

Diss. ETH Nr. 11576

WÄRMETAUSCHER-ÜBERWACHUNG DURCH MESSEN VON EIN- UND AUSGANGSGRÖSSEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

PETER NEUENSCHWANDER

Dipl. Masch.-Ing. ETH

geboren am 13. September 1962

von Signau (Kanton Bern)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Suter, Referent

Prof. Dr. W. Schaufelberger, Korreferent

Zürich 1996



Juris Druck+Verlag Dietikon

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand am Laboratorium für Energiesysteme des Instituts für Energietechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Die Messungen und Versuche wurden an einem im praktischen Einsatz stehenden Blockheizkraftwerk durchgeführt.

Allen Personen, welche durch ihre Mithilfe zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich herzlich.

Prof. Dr. Peter Suter danke ich für die Unterstützung und die wertvollen Anregungen zur Arbeit sowie für das entgegengebrachte Vertrauen, welches mir die Entfaltung eigener Ideen ermöglichte. Prof. Dr. Walter Schaufelberger danke ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Uebnahme des Korreferats.

Prof. Dr. Martin Zogg, Leiter des Forschungsprogrammes "Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Koppelung" des Bundesamtes für Energiewirtschaft danke ich für die angenehme Zusammenarbeit.

Für die sehr gute Zusammenarbeit danke ich den Mitarbeitern der Firma Ammann AG in Langenthal, besonders Herrn Dr. Daniel Maurer. Herrn Hans Pauli von der Firma Dr. Eicher & Pauli AG in Liestal danke ich für die Unterstützung des Projektes, insbesondere für die Starthilfe. Dem Amt für Bundesbauten, namentlich Herrn Peter Müller, sowie Herrn Werner Pfund und seinen Mitarbeitern von der EMPA in Dübendorf danke ich, dass mir das Blockheizkraftwerk der EMPA für Versuche zur Verfügung gestellt wurde.

Für die interessante Zeit am Laboratorium danke ich meinen Arbeitskollegen, namentlich den Herren Roger Räber, Matthias Flury und Dr. Ernst Walder. Herrn Martin Meuli und Herrn Max Hard danke ich speziell für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung.

Das Projekt wurde durch die finanzielle Unterstützung des Bundesamts für Energiewirtschaft ermöglicht.

Zürich, im März 1996

Peter Neuenschwander

WÄRMETAUSCHER-UEBERWACHUNG DURCH MESSEN VON EIN- UND AUSGANGSGRÖSSEN

INHALT

Zusammenfassung	VIII
Abstract.....	X
Symbolverzeichnis.....	XII
Kenngrößenverzeichnis.....	XIV
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Gewähltes Vorgehen	3
1.3 Gliederung.....	3
2. Abnützungsprädiktion	5
2.1 Voraussetzungen für die zustandsorientierte Instandhaltung.....	5
2.1.1 Ausfallarten.....	5
2.1.2 Einfluss der Ausfallrate auf die Wahl der Instandhaltungsstrategie	6
2.1.3 Abnützungsverhalten.....	7
2.2 Anforderungen an die Abnützungsprädiktionsmethode.....	8
2.3 Methoden zur Erfassung der Abnützung.....	9
2.3.1 Messen der Abnützung.....	9
2.3.2 Berechnen der Abnützung aus gemessenen Zustandsgrößen.....	10
2.3.3 Berechnen der Abnützung aus der Anlagebelastung	10
2.4 Abnützungsprädiktionsmethoden	10
2.4.1 Prädiktion ohne Abnützungsmodelle mit Istzustandserfassung	10
2.4.2 Prädiktion mit Abnützungsmodellen ohne Istzustandserfassung.....	11
2.4.3 Prädiktion mit Abnützungsmodellen und Istzustandserfassung.....	12
2.5 Abnützungsprädiktion Wärmetauscher	12
2.5.1 Wärmeübertragungsexergieverluste.....	13

2.5.2 Strömungsexergieverluste	15
2.5.3 Leckage zwischen den Medien	15
2.5.4 Wärmeenergieverluste und Leckage gegen aussen.....	15
2.5.5 Gewählte Ueberwachungsprinzipien für Wärmetauscher	15
2.5.6 Praktische Anwendung.....	17
3. Modellierung des Wärmetauschers.....	19
3.1 Grundlegende Zusammenhänge.....	19
3.1.1 Wärmeströme im stationären Betrieb	20
3.1.2 Wärmeströme instationär, Wärmespeicher	21
3.1.3 Wärmedurchgangskoeffizient, Verschmutzung	26
3.2 Statisches Uebertragungsverhalten	27
3.2.1 Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten k von den Aenderungen der Eingangsgrössen.....	29
3.2.2 Partielle Ableitung des Mittelwertes für die spezifische Wärmekapazität.....	31
3.2.3 Zusammenhang zwischen T_{Ha}' und T_{Ka}'	31
3.2.4 Uebertragungsfaktoren bei Eingangstemperaturänderung	31
3.2.5 Uebertragungsfaktoren bei Massenstromänderung	33
3.2.6 Austauschgrade sowie Funktionen g_u und g_{NTU} für verschiedene Stromführungen.....	35
3.2.7 Berücksichtigung des Betriebspunktes.....	38
3.3 Uebertragungsfaktor-Sensitivitätsuntersuchungen	41
3.3.1 Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren.....	43
3.3.2 Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten auf die Uebertragungsfaktoren.....	45
3.3.3 Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten respektive die Uebertragungsfaktoren.....	47
3.3.4 Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren.....	48
3.3.5 k -Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren – Uebertragungsfaktor- Diagramme	54
3.4 Dynamisches Uebertragungsverhalten.....	58
3.4.1 Analytisch bestimmte Uebertragungsfunktionen in der Literatur.....	58
3.4.2 Vereinfachte dynamische Modelle in der Literatur	59
4. Ermitteln des zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstandes infolge Verschmutzung... 61	
4.1 System der Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen	61
4.1.1 Wahl der Messgrössen für das Gleichungssystem.....	62

4.1.2 Wahl der anzuregenden Wärmetauschereingangsgrößen und der zu messenden Ausgangstemperatur.....	64
4.1.3 Ermitteln von R_T mittels im voraus berechneter Werte.....	65
4.2 Bestimmung der Uebertragungsfunktionsparameter – praktische Aspekte	65
4.2.1 Dynamisches Verhalten der Massenstromstelleinrichtung.....	65
4.2.2 Dynamisches Verhalten der Temperatursensoren.....	66
4.2.3 Gleichzeitigkeit der Messung, Messort der Temperaturen.....	66
4.2.4 Datenvorbereitung	67
4.3 Ermitteln von R_T bei einem Abgaswärmetauscher	67
4.3.1 Funktionsweise des Blockheizkraftwerkes.....	67
4.3.2 Anregung der Abgaswärmetauschereingangsgrößen.....	69
4.3.3 Temperatursensoren Abgaswärmetauscher.....	69
4.3.4 Konstruktions- und Auslegungsdaten des Abgaswärmetauschers.....	69
4.3.5 Uebertragungsfunktionen Abgas-Kühlwasser Kreuzgegenstrom-Rohrbündelwärmetauscher.....	70
4.3.6 Betriebspunktabhängigkeit der Uebertragungsfaktoren.....	73
4.3.7 Signalflussbild, Abgastemperatur als Ausgangsgröße.....	78
4.3.8 Zustandsraummodell in beobachtbarer Standardform.....	78
4.3.9 Messdatenbeispiel.....	80
4.3.10 Parameterschätzergebnisse.....	81
5. Schlussfolgerungen.....	83
5.1 Aufwand, Eignung und Schwierigkeiten bei der Anwendung der Methode in Bezug auf die betrieblichen Randbedingungen	83
5.2 Ermitteln der Wärmetauscherabnutzung.....	84
5.3 Uebertragungsfaktoren.....	85
5.4 Praktische Vorgehensweise.....	86
5.5 Ausblick	87
6. Literaturverzeichnis	89

ZUSAMMENFASSUNG

Schlagworte: Abnützung, Abnutzungsprädiktion, Instandhaltung, Ueberwachung, Parameterschätzung, Uebertragungsfaktoren, Gegenstrom, Gleichstrom, Kreuzstrom, Zweigangeinsatz Uebertragungsfunktion, Wärmetauscher, Wärmeaustauscher, Wärmeübertrager

In der vorliegenden Arbeit werden Grundlagen für die zustandsorientierte Instandhaltung von Wärmetauschern (Rekuperatoren) ausgearbeitet; einerseits die Ermittlung der momentanen Abnützung, andererseits die Prädiktion des Abnutzungsverlaufes zur anschließenden Berechnung der Restlebensdauer. Bei der Prädiktion des Abnutzungsverlaufes wird das typische Abnutzungsverhalten der Wärmetauscher berücksichtigt.

Die Bewertung verschiedener Instandhaltungsstrategien und Abnutzungsprädiktionsmethoden zeigt, dass für Wärmetauscher die zustandsorientierte Instandhaltung und die Abnutzungsprädiktion mit einem Abnutzungsmodell, welches den zeitlichen Verlauf der Abnützung beschreibt, zweckmässig sind. Die Parameter dieses Abnutzungsmodells werden dem individuellen, periodisch erfassten Abnutzungsverhalten angepasst.

