelnde Operatorenverhalten identifizierbar sein sollte, enthielt kaum Sollwertänderungen oder andere die Wasserkreislauf-Dynamik überlagernde Operatoreneingriffe. Die Prozessdaten für die Praxistest-Sequenz aus einem aktuelleren Zeitraum waren weitaus stärker durch solche, sich überlagernde Einflüsse geprägt.

Während in der Kalibrierung für die Basissequenz bewusst nur aus der Betriebspraxis bekannte oder aus den Kurven erkennbare Bedieneingriffe wiedergegeben wurden, wurden jetzt auch Störgrößen in das Modell eingebracht. Es wurde angenommen, dass diese Störgrößen unabhängig von der Rückwasserregelung existieren.

Das Simulationsmodell wurde statisch und dynamisch rekali­briert. Die Modellantwort wurde möglichst genau an die Realverläufe angepasst. Das Regelkonzept B* wurde dann mit der neuen Testsequenz im Vergleich zum un­geregelten Simulationslauf geprüft.

Eine Echtzeit-Datenübergabe vom Prozessleitsystem zum Simulationsmodell, wie ursprünglich geplant, war im Werk B technisch nicht realisierbar.

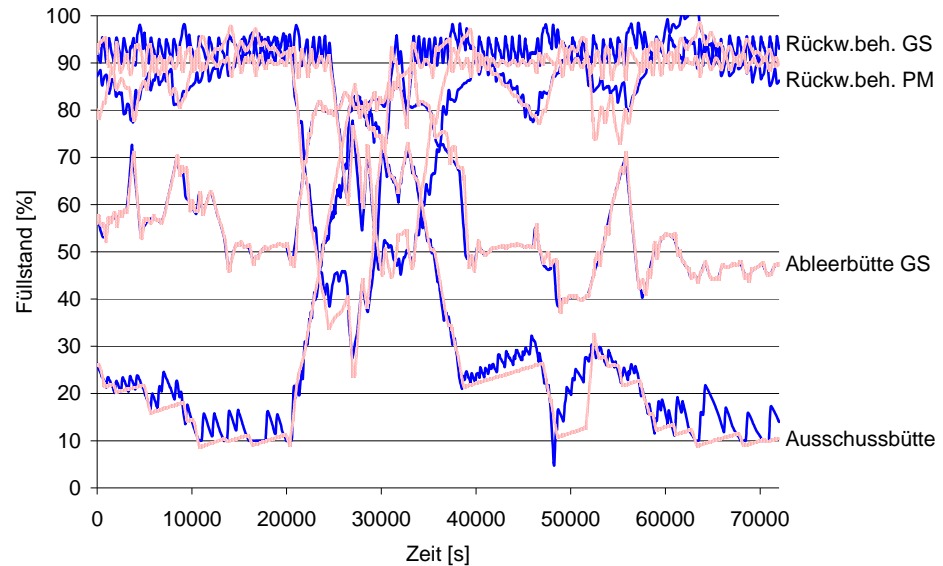
Rekalibrierung des Modells

Das Modell wurde so rekali­briert, dass es die Dynamiken des gewählten Datenzeitraums detailliert wiedergibt. Die Kalibrierung erfolgte in zwei Schritten:

1. statische Kalibrierung: Schaltung, Stoffdichten, Sollwerte und PI-Einstellungen
 2. dynamische Kalibrierung:
 - 2.1. Produktionsverläufe, Betriebsereignisse, Volumenströme, Sollwertänderungen...
 - 2.2. Nachstellen des manuellen Operatorenverhaltens, z.B. Sollwertänderungen
-

**Vergleich
Originaldaten -
Simulationsdaten**

Mit dem rekali­brierten Simulationsmodell konnten die Simulationsdaten (hell) gut in Übereinstimmung mit den Real­daten (dunkel) gebracht werden:



Regel­strategie

Als Regel­strategie wurde das Regel­konzept B* eingesetzt. Diese Regel­strategie orientiert sich an der Berechnung eines Abwasserdefizits und steuert damit die Abwasserausschleusung aus der Grund­schicht unter der Vorgabe, den Gesamt­füll­stand des Systems konstant zu halten.

