

Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozeßautomation der
Technischen Universität München

Numero-Fuzzy Modell zur Beschreibung des Foulings bei der Erhitzung von Milch

Johannes Petermeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Weisser

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.Ing. habil. A. Delgado
2. Univ.-Prof. Dr.Ing. habil. J. Hinrichs,
Universität Hohenheim

Die Dissertation wurde am 17. April 2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 8. Juli 2003 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozeßautomation an der Technischen Universität München.

Allen voran Herrn Professor Dr.-Ing. Antonio Delgado Dank für die Überlassung des Themas und die hilfreiche und aufmunternde Unterstützung, bei Privatdozent Dr.-Ing. Thomas Becker für die anspornenden Diskussionen. Er entwickelte zusammen mit Dr.-Ing. Ernst Murnleitner und Dipl.-Ing. Tomas Kurz den Kern des Fuzzy-System, das in dieser Arbeit Anwendung fand und denen ich, ebenso wie Dipl.-Ing. Markus Fellner und Dipl.-Ing. Marcus Schmitz für die Hilfe beim Erlernen von C++ danken möchte. Dipl.-Ing. Rainer Benning für die Hilfe beim Erwerb des technologischen Rüstzeugs des Milchkochens und den produktiven Diskussionen. An Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Hinrichs Dank für die Übernahme des Koreferats und den wissenschaftlichen Rat.

Auch allen anderen Kollegen, wie Dr.-Ing. Christoph Hartmann, Dr. rer. nat. Harald Schleip, Dipl.-Ing. Martin Mitzscherling, Dipl.-Ing. Gunter Fischer, Dipl.-Chem. Dipl.-Ing. Volker Stippl Dank für die Hilfe.

Für die finanzielle Förderung durch die Industriepartner möchte ich mich stellvertretend für Friesland Coberco Dairy Foods bei den Herren John Wokke, Rudy de Wit und Cor de Boer, für Tetra Pak bei Herrn Klaus Bake und Bert-Ove Bergman sowie für Nestlé bei Herrn Antoine Margot bedanken.

Besonderen Dank auch an meine Familie, besonders meiner Frau Franziska und meinen Freunden, denen ich viel zu verdanken habe: „Keiner lebt aus sich allein“ - „Vergelt's Gott!“ an alle, die mir bis jetzt geholfen haben.

Freising, Herbst 2002

Hannes Petermeier

Formelzeichen und Symbole

Lateinische Buchstaben

A	$[m^2]$	Fläche
a_i		Ausgangsgröße
B^*	$[-]$	bakteriologischer Effekt
C	$[kg/m^3]$	Konzentration
C^*	$[-]$	chemischer Effekt
D	$[m^2/s]$	Diffusionskoeffizient
d	$[m]$	Durchmesser
E	$[J/mol]$	-
e_i		Eingangsgröße
k	$[W/Km^2]$	Wärmeübergangswiderstand
l	$[m]$	Länge
\dot{m}	$[kg/s]$	Massenstrom
p	$[N/m^2]$	Druck
p		Parameter
\dot{Q}	$[W]$	Wärmestrom
\dot{q}	$[W/m^2]$	Wärmestromdichte
R	$[J/molK]$	Gaskonstante
R_f	$[m^2K/W]$	Foulingfaktor
R_{rel}	$[-]$	relative Rauigkeit = $\frac{R_z}{d_{hyd}}$
r_i		Regel
S	$[-]$	Schwankung
T	$[K]$	Temperatur
t	$[s]$	Zeit
t		Stützpunkt
\dot{V}	$[m^3]$	Volumenstrom

Griechische Buchstaben

α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
β	[m/s]	Stoffübergangskoeffizient
δ	[m]	Schichtdicke
η	[kg/ms]	dynamische Viskosität
ϑ	[°C]	Temperatur
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
μ		Zugehörigkeitsfunktion
ρ	[kg/m ³]	Dichte
χ		Zugehörigkeitsfunktion
ψ	[-]	Widerstandszahl für Druckabfall

Indizes

A	Aufgefaltet	m	mittel
ad	adsorbiert	N	nativ
agg	aggregiert, Aggregation	P	Produkt
akk	akkumuliert, Akkumulation	p	Druck
anf	Anfang	r	Abtragung (<i>removal</i>)
d	Ablagerung (<i>deposit</i>)	S	Schicht
den	denaturiert	U	aufgefaltet
f	Fouling	V	Verlust
hyd	hydraulisch	W	Wasser
imp	Implikation	w	Wand
k	Wärmeübergang		

Dimensionslose Kennzahlen

Nu	Nusselt-Zahl = $\frac{\alpha d}{\lambda}$
Re	Reynolds-Zahl = $\frac{wd_{hyd}\rho}{\eta}$
Sc	Schmidt-Zahl = $\frac{\eta}{\rho D}$
Sh	Sherwood-Zahl = $\frac{\beta d_{hyd}}{D}$
Bi	Biot-Zahl = $\frac{k_0 \delta}{\lambda}$

1. Einführung

1.1. Problembeschreibung

Fouling, die unerwünschte Bildung von Ablagerungen auf Erhitzerflächen, ist ein bedeutendes, noch nicht vollständig gelöstes Problem der Verfahrenstechnik (Taborek *et al.* 1972, Kessler 1996, Visser & Jeurnink 1997). Insbesondere in der milchverarbeitenden Industrie bei der Herstellung von Trinkmilch oder der Vorverarbeitung von Milch besitzt Fouling hohe Bedeutung, da es auf drei Weisen den Erhitzungsprozeß beeinflusst. Fouling vermindert die Prozeßleistung, da die abgelagerten Produktbestandteile sowohl die Strömung als auch den Wärmeübergang beeinträchtigen (Sandu & Lund 1985, Sandu & Singh 1994), was sich in der Folge auf die Produktqualität auswirkt. Darüberhinaus verkürzt das erforderliche Entfernen der Ablagerungen die Produktionszeit. Reicht in der chemischen Verfahrenstechnik oftmals eine jährliche Reinigung aus, erfordern die Hygiene- und Qualitätsanforderungen in der Milchverarbeitung eine tägliche Reinigung.

Faßt man die verschiedenen von Fouling betroffenen Industrien zusammen, so belaufen sich die durch Fouling verursachten Mehrkosten bei hochindustrialisierten Ländern auf etwa 0,3, bei wenig industrialisierten Ländern auf etwa 0,15 Prozent des Bruttosozialprodukts (VDI 1997). Überschlägt man in den Niederlanden ermittelte Daten, so betragen die durch Milchfouling verursachten Kosten in Europa etwa 260 Millionen Euro. Neben den bereits erwähnten zusätzlichen Wartungs-, Energie- und Reinigungskosten schlagen noch die durch Überdimensionierung höheren Investitionskosten zu Buche.

Milchfouling, wie im folgenden „Ablagerungsbildung“ kurz genannt werden soll, ist auf Grund der vielgestaltigen und komplexen Vorgänge nur teilweise erforscht. Es läßt sich offensichtlich nicht vollständig verhindern. Daher erweisen sich Strategien zur Vermeidung oder gar Verhinderung dieser Belagbildung von besonderem Interesse. Gäbe es eine umfassende Darstellung aller das Fouling beeinflussenden Effekte, so wäre es möglich, Konzeption und Betrieb von Erhitzungsanlagen hinsichtlich der Standzeit bei zumindest gleichbleibender, wenn nicht verbesserter Produktqualität, zu optimieren. Experimente, bereits im Labormaßstab, erweisen sich als teuer und aufwendig. Darüberhinaus be-

schränkt sich die Gültigkeit der experimentiellen Ergebnisse oftmals auf die Versuchsanordnung (Anlage, Produkt).

Betrachtet man die Milchfouling betreffende Literatur, so werden einzelne Größen, Anlagenabschnitte oder Temperaturbereiche betrachtet. Zur Modellierung von Milchfouling setzen z. B. Lalande & Corrieu (1981) die Prozeßtemperatur und den Ammoniakgehalt der Milch ein, de Jong *et al.* (1992) die β -Laktoglobulin-Denaturierung und Schraml (1993) modelliert anhand experimentieller Daten die Anlagerungsrate als Funktion der Zeit. Um die Änderung der Schichtdicke zu erhalten, setzen Belmar-Beiny *et al.* (1993) das Verhältnis der Ansatzmasse am Anfang und am Ende der Erhitzungseinheit als Funktion der Wandschubspannung zusammen mit der dynamischen Viskosität und dem Rohrdurchmesser an. Schreier & Fryer (1995) ermitteln die Änderung der Biot-Zahl in Abhängigkeit der Temperatur an der Wand und im Strömungskern sowie der Reynoldszahl.

1.2. Motivation

Dieser Abschnitt umreißt die bei jeglichem Fouling auftretenden Phänomene und faßt dabei die Darstellungen von (Epstein 1983, Bohnet 1985, VDI 1997) zusammen. Darüberhinaus werden in der Literatur offene Fragestellungen kurz angerissen. Die grundlegenden physikalischen und chemischen Phänomene, die den einzelnen Foulingphänomenen zugrundeliegen, lassen sich in fünf Kategorien einteilen.

Kristallisationsfouling liegt vor, wenn aus der Lösung auf der Wärmetauscheroberfläche Salze auskristallisieren. Salze normaler Löslichkeit fallen auf unterkühlten und Salze mit umgekehrter Löslichkeit auf überhitzten Oberflächen aus. Zusätzlich kann sich durch Ausfrieren oder Erstarren auf einer unterkühlten Oberfläche ein Belag bilden. Bei *Partikelfouling* akkumulieren sich im Fluid suspendierte Teilchen auf der Wärmetauscheroberfläche. Trennt die Schwerkraft die Partikel vom Fluid, spricht man von *Sedimentationsfouling*. Tritt die Belagbildung an der Oberfläche durch chemische Reaktionen auf, spricht man von *Reaktionsfouling*. Die Oberfläche ist in diesem Fall inert. Bei *Korrosionsfouling* häufen sich an der Wärmetauscheroberfläche Korrosionsprodukte an und bei *Biofouling* bilden Makro- oder Mikroorganismen zusammen mit ihren Stoffwechselprodukten den Belag. Foulingvorgänge innerhalb einer der genannten Gruppe unterliegen im wesentlichen den gleichen Gesetzmäßigkeiten.

Häufig wird der Foulingzustand durch einen Faktor R_f gekennzeichnet,

$$R_f(t) = \frac{1}{k_f(t)} - \frac{1}{k_0} \quad (1.1)$$

wobei k für den Wärmeübergangswiderstand mit (Index f) und ohne Belag (Index 0) steht. Betrachtet man den für die Belagbildung verantwortlichen Massentransport, so läßt sich allgemein schreiben

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_d(t) - \dot{m}_r(t), \quad (1.2)$$

d. h. man betrachtet die Nettoanlagerungsrate (f für Fouling) aus Belagbildung (Index d für *deposition*) und Abtrag (r für *removal*).

Am zeitlichen Ablauf von Fouling lassen sich drei Phasen unterscheiden (vgl. Abbildung 1.1). In der Induktions- oder Eingangsphase läßt sich kein nennenswertes Fouling beobachten, und die saubere Oberfläche wird für die weitere Belagbildung konditioniert. Dies geschieht durch die Bildung von Keimstellen an der Oberfläche. In der Übergangsphase liegt schon Belag vor, Veränderungen in Prozeßgrößen wie Temperatur oder Druck sind zu beobachten. In der Foulingphase ist die Oberfläche bereits mit den das Fouling kontrollierenden Schlüsselkomponenten belegt.

Je nach Prozeßbedingungen (z. B. Produkteigenschaften, Prozeßbedingungen, Reinigungserfolg) können allerdings die Induktions- und Übergangsphasen

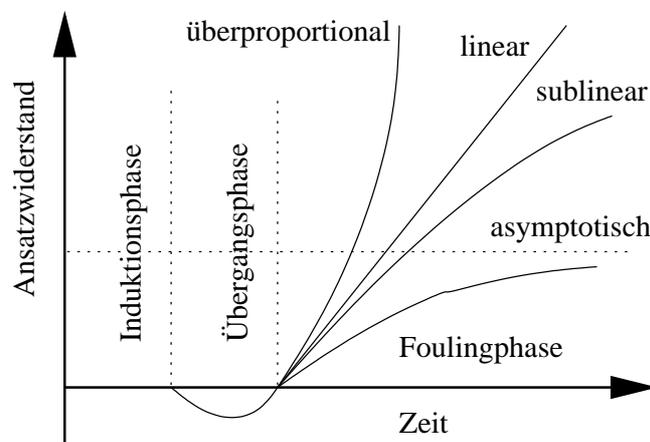


Abbildung 1.1.: Mögliche qualitative Verläufe des Foulingwiderstands (Bohnet 1985, Kessler 1996).

so stark verkürzt sein, daß gleich zu Beginn starkes Ansatzwachstum stattfindet. Im Fall von Kristallisations- und Reaktionsfouling kann sich mit zunehmender Temperatur die Induktionsphase durch das Ansteigen der Übersättigung und der Reaktionsgeschwindigkeit verkürzen. Ein anderer Effekt besteht in der Verkürzung der Induktionsphase durch die zunehmende Rauigkeit. Hier liegen vermehrt Keimstellen vor, Zonen geringer Strömungsgeschwindigkeit treten auf und der diffusive Stofftransport erhöht sich.

Abhängig von den zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Prozessen unterscheidet sich das Wachstum der Foulingschicht (Abbildung 1.1). Dies hängt davon ab, bis zu welchem Maß der Belagbildung eine Abtragung entgegenwirkt oder die Schichtbildung durch eine Autoretardation des Massentransports verlangsamt wird. Je nach Ansatzmaterial altert mit zunehmender Prozeßzeit die Ansatzschicht, was sich auf die Wärmeleitfähigkeit, Dichte oder Festigkeit der Foulingschicht auswirkt.

Bei konstanter Differenz $\dot{m}_f(t)$, siehe Gleichung 1.2, zwischen Ablagerungs- und Anlagerungsrate spricht man von *linearem* Fouling. Geht $\dot{m}_f(t)$ für $t \rightarrow \infty$ gegen Null, so erhält man abnehmendes Foulingverhalten. Geht $\dot{m}_f(t)$ nach endlicher Zeit gegen Null, so erhält man asymptotisches Fouling. Das sogenannte Sägezahnverhalten liegt vor, wenn nach kritischen Intervallen große Teile des Belages abgerissen und mit der Kernströmung fortgeschwemmt werden. Dabei limitieren die Schichtdicke oder Verweilzeit die Intervalle.

Hinsichtlich des Foulingverhaltens gehört Milch zu den bestuntersuchten Fluiden. Neben den bereits beschriebenen allgemein wirkenden Prinzipien beeinflussen hier also noch die Wechselwirkungen innerhalb der Milchbestandteile die Belagbildung. Das heterogene kolloidale System Milch setzt sich aus Proteinen, Zucker, Fett, Mikroorganismen und Salzen zusammen, wobei Laktose, Molkenproteine und Salze in Lösung das Serum bilden und die disperse Phase aus Fett und Kaseinmizellen besteht. Der Einfluß der Erhitzung ist eng mit den physikochemischen Veränderungen der Milch verbunden. Charakterisiert werden diese durch technologische Parameter wie C^* oder B^{*1} , die normiert den thermischen Effekt auf einen besonders hitzeempfindlichen Milchbestandteil bzw. auf besonders hitzeresistente Sporen angeben. Wesentlich ist dabei die Temperatur-Zeit-Kombination, d. h. Fouling nimmt durch die veränderten Temperaturprofile Einfluß auf die Produktqualität.

Auf Burton (1968) geht die Klassifizierung des Belages in zwei Typen zurück. Abbildung 1.2 zeigt die qualitative Verteilung der beiden Belagtypen. Im Be-

¹Der *chemische Effekt* $C^* = 1$, steht für eine Reduktion des Thiamins um 3%, der *bakteriologische Effekt* $B^* = 1$ für eine Reduktion thermophiler Sporen um 9 Zehnerpotenzen. Anzustreben ist daher $C^* < 1$ bzw. $B^* > 1$.

reich von etwa 70 bis 90°C bildet sich ein voluminöser Belag, der vorwiegend aus Proteinen besteht (*Typ A*). Das vorherrschende Protein ist β -Laktoglobulin, der Salzanteil besteht vorwiegend aus Kalzium und Phosphat. Der Belag vom Typ A besteht aus 50 – 60 % Protein, 30 – 50 % Salzen und 4 – 8 % Fett. Bei höheren Temperaturen, d. h. 110 – 140°C, bildet sich ein spröder, körniger Belag, der sich aus 70 – 80 % Salzen, 15 – 20 % Protein und 4 – 8 % Fett zusammensetzt. Diese Beobachtungen werden von vielen Autoren bestätigt, siehe z. B. Lalande & Corrieu (1981).

Vom optischen Eindruck wird der Belag vom Typ A als schwammig, sahnig und weiß beschrieben, seine qualitativen Hafteigenschaften als naß leicht abwischbar, trocken aber sehr fest. Der Belag von Typ B ist dagegen fest, kristallin und glasartig, haftet naß fest und ist trocken leicht abwischbar (Kessler 1996).

Für Ansätze vom Typ A spielen die Proteine eine wesentliche Rolle. Die vorherrschende Meinung ist, daß die Ansatzbildung stark mit der Anzahl „freier“ SH-Gruppen, insbesondere am β -Laktoglobulin, korreliert. Insbesondere folgt daraus, daß die Ansatzbildung mit der Denaturierung des β -Laktoglobulins zusammenhängt. Bei Ansätzen vom Typ B herrscht Kalziumphosphat vor, was in der umgekehrten Löslichkeit dieses Salzes begründet liegt.

Die zeitliche Abfolge der Anlagerung, d. h. ob und in welchem Maße zuerst der Proteinbelag oder der Salzbelag auftritt, wird kontrovers diskutiert.

Wie eingangs erwähnt, gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zu den einzelnen Effekten von Milchfouling. Doch sind diese größtenteils auf einen engen Ausschnitt des für eine vollständige Beschreibung erforderlichen Parameter-raumes beschränkt. Diese experimentiellen Erkenntnisse gepaart mit technologischem Wissen eines Experten stellen ein sozusagen „kognitives“ Modell von

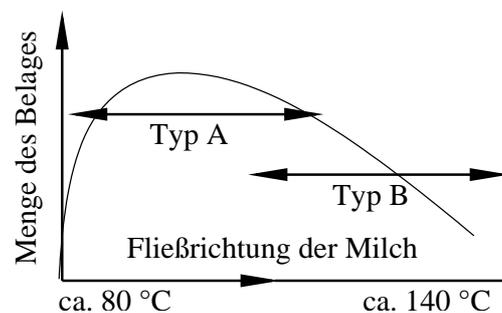


Abbildung 1.2.: Qualitative Verteilung der Ablagerungen bei Milchfouling (Burton 1968)

Milchfouling dar. Ein Weg, dieses Modell mit den herkömmlichen, „numerischen“ Methoden zu kombinieren, bietet sich durch ein *Numero-Fuzzy-Hybrid* (Becker 2002, Petermeier *et al.* 2002) an: Fuzzy WENN-DANN-Regeln, die das umgangssprachliche Rasonnieren des Experten formalisieren und der Weiterverarbeitung mit klassischen Methoden zugänglich machen.

1.3. Einordnung und Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Darstellung eines Modelles zur Beschreibung des Langzeitverhaltens einer aus Röhrenwärmetauscher aufgebauten Erhitzungsanlage zur Herstellung Ultrahocherhitzter Milch (UHT-Behandlung, H-Milch) innerhalb der einzelnen Anlagenabschnitte.

Als Werkzeug wird Fuzzy-Logik zusammen mit klassischen Methoden der Strömungsmechanik und der Wärmeübertragung eingesetzt. Die Validierung des Modells erfolgt anhand von Daten aus einer industriellen Anlage. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten dient der Klärung der Frage, ob die industrielle Anlage hinsichtlich ihres Foulingverhaltens beschrieben werden kann. Zusätzlich ist die Übertragbarkeit des Modells auf andere Industrieanlagen zu bewerten.

Neben diesen Fragen, die den Erhitzungsprozeß und seine Modellierung betreffen, ist die Sensitivität des Modellierungsansatzes zu analysieren. Von besonderer Bedeutung ist das Zusammenwirken der klassischen Modellierung und der Fuzzy-Logik.

Die Grundlage der Modellierung bilden die in der Literatur vorhandenen Daten zum Milchfouling, die Experimente erschöpfen sich in der Aufnahme der Anlagendaten zur Validierung.

1.4. Zusammenhang mit anderen Arbeiten

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung und Validierung eines Numero-Fuzzy-Modells zur Beschreibung des Foulingverhaltens von Milcherhitzern.

Anwendung findet dieses Modell in der Dissertation „Novel Process Synthesis in UHT plants“ von Rainer Benning (2002). Diese Arbeit beleuchtet die technologischen Hintergründe der Milcherhitzung und Fuzzy-Modelle und untersucht anhand des hier beschriebene Modells mittels Parametervariationen die technologischen Möglichkeiten zur Standzeitverlängerung und deren Zusammenhang mit der Produktqualität.

2. Einige Aspekte zum Stand der Forschung

Die Entwicklung eines Numero-Fuzzy-Prozeßmodells der Milcherhitzung unter Berücksichtigung von Fouling erfordert eine gesonderte Darstellung einiger Aspekte. Zuerst wird die Belagbildung im Hinblick auf die für die Modellierung wesentlichen Aspekte dargestellt. Vor diesem Hintergrund werden einige Ansätze zur Beschreibung von Fouling vorgestellt. Ausführungen zur Wahl des Prozeßmodells und ein kurzer Überblick über Fuzzy-Logik bereiten die weiteren Ausführungen vor. Am Ende des Abschnitts wird die zur Validierung verwendete Anlage beschrieben.

2.1. Belagbildung

Ausgehend von den einzelnen Stufen der Belagbildung werden in diesem Punkt die in der Literatur dargestellten Effekte und Modellvorstellungen hinsichtlich der Modellierung zusammengefaßt. Für weiterführende Darstellungen sei auf die Literatur verwiesen z. B. Kessler (1996), Visser & Jeurink (1997).

Ablauf

Modellstudien (Paterson & Fryer 1988) und Erfahrung lehren, daß bei der Erhitzung von Milch in Röhrenwärmetauschern etwa 0.5 bis 1.5 Stunden vergehen, bis eine nennenswerte Belagbildung stattgefunden hat. Es bildet sich eine kompakte Unterschicht, auf der sich körnige Erhebungen bilden (Induktions- und Übergangsphase). Diese Erhebungen wachsen immer weiter zusammen, bis das Wachstum des eigentlichen Belages beginnt (Foulingphase).

Die Anlagerung der kompakten Unterschicht erfolgt durch Adsorption von Proteinen und Salzen an der Grenzfläche fest/flüssig. Ihre Beschreibung mittels der Langmuir-Theorie, z. B. Hege (1984), setzt eine homogene Oberfläche voraus. Desweiteren kann nur ein Molekül pro aktiver Gruppe an der Oberfläche adsorbiert werden. Die Adsorptionsenergie eines anderen Moleküls wird

nicht beeinflusst (keine lateralen Beeinflussungen). In der verdünnten Lösung liegt nur die adsorbierte Spezies bei reversibler Adsorption vor.

Diese als homogen angenommene, kompakte Unterschicht wird durch eine spezifische Masse von etwa $1 - 3 \text{ mg/m}^2$ charakterisiert. Stellvertretend für die Vielzahl von Untersuchungen sei hier in Abbildung 2.1 auf die Arbeit von Karlsson *et al.* (1996) verwiesen.

An Abbildung 2.1 tritt der Einfluß der Temperatur deutlich hervor. Bei niedrigen Temperaturen bildet sich innerhalb der Versuchsdauer ein Plateau aus, das sich bei hohen Temperaturen verkürzt. In diesem Fall weist die Kurve der Anlagerungsmasse einen Wendepunkt auf, nach dessen Durchlaufen die Anlagerung stark ansteigt. Es ist nicht bekannt, ob dieser Effekt bei hinreichend langer Versuchszeit auch bei niedrigen Temperaturen eintritt.

Die Adsorption wird auch stark von den Eigenschaften des Lösungsmittels beeinflusst. Hierzu zählen anwesende Ionen und damit die Ionenstärke sowie pH und Temperatur. Die fluidmechanischen Gegebenheiten wie Geschwindigkeit, Geometrie, Viskosität usw. spielen ebenfalls eine Rolle. Montelius (1988) konnte bei Erniedrigung der Fließgeschwindigkeit von 0.104 m/s auf 0.067 m/s eine dreimal höhere Adsorptionsrate beobachten, was auf eine transportkontrollierte Adsorption hinweist.

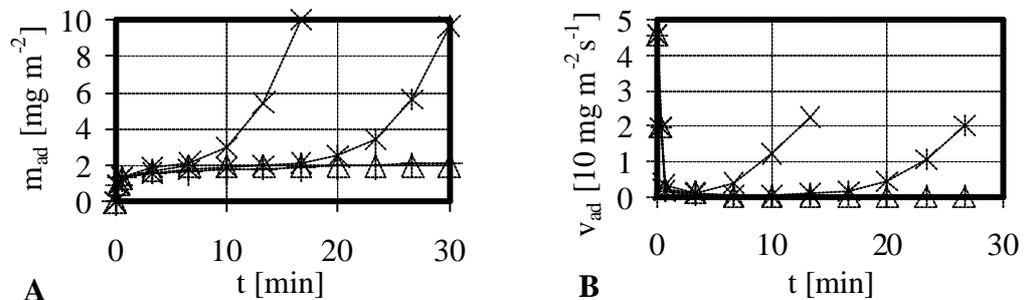


Abbildung 2.1.: Belagmassen aus einer Molkenproteinlösung nach Karlsson *et al.* (1996). Aufgetragen ist über der Versuchszeit bei A die spezifischen Belagmassen m_{ad} , in B die Anlagerungsgeschwindigkeit v_{ad} für $25(+)$, $73(\Delta)$, $76(*)$ und $78(\times)$ °C. Die Anlagerungsgeschwindigkeit wurde aus A durch lineare Interpolation abgeschätzt.

Oberfläche

Die technische Beschaffenheit der sauberen Oberfläche, sei es Rauigkeit oder eine Beschichtung durch PTFE¹, spielt eine untergeordnete Rolle (Yoon & Lund 1994). Eine Verlängerung der Induktionszeit konnte nicht erreicht werden².

β -Laktoglobulin

Die Schlüsselkomponente für das Proteinfouling ist das Molkenprotein β -Laktoglobulin (Dannenberg 1986, Belmar-Beiny & Fryer 1992, Delplace & Leuliet 1995, de Jong 1996). Erhitzt man Milch, so denaturiert β -Laktoglobulin in zwei Schritten, in denen die für das Fouling relevanten reaktiven Gruppen der Reaktion zugänglich bzw. entzogen werden. Im ersten Schritt werden vom nativen (N) β -Laktoglobulin Mono- bzw. Dimere aufgefaltet (U), die reaktiven Thiolgruppen freigelegt. Im zweiten Schritt, der Aggregation (A), werden diese Gruppen durch die Bildung von Polymeren belegt, also $N \longleftrightarrow U \longrightarrow A$. Formal wird hier angenommen, daß bei der Auffaltung die Hinreaktion überwiegt, die Rückreaktion $U \longrightarrow N$ vernachlässigt werden kann, so daß sich als Reaktionsschema



ergibt. Diese Darstellung läßt sich durch Anwendung elementarer Reaktionskinetiken als zweistufige Reaktion darstellen (de Jong *et al.* 1992)

$$\dot{C}_N = -k_U C_U^{m_U} \quad (2.3)$$

$$\dot{C}_U = k_U C_U^{m_U} - k_A C_U^{m_A} \quad (2.4)$$

$$\dot{C}_A = k_A C_U^{m_A} \quad (2.5)$$

$$k_i = k_{i,0} e^{-\frac{E_{i,a}}{RT}}, i = N, U, A. \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

Dabei wird die Temperaturabhängigkeit mit einem Arrhenius-Term beschrieben, die Reaktionsordnung n_i , $i = N, U, A$, läßt sich, da β -Laktoglobulin ebenfalls mit anderen Milchkomponenten aggregieren kann, nicht a priori angeben. Andere (Chen *et al.* 1998) Modelle versuchen die Denaturierung qualitativ stärker aufzulösen.

¹ „Teflon“

²Im Rahmen des 5. Rahmenprogramms der EU findet ein Kooperationsprojekt statt, in dem durch Plasmabeschichtung modifizierte Oberflächen zur Vermeidung von Milchfouling untersucht werden.

Milchsalze

Im Belag finden sich auch die im Serum gelösten Milchsalze. Allen voran werden Kalziumphosphat-Salze als Schlüsselkomponente für diesen Ansatz betrachtet.

pH

Die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit der Milchsalze führt dazu, daß sich der pH-Wert der Milch während der Erhitzung ändert. Messungen (Kirchmeier 1982, Hege 1984) zeigten, daß der pH von Milch bei der Erhitzung von etwa 6.7 bei Lagerungstemperatur auf etwa 6.0 bei 80 °C absinkt³.

Die in der Literatur angegebenen kinetischen Daten werden in Erhitzungsexperimenten gewonnen. Damit berücksichtigen die Daten den aktuellen pH-Wert, d. h. derjenige, der sich bei der Erhitzung einstellt, sofern die Daten sich auf den normalen Ausgangs-pH der Milch beziehen.

Das Foulingverhalten von Milch wird vom Anfangs-pH beeinflusst. Widersprüchliche Daten hinsichtlich der Hitzestabilität der Molkenproteine zeigen Mulvihill & Donovan (1987) in einem Übersichtsartikel auf, deren Streuung sich durch die Art der Zubereitung der Modelllösung, ihrer Zusammensetzung und des Experiments, d. h. der Meßmethode, selbst erklären lassen. Foster *et al.* (1989) führten mit Hilfe einer rotierenden Scheibe Erhitzungsexperimente durch, in denen sich zeigte, daß eine Absenkung des Anfangs-pH von 6.7 auf 6.3 eine Erhöhung der Anlagerungsmasse auf das 4 bis 5fache zur Folge hatte. Diese Tendenz wird in der nachfolgenden Arbeit (Foster & Green 1990) bestätigt. Hege (1984) findet bei Temperaturen um 85°C eine nennenswerte Erhöhung nur für einen Anfangs-pH kleiner 6.0. Ebenfalls einen Anstieg der Belagmasse mit sinkendem pH konnte Skudder *et al.* (1986) feststellen.

Adhäsion des Belags, Abtrag

Fryer & Slater (1987) geben im Bereich von 95 - 105 °C eine Arrhenius-Abhängigkeit derjenigen Wandschubspannung an, ab der sich in der Versuchsanordnung nach vier Stunden Versuchszeit kein Belag bildet. Nach Fiedler (1985) läßt sich die Abtragung der kristallinen Ansätze beim Eindampfen von Molke und Ultrafiltrations-Permeaten vernachlässigen. Zudem kann ein Zuwachsen (Blockieren) in Rohrleitungen beobachtet werden, was den Schluß zuläßt, daß der sich einmal gebildete Belag nicht wieder von den Wärmetauscherwandungen löst. Swartzel (1983) stellt bei seinen Erhitzungsversuchen

³Siehe hierzu Anhang A.5.

zwischen 75 – 150°C lineares Fouling fest und schließt, daß die Anlagerung den Abtrag überwiegt. Grasshoff (1988) untersucht an einer Labor-Platten-Wärmeaustauscher die Belagbildung in Abhängigkeit vom Systemüberdruck und der Strömungsgeschwindigkeit. Für eine mittlere Produktanfangstemperatur im Versuchsbereich von 84.5°C ergibt sich für den betrachteten Laborerhitzer eine kritische Geschwindigkeit von $0.7 \frac{m}{s}$, ab der in diesem Temperaturbereich anfallende Belag vom Typ A nicht mehr an der Wärmetauscherfläche haftet.

Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Foulingschicht

Davies *et al.* (1997) charakterisieren Dichte ρ und Wärmeleitfähigkeit λ einer Milchfoulingschicht zwischen $660 \leq \rho_f \lambda_f \leq 5500 \frac{Wkg}{m^4K}$. und schlagen ein Schichtmodell für den Belag vor, das bei Kenntnis des Verhältnisses von Protein zu Wasser ϵ im Belag die Wärmeleitfähigkeit abschätzen läßt zu

$$\lambda_f = \frac{\lambda_w}{\epsilon \lambda_p + (1 - \epsilon) \lambda_w}. \quad (2.8)$$

Ausgehend von einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit erhalten Delplace & Leuliet (1995) eine exponentielle Abnahme der Wärmeleitfähigkeit des Belags von anfangs $3 \frac{W}{mK}$ gegen den asymptotischen Wert $0.27 \frac{W}{mK}$. Nach Hege (1984) nimmt die Dichte mit der Versuchszeit von etwa $1000 - 1300 \frac{kg}{m^3}$ auf etwa $500 - 700 \frac{kg}{m^3}$ ab, die Wärmeleitfähigkeit läßt sich aus seinen Meßdaten zu etwa $0.22 \frac{W}{mK}$ angeben.

2.2. Modelle für Milchfouling - Literaturübersicht

Wie aus den zugrundeliegenden Phänomenen und den Besonderheiten des Milchfouling ersichtlich, handelt es sich um ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Effekte. Im folgenden wird ein Überblick über die bereits existierenden Modelle zur Beschreibung des Milchfoulings gegeben. Die verschiedenen Modellansätze lassen sich entsprechend des vorhergesagten Parameters, der Ansatzmasse, der Schichtdicke oder der Änderungen des Wärmeübergangskoeffizienten, klassifizieren.

2.2.1. Ansatzmasse

Mottar & Moermans (1988) erhitzen mit einem für $150 \frac{l}{h}$ ausgelegten Plattenwärmetauscher pro Experiment 75l Rohmilch mit einem Fettgehalt von $3.6 \frac{g}{100g}$ nach zweistufiger Homogenisierung bei verschiedenen Haltetemperaturen⁴ auf 138 – 140°C für 5s. Die Menge der feuchten Ansatzmasse m_d im UHT-Bereich wurde nach halbstündigem Ablaufen durch Wiegen der Wärmetauscherplatten in mg pro verarbeiteten Liter Milch in Abhängigkeit der Haltezeit t und der Temperatur ϑ ermittelt.

$$m_d = a_0 + a_1 t + a_2 \vartheta + a_3 t^2 + a_4 \vartheta^2 + a_5 t \vartheta \quad (2.9)$$

Neben der Ansatzmasse wurde der Einfluß der Haltesektion auf die Proteinstabilität und den Geschmack der Milch untersucht. Die Koeffizienten der Gleichung sind in Tabelle 2.1 angegeben.

Die Konzentration des aufgefalteten β -Laktoglobulins C_U setzt de Jong (1996) in das Foulingmodell ein. Ausgehend davon wird die Ansatzrate für die Masse⁵ zu

$$\dot{m}_f = k(T_s) \left(C_U - \frac{\delta r \dot{m}_f}{D} \right)^n \quad (2.10)$$

In Gleichung 2.10 geht die Grenzschichtdicke δ , das Verhältnis von β -Laktoglobulin im Ansatz zu gesamten Ansatz r , der effektive Diffusionskoeffizient D , die Konzentration des aufgefalteten β -Laktoglobulin ein. $k(T_s)$ beschreibt die Anlagerungsreaktion als Funktion der Oberflächentemperatur mit einem Arrheniusterm. Beste Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment ergab sich für Partikelgrößen kleiner 50 nm und für kleine Hattazahlen (< 0.3), d. h. für einen durch die in der Kernströmung stattfindenden Reaktion der Auffaltung dominierten Prozeß.

⁴Die Temperatur-Zeit-Kombinationen waren 70, 80, 90°C; 0, 60, 90, 120s.

⁵Die Darstellung, die de Jong angibt, ist nicht dimensionsrichtig.

Tabelle 2.1.: Koeffizienten a_i des Foulingmodells Gleichung 2.9 nach Mottar & Moermans (1988).

$$m_d = a_0 + a_1 t + a_2 \vartheta + a_3 t^2 + a_4 \vartheta^2 + a_5 t \vartheta$$

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
16851.7	-2.1	- 4.6	1.6	3.7	0.4
mg	$\frac{mg}{s}$	$\frac{mg}{^\circ C}$	$\frac{mg}{s^2}$	$\frac{mg}{^\circ C^2}$	$\frac{mg}{s^\circ C}$

Georgiadis, Rotstein & Macchietto (1998 A) sowie Georgiadis, Rotstein & Macchietto (1998 B) geben jeweils für Platten- und Röhrenwärmetauscher basierend auf dem aggregierten β -Laktoglobulin als Schlüsselkomponente ein Modell zur Ermittlung der Anlagerungsmassen an. Das Modell wird an Literaturdaten validiert. Die Anpassung des Massentransportmodells an die Validierungsdaten erfolgt über Parameterschätzung, wobei für die nativen, denaturierten und aggregierten β -Laktoglobulin-Partikel Durchmesser von $9.8 \cdot 10^{-11}$, $9.3 \cdot 10^{-11}$ und $9.91 \cdot 10^{-10}$ m angegeben werden. An anderer Stelle (Kessler 1996) findet man für das native β -Laktoglobulin-Monomer Partikeldurchmesser von 3 nm.

2.2.2. Schichtdicke

Kern & Seaton (1959) ermitteln ausgehend von asymptotischem Foulingverhalten, d. h. $R_f \rightarrow R_{f,\infty}$, mit einem exponentiellen Ansatz

$$R_f(t) = R_{f,\infty}(1 - e^{-Bt}), [B] = \frac{1}{s} \quad (2.11)$$

das Verhältnis $\frac{x_{0,1}}{x_{0,2}}$ der Asymptoten der Schichtdicke x zweier verschiedener Erhitzungsverläufe für das gleiche Fluid in Abhängigkeit der Rohrlänge l , des Druckverlustes Δp und des Massenstroms \dot{m} :

$$\frac{x_{0,1}}{x_{0,2}} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{0.8} \left(\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1}\right)^{0.8} \left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}\right)^{0.8} \quad (2.12)$$

Transport und Anlagerung werden als zeitunabhängig vorausgesetzt.

Belmar-Beiny *et al.* (1993) setzen, ausgehend von einem Ansatz vom Typ der Gleichung 2.11, die Schichtdicken gemessen am Beginn (Index *ein*) und am Ende (Index *aus*) eines Laborwärmetauschers⁶ ins Verhältnis, um experimentelle Daten dahingehend zu untersuchen, ob das Fouling von Reaktionen in der Kernströmung oder Wandeffekten dominiert ist. Diese Verfasser geben zwei unterschiedliche Beschreibungsansätze an:

$$\frac{\delta_{ein}}{\delta_{aus}} = \frac{\exp\left(\frac{-E}{RT_{ein}}\right)}{\exp\left(\frac{-E}{RT_{aus}}\right)} \quad (2.13)$$

$$\frac{\delta_{ein}}{\delta_{aus}} = 1 - \left(1 - \frac{120}{d} \sqrt{\frac{\mu}{\tau_w}}\right)^2 \quad (2.14)$$

⁶ca. 2m lang, Temperaturbereich 60 - 80°C

Die Auswertung der Messdaten zeigte hier, daß Gleichung 2.14 die Datensätze besser approximiert. Hieraus folgt zusätzlich, daß im betrachteten Temperaturbereich die Prozesse im Strömungskern die Belagbildung dominieren. Dies ist ein Modell nach Kern & Seaton (1959), setzt also asymptotisches Fouling wie Gleichung 2.11 voraus.

Lalande, Tissier & Corrieu (1985) entwickelten anhand experimentieller Daten ein Foulingmodell für Plattenwärmetauscher, das basierend auf der Denaturierung des β -Laktoglobulin die Ansatzmasse m_d und damit die Schichtdicke δ_d ermittelt.

$$\delta_d = \frac{r_3 m_d}{\rho_d \Delta x d_p} \quad (2.15)$$

$$m_d = 2r_1 r_2 \Delta C_i \frac{r_4}{d_{hyd}} \dot{V}_i \Delta t \quad (2.16)$$

$$\Delta C_i = C_{i-1} \left(1 - \left[1 + k_0 e^{\frac{-2E}{R(T_b + T_w)}} \tau C_{i-1} \right]^{-1} \right) \quad (2.17)$$

Hierbei sind r_1, r_2 , und r_3 Koeffizienten, die das Verhältnis der gesamten Proteinmasse zur β -Laktoglobulin-Masse, das der Trockenmasse zur Gesamtproteinmasse, das des nassen Belags zum getrockneten einbeziehen. Der empirischer Koeffizient r_4 hat die Einheit m. Die Geometrie des Wärmetauschers wird über den Plattenabstand d_p , den hydraulischen Durchmesser d_{hyd} und die Abschnittslänge Δx angegeben. Zudem muß im betrachteten Abschnitt die Verweilzeit τ bekannt sein. In Gleichung 2.17 steht der Index i für die räumliche Diskretisierung. Für die Dichte und Wärmeleitfähigkeit der feuchten Ansatzmasse werden $1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bzw. $0.5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ angegeben.

Hiddink *et al.* (1986) charakterisieren das Fouling bei der Pasteurisierung von Schlagsahne in einem Plattenwärmetauscher durch den bereits zugewachsenen Anteil A des hydraulischen Durchmessers⁷ und dem Druckverlust der ganzen Anlage bestehend aus Regenerator, Haltesektion und dampfbeheiztem Erhitzer und schließen so auf die Schichtdicke.

$$A = \frac{d_{hyd,0} - d_{hyd}}{d_{hyd,0}} = 1 - \left(\frac{\Delta p_0}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.18)$$

2.2.3. Wärmeübergangskoeffizient

In den TEMA⁸-Empfehlungen wird für die anfängliche Überdimensionierung von Rohrbündel-Wärmeübertrager ein Foulingwiderstand R_f angegeben, der

⁷ „fouled fraction of the hydraulic channel diameter“ (Hiddink *et al.* 1986).

⁸Tubular Exchanger Manufacturer's Association

auf Betriebserfahrung beruht. Dieser wird zum Wärmeübergangskoeffizienten pro Einheitsfläche im sauberen Zustand des Übertragers addiert. Diese Werte (z. B. Epstein (1983), VDI (1997)) gelten vorwiegend für Wasser und kohlenwasserstoff-basierte Systeme. Die verschiedenen Prozeßbedingungen wie Strömungsgeschwindigkeit, Zusammensetzung des Produktes und Temperaturen können nicht berücksichtigt werden, d. h. diese Vorgehensweise behandelt Fouling als von Anfang an stationär ablaufenden Prozeß. Ob ein asymptotischer Foulingwiderstand oder der zu einer gegebenen Prozeßzeit vorliegt, geht daraus nicht hervor.

Delplace & Leuliet (1995) untersuchten für Plattenwärmetauscher an Molkenproteinlösungen das Foulingverhalten im Übergangsbereich ($1800 \leq Re \leq 9000$). Zur Validierung wurde wegen starker Unterschiede im Druckverlust der Wärmeübergangskoeffizient $k(t)$ gewählt. Zur Modellierung wurde Trockenmasse der jeweiligen Plattenkanäle $m_{t,i}$ mit der wärmeübertragenden Fläche A_i und dem Volumen des erwärmten Fluids V_i mit der Abnahme des nativen β -Laktoglobulin, ΔC_i durch experimentielle Daten korreliert⁹:

$$k(t) = \frac{k_0 \lambda_d(t)}{k_0 k_{den} t + \lambda_d(t)} \quad (2.19)$$

Hier ist $\lambda_d(t)$ eine scheinbare Wärmeleitfähigkeit [$\frac{W}{mK}$] der Ansatzschicht, der (nicht dimensionsrichtige) Term k_{den} berücksichtigt die Denaturierung, i steht für eine der N Wärmetauscherplatten:

$$\lambda_d(t) = 3.73e^{-2.5 \cdot 10^{-4} t} + 0.27; \quad k_{den} = \frac{0.12733}{\rho_d N} \sum_{i=1}^N \dot{V}_i \Delta C_i^{0.5}.$$

Fryer & Slater (1985) ermitteln den Wärmeübergang über die Biot-Zahl Bi in einem Röhrenwärmetauscher für Magermilch im Temperaturbereich von $85 - 110^\circ\text{C}$ mit einem Ansatz vom Typ 2.11 zu

$$\frac{d}{dt} Bi = k_d(\tau_w) \exp\left(-\frac{E}{R} \frac{1 + \Phi + Bi}{T_s + (\Phi + Bi)T_f}\right) - k_r(\tau_w) Bi \quad (2.20)$$

wobei hier $\Phi = h_{f,0} \left(h_{s,0} + \frac{\delta_w}{\lambda_w}\right)^{-1}$, und die Wandschubspannung über die Terme $k_d(\tau_w) = 9.9 \cdot 10^{10} \tau_w^{-1}$ und $k_r(\tau_w) = \frac{k_d(\tau_w)}{Bi_\infty} \exp\left(-\frac{E}{R} \frac{1 + \Phi + Bi_\infty}{T_s + (\Phi + Bi_\infty)T_f}\right)$ berücksichtigt wird. In den Simulationsrechnungen wurde mit einem gemitteltem Abtrag $k_r(\tau_w)$ gerechnet. Mit der Biotzahl wurden die Temperaturprofile nach der Methode der Charakteristiken berechnet.

⁹Die Darstellung der Beziehungen wird von Delplace & Leuliet (1995) z. T. nicht dimensionsrichtig angegeben.

Swartzel (1983) führt an einem dampfbeheizten Röhrenwärmetauscher Erhitzungsexperimente auf 137 bzw. 154°C bei Produkteintrittstemperaturen zwischen 75 – 106°C durch. Der Foulingwiderstand R_f bzw. die Speisedampf-temperatur $\Delta T_{Dampf, zu}$ wird als Funktion der Prozeßzeit t , der Produktgeschwindigkeit $v^{-0.8}$, der Erhitzungstemperatur T_p und der mittleren Temperaturdifferenz am Anfang ΔT_m angegeben. Hinsichtlich des qualitativen Verlaufs stellt er im UHT-Bereich lineares Fouling ohne Induktionsphase fest. Die Belagbildung überwiegt hier offensichtlich den Abtrag.

2.2.4. Fuzzy-Ansätze im Zusammenhang mit Fouling

Reppich *et al.* (1993) gewinnen aus einer Befragung ein Fuzzy-Expertensystem, das einen den TEMA-Empfehlungen entsprechenden Foulingwiderstand ermittelte. Betrachtet wird dabei Sedimentationsfouling und Fouling von Kohlenwasserstoffgemischen. Als Eingangsgrößen werden die kinematische Viskosität und die Strömungsgeschwindigkeit verwendet. Weiter Einflußgrößen wie Wandtemperatur, Konzentration etc. konnten nicht quantitativ erfaßt werden, da, wie Reppich *et al.* (1993) feststellen, „... die Expertenerfahrungen diesbezüglich unannehmbar widersprüchlich waren.“

Seelinger *et al.* (1996) verwenden für Partikel- und Kristallisationsfouling in Kühlwasserkreisläufen ein Fuzzy-Expertensystem. Ermittelt werden Foulingfaktoren analog der TEMA-Empfehlungen. Als Eingangsgrößen für die beiden Fuzzy-Systeme werden z. B. pH-Wert, Wand- und Fluidtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit, hydraulischer Durchmesser verwendet¹⁰. Das so gebildete Fuzzy-System enthält auch Einflüsse wie Thermophorese, thermische Spannungen und Verschmutzungsneigung als Zwischengrößen, mit denen die Oberfläche charakterisiert wird. Die Anpassung der Zugehörigkeitsfunktionen erfolgte manuell.

Afgan & Carvalho (1998) beschreiben ein Expertensystem, das Wärmetauscher online hinsichtlich des Foulingzustandes bewertet. Ungünstige Betriebszustände sollen so erkannt und Abhilfe geschaffen werden. Die Effektivität, d. h. das Verhältnis der tatsächlich zu der im Idealfall übertragenen Wärme, zusammen mit dem qualitativen Verhalten der zugrundeliegenden Gleichungen erlauben mit den jeweils auf der heißen und kalten Seite des Wärmetauschers gemessenen Größen, Massenstrom und Temperatur, auf den Zustand, und auf welcher Seite Fouling vorliegt, zu schließen.

¹⁰Für die Zuordnung und weitere Details sei auf Seelinger *et al.* (1996) verwiesen.

2.3. Grundlegende Betrachtungen

2.3.1. Prozeßmodell

Das Prozeßmodell basiert auf der Beschreibung des Energie- und Impulstransports, zusammengefaßt in der Gleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varphi + \operatorname{div}(\rho \varphi \vec{u}) = \operatorname{div}(\Gamma(\operatorname{grad}(\varphi))) + S, \quad (2.21)$$

worin φ die abhängige Variable, ρ die Dichte und \vec{u} die Strömungsgeschwindigkeit ist. Sowohl der Diffusionskoeffizient Γ als auch der Quellterm S hängen von der jeweiligen Bedeutung von φ im Prozeßmodell ab.

Die Modelle, die das Verhalten von Röhrbündel-Wärmeübertrager beschreiben, lassen sich gliedern in *mehrdimensionale Kontinuumsmodelle*, *Modelle mittlerer Komplexität* und *einfache Modelle* (Kukral 1994). Einfache Modelle betrachten den Wärmeübertrager als Ganzes, sie erlauben die Ermittlung von Temperaturverläufen über der Standzeit am Austritt, nicht aber Temperaturprofile über der Verweilzeit im Apparat. Zustandsänderungen nach beliebigen Änderungen der Eingangsbedingungen lassen sich mit mehrdimensionalen Kontinuumsmodelle¹¹, die auf den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls beruhen und das Rohrbündel als unendlich fein verteilt im Mantelrohr annehmen, unter einem z. T. erheblichen numerischen Aufwand, errechnen.

Modelle mittlerer Komplexität berücksichtigen die Energiebilanzen für die Fluidströme im Rohr- und Mantelraum und der wichtigsten Apparate. Die Strömung im Mantelraum wird mit einfachen, auf der Stromfadentheorie aufbauenden Modellen beschrieben, nicht mit vollständigen Impulsbilanzen. Allerdings können die Eingangsgrößen in beliebiger Weise einzeln oder gleichzeitig verändert und die aktuellen Zustandsgrößen gehen z. B. in die Stoffdaten oder Wärmeübergangskoeffizienten ein.

Zur Lösung von 2.21 werden Finite-Element-Methoden, Finite-Differenz-Methoden oder Finite-Volumen-Methoden eingesetzt, wobei letztere sich sehr anschaulich auf die Apparatestruktur übertragen lassen und damit auch ein anschauliches Apparatmodell ermöglichen.

Die Eigenschaften der überströmten Oberfläche beeinflussen den Wärme- bzw. Stofftransport und damit auch das Foulingverhalten. Deutlich wird dies an der Widerstandszahl ψ , die im Fall turbulenter Strömungen in rauhen Rohren höher ist als in Glatten. Für niedrige Reynoldszahlen überdeckt die viskose Unterschicht die Rauigkeiten. Nimmt indessen die Reynoldszahl zu, verringert

¹¹auch *porous body models*.

sich die viskose Unterschicht, zuerst treten die höchsten Rauigkeitserhebungen hervor, dann weitere, bis ein Übergang zum rein quadratischen Übergangsgesetz erfolgt.

Als Maßzahl für die Rauigkeit wird die mittlere Höhe aller Erhebungen verwendet. Im hier betrachteten Fall sind die Rohre als glatt im sauberen Zustand und als natürlich rau durch die sich mit der Zeit bildenden Ablagerungen anzusehen. Der Widerstandsbeiwert ψ ist im allgemeinen eine Funktion der Reynoldszahl und der relativen Rauigkeit $R_{rel} = \frac{R_z}{d_{hyd}}$.

Bei laminarer Strömung hängt ψ nur von der Reynoldszahl ab. Für turbulente Strömungen hängt sie für oberhalb der Grenzkurve $\psi = \left(\frac{200}{R_{rel}Re}\right)^2$ nur von R_{rel} ab. Im Bereich $65 < ReR_{rel} < 1300$ beeinflussen sowohl die Reynoldszahl als auch die relative Rauigkeit den Reibungswiderstand. In diesem Übergangsbereich zwischen glatt und vollkommen rau kann ψ für ein festes R_{rel} ein Minimum durchlaufen. Liegt in einem glatten Rohr turbulente Strömung vor, weist ψ nur eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl auf. Für die Berechnung von ψ liegen die Fehler für ψ je nach Bereich bei 5 - 10 Prozent, siehe hierzu Soumerai (1987) und Anhang.

2.3.2. Fuzzy Logik

Fuzzy Logik geht auf Arbeiten von Lotfi Zadeh in den frühen 60er Jahren zurück. Bis zu in die neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts stießen die mit Fuzzy-Logik verbundenen Ideen außerhalb Japans vorwiegend in akademischen Kreisen auf Interesse. Zunehmend zeigt sich die Leistungsfähigkeit dieses Methodenkreises. Bemerkungen zur Entwicklung und weiterführende Hinweise finden sich z. B. in Bandemer & Gottwald (1993), Biewer (1997), Bothe (1995), Zimmermann *et al.* (1993). Einen Überblick über die „Gründerzeit“ bis 1980 gibt Dubois & Prade (1980).

Begriffe

Im Gegensatz zu anderen Anwendungsgebieten der Fuzzy-Logik soll hier die Fuzzy-Logik als Ergänzung klassischer Modelle dienen. Diese Kombination von Fuzzy-Logik mit klassischen Modellierungsansätzen führt auf ein hybrides Numero-Fuzzy-Modell.

Die Darstellung der für vorliegenden Fall erforderlichen Begriffe basiert auf den Arbeiten von Bandemer & Gottwald (1993), Bothe (1995), Bardossy & Duckstein (1995). Die Notation bzw. Schreibweise kann von der üblichen abweichen, wurde aber gewählt, um für den vorliegenden Zweck eine sinnfällige

Darstellung zur Verfügung zu haben. Für ergänzende Definitionen und weiterführende Rechnungen sei auf den Anhang verwiesen.

Betrachtet werden Abbildungen, die einem Vektor von Eingangswerten e_i einen Ausgangswert a zuordnen

$$a = \mathcal{F}(e_1, \dots, e_n). \quad (2.22)$$

Im Fall von mehreren Ausgangsgrößen a_i erklärt man die Abbildung komponentenweise. Der Unterschied zu klassischen Modellierungsmethoden liegt nun in der Darstellung der durch \mathcal{F} gegebenen Abbildung. Die Zuordnung der Ein- und Ausgänge erfolgt hier durch Fuzzy-Logik mittels Regeln der Form

WENN *Bedingung* DANN *Folgerung*.

Die Beschreibung der so als „black box“ beschriebenen Abbildung erfolgt mit Hilfe von *linguistischen Variablen*¹², d. h. der Wert wird durch Begriffe der (technischen) Umgangssprache (z. B. hoch, niedrig) beschrieben und nicht durch einen Zahlenwert (z. B. 1.932 m). Ob die Zuordnung der gegebenen Eigenschaft richtig ist oder nicht, wird unscharf angegeben: „groß“ ist Jemand mit 2 m auf alle Fälle, aber auch Jemand mit 1.80, mit 1.60 wohl kaum mehr.

Diesem Umstand trägt der Zugehörigkeitsgrad Rechnung. Damit erhält man das Konzept einer Fuzzy-Menge A , erklärt über die Zugehörigkeitsfunktion μ_A von x aus einem Universum X zu

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X \wedge \mu_A(x) \in [0; 1]\}, \quad (2.23)$$

wobei $0 < \mu_A(x) \leq 1$ ist und angibt zu welchem Grad x der Fuzzy-Menge angehört¹³.

Die Abbildung (2.2) zeigt für stückweise lineare Zugehörigkeitsfunktionen die vier Vertreter von Fuzzy-Mengen. Sie werden mit Buchstaben bezeichnet, die ihrer Form entsprechen. Mit diesen lassen sich Werte im Sinne von „kleiner“ oder „größer“ einer gegebenen Schranke beschreiben. Der dreiecksförmige Typ A , ein Sonderfall vom trapezförmigen T , kann z. B. mit dem linguistischen Ausdruck „ist etwa“ erklärt werden. T bringt indessen die graduelle Zugehörigkeit zu einem links und rechts beschränkten Intervall zum Ausdruck.

Diese Abbildung \mathcal{F} , s. Gleichung (2.22), besteht ihrerseits aus einer Folge hintereinander geschalteter Abbildungen, der *Fuzzyifizierung* (F), *Inferenz* (I) und *Defuzzyifizierung* (D).

¹²Fuzzy-Logik ist ein Kalkül, der dem umgangssprachlichem Rasonnieren nachempfunden ist. Der Begriff „linguistisch“ bringt dies zum Ausdruck.

¹³Die Zugehörigkeitsfunktion oder Charakteristische Funktion einer scharfen Menge gibt nur an, ob ein Wert zu einer Menge gehört ($\chi_{\bar{A}}(x) = 1$) oder nicht $\chi_{\bar{A}}(x) = 0$, graduelle Unterschiede können nicht verwirklicht werden.

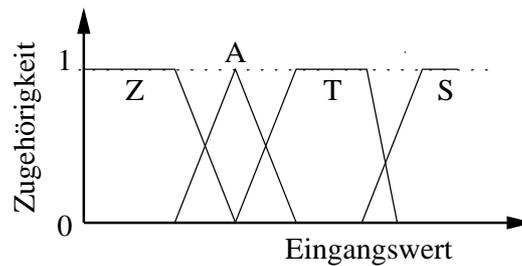


Abbildung 2.2.: Stückweise lineare Zugehörigkeitsfunktionen: Z (S) bezeichnet ein nach links (rechts) unbeschränktes unscharfes Intervall, A einen unscharfen Wert, T ein unscharfes Intervall.

Die Fuzzyfizierung ermittelt die Übereinstimmung eines Eingangswertes e_i , z. B. ein *scharfer*¹⁴ Meßwert, mit einem *unscharfen*¹⁵ Zustand. Hierzu wird die Zugehörigkeit μ_i zu jedem Term der entsprechenden linguistischen Variablen bestimmt.

Die so gewonnenen Fuzzy-Werte werden anhand der Regeln durch die Inferenz ausgewertet. Der erste Schritt, die Aggregation I_{agg} , ermittelt den Erfülltheitsgrad der Prämissen (WENN-Teil) der einzelnen Regeln. Ausgehend davon ergibt die Implikation I_{imp} den Erfülltheitsgrad r_i der Konklusion (DANN-Teil). Die Akkumulation I_{akk} verbindet die Implikationsergebnisse der einzelnen WENN-DANN-Regeln

$$r_i = I_{imp}(I_{agg}(\mu_1(e_1), \dots, \mu_n(e_n))). \quad (2.24)$$

Die Defuzzyfizierung D ordnet dem unscharfen Ergebnis der Inferenz wieder einen scharfen Wert zu, z. B. eine Stellgröße oder wie im vorliegenden Fall ein Modellparameter,

$$a = D(I(\mu_1(e_1), \dots, \mu_n(e_n))) = D(I_{akk}(r_1, \dots, r_m)). \quad (2.25)$$

Beispiel

Angenommen, zur Bestimmung der *Phase* aus der *spezifischen Anlagerungsmasse*, abgekürzt im Beispiel durch *Masse*, lauten die Regeln des zugehörigen Fuzzy-Systems wie in Tabelle 2.2 angegeben. Die Abbildung 2.3 veranschaulicht am Beispiel dieser Regeln die Schritte Fuzzyfizierung, Inferenz und Defuzzyfizierung.

¹⁴engl. *crisp*, bezeichnet Werte außerhalb des Fuzzy-Konzepts.

¹⁵engl. *fuzzy*, für den Fuzzy-Logik Wertebegriff.

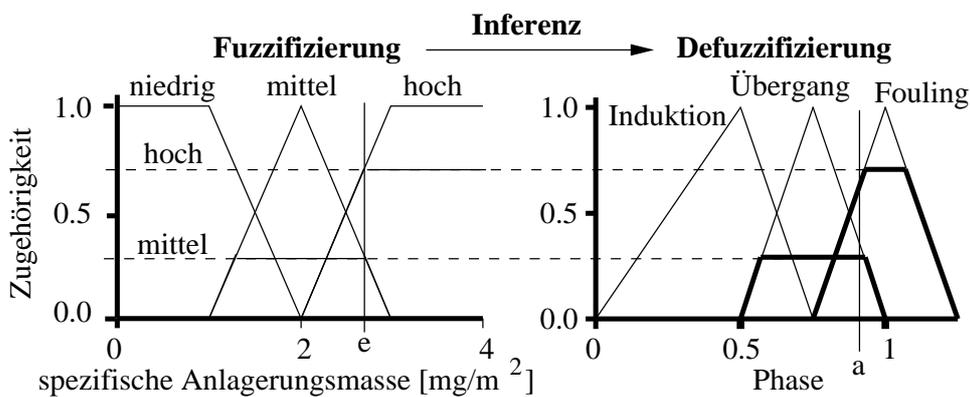
Tabelle 2.2.: Fuzzy-Regeln für das Beispiel zur Phasenerkennung.

	WENN	DANN Phase IST
1	Masse IST <i>niedrig</i>	Induktion
2	Masse IST <i>mittel</i>	Übergang
3	Protein IST <i>hoch</i>	Fouling

Zur Fuzzifizierung: am Eingang e (Abbildung 2.3 links) liegt für die Anlagerungsmasse ein Wert von $2.7 \frac{\text{mg}}{\text{m}^2}$ an, fällt also nicht in „niedrig“ (zu 0 erfüllt), aber in „mittel“ (zu 0.3 erfüllt) und „hoch“ (zu 0.7 erfüllt). Da keine weiteren Eingänge im WENN-Teil auftauchen, erfordert die Aggregation keinen weiteren Schritt.

Die Erfülltheit der Prämisse für Induktion erhält den Wert Null, für Übergang etwa 0.3 und für Fouling etwa 0.7. Diese einfachen Regel wirken wie eine Zuweisung, die Implikation überträgt hier nur den Erfülltheitsgrad: Induktion ist nicht erfüllt, Übergang etwa einem Drittel, Fouling zu etwa Dreiviertel.