Als Eingabegrösse des Abnutzungsmodells wird der bisherige Verlauf der Abnützung – in diesem Fall des Foulings respektive der Verschmutzung – benötigt. Die Abnützung verändert das statische und dynamische Uebertragungsverhalten eines Wärmetauschers. Das Verhalten ändert sich jedoch nicht nur wegen der Abnützung, es ist auch betriebspunktabhängig. Daher ist es nötig, betriebspunktbedingte Aenderungen von abnutzungsbedingten unterscheiden zu können.

Zur Beurteilung des Wärmetauscherzustandes werden Ein- und Ausgangsgrössen gemessen. Die Eingangsgrössen können während den Messungen konstant sein, oder variieren. Wärmetauscher sind Systeme mit verteilten Parametern, deren dynamisches Verhalten mit Systemen 1. oder 2. Ordnung und Totzeit genügend genau nachgebildet werden kann. Die gewählte Wärmetauschermodellierung durch Uebertragungsfunktionen ist für kleine Aenderungen der Eingangsgrössen in einem beliebigen Betriebspunkt gültig. Die Parameter der einfachen Uebertragungsfunktionen können aber physikalischen Parametern nicht direkt zugeordnet werden. Der Zusammenhang zwischen Physik und Modell wird durch die Uebertragungsfaktoren hergestellt, welche aus der Wärmetransport- und der Wärmebilanzgleichung ermittelt werden.

Die Uebertragungsfaktoren, welche zusammen mit Ein- und Ausgangsgrössen für die Bestimmung der Abnützung verwendet werden, hängen unter anderem von Aenderungen der Wärmeübergangskoeffizienten, der Aenderung des Wärmekapazitätsstromverhältnisses und der Stromführung ab. Die Wärmeübergangskoeffizienten ändern mit dem Massenstrom und den Temperaturen der Fluide. Sensitivitätsuntersuchungen zeigen, dass für die Berechnung der Uebertragungsfaktoren neben Massenstromänderungen in gewissen Fällen auch der Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte berücksichtigt werden muss. Der Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren darf nicht grundsätzlich vernachlässigt werden; je nach Betriebspunkt beeinflusst die Stromführung einzelne Uebertragungsfaktoren sehr stark.

Entsprechend den variierenden Eingangsgrössen, sind mehr oder weniger Sensoren für die Ueberwachung nötig. Die Anzahl benötigter Sensoren ist für verschiedene Situationen systematisch dargestellt. Der Fall mit konstanten Massenströmen und variierenden Eingangstemperaturen kommt mit besonders wenigen Sensoren aus. In dieser Situation ist auch die Modellierung der Uebertragungsfunktionen einfach. Demgegenüber ist bei variierenden Massenströmen die Modellierung und die Parameterschätzung aufwendiger oder kann in gewissen Fällen nicht mehr mit auf Linearisierung beruhenden Methoden erfolgen.

ABSTRACT

Keywords: *Wear, fouling, prediction, maintenance, monitoring, parameter estimation, small signal transfer gain, counter-current co-current cross-current fluid flows, transfer function, heat exchanger*

The fundamentals for condition-based repair of heat exchangers are presented in this work. In particular a method for determining the actual amount of wear – or fouling, and the prediction of the remaining life-span are investigated. For the prediction of the wear process typical fouling behaviour of heat exchangers which can be found in practice is taken into account.

The evaluation of different maintenance strategies and wear prediction methods for heat exchangers shows that condition based repair and wear prediction based on mathematical models are appropriate procedures. The wear model parameters are adapted periodically to the individual wear process.

The input quantity of the wear model is the actual wear – or the fouling. The fouling changes the static and the dynamic transfer behaviour of heat exchangers. However the behaviour change is not only due to fouling but it depends also on the operating point. To compensate for the influence of the operating point, and therefore to isolate the influence of fouling, one has to distinguish between these two effects.

Input and output quantities must be measured to determine the condition of the heat exchanger. During measurement the input quantities can be constant, or some or all of them can vary. Heat exchangers are systems with distributed parameters, but their dynamic behaviour can be described by systems of first- or second-order with dead time with reasonable accuracy. The selected model, which is based on transfer functions, is valid for small changes in input for any operating point. The parameters of the simple transfer function cannot be related directly to physical properties. The connection between physics and the model is established with small signal transfer gains. The transfer gains are derived from basic heat transfer and heat balance equations.

The transfer gains, which are used together with input and output quantities to determine the fouling, depend on changes of the heat transfer coefficients, on change of the heat-capacity-flow-ratio and on the stream flow. The heat transfer coefficients depend on the mass flows and the fluid temperatures. Sensitivity analysis shows in some cases that besides mass flow changes, the temperature dependencies of material properties must be

taken into account. Depending on the operating point, the influence of stream flow significantly affects the single transfer gains.

The number of sensors which are needed for reliable monitoring depends on the varying input quantities. The number of sensors needed is systematically shown for several different situations. In the situation with constant mass flows and varying input temperatures only a few sensors are necessary. In this case modelling of the transfer functions is simple. On the other hand, if mass flows vary, the parameter estimation involves a greater expense, or in some cases it is not possible to use linear models.

SYMBOLVERZEICHNIS

Grössen

A	Abnützung	ΔT_r	relative Eingangstemperaturdifferenz (Defgl. siehe S. XV)
A	Matrix	a	Element in Matrix
A	Wärmeübertragungsfläche	b	Element in Matrix
A_G	Abnützungsgrenzwert	c	Konstanten
B	Matrix	c_p	spezifische Wärmekapazität
Bi	Biotzahl (Defgl. siehe S. XV)	d	Durchmesser
C	Konstanten	d	Element in Matrix
C	Matrix	f	Funktion
D	Matrix	g	Funktion
G	Uebertragungsfunktion	h	spezifische Enthalpie
K	Uebertragungsfaktor	k	Wärmedurchgangskoeffizient
M	Masse	l_T	charakteristische Länge
NTU	Wärmeübertragungseinheiten (Defgl. siehe S. XIV)	$\dot{m}$	Massenstrom
Nu	Nusseltzahl (Defgl. siehe S. XV)	p	Parametervektor
Pr	Prandtlzahl (Defgl. siehe S. XV)	s	komplexe Frequenz
Re	Reynoldszahl (Defgl. siehe S. XV)	t	Zeit
$\dot{Q}$	Wärmestrom	t_A	Beginn des Foulings
R_f	Wärmedurchgangswiderstand infolge Fouling	t_R	Restlebensdauer
R_f^*	asymptotischer Endwert des Wärmedurchgangswiderstandes infolge Fouling	u	Eingangsgrösse
T	Temperatur	x	Zustandsgrösse
T_m	Mitteltemperatur	y	Ausgangsgrösse
Tb	Dimensionslose Mitteltemperatur (Defgl. siehe S. XV)	z	Ortskoordinate

Δ	Differenz
Φ	Austauschgrad (Defgl. siehe S. XIV)
Θ	Dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz (Defgl. siehe S. XIV)
α	Wärmeübergangskoeffizient
γ	Verhältnis zwischen spezifischen Wärmekapazitäten (Defgl. siehe S. XV)
η	dynamische Viskosität
λ	Luftverhältnis
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	Wärmekapazitätsstromverhältnis (Defgl. siehe S. XIV)
τ	Zeitkonstante

Exponenten

b	Summenexponent
m	Exponent der Reynoldszahl
n	Exponent der Prandtlzahl
p	Exponent der dynamischen Viskosität
q	Exponent der spezifischen Wärmekapazität
r	Exponent der Wärmeleitfähigkeit

Indices allgemein

H	H-Seite bezogen auf H-Seite
K	K-Seite bezogen auf K-Seite
NTU	Funktion g_{NTU} zu NTU_K gehörend (siehe Gl. 3.31)
R	Restlebensdauer
W	Wand
S	Sensor
a	Ausgang

e	Eingang
m	Mittel
p	Betriebspunkt
zul	zulässig
0	Referenzpunkt
μ	Funktion g_μ zu μ_K gehörend (siehe Gl. 3.31)

Indices Uebertragungsfunktionen und Uebertragungsfaktoren

Zur besseren Verständlichkeit siehe auch Figur 3.1 Seite 19 und Figur 3.4 Seite 25.