Ergebnisse

Die Abbildung zeigt einen Vergleich des Simulationslaufs ohne Fuzzy-Regler (dunkel) und mit Fuzzy-Regelkonzept B* (hell):



Es ergab sich eine gleichmäßigere Abwasserganglinie. Die Füllstandsverläufe verhielten sich außerdem stabiler. Mit dem Einsatz der Regelstrategie konnten 5% der Frischwassermenge und der Abwassermenge eingespart werden. Die Standardabweichung der Abwasserganglinie konnte im Vergleich zum Ausgangszustand um 30% reduziert werden.

Auch im Praxistest konnte das Regelkonzept B* damit eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum Ausgangszustand erzielen.

9 Entwicklung systematischer Vorgehensweisen

Ziel Um die Erkenntnisse, die bei der Entwicklung der Fuzzy-Systeme gewonnen wurden, für andere Papierfabriken nutzbar zu machen, wurden systematische Vorgehensweisen abgeleitet.

Systematik der Vorgehensweise Folgendes Vorgehen zur Planung und Entwicklung von Fuzzy-Regelstrategien für ein geregeltes Rückwassermanagement erwies sich als zielführend:

| | | |
|--|--|--|
| 1. Generierung der Wissensbasis | 1.A. Datenaufnahme | <p>Folgende Daten werden bei der Systemaufnahme im Werk erhoben:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaltung ▪ Produktionsdaten ▪ Online-Daten ▪ Analytik ▪ Geometrische Daten ▪ Fahrweisen <p>Ziel bei der Datenaufnahme ist es, den Prozess sowie das Operatorenverhalten zu verstehen.</p> |
| | 1.B. Datenauswertung | <p>Folgende Analysen werden mit der Datengrundlage aus 1.A. durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bilanz ▪ Volumenanalyse <p>Ziel der Analysen ist es, grundlegende Probleme (wie z.B. Wasserengpässe) zu identifizieren und damit die Regelaufgabe festzulegen.</p> |
| | 1.C. Charakterisierung des Rückwasser-managements | <p>Durch Rücksprache mit dem Anlagenpersonal und durch Identifizierung des Verhaltens auf der Grundlage der Online-Daten wird das im Betrieb teils manuell geregelte Rückwassermanagement charakterisiert.</p> |
| | 1.D. Definition kritischer Betriebsereignisse | <p>Kritische Betriebsereignisse wie z.B. Abrisse, Über- und Leerlaufen oder Stillstände, die zu hohem Wasseranfall oder -bedarf führen, werden aufgenommen. Auf dieser Grundlage wird die Regelaufgabe festgelegt.</p> |

| | | |
|---------------------------------------|--|---|
| 2. Konzeption der Fuzzy-Regler | 2.A. Ziele der Regelung | <p>Die Ziele der Regelung werden auf der Grundlage von 1. festgelegt. Ein geregeltes Rückwassermanagement kann folgende Ziele verwirklichen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicherstellung der Verfügbarkeit von Wasser ▪ Vermeidung des Über- oder Leerlaufens von Behältern ▪ Minimierung des Frischwasserbedarfs ▪ Reduzierung der spezifischen Abwassermenge ▪ Gleichmäßiger Abwasseranfall |
| | 2.B. Input-Output-Struktur | <p>Outputs: Stellgrößen, die besonders effektiv auf den Prozess wirken:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zulaufgrößen des Pufferbehälters, z.B. Frischwasserinput ▪ Abwasserausschleusung (nimmt indirekt Einfluss auf den Füllstand des Pufferbehälters) |
| | | <p>Inputs: Messgrößen, die den Prozess charakteristisch beschreiben:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Füllstand der/des Pufferbehälter(s), ggf. Änderungsraten der Füllstände ▪ Bilanz-Abwasserdefizit ▪ Wasseranteil in den Stoffvolumina ▪ Teilbilanzen Stoffaufbereitung und Papiermaschine ▪ Verhältnis dynamisch genutzter Wasservolumina zu Stoffvolumina |
| | 2.C. Wissensstruktur | <p>Mit der Festlegung des Regelwerks wird dem Fuzzy-Regler eine Wissensstruktur hinterlegt. Die Erstellung des Regelwerks erfolgt auf der Grundlage des in 1. erworbenen Wissens. Hierbei werden einerseits das Wissen aus dem Betrieb der Anlage und das Expertenwissen andererseits in das Fuzzy-System integriert.</p> |
| | 2.D. Regler-Typ | <p>Man unterscheidet grundsätzlich 2 Fuzzy-Regler-Typen: Mamdani- und Sugeno-Systeme.</p> <p>Muss der Regler starke Schwankungen ausgleichen, die zeitlich schnell wechseln, eignen sich Sugeno-Systeme besser als Mamdani-Systeme, da sie effizienter arbeiten.</p> |
| 2.E. Einstellung der Regler | <p>Die Einstellung der Regler erfolgt entweder nach Erfahrungswerten oder durch Einsatz des ANFIS-Verfahrens bei Vorhandensein geeigneter Trainingsdaten</p> | |