Akkumulieren heißt nun, die Erfülltheitsgrade einzelnen Regeln, dargestellt in Abbildung 2.3 rechts als dick umrandete Trapeze, zusammenzufassen. Hierzu werden die Mengen Induktion, Übergang und Fouling bildlich gesprochen zu einer Fläche vereinigt, diese vereinigten Fuzzy-Mengen (dargestellt durch die Fläche) im vorliegenden Beispiel mit der Schwerpunktmethode defuzzifiziert, d. h. die Abszisse des Schwerpunkts der Fläche (hier 0.9) gibt an, welchen „realen“ Wert Phase annimmt.

**Abbildung 2.3.:** Zu Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung.

2.4. Anlage

Zur Validierung der Simulationsdaten fanden an einer industriell genutzten Anlage mit einer Leistung von etwa 15000 kg pro Stunde gewonnene Meßdaten Anwendung.

Der Aufbau und die Anordnung der einzelnen Prozeßschritte entsprechen einer üblichen UHT-Anlage, wie sie z. B. in Kessler (1996) beschrieben ist. Die einzelnen Anlagenabschnitte (Sektionen) und zugehörigen Prozeßschritte sind im folgenden mit römischen Ziffern wie in Abbildung 2.4 bezeichnet. Zusätzlich sind noch einige allgemeine Anmerkungen zu thermischen Behandlungen beigefügt.

- I *Erwärmen, Homogenisieren*
- II *Vorerhitzen, Vorheißhalter*. Der Vorheißhalter wird vielfach als technologische Maßnahme zur Reduzierung des Proteinfouling in den nachfolgenden Sektionen eingesetzt.
- III *Erhitzen*. In diesem Temperaturabschnitt (105-120 °C) fällt auch die kontinuierliche Sterilisation. Je nach Verfahren wird das Produkt dabei einer Behandlung von 10 bis 40 Minuten unterzogen.
- IV *UHT-Erhitzung, UHT-Heißhalter*. Der Heißhalter gewährleistet den entsprechenden bakteriologischen Effekt gemessen an der Reduzierung thermophiler Keime, erreicht wird. Die UHT-Behandlung erfolgt bei Temperaturen zwischen 135 und 150 °C, wobei die Behandlungsdauer zwischen 2 und 20 Sekunden liegen kann.

In dieser Anlage kommen Röhrenwärmetauscher zum Einsatz. Diese werden von zwei getrennten Heißwasserkreisläufen gespeist, einer für die Prozeßschritte Erwärmen-Erhitzen, der zweite für die UHT-Erhitzung.

Die Abbildung 2.4 zeigt ein Anlagenschema mit den Meßpunkten für Druck und Temperatur. Numerierung und Benennung wird im weiteren beibehalten. Die Meßdaten wurden zum größten Teil aus dem Prozeßleitsystem ausgelesen, einige Drücke mußten von analogen Manometern abgelesen werden.

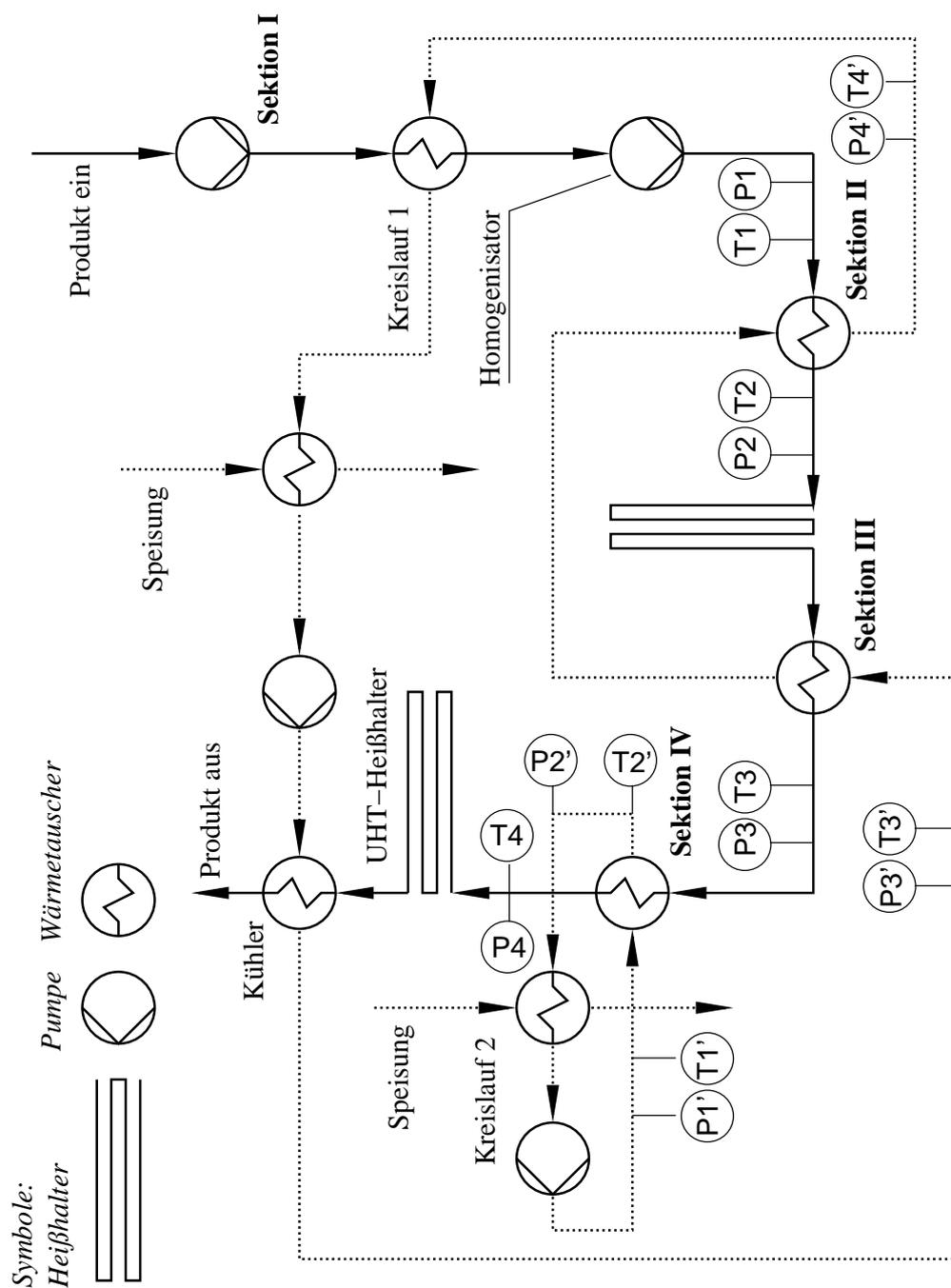


Abbildung 2.4.: Anlagenschema mit den im weiteren verwendeten Bezeichnungen.

3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird das Numero-Fuzzy-Prozeßmodell vorgestellt, gegliedert in die Untersuchung der für die Validierung verwendeten Meßdaten, die Vorstellung und Diskussion der Fuzzy-Systeme, Sensitivitätsanalyse und die Validierung¹ anhand der Meßdaten. Die Sensitivitätsanalyse befaßt sich dabei in erster Linie mit den Fuzzy-Systemen. Sofern erforderlich, wird der Zusammenhang zum technologischen Hintergrund kurz umrissen.

3.1. Meßdaten

Die Meßdaten dienen in erster Linie der Validierung des Foulingmodells. Im Vordergrund steht eine qualitative und phänomenologisch motivierte Untersuchung der gemessenen Daten, um eine Aussage über die zeitlichen Schwankungen der Datensätze zu gewinnen.

Ziel der Meßdatenaufnahme war es nicht, mittels Verfahren der beurteilenden Statistik (z. B. Regression), ein auf statistischen Daten basierendes Modell zu erstellen, sondern Vergleichskurven zur Validierung des Modells zu gewinnen und zu bewerten². Gleichzeitig liefert diese Bewertung zusammen mit der Sensitivitätsanalyse Ansatzpunkte zur Bewertung und Diskussion des Modells. In diesem Sinne werden die Folgerungen aus den Beobachtungen und Interpretationen der Meßdaten anhand der eingangs zusammengefaßten Sachverhalte³ ebenfalls als Ergebnisse betrachtet, deren Bewertung und Einordnung an anderer Stelle⁴ erfolgt.

Die hier vorgestellten Daten unterscheiden sich von anderen, in der Literatur dokumentierten Erhitzungsexperimenten dadurch, daß sie von einer industriell genutzten Anlage stammen. Daraus ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich Anzahl und Positionierung der Meßaufnehmer⁵, um das Risiko einer Infektion zu minimieren ebenso wie in der Darlegung der genauen „Rezeptur“, d. h.

¹Zu den Ergebnissen und der Vorgehensweise s. Abschnitt 3.2, S. 33

²Der experimentielle Aufwand für ein derartiges Vorgehen wäre immens, sind letztlich die Stützstellen t_i der verwendeten Fuzzy-Sets *Parameter* des Modells.

³siehe Abschnitt 2.1

⁴siehe Abschnitt 4

⁵Im wesentlichen das Prozeßabbild für das Prozeßleitsystem.

Temperatur-Zeit-Programme, was die im Folgenden gewählte Normierung motiviert.

Für die Datenaufnahme wurde als Startzeitpunkt der Produktionsbeginn festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Anlage eingefahren, d. h. sie befindet sich, vollständig mit Produkt gefüllt, im thermischen Gleichgewicht. Als Kriterium für die Gewinnung und Auswahl der Meßdaten sei ein *durchschnittlicher Produktionsverlauf* festgelegt durch

- **Saubere Oberfläche:** Nur nach einer Hauptreinigung werden Meßdaten aufgenommen bzw. aus dem Prozeßleitsystem ausgelesen.
- **Durchgehende Produktion:** Eine betriebsbedingte Unterbrechung der Produktion⁶ führt zum Abbruch der Datenaufnahme.
- **Vergleichbare Produkteigenschaften:** Das Produkt soll innerhalb eines Produktionsverlaufes immer vergleichbare Eigenschaften haben (z. B. hinsichtlich der Lagerung). Ein Tankwechsel stoppt daher die Datenaufnahme.

Für die Validierung des Prozeßmodells werden (mittelbar) die Prozeßtemperaturen und der Druckverlust herangezogen. Die Untersuchung des qualitativen Verhaltens der Erhitzeranlage erfolgt anhand des Foulingwiderstands R_f und des Druckverlustes. Diese Auftragung hat den Vorzug, daß sie die zeitliche Entwicklung des Foulings besser darstellt und darüberhinaus dem mittelnden Charakter der gemessenen Daten über die Anlage Rechnung trägt.

Beides geschieht mit dem Ziel, aus einem Spektrum von unter gleichen Bedingungen gewonnenen Datensätzen Aussagen über die Schwankungen S_p für den Druck⁷ bzw. S_k für den Wärmeübergang innerhalb der einzelnen Meßreihen zu gewinnen. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Reproduzierbarkeit der Daten hinsichtlich Anfangsbedingungen und zeitlichem Ablauf.

Der Foulingwiderstand wurde aus den gemessenen Temperaturprofilen ermittelt. Die für die Aufbereitung der Meßergebnisse erforderlichen Stoffdaten beziehen sich auf die mittlere Temperatur $\frac{T_i+T_{i+1}}{2}$. Die wärmeübertragende Fläche auf die Geometrie des Wärmetauschers (Rohrdurchmesser, Länge, Anzahl der Rohre pro Bündel) und der Foulingwiderstand auf den größten Wert, d. h. den aus den Meßdaten ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten zu Produktionsbeginn. Die Schwankung $S_w(t)$ (w steht für k, p) zu einem

⁶Z. B. Heißwasserumlauf wegen Stockung in nachfolgenden Gliedern der Produktionskette, vorgezogene Zwischenreinigung wegen Anlagenauslastung

⁷Der Systemüberdruck produktseitig (vgl. citetGrasshoff1988 stellt sicher, daß Sieden im Weiteren keine Rolle spielt.

Zeitpunkt $t = t_{\text{Beobachtung}}$ entspricht der Standardabweichung des Meßwertes w der verschiedenen Produktionsläufe jeweils zu $t = t_{\text{Beobachtung}}$ bezogen auf den Mittelwert über die verschiedenen Produktionsläufe des betreffenden $w(t = t_{\text{Beobachtung}})$.

Als „niedrige Temperatur“ werden im weiteren⁸ Temperaturen unter 60 - 70 °C bezeichnet. Die obere Grenze entspricht gängigen Homogenisierungstemperaturen (s. Kessler (1996)), die Abgrenzung dieses Intervalls nach unten liefern die Lagerungstemperaturen des Ausgangsprodukts Milch, die, abhängig der Anforderungen, bei entsprechend gesetzlicher Vorgaben unter 6°C liegen. Dieser niedrige Temperaturbereich entspricht im vorliegenden Fall der Sektion I. Die Temperaturbereiche für *mittel* und *hoch* motiviert die Einteilung der Belagtypen nach Burton (1968). „Mittel“ bezieht sich auf den Temperaturbereich, in dem Foulingbelag vom Typ A, „hoch“ der vom Typ B beobachtet wird. Übertragen auf die Anlage liegt Sektion II mit der Haltesektion im unteren mittleren (Belagtyp A), Sektion III im Übergangsbereich zwischen Typ A und B, also im oberen mittleren und Sektion IV (Belagtyp B, Salz fouling) im hohen Temperaturbereich, der von etwa 110 °C bis zu den UHT-Temperaturen reicht.

Die Anlage besitzt produktseitig zwei Bezugspunkte („Fixpunkte“) in den Temperaturprofilen (s. Abbildung 2.4, Stelle 3 und 4). An den Stellen 3 und 4 wird zur Gewährleistung der Erhitzung von der Regelung der Istzustand ermittelt. An deren wasserseitigen Entsprechung greift die Stellgröße (Heiztemperatur) ein.

Die Charakterisierung des Anlagenzustandes erfolgt über die in der Einleitung erwähnten Phasen Induktion, Übergang und Fouling. Diese Begriffe eignen sich, den lokalen Zustand an der Oberfläche ebenso wie den globalen der Anlage zu beschreiben. Zur Abgrenzung dieser drei Phasen untereinander sei nur auf die Festlegung der Induktionsphase für die Interpretation der Meßdaten eingegangen. Ändern sich in den zwei Hauptabschnitten der Anlage (Erhitzer, UHT) je zwei der Indikatoren (Druck Homogenisator *und* Temperatur Heizmedium T_1 , bzw. Druck Homogenisator *und* Temperatur Heizmedium T_3) nicht, so durchläuft der jeweils betrachtete Abschnitt die (erweiterte) Induktionsphase⁹.

Produkt- und wasserseitige Volumenströme waren über den jeweiligen Beobachtungszeitraum, d. h. jeweils für die Dauer eines durchschnittlichen Produktionslaufs, konstant.

Die Datenreihen wurden für die Darstellung in den Abbildungen mittels

⁸Diese Einteilung spiegelt sich ebenfalls in den Eingangsmengen der Fuzzy-Systeme wieder.

⁹Dies im Vorgriff auf die Erklärung von „erweitert“ in diesem Zusammenhang.

gleitenden Mittelwertfilter geglättet.

Die folgenden Abbildungen stellen den Foulingwiderstand bzw. Druckverlust entsprechend der bereits eingeführten Unterteilung der Anlage in Sektionen, römisch durchnummeriert in Fließrichtung von I bis IV, dar. Sie finden unter dem technologischen Gesichtspunkt ihre Entsprechung in den Temperaturbereichen *niedrig, mittel, hoch*.

Abbildung 3.1 stellt den Foulingwiderstand (linke Abbildung) und den Druckverlust (rechte Abbildung) der Sektion I gegenüber. Den Druckanstieg in der Sektion I, also vor dem Homogenisator bleibt offensichtlich, im Gegensatz zu R_f , über die gesamte betrachtete Zeit konstant.

In seiner Auswirkung spielt also bei niedrigen Temperaturen der Druckverlust eine vernachlässigbare Rolle. Der Verlauf des Foulingwiderstands R_f weist in diesem Bereich allerdings auf Fouling hin. Stellt man dies den von Karlsson *et al.* (1996) ermittelten Daten, siehe Abbildung 2.1, gegenüber, so läßt dies darauf schließen, daß auch bei niedrigen Temperaturen bei längerer Standzeit die Ansatzmasse nicht gegen einen konstanten Grenzwert konvergiert, sondern daß in diesem Fall ebenfalls eine Änderung des qualitativen Verhaltens (Wendepunkt) auftritt.

Dies kann erst als sicher angenommen werden, wenn für noch längere Standzeiten Daten vorliegen, die dann einen Anstieg des Druckverlusts nachweisen. Ein weiterer, in der Literatur noch nicht umfassend untersuchter Effekt¹⁰ des Foulings bei Milcherhitzern kann hier als Erklärung zum Tragen kommen: das Altern der Foulingschicht. Altern hieße hier, daß sich die Ablagerungen mit der Zeit nur hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit verändern. Dabei nimmt die Wärmeleitfähigkeit zunehmend ab und das absolute Wachstum der Schicht

¹⁰Ansätze finden sich z. B. bei Hege (1984).

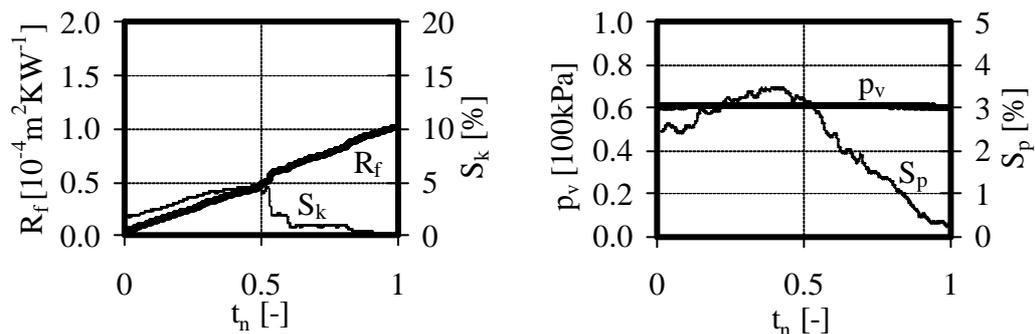


Abbildung 3.1.: Foulingwiderstand R_f (linke Abbildung), Druckverlust p_v (rechte Abbildung) und Schwankungen S_k bzw. S_p in Sektion I über der normierten Zeit t_n .

nimmt hinsichtlich Masse und Schichtdicke einen merklichen Einfluß auf den Druckverlust. Führt man diesen Gedanken fort, so erscheint eine Anlage, die den oben eingeführten *niedrigen* Temperaturbereich nicht verläßt, als nicht sehr anfällig für Fouling, da sich der Druckverlust nicht merklich ändert. Dieser Fall ließe auch einen asymptotischen Foulingwiderstand R_f zu, da als der dominierende Mechanismus nicht die Anlagerung, sondern die Alterung der Foulingschicht in Frage kommt.

Ein anderes Verhalten zeigt die Sektion II, siehe Abbildung 3.2. Sie umfaßt zusammen mit der Haltesektion den mittleren Temperaturbereich des Prozesses von etwa 75 - 100 °C, also gerade die für verstärkt auftretendes Protein-fouling kennzeichnenden Temperaturen.

In Abbildung 3.2 zeigt die linke Abbildung den Foulingwiderstand R_f , dessen Schwankung unter 5 % bleibt. Der kurzzeitige Anstieg der Schwankung rührt vom Übergang von der Induktions- zur Foulingphase her.

Von den beschriebenen Phänomenen läßt sich hier eine ausgeprägte Induktionsphase erwarten. Allerdings zeigt der Verlauf von R_f , daß sich unmittelbar nach Beginn der Datenaufnahme bereits Fouling einstellt. Vergleicht man damit den Verlauf des Druckverlusts, so zeigt sich die Induktionsphase deutlich. Die stärkere Schwankung des Druckverlusts erklärt sich durch die in diesem Abschnitt eingebauten analogen Druckaufnehmer, von denen die Meßdaten direkt abgelesen wurden.

Der Vergleich der Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigt an, daß sich die beiden für Fouling charakteristischen Prozeßparameter, Druck und Temperatur, in unterschiedlichen Zeitskalen verändern. Bezüglich des Wärmeübergangs tritt in Sektion I bereits Fouling auf, wogegen am Druck keine Veränderungen festzustellen sind. In Sektion II tritt Fouling hinsichtlich Wärmeübergang und Druck

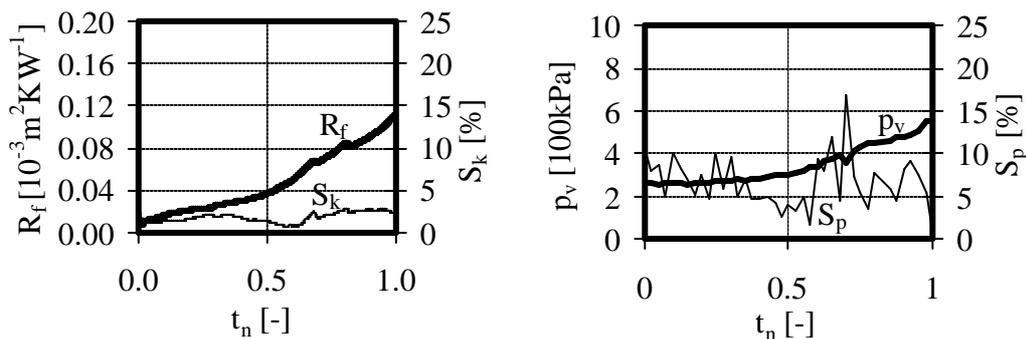


Abbildung 3.2.: Foulingwiderstand R_f (linke Abbildung), Druckverlust p_v (rechte Abbildung) und Schwankungen S_k bzw. S_p in Sektion II über der normierten Zeit t_n .

in gleichen Zeitmaßstäben auf.

Das unterschiedliche zeitliche Foulingverhalten der Sektionen I und II läßt sich als *erweiterte* Induktionsphase zusammenfassen. Erweitert in dem Sinne, daß die Induktionsphase erst dann als vollständig abgeschlossen betrachtet werden kann, wenn an beiden für das Fouling charakteristischen Prozeßgrößen, Temperatur und Druck, die Auswirkungen von Fouling auftreten. Die Vermutung, daß in Sektion I das Altern des Belages eine besondere Ausprägung erfährt, wird durch diese Beobachtung gestützt.

Abbildung 3.3 zeigt in der linken Abbildung die Zunahme der auf das Intervall $[0; 1]$ normierten Eingangstemperatur T_n , auf der rechten Seite den Druckverlust von 1 nach 4 (siehe Abbildung 2.4), also über die Anlage nach dem Homogenisator bis einschließlich UHT-Bereich. Die Eingangstemperatur T_n (dicke Linie) aus dem Intervall $[T_{anf}, T_{max}]$, mit T_{anf} der Auslegungstemperatur im sauberen (stationären) Zustand, T_{max} der höchsten für den Wasserkreis 1 beobachteten Temperatur. Die dünne Linie gibt die Schwankung ΔT_n absolut an, also nicht bezogen auf den jeweiligen Mittelwert.

Die Schwankungen betragen hier zwischen 5 und 15 %, der qualitative Verlauf zeigt zu Beginn ein Plateau, das die Induktionsphase aufweist. Der Wärmeübergang und der gesamten Druckabfalls lassen bis $t_n \approx 0.2$ über die Sektionen II bis IV keine nennenswerten Änderungen feststellen, woraus mit der Festlegung, daß die Induktionsphase vorliegt, solange keine nennenswerten Änderungen in den Stellgrößen auftreten, folgt, daß in diesem Bereich die Anlage die Induktionsphase durchläuft.

Hinsichtlich der Interpretation der Dauer der Induktionsphase sei angemerkt, daß die gezeigte Induktionsphase insgesamt kürzer erscheint, als in

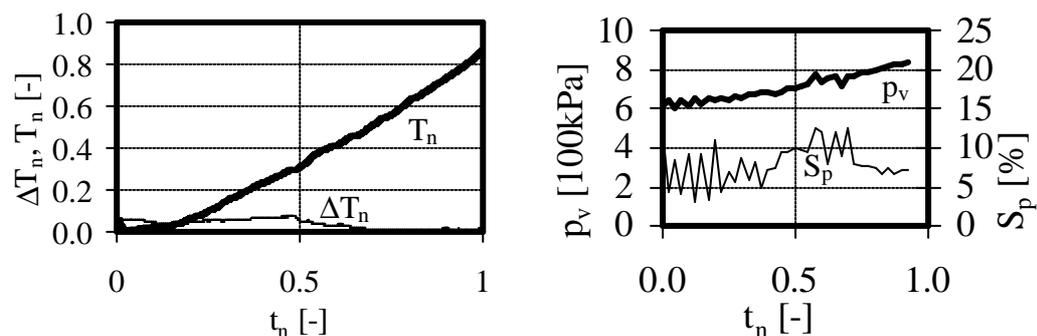


Abbildung 3.3.: Zur Veranschaulichung der beobachteten Induktionsphase. Normierter wasserseitiger Temperaturanstieg T_n (dicke Linie) bzw. ΔT_n (dünne Linie) für Kreislauf 1 (linke Abbildung) und Druckverlust p_v der Sektionen II bis IV (rechte Abbildung) über der normierten Zeit t_n .

den jeweils untersuchten Produktionsläufen beobachtet wurde. Dies liegt in der hier angewendeten Mittelwertbildung über mehrere Produktionsläufe begründet. Als weitere Folge scheint die Übergangsphase etwas verlängert.

Entsprechend der bereits eingeführten Terminologie liegt die Sektion III sowohl im mittleren als auch im hohen Temperaturbereich. Die Abbildung 3.4 stellen den Foulingwiderstand der Sektion III und den Druckverlust über der normierten Zeit nach dem Homogenisator zusammen. Der Foulingwiderstand weist in diesem Abschnitt keine Induktionsphase auf. Das Fehlen der (erweiterten) Induktionsphase erklärt sich durch das in diesem Abschnitt mit zunehmender Produkttemperatur überwiegende Salz fouling.

Die Schwankung von R_f im zweiten Abschnitt mittlerer Temperatur, d. h. der Sektion III, liegt ebenfalls unter 5 %. Im Vergleich zu den Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellten Verläufen nimmt hier R_f stärker zu.

Die zeitliche Entwicklung des Foulingwiderstandes in Sektion IV zeigt Abbildung 3.5 links. Wie von den Ergebnissen aus Sektion III zu erwarten, tritt wegen des überwiegenden Salz foulings keine Induktionsphase auf. Dies zeigt sich auch am normierten wasserseitigen Temperaturanstieg T_n (dicke Linie) bzw. ΔT_n (dünne Linie) in Abbildung 3.5 für den Kreislauf 2 (rechte Abbildung).

Zusammenfassung

Die aus den Meßdaten gewonnenen Erkenntnisse lassen sich dahingehend zusammenfassen, daß für die Vergleichsdaten die Schwankungen für Druck und Wärmeübergang jeweils zwischen als 5 und 10 % liegen. Die größeren Schwankungen im UHT-Bereich können nicht gedeutet werden.

Im Vergleich zwischen den einzelnen Abschnitten nimmt der Foulingwider-

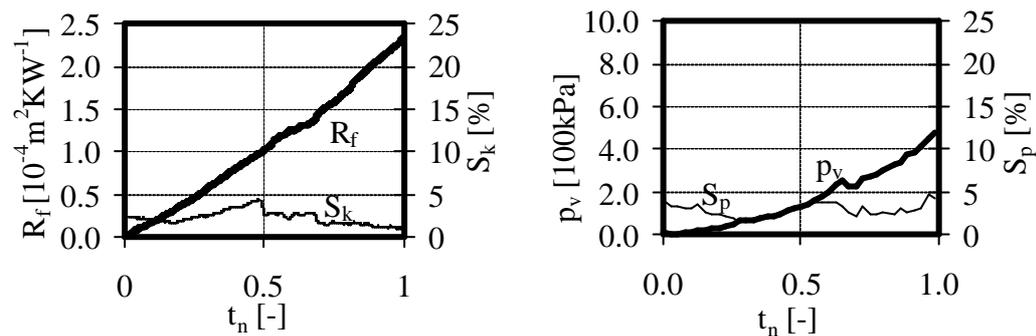


Abbildung 3.4.: Foulingwiderstand R_f und Schwankungen S_k für Sektion III (linke Abbildung) bzw. Sektion IV (rechte Abbildung) über der normierten Zeit t_n .

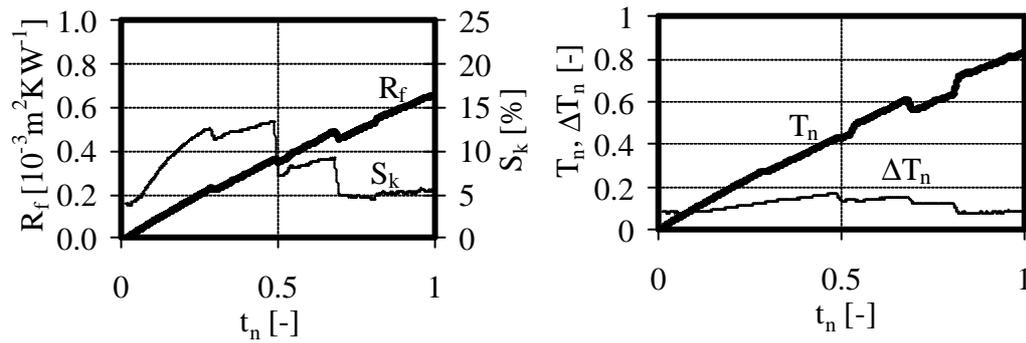


Abbildung 3.5.: Foulingwiderstand R_f und Schwankungen S_k für Sektion IV (linke Abbildung) bzw. der normierte wasserseitige Temperaturanstieg T_n (dicke Linie) bzw. ΔT_n (rechte Abbildung) über der normierten Zeit t_n .

stand in den Sektionen I und II über den Beobachtungszeitraum in ähnlichem Umfang zu, in Sektion III um etwa das Doppelte schneller als in Sektion I. Im Bereich hoher Temperaturen, also der Sektion IV, liegt hinsichtlich R_f qualitativ ähnliches Verhalten vor wie in Sektion III. Allerdings ist die Schwankung ebenso wie die Zunahme von R_f bedeutend größer, linearer Zuwachs vorausgesetzt über den gleichen Zeitraum um das 6- bzw. 3fache gegenüber den Sektionen I (II) bzw. III. Warum in diesem Abschnitt stärkere Schwankungen S_k , gerade am Anfang, auftreten, ist nicht zu erklären. Wären, was nahe liegt, Schwankungen in der Produktqualität die Ursache, so hätten diese auch in den vorhergehenden Sektionen auftreten müssen.

An der untersuchten Anlage ließen sich im Erhitzer ($T_{3'}$) Induktionszeiten zwischen einer und etwa fünf Stunden, im UHT-Bereich durchgehend keine beobachten, d. h. die Temperatur stieg gleich an, wobei der Druckverlust (Druckanstieg im Homogenisator heißt zusätzliche Pumpleistung in allen nachfolgenden Anlagenabschnitten) die Induktionszeit der Erhitzersektion limitierend blieb.