HH	Ausgang H, Eingang Temperatur H
HK	Ausgang H, Eingang Temperatur K
HmH	Ausgang H, Eingang Massenstrom H
HmK	Ausgang H, Eingang Massenstrom K
KH	Ausgang K, Eingang Temperatur H
KK	Ausgang K, Eingang Temperatur K
KmH	Ausgang K, Eingang Massenstrom H
KmK	Ausgang K, Eingang Massenstrom K
K α H	α -H-Seite, bezogen auf K-Seite
K α K	α -K-Seite, bezogen auf K-Seite

Zeichen

- / symbolisiert die partielle Ableitung einer Grösse nach einer der Eingangsgrössen u
- symbolisiert die Ableitung nach der Zeit

KENNGRÖSSENVERZEICHNIS

Dimensionslose Grössen Wärmetauscher

$$\mu_K = \frac{\dot{m}_H \cdot c_{pH}}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}} = - \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ha} - T_{He}} \quad \text{Wärmekapazitätsstromverhältnis}$$

$$NTU_K = \frac{k \cdot A_K}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}} = \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{\Delta T_m} \quad \text{Wärmeübertragungseinheiten}$$

$$\mu_H = \frac{1}{\mu_K}$$

$$NTU_H = \frac{1}{\mu_K} \cdot NTU_K$$

$$\Phi_K = \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{He} - T_{Ke}} = f(\mu_K, NTU_K) \quad \text{Austauschgrad}$$

$$\Phi_H = \frac{1}{\mu_K} \cdot \Phi_K$$

$$\Theta = \frac{\Phi_K}{NTU_K} = \frac{\Delta T_m}{T_{He} - T_{Ke}}$$

Jedes Paar der sechs Kenngrössen μ_K , NTU_H , NTU_K , Φ_H , Φ_K , Θ beschreibt den Wärmetauscher bezüglich seines stationären Verhaltens in einem Betriebspunkt vollständig (Roetzel, 1988). Für die Modellierung des statischen¹ Uebertragungsverhaltens (Kleinsignalverhalten) in einem Betriebspunkt werden zusätzliche Kenngrössen benötigt.

¹ Als statisches Verhalten wird das stationäre Verhalten bei kleinen Auslenkungen um einen Betriebspunkt definiert (S. 25).

$$NTU_K = \frac{1}{\frac{1}{NTU_{K\alpha H}} + \frac{1}{NTU_{K\alpha K}} + \frac{1}{NTU_{KW}} + \frac{1}{NTU_{KRf}}}$$

$$NTU_{K\alpha H} = \frac{\alpha_H \cdot A_H}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}} \quad \text{Zur besseren Verständlichkeit siehe auch Figur 3.5 Seite 26.}$$

$$NTU_{K\alpha K} = \frac{\alpha_K \cdot A_K}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}}$$

$$NTU_{KW} = \frac{2 \cdot \lambda_w \cdot A_K}{d_K \cdot \ln\left(\frac{d_K}{d_H}\right) \cdot \dot{m}_K \cdot c_{pK}}$$

$$NTU_{KRf} = \frac{A_K}{R_f \cdot \dot{m}_K \cdot c_{pK}}$$

$$Tb_H = \frac{T_{He} + T_{Ha}}{T_{He} - T_{Ke}}$$

$$Tb_K = \frac{T_{Ke} + T_{Ka}}{T_{He} - T_{Ke}}$$

$$\gamma_e = \frac{c_{pe}}{c_p}$$

$$\gamma_a = \frac{c_{pa}}{c_p}$$

Dimensionsbehaftete Grössen
Wärmetauscher

Dimensionslose Grössen
Wärmeübergang

$$\Delta T_{rH} = \frac{T_{He} - T_{Ke}}{\dot{m}_H}$$

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda_s} \cdot l_r$$

$$\Delta T_{rK} = \frac{T_{He} - T_{Ke}}{\dot{m}_K}$$

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l_r$$

$$Re = \frac{\dot{m}}{\eta} \cdot \frac{l_r}{A_Q}$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$$

1. EINLEITUNG

1.1 Motivation

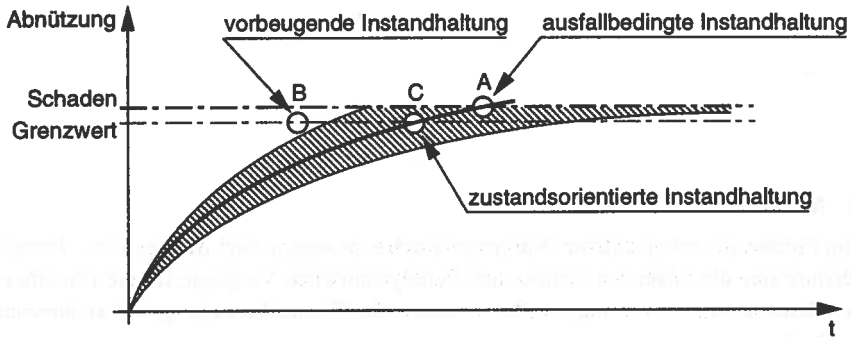
Beim Prozess des rekuperativen Wärmeaustausches zwischen zwei Medien ohne Phasenänderung sind die folgenden thermo- und fluiddynamischen Vorgänge für die Qualität eines Wärmetauschers ausschlaggebend: einerseits die Wärmeübertragung und andererseits der Fluidtransport.

Die Uebertragungsleistung von Wärmetauschern hat bei vielen verfahrens- und energie-technischen Prozessen einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch, da die nicht übertragene thermische Energie als Verlust an die Umgebung abgegeben wird. Die für eine bestimmte Uebertragungsleistung benötigte treibende Temperaturdifferenz bestimmt massgeblich die exergetische Qualität von energietechnischen Anlagen; diese Eigenschaft ist vor allem im Zusammenhang mit der Abwärmenutzung (Pinch Point Technik) und der Umgebungswärmenutzung wichtig. Beim Transport der Fluide durch den Wärmetauscher wird unerwünschterweise Strömungs- in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Dissipationsenergie muss durch Pumpen oder vorgelagerte Maschinen (z. B. Verbrennungsmotoren) in Form von Arbeit aufgebracht werden.

Während des Betriebes verschmutzen Wärmetauscher je nach Einsatzgebiet, Bauart, Auslegung und Betriebsweise unterschiedlich schnell. Dabei ist es schwierig, für den einzelnen Fall den zeitlichen Verlauf dieser Verschmutzung – oder allgemeiner ausgedrückt Abnutzung – ohne Kenntnis der effektiven Betriebszustände vorherzusagen. Die Abnutzung vermindert die Prozessqualität eines Wärmetauschers mit der Zeit. Je nach Ausmass kann er seine Aufgabe nicht mehr oder nur noch zu übermässigen Kosten erfüllen und dabei andere Anlageteile beeinträchtigen. Aus diesen Gründen ist es wichtig, den aktuellen Zustand von Wärmetauschern zu überwachen und mit den Auslegungseigenschaften zu vergleichen.

Werden Wärmetauscher überwacht, bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Instandhaltung zu organisieren (Figur 1.1). Eine oft nicht bewusst gewählte Strategie besteht darin, erst bei Funktionsuntüchtigkeit des Wärmetauschers und dem Ausfall der Anlage einzugreifen (Punkt A). Als Gegensatz dazu kann als konservative Methode die vorbeugen-

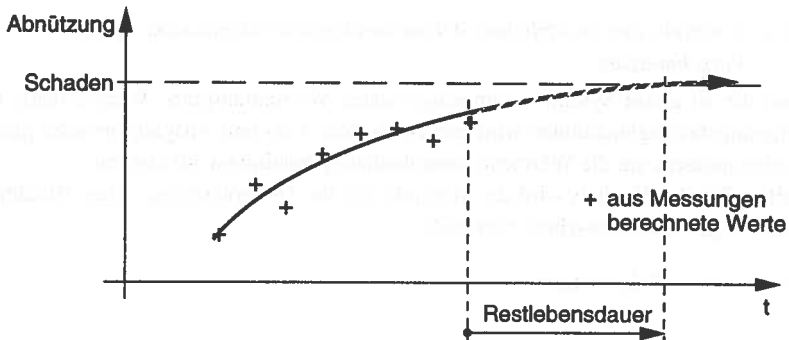
de Instandsetzung angeordnet werden (Punkt B). Im Rahmen einer dritten Strategie kann die Instandsetzung je nach individuellem Zustand des Wärmetauschers erfolgen (Punkt C).



Figur 1.1: Einfluss der Instandhaltungsstrategien auf den Instandsetzungszeitpunkt. Die Unsicherheit des individuellen Abnutzungsverlaufes wird durch die schraffierte Fläche dargestellt.

In der Energie- und Haustechnik mit ausgeprägten jahres- und tageszeitlichen Nachfragezyklen ist die ausfallbedingte Instandhaltung aus Gründen der Versorgungssicherheit und der Ausfall-Folgekosten nicht zweckmässig. Die oft angewandte vorbeugende Instandhaltung ist bei Wärmetauschern ebenfalls unwirtschaftlich, da die Abnutzung je nach Anlage unterschiedlich schnell fortschreitet und daher in vielen Fällen aus Unkenntnis über den aktuellen Zustand unnötige Arbeiten ausgeführt würden.