**Notwendigkeit
des Einsatzes
eines
Simulations-
modells**

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden für beide untersuchten Werke dynamische Simulationsmodelle erstellt, mit denen die entwickelten Fuzzy-Regelstrategien getestet werden konnten. Dies diente der Kalibrierung der Regler sowie der Überprüfung ihrer Funktionalität. Dabei wurden auch Extremsituationen wie z.B. sehr lange Abrisse getestet. In der Realität lassen sich Betriebsversuche in diesem Maße nicht durchführen. Jedoch ist der Aufwand für Aufbau und Kalibrierung genauer dynamischer Simulationsmodelle hoch. Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten den Schritt der dynamischen Modellbildung zu umgehen:

- **Einsatz adaptiver Regelkonzepte:**
Regelkonzepte wie das Konzept B und B* für das Werk B basieren auf Bilanzberechnungen und sind somit adaptiv. Eine aufwändige Anpassung der Reglereinstellungen kann damit vermieden werden.
- **Optimale Trainingsdatensätze:**
Sind „optimale“ Trainingsdaten vorhanden, können die Fuzzy-Regler mithilfe des ANFIS-Verfahrens offline eingestellt werden. Voraussetzung dafür ist, dass der Trainingsdatensatz einen Zeitraum mit genug Varietät beinhaltet sowie mit Blick auf die Ziele der Regelung (z.B. minimaler Frischwassereinsatz, gleichmäßige Abwasserganglinie) der Prozess in verschiedenen Betriebssituationen optimal geführt wurde.

**Fuzzy-Konzepte
für typische
Regelaufgaben**

Die Problematiken, die im Rahmen der Forschungsarbeiten am Beispiel zweier Praxisfälle erarbeitet wurden, stellen typische Problemstellungen von Rückwassersystemen in Papierfabriken dar:

- Das Werk A repräsentierte mit der Regelung der Wasserverteilung zwischen zwei parallel geschalteten Bütten ein in Rückwassersystemen oft vorkommendes Element.
 - Im Fall des Werkes B wurde die typische Problematik der Wasserverfügbarkeit im Fall von Abrissen behandelt.
-

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Kosten-Nutzen-Darstellung Der wirtschaftliche Nutzen der Forschungsergebnisse liegt in der Einsparung von Betriebskosten und Investitionskosten. Anhand eines Kostenbeispiels wird folgend der Nutzen, der sich durch Einsatz von Fuzzy-Regelungen ergibt, abgeschätzt und den Kosten für die Anschaffung und Implementierung eines Fuzzy-Systems gegenübergestellt.

Kostenbeispiel Frischwasser- und Abwassermenge

Durch die Reduzierung bzw. Vermeidung unspezifischer Frischwasserzugaben wie Frischwassersicherungen für Wasserpuffer und die damit verbundene Reduzierung der Abwassermenge können wasserbezogene Kosten reduziert werden.

Die Höhe möglicher Einsparungen zeigt ein Beispiel einer Modellpapierfabrik mit kmU-Charakter und folgenden Eckdaten:

| | |
|------------------|----------------------|
| Produktionsmenge | 100.000 t/a |
| Abwassermenge | 10 m ³ /t |

Bei Direkteinleitern betragen die spezifischen Betriebskosten für die Abwasserreinigung im Jahr 2004 im Mittel 0,33 €/m³ (Wert gewichtet über Abwassermenge, Bereich 0,02 - 0,69 €/m³). Diese Angaben enthalten nicht die Aufwendungen für Abschreibungen, für Abfallbehandlung/-verwertung/-entsorgung und die Abwasserabgabe. Die spezifischen Einleitkosten der Indirekteinleiter liegen bei 0,75 €/m³ (Mittelwert gewichtet über Abwassermenge, Bereich 0,24 - 2,1 €/m³) [1].

Das Nutzungsentgelt für das Frischwasser beträgt im Mittel 0,02 €/m³ (Bereich 0 – 0,1 €/m³). Die Betriebskosten für die Brauchwasseraufbereitung betragen im Mittel 0,10 €/m³ (Bereich 0,01 – 0,41 €/m³) [18].