Die aus der Interpretation der Meßdaten gewonnenen phänomenologischen Ergebnisse sind mit der verschiedenen zeitlichen Entwicklung der gewählten charakteristischen Prozeßparameter Druck und Temperatur verknüpft. Daß in der Anlage unterschiedliches zeitliches Verhalten der beiden Größen in entsprechend übereinstimmenden Abschnitten (Temperaturprogramm) beobachtet werden kann, deutet auf unterschiedliche Mechanismen hin. Die Abgrenzung dieser Effekte motiviert daher die Unterscheidung in *thermisches* und *hydraulisches* Fouling. Diese begriffliche Unterscheidung ist sinnvoll, da unter „Fouling“ im weiteren Sinn auch die Belagbildung an z. B. Schiffsrümpfen verstanden wird. Die „thermischen“ Effekte sind hier natürlich vernachlässigbar.

Ersteres bezieht sich auf die in erster Linie mit dem Wärmeübergang verbundenen Effekte. In beiden Fällen kann - abhängig vom Temperaturbereich - eine Induktionsphase beobachtet werden.

Im vorliegenden Fall läßt sich bei niedrigen Temperaturen zuerst thermisches Fouling beobachten, hydraulisches Fouling dagegen nicht. Dieser Sachverhalt soll durch den Begriff *erweiterte* Induktionsphase Rechnung getragen werden, mit dem zum Ausdruck gebracht werden soll, daß die Induktionsphase erst dann als abgeschlossen betrachtet werden kann, wenn thermisches und hydraulisches Fouling die Induktionsphase durchlaufen haben.

Die vorliegenden Datensätze eignen sich damit zur Validierung.

3.2. Vergleich Rechenergebnisse mit Meßdaten

Vor der Erläuterung des Modells und seiner Bausteine stellt dieser Abschnitt die mit dem Modell errechneten Daten den im letzten Abschnitt diskutierten Meßdaten gegenüber. Um die im Sinne einer Verallgemeinerung des verwendeten Ansatzes nicht interessierende Auseinandersetzung mit den Absolutwerten zu vermeiden, erfolgt dieser Vergleich anhand von (auf die gemessenen Werte bezogenen) Daten.

Entsprechend dem im Abschnitt 3.1 werden zur Validierung (Heizmedium-) Temperatur an ausgewählten Meßpunkten und Druckverlust gewählt, da diese in den Molkereien ebenfalls zur Bewertung einer Erhitzungsanlage herangezogen werden. Der Bewertungszeitraum wurde auf zehn Stunden festgesetzt. Dies entspricht im vorliegenden Fall der Länge eines durchschnittlichen Produktionslaufes.

Eine Anmerkung zur Vorgehensweise bei der Modellerstellung und Validierung. In einem ersten Schritt wurden Meßdaten einer industriell genutzten Milcherhitzers gewonnen und die Parameter, d. h. im vorliegenden Fall die Stützstellen der Fuzzy-Systeme falls erforderlich abgeändert. Die Wahl der Stützstellen erfolgte dabei entsprechender in der Literatur angegebener Werte. In einem zweiten Schritt wurden abermals Meßdaten an der gleichen Anlage aufgenommen und ohne weitere Abänderung die Simulationsergebnisse mit den Meßdaten verglichen. Diese Gegenüberstellung ist Gegenstand dieses Abschnittes.

Längere Standzeiten wurden ebenso untersucht, siehe Abschnitt 3.1. Aus diesen Daten kann geschlossen werden, daß sich zum einen über den betrachteten Anlagenabschnitt hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs von Induktions- und Übergangsphase keine Änderungen ergeben. Beide Phasen sind sicherlich durchlaufen und daher treten für einen durchschnittlichen Produktionslauf keine wei-

teren Veränderungen auf.

Der niedrige Temperaturbereich wird in diesem Zusammenhang nicht in Betracht gezogen, da er, wie die Meßdaten zeigen, keine wesentliche Beeinträchtigung eines Milcherhitzers zeigt. Die vorgestellten Daten umfassen daher den mittleren und hohen Temperaturbereich.

Druckverlust

Die Tabelle 3.1 gibt den Druckverlust an. An den Vergleichspunkten der Sektion II (Δp_{13}) zeigen die Werte eine bessere Übereinstimmung zwischen den durch das Modell ermittelten und den gemessenen Werten als an den der Sektionen III und IV (Δp_{34}), wo nach etwa 7 Stunden der Druckverlust vom Modell als zu hoch ermittelt wird.

Überträgt man die angegebenen absoluten Fehler für Δp_{13} und für Δp_{34} auf den Relativen, so liegt die Druckschwankung S_p bei etwa 5-10%, vgl. Abbildungen 3.2 und 3.3, der Unterschied zwischen den errechneten Werten und den zur Validierung herangezogenen Meßwerten bei 1-11 bzw. 2-13 %.

Da zur Ermittlung des Druckverlustes die allgemein üblichen empirischen

Tabelle 3.1.: Druckverlust von p_1 nach p_3 (Δp_{13}) und p_3 nach p_4 (Δp_{34}). Der Index c steht für berechnet, m für gemessen, d_{13} bzw. d_{34} für die absolute Abweichung gemessen/gerechnet. Die Positionen beziehen sich auf die Ausführungen in Abschnitt 2.4, Abbildung 2.4

	Zeit [h]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta p_{13,c}$	2.05	2.20	2.28	2.35	2.48	2.54	2.59	2.64	2.69	2.73
$\Delta p_{13,m}$	2.30	2.31	2.48	2.42	2.40	2.47	2.63	2.67	2.72	3.03
d_{13}	0.25	0.11	0.20	0.07	-0.08	-0.07	0.04	0.03	0.03	0.30
$d_{13,rel}$ $= \frac{d_{13}}{\Delta p_{13,m}}$	0.11	0.05	0.08	0.03	-0.03	-0.03	0.02	0.01	0.01	0.10
$\Delta p_{34,c}$	3.64	3.67	3.76	3.87	4.01	4.16	4.31	4.47	4.62	4.77
$\Delta p_{34,m}$	3.72	3.91	3.86	3.93	4.11	4.20	4.23	4.23	4.08	4.25
d_{34}	0.08	0.24	0.10	0.06	0.11	0.04	-0.09	-0.24	-0.54	-0.52
$d_{34,rel}$ $= \frac{d_{34}}{\Delta p_{34,m}}$	0.02	0.06	0.03	0.02	0.03	0.01	-0.02	-0.06	-0.13	-0.12

Beziehungen Anwendung finden und diese selbst einen Fehler von 5 - 10 % aufweisen (Soumerai 1987), läßt sich diese Übereinstimmung als recht gut einordnen.

In diesem Zusammenhang sei die Bedeutung des durchschnittlichen Produktionslaufs hervorgehoben. Diese begriffliche Abgrenzung beschreibt den alltäglichen betrieblichen Ablauf nur ungenügend. Als Beispiel und Anregung sei hier auf Abbildung 3.6 verwiesen.

Hier findet sich die zeitliche Zunahme des Druckverlustes an zwei unterschiedlichen Datensätzen. Der eine Datensatz stammt aus der Anwendung des Modells und repräsentiert einen durchschnittlichen Simulationslauf, der andere kann durch produktionsbedingte Tankwechsel nicht als durchschnittlicher Produktionslauf klassifiziert werden. Die Zeitpunkte der Tankwechsel sind in der Abbildung durch a und b gekennzeichnet. Es darf von gleicher Rohproduktqualität ausgegangen werden, Unterschiede können bestenfalls in der Dauer der Lagerung bestehen. Auffallend ist hier, daß sich, nachdem sich die Zunahme des Druckverlustes wie erwartet entwickelt nach a ein Plateau ausbildet, dies bis zum Zeitpunkt b anhält, um danach in eine stärkere Zunahme überzugehen. Hinsichtlich der zeitlichen Zunahme der Temperaturen, also den Indikatoren für das thermische Fouling, den Temperaturen, zeigt sich diese Entwicklung nicht.

Temperatur

Die Tabelle 3.2 zeigt die relativen Abweichungen zwischen gemessenen und errechneten Temperaturen. Produktseitig erscheint hier nur der Meßpunkt T_2 , da die anderen Eintritts- bzw. Austrittstemperaturen aufgrund der Anlagen-

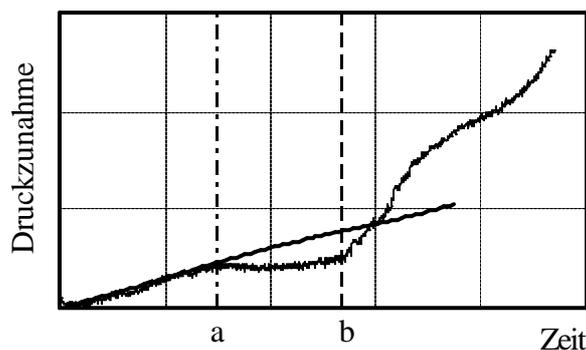


Abbildung 3.6.: Vergleich der Druckzunahme. Die Tankwechsel werden durch a und b angezeigt.

konfiguration festlegen. Von Interesse sind daher die am Heizmedium gemessenen Eintritts- bzw. Austrittstemperaturen. Innerhalb des Rechenablaufes wurde dabei sichergestellt, daß entsprechend „reale“ Betriebsbedingung simuliert wurden, weswegen die Eintrittstemperatur mittels eines P-Reglers bei jeweils konstanten Volumenströmen (Produkt/Heizmedium) dem auftretendem Fouling angepaßt wurden.

Als Bewertungskriterium für die Differenz zwischen den durchschnittlichen gemessenen und den errechneten Werten, führt Tabelle 3.2 in den letzten beiden Spalten (S_{min} bzw. S_{max}) die in Abschnitt 3.1 motivierte minimale bzw. maximale Schwankung an den Meßpunkten über den Beobachtungszeitraum auf.

Zusammenfassung, Diskussion

Die Tabellen 3.1 und 3.2 lassen sich dahingehend zusammenfassen, daß sowohl Temperaturen als auch Druck die Richtigkeit der Annahmen des Modellierungsansatzes bestätigen.

Die dem Modell zugrundeliegenden Annahmen fassen die für den Belag verantwortlichen Produktbestandteile in zwei Gruppen zusammen, die Proteine und die Milchsalze. Wie bereits ausgeführt, ist der mittlere Temperaturbereich gerade für den Übergang vom vorwiegenden Proteinbelag zum Belag aus Milchsalzen interessant. Im niedrigen Temperaturbereich setzt sich der Belag aus etwa 30-40 % Asche (Milchsalze) und etwa 60 % Protein zusammen, im

Tabelle 3.2.: Relative Abweichung zwischen gemessenen und errechneten Temperaturen in Prozent. Die Positionen $i \in \{2, 1', 2', 3', 4'\}$ beziehen sich auf die Ausführungen in Abschnitt 2.4, Abbildung 2.4. S_{min} bzw. S_{max} geben die minimale bzw. maximale Schwankung über den Bewertungszeitraum von 10 h an der jeweiligen Position an.

	Zeit [h]										S_{min}	S_{max}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T_2	-2.4	-2.5	-2.6	-2.5	-2.5	-2.4	-2.2	-2.2	-2.1	-2.0	0.2	0.9
$T_{1'}$	2.9	2.2	1.8	1.5	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2	0.5	1.4
$T_{2'}$	0.3	0.6	0.9	1.2	1.4	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	0.0	1.9
$T_{3'}$	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.0	0.4
$T_{4'}$	0.6	0.2	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	0.1	0.8

hohen Temperaturbereich liegt der Anteil der Proteine unter 20 %. Für den mittleren Temperaturabschnitt gibt Abbildung 3.7 die prozentuale Zusammensetzung des Belages wieder. Die Vereinfachung der Dynamik der Anlagerung in Bezug auf die der Rolle der Kaseine bzw. Milchsalze vereinfacht abgebildet wurde, wirkt sich auf die relative Zusammensetzung des Belages im Vergleich mit den in der Literatur angegebenen Werten nicht aus¹¹.

Damit stehen drei Kriterien zur Verfügung, die mittelbar das Modell verifizieren: Druck, Temperatur und die relative Zusammensetzung des Belagmaterials. Die beiden ersteren bestätigen hierbei die getroffenen Annahmen.

Vergleichende Untersuchungen zur Technologie der Milcherhitzung unter Anwendung des vorliegenden Modells (Benning 2002) zeigen Möglichkeiten zur Einsparung bzw. Optimierung auf. Ohne dieser Darstellung vorzugreifen, sei kurz die Vorgehensweise sowie in Tabelle 3.3 die Ergebnisse dargestellt und für die vorliegende Untersuchung interessante Schlüsse mitgeteilt.

Die Vorgehensweise in diesem Fall läßt sich zusammenfassen, daß durch Abwandlung der Anlagenkonfiguration bzw. der Anlagenparameter (z. B. Volumenströme, Temperaturprogramme) gewonnene Aussagen mit denen der Referenzanlage bezogen auf die (Referenz-) Anlagenstandzeit verglichen werden. Die Abänderungen erfolgten in einer plausiblen Stufung der betrachteten

¹¹Die direkte, absolute Bestimmung der Belagmasse bzw. Analyse der Zusammensetzung während eines Produktionslaufes war nicht möglich.

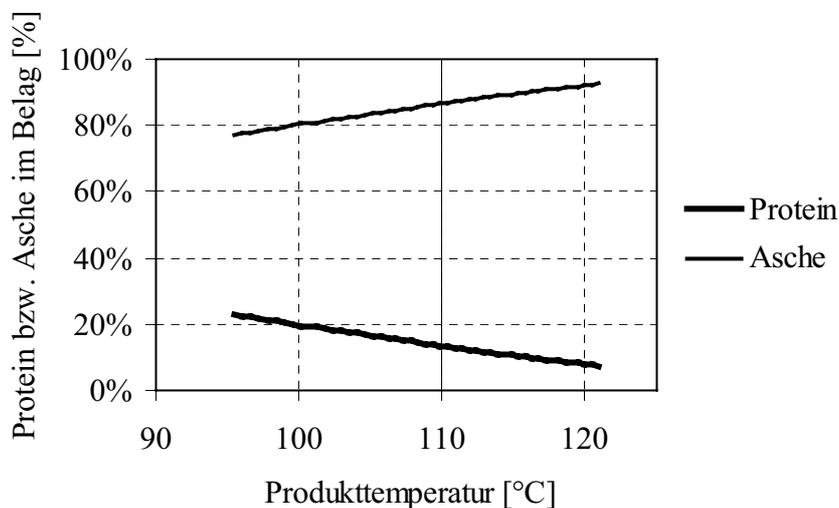


Abbildung 3.7.: Zusammensetzung der abgelagerten Masse (Protein/Asche) dargestellt über der Temperatur.

Tabelle 3.3.: Verlängerung der Standzeit gegenüber der Referenzanlage durch Abänderung der Anlagenkonfiguration nach Benning (2002). Zur Zuordnung der Sektionen siehe Abbildung 2.4.

	Abschnitt	Art der Abänderung	Δp	k
1	Haltesektion	Erniedrigung der Haltetemperatur	20 %	25 %
2	Sektion III, IV	Produktgeschwindigkeit	50 %	20 %
3		wärmeübertragende Fläche	50 %	10 %
4	Sektion IV	Volumenstromverhältnis	15 %	20 %
5		Rohrdurchmesser	20 %	10 %

Anlagenkomponenten (Rohrdurchmesser nach DIN-Reihe, Fläche nach DIN-Reihe bzw. hinzufügen/weglassen einzelner Röhrenwärmeübertrager) jeweils nach oben und unten (Vergrößerung/Verkleinerung).

Die Prozentangaben beziehen sich dabei auf die erwartete Verlängerung der Standzeit bezogen auf die durchschnittliche Standzeit der Referenzanlage in Prozent. Es sei hier darauf hingewiesen, daß die unter 2, 3 und 5 in Tabelle 3.3 aufgeführten Abänderungen auf Druck und Wärmeübergangskoeffizient gegenseitig wirken: was hinsichtlich der Zunahme des Druckverlustes verlängernd wirkt, kürzt die Standzeit bezüglich des Wärmeübergangs und umgekehrt. Die Abänderung des Volumenstromverhältnisses in Sektion IV wurde dabei auch umgesetzt. Motivation hierfür war, durch Erniedrigung den mittelbaren Einfluß des Wärmestroms über die Temperaturdifferenz bei gleichem Temperaturprogramm zu untersuchen. Wie die Rechenergebnisse zeigen, reagiert das Modell auf diese Erniedrigung des Wärmestroms wie zu erwarten auf eine Verringerung der Belagbildung im untersuchten Bereich.

Diese Beobachtung zeigt zugleich auf, daß diese Abänderungen auch unter dem Blickpunkt einer Sensitivitätsanalyse gesehen werden können. Die Veränderung der Konfiguration bewirkt, daß jeweils an den von der Verweilzeit her gesehenen gleichen Punkten innerhalb der Anlage das Numero-Fuzzy-Hybrid lokal eine unterschiedliche Parametrierung erfährt. Reagiert das System nun „plausibel“ auf die gemachten Änderungen, so ist daraus zu schließen, daß die Sensitivität des Anlagenmodells ebenfalls die Sensitivität des abgebildeten Prozesses widerspiegelt. Der umgekehrten Fall, d. h. das Modell zeigt bei Änderung der Parameter nicht eine dem ursprünglichen Prozeß entspre-

chende Empfindlichkeit, erfordert eine Ergänzung bzw. Änderung des Modells bzw. der Modellannahmen. Die Ausführungen von Benning (2002) seien soweit zusammengefaßt, daß die so erhaltenen Ergebnisse jeweils aus dem technologischen Kontext der Milcherhitzung sinnvoll sind, das Modell also „richtig“ auf Parameteränderungen reagiert.

Abschließend sei noch angemerkt, daß eine Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen „mit Fuzzy“ und „ohne Fuzzy“ bewußt weggelassen wurde, da nur das „Weglassen“ der Fuzzy-Systeme das klassische Modell zu unrecht schlechter aussehen ließe. Hierzu müßte man ein echtes klassisches Konkurrenzmodell direkt auf die hier betrachtete Anlage anwenden.

3.3. Wechselwirkungen innerhalb des Numero-Fuzzy-Hybrid Modells

Im Vordergrund steht, ein möglichst vollständiges *Prozeß*abbild einer Milcherhitzungsanlage zu erreichen. Dies führt auch zur Notwendigkeit, Kompromisse hinsichtlich der Auflösung der Anlage einzugehen. Eine detaillierte, hochauflösende Simulation des lokaler Stoffaustauschs, wie sie z. B. von Esterl (2001) beschrieben werden, wurde nicht angestrebt, vielmehr, entsprechend der zur Validierung vorhandenen Meßdaten eine

- Abbildung der Temperaturverläufe
- Darstellung des Druckverlustes
- Bewertung des Anlagenzustandes

Das daraus resultierende (räumlich) eindimensionale Prozeßmodell reicht in diesem Fall aus, da hier bereits die für die Bewertung der Erhitzung bedeutsamen Effekte (z. B. B^* , C^*) ausreichend genau ermittelt werden können.

Der *Zustand* einer Anlage wird über die Temperatur und den Druckverlust bewertet. Wie die Untersuchungen und die zugrunde liegenden physikalischen Vorstellungen zum Fouling zeigen, bestimmen die Temperaturdifferenz Wand-Produkt, die über Prandtl- und Reynoldszahl charakterisierte Strömung bzw. Wärmeübertragung, die lokale Beschaffenheit der Oberfläche (Phase) und die Produkttemperatur die Anlagerung.

Abbildung 3.8 zeigt das Geflecht der allgemeinen Wechselwirkungen bei Fouling und die Zuordnung der eingesetzten Modelle auf. „Numerik“ faßt die klassischen, z. T. empirischen Ansätze zusammen, „Fuzzy“ weist auf die Verwendung eines Fuzzy-Systems zur Modellbildung hin.

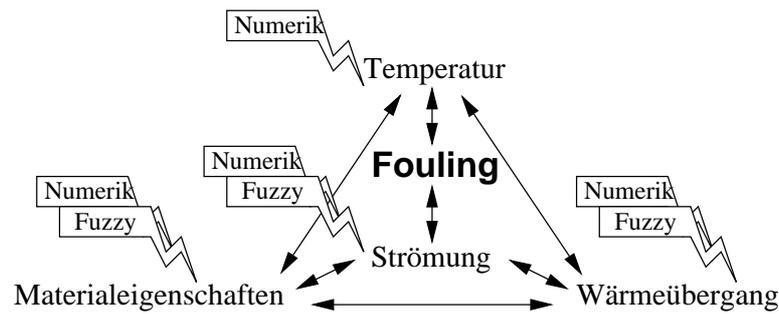


Abbildung 3.8.: Wechselwirkungen des Numerofuzzy-Hybrids.

Im Zentrum dieses Netzes steht das Fouling-Phänomen selbst, da die drei Phasen Induktion, Übergang und das eigentliche Fouling, das stete Wachsen des Belages, selbst unterschiedliche Auswirkungen auf den Prozeß zeigen. Aus diesem Grund wurde der über die Phasen charakterisierbare Anlagenzustand selbst als Zustandsgröße in das Modell eingeführt, der die zeitliche Abfolge der Zustände Induktion - Übergang und Wachstum lokal beschreibt. Lokal in dem Sinne, daß diese Größe mit einem Fuzzy-System entsprechend der Diskretisierung der Anlagenkomponenten an jedem Element ermittelt wird.

In Anlehnung an diese Abbildung diskutieren die folgenden Abschnitte das Modell. Die Fuzzy-Systeme selbst werden für sich im Abschnitt 3.4 behandelt. Wie die folgenden Ausführungen zeigen, fanden Standardverfahren Anwendung. Da eine detaillierte Darstellung im vorliegenden Fall nicht zweckdienlich ist, sei auf den Anhang verwiesen¹².

Temperatur

Die Temperatur besitzt hier eine zweifache Bedeutung: zum einen ist sie die den Erhitzungsprozeß bestimmende Prozeßgröße, zum anderen wirkt sie über die Temperaturabhängigkeit der Stoffgrößen als wesentlicher Parameter in den Materialeigenschaften, der Strömung und des Wärmeübergangs.

Im Abschnitt 3.1 ist festgehalten, daß die Temperaturprogramme produktseitig zwei Fixpunkte an den Speisestellen des Heizmediums aufweisen. Fixpunkte in dem Sinn, daß hier eine geforderte Temperatur über den gesamten Produktionslauf zur Gewährleistung der Erhitzung eingehalten werden muß. Die durch Fouling erforderliche zusätzliche Erhöhung der zugeführten Heizleistung wird bei konstanten Volumenströmen über die Erhöhung der Eintritts-

¹²Siehe S. 59 ff.

stemperatur des Heizmediums realisiert. Um nun ein möglichst reales Prozeßabbild zu erhalten, wurde ein Proportionalregler im Simulationsablauf integriert. Dies reicht in diesem Fall aus, da die aufwändigere Kaskadenregelung eingesetzt wird, um wechselnden Vordruck oder andere Störungen des Heizmediummassenstroms abzufangen. Nach Fryer & Slater (1986) führt diese Strategie zu einem stabilen stationären Zustand.

Wärmeübergang, Stofftransport

Zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten α_p und α_w in

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{s_f}{\lambda_f} + \frac{1}{\alpha_p} \quad (3.1)$$

finden die im VDI-Wärmeatlas (VDI 1997) angegebenen empirischen Beziehungen nach Hausen/Gnielinski Anwendung. Der Fuzzy-Anteil ist hier in der Dicke s der abgelagerten Schicht über die angelagerte Masse integriert. Die Zusammensetzung der Foulingschicht setzt sich dabei im Folgenden aus den zwei wesentlichen Komponenten (Protein, Salz) zusammen. Dabei sind in „Protein“ ebenfalls über einen Faktor die Anteile an Kasein und Fett berücksichtigt. Die Proteinanlagerung modelliert ein um einen Anlagerungsterm erweitertes Modell nach de Jong *et al.* (1992)¹³

$$\dot{C}_N = -k_U C_N \quad (3.2)$$

$$\dot{C}_U = k_N C_N - k_A C_U^2 - k_d C_U \quad (3.3)$$

$$\dot{C}_A = k_A C_U^2 \quad (3.4)$$

$$\dot{C}_d = k_d C_U. \quad (3.5)$$

Hierbei folgen k_U , k_N und k_A einer Beziehung nach Arrhenius

$$k_i(T) = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

mit $i \in N, U, A$, wobei die Anlagerungsrate über

$$k_d = k_{Protein} k_t = k_{Fuzzy} \left[\frac{1}{k_{Transport}} + \frac{1}{k_{Reaktion}} \right]^{-1} \quad (3.6)$$

dargestellt wird. Die Abschätzung von $k_{Transport}$ und $k_{Reaktion}$ basieren auf Literaturdaten (de Jong 1996, Kessler 1996, Kennel 1994). Den reaktive Anteil des

¹³Siehe Abschnitt 2.1, S. 9

Stofftransportes berücksichtigt eine von de Jong (1996) angegebene Arrhenius-Beziehung, der Transportanteil $k_{Transport}$ beruht auf einer Abschätzung des Diffusionskoeffizienten über die Beziehungen nach Wilke-Chang oder Einstein (Mersmann 1980)¹⁴ zusammen mit der Sherwood-Zahl für das aufgefaltete β -Laktoglobulin.

Bei den hier angegebenen Überlegungen ist in Betracht zu ziehen, daß der Diffusionskoeffizient direkt sowie die Sherwoodzahl über die darin auftretenden Stoffgrößen von der Temperatur abhängen. Diese Temperaturabhängigkeit im vorliegenden Fall berücksichtigten implizit die Fuzzy-Modelle über den Korrekturfaktor. Der Stoffübergang wird als Nettotransport aus der Kernströmung an die Wand inklusive Reaktion proportional der Schlüsselkomponente β -Laktoglobulin angesetzt. Dies läßt sich auch rechtfertigen, wenn man berücksichtigt, daß der *Partikeldurchmesser* der sich anlagernden Milchbestandteile aufgrund der Reaktionen zwischen den Milchbestandteilen (Protein/Kasein, Fett, Milchsäure) ändert, siehe hierzu Kennel (1994).

Die angelagerte Proteinmasse wird aus der so bestimmten Konzentration, die Schichtdicke über eine durchschnittliche Dichte des Belages ermittelt.

Im Falle des Salz foulings fand eine empirische Beziehung nach Hege (1984) Anwendung, siehe Abschnitt 3.4. Hierfür gilt in Bezug auf die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen gilt das zur Proteinanlagerung Gesagte.

Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften fassen als Oberbegriff die Stoffgrößen der im Prozeß auftretenden Fluide (Wasser, Milch) sowie des Belages zusammen. Die verwendeten Beziehungen sind im Anhang zusammengestellt. Da in der untersuchten Anlage Heißwasser als Heizmedium wirkt, genügt es die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen, das Heißwasser ist unter den vorliegenden Gegebenheiten inkompressibel. Die Rauigkeit der Belagoberfläche zählt ebenfalls zu den Materialeigenschaften.

Strömung

Phänomenologisch betrachtet, wirkt Fouling auch auf die Strömung ein, da die sich bildende Ablagerungsschicht den Rohrquerschnitt einengt und zusätzlich durch die sich ändernde Oberflächenbeschaffenheit die Rauigkeit ändert.

Der Verengung des Rohrquerschnittes wird durch die Berücksichtigung der angelagerten Schicht Rechnung getragen, die Veränderung der Oberfläche selbst

¹⁴Siehe hierzu Anhang, S. 77.

wird über die Ermittlung des Druckverlustes berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Druckverlustes wurde der Beziehung nach Nikuradse (VDI 1997) gegenüber der von Churchill (1977) angegebenen der Vorzug gegeben. Mit letztgenannter lassen sich die Druckverlustbeiwerte von laminaren bis turbulente Strömungen über einen weiten Bereich unter Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit angeben. Die für diesen Ansatz erforderliche Rauigkeit ermittelt dabei ein Fuzzy-System¹⁵.

3.4. Eingesetzte Fuzzy Systeme

Wie im Abschnitt 3.3 ausgeführt, finden im hier vorgestellten Numero-Fuzzy-Hybrid Modelle zur Bestimmung des Anlagenzustandes über die Phase, der Protein- und Salzanlagerung sowie der Oberflächenrauigkeit Anwendung.

Die Regeln dieser Fuzzy-Logik Modelle wurden von einem menschlichen Experten entworfen und nicht etwa durch automatische Regelgenerierung wie z. B. Fuzzy-Clustering basierend auf experimentiellen Daten.

Der gewählte Ansatz hat den Vorteil, daß sich so das vielfältige, in der Literatur vorhandene, aus einer Vielzahl von Experimenten gewonnene Expertenwissen, vgl. Abschnitt 2, integrieren läßt. Für den Fall direkt zugänglicher Experimentaldaten sind diese nur für den speziellen Aufbau zugeschnitten und die gewünschte Verallgemeinerung wäre nicht möglich.

Die mit den Fuzzy-Systemen errechneten Größen lassen sich auf zweierlei Weise anwenden: entweder wird die Größe selbst oder ein Faktor bestimmt, mit dem die Größe entsprechend der erwarteten Tendenz „korrigiert“ wird.

Dabei bestimmt ein Fuzzy-System oder eine klassische Modellierung die Eingangswerte der Fuzzy-Systeme. Die Ergebnisse des Fuzzy-Systems werden in der weiteren Rechnung verwendet, z. B. in der Parametrierung der klassischen Modellierungsansätze. Die Einteilung der Fuzzy-Mengen erfolgte nach in der Literatur angegebenen Kriterien bzw. Ergebnissen. Die Integration der in den Experimenten gewonnen Erfahrungen in das Modell erfolgte manuell.

Ein Beispiel für den erste Möglichkeit ist die Oberflächenrauigkeit. Das Fuzzy-System übernimmt hier während der Simulation die Rolle des menschlichen Experten. Betriebszustand und Anlagenabschnitt bestimmen so in Übereinstimmung mit der Erfahrung für die weiteren Rechnungen festgelegten Wert. Die zweite Möglichkeit, multiplikative Faktoren, finden bei der Protein- und Salzanlagerung Anwendung. Hier werden auf die Abschätzungen, die auf den klassischen Ansätzen beruhen, Faktoren angewandt, mit denen die in der Literatur berichteten Tendenzen berücksichtigt werden.

¹⁵Siehe Abschnitt 3.4, S. 51.

Eine Sonderstellung nimmt die Phase ein. Sie hat als phänomenologisch motivierte Größe keine direkte physikalische Entsprechung und bündelt (qualitativ) eine Vielzahl von Einflußgrößen. In der Formulierung der Fuzzy-Regeln kann die Phase als Zwischenergebnis bzw. Zwischengröße betrachtet werden: sie charakterisiert den Anlagenzustand.

Zur Darstellung der Fuzzy-Systeme

Formal lassen sich alle Fuzzy-Systeme als Abbildung von $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ betrachten, wobei m der Gesamtanzahl an Eingängen, n der an Ausgängen entspricht. Dieser Ansatz geht zu Lasten der Übersichtlichkeit und bringt keinerlei Vorteile. Hier bietet sich eine komponentenweise Betrachtung $\mathbb{R}^{m_i} \rightarrow \mathbb{R}$ der einzelnen Teilmodelle an.