Für Wärmetauscher ist meistens die zustandsorientierte Instandhaltung die geeignete Strategie. Sie ermöglicht es, die Instandsetzungsmassnahmen so zu planen, dass die Anlagen dann, wenn sie am dringendsten gebraucht werden, zur Verfügung stehen und trotzdem nicht unnötig früh instandgesetzt werden müssen. Der Instandsetzungszeitpunkt kann zudem auf die Wartungsintervalle anderer Komponenten, die personellen Möglichkeiten der Instandhaltungsorganisation und die Arbeitswegminimierung im Falle der Instandsetzung mehrerer Anlagen in der gleichen Region abgestimmt werden. Die Verwirklichung dieser Strategie bedingt jedoch die Kenntnis des momentanen Wärmetauscherzustandes und die Vorhersage der verbleibenden Betriebszeit bis zu einem Anlageausfall, der Restlebensdauer (Figur 1.2).



Figur 1.2: Berechnung der Restlebensdauer mit Hilfe der Abnutzungsprädiktion

1.2 Gewähltes Vorgehen

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen für die zustandsorientierte Instandhaltung von Wärmetauschern (Rekuperatoren) ausgearbeitet, einerseits die Ermittlung der momentanen Abnutzung aus der Messung von Ein- und Ausgangsgrößen und andererseits die Prädiktion des Abnutzungsverlaufes zur anschließenden Berechnung der Restlebensdauer. Bei der Prädiktion des Abnutzungsverlaufes wird das bekannte Abnutzungsverhalten der Wärmetauscher berücksichtigt.

1.3 Gliederung

Kapitel 2. Abnutzungsprädiktion

In diesem Kapitel werden Aspekte zur Wahl der geeigneten Instandhaltungsstrategie und die Voraussetzungen für die zustandsorientierte Instandhaltung behandelt. Anforderungen, welche eine Abnutzungsprädiktionsmethode erfüllen muss, werden aufgelistet. Verschiedene Methoden zur Erfassung und zur Prädiktion werden vorgestellt und bewertet. Die im ersten Teil des Kapitels allgemein gehaltenen Ausführungen werden im zweiten Teil auf Wärmetauscher angewandt.

Einige Begriffe der Abnutzungsprädiktion sind im Anhang ab Seite A 1 erläutert.

Kapitel 3. Modellierung des Wärmetauschers

Die Abhängigkeiten der Ausgangsgrößen von den Eingangsgrößen und vom Wärmetauscherzustand werden modelliert. Um die Abnutzung des Wärmetauschers in Kapitel 4 bestimmen zu können, werden die Einflüsse des Wärmeüberganges, der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte und der Stromführung auf die Übertragungsfaktoren detailliert untersucht.

Kapitel 4. Ermitteln des zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstandes infolge Verschmutzung

An Hand der zu einem System zusammengefassten Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen wird erörtert, welche Ein- und Ausgangsgrößen gemessen werden müssen, um die Wärmetauscherabnutzung bestimmen zu können.

Im zweiten Teil des Kapitels wird die Methode für die Ueberwachung eines Blockheizkraftwerk-Abgaswärmetauschers verwendet.

Kapitel 5. Schlussfolgerungen

2. ABNÜTZUNGSPRÄDIKTION

Die Abnutzungsprädiktion¹ ist ein Hilfsmittel zur Verwirklichung der zustandsorientierten Instandhaltung. Diese Instandhaltungsstrategie kann nur unter bestimmten Voraussetzungen angewandt werden. Die Kriterien für die Strategiewahl gelten allgemein; ebenso sind die Abnutzungsprädiktionsmethoden nicht auf den Einsatz bei der Wärmetauscherüberwachung beschränkt. Daher werden diese Themen zuerst allgemein behandelt, bevor auf die Abnutzungsprädiktion bei Wärmetauschern eingegangen wird.

2.1 Voraussetzungen für die zustandsorientierte Instandhaltung

Die Verwirklichung der zustandsorientierten Instandhaltung bedingt Kenntnisse über die Ausfallart und die Abnutzungsentwicklung².

2.1.1 Ausfallarten

Jede Maschine und Anlage beziehungsweise deren einzelne Komponenten und Teile haben ein spezifisches Ausfallverhalten. Neue Anlagen leiden häufig unter Kinderkrankheiten und fallen daher relativ häufig aus. Sind die Kinderkrankheiten kuriert, verweilt die Ausfallrate auf tiefem Niveau. In diesem Lebensabschnitt treten vor allem Zufallsausfälle auf; er kann durch spezielle Instandhaltungsmassnahmen für einzelne, sich im Verhältnis zur Anlagelebensdauer rasch abnützende Teile verlängert werden. Mit zunehmendem Alter der Anlagen steigt die Ausfallrate infolge der fortschreitenden Abnutzung der einzelnen Teile.

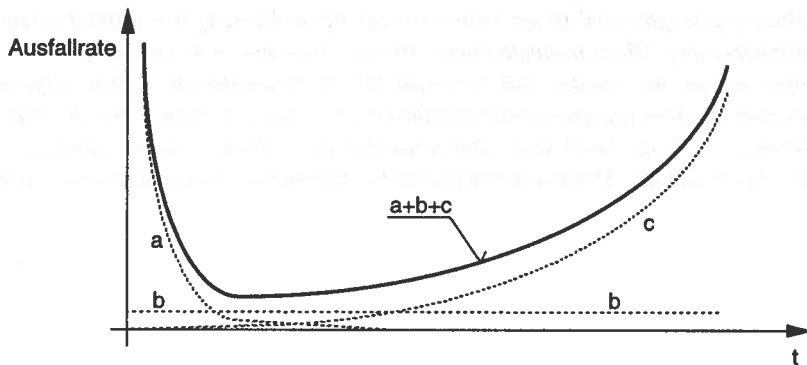
	Ausfallart	Verlauf der Ausfallrate
a	Frühausfälle	sinkend
b	Zufallsausfälle	konstant
c	Abnutzungsausfälle	steigend

Tabelle 2.1: Ausfallart – Verlauf der Ausfallrate

¹ Einige Begriffe der Abnutzungsprädiktion werden im Anhang ab Seite A 1 erläutert.

² Kraus (1981) diskutiert alle Aspekte, welche bei der Instandhaltungsstrategieplanung zu berücksichtigen sind.

Werden die drei Ausfallarten überlagert, entsteht die charakteristische Kurve in Figur 2.1 (Jäger, 1981; Gericke und Schulz, 1981). Sie ist typisch für das Verhalten von Maschinen und Anlagen.



Figur 2.1: Typisches Ausfallverhalten als Überlagerung von a Früh-, b Zufalls- und c Abnutzungsausfällen

2.1.2 Einfluss der Ausfallrate auf die Wahl der Instandhaltungsstrategie

Die Wahl der Instandhaltungsstrategie und der Überwachungsmaßnahmen wird wesentlich durch den zeitlichen Verlauf der Ausfallrate beeinflusst.

Durch Frühausfälle verursachte Störungen lassen sich nicht vorhersagen, da sie nicht durch den normalen Lebenszyklus der Anlage bedingt sind, sondern oft durch Fabrikationsfehler einzelner Teile oder Konstruktions- und Montagefehler. Komponenten, welche eine sinkende Ausfallrate haben, werden daher ausfallbedingt instandgesetzt.

Treten Störungen hauptsächlich zufällig auf, muss die für diesen Anlagenteil zuständige Instandhaltungsstelle auf ausfallbedingte Instandsetzungseinsätze vorbereitet sein.

Für Komponenten mit steigender Ausfallrate ist die vorbeugende oder die zustandsorientierte Instandhaltung angebracht. Sofern der künftige Abnutzungsverlauf genügend genau bekannt oder berechenbar ist, kann die Abnutzung vorhergesagt, die Restlebensdauer berechnet und die zustandsorientierte Instandhaltung verwirklicht werden. Ist dies nicht der Fall, muss die vorbeugende oder allenfalls die ausfallbedingte Instandhaltungsstrategie gewählt werden.

Über den Einsatz der Abnutzungsprädiktion, respektive der zustandsorientierten Instandhaltung, entscheiden technische und ökonomische Randbedingungen.

<i>Ausfallrate</i>	<i>Instandhaltungsstrategie</i>	<i>Ueberwachung / Diagnose</i>
sinkend	ausfallbedingte Instandhaltung	Störungsdiagnose
konstant	ausfallbedingte Instandhaltung	Störungsdiagnose
steigend	vorbeugende Instandhaltung oder zustandsorientierte Instandhaltung	Abnutzungsprädiktion grundsätzlich geeignet, zusätzliches Kriterium Abnutzungsverhalten Tabelle 2.3

Tabelle 2.2: Wahl der Instandhaltungsstrategie in Abhängigkeit der Ausfallrate

2.1.3 Abnutzungsverhalten

Auch bei steigender Ausfallrate kann nicht in jedem Fall mit Hilfe der Abnutzungsprädiktion zustandsorientiert instandgehalten werden. Damit die Abnutzung vorhergesagt und die entsprechende Komponente zustandsorientiert instandgesetzt werden kann, muss der Abnutzungsverlauf bekannt oder berechenbar sein. Ist der Abnutzungsverlauf aus der Betriebszeit und den Betriebsbedingungen errechenbar, erübrigt sich die Zustandsüberwachung.