Für das Werk B konnte in der Basissequenz für den Einsatz des Fuzzy-Regelkonzepts B* eine Frischwasserreduzierung von ca. 4% festgestellt werden. Die Reduzierung der Frischwasser- und Abwassermenge um 4% bedeutet für die Modellpapierfabrik eine Einsparung von ca. 17.900 €/a im Falle einer Direkteinleitung oder ca. 34.700 €/a bei Indirekteinleitung.

Kostenbeispiel Abwasserabgabe

Ein gleichmäßiger Abwasseranfall sichert die Leistungsfähigkeit der Kläranlagen. Durch den Einsatz der Regelkonzepte kann die Abwasserganglinie deutlich vergleichmäßigt werden. Instabile Betriebsverhältnisse mit der Folge von Grenzwertüberschreitungen, die zu einer massiven Erhöhung der Abwasserabgaben führen können, lassen sich damit verhindern. Bei ungleichmäßigem Abwasseranfall kann es zu Grenzwertüberschreitungen mit der Folge einer Erhöhung der Abwasserabgabe kommen. Die Größenordnung solcher finanzieller Belastungen einer Papierfabrik nach dem gültigen Abwasserabgabengesetz veranschaulicht folgendes Beispiel:

In einem kleinen und mittelständischen Unternehmen mit der Produktion altpapierhaltiger Papiere fallen Kosten von 70.000 € pro Jahr für die Abwasserabgabe an. Bei Überschreitung der gesetzlichen Anforderungen können sich die Kosten für die Abwasserabgabe, wie in der Tabelle gezeigt, um 40 % oder noch weiter erhöhen. Bei stabilem Betrieb lassen sich diese Zusatzkosten vermeiden.

Rahmenbedingungen

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| Jahresproduktion | 100.000 t/a |
| Abwassermenge | 1.000.000 m ³ /a |
| CSB-ÜW | 200 mg/l |
| Abgabesatz | 35 €/SE |
| Schadeinheit | 50 kg/a |
| Schadstoff-Fracht | 200.000 kg/a |

| | | Einhaltung ÜW | ÜW überschrit- ten | ÜW überschrit- ten |
|---|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| Abwassermenge | m ³ /a | 1.000.000 | 1.000.000 | 1.000.000 |
| CSB-ÜW | mg/l | 200 | 200 | 200 |
| CSB-Messwert | mg/l | 200 | 230 | 280 |
| Abgabesatz | €/SE | 35 | 35 | 35 |
| Schadeinheit | kg/a | 50 | 50 | 50 |
| Schadstoff-Fracht | kg/a | 200.000 | 200.000 | 200.000 |
| Zuschlag SE bei nicht Einhaltung ÜW | % | 0% | 15% | 40% |
| Schadeinheiten | - | 4.000 | 4.600 | 5.600 |
| Kosten: | € | 140.000 | 161.000 | 196.000 |
| Minderung für Einhaltung MA | % | 50% | 50% | 50% |
| Abwasserabgabe | €/a | 70.000 | 80.500 | 98.000 |

ÜW: Überwachungswert SE: Schadeinheit MA: Mindestanforderungen

Abschätzung der Aufwendungen

Die Aufwendungen zur Einführung der Regelsysteme beinhalten die Anschaffungskosten eines Projektierungswerkzeugs und die Kosten für den Entwurf der Regelungen und die Implementierung in das Prozessleitsystem, sowie die Einarbeitung des Anlagenpersonals.

**Kosten-Nutzen-
Gegenüber-
stellung**

| Kosten | Nutzen |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Fuzzy Add On: Basislizenz, Funktionsbaustein, OPC: € 3740 (Beispiel Siemens FuzzyControl++ [19]) Regelkonzepterstellung und Implementierung: ca. € 10.000 - € 30.000 | <ul style="list-style-type: none"> 4% FW-Reduktion und 4% Abwasser-Reduktion Modellpapierfabrik: Direkteinleiter: 17900 €/a Indirekteinleiter: 34700€/a Gleichmäßigere Abwasser-ganglinie Bsp.: ~10000€/a Kostenein-sparung bei Einhaltung von Überwachungswerten |
| Summe: € 13.740 - € 33.740 | Summe: € 27.900 - € 44.700 |

Es ergibt sich für Direkteinleiter eine Amortisationszeit von unter 1,2 a, für Indirekteinleiter von unter 0,75 a.