Die Darstellung der Fuzzy-Mengen erfolgt durch $Name(t_1, t_2, t_3, t_4)$ und greift auf die Definition einer LR-Fuzzy-Menge¹⁶ zurück, d. h. mit $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4$ werden die Werte der Trägermenge angegeben, an denen die (stückweise lineare) Zugehörigkeitsfunktion ihren Wert ändert; Mengen vom Typ A, Z, S, T¹⁷ lassen sich als Tupel $(t_1; t_2; t_3; t_4)$ darstellen. $Name$ bezieht sich auf die Bezeichnung des linguistischen Terms der entsprechenden Fuzzy-Variablen. Die Art der Zugehörigkeitsfunktion¹⁸ ist der Tabelle 3.4 zu entnehmen. Die Tabelle 3.5 faßt die verwendeten linguistischen Variablen und die Zuordnung der entsprechenden Fuzzy-Mengen und deren Träger zusammen. Ausführungen zur Motivation der Variablen bzw. der Zuordnung der Intervalle der Trägermengen finden sich jeweils bei den Erläuterungen der einzelnen Fuzzy-Systeme.

¹⁶Siehe Anhang S. 62, Definition (A.2.2)

¹⁷Siehe dazu Abbildung 2.2, S. 20.

¹⁸A, Z, S, T: vgl. Abbildung 2.2.

Tabelle 3.4.: Zuordnung des Tupels $(t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4)$ mit $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4$ zu den Fuzzy-Mengen.

Typ	
S	$t_1 \neq t_2 \neq t_3 = t_4$
Z	$t_1 = t_2 \neq t_3 \neq t_4$
A	$t_1 \neq t_2 = t_3 \neq t_4$
T	$t_1 \neq t_2 \neq t_3 \neq t_4$

Tabelle 3.5.: Zuordnung der linguistischen Variablen für die verwendeten Fuzzy-Systeme.

Variable	linguistische Variable, Fuzzy-Sets
Protein [mg/m^2]	niedrig (0.0; 0.0; 1.0; 2.0), mittel (1.0; 2.0; 2.0; 3.0), hoch (2.0; 3.0; 4.0; 4.0)
Salz [mg/m^2]	niedrig (0.0; 0.0; 1.0; 2.0), mittel (1.0; 2.0; 2.0; 3.0), hoch (2.0; 3.0; 4.0; 4.0)
Gesamt [mg/m^2]	niedrig (0.0; 0.0; 1.0; 2.0), mittel (1.0; 2.0; 2.0; 3.0), hoch (2.0; 3.0; 4.0; 4.0)
Phase [-]	Induktion (0.0; 0.5; 0.5; 0.75), Übergang (0.5; 0.75; 0.75; 1.0), Fouling (0.75; 1.00; 1.00; 1.25)
Δ Temperatur [K]	niedrig (0.0; 0.0; 5.0; 10.0), mittel (5.0; 10.0; 10.0; 15.0) hoch (10.0; 15.0; 20.0; 20.0)
Temperatur [K]	niedrig (333; 333; 343; 353), mittel (343; 353; 358; 368) hoch (358; 368; 373; 373)
pH [-]	niedrig (5.00; 5.00; 6.20; 6.65), mittel (6.20; 6.65; 6.65; 7.10) hoch (6.65; 7.10; 7.20; 7.20)
Proteinrate [-]	niedriger (0.0; 0.3; 0.3; 0.6), niedrig (0.3; 0.6; 0.6; 1.2) mittel (0.6; 1.2; 1.2; 2.0), hoch (1.2; 2.0; 2.0; 2.5) sehr hoch (2.0; 2.5; 2.5; 3.0)
Salzrate [-]	niedrig (0.0; 0.05; 0.05; 0.1), mittel (0.05; 0.1; 0.1; 0.15) hoch (0.1; 0.15; 0.15; 0.2)
Schicht [m]	niedrig (0.0 ; $5 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-6}$) mittel ($5 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-4}$) hoch ($5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-3}$)
Dichte [kg/m^3]	niedrig (500; 500; 750; 800), mittel (750; 800; 800; 1000) hoch (800; 1000; 1100; 1100)
Rauhigkeit [m]	glatt ($1 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-5}$) mittel ($5 \cdot 10^{-6}$; $5 \cdot 10^{-5}$; $5 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-4}$) rauh ($5 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$)

Phase

Fouling wird durch drei Phasen charakterisiert: Induktion, Übergang und die des starken Wachstums (Fouling-Phase). Die Induktionsphase wird einhellig als Vorbereitung (Konditionierung) der Oberfläche für das nachfolgende Wachstum gedeutet.

Bevor auf das Fuzzy-System näher eingegangen wird, soll anhand von Abbildung 3.9 die Existenz unterschiedlicher Phasen bzw. Phasenbedingungen an unterschiedlichen Orten innerhalb der Anlage veranschaulicht werden. Abbildung 3.9 zeigt dabei die vom Fuzzy-System ermittelte Phase nach einer halben (linke Abbildung (A)) bzw. nach 2.5 Stunden (rechte Abbildung B). Der in dieser Darstellung gewählte Anlagenabschnitt umfaßt den *mittleren* Temperaturbereich. Die Graphen der Zugehörigkeit über dem normierten Fließweg zur Phasencharakterisierung „Fouling“ (dicke Linie), „Übergang“ und „Induktion“ (dünne Linien) sind mit einer Textlegende in der Abbildung versehen.

Der abgebildete Anlagenabschnitt erstreckt sich über den gesamten *mittleren* Temperaturbereich. Er eignet sich deshalb besonders zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Phasenbedingungen, da er sowohl niedrige Temperaturen, wo wenig Belagbildung zu erwarten als auch hohe Temperaturen, bei denen die Belagbildung durch Salz fouling einsetzt, umfaßt.

Dieser Bereich befindet sich nach einer halben Stunde noch weitgehend in der Induktionsphase. Bei etwa 0.2-0.25 zeichnet sich deutlich die Zuordnung

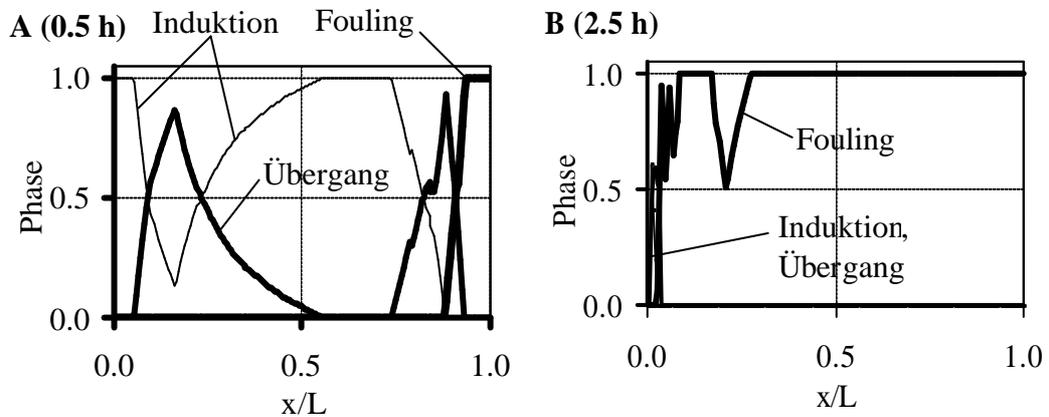


Abbildung 3.9.: Phase nach 0.5 h (A) und 2.5 h über der normierten Länge. Die dicke Linie zeigt die Foulingphase an, Induktions- und Übergangsphase sind mit dünnen Linien dargestellt.

zu „Übergang“ ab. Dies entspricht gerade den Temperaturbereich, in dem die Kinetik der Schlüsselkomponente β -Laktoglobulin besonders starke Belagbildung erwarten läßt. Gegen Ende des betrachteten mittleren Temperaturbereichs läßt sich entsprechend des einsetzenden Salz foulings keine ausgeprägte Induktions- bzw. Übergangsphase feststellen. Hier tritt, wie von den Meßdaten her zu erwarten, bereits „Fouling“ auf.

Aus den Meßdaten lassen sich die Phasen nur mittelbar an den Temperaturprofilen bzw. dem Druckverlust erkennen¹⁹. Die mittelbare Beobachtbarkeit liegt darin begründet, daß sich die an der Wärmeübertragerfläche angelagerte Masse nicht direkt aus den zur Verfügung stehenden Daten ermitteln läßt. Hier bietet die Phasenerkennung einen Vorteil, da auch auf den - von der gewählten Diskretisierung abhängigen - lokalen Anlagenzustand²⁰ geschlossen werden kann.

Der zeitliche Rahmen, in dem die Induktion in dem betrachteten Anlagenabschnitt stattfindet, bewegt sich, wie aus den hier vorgestellten Meßdaten und der Literatur bekannt, bei Röhrenwärmetauschern für Proteinfouling zwischen etwa einer halben und 5 Stunden.

Die Temperaturabhängigkeit (vgl. Abbildung 2.1), betrifft nicht den lokalen Anlagenzustand. Sie gehört zur Protein- bzw. Salzanlagerung selbst. Die angelagerte Masse und damit die spezifische Anlagerungsmasse hängt mittelbar von der Temperatur ab. Vermittelt wird die Abhängigkeit von der Temperatur über die Anlagerungsgeschwindigkeit, die aktuell zur Verfügung stehende Menge an Belagbildnern (Proteine, Salz, etc.) sowie der Oberflächentemperatur in dem entsprechenden Bereich und dem Temperaturunterschied zwischen Strömungskern und der Wandtemperatur.

Die Tabelle 3.6 führt die Regeln und die verwendeten Ein- und Ausgangsgrößen²¹ auf. Als Eingangsgrößen finden die angelagerte Masse an Protein, Salz und die gesamt angelagerte Masse Verwendung. Die angelagerte Masse wird dabei als flächenbezogene, spezifische Anlagerungsmasse dargestellt. Diese Charakterisierung gilt sowohl für den Salz- als auch Proteinbelag.

Es sei betont, daß die eingeführte Größe „Phase“ eine (dimensionslose) Hilfsgröße darstellt, die keine unmittelbare physikalische Entsprechung besitzt. Wie bereits erläutert sehr wohl mittelbar, da sie über die angelagerte Masse die lokalen Gegebenheiten und damit auch gewissermaßen die „Geschichte“ der An-

¹⁹vgl. S. 29 ff.

²⁰Unter stark vereinfachenden Annahmen läßt sich auf die *gesamte* Rohrlänge eines Wärmetauschers abgelagerte Masse schließen. Erforderlich ist aber eine im Rahmen der geforderten Auflösung des Prozeßmodells eine *lokale* Betrachtung des Wärmeübergangs. Diese lokale Betrachtungsweise unterstützt das Fuzzy-System zur Phasenbestimmung.

²¹Siehe auch Tabelle 3.5, S. 45.

lagerung beschreibt. Die Trägermengen für die Fuzzy-Mengen der Ausgangswerte kann man daher frei wählen.

Proteinfouling

Das „Proteinfouling“ bezieht sich im wesentlichen auf das einhellig in der Literatur als Schlüsselkomponente für die Anlagerung von Proteinen beim Erhitzen von Milch genannte β -Laktoglobulin. Im Wesentlichen heißt hier, daß die physiko-chemischen Reaktionen im Strömungskern die Temperaturabhängigkeit der Anlagerung über die zur Verfügung stehenden Mengen an aufgefaltetem β -Laktoglobulin dominieren.

Zugrunde liegt die Modellvorstellung, daß das β -Laktoglobulin in zwei Schritten denaturiert²². Im ersten Schritt wird das native β -Laktoglobulin aufgefaltet, im zweiten aggregiert dieses. Wie in den Ausführungen zum Stand der Forschung bereits ausgeführt, besteht ein enger Zusammenhang der Belagbildung mit dem aufgefalteten β -Laktoglobulin²³.

Für die Anlagerung dieses Proteins wird zunächst mit klassischen Methoden der Anteil des Transports und der Reaktion abgeschätzt, die sich daraus

²²Siehe S. 9

²³Siehe S. 9.

Tabelle 3.6.: Fuzzy-Regeln zur Phasenerkennung (Regelbasis R1).

n_r	WENN	DANN
		<i>Phase</i>
		IST
1	(<i>Protein IST niedrig</i> ODER <i>Protein mittel</i>) UND (<i>Salz IST niedrig</i> ODER <i>Salz IST mittel</i>) UND <i>Gesamt IST niedrig</i>	<i>Induktion</i>
2	(<i>Protein IST niedrig</i> ODER <i>Protein IST mittel</i>) UND (<i>Salz IST niedrig</i> ODER <i>Salz IST mittel</i>) UND (<i>Gesamt IST mittel</i>)	<i>Übergang</i>
3	(<i>Protein IST niedrig</i> ODER <i>Protein IST mittel</i> ODER <i>Protein IST hoch</i>) UND (<i>Salz IST niedrig</i> ODER <i>Salz IST mittel</i> ODER <i>Salz IST hoch</i>) UND <i>Gesamt IST hoch</i>	<i>Fouling</i>

ergebende Anlagerungsgeschwindigkeit mit einem Fuzzy-System korrigiert.

Tabelle 3.7 stellt die Zusammenhänge²⁴ des Fuzzysystems zur Proteinanlagerung zusammen. Es sei darauf hingewiesen, daß es sich in den Tabellen bei der Bezeichnung „sehr hoch“ zur Benennung der Ausgangsmenge nicht um einen Fuzzy-Modifizierer handelt. Der lokale Anlagenzustand findet Eingang über den Ausgangswert des Fuzzy-Systems zur Phasenbestimmung. Die Motivation für diese Vorgehensweise liefern die bereits erwähnten Adsorptionsexperimente.

Die Wahl der Eingangsmengen für die Temperatur im Strömungskern folgt der über die Belagtypen sowie durch die Prozeßschritte bzw. Anlage nahegelegten Einteilung, vgl. Seite 27, und wurde für alle Fuzzy-Systeme beibehalten. Darüberhinaus beeinflußt der Temperaturunterschied ΔT zwischen Wand und Strömungskern die Anlagerung genauso wie die Temperatur im Strömungskern selbst. Die Auswahl der Intervalle basiert auf bei der Erhitzung von Milch üblichen Werten. Damit ist der Temperaturunterschied größer Null²⁵ und lehnt sich an die für dieses Produkt typischen Werte an. Richtschnur hierfür waren Gyn-

²⁴Siehe auch Tabelle 3.5, S. 45

²⁵Die Berücksichtigung der Kühlung hätte hier negative Werte zur Folge.

Tabelle 3.7.: Fuzzy-Regeln zur Proteinanlagerung (Regelbasis R2). ΔT kürzt die Variable Temperaturunterschied, T Temperatur ab.

n_r	WENN	DANN
		<i>Proteinrate</i>
		IST
1	<i>Phase IST Induktion</i>	<i>niedriger</i>
2	ΔT IST <i>niedrig</i>	<i>niedriger</i>
3	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>pH</i> IST hoch UND <i>T</i> IST <i>niedrig</i>	<i>niedrig</i>
4	<i>Phase IST Übergang</i> UND <i>T</i> IST <i>niedrig</i> UND NICHT ΔT IST <i>niedrig</i>	<i>niedrig</i>
5	<i>Phase IST Übergang</i> UND ΔT IST <i>hoch</i>	<i>mittel</i>
6	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>pH</i> IST <i>hoch</i>	<i>mittel</i>
7	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>hoch</i> UND ΔT IST <i>mittel</i>	<i>mittel</i>
8	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>pH</i> IST <i>niedrig</i> UND ΔT IST <i>hoch</i>	<i>hoch</i>
9	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>hoch</i> UND ΔT IST <i>hoch</i>	<i>hoch</i>
10	<i>Phase IST Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>hoch</i> UND ΔT IST <i>hoch</i>	<i>höher</i>

ning *et al.* (1958) und der bei Bechmann (1996) angegebene Verweis, der „sehr niedrige Temperaturdifferenzen“ auf ein Intervall von 2 bis 8 Kelvin bezieht.

Der pH-Wert beeinflusst die Neigung der Milch zum Protein-Fouling: je niedriger der Ausgangs-pH Wert, desto stärker die Neigung der Belagbildung. Daher findet hier der Ausgangs-pH Wert der Milch Anwendung. Die Temperaturabhängigkeit des pH fließt indirekt über die Temperatur des Produkts im Strömungskern ein.

Die Intervallwahl der Ausgangsmenge trägt die Vorstellung, daß die Anlagerungsrate nicht beliebig groß werden kann und kein Abtrag stattfindet. Die in der Literatur über die Abhängigkeit der Anlagerungsraten vom pH-Wert²⁶ getroffenen Aussagen dienen in diesem Fall zur Wahl der oberen Intervallgrenze unter der Annahme, daß dieser Fall im Hinblick auf die Proteinanlagerung die günstigsten Bedingungen für die Anlagerung bietet. Der Wert für die untere Intervallgrenze muß größer als Null sein, da davon ausgegangen werden kann, daß im Fall von Milch sich immer ein Belag bildet.

Salzfouling

Der Begriff Salzfouling²⁷ faßt die Belagbildung von Milchsälen an der Oberfläche des Wärmeübertragers zusammen.

Anwendung findet das Anlagerungsmodell nach Hege (1984). Dieses Modell faßt sowohl die Reaktion als auch den Transport mit Hilfe eines Arrhenius-Terms

$$\dot{m}_{Salz} = r_0 e^{-\frac{E_{a,Salz}}{RT}} \quad (3.7)$$

zusammen, das die umgekehrte Löslichkeit der beteiligten Kalziumphosphate bereits berücksichtigt. Diese pragmatische Vorgehensweise läßt sich mit der Wirkung der Kaseine als Kalziumpuffer motivieren. Aufgrund der Pufferkapazität der Kaseine bleibt die Konzentration des im Milchserum gelösten Kalziums konstant. Daher reicht eine konzentrationsunabhängige Formulierung der Anlagerung aus.

Die Tabelle 3.8 führt das Fuzzy-System für den Korrekturfaktor der Salzanlagerung²⁸ auf. Das Fuzzy-System bringt in die mit dem Arrhenius-Ansatz ermittelte Temperaturabhängigkeit der Anlagerungsrate für die Milchsälen die lokalen Gegebenheiten ein. Die Eingangsgrößen zur Beschreibung des lokalen Zu-

²⁶Siehe S. 10

²⁷Das Proteinfouling steht im Vordergrund des vorgestellten Modells. Berücksichtigt wird Salzfouling, um im hohen Temperaturbereich detailliertere Aussagen über die angelagerten Mengen treffen zu können.

²⁸Siehe auch Tabelle 3.5, S. 45

Tabelle 3.8.: Fuzzy-Regeln zur Salzanlagerung (Regelbasis R3). ΔT steht für den Temperaturunterschied.

n_r	WENN	DANN
		Salzrate
		IST
1	Phase IST Induktion	niedrig
2	ΔT IST niedrig	niedrig
3	ΔT IST hoch UND pH IST niedrig	mittel
4	Phase IST Übergang UND pH IST hoch UND ΔT IST hoch	mittel
5	ΔT IST mittel UND pH IST mittel	mittel
6	Phase IST Fouling UND pH IST hoch	hoch
7	Phase IST Fouling UND ΔT IST hoch	hoch

stands umfassen die Phase, den Temperaturunterschied zwischen Strömungskern und Wand, entsprechend der Erfahrung, daß eine stärkere Überhitzung der Wand eine stärkere (Salz-)Belagbildung mit sich bringt. Die Wahl der Eingangsintervalle für den Temperaturunterschied erfolgte gemäß dem zum Proteinfouling Gesagten.

Hinsichtlich der Wahl der Ausgangsintervalle trifft das für das Proteinfouling Festgehaltene zu. Der Abtrag wird vernachlässigt, das Wachstum kann nicht beliebig groß werden.

Die Festlegung der Ausgangsintervalle erfolgte indirekt. Aussagen über die Mengenverhältnisse Protein/Salz in Foulingbelägen ließen Rückschlüsse auf die im Modell erforderliche Korrektur zu.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß versucht wurde, einen alternativen Weg zur Beschreibung der Belagbildung durch Milchsalze zu beschreiben. Die damit erzielten Ergebnisse reichten aber nicht weit genug, um in das Modell aufgenommen zu werden.²⁹

Rauhigkeit

Die zur Beschreibung des Wärmeübergangs angegebenen Gleichungen gelten zunächst für technisch glatte Rohre. Hat sich auf den Rohrinneflächen aber erst einmal eine Schicht gebildet, so hat die Rohroberfläche nicht mehr die

²⁹Einen Abriß hierzu findet man im Anhang A.5, S. 81.

Rauhigkeitseigenschaften wie ein sauberes Rohr. Diesem Umstand trägt das Fuzzy-System zur Ermittlung des Rauhigkeitseinflusses Rechnung.

Die Tabelle 3.9 beschreibt das Fuzzy-System³⁰ zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit. Die Eingangsgrößen berücksichtigen den lokalen Anlagenzustand (Phase), die Temperatur im Strömungskern als Bezug zur Typeinteilung der abgelagerten Schicht und die Dicke der abgelagerten Schicht. Die Wahl der Intervalle leiteten die in der Werkstofftechnik angewendeten Rauhigkeitswerten, dem Mittenrauhwert³¹, der Einzelrauhtiefe³² und der maximalen Rauigkeit³³. Die Wahl als sinnvolle Vorstellung fiel auf den Mittenrauhwert, da hier die endliche Länge der einzelnen Rohrabchnitte (finiten Volumen) den Bezug zur Testlänge herstellt.

Die Charakterisierung der Oberflächen basiert auf der bereits erwähnten Einteilung der Belagtypen (Burton 1968), die sich ihrerseits im wesentlichen durch Temperaturbereiche ersetzt läßt. Die Schichtdicke wird integriert, um sicherzustellen, daß die Rauigkeit nicht größer als die Schichtdicke werden kann, was der Vorstellung einer gemittelten Rauigkeit widerspricht.

³⁰Siehe auch Tabelle 3.5, S. 45

³¹Die auf eine Testlänge bezogene Summe der absoluten Rauigkeiten.

³²Die maximale Erhebung innerhalb einer Testlänge.

³³Der Mittelwert von fünf Einzelrauhtiefen

Tabelle 3.9.: Fuzzy-Regeln zur Oberflächenrauigkeit (Regelbasis R_4).

R $n_b.n_r$	WENN	DANN
		<i>Rauhigkeit</i>
		IST
4.1	<i>Phase</i> IST <i>Induktion</i>	<i>glatt</i>
4.2	<i>T</i> IST <i>niedrig</i>	<i>glatt</i>
4.3	<i>Schicht</i> IST <i>dünn</i>	<i>glatt</i>
4.4	<i>Phase</i> IST <i>Übergang</i>	<i>mittel</i>
4.5	<i>Phase</i> IST <i>Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>niedrig</i>	<i>mittel</i>
4.6	<i>Phase</i> IST <i>Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>mittel</i>	<i>mittel</i>
4.7	<i>Phase</i> IST <i>Fouling</i> UND <i>T</i> IST <i>hoch</i> UND <i>Dichte</i> IST <i>hoch</i>	<i>mittel</i>
4.8	<i>Schicht</i> IST <i>dick</i> UND <i>T</i> IST <i>niedrig</i>	<i>rauh</i>
4.9	<i>Schicht</i> IST <i>dick</i> UND <i>T</i> IST <i>mittel</i>	<i>rauh</i>

Richtwerte, wie in Tabelle 3.10 angegeben, fanden zusammen mit in der Literatur mitgeteilten elektronenmikroskopische Aufnahmen Eingang in die Intervalleinteilung. Im Fall einer glatten (sauberen) Oberfläche erfüllt das Ausgangsintervall der Fuzzy-Menge „glatt“ die Forderung, daß eine technisch sinnvolle Rauigkeit, die hinsichtlich des Druckverlustes in den noch nicht verschmutzten Rohren zu sinnvollen Resultaten führt, Anwendung findet.

Zur Sensitivität der verwendeten Fuzzy Modelle

Die Sensitivität untersucht die Auswirkungen von Schwankungen (Unsicherheiten) in den Parametern auf das Ergebnis des Modellsystems. Rufen kleine Änderungen eines Parameters p_j bei konstanten p_i , $i \neq j$ große Zustandsänderungen hervor, so reagiert das System sensitiv. Das Verhältnis der Änderung der Zustandsgröße x_i zu der Änderung des Parameters p_j , also

$$S_j = \frac{\Delta x_i}{\Delta p_j} \quad (3.8)$$

ein Maß für die Sensitivität. Wie Gleichung 2.25 zeigt, ergibt sich der scharfe Ausgangswert eines Fuzzy-Systems aus $a = D(I(\mu_1(e_1), \dots, \mu_n(e_n)))$.

Dies zeigt, daß die Träger der Fuzzy-Sets, vertreten durch $t_{j,1} \leq t_{j,2} \leq t_{j,3} \leq t_{j,4}$ der Eingänge bzw. Ausgänge, eines Fuzzysystems mit normierten Zugehörigkeitsfunktionen in erster Linie die Parameter festlegt. Sie bestimmen neben den Regeln die Ausgangswerte. Dieser Abschnitt will nicht eine vollständige Untersuchung der Sensitivität der Fuzzy-Systeme vorlegen, sondern nur qualitativ am Beispiel der Phasenbestimmung den Einfluß der Sensitivität diskutieren.

Die Phase eignet sich hierfür, da sie zum einen im Zentrum der Wechselwirkung des Numero-Fuzzy-Hybrids steht. Die der Abbildung 3.10 zugrundeliegenden Daten wurden offline durch Abänderung der Ein- und Ausgangsmengen

Tabelle 3.10.: Absolute Rauigkeiten technischer Oberflächen in Röhrenwärmetauschern für gezogene Stahlrohre.

Zustand	K [mm]
neu	0.04 (0.02 - 0.1)
nach längerem Gebrauch gereinigt	0.15 - 0.20
leichte Verkrustung	0.4
starke Verkrustung	3.0

durchgeführt. Geändert wurden jeweils der Proportionalitätsfaktor der LR-Funktionen und die Länge des Trägers. Aufgetragen sind die maximalen Abweichungen. Es überrascht dabei nicht, daß gerade bei niedrigen Belagmengen (Induktionsphase) die Phase empfindlicher auf Parameteränderungen reagiert als bei höheren Belagmengen (Fouling).

Ändert man nur die Eingangsmengen, so bleibt die Empfindlichkeit bei niedrigen Belagmengen erhalten, siehe Abbildung 3.10 links. Erhöhen bzw. Erniedrigen der Parameter von 5 bis 16 % äußert sich in einer Empfindlichkeit von maximal 14 % bei niedrigen Belagmengen, die auf etwa 9 % bei hohen Belagmengen abnimmt. Die Tendenz bleibt erhalten, wenn man nur die Parameter der Ausgangsmengen abändert. Das System reagiert hier empfindlicher als bei Änderungen der Eingangsmengen. Grundsätzlich ist eine formale Untersuchung der Sensitivität, ja in gewisser Weise eine (im herkömmlichen Sinne) geschlossene Darstellung der hier verwendeten Fuzzy-Systeme möglich. Im Anhang, siehe Abschnitt A.2.2, ist dargestellt, wie sich eine differenzierbare Approximation für ein aus stückweise linearen Zugehörigkeitsfunktionen aufgebauten, mit den min- und max-Operatoren sowie der min-max-Inferenz versehenem Fuzzy-System konstruieren läßt.

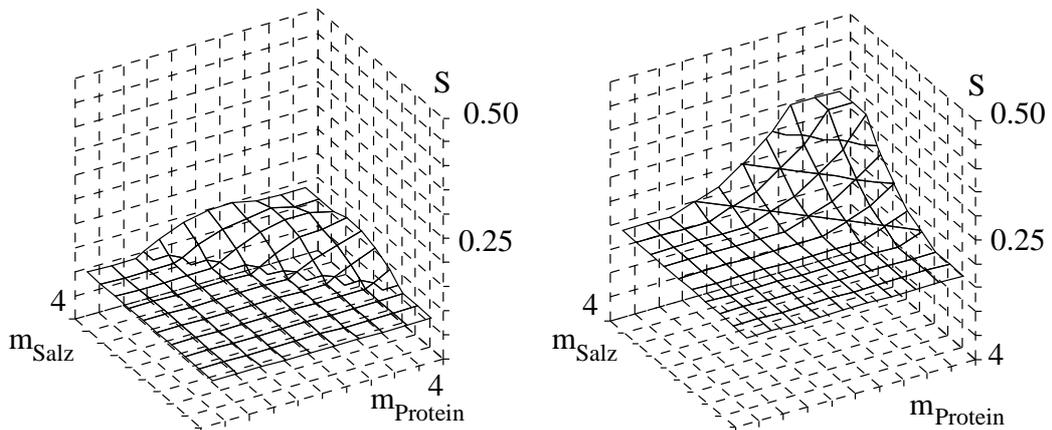


Abbildung 3.10.: Sensitivität des Fuzzy-Systems „Phase“ bei Änderung der Eingangsparameter (linke Abbildung) bzw. der Ausgangsparameter (rechte Abbildung).

4. Zusammenfassung, Ausblick

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt ein Numero-Fuzzy Hybrid vor, das klassische technologische Modellierung der Strömungsverhältnisse und des Wärmeübergangs kombiniert mit Fuzzy-Logik. Fuzzy-Logik findet als aktiver Teil innerhalb des Prozeßmodells Verwendung. Die Verwendung von Fuzzy-Logik ermöglicht es, den Zustand einer Anlage zur Ultraheißerhitzung von Milch unter Berücksichtigung des Foulings zu beschreiben. Neben der Anlagerung von Protein lassen sich so ebenfalls summarisch die Anlagerung von Milchsäuren mit in Betracht ziehen. Betrachtet wird eine aus Rohrbündelwärmetauschern aufgebaute Anlage. Ein Ansatz zur Sensitivitätsanalyse von Fuzzy-Systemen in geschlossener Form wird umrissen, der derartige Untersuchungen mit analytischen Methoden erst möglich macht. Zudem bietet der vorgeschlagene Weg auch einen Zugang zu Stabilitätsuntersuchungen von Fuzzy-Systemen.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Vergleichsdaten an einer industriell genutzten Anlage gewonnen. Die zur Validierung¹ herangezogenen Prozeßgrößen Druckverlust und Temperatur an ausgewählten Meßpunkten stimmen mit den an einer industriellen Anlage gewonnenen überein. Diese Übereinstimmung zeigt die Leistungsfähigkeit dieses Hybrid-Ansatzes.

Aus den zur Validierung herangezogenen Meßdaten der untersuchten Anlage legen aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung der beobachteten Prozeßkenngrößen (Druckverlust, Temperatur) eine Unterscheidung in zwei unterschiedliche Phänomene für Fouling nahe. Diese beiden Phänomene können als thermisches und hydraulisches Fouling bezeichnet werden. Hierbei weist *thermisch* auf die den Wärmeübergang, *hydraulisch* auf die Strömung betreffenden Effekte (Druckverlust) hin. Von einem ähnlich versetzten Ablauf wird bei der Reinigung berichtet.

Der beschriebene Modellansatz kann als Grundlage für die Entwicklung von Werkzeugen für die Beschreibung des Langzeitverhaltens von Milcherhitzern dienen. Damit können Wege für technologische Verbesserungen der Erhitzung von Milch in Röhrenwärmetauschern aufgezeigt werden. Die Aspek-

¹Validierung im Sinne von Abschnitt 3.2, S. 33.

te der hinsichtlich Prozeßsynthese und Anwendbarkeit dieses Modells führt Benning (2002) aus. Um dies zu erreichen, wurden die angewendeten Modelle hinsichtlich ihres Bezugs zu den physikalischen und chemischen Grundlagen des Prozesses hin ausgewählt. Das erlaubt die Untersuchung von einzelnen Anlagenkomponenten und Prozeßbedingungen zum Beispiel hinsichtlich ihrer Eignung zur Verlängerung der Standzeit.