<i>Abnutzungsverhalten</i>	<i>Instandhaltungsstrategie</i>	<i>Ueberwachung</i>
genau bekannt	zustandsorientierte Instandhaltung	Abnutzungsprädiktion ohne Zustandsüberwachung
bekannt, mit Streuung	zustandsorientierte Instandhaltung je nach Prädiktionsgenauigkeit sinnvoll	Zustandsüberwachung mit oder ohne Abnutzungsprädiktion je nach Prädiktionsgenauigkeit
unbekannt	Instandhaltungsstrategie muss durch andere Kriterien bestimmt werden	Zustandsüberwachung

Tabelle 2.3: Wahl der Instandhaltungsstrategie bei steigender Ausfallrate

Je weniger der Abnutzungsverlauf zwischen den einzelnen Teilen und Komponenten variiert, desto steiler ist die rechte Kurvenflanke der Ausfallrate in Figur 2.1. Die Unsicherheit des individuellen Verlaufes wird auch durch die schraffierte Fläche in Figur 1.1 dargestellt.

2.2 Anforderungen an die Abnutzungsprädiktionsmethode

Die Abnutzungsprädiktionsmethode muss unabhängig von der Abnutzungsart folgende, zum Teil gegenläufige Anforderungen erfüllen:

a) Vergleichbarkeit

Die Prädiktion soll komponentenunabhängig sein; das heisst, dass die Abnutzungsgrößen bestimmter Komponenten unterschiedlicher Baugrösse aber gleicher Bauart direkt miteinander vergleichbar sein sollen. Wenn möglich soll die Abnutzungsgrösse auch bauartunabhängig sein, also für alle Apparate eines bestimmten Verwendungszweckes angewendet werden können (z. B. Kreuz- und Gegenstromabgaswärmetauscher). Auf diese Weise können die Abnutzungsgrenzwerte mit allgemeingültigen Kriterien festgelegt werden.

b) Erfahrung in Prädiktion mit einbeziehen

Durch die Ueberwachung beziehungsweise die Instandsetzung lassen sich Erfahrungen über das Langzeitverhalten gewinnen. Die Prädiktionsmethode soll diese und bereits in der Literatur dokumentierte Erfahrungen mit einbeziehen.

Vorhandene Erfahrung liegt meist in Form von empirischen und halbempirischen Gesetzen vor, welche die Zusammenhänge zwischen Belastung, Betriebspunkt, Einschalthäufigkeit etc. in Bezug auf die Abnutzung beschreiben.

c) Empfindlichkeit, Robustheit

Die Prädiktionsmethode muss einerseits sensitiv gegenüber übermässiger Abnutzung sein, um in dieser Situation im Sinne der Störungsdetektion verwendet zu werden; andererseits muss sie gegenüber einzelnen Fehlmessungen unempfindlich sein. Auch bezüglich Parameteränderungen, welche durch einen veränderten Betriebspunkt bedingt sind, muss die Methode robust sein.

d) Geringer Mess-, Datenerfassungs- und Datenübertragungsaufwand

Die Methode soll mit wenigen, kostengünstigen Sensoren auskommen.

Bei der Beurteilung von Lösungen bezüglich dieser Anforderung ist zu berücksichtigen, dass in manchen Fällen ein teurer Sensor durch mehrere günstige ersetzt werden kann. Weiter ist zu beachten, dass die Vertrauenswürdigkeit eines einzelnen Sensors beim Einsatz mehrerer Sensoren einfacher geprüft werden kann als beim Einsatz eines einzelnen, und dass beim Ausfall eines Sensors von mehreren eine reduzierte Ueberwachung oft noch möglich ist.

Die Messungen sollen mit niedriger Frequenz erfolgen, damit an die Datenakquisition keine besonderen Anforderungen gestellt werden müssen.

Damit die zu übertragende Datenmenge klein bleibt, sollen nur wenige, dafür aber aussagekräftige Grössen übermittelt werden müssen.

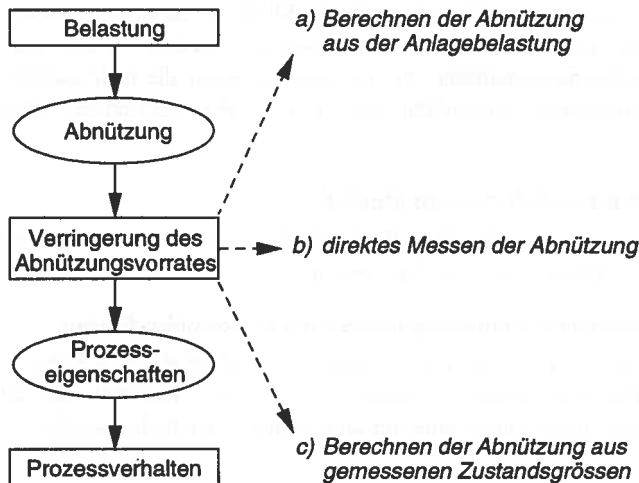
e) Kleiner Rechen- und Speicheraufwand

Die Berechnungen für die Abnutzungsprädiktion und Restlebensdauer dürfen im Vergleich zur Störungsdetektion und -diagnose viel Rechenzeit in Anspruch nehmen, da eine Anlage permanent auf Störungen überwacht werden muss, die Restlebensdauer aber nur sporadisch zu berechnen ist. Sind mit einem Rechner jedoch viele Anlagen respektive Komponenten zu überwachen, sind die Rechenzeiten auch bei der Abnutzungsprädiktion zu beachten.

Kurze Rechenzeiten sind somit erstrebenswert, jedoch nicht zwingend.

2.3 Methoden zur Erfassung der Abnutzung

Bevor das Abnutzungsverhalten vorhergesagt werden kann, muss der aktuelle Abnutzungszustand bestimmt werden.



Figur 2.2: Methoden zur Erfassung der Abnutzung

2.3.1 Messen der Abnutzung

Der einfachste Fall liegt vor, wenn die Abnutzung im Betrieb direkt gemessen werden kann (Figur 2.2 b). Dies ist jedoch nur in Ausnahmefällen möglich. Bei Wärmetauschern zum Beispiel müsste ein für die gesamte Wärmeübertragungsfläche repräsentativer Wärmedurchgangswiderstand gemessen werden können.

2.3.2 Berechnen der Abnutzung aus gemessenen Zustandsgrößen

Als Prozessgrößen können zum Beispiel Temperaturen, Drücke und Massenströme gemessen werden. Mit Hilfe physikalischer Modelle werden aus diesen gemessenen Größen Abnutzungsgrößen berechnet (Figur 2.2 c). Dies setzt die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Mess- und Abnutzungsgrößen voraus. Wird eine Anlage oder ein Apparat bei verschiedenen Betriebspunkten verwendet, ist die Kenntnis der erwähnten Zusammenhänge besonders wichtig, um die Betriebspunkteinflüsse berücksichtigen zu können.

2.3.3 Berechnen der Abnutzung aus der Anlagebelastung

Die Berechnung der Abnutzung aus der Anlagebelastung ist von den Abnutzungserfassungsmethoden meist die kostengünstigste (Figur 2.2 a). Diese Methode bedingt jedoch die genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Anlagebelastung und Abnutzung.

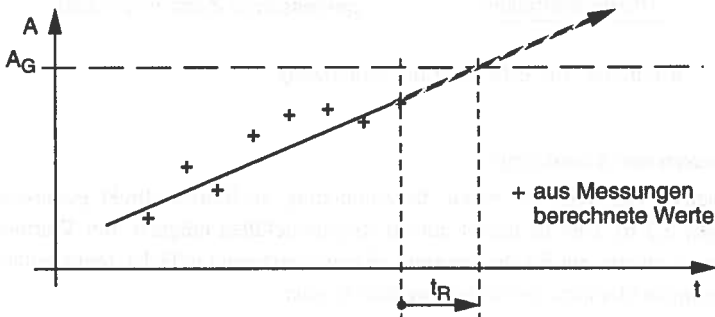
Das Berechnen der Abnutzung aus der Anlagebelastung ist zur Beurteilung mechanisch beanspruchter Bauteile oft die einzig mögliche Methode, da die Abnutzung meist weder direkt gemessen, noch aus der Istzustandserfassung berechnet werden kann. Man muss sich bei dieser Beanspruchungsart auf Versuche verlassen, die nicht speziell für die beobachteten Komponenten durchgeführt wurden (z. B. Wechselfestigkeit unter thermischer Belastung).

2.4 Abnutzungsprädiktionsmethoden

Die Prädiktion der Abnutzung über die Zeit lässt sich mit verschiedenen Methoden verwirklichen. Im Folgenden werden drei Grundtypen vorgestellt und bewertet.

2.4.1 Prädiktion ohne Abnutzungsmodelle mit Istzustandserfassung

Ist das zeitliche Abnutzungsverhalten a priori nicht bekannt, dann können Istzustandsgrößen des Prozesses erfasst, die momentane Abnutzung berechnet und auf Grund der zuvor ermittelten Werte mittels eines linearen Modells extrapoliert werden.