Ansprechpartner für weitere Informationen:

Dipl.-Ing. Desiree.Somnitz
Tel. 089/12146-455
desiree.somnitz@ptspaper.de

Papiertechnische Stiftung PTS
Heißstraße 134
80797 München
Tel. (089) 1 21 46-0
Fax (089) 1 21 46-36
e-Mail: info@ptspaper.de
www.ptspaper.de

Literaturverzeichnis

- 1 JUNG H., DEMEL I., GÖTZ B.
Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papierindustrie – Ergebnisse der Wasserumfrage 2004.
Wochenblatt für Papierfabrikation 9, 2006, 478-481
- 2 KAPPEN J., DEMEL I., ÖLLER H.-J.
Besondere Anforderungen an Wasserkreisläufe beim Deinken
Wochenblatt für Papierfabrikation 124:20, 910-917 (1996)
- 3 KAPPEN J.
Bestandsaufnahme und Verbesserung von Wasserkreisläufen in Papierfabriken mit integrierter Altpapierstofferzeugung
Abschlussbericht AiF 9584 / PTS-Forschungsbericht 03/96
München: PTS 1996
- 4 DIETZ W., JUNG H., SCHRECKENBACH S., HAMM U.
Verfahrenstechnische Vermeidung der mikrobiellen Geruchsbildung
Wochenblatt für Papierfabrikation, 133: 14-15, 903-907 (2005)
- 5 HÜSTER R.
Integrierte Schleimlimitierung
Wochenblatt für Papierfabrikation 123:6, 254-258 (1995)
- 6 KLAHRE J., LUSTENBERGER M. und H.-C. FLEMMING
Mikrobielle Probleme in der Papierfabrikation
Teil 1: Schäden, Ursachen, Kosten, Grundlagen
Das Papier 50:2, 47-53 (1996)
- 7 BAKER J. R.
Reducing mill effluent and dealing with the consequences
Papermakers Conference 1995
Atlanta: Tappi Press 1995 S.341 - 344
- 8 LAUKKANEN I., LAPPALAINEN J., SILVENNOINEN J.
Enhancement studies on operation and control of water usage in paper mills
Engineering & Papermakers: Forming Bonds for Better Papermaking.
Atlanta: TAPPI Press 1997. S. 67 - 73
- 9 ORCCOTOMA J.A., PARIS J., PERRIER M. u.a.
Dynamics of white water networks during web breaks
Tappi Journal 80:12, 101 - 110 (1997) 2
- 10 BLUM O., KAPPEN J., DIETZ W.
Verringerung des Frischwasserbedarfs und der spezifischen Abwassermenge in Altpapier verarbeitenden Papierfabriken durch dynamische Prozesssimulation.
Abschlussbericht AiF 11529 / PTS-Forschungsbericht PTS-FB 07/00
München: PTS 2000
- 11 CROTEAU A.P., ROCHE A.A.
Study of broke handling and white water management using a dynamic simulation
Pulp and Paper Canada (PPAC) 88:11, S. 74 (1987)
- 12 BONHIVERS J.-C., PERRIER M., PARIS J.
Model predictive control for integrated management of whitewater tanks
Tappi Journal Nov. 2002, S. 15-21

- 13 SHAFIEI S., DOMENECH S., KOTELES R., PARIS J.
System closure in an integrated newsprint mill, practical application of the genetic algorithm
Pulp & paper Canada 105:6, pp. 40-43 (2004)
- 14 SHAFIEI S., FLOQUET P., DOMENECH S., PARIS J.
Genetic Algorithm Reliability for White Water Network Optimization in Pulp and Paper Industry
Chemical Engineering Transactions 6, p. 221-226 (2005)
- 15 BORGELT C., KLAWONN F., KRUSE R., NAUCK D.
Neuro-Fuzzy-Systeme
Wiesbaden: Vieweg 3. Auflage 2003
- 16 IDEAS Simulation Inc.
<http://www.IDEAS-Simulation.com>
- 17 The Mathworks, Inc.
<http://www.mathworks.com>
- 18 HUTTER A.
Wasser- und Rückstandsumfrage in der deutschen Papierindustrie (2004)
Abschlussbericht INFOR 83R
München: PTS 2004
- 19 SIEMENS AG
<http://www.siemens.com/fuzzycontrol>