Ausblick

Die von der vorliegenden Arbeit aufgeworfenen zukünftigen Fragestellungen ergeben sich damit aus der Numero-Fuzzy-Methode selbst, zum anderen betreffen sie das so beschriebene Phänomen, das Foulingverhalten von Milcherhitzern.

Von methodischen Interesse ist es, Stabilität und Sensitivität des Numero-Fuzzy-Hybrids im Detail zu untersuchen. Damit verbunden ist auch die Frage, ob es eine Klasse von Fuzzy-Mengen und -Operatoren gibt, die für die Anwendung innerhalb eines Numero-Fuzzy-Hybrids besondere Vorteile besitzt.

Einen anderen methodischen Weg zur Untersuchung des Foulings einzuschlagen, bietet eine qualitative Untersuchung des Anlagerungsprozesses. Qualitativ heißt hier, daß die Anlagerung an einem vereinfachten Mehrkomponentensystem untersucht wird. Im Fall des Milchfoulings könnte man dieses Modellsystem aus den Komponenten Molkenproteine, Kaseine, Asche, Fett und Wasser und möglicher Zwischenprodukte bestehen. Diese Unterteilung zeigt auch Ansatzpunkte für die Beschreibung der Alterung der Foulingschicht auf und unterstützt auch Bestrebungen, durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten eine „Selbstreinigung“ der Anlage zu erreichen bzw. die Anhaftung durch Modifikation der Oberfläche selbst zu verringern oder zu eliminieren. Die aus diesen qualitativen Überlegungen gewonnenen Einsichten ließen sich auch als Grundlage eines z. B. als künstliches neuronales Netz realisierten „technologischen Produktmodells“ nutzen.

Das Salz fouling-Modell basiert auf Literaturdaten. Es kann daher als ein erster Schritt hinsichtlich der Integration dieses Effekts in die Modellierung der Belagbildung in Milcherhitzern betrachtet werden.

Gerade der positive Einfluß von Haltesektionen auf die Anlagenstandzeit legt nahe, daß insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Kasein und Kalzium eingehender hinsichtlich der Anlagerungsbildung untersucht werden, wobei Kalzium ja auch die Größenverteilung der Molkenprotein-Aggregate beeinflusst. Zusätzliche experimentielle Daten über einen weiteren Temperaturbereich hinsichtlich des Löslichkeitsverhaltens der beteiligten Bestandteile wäre wünschenswert. Trotz der sich mit diesem Ansatz bietenden Möglichkeiten blei-

ben einige Fragen offen bzw. müssen erneut zur Diskussion gestellt werden. In erster Linie betrifft dies das zugrundeliegende Produktmodell. Weitergehende Optimierung setzen ein detaillierteres Produktmodell voraus, das als „technologisches Produktmodell“ charakterisiert werden soll. Es reicht aus, innerhalb der komplexen Matrix des Lebensmittels Milch den Einfluß der Erhitzung durch technologisch relevante Parameter wie B^* und C^* zur charakterisieren. Dieser Ansatz der Parallelreaktionen² zur Produktbeschreibung, der im vorliegenden Fall ebenfalls gewählt wurde, zusammen mit dem hier eingeschlagenen Weg kann nur einen Kompromiß zwischen den praktischen Anforderungen hinsichtlich eines Prozeßmodells, das die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anlagen ermöglicht, und der Offenlegung der Einflüsse der Wechselwirkungen zwischen den durch die Anlage repräsentierten Prozeß und dem Produkt selbst sein. Wie weit die Verzahnungen zwischen den einzelnen Produktbestandteilen und deren Reaktionspfade nachgebildet werden müssen, bleibt offen.

Die im Zusammenhang von Abbildung 3.6 geschilderte Beobachtung eines Druckplateaus nach einem Tankwechsel zeigt auf, daß vergleichende Untersuchungen an mehreren Industrieanlagen über einen längeren Zeitraum, die den gesamten Produktionszyklus einbeziehen, zur Bewertung und Abgrenzung anlagenspezifischer Einflüsse auf die Induktionszeit bieten. Zudem bietet dies eine Möglichkeit vom Konzept des durchschnittlichen Produktionslauf ausgehend, Aussagen über den weiteren Anlagenzustand bei Abweichungen von diesem zu treffen.

Hinsichtlich der analytischen Behandlung der Fuzzy-Systeme ist der skizzierte Ansatz auf mögliche Verallgemeinerungen hin zu untersuchen.

²Strenggenommen fällt auch die Verwendung von Polynomen zur Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität oder Dichte unter ein Modell als „Parallelreaktion“.

A. Anhang

A.1. Prozeßmodell

Inhalt dieser Arbeit ist selbst eine Methode: die Kombination „klassischer“ Modellierungsansätze mit einem „kognitiven“ Ansatz, der Fuzzy-Logik. Die Bausteine der hier vorgestellten Anwendung basieren auf Standardverfahren, die in Lehrbüchern und der entsprechenden Spezialliteratur dokumentiert sind. Deshalb hier nur kursorisch ein Überblick über die verwendeten Methoden.

Ausgehend von einem eindimensionalen Prozeßmodell fand eine C++-Bibliothek Anwendung, die auf einem Finite-Volumen-(„Tank-and-Tube“-) Modell nach Patankar (1980) basiert und unter Anwendung des SIMPLER-Algorithmus produkt- und wasserseitig Geschwindigkeit und Temperatur ermittelt.

Der SIMPLER-Algorithmus (Patankar 1980, Ferziger 2002) ist ein Finite-Volumen-Verfahren, das ausgehend von einer Schätzung der Strömungsgeschwindigkeit den Druckverlauf bestimmt. Die Schritte im einzelnen sind in Tabelle A.1 aufgeführt

Die Wahl fiel auf dieses Verfahren, da die finiten Volumen zum einen eine

Tabelle A.1.: SIMPLER-Algorithmus nach Patankar (1980).

Schritt	Aufgabe
1	Beginne mit einem geschätzten Geschwindigkeitsfeld
2	Auswertung der Impulsgleichungen
3	Berechnung des Druckverlaufes
4	Berechne aus dem Druckverlauf über die Impulsgleichungen ein neues Geschwindigkeitsfeld
5	Auswertung von Massenquellen
6	Korrigiere das Geschwindigkeitsfeld, aber nicht den Druck
7	Werte andere Gleichungen aus, sofern erforderlich
8	Beginne erneut bei Schritt 2 bis zur Konvergenz

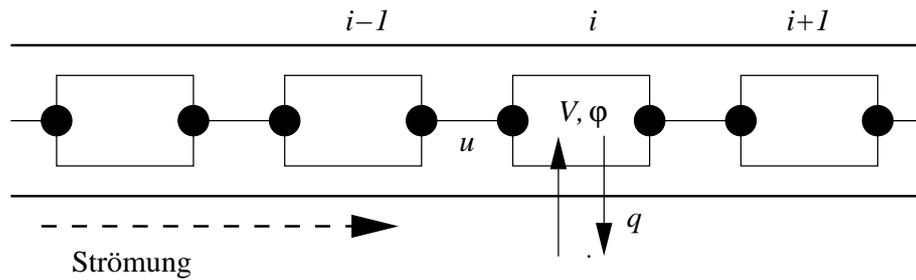


Abbildung A.1.: Prinzipskizze für die Finite-Volumen-Methode („tank-and-tube-model“) an einem Rohrstück. Der fortlaufende Index i steht für die räumliche Diskretisierung, V für das Volumen, u für die Geschwindigkeit, φ für die Zustandsgröße und q für einen Austausch mit der Umgebung.

sehr anschauliche Umsetzung der Anlagenkomponenten erlauben, zum anderen nach Ansicht des Verfassers den hinsichtlich ihrer Funktionalität den modularen Aufbau eines Simulationsprogramms erleichtert.

Die Umsetzung des Prozeßabbildes erfolgte über „Module“ zum einen mit einer verketteten Liste, über die der Zusammenhang der Anlagenkomponenten definiert und auch der Datenaustausch (auch im Sinne des Finiten-Volumen-Verfahrens) bewerkstelligt wird. Zum anderen über einen Baum mit variabler Anzahl von Teilbäumen. Die jeweiligen Teilbäume fassen dabei Anlagenkomponenten im Sinne von „Komponente X besteht aus Komponente $\{a,b,\dots\}$ “ zusammen. Die Blätter dieser Bäume bilden dabei die Finiten-Volumen. Entsprechend der im SIMPLER-Algorithmus vorgegebenen Untergliederung sind den einzelnen Schritten des Algorithmus Gruppen von „Prozessen“ zugeordnet. Diese Prozesse wiederum liefern die Funktionalität der Simulation.

Die Iteration des Schemas nach Tabelle A.1 erfolgte dabei direkt auf der verketteten Liste, was hinsichtlich der Simulationsgeschwindigkeit Nachteile birgt.

Die Parametrierung erfolgt über ein blockstrukturiertes¹ Textfile.

¹Ähnlich strukturiert wie XML.

A.2. Fuzzy-Logik

A.2.1. Fuzzy-Logik-Bibliothek

Die verwendete Fuzzy-Logik-Bibliothek Software ist bei Becker (1995) und Murnleitner (2002) beschrieben. Sie umfaßt alle erforderlichen Methoden zur Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung und erlaubt es, eine beliebige Anzahl von Eingangs- und Ausgangsgrößen, Regeln und Regelbasen anzuwenden.

Parametriert wird dieses Fuzzy-System über eine Textdatei, in der die Namen der Ein- und Ausgangsvariablen und ihrer zugeordneten Fuzzy-Mengen erklärt und die Regeln definiert werden.

Dieses Fuzzy-System läßt sich als C++-Bibliothek einbinden. Für *a priori* Tests und Abschätzungen steht eine Schnittstelle zu einem Tabellenkalkulationsprogramm² zur Verfügung. Die Charakterisierung der einzelnen Abschnitte des verwendeten Fuzzy-Systems faßt Tabelle A.2 zusammen.

A.2.2. Zur Sensitivität der betrachteten Fuzzy-Systeme

Ausgehend von der Beziehung $a = D(I(\mu_1(e_1), \dots, \mu_n(e_n)))$, sollen die Schritte der Bearbeitung, also Fuzzifizierung ($\mu_i(e_i)$), Inferenz (I) und Defuzzifizierung (Abbildung D) hinsichtlich ihres Einflusses auf die Sensitivität der Fuzzy-Systeme kurz beleuchtet werden.

²Microsoft Excel

Tabelle A.2.: Zusammenstellung der in den Fuzzy-Systemen angewendeten Methoden.

Abschnitt		Methode
Zugehörigkeitsfunktion		stückweise linear
Inferenz		Min-Max
Defuzzifizierung		Schwerpunktmethode
Operator	NICHT	$\mu(\text{NICHT}x) = 1 - \mu(x)$
	UND	$\mu(x\text{UND}y) = \min(\mu(x), \mu(y))$
	ODER	$\mu(x\text{ODER}y) = \max(\mu(x), \mu(y))$

Mengen

Betrachtet wird die (stückweise) linearen Zugehörigkeitsfunktion in den Stützpunkten $t_1 < t_2 \leq t_3 < t_4$, deren Graphen sich durch die Geraden $\mu_{i,j} = m_{i,j}x + \tau_{i,j}$ darstellen lassen. Eine Entsprechung hat dies in der Definition von LR-Fuzzy-Mengen.

Definition von LR-Fuzzy Sei $L, R : [0; 1] \rightarrow [0; 1]$ mit $L(y) = R(y) = 1$ für $y \leq 0$ und $L(y) = R(y) = 0$ für $y \geq 1$, wobei mit $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4$; $\tilde{A} = \{x; t_1; t_2; t_3; t_4\}$ und $u, v, w \in \tilde{A}$ folgende Abbildung erklärt sei: $y(u, v, w) = \frac{u-v}{u-w}$. Die Zugehörigkeitsfunktionen lassen sich so mit $L(y) = L(y(u, v, w))$ und $R(y) = R(y(u, v, w))$ darstellen.

Entsprechend der Anordnung der t_i wird die linke Gerade mit L, die rechte mit R abgekürzt. Die Beziehungen für die Steigung $\mu_{i,j}$ und dem Ordinatenabschnitt $\tau_{i,j}$ sind in Abbildung A.2 zusammengestellt.

Die stückweise linearen Zugehörigkeitsfunktionen sind im vorliegenden Fall auf Eins normiert mit der Eigenschaft, daß $\sum_i \mu_i(x) = 1$ für sich überlappende Zugehörigkeitsfunktionen μ_i bei festem x für eine Fuzzy-Variable, wobei der Index i für eine qualitative Eigenschaft steht, z. B. im Fall der Phase ist $i = 1$ „niedrig“, $i = 2$ „mittel“, $i = 3$ „hoch“.

Für derartig normierte Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_i(x) \in [0; 1]$ ist $L \cap R = (t_0, H_0)$ mit der Höhe $H_0 = \frac{t_4 - t_1}{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}$ über $t_0 = t_1 + \frac{(t_4 - t_1)(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}$. Damit ist klar, daß für die Untersuchung der Sensitivität der Fuzzy-Systeme gerade die Wahl der Stützstellen von Einfluß ist.

An Abbildung A.2 erkennt man auch, wie man aus den ja nicht von vorneherein betragsmäßig gleichen Steigungen der stückweise linearen Zugehörig-

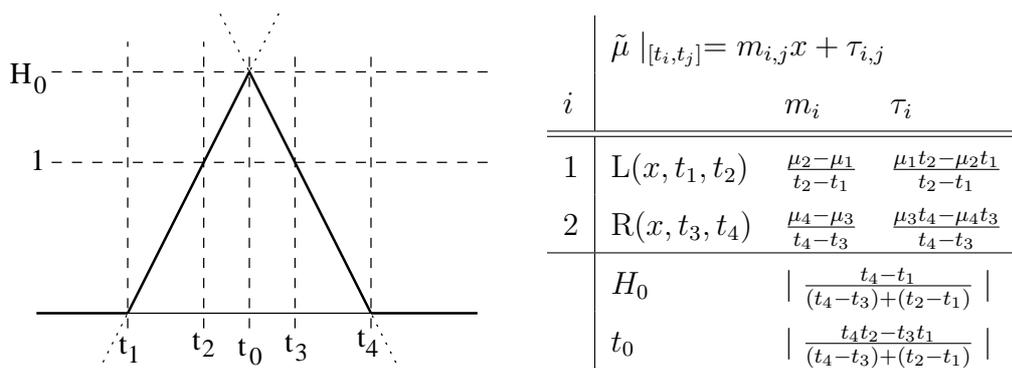


Abbildung A.2.: Zur Darstellung einer stückweise linearen Zugehörigkeitsfunktion abhängig von den Parametern $t_{i,1} < t_{i,2} \leq t_{i,3} < t_{i,4}$ und deren Beziehungen für die Fuzzy-Mengen vom Typ A,S,T,Z.

keitsfunktionen diese bei gleichbleibender Höhe umskaliert. Für eine gegebene Menge seien t_0 und H_0 ermittelt. Streckt bzw. staucht man die Intervalle um den Faktor $\frac{t_4-t_1}{t_0-t_1}$ bzw. seinen Kehrwert, so erhält man eine zu $\frac{1}{2}(t_4 - t_1)$ achsensymmetrische Zugehörigkeitsfunktion mit

$$\begin{aligned}\mu_L &= \frac{2H_0}{t_4-t_1} \frac{1}{2} \frac{t_4-t_1}{t_0-t_1} x + \tilde{\tau}_1 \\ \mu_R &= \frac{2H_0}{t_4-t_1} \frac{1}{2} \frac{t_0-t_1}{t_4-t_1} x + \tilde{\tau}_2\end{aligned}$$

Zudem ist es immer möglich, durch eine Transformation das Intervall so zu wählen, daß mit zwei Konstanten c_u und c_o für alle zu einer Fuzzy-Variablen gehörenden Mengen gilt: $c_u \leq t_{1j} < t_{2j} \leq t_{3j} \leq t_{4j} < c_o$.

Eine Fuzzy-Zahl mit stückweise linearer Zugehörigkeitsfunktion kann mit Hilfe der charakteristischen Funktion χ erklärt durch

$$\chi(x, t_i, t_j) = \begin{cases} 1 & : x \in [t_i; t_j] \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

dargestellt werden als

$$\mu(x) = L(x, t_1, t_2)\chi(x, t_1, t_2) + \chi(x, t_2, t_3) + R(x, t_3, t_4)\chi(x, t_3, t_4) \quad (\text{A.2})$$

wobei in dieser Darstellung sich $L(x, t_1, t_2)$ bzw. $R(x, t_3, t_4)$ auf die Geradenabschnitte der LR-Darstellung der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ beziehen. Im einzelnen ist mit den bereits angegebenen Beziehungen (siehe hierzu auch die Zusammenstellung in Abbildung A.2) $L(t_1, t_1, t_2) = 0$ und $L(t_2, t_1, t_2) = 1$, sowie für den rechten Teil $R(t_3, t_3, t_4) = 1$ und $R(t_4, t_3, t_4) = 0$.

Konstruktion einer Approximation

Für die Untersuchung der Sensitivität soll für den verwendeten Fall eine differenzierbare Approximation $\tilde{\mu}(x, \lambda)$ konstruiert werden, mit der sich das Verhalten des Fuzzy-Systems analytisch untersuchen läßt. Hierbei verweist $\lambda \in \mathbb{R}$ auf einen von x unabhängig zu wählenden Approximationsparameter.

Diesem Ansatz wurde der Entwicklung bzw. Anwendung einer Strategie zur numerischen Auswertung der Sensitivität der Vorzug gegeben, da es so zusätzlich möglich ist, strukturelle Einflüsse mit zu berücksichtigen und eine Verallgemeinerung auf z. B. andere Fuzzy-Systeme erleichtert wird.

Entsprechen der Gleichung A.2 ist diese Darstellung für $\chi(x, t_i, t_j)$, $t_i < t_j$ zu finden, die außerhalb von $[t_i - \delta_i; t_j + \delta_j]$ kleiner ϵ und innerhalb dieses Intervalls größer dieser Schranke und kleiner (bzw. möglichst gleich) Eins ist:

$$\tilde{\chi}(x) \in \begin{cases} (\epsilon, 1] & : x \in [t_i + \Delta_i(\lambda); t_j + \Delta_j(\lambda)] \\ [0, \epsilon] & : \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Diese Wahl, geleitet von der Exponentialapproximation, besitzt die Eigenschaft, daß wenn das gesuchte $\tilde{\chi} > 0 \forall x \in \mathbb{R}$ ist, die Nullstellen der Funktionen L bzw. R wegen $L(t_1, t_1, t_2) = 0 = R(t_4, t_3, t_4)$, und $L(t_2, t_1, t_2) = 1 = R(t_3, t_3, t_4)$ ist $\tilde{\mu}(t_1, \lambda) = 0 = \tilde{\mu}(t_4, \lambda)$ und $\mu(t_2, \lambda) \approx 1$ bzw. $\mu(t_3, \lambda) \approx 1$ ebenfalls Nullstellen der Approximation

$$\tilde{\mu}(x, \lambda) = L(x, t_1, t_2)\tilde{\chi}(x, t_1, t_2, \lambda) + \tilde{\chi}(x, t_2, t_3, \lambda) + R(x, t_3, t_4)\tilde{\chi}(x, t_3, t_4, \lambda) \quad (\text{A.4})$$

sind.

Die Wahl der Basisfunktion der Approximation fällt auf die logistische Funktion³, die auch bei der Auswertung nominaler Datensätze in der Statistik (s. z. B. Fahrmeir, Hamerle *et al.* (1984)) und als Aktivierungsfunktion in Künstlichen Neuronalen Netzen (s. z. B. Zell (2000)) Anwendung findet. Sie läßt sich mit den Parametern p_1, p_2, x_0, λ darstellen als

$$\mathcal{L}(x, p_1, p_2, x_0, \lambda) = p_1 - \frac{p_1 - p_2}{1 + e^{-\lambda(x - x_0)}} = p_1 - (p_1 - p_2)\tilde{\mathcal{L}}(\lambda(x - x_0)) \quad (\text{A.5})$$

wobei $\mathcal{L}(x_0) = \frac{p_1 + p_2}{2}$, $\lim_{x \rightarrow -\infty} \mathcal{L}(x, p_1, p_2, x_0, \lambda) = p_1$, $\lim_{x \rightarrow \infty} \mathcal{L}(x, p_1, p_2, x_0, \lambda) = p_2$. Mit dem Parameter $\lambda > 0$ kann die Steilheit der Tangente im Wendepunkt $(x_0, \frac{p_1 + p_2}{2})$ eingestellt werden. Mit dieser Basisfunktion läßt sich für χ eine Approximation für $t_i < t_j$ angeben durch

$$\tilde{\chi}(x, t_i, t_j, \lambda) = \mathcal{L}(x, 0, 1, t_i, \lambda) - \mathcal{L}(x, 0, 1, t_j, \lambda). \quad (\text{A.6})$$

Sie nimmt nur Werte aus $[0;1]$ an. Wegen $\chi(t_1, t_1, t_2, \lambda) = \chi(t_2, t_1, t_2) = \frac{1}{2}$ ist die so konstruierte Funktion an der Nahtstelle gerade Eins, und wie gefordert, ausserhalb von $[t_1 - \delta_1(\lambda); t_4 + \delta_4(\lambda)]$ ist $\mu \leq \epsilon$.

A.2.2.1. Zur Güte der Approximation

Mit den charakteristischen Funktionen χ_L, χ_1, χ_R und ihren Approximationen $\tilde{\chi}_L, \tilde{\chi}_1, \tilde{\chi}_R$, wobei die Indizes auf die Intervalle $[t_i, t_j]$ verweisen, siehe auch Gleichungen A.1 und A.3, ist dann mit der L_1 - Norm $\|f(x)\|_1 = \int_u^o |f(x)| dx$ mit $-\infty < t_1 < t_2 \leq t_3 < t_4 < \infty$

$$\begin{aligned} \|\mu - \tilde{\mu}\|_1 &= \|L(\chi_L - \tilde{\chi}_L) + (\chi_1 - \tilde{\chi}_1) + R(\chi_R - \tilde{\chi}_R)\|_1 \leq \\ &\int_{-\infty}^{t_1} |L\tilde{\chi}_L| dx + \int_{t_1}^{t_2} |L(1 - \tilde{\chi}_L)| dx + \int_{t_2}^{\infty} |L\tilde{\chi}_L| dx + \\ &\int_{-\infty}^{t_2} |\tilde{\chi}_1| dx + \int_{t_2}^{t_3} |L(1 - \tilde{\chi}_1)| dx + \int_{t_3}^{\infty} |L\tilde{\chi}_1| dx + \\ &\int_{-\infty}^{t_3} |R\tilde{\chi}_R| dx + \int_{t_3}^{t_4} |R(1 - \tilde{\chi}_R)| dx + \int_{t_4}^{\infty} |R\tilde{\chi}_R| dx \end{aligned}$$

³Im folgenden auch $\tilde{\mathcal{L}}$, wobei hier noch auf den Zusammenhang der gewählten Approximation auf die hyperbolischen Funktionen hingewiesen sei über $\tilde{\mathcal{L}} = \frac{1}{1+e^{-x}} = \frac{1}{2}(1 + \tanh \frac{x}{2})$. Je nachdem, wie sich die Ergebnisse augenfälliger darstellen lassen, werden die Exponentialfunktion bzw. die hyperbolischen Funktionen benutzt.

Setzt man $a = e^{\lambda t_i}$, $b = e^{\lambda t_j}$ ($t_i < t_j$), so ist $\tilde{\chi} = \frac{(a-b)}{e^{-x} + (a+b) + abe^x}$ mit einem immer von Null verschiedenen Nenner. Die Funktionen $L, 1, R$ sind auf den unbeschränkten Intervallen von der Bauart $(mx + \tau)$, der Exponent der e -Funktion vom Typ $\lambda\tilde{x}$, so daß nach der Substitution $x = \lambda\tilde{x}$ Integrale vom Typ

$$\mathcal{I}(x, \lambda) = \frac{1}{\lambda} \int \left| \frac{(mx + \tau)(a-b)e^x}{1 + (a+b)e^x + abe^{2x}} \right| dx \quad (\text{A.7})$$

anfallen. Nach Konstruktion ist $0 < a + b$, so daß

$$e^{-x} + (a+b) + abe^x > C(e^{-x} + e^x) = 2C \cosh x,$$

wobei $C = 1$ für $1 \leq ab$, $C = \frac{1}{ab}$ für $0 < ab < 1$. Der Kehrwert des hyperbolischen Cosinus ist achsensymmetrisch und kleiner als $e^{-x} \forall 0 \leq x$, so daß $\int_0^\infty \frac{x dx}{\cosh x} < \int_0^\infty x^n e^{-x} dx = n!$, also kleiner 1, da $n = 1$. Das Verhalten von $|x| \rightarrow \infty$ wird an

$$\int \frac{|x| e^x dx}{|e^{2x} - 2\alpha e^x + \beta|}$$

untersucht. Es ist $\alpha^2 - \beta = \left(-\frac{1}{2} \frac{a+b}{ab}\right)^2 - \frac{1}{ab} = \frac{(a-b)^2}{4(ab)^2} > 0$, also auch $\alpha^2 > \beta$. Desweiteren gilt für den Integranden

$$\frac{|-x| e^{-x}}{e^{-2x} - 2\alpha e^{-x} + \beta} = \frac{|x| e^x}{\beta \left(\frac{1}{\beta} - 2\frac{\alpha}{\beta} e^x + e^{2x}\right)}, \quad (\text{A.8})$$

so daß hier $\tilde{\alpha}^2 - \tilde{\beta} = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 - \frac{1}{\beta} = \left(-\frac{1}{2}(a+b)\right)^2 - ab = \frac{(a-b)^2}{4} > 0$, also ebenfalls $\tilde{\alpha}^2 > \tilde{\beta}$. Damit ist jeweils eine obere Schranke für

$$\mathcal{I}_1 = \int_0^\infty \frac{x e^x}{e^{2x} - 2\alpha e^x + \beta} dx \quad (\text{A.9})$$

$$\mathcal{I}_2 = \int_0^\infty \frac{e^x}{e^{2x} - 2\alpha e^x + \beta} dx \quad (\text{A.10})$$

gesucht. Es ist

$$\frac{x e^x}{e^{2x} - 2\alpha e^x + \beta} = e^{-x} \frac{x}{1 - 2\alpha e^{-x} + \beta e^{-2x}}$$

Wegen $\lim_{x \rightarrow \infty} (2\alpha e^{-x} - \beta e^{-2x}) = 0$ gibt es ein x_t , so daß $2\alpha e^{-x} - \beta e^{-2x} \leq \frac{1}{2} \forall x \geq x_t$. Damit ist

$$e^{-x} \frac{x}{1 - 2\alpha e^{-x} + \beta e^{-2x}} \leq e^{-x} \frac{x}{1 - \frac{1}{2}} = 2x e^{-x} \forall x \geq x_t$$

Folglich ist

$$\begin{aligned}\mathcal{I}_1 &\leq \int_0^{x_t} e^{-x} \frac{x}{1-2\alpha e^{-x}+\beta e^{-2x}} dx + 2 \int_{x_t}^{\infty} x e^{-x} dx \\ &= K_{1,1}(\alpha, \beta) + K_{1,2}(\alpha, \beta) \\ \mathcal{I}_2 &\leq \int_0^{x_t} e^{-x} \frac{1}{1-2\alpha e^{-x}+\beta e^{-2x}} dx + 2 \int_{x_t}^{\infty} e^{-x} dx \\ &= K_{2,1}(\alpha, \beta) + K_{2,2}(\alpha, \beta)\end{aligned}$$

Nach Konstruktion tritt das Integral gerade bei den Geradenabschnitten, d. h. zu den Stützstellen t_1 und t_2 bzw. t_3 und t_4 .

Da nach Konstruktion $\alpha = \left(-\frac{1}{2}\frac{a+b}{ab}\right)$ und $\beta = \frac{1}{ab}$ mit $0 < a = e^{\lambda t_i} < b = e^{\lambda t_j}$, gibt es eine obere Schranke für $K_1(\alpha, \beta) = K_{1,1}(\alpha, \beta) + K_{1,2}(\alpha, \beta)$ und für $K_2(\alpha, \beta) = K_{2,1}(\alpha, \beta) + K_{2,2}(\alpha, \beta)$, so daß man für die Abschätzung der Norm erhält

$$\|\mu - \tilde{\mu}\|_1 \leq \frac{C(t_1, t_2)}{\lambda_L} + \frac{C(t_2, t_3)}{\lambda_1} + \frac{C(t_3, t_4)}{\lambda_R}$$

Hierbei sind $\lambda_L, \lambda_1, \lambda_R$ jeweils größer Eins. Als Index einer Folge gedeutet, kann man also eine Konstante $C = \max C(t_1, t_2), C(t_2, t_3), C(t_3, t_4)$ und ein λ_n finden, so daß

$$\|\mu - \tilde{\mu}\|_1 \leq \frac{C}{\lambda_n}.$$

A.2.2.2. Fuzzy-Operatoren

Die im vorliegenden Fall angewendeten Operatoren, mit denen die Verknüpfungen zwischen den Fuzzy-Eingängen und den Regeln realisiert werden, sind der min- und max- Operator. Sie lassen sich darstellen als $\min(a, b) = \frac{1}{2}(a + b - |a - b|)$ bzw. $\max(a, b) = \frac{1}{2}(a + b + |a - b|)$, wobei sich der Absolutbetrag annähern läßt als

$$|x| = x \cdot \text{sign}(x) \approx x \cdot \mathcal{L}(x, -1, 1, 0, \lambda).$$

Damit ist ebenfalls in der L_1 -Norm

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left| |x| - x \tanh \frac{\lambda x}{2} \right| dx = \frac{4}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{y dy}{e^y - 1} = \frac{2\pi^2}{3\lambda}.$$

Die oben angegebenen Abschätzung zeigt, daß sich durch die Integranden die Betragsfunktion sehr gut annähern läßt.

Um aus einem n -Tupel von reellen Zahlen (z_1, \dots, z_m) das kleinste (größte) Element durch den Vergleich $\mathcal{V}(u, v)$ zu erhalten, gibt es mehrere Möglichkeiten, die jeweils Vorzüge für die weitere Anwendung in diesem Zusammenhang besitzen. Ist $m = 2n$, so liefert eine n -fache Kaskade von Vergleichen $\mathcal{V}(u_{ij}, v_{ij})$ das gewünschte Ergebnis, für $m = 2n + 1$ kann durch hinzufügen des

letzten Elements auf den bereits erwähnten Fall zurückgeführt werden. Alternativ ist eine Darstellung $\mathcal{V}(z_1, \mathcal{V}(z_2, \mathcal{V}(z_3, \dots, \mathcal{V}(z_{n-1}, z_n) \dots)) \dots)$ anwendbar. Eine graphische Umsetzung dieser Vorschrift zeigt Abbildung A.3.