Figur 2.3: Abnutzungsprädiktion mit linearem Modell und Istzustandserfassung

Im Falle abnehmender Abnutzung wird mit dieser Prädiktionsart die verbleibende Lebensdauer t_R bis zum Ueberschreiten der Abnutzungsgrenze A_G unterschätzt, im Falle zunehmender Abnutzung überschätzt.

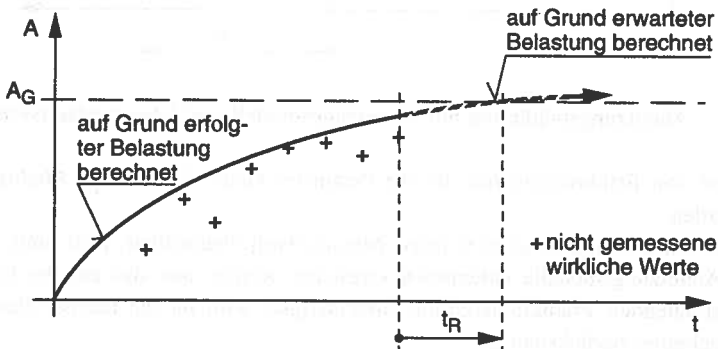
Die Methode ist gegenüber einzelnen Fehlmessungen unempfindlich; plötzliche Trendänderungen kann sie jedoch nicht detektieren.

Der letztgenannte Nachteil lässt sich vermeiden, wenn mit einem gleitenden Zeitfenster nur die neuesten Messungen berücksichtigt werden. Mit diesem Vorgehen wird die Methode jedoch gegenüber Mess- und Betriebspunktumrechnungsfehlern wieder empfindlicher.

2.4.2 Prädiktion mit Abnutzungsmodellen ohne Istzustandserfassung

Für die Auslegung von Maschinenteilen werden oft Abnutzungsmodelle verwendet, welche Einflüsse wie mechanische Belastung, Betriebstemperatur, Anfahrzyklen etc. berücksichtigen.

Bei der Dimensionierung von Maschinenteilen muss von einem hypothetischen Betrieb ausgegangen werden. Bei der Abnutzungsprädiktion hingegen kann der effektiv erfolgte Betrieb als Randbedingung für das Auslegungsmodell (evtl. Simulationsmodell) verwendet werden, um die bereits erfolgte Abnutzung zu berechnen. Für die Abnutzungsprädiktion wird mit dem in der Prädiktionsperiode erwarteten Betrieb gerechnet.



Figur 2.4: Abnutzungsprädiktion mit Abnutzungsmodell ohne Istzustandserfassung

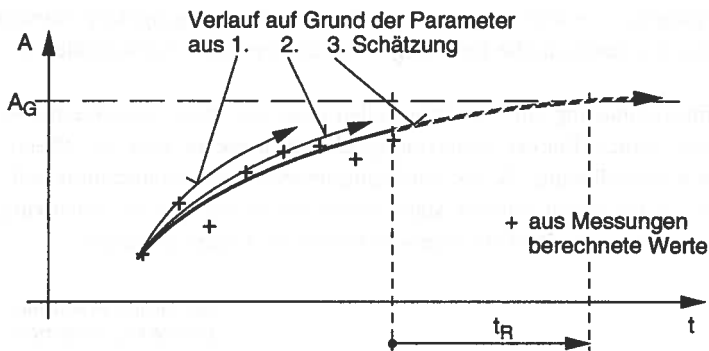
Diese Methode ist für all jene Fälle geeignet, bei denen die Abnutzung oder der Zustand nur mit grossem Aufwand erfasst werden kann, respektive das Abnutzungsverhalten in Bezug auf den Betrieb genau bekannt ist und nur wenig streut.

Die Methode basiert ausschliesslich auf Erfahrung. Da bei der Auslegung konservative, die Abnutzung überschätzende Ansätze verwendet werden, wird die Restlebensdauer tendenziell unterschätzt.

2.4.3 Prädiktion mit Abnutzungsmodellen und Istzustandserfassung

Wenn das Abnutzungsverhalten im Prinzip bekannt und in Form von Modellen formuliert ist, können mit Hilfe der Istzustandserfassung die Abnutzungsmodellparameter geschätzt werden. Der weitere Abnutzungsverlauf wird auf dieser Grundlage extrapoliert.

Die Parameter lassen sich mit zunehmendem Komponentenalter exakter schätzen und die Restlebensdauer zuverlässiger berechnen.



Figur 2.5: Abnutzungsprädiktion mit Abnutzungsmodell und Istzustandserfassung

Auf Grund von Erfahrungswerten für die Parameter kann übermässige Abnutzung erkannt werden.

Die Prädiktionsgenauigkeit ist nach jedem Messintervall überprüfbar. Falls nötig, können mehrere Abnutzungsmodelle miteinander verglichen werden und das aus der Erfahrung der vorhergehenden Prädiktionsschritte zuverlässigste wird für die nächste Restlebensdauerberechnung berücksichtigt.

Diese Methode ist auf grosse Streuung des Abnutzungsverhaltens einzelner Komponenten unempfindlich.

2.5 Abnutzungsprädiktion Wärmetauscher

Bei Wärmetauschern sind für die Abnutzungsprädiktion zwei Aspekte von besonderem Interesse:

- Wärmeübertragungsexergieverluste, welche durch die Temperaturdifferenz zwischen den wärmetragenden Medien verursacht werden und

- Strömungsexergieverluste, welche beim Durchfließen der Medien durch die Wärmetauscher entstehen.

Eine erhöhte Temperaturdifferenz zwischen den wärmetragenden Medien verursacht neben zusätzlichen Exergie- auch zusätzliche Energieverluste, falls die Restwärme an die Umgebung abgegeben werden muss und nicht weiter verwendet werden kann.

Für die Zustandsüberwachung sind zusätzlich zu berücksichtigen:

- Leckage zwischen den Medien sowie
- Wärmeenergieverluste und Leckage der Wärmetauscher gegen aussen.

2.5.1 Wärmeübertragungsexergieverluste

Im Laufe der Betriebszeit können die wärmetübertragenden Flächen abgenutzt respektive verschmutzt werden, dies erhöht den Wärmedurchgangswiderstand und reduziert in gewissen Fällen die Uebertragungsfläche. Die Vorgänge, welche den Wärmedurchgangswiderstand erhöhen, werden oft unter dem Begriff "Fouling" zusammengefasst.

Die Abnützung oder das Fouling umfasst folgende Mechanismen (Schnell, 1988)::

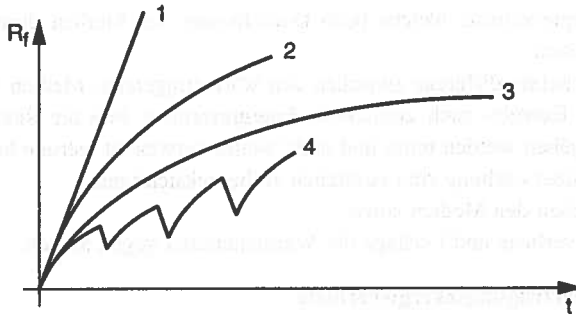
- Kristallisation
- Sedimentation
- Chemische Reaktion, Korrosion
- Biologisches Wachstum

Ob ein Wärmetauscher so stark abgenutzt wird, dass er periodisch instandgesetzt werden muss und wie die Abnützung zeitlich verläuft, hängt von diversen Bedingungen ab. Wichtige Einflüsse sind:

- chemische Zusammensetzung der wärmetragenden Medien
- Temperatur der Medien
- Strömungsgeschwindigkeit der Medien
- Homogenität der Strömung
- Oberflächenbeschaffenheit der wärmetübertragenden Flächen

Zur Verschmutzung von Wärmetauschern gibt es zahlreiche Untersuchungen, deren Resultate in Form von analytischen Modellen festgehalten sind. Diese Modelle erlauben noch keine genügend exakte Voraussage des Verschmutzungsverlaufes eines einzelnen Wärmetauschers.

Generell werden vier zeitliche Verschmutzungsverläufe unterschieden (z. B. Schnell, 1988):



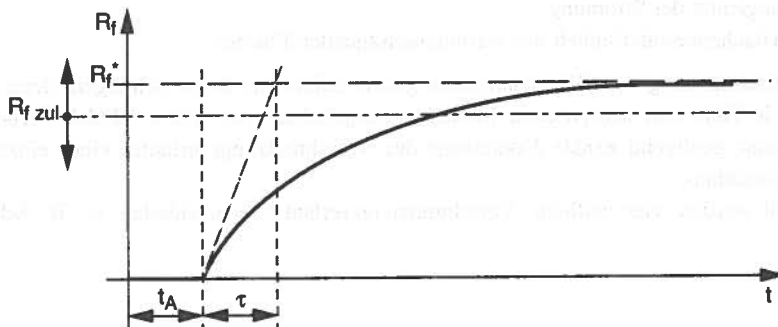
Figur 2.6: Verschmutzungsverlauf: 1 linear, 2 fallend, 3 asymptotisch, 4 sägezahnförmig

Gemäss Schnell (1988) können der lineare und fallende Verschmutzungsverlauf allgemein als Frühformen des asymptotischen Verlaufes betrachtet werden. Darum wird für die Abnutzungsprädiktion das verschiedentlich vorgeschlagene und auch validierte (z. B. Krause, 1986) Abnutzungsmodell nach Gl. 2.1 verwendet:

$$R_f = R_f^* \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_A}{\tau}}\right) \quad |t \geq t_A \quad R_f = 0 \quad |0 \leq t < t_A$$

Gl. 2.1

Figur 2.7 zeigt den charakteristischen Verlauf des zusätzlich durch Fouling verursachten Wärmedurchgangswiderstandes R_f in Funktion der Zeit, unter der Annahme, dass die zuvor aufgezählten Einflüsse – insbesondere die Strömungsgeschwindigkeit – im Mittel (z. B. über 100 Betriebsstunden) konstant gehalten werden.



Figur 2.7: Charakteristischer Verlauf des zusätzlich durch Fouling verursachten Wärmedurchgangswiderstandes R_f (Gl. 2.1)

Je nach der Auslegung und den Betriebsbedingungen des Wärmetauschers wird eine Betriebsphase mit konstantem Wärmedurchgangswiderstand erreicht, während der die Wärmeübertragungsexergieverluste, respektive der Wärmedurchgangswiderstand nicht mehr weiter zunehmen. Bleiben die Verluste in einem bestimmten Mass, muss der Wärmetauscher nie gereinigt werden. Oft wird diese Betriebsphase zwar nicht erreicht, aber zumindest ist eine Reinigung oft viel später notwendig als zunächst vermutet, da die Abnutzungsgeschwindigkeit mit der Lebensdauer abnimmt.

2.5.2 Strömungsexergieverluste

Die Ursachen für Strömungsexergieverluste sind Fouling, wie bereits beschrieben, und Verstopfen einzelner Rohre oder Platten durch grosse Partikel, welche entweder im Wärmetauscher selber abgelöst oder mit der Strömung aus anderen Anlageteilen in den Wärmetauscher transportiert werden.

Strömungsexergieverluste sind einerseits wegen des erhöhten Energieverbrauches von Förderpumpen schädlich, andererseits werden der Massenstrom und die Strömungsgeschwindigkeit kleiner, so dass sich die Wärmeübertragungsleistung verringert und die Exergieverluste der Wärmeübertragung erhöhen. Zudem verursacht ein erhöhter Abgasgegendruck bei Verbrennungsmotoren übermässige Abnutzung.

2.5.3 Leckage zwischen den Medien

Sind die Medien nicht mehr voneinander getrennt, wird – sofern die Anlage nicht sofort ausfällt – der Wärmedurchgangskoeffizient mit zunehmendem Stoffaustausch scheinbar grösser.

Leckageursachen können die mechanische Beanspruchung, Korrosion oder Erosion der Wärmetauscherwände und Schweissnähte sein.

2.5.4 Wärmeenergieverluste und Leckage gegen aussen

Wärmeenergieverluste gegen aussen können durch gealterte Isolation, durch Kondenswasser in der Isolation oder durch fehlerhafte Isolationsmontage nach Instandsetzungsmassnahmen verursacht werden. Die Leckage, vor allem jene von Flüssigkeiten, schädigt die Isolation stark.

2.5.5 Gewählte Ueberwachungsprinzipien für Wärmetauscher

Wärmeübertragungsexergieverluste

Für die Prädiktion der Wärmeübertragungsexergieverluste ist die Kombination des Abnutzungsmodells Gl. 2.1 mit der Prädiktionsmethode "Abnutzungsmodell mit Istzustandserfassung" Kapitel 2.4.3 geeignet.

Die Ueberwachung soll auf der Messung von Ein- und Ausgangsgrössen des Wärmetauschers basieren, da nur in Ausnahmefällen eine direkte Messung des Fouling wirtschaft-

lich vertretbar ist. Aus den Ein- und Ausgangsgrössen wird der zusätzlich durch Fouling verursachten Wärmedurchgangswiderstand R_f respektive R_f/A ermittelt. Die letztgenannte Grösse berücksichtigt den Umstand, dass es von aussen nicht möglich ist, zwischen einer Zunahme von R_f und einer Abnahme der wärmeübertragenden Fläche A zu unterscheiden.

Es muss speziell berücksichtigt werden, dass der Wärmedurchgangswiderstand von den

- Strömungsgeschwindigkeiten und den
- Temperaturen der Fluide abhängt.

Um den zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand bestimmen zu können, müssen die erwähnten Einflüsse rechnerisch kompensiert werden oder die Messungen müssen immer unter den gleichen, genau definierten Bedingungen erfolgen. Diese Bedingungen können entweder in einem stationären Betriebspunkt definiert sein oder sie können auch definierte instationäre Abläufe umfassen.

Im folgenden wird davon ausgegangen, dass genau definierte Bedingungen nicht genau eingehalten, und die Einflüsse rechnerisch kompensiert werden.

Vergleich mit den Anforderungen Kapitel 2.2 Seite 8:

Mit dem gewählten Vorgehen, werden die Anforderungen a, b und c erfüllt. Die Vergleichbarkeit wird durch den die Erfahrungen über das Foulingverhalten einbeziehenden Modellansatz gewährleistet. Durch die Abnützungsprädiktion mit Abnützungsmodell wird der Einfluss der Ungenauigkeit der einzelnen Messung auf das Prädiktionsresultat reduziert. Unerwartete Messresultate müssen jedoch mit regelbasierten Methoden beurteilt werden, um Leckage zwischen den Medien oder Wärmeenergieverluste und Leckage gegen aussen möglichst rasch zu erkennen.

Das Erfüllen der Anforderung d nach wenigen und kostengünstigen Sensoren hängt davon ab, ob ein Massenstrom gemessen werden muss oder nicht (Kapitel 4.1.1 Seite 62).

Je genauer die Resultate sein sollen, desto schlechter werden die Forderungen nach kleinem Messdatenerfassungs- und Rechenaufwand erfüllt.

Strömungsexergieverluste

Die Strömungsexergieverluste werden am besten durch Erfassen des Förderpumpenenergieverbrauches oder Messen des Abgasgedruckes überwacht. Bei beiden Methoden ist die Massenstromabhängigkeit des Energieverbrauches respektive der Druckverluste zu berücksichtigen.

Kann der Energieverbrauch ohne grossen Zusatzaufwand der einzelnen Förderpumpe zugewiesen werden, sind alle Anforderungen a bis e Kapitel 2.2 Seite 8 erfüllt.

Leckage zwischen den Medien

Für die Detektion dieses Fehlers ist, falls die Anlage überhaupt noch weiter betrieben werden kann, im Vergleich zum Fouling keine spezielle Methode notwendig. Ein regelbasierter Teil der Ueberwachung kann dieses Phänomen detektieren.

Wärmeenergieverluste und Leckage gegen aussen

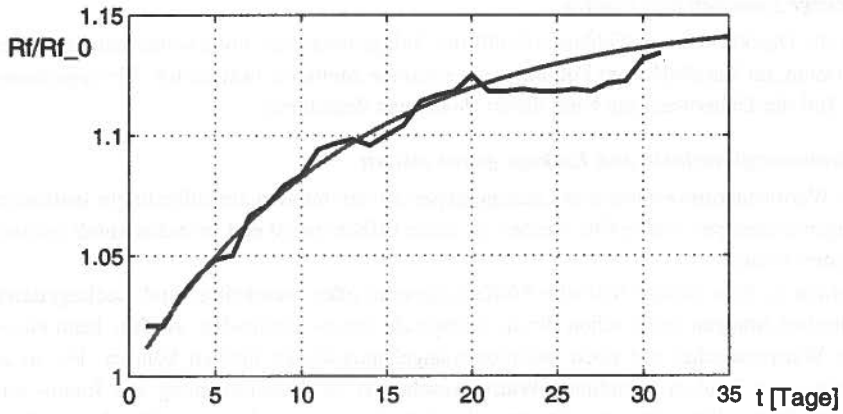
Für Wärmeenergieverluste und Leckage gegen aussen müssen ausfallbedingte Instandsetzungsmassnahmen vorbereitet werden, da diese Effekte meist erst im Schadenfall entdeckt werden können.

Werden in einer Anlage toxische Stoffe eingesetzt oder verarbeitet, sind Leckagedetektionseinrichtungen meist schon für die Anlage als ganzes vorhanden, so dass beim einzelnen Wärmetauscher nur noch Isolationsmängel unentdeckt bleiben können. Für in geschlossenen Räumen installierte Wärmetauscher ist die Ueberwachung der Raum- oder unmittelbaren Umgebungstemperatur die einfachste Massnahme zur Detektion dieses Fehlers. Da Fehler anderer Anlageteile ähnliche Auswirkungen auf die Raum- oder Umgebungstemperatur haben können, ist mit dieser Methode eine Ueberwachung mit dem Ziel der Abnutzungsprädiktion nicht möglich.

Für im Freien installierte Wärmetauscher sind visuelle Inspektionen und die Kontrolle der Wärmebilanzen notwendig.