A.2.2.3. Ableitung nach den Parametern

Die Sensitivität beschreibt die Empfindlichkeit bezüglich Parameteränderungen. Formal geschieht dies durch partielle Ableitung nach den Parametern. Mit der logistischen Funktion

$$\mathcal{L}(x, a, b, x_0, \lambda) = a - \frac{a - b}{1 + e^{-\lambda(x-x_0)}} \quad (\text{A.11})$$

wird die Ableitung nach den Parametern a, b, x_0 zu

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial a} = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\lambda(x-x_0)}}\right) = \mathcal{L}(x, 1, 0, x_0, \lambda) \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial b} = -\frac{1}{1 + e^{-\lambda(x-x_0)}} = \mathcal{L}(x, 0, 1, x_0, \lambda) \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_0} = \frac{\lambda e^{-\lambda(x-x_0)}(a - b)}{(1 + e^{-\lambda(x-x_0)})^2} \quad (\text{A.14})$$

$$= \mathcal{L}(x, 0, -\lambda e^{-\lambda(x-x_0)}, x_0, \lambda) \mathcal{L}(x, 0, (b - a), x_0, \lambda) \quad (\text{A.15})$$

Für die Approximation der Operatoren ist

$$\max_{\lambda}(x, y) = \frac{1}{2}(x + y + (x - y) \tanh \frac{\lambda(x - y)}{2}) \quad (\text{A.16})$$

$$\min_{\lambda}(x, y) = \frac{1}{2}(x + y - (x - y) \tanh \frac{\lambda(x - y)}{2}) \quad (\text{A.17})$$

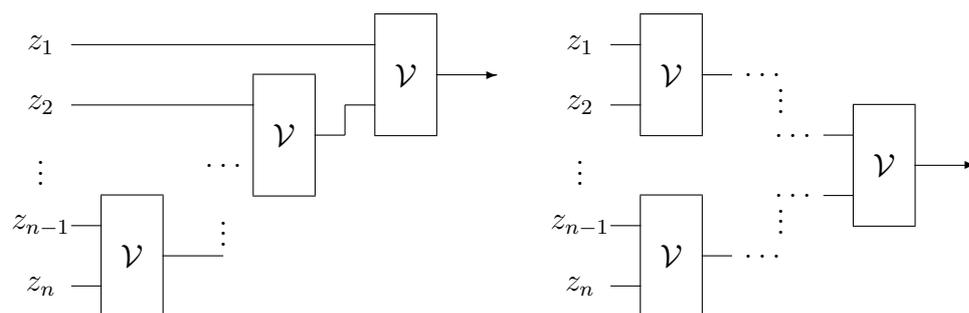


Abbildung A.3.: Graphische Darstellung einer n -stelligen Vergleichsoperation \mathcal{V} .

so daß damit die Ableitungen nach den ersten bzw. zweiten Argument sich angeben lassen zu

$$\frac{\partial \text{Op}}{\partial x} = 1 + \epsilon \tanh \frac{\lambda(x-y)}{2} + \epsilon \frac{\lambda}{2} \left(\text{sech} \frac{\lambda(x-y)}{2} \right)^2 \quad (\text{A.18})$$

$$(\text{A.19})$$

$$\frac{\partial \text{Op}}{\partial y} = 1 - \epsilon \tanh \frac{\lambda(x-y)}{2} - \epsilon \frac{\lambda}{2} \left(\text{sech} \frac{\lambda(x-y)}{2} \right)^2 \quad (\text{A.20})$$

Hierbei bezeichnet $\text{sech } z = \frac{1}{\cosh z}$ den hyperbolischen Sekans. Für $\text{Op} = \min$ ist $\epsilon = -1$, für $\text{Op} = \max$ ist $\epsilon = +1$.

A.2.2.4. Fuzzyfizierung

Parametriert sind die vorliegenden Fuzzy-Systeme über die Charakterisierung des Trägers in der LR-Darstellung und der Normierung des Zugehörigkeitsgrades. Zusammen mit der Wahl von stückweise linearen Zugehörigkeitsfunktionen lassen sich in den Dreiecks- bzw. Trapezflächen alle bezeichnenden Parameter und Eigenschaften einer Fuzzy-Menge festlegen. Mit der oben angeführten Konstruktion läßt sich jeweils die Fuzzyfizierung eines Eingangs direkt darstellen und die Sensitivität bezüglich der Änderung eines Parameters, d. h. eines der t_i mit den bereits aufgeführten Beziehungen angeben. Mit der Approximation von Gleichung A.4 (die Tilde wird im folgenden weggelassen)

$$\mu(x) = L(x, t_1, t_2)\chi(x, t_1, t_2) + \chi(x, t_2, t_3) + R(x, t_3, t_4)\chi(x, t_3, t_4)$$

lassen sich die Ableitung nach den Parametern $\frac{\partial}{\partial t_i} \mu(x, t_1, t_2, t_3, t_4)$ einer Fuzzy-Menge mit den Beziehungen aus Abbildung A.2

$$\frac{\partial}{\partial t_i} L(x, t_1, t_2) = (-1)^i m_1 (m_1 x - \mu_i - \tau_1); \quad i = 1, 2 \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial}{\partial t_i} R(x, t_3, t_4) = (-1)^i m_1 (m_2 x - \mu_i - \tau_2); \quad i = 3, 4 \quad (\text{A.22})$$

und der Konstruktion von $\chi(x, t_i, t_j, \lambda)$

$$\frac{\partial}{\partial t_i} \chi(x, t_i, t_j, \lambda) = \mathcal{L}(x, 0, -\lambda e^{-\lambda(x-t_i)}, x_0, \lambda) \mathcal{L}(x, 0, 1, t_i, \lambda) \quad (\text{A.23})$$

direkt angeben.

A.2.2.5. Inferenz

Das regelbasierte Schließen geschieht in drei Teilschritten, die unter der Inferenz zusammengefaßt werden: Prämissenauswertung, Aktivierung und Aggregation. Im vorliegenden Fall wurde die min-max-Inferenzstrategie gewählt, der Operator der „UND“-Verknüpfung von zweier Zugehörigkeitsgrade ist der min-Operator, die „ODER“-Verknüpfung realisiert der max-Operator.

Die min-max-Inferenzstrategie überträgt durch die Aktivierung (Implikation) die Zugehörigkeitsfunktion des „DANN“-Teiles auf den des „WENN“-Teiles, die Prämissenauswertung erfolgt durch die im „WENN“-Teil der Regel angegebenen Verknüpfungen der einzelnen linguistischen Variablen und den zugehörigen linguistischen Termen. Der letzte Schritt der Inferenz betrifft die Aggregation. Hier werden die Erfülltheitsgrade der einzelnen Regeln entsprechend der gewählten Inferenzstrategie auf die Ausgangswerte übertragen. Für die min-max-Inferenzstrategie heißt dies, daß jeweils der größte der Erfülltheitsgrade auf die Fuzzy-Ausgangsmenge übertragen wird, die Vereinigung der einzelnen, so erhaltenen Fuzzy-Ausgänge erfolgt ebenfalls mit dem max-Operator.

Dieser Situation trägt die in Abbildung A.3 gezeigte Struktur Rechnung, so daß entsprechend oftmaliges Anwenden der Kettenregel zum Erfolg führt. Formal⁴ ist die Zugehörigkeit zum Ausgang in Abhängigkeit von einem Parameter des Eingangs

$$\begin{aligned}
\mu_i^a &= \mathcal{V}_n \circ \mathcal{V}_{n-1} \circ \dots \circ \mathcal{V}_0 \circ \mu_j \\
(\mu_i^a)' &= (\mathcal{V}_n \circ \mathcal{V}_{n-1} \circ \dots \circ \mathcal{V}_0 \circ \mu_j)' \\
\mathcal{V}_n &= \mathcal{V}_{n-1} + \epsilon_n \mathcal{V}_{n-1} f_n(\mathcal{V}_{n-1}) \\
\mathcal{V}'_n &= \mathcal{V}'_{n-1} + \epsilon_n \mathcal{V}'_{n-1} f_n(\mathcal{V}_{n-1}) + \epsilon_n \mathcal{V}_{n-1} \mathcal{V}'_{n-1} f'_n(\mathcal{V}_{n-1}) \\
&= \mathcal{V}'_{n-1} (1 + \epsilon_n f_n(\mathcal{V}_{n-1}) + \epsilon_n \mathcal{V}_{n-1} f'_n(\mathcal{V}_{n-1})) \\
\mathcal{V}'_n &= \mu'_i \prod_{i=1}^n (1 + \epsilon_i f_i(\mathcal{V}_{i-1}) + \epsilon_i \mathcal{V}_{i-1} f'_i(\mathcal{V}_{i-1})).
\end{aligned}$$

Der Laufindex i durchläuft dabei eine Numerierung von der Wurzel des durch die Vergleichsoperatoren aufgespannten Baumes hin zu dem Blatt, das zu der zu differenzierenden Eingangszugehörigkeitsfunktion gehört. Da eine Eingangszugehörigkeitsfunktion in mehreren Regeln sowie innerhalb einer Regel ebenfalls öfter auftauchen kann, ist formal die Summe

$$\mathcal{V}'_n = \mu'_i \left\{ \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^{n_j} ((1 + \epsilon_n f_n(\mathcal{V}_{n-1}) + \epsilon_n \mathcal{V}_{n-1} f'_n(\mathcal{V}_{n-1})) \right\}$$

⁴Formal deshalb, weil entsprechend der Zuordnung zu den Verknüpfungen jeweils der entsprechende Term der Summe bzw. der Differenz in der Approximation für den Betrag differenziert werden muß. Dies ist aber selbst wiederum das Ergebnis eines Vergleiches.

auszuwerten, wobei n_j die Länge (gezählt in Vergleichsoperatoren) des j -ten Weges ist. Da nur eine endliche Anzahl von Eingangsmengen betrachtet wird, gibt es nur eine endliche Zahl N von möglichen Wegen, die verfolgt werden müssen. Nach Konstruktion sind \mathcal{V}_n und f_n beschränkt, und nehmen ebenfalls wie die Ableitungen nur Werte zwischen $[0; 1]$ an. Daraus kann man schließen, daß sich die Sensitivität hinsichtlich der Änderung eines Eingangsparameters t_i bei einer gegebenen Regelstruktur durch die Inferenz zieht. Dies erklärt sich an der Eigenschaft der min-max-Inferenz (Bardossy & Duckstein 1995), daß dieses Verfahren gerade die limitierenden oder extremen Werte berücksichtigt. Damit überträgt sich die Sensitivität bezüglich der Parameteränderungen im „WENN“-Teil auf den Erfülltheitsgrad der entsprechenden Regel.

A.2.2.6. Defuzzyfizierung

Die durch Fuzzyfizierung und Inferenz ermittelten Zugehörigkeiten geben den Erfülltheitsgrad der linguistischen, qualitativen Ausgangswerte an. Als Umkehrung der Fuzzyfizierung wirkt hier die Defuzzifizierung, die eine Verteilung der Erfülltheitsgrade entsprechenden scharfen Ausgangswert ermittelt. Das Defuzzifizierungsverfahren, daß angewendet wird, ist die Schwerpunktmethode, die, zusammen mit einigen modifizierten Schwerpunktsverfahren durch die gewichtete Summe

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} p_i g_i}{\sum_{i=1}^{n_a} g_i}, \quad (\text{A.24})$$

wobei die Gewichte⁵ $0 < g_i$ entweder die von den Regeln ermittelten Zugehörigkeitsgrade des i -ten linguistischen Terms („modifiziertes Schwerpunktsverfahren“) oder die zugehörige Fläche $A_i \mu_i$ ist.

Als Parameter p_i erscheint im Fall des modifizierten Schwerpunktsverfahrens der Schwerpunkt der i -ten Fläche zum Erfülltheitsgrad $\mu_i = 1$, beim Schwerpunktsverfahren der Schwerpunkt der Fläche $x_i(\mu_i)$ der $A_i(\mu_i)$. Die Situation zeigt Abbildung A.4. Die hier angegebene Indizierung findet im weiteren Anwendung.

Die modifizierte Schwerpunktmethode ermittelt die Schwerpunkte der Ausgangsmengen jeweils zum Erfülltheitsgrad 1 und bildet den Ausgang durch die

⁵Der Nenner wird in diesem Fall sinnvollerweise als von Null verschieden vorausgesetzt. Je nach Wahl der Fuzzy-Mengen kann Null selbst auch ein möglicher Ausgangswert sein. Aus der Tatsache, daß Gewichte Null folgt, daß dann der Ausgang des Fuzzysystems nicht definiert ist und somit das Fuzzysystem für den betrachteten Eingabevektor nicht definiert ist, was von vorneherein ausgeschlossen wird.

mit den Schwerpunkten gewichtete Summe der Erfülltheitsgrade

$$a = \frac{\sum_{i=0}^n x_i \mu_i}{\sum_{i=0}^n x_i} \quad (\text{A.25})$$

Geht man von der direkten Beschreibung der Schwerpunktmethod aus, so ist

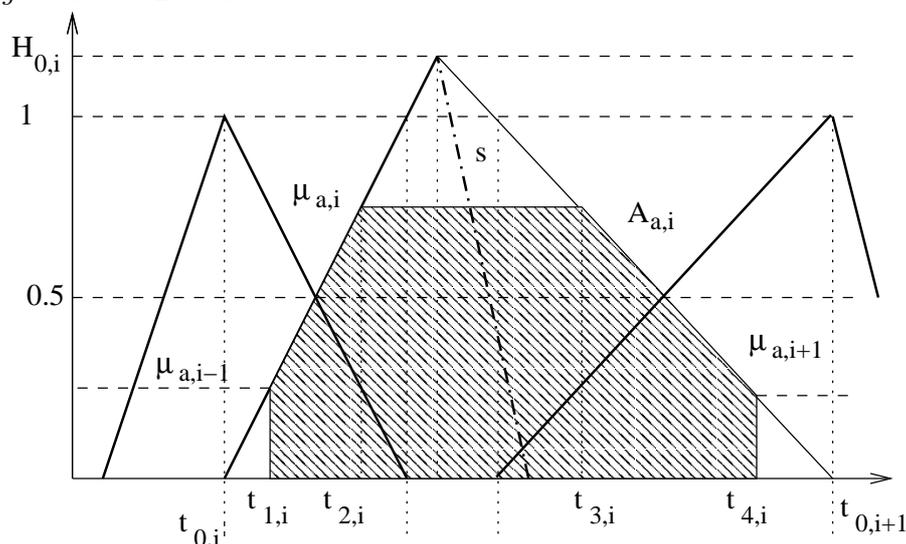
$$a = \frac{\sum_i x_i(\mu_i) A_i(\mu_i)}{\sum_i A_i(\mu_i)}, \quad (\text{A.26})$$

wobei hier $x_i(\mu_i)$ der Schwerpunkt zum in der Inferenz ermittelten Erfülltheitsgrad, $A_i(\mu_i)$ die Fläche zur Zugehörigkeit μ_i der jeweiligen i -ten Ausgangsmenge ist, siehe die schraffierte Fläche in Abbildung A.4.

Summiert wird jeweils über die Anzahl der Ausgangsmengen $1 \leq i \leq n_a$. Spaltet man die Summation entsprechend dem in Abbildung A.4 gegebenen Intervall $[t_{0,i}, t_{0,i+1}]$ auf, so bezeichnet der Index i in der oben genannten Summe auf $t_{0,i}$ ⁶. Mit der oben eingeführten Konstruktion der Zugehörigkeitsfunktion läßt sich die Fläche $A_i(\mu_i)$ und den zugehörigen Schwerpunkt $x_i(\mu_i)$ be-

⁶Das Folgende bezieht sich auf die Normierung $\sum \mu_i = 1$.

Abbildung A.4.: Linguistische Variable als Fuzzy-Ausgangsmenge mit drei linguistischen Termen.



schreibende Polygonzug $\mathcal{P}_i(x)$ auf $[t_{0,i}, t_{0,i+1}]$ annähern als

$$\mathcal{P}_i(x) = \max_{[t_{0,i}, t_{0,i+1}]} \left\{ \mu_i \tilde{\chi}(x, t_{0,i}, t_{0,i} + \frac{\mu_i}{m}, \lambda) + R_i \tilde{\chi}(x, t_{0,i} + \frac{\mu_i}{m}, t_{0,i+1}, \lambda), \right. \\ \left. L_{i+1} \tilde{\chi}(x, t_{0,i}, t_{0,i} + \frac{\mu_{i+1}}{m}, \lambda) + \mu_i \tilde{\chi}(x, t_{0,i} + \frac{\mu_{i+1}}{m}, t_{0,i+1}, \lambda) \right\},$$

so daß direkt über $A_i(\mu_i) = \int_{t_{0,i}}^{t_{0,i+1}} \mathcal{P}_i(x) dx$ die Fläche bzw. über $x_i(\mu_i) = \int_{t_{0,i}}^{t_{0,i+1}} x \mathcal{P}_i(x) dx$ der Schwerpunkt angegeben werden kann.

Begründet in der Konstruktion der Approximation lautet die Darstellung des vom Vektor (μ_1, \dots, μ_n) abhängigen Ergebnisstreckenzuges

$$\mathcal{P}_{res} = \sum_{i=1}^n \mathcal{P}_i(\mu_i).$$

Allerdings erfüllt in diesem Fall eine Abschätzung, die auf die modifizierte Schwerpunktmethode abzielt, den gleichen Zweck. Betrachtet man die Sensitivität dieses Schrittes, so ist zweierlei zu unterscheiden: die Sensitivität der bezüglich der Parametrierung der Ausgangsmengen sowie die Auswirkungen der Sensitivität der Eingangsmengen. Bei konstanter Ausgangsparametrierung wird also die Sensitivität der Eingänge über den Erfülltheitsgrad der einzelnen Regeln, bei konstanten Erfülltheitsgraden die Sensitivität der Parametrierung der Ausgangsmengen untersucht.

Die Änderung des i-ten Parameters (d. h. um Δp_i) führt auf

$$\Delta a(\Delta p_i) = \frac{g_i}{\sum_k g_k} \Delta p_i, \quad (\text{A.27})$$

die Änderung des i-ten Gewichtes um Δg_i zu

$$\Delta a(\Delta g_i) = \frac{1}{\sum_k g_k} \Delta g_i (p_i - a) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{\Delta g_i}{\sum_k g_k} \right)^n \quad (\text{A.28})$$

$$= \frac{1}{\sum_k g_k} \Delta g_i (p_i - a) + R(\Delta g_i, g_1, \dots, g_n), \quad (\text{A.29})$$

mit dem Rest $R(\Delta g_i, g_1, \dots, g_n) = R\left(\frac{\Delta g_i}{\sum_k g_k}\right)$. Dies weist die Auswirkung einer Änderung auf den scharfen Ausgangswertes a auf, gleichviel, ob sie von einer Änderung der Parametrierung der Eingangs- oder Ausgangsmenge herrührt.

Für die Sensitivität der Ausgangsmengen sei angenommen, daß der jeweilige Erfülltheitsgrad μ_i aus den jeweiligen Regeln bereits ermittelt ist. Für die

Fläche $A_i(\mu_i)$ und ihren Schwerpunkt $x_i(\mu_i)$ ist in Abhängigkeit der Parametrierung t_1, t_0, t_4 ⁷

$$x_i(\mu_i) = \frac{1}{2}(t_4 - t_1) - \left(\frac{1}{2}(t_4 - t_1) - (t_0 - t_1)\right) \frac{\mu_i (t_4 - t_1) + 2l(\mu_i)}{3 (t_4 - t_1) + l(\mu_i)} \quad (\text{A.30})$$

$$A(\mu_i) = \frac{1}{2}((t_4 - t_1) + l(\mu_i))\mu_i, \quad (\text{A.31})$$

$$l(\mu_i) = \left(\frac{1}{|m_1|} + \frac{1}{|m_2|} \right) (H_i - \mu_i), \quad (\text{A.32})$$

mit $H_i = H_{i,0} + ((t_{i,3} - t_{i,2})(|m_{i,1}| + |m_{i,2}|))/(|m_{i,1}| |m_{i,2}|)$.

Da die Änderung des Parameters p_i , hängt in erster Linie von der Wahl der Wahl der Stützpunkte $t_{j,i}$ der Trägermenge ab, gibt also die Sensitivität hinsichtlich der Parametrierung der Ausgangsmenge an. Der Einfluß der Gewichte hängt in erster Linie von den Erfülltheitsgraden μ_i der linguistischen Terme ab. Schreibt man, in Anlehnung an die Darstellung von Abbildung A.4 die Fläche und den Schwerpunkt jeweils in Abhängigkeit der Zugehörigkeitsgrade μ_i an, so ist $(t_{3,i} - t_{2,i})\mu_i \leq g(\mu_{i-1}, \mu_i, \mu_{i+1}) \leq g(0, \mu_i, 0) \leq g(0, 1, 0)$. Der Parameter p_i , dargestellt durch den Schwerpunkt befindet sich jeweils im Intervall

$$x_{s,i} = \left[\frac{1}{2}(t_{i,4} - t_{i,1}) + \frac{1}{3}(t_{i,4} - 2t_{i,0} - t_{i,1}); \frac{1}{2}(t_{i,4} - t_{i,1}) \right] \quad (\text{A.33})$$

wobei folgende Fälle zu unterscheiden sind

- $\mu_{i-1} = 0$; $\mu_{i+1} = 0$ mit $t_{0,i} = t_{1,i}^0$
- $\mu_{i-1} \neq 0$; $\mu_{i+1} = 0$ mit $t_{0,i} = t_{1,i}^0 + \mu_{i-1}/m_1$
- $\mu_{i-1} = 0$; $\mu_{i+1} \neq 0$ mit $t_{0,i} = t_{4,i}^0 + \mu_{i+1}/m_2$
- $\mu_{i-1} \neq 0$; $\mu_{i+1} \neq 0$ mit $t_{1,i} = t_{1,i}^0 + \mu_{i-1}/m_1$ und $t_{0,i} = t_{4,i}^0 + \mu_{i+1}/m_2$

so daß die Länge des Intervalles auf den jeweils maximalen Einfluß der einzelnen Schwerpunktkoordinate auf den Ausgang schließen läßt. Ebenso läßt sich hier der Einfluß der Intervallunterteilung selbst ablesen: hierzu ist jeweils der Zugehörigkeitsgrad festzuhalten.

Die hier gezeigten Eigenschaften der Defuzzifizierung zeigen, daß zur Abschätzung der Sensitivität die Verwendung der modifizierten Schwerpunktmethode

$$a = \frac{\sum_{i=0}^n x_i \mu_i}{\sum_{i=0}^n x_i} \quad (\text{A.34})$$

⁷ $t_0 = t_1 + H/m_1$ bzw. $t_0 = t_4 + H/m_2$.

ausreicht. Der Einfluß der Stützstellen $t_{i,j}$ kann über die Angabe des Einflusses auf die Schwerpunkte $x_i(\mu_i = 1)$, bei gegebener Wahl der Stützstellen der Einfluß der Erfülltheitsgrade über die Gradienten nach den Zugehörigkeitsgraden angegeben werden. Für $\mu_i = 1$ erhält man damit für den Schwerpunkt einer Fläche (ohne die Überlappung zu berücksichtigen) zu

$$\sum \tilde{x}_i \tilde{A}_i = \frac{h}{3} \frac{((t_4 - t_3) + (t_2 - t_1))^2 - 2(t_4 - t_3)(t_2 - t_1) + 3(t_1 - t_3)(t_1 + t_2 + t_3)}{A_{ges}}$$

mit $\tilde{A}_{ges} = \frac{h}{2}((t_4 - t_3) + (t_2 - t_1))$. Insgesamt

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{2}{3} \left\{ ((t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)) - \frac{1}{\frac{1}{(t_4 - t_3)} + \frac{1}{(t_2 - t_1)}} + \frac{3(t_1 - t_3)(t_1 + t_2 + t_3)}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} \right\} \\ &= \frac{2}{3} \{T_1 + T_2 + T_3\} \end{aligned}$$

Für die Ableitungen ist damit

$$\frac{\partial T_1}{\partial t_i} = (-1)^i; i = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t_i} = (-1)^i \left(\frac{(t_4 - t_3)}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} \right)^2; i = 1, 2 \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t_i} = (-1)^i \left(\frac{(t_2 - t_1)}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} \right)^2; i = 3, 4 \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t_1} = \frac{1}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} (2t_1 + t_2 + T_3) \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t_2} = \frac{1}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} (t_1 - t_3 - T_3) \quad (\text{A.39})$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t_3} = \frac{1}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} (-(2t_3 + t_2) + T_3) \quad (\text{A.40})$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t_4} = \frac{1}{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)} (-T_3) \quad (\text{A.41})$$

A.2.2.7. Sensitivität

Die Sensitivität bezüglich der Eingangsmengen ist, wie vorher ausgeführt, bei gegebenen Regeln gerade die lineare Empfindlichkeit der Eingänge selbst. Für die Ausgangsmengen läßt sich ein gestaffeltes Tableau angeben, mit dem die Sensitivität untersucht werden kann, siehe Tabelle A.3.

Der hier vorgeschlagene Ansatz zeigt, wie sich die Sensitivität von Fuzzy-Systemen untersuchen läßt. Welche Darstellung im einzelnen geeignet ist, die so gewonnenen Ergebnisse darzustellen ist im Einzelnen zu entscheiden (vgl. Abschnitt 3.4, S. 53 ff.).

Tabelle A.3.: Tableau zur Ermittlung der Sensitivität eines Fuzzy-Systems bezüglich einer Ausgangsgröße. Die Bezeichnungen beziehen sich auf die Gleichungen A.35 bis A.41.

...	⋮					
	$t_{j,1}$	$t_{j,2}$	$t_{j,3}$	$t_{j,4}$		
		$t_{j+1,1}$	$t_{j+1,2}$	$t_{j+1,2}$	$t_{j+1,4}$	
...	⋮					
...	$T_{1,t_{j,1}}$	$T_{1,t_{j,2}}$	$T_{1,t_{j,3}}$	$T_{1,t_{j,4}}$		
	$T_{2,t_{j,1}}$	$T_{2,t_{j,2}}$	$T_{2,t_{j,3}}$	$T_{2,t_{j,4}}$		
	$T_{3,t_{j,1}}$	$T_{3,t_{j,2}}$	$T_{3,t_{j,3}}$	$T_{3,t_{j,4}}$		
	$T_{t_{j,1}}$	$T_{t_{j,2}}$	$T_{t_{j,3}}$	$T_{t_{j,4}}$		
		$\Delta x_j; x_j$...
		$T_{1,t_{j+1,1}}$	$T_{1,t_{j+1,2}}$	$T_{1,t_{j+1,3}}$	$T_{1,t_{j+1,4}}$	
		$T_{2,t_{j+1,1}}$	$T_{2,t_{j+1,2}}$	$T_{2,t_{j+1,3}}$	$T_{2,t_{j+1,4}}$	
		$T_{3,t_{j+1,1}}$	$T_{3,t_{j+1,2}}$	$T_{3,t_{j+1,3}}$	$T_{3,t_{j+1,4}}$	
		$T_{t_{j+1,1}}$	$T_{t_{j+1,2}}$	$T_{t_{j,3}}$	$T_{t_{j+1,4}}$	
		$\Delta x_{j+1}; x_{j+1}$...
		⋮				

A.3. Wärmeübergang und Stofftransport

Nusselt- und Sherwoodzahl

Für den Wärmeübergang an Rohren bei vollständig ausgeprägter turbulenter Strömung ist nach Gnielinski (VDI 1997)

$$Nu_{m,T} = \frac{(\zeta/8)RePr}{1 + 12.7\sqrt{(\zeta/8)(Pr^{2/3} - 1)}} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (A.42)$$

$$\zeta = (1.8 \log_{10} Re - 1.5)^{-2} \quad (A.43)$$

zu setzen, wobei diese Gleichungen gültig sind für $10^4 \leq Re \leq 10^6$; $0.6 \leq Pr \leq 1000$; $\frac{d_i}{L} \leq 1$ mit $Nu_{m,T} = \frac{\alpha d_i}{\lambda}$; $Re = \frac{w d_i}{\nu}$. Für die technisch wichtigen Randbedingungen „konstante Temperatur“ bzw. „konstanter Wärmestrom“ ergeben sich praktisch die gleichen mittleren Nusselt-Zahlen. Die Stoffwerte sind jeweils für die mittlere Temperatur $\vartheta_m = \frac{1}{2}(\vartheta_E + \vartheta_A)$ anzugeben.

Aufgrund der Analogie zwischen Wärmeübergang und Stofftransport ist für

dimensionslose Kennzahl des Stofftransportes ebenfalls nach Gnielinski (Mersmann 1986)

$$Sh = \frac{(\zeta/8)(Re - 1000)Sc}{1 + 12.7\sqrt{(\zeta/8)(Sc^{2/3} - 1)}} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (\text{A.44})$$

zu setzen, wobei für die Sherwood-Zahl mit dem Stofftransportkoeffizienten β , dem hydraulischen Durchmesser d und dem (binären) Diffusionskoeffizienten D_{AB} gilt: $Sh = \frac{\beta d}{D_{AB}}$. Der empirisch gefundene Wert 1000 im Term der Reynoldszahl berücksichtigt, daß im Bereich von $2300 < Re < 10^4$ noch keine vollturbulente Strömung vorliegt.

Druckverlust

Davon gesondert zusammengestellt sind die Beziehungen zur Berechnung des Druckverlustbeiwertes ψ in Tabelle A.4.

Hausen (1976) berichtet von Messungen zum Wärmeübergang in Metallrohren an Flüssigkeiten, in denen eine Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten mit wachsender Rauigkeit der Rohrwand beobachtet wurde. Bei künstlichen Rauigkeiten konnte sogar eine Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten auf bis um das dreifache des Wertes in glatten Rohren beobachtet werden. Zum Einfluß von R_{rel} gibt Hausen (1976) folgende Beziehung an:

$$Nu_{rauh} = Nu_{glatt} [1.87 + 0.54 \log(1000 R_{rel})]. \quad (\text{A.45})$$

Tabelle A.4.: Formeln zur Berechnung des Druckverlustbeiwertes ψ .

	$\psi =$	
Nikuradse	$\left(2.00 \log_{10} \left(\frac{3.71}{R_{rel}} \right) \right)^{-2}$	65 < Re R_{rel} < 1300
Colebrook	$\left[2.00 \log_{10} \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{\psi}} + 0.27 R_{rel} \right) \right]^{-2}$	
Blasius	$\frac{0.3164}{4\sqrt{Re}}$	glatt
Chisholm	$\left\{ \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right\}^{1/12}$	$A = -2.457 \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + \frac{0.27\epsilon}{D_e} \right)$ $B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$

Diffusionskoeffizient

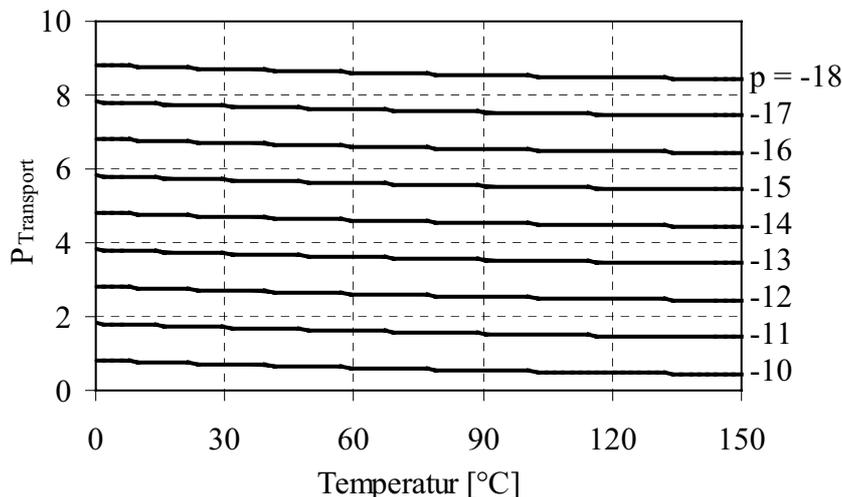
Für die im vorliegenden angewandte Abschätzung des Stofftransportes sei hier auf Abbildung A.5 verwiesen. Aufgetragen ist hier der Transportparameter $P_{Transport} = -\log_{10}(\beta d)$ über der Prozeßtemperatur mit $\beta d = Sh \cdot D$. Hier bei ist β der Stofftransportkoeffizient, d der hydraulische Durchmesser, Sh die Sherwood-Zahl nach Gleichung A.44 mit den temperaturabhängigen Werten für die Reynolds- und Schmidtzahl sowie D der Diffusionskoeffizient ermittelt nach Einstein (Mersmann 1980) gemäß

$$D = \frac{kT}{\eta} \frac{1}{\phi r} = \frac{kT}{\eta(T)} \frac{1}{10^p} \quad (\text{A.46})$$

mit T der absoluten Temperatur, η die dynamische Viskosität und k der Boltzmann-Konstante. Der Radius r steht für die Größe der diffundierenden Teilchen. Der Formfaktor ϕ beträgt bei kugeligen Teilchen 4π , wenn die Moleküle der diffundierenden Komponente und des Trägermediums etwa gleich groß sind. Bei sehr großen diffundierenden Molekülen beträgt dieser 6π . Diese Beziehung ist dimensionsrichtig und allgemein einsetzbar. Die Darstellung von Abbildung A.5 ist also so gewählt, daß im Parameter p neben dem Formfaktor ϕ ebenfalls der Radius der aufgefalteten β -Laktoglobulinmoleküle einbezogen ist.

An dieser Stelle noch einige Erläuterungen zur verwendeten Abschätzung.

Abbildung A.5.: Transportparameter $P_{Transport}$ in Abhängigkeit von der Prozeßtemperatur.



Für die Ermittlung bzw. Abschätzung des Diffusionskoeffizienten⁸ ist keine universelle Definition anzugeben. In flüssigen Gemischen erschwert sich die Ermittlung des binären Diffusionskoeffizienten, da hier dieser außer von Temperatur und Druck noch von der Konzentration abhängt. Eine allgemein zuverlässige Berechnungsmethode existiert nicht. Für eine ideal verdünnte Lösung läßt sich ein Diffusionskoeffizient D_{12}^{ivL} definieren, da in diesem Fall der Diffusionskoeffizient unabhängig von der Konzentration ist, wobei die ideale Lösung streng durch das Henry-Gesetz definiert ist. In der Praxis beträgt die Konzentration der Komponente aber etwa 5 bis 10 %.

Die bekannteste Berechnungsmethode für den binären Diffusionskoeffizienten in verdünnter Lösung ist die von Wilke und Chang (Mersmann 1986)

$$D_{12}^{ivL} = 7.4 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{\Phi \tilde{M}_2 T}}{\eta_2 \nu_{s1}^{0.6}} \quad (\text{A.47})$$

Hierbei ist $[D_{12}^{ivL}] = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ und T die Temperatur in Kelvin, \tilde{M}_2 die molare Masse der im Überschuß vorhandenen Komponente in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, η_2 die Viskosität der im Überschuß vorhandenen Komponente in $10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$, ν_{s1} das molare Volumen der verdünnten Komponente an ihrem normalen Siedepunkt in $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$ und Φ ein Assoziationsfaktor. Ist die überschüssige Komponente nicht assoziierend, so ist $\Phi = 1$, für das stark assoziierende Wasser ist $\Phi = 2.6$, für Methanol 1.9, für Ethanol 1.5. Gute Ergebnisse erhält man für die Diffusion von Wasser in organischen Substanzen, wenn die nach Wilke und Chang ermittelten Werte durch 2.3 dividiert werden.

Wie an anderer Stelle bereits dargelegt, hängt die Größe der β -Laktoglobulin Partikel ebenfalls von der Temperatur ab, siehe auch Kennel (1994). Wie Abbildung A.5 zeigt, ist die Abhängigkeit von der Temperatur für ein festes $p = \log_{10}(\phi r)$ nur gering, stärkeren Einfluß zeigt hier der Parameter p .

Der Bereich, aus dem der Parameter p gewählt wird, ist nun so bemessen, daß im wesentlichen alle für die Anlagerung in Frage kommenden Partikelgrößen (Molkenproteine, Fett, Kasein, Milchsäure und Konglomerate derselben) abgedeckt sind. Die Größe der Partikel im einzelnen hängt von den Reaktionen der beteiligten Milchbestandteile ab, ist also wiederum in erster Linie temperaturabhängig.

⁸Diese Zusammenfassung folgt VDI (1997).

A.4. Material- und Stoffdaten

Dieser Abschnitt faßt die im vorliegenden Fall angewendeten Material- und Stoffdaten zusammen. Die im vorliegenden Fall angewendeten Parametrierungen für die Arrheniusbeziehungen der Reaktionsraten in Tabelle A.5. Dabei sind die verwendeten Beziehungen für die thermophysikalischen Stoffgrößen der Milch in den Tabellen A.8 und A.6, die für Wasser in A.9 und A.7 zusammengefaßt.

Tabelle A.5.: Zusammenstellung der verwendeten Geschwindigkeitskonstanten für die β -Laktoglobulin-Denaturierung nach de Jong (1996).

Arrheniusbeziehungen $k_i = k_{0,i} \exp \frac{-E_{a,i}}{RT}$			
Index i	Temperaturbereich	E_a	$\ln(k_0)$
Auffaltung U	70 - 90 °C	216.4	86.41
Aggregation A	70-90 °C	288.5 ± 5.7	91.32 ± 1.92
	90-150 °C	54.7 ± 0.5	13.99 ± 0.15
Anlagerungsreaktion d	-	45.1 ± 4.5	-0.82 ± 1.45

Tabelle A.6.: Polynome zur Bestimmung der Wärmekapazität von Milch nach Kessler (1996)

$c_{Milch} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$	$= (1 - x_{tr})c_w + x_{tr} \sum_{i=1}^3 a_i b_i$, x_{tr} Trockensubstanz in $\frac{kg}{kg}$			
	1	2	3	Bemerkung
a_i	0.534	0.381	0.083	Massenanteil [-]
b_i	1.4	1.6	0.8	spezifische Wärme [kJ/kgK]
	Kohlehydrate	Proteine	Asche	

Tabelle A.7.: Polynome zur Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser (Blanke 1989).

$c_{Wasser} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$	$= \sum_{i=0}^3 a_i \vartheta^i$			
	$a_0 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$	$a_1 \left[\frac{kJ}{kgK^\circ C} \right]$	$a_2 \left[\frac{kJ}{kgK^\circ C^2} \right]$	$a_3 \left[\frac{kJ}{kgK^\circ C^3} \right]$
	4.214	$-2.153 \cdot 10^{-3}$	$-3.646 \cdot 10^{-5}$	$-1.4948 \cdot 10^{-7}$

Tabelle A.8.: Formeln zur Berechnung der Dichte, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit von Milch nach Kessler (1996).

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\rho = \sum_{i=0}^1 x_f^i \sum_{j=0}^2 a_{i,j} \vartheta^j, \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pm 0.1\%$		
	ϑ Temperatur [°C], x_f Fettgehalt [%]		
	2 $\left[\frac{kg}{m^3 \cdot ^\circ C^2} \right]$	1 $\left[\frac{kg}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$	0 $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
$a_{0,i}$	$-2.3 \cdot 10^{-2}$	$-2.665 \cdot 10^{-2}$	1040.7
$a_{1,i}$	$-4.81 \cdot 10^{-5}$	$-9.76 \cdot 10^{-3}$	1.011
$\eta [mPa \cdot s]$	$\eta = \exp \left(\sum_{i=0}^2 x_f^i \sum_{j=0}^2 a_{i,j} \vartheta^j \right), \frac{\Delta \eta}{\eta} = \pm 2.2\%; 0 \leq x_f \leq 12$		
	ϑ Temperatur °C, x_f Fettgehalt [%]		
	2 $\left[\frac{1}{^\circ C^2} \right]$	1 $\left[\frac{1}{^\circ C} \right]$	0
$a_{0,j}$	$3.03 \cdot 10^{-5}$	$-1.813 \cdot 10^{-2}$	0.609
$a_{1,j}$	$-2.3 \cdot 10^{-6}$	$5.49 \cdot 10^{-4}$	$2.06 \cdot 10^{-3}$
$a_{2,j}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$6.29 \cdot 10^{-5}$	$5.42 \cdot 10^{-3}$
$\lambda \left[\frac{W}{mK} \right]$	$\lambda = 0.5406 - 0.0055 \cdot x_f; 3 \leq x_f \leq 62\%$		
	x_f Fettgehalt [%], $0 \leq x_f \leq 12$		

Tabelle A.9.: Formeln zur Berechnung der Dichte, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser abhängig von der Temperatur $\vartheta, [\vartheta] = ^\circ C$.

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\rho = \sum_{i=0}^3 a_i \vartheta^i$					
	a_0	a_1	a_2	a_3		
	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\left[\frac{kg \cdot 10^{-2}}{m^3 \cdot ^\circ C} \right]$	$\left[\frac{kg \cdot 10^{-6}}{m^3 \cdot ^\circ C^2} \right]$	$\left[\frac{kg \cdot 10^{-5}}{m^3 \cdot ^\circ C^3} \right]$		
	1000.22	1.0205	-5.8149	1.496		
$\lambda \left[\frac{W}{mK} \right]$	$\lambda = \sum_{i=0}^3 a_i \vartheta^i$					
	a_0	a_1	a_2	a_3		
	$\left[\frac{W \cdot 10^{-3}}{mK} \right]$	$\left[\frac{W \cdot 10^{-3}}{mK} \right]$	$\left[\frac{W \cdot 10^{-6}}{mK} \right]$	$\left[\frac{W \cdot 10^{-9}}{mK} \right]$		
	568.96	1.88	-8.2	6.02		
$\eta [Pa \cdot s]$	$\eta = 10^{-6} \sum_{i=0}^5 a_i \vartheta^i, 0 \text{ bis } 150 \text{ } ^\circ C, \left \frac{\Delta \eta}{\eta} \right \leq 0.15\%$					
	a_0	a_1	a_2	$a_3 \cdot 10^{-2}$	$a_4 \cdot 10^{-5}$	$a_5 \cdot 10^{-7}$
	$[Pa \cdot s]$	$\left[\frac{Pa \cdot s}{^\circ C} \right]$	$\left[\frac{Pa \cdot s}{^\circ C^2} \right]$	$\left[\frac{Pa \cdot s}{^\circ C^3} \right]$	$\left[\frac{Pa \cdot s}{^\circ C^4} \right]$	$\left[\frac{Pa \cdot s}{^\circ C^5} \right]$
	1791.0	56.519	1.0796	1.2012	6.9445	1.5853

A.5. pH-Wert, Löslichkeit

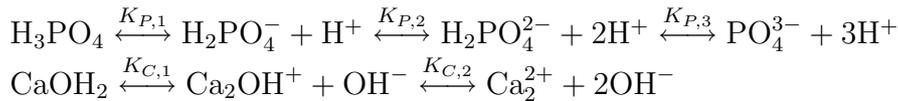
Temperaturänderungen verändern die Dissoziationskonstanten, wodurch sich die Lösungsgleichgewichte verschieben und sich damit der pH-Wert ändert (Butler 1998). Über die Ladungsbilanz läßt sich der pH - Wert aus der $[H^+]$ -Konzentration

$$\begin{aligned} 0 &= \sum C_{ch,an} + [OH^-] - \sum C_{ch,kat} + [H^+]; & [OH^-] &= \frac{K_w}{[H^+]} \\ 0 &= [H^+] + (\sum C_{ch,an} - \sum C_{ch,kat}) - \frac{K_w}{[H^+]} \Rightarrow 0 = [H^+]^2 + [H^+]C_{ch} - K_w \end{aligned}$$

durch Auffinden einer Nullstelle einer quadratischen Gleichung finden lassen. Heinzle *et al.* (2000) gibt hierzu einen Algorithmus an, siehe Tabelle A.10. Bei gegebener Gesamtkonzentration kann über die Dissoziation der beteiligten Salze, Basen und Säuren

$$\begin{aligned} M_z X_y(s) &\leftrightarrow zM^{y+} + yX^{z-}; & K_{so} &= [M^{y+}]^z [X^{z-}]^y; & [M^{y+}]^z &= zS; & [X^{z-}]^y &= yS \\ \Rightarrow (zS)^z (yS)^y &= S^{z+y} z^z y^y = K_{so} \Rightarrow S &= \left[\frac{K_{so}}{z^z y^y} \right]^{\frac{1}{z+y}} \end{aligned}$$

Löslichkeit und Kristallisation abhängig vom pH-Wert berechnet werden. Die chemischen Gleichgewichte des Kalziumphosphatpuffers wurden gemäß



ermittelt, die Dissoziationskonstanten entsprechend der in Tabelle A.11 gegebenen Beziehungen nach den bei Hege (1984) angegebenen Werten ermittelt.

Mit der vollständigen Dissoziation eines Kalziumphosphatpuffers Ca_3PO_4 als Modellösung für Milch die Temperaturabhängigkeit des pH - Wertes für eine Milch recht gut darstellen, siehe Abbildung A.6. Die Literaturwerte stammen von Kirchmeier (1982) und Hege (1984). Die Anwesenheit weiterer unbeteiligter Ionen wurde in der Ladungsbilanz berücksichtigt. Die errechneten Werte

Tabelle A.10.: Berechnung des pH-Wertes nach Heinzle *et al.* (2000).

Schritt	Vorgehen (Start: $[H^+]_1 = 1.0^{-14}$; $[H^+]_0 = 1.0^{-15}$; $F = 10$)
1	Berechne Anteil Anionen und Kationen abhängig von $[H^+]$
2	Berechne die Ladung
3 1	Wenn $C_{ch,i-1}C_{ch,i} < 0$: $[H^+]_{i+1} = [H^+]_i/F$, $F = \sqrt{F}$
3 2	Wenn $C_{ch,i-1}C_{ch,i} > 0$: $[H^+]_{i+1} = [H^+]_i * F$
4	Wenn $C_{ch,i} \leq \varepsilon$: pH = $-\log_1 0([H^+])$, sonst weiter bei Schritt 1

Tabelle A.11.: Dissoziationskonstanten des Kalziumphosphatpuffers. In $K_{P,3}$ ist die Temperatur in °C einzusetzen. Es ist $K_i = 10^{\tilde{K}}$; $\tilde{K} = \sum_{i=-1}^1 a_i T^i$, mit $a_{-1}[T]$; $a_0[-]$; $a_1 \left[\frac{1}{T}\right]$.

i	$H_3PO_4: K_{P,i}$			$CaOH_2: K_{C,i}$			$H_2O: K_{w,i}$		
	a_{-1}	a_0	$a_1 \cdot 10^2$	a_{-1}	$a_0 \cdot 10^3$	a_1	a_{-1}	a_0	a_1
1	-799,31	4,55	-13,486	0	3,74	0	-4470,99	6,0875	-0,17
2	-1979,5	5,3541	-1,984	0	43	0			
3	-9,957	-11,916	0						

stimmen mit den beiden Datensätzen gut überein. Allerdings zählt z. B. Citrat ebenfalls zu den Belagbildnern, so daß dieses Kalziumphosphatpuffer-Modell nur zur Darstellung der Temperaturabhängigkeit des pH-Wertes ausreicht.

Eine für die Simulation geeignete Lösung für den lokalen Kristallisationsvorgang der Milchsäure konnte über diesen Ansatz nicht gefunden werden. Die Beschränkung auf den Kalziumphosphatpuffer hätte zusätzliche Parameter und deren Anpassung gefordert. Daher wurde der Ansatz von Hege (1984) angewendet, der die Anlagerung direkt beschreibt (Aktivierungsenergie E_a von 66.083 [kJ/kgK] und ein $\ln(k_0)$ von 23.65.).

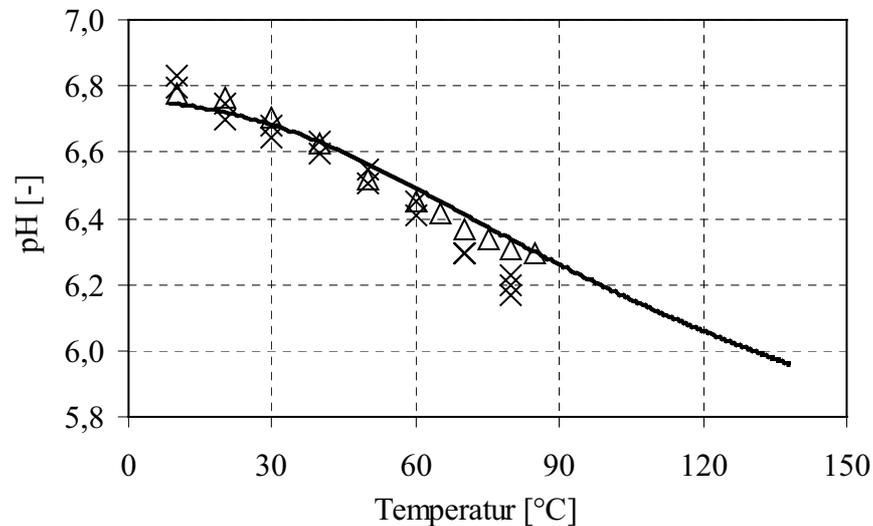


Abbildung A.6.: pH-Wert in Abhängigkeit von der Temperatur (durchgezogene Linie: s. Tabelle A.10; Kirchmeier (1982): (×), Hege (1984): (Δ))

Literaturverzeichnis

- Afgan, N. H., Carvalho, G., *A Confluence-Based Expert System for the Detection of Heat Exchanger Fouling*, Heat Transfer Engineering 19, 1998
- Arteaga, G. E., Vazquez, M. C. & Nakai, S., *Dynamic optimization of the heat treatment of milk*, Food Research International 27, 77-82, 1994
- Augustin, W., *Verkrustung (Fouling) von Wärmeübertragungsflächen*, Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig, 1992
- Bandemer, H., Gottwald, S., *Einführung in Fuzzy-Methoden*, Akademie Verlag, 1993
- Barton, K. P., Chapman, T. W. & Lund, D., *Rate of Precipitation of Calcium Phosphate on Heated Surfaces*, Biotechnology Progress (1)1, 49-55, 1985
- Bardossy, A., Duckstein, L., *Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems*, CRC Press, 1995
- Bechmann, F., *Das stationäre und instationäre Verhalten von Platten-Wärmeübertragern im industriellen Maßstab*, VDI-Verlag Düsseldorf, 1996
- Becker, T., *Entwicklung eines rechnergestützten enzymintegrierten Fließinjektionssystems und seine Verwendung in der biotechnologischen Prozeßleittechnik und Qualitätskontrolle*, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995
- Becker, T., *Management of bioprocesses by means of modelling and cognitive tools*, Habilitationsschrift Technische Universität München, 2002
- Belmar-Beiny, M. T., Fryer, P. J., *Bulk and surface effects on the initial stages of whey fouling*, Trans. IChem. Engn. Vol. 70, Part C, December 193 - 198, 1992
- Belmar-Beiny, M. T., Gotham, S. M., Paterson, W. R., Fryer, P. J., Pritchard, A. M., *The effect of Reynolds number and Fluid Temperature in Whey protein Fouling*, Journal of Food Engineering, 19(2), 119-139, 1993

- Benning, R., *Novel Process Synthesis in UHT plants*, Dissertation Technische Universität München (eingereicht)
- Biewer, B., *Fuzzy-Methoden - Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen*, Springer Verlag, 1995
- Blanke, W. (Hrsg), *Thermophysikalische Stoffgrößen*, Springer Verlag, 1989
- Bohnet, M., *Fouling von Wärmeübertragungsflächen*, Chemie-Ingenieur-Technik 57 (1985)
- Bothe, H.-H., *Fuzzy Logic - Einführung in Theorie und Anwendungen*, Springer Verlag, 1995
- Burton, H., *Deposits from whole milk in heat treatment plant - a review and discussion.*, J. Dairy Res., 317 - 331, 1968
- Butler, J. N., *Ionic Equilibrium - Solubility and pH Calculations*, John Wiley & Sons New York, 1998
- Chen, X. D., Chen, Z. D., Nguang, S. K., Anema, S., *Exploring the reaction kinetics of whey protein denaturation/aggregation by assuming the denaturation step is reversible*, Biochemical Engineering Journal 2, 63-69, 1998
- Chisholm, D. (ed.), *Developments in Heat Exchanger Technology - 1, Applied Science Publishers*, Barking, 1980
- Churchill, S. W., *Friction factor equation spans all fluid-flow regimes*, Chem. Eng., 84, 91-92, 1977
- Dannenberg, F., *Zur Reaktionskinetik der Molkenproteindenaturierung und deren technologischer Bedeutung*, Dissertation Technische Universität München, 1986
- Davies, T. J., Henstridge, S. C., Gillham, C. R., Wilson, D. I., *Investigation of whey protein deposit properties using heat flux sensors*, Food and Bioproducts processing, 75, 106-110, 1997
- Delplace, F., Leuliet, J. C., *Modelling Fouling of a Plate Heat Exchanger with different Flow Arrangements by Whey Protein Solutions*, Trans IChemE Vol 73, Part C, September, 1995
- Dubois, D., Prade, H., *Fuzzy Sets and Systems - Theory and Applications* Academic Press, 1980

- Epstein, N., *Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5 x 5 Matrix*, Heat Transfer Engineering 4, 1983
- Esterl, S., *Numerische Simulation der Strömung und des Stofftransportes in Festbett-Bioreaktoren*, Dissertation Technische Universität München, 2000
- Fahrmeir, L., Hamerle, A., (Hrsg.), *Multivariate statistische Verfahren*, Walter de Gruyter, 1984
- Ferziger, J. H., Perič, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer Verlag, 2002
- Fiedler, J., *Ansatzbildung durch Milchsäure und Molkenproteine beim Eindampfen von Molke und Ultrafiltrations-Permeat in einem Fallfilmverdampfer*, Dissertation Technische Universität München, 1985
- Foster, C. L., Britten, M., Green, M. L., *A model heat-exchange apparatus for the investigation of fouling of stainless steel surfaces by milk I. Deposit formation at 100 °C*, Journal of Dairy Research, 1989
- Foster, C. L., Green, M. L., *A model heat-exchange apparatus for the investigation of fouling of stainless steel surfaces by milk II. Deposition of fouling material at 140 °C*, Journal of Dairy Research 57, 339-348, 1990
- Fryer, P. J., Slater, N. K. H., *A direct simulation procedure for chemical reaction fouling in heat exchangers*, The Chemical Engineering Journal 31, 97 - 107, 1985
- Fryer, P. J., Slater, N. K. H., *The simulation of heat exchanger control with tube-side chemical reaction fouling*, Chemical Engineering Science Vol. 41, No. 9, S. 2363-2372, 1986
- Fryer, P. J., Slater, N. K. H., *A novel fouling monitor*, Chemical Engineering Communications 57, 139-152, 1987
- Grasshoff, A., *Studien über die Belagbildung auf Wärmeaustauschflächen beim Erhitzen von Milch mit einer Labor-Wärmeaustauscher-Apparatur*, Milchwissenschaft 43 (12), 780-783, 1988
- Gynning, K., Thomé, K. E., Samuelsson, E.-G., *Das Anbrennen in Plattenerhitzern*, Milchwissenschaft 1958, Heft 2, S. 62-70, 1958

- Georgiadis, M. C., Rotstein, G. E., Macchietto, S., *Modeling and Simulation of Shell and Tube Heat Exchangers under Milk Fouling*, AIChE Journal (4), 1998
- Georgiadis, M. C., Rotstein, G. E., Macchietto, S., *Modelling and Simulation of Complex Plate Heat Exchanger Arrangements under Milk Fouling*, Comp. chem. Engng., Vol 22. Suppl. 1998 331-338, 1998
- Hausen, H., *Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom*, Springer Verlag, 1976
- Hege, W. U., *Über die Bildung von Ablagerungen beim Erhitzen von Milch und Molke*, Dissertation Technische Universität München 1984
- Heinzle, E., Dunn, I. J., Ryhiner, G. B., *Modeling and Control for Anaerobic Wastewater Treatment*, In: Schügerl, K., Bellgardt, K. H. (Hrsg.), *Bioreaction Engineering: Modeling and Control*, Springer Verlag Berlin/Heidelberg 2000.
- Hiddink, J., Lalande, M., Maas, A. J. R., Streuper, A., *Heat treatment of whipping cream - I. Fouling of the pasteurization equipment*, *Milchwissenschaft* (41), 1986
- de Jong, P., *Modelling and optimization of thermal processes in the dairy industry*, Dissertation Technische Universität Delft, 1996
- de Jong, P., Bouman, S., van der Linden, H. J. L. J., *Fouling of heat treatment equipment in relation to the denaturation of β -lactoglobuline*, *Journal of the Society of Dairy Technology*, 45, 3-8, 1992
- Karlsson, C. A.-C., Wahlgren, M. C., Trägårdh, A. C., *β -lactoglobulin fouling and its removal upon rinsing and by SDS as Influenced by Surface Characteristics, Temperature and Adsorption Time.*, *Journal of Food Engineering* 30, 43-60, 1996
- Kennel, R., *Hitzeinduzierte Aggregatbildung von Molkenproteinen*, Dissertation Technische Universität München, 1994
- Kern, D. Q., Seaton, R. E., *A theoretical analysis of thermal surface fouling*, *British Chemical Engineering*, 4, May, 258 - 262, 1959
- Kessler, H. G., *Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik, Molkereitechnologie*, Verlag A. Kessler: München 1996

- Kirchmeier, O., *Zur Reversibilität der Salzgleichgewichte in Milch*, Milchwissenschaft 37 (7), 405-407, 1982
- Kukral, R., *Modelle zur Beschreibung der Zustandsänderungen in Rohr-bündel-Wärmeübertragern bei zeitlich veränderlichen Betriebsbedingungen*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 76, Düsseldorf, VDI Verlag, 1994
- Lalande, M., Corrieu, G., *Fouling of Plate Heat Exchanger by Milk*, In: Fundamentals and Applications of Surface Phenomena Associated with Fouling and Cleaning in Food Processing, Proceedings 6-9 April 1981, Tlosand, Sweden, pp. 279-288
- Lalande, M., Tissier, J.-P., Corrieu, G., *Fouling of Heat Transfer Surfaces related to β -Laktoglobulin Denaturation during Heat Processing of Milk*, Biotechnology Progress Vol. 1., No. 2, 1985
- Mersmann, A., *Thermische Verfahrenstechnik - Grundlagen und Methoden* Springer Verlag, 1980
- Mersmann, A., *Stoffübertragung*, Springer Verlag, 1986
- Montelius, M. N., *Some studies of fouling phenomena on non-heated food contact surfaces*, Dissertation Universität Lund, 1988
- Mottar, J., Moermans, R., *Optimization of the forwarming process with respect to deposit formation in indirect ultrahigh temperature plants and the quality of milk*, Journal of Dairy Research 55, 563 - 568, 1988
- Mulvihill, D. M., Donovan, M., *Whey Proteins and their thermal Denaturation - A review*, Irish Journal of Food Science and Technology, 11, 43-75, 1987
- Murnleitner, E., *State Detection and Feedback Control of the Anaerobic Wastewater Treatment Using Fuzzy Logic*, Dissertation Technische Universität München, 2001
- Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corp.: Washington, 1980
- Paterson, W. R., Fryer, P. J., *A reaction engineering approach to the analysis of fouling*, Chemical Engineering Science 43, 1714-1717, 1988
- Petermeier, H., Benning, R., Delgado, A., Kulozik, U., Hinrichs, J., Becker, T., *Hybrid model of the fouling process in tubular heat exchangers for the dairy industry*, Journal of Food Engineering 55, 9-17, 2002

- Reppich, M., Babinec, F., Dohnal, M., *Bestimmung des Foulingfaktors an Wärmeübertragungsflächen mit Hilfe einer Fuzzy-Wissensbasis*, Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research 59, 1993
- Sandu, C., Lund, D. B., *Minimizing Fouling in Heat Exchanger Design*, Biotechnology Progress (1)1, 10-17, 1985
- Sandu, C., Singh, R. K. (1994), *Energy Increase in Operation and Cleaning due to Heat-Exchanger Fouling in Milk Pasteurization*, Food Technology (84)12, pp 84-91, 1994
- Schraml, J., *Zum Verhalten konzentrierter Produkte bei der Belagbildung an heißen Oberflächen*, Dissertation Technische Universität München, 1993
- Schreier, P. J. R., Fryer, P. J., *Heat Exchanger Fouling: a model study of the scaleup of laboratory data*, Chemical Engineering Science, Vol. 50, 1311 - 1321, 1995
- Seelinger, P., Pflieger, D., Adomeit, P., Sperber, A., *Fouling in Wärmeübertragern - Berechnung der Widerstandswerte über Neuro-Fuzzy-Modelle*, Chemie Ingenieur Technik (68), 835-839, 1996
- Skudder, P. J., Brooker, B. E., Bonsey, A. D., Alvarez-Guerrero, N. R., *Effect of pH on the formation of deposit from milk on heated surfaces during ultra high temperature processing*, Journal of Dairy Research 53, 75-87, 1986
- Soumerai, H., *Practical Thermodynamic Tools for Heat Exchanger Design Engineers*, John Wiley & Sons, 1987
- Swartzel, K. R., *Tubular heat exchanger fouling by milk during ultra high temperature processing*, Journal of Food Science 48, 1507-1511, 1983
- Taborek, J., Aoki, T., Ritter, R. B. & Palen, J. W., *Predictive Methods for Fouling Behavior*, Chemical Engineering Progress (Vol. 68, No. 7) pp 69 - 78, 1972
- Takemoto, T., Crittenden, B. D., Kolaczowski, S. T., *Interpretation of Fouling data in industrial shell and tube heat exchangers*, Trans IChemE Part A, Vol 77 November 1999
- Visser, J., Jeurink, T. J. M., *Fouling of Heat Exchangers in the Dairy Industry*, In: Experimental Thermal and Fluid Science 14, 407-424, 1997

-
- VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, Herausgegeben von der Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) im Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Springer-Verlag, 1997
- Yoon, J., Lund, D. B., *Magnetic Treatment of Milk and Surface Treatment of Plate Heat Exchangers: Effects on Milk Fouling*, Journal of Food Science, Vol. 59, No. 5, 1994
- Zell, A., *Simulation Neuronaler Netze*, Oldenbourg-Verlag, 2000
- Zimmermann, H.-J., Angstenberger, J., Lieven, K., Weber, R., *Fuzzy-Technologien: Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*, VDI Verlag Düsseldorf, 1993