2.5.6 Praktische Anwendung

Das Abnutzungsmodell Gl. 2.1 ist in ein Ueberwachungssystem eingebaut worden, welches in der industriellen Praxis verwendet wird. Die Modellparameter werden nach einem Programmablaufplan von Krause (1986) berechnet. Figur 2.8 zeigt den Verlauf des Verhältnisses von Wärmedurchgangswiderstand infolge Fouling zu Wärmeübertragungsfläche R/A eines Blockheizkraftwerk-Abgaswärmetauschers.



Figur 2.8: R_f/A -Verlauf eines Abgaswärmetauschers

Bei der Instandsetzung des Wärmetauschers zeigte sich, dass die R_f/A -Erhöhung nicht wie vermutet durch Fouling verursacht wurde, sondern durch eine nach und nach zerstörte innere Dichtungslippe. Dies führte zu einer abnehmenden Nutzung der wärmeübertragenden Fläche. Trotz der unerwarteten Abnutzungsursache und der ungewöhnlich schnellen Abnutzung ermöglichte das Abnutzungsmodell die Berechnung der Restlebensdauer und damit eine geplante, zustandsorientierte Instandsetzung (der Wärmetauscher wurde bei konstanten Betriebsbedingungen eingesetzt, die Überwachung erfolgte durch Messen der Ein- und Ausgangstemperaturen).

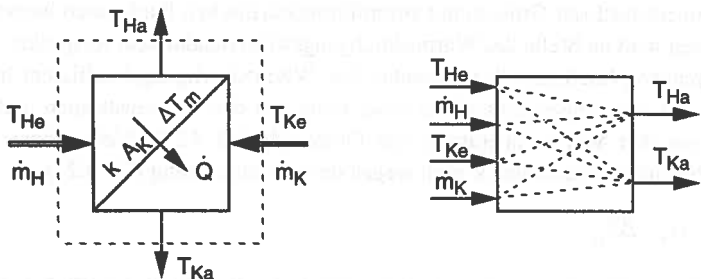
3. MODELLIERUNG DES WÄRMETAUSCHERS

Die Modellierung des Wärmetauschers wird für die Ermittlung der in Kapitel 4 beschriebenen momentanen Abnützung benötigt. Die Modellierung dient insbesondere der Unterscheidung zwischen Betriebspunkt- und Abnützungseinflüssen und erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Beziehungen zwischen stationären Ausgangssignalen und konstanten Eingangssignalen beschrieben (statisches Uebertragungsverhalten) und ihre Sensitivität bezüglich der Temperatur- und Massenstromabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten, der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte sowie der Stromführung untersucht. Anschliessend wird das dynamische Verhalten modelliert.

3.1 Grundlegende Zusammenhänge

Vorgaben

Die Ueberwachung des Wärmetauschers soll von aussen an den Schnittstellen zu seiner Umgebung erfolgen. Es wird angenommen, dass er von einer idealen Isolation umgeben ist. In Figur 3.1 sind die Grössen eingetragen, welche an der Systemgrenze gemessen werden können. Dies sind als Eingangsgrössen des Systems die beiden Massenströme $\dot{m}_H$ und $\dot{m}_K$ sowie die Temperaturen am Eintritt T_{He} und T_{Ke} . Die Temperaturen T_{Ha} und T_{Ka} sind die Ausgangsgrössen; beide Ausgangsgrössen hängen von allen Eingangsgrössen ab.



Figur 3.1: Wärmetauscher mit Eingangsgrössen $\dot{m}_H$, $\dot{m}_K$, T_{He} , T_{Ke} und Ausgangsgrössen T_{Ha} und T_{Ka} schematisch sowie mit Wirkungszusammenhängen

3.1.1 Wärmeströme im stationären Betrieb

Im stationären Fall lässt sich aus den Ein- und Ausgangsgrößen, den Stoffwerten der Fluide sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten k , der wärmeübertragenden Fläche A_K und der mittleren Temperaturdifferenz ΔT_m der im Wärmetauscher übertragenen Wärmestrom $\dot{Q}$ berechnen.

Gl. 3.1: Das Fluid auf der heißen Seite des Wärmetauschers kühlt sich ab, seine spezifische Enthalpie verringert sich von h_{He} auf h_{Ha} . Die Enthalpieänderung kann nach Einführung einer mittleren spezifischen Wärmekapazität c_{pH} (Gl. 3.3) aus der Temperaturänderung des Fluids zwischen Ein- und Ausgang berechnet werden (Roetzel, 1988).

$$\dot{Q} = -\dot{m}_H \cdot (h_{Ha} - h_{He}) = -\dot{m}_H \cdot c_{pH} (T_{Ha} - T_{He}) \quad \text{Gl. 3.1}$$

Der vom heißen Fluid abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}$ heizt das kalte Fluid auf:

$$\dot{Q} = \dot{m}_K \cdot (h_{Ka} - h_{Ke}) = \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (T_{Ka} - T_{Ke}) \quad \text{Gl. 3.2}$$

Die Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazitäten in Gl. 3.1 und Gl. 3.2 sind:

$$c_{pH} = \frac{h_{Ha} - h_{He}}{T_{Ha} - T_{He}} \quad c_{pK} = \frac{h_{Ka} - h_{Ke}}{T_{Ka} - T_{Ke}} \quad \text{Gl. 3.3}$$

sie hängen von den Stoffwerten sowie den Ein- und Ausgangstemperaturen der jeweiligen Fluide ab.

Gl. 3.4: Im Innern des Wärmetauschers muss der Wärmestrom einen Wärmedurchgangswiderstand überwinden, dies bedingt eine treibende Temperaturdifferenz. Ueber die wärmeübertragende Fläche gemittelt, kann sie als mittlere Temperaturdifferenz ΔT_m dargestellt werden. Sie ist von der Stromführung des Wärmetauschers sowie von Ein- und Ausgangsgrößen abhängig. In Kapitel 3.2 (Gl. 3.29 und folgende) wird ΔT_m nach der Einführung dimensionsloser Größen mit stromführungstypischen Funktionen berechnet.

Im folgenden wird an Stelle des Wärmedurchgangswiderstandes sein reziproker Wert, der Wärmedurchgangskoeffizient k verwendet. Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt von allen Ein- und Ausgangsgrößen ab, in erster Linie von den Massenströmen und in zweiter Linie von den Mitteltemperaturen der Fluide (Kapitel 3.2.1). Ueber einen längeren Zeitraum betrachtet ändert sich k auch wegen der Verschmutzung (Gl. 3.21).

$$\dot{Q} = k \cdot A_K \cdot \Delta T_m \quad \text{Gl. 3.4}$$

Aus den obigen Gleichungen für den Wärmestrom $\dot{Q}$ (Gl. 3.1, Gl. 3.2, Gl. 3.4) folgen die Wärmetransport-Gl. 3.5 und die Wärmebilanz-Gl. 3.6.

$$k \cdot A_K \cdot \Delta T_m = \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (T_{Ka} - T_{Ke}) \quad \text{Gl. 3.5}$$

$$-\dot{m}_H \cdot c_{pH} \cdot (T_{Ha} - T_{He}) = \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (T_{Ka} - T_{Ke}) \quad \text{Gl. 3.6}$$

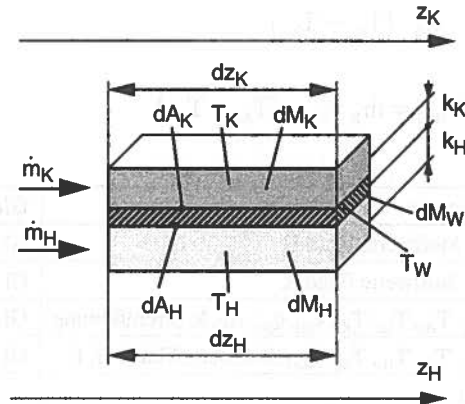
Koeffizient	Abhängig von	Gleichungen
c_{pH}	T_{He}, T_{Ha} , Stoffwerte Fluid H	Gl. 3.3
c_{pK}	T_{Ke}, T_{Ka} , Stoffwerte Fluid K	Gl. 3.3
$\Delta T_m / \Theta$	$\dot{m}_H, \dot{m}_K, T_{He}, T_{Ke}, T_{Ka}, c_{pH}, c_{pK}, A_K, k$, Stromführung	Gl. 3.29 ff., Gl. 3.59 ff.
k	$\dot{m}_H, \dot{m}_K, T_{He}, T_{Ha}, T_{Ke}, T_{Ka}$, Stoffwerte Fluide H, K	Gl. 3.21, Gl. 3.38 ff.
A_K	konstant	

Tabelle 3.1: Abhängigkeit der Koeffizienten Gl. 3.5 und Gl. 3.6

Ausser A_K sind alle Koeffizienten der Gl. 3.5 und der Gl. 3.6 Funktionen aller Eingangsgrößen, da sie zumindest von einer Ausgangstemperatur abhängen.

3.1.2 Wärmeströme instationär, Wärmespeicher

Um das dynamische Verhalten des Wärmetauschers modellieren zu können, müssen seine Wärmespeicherungsseigenschaften berücksichtigt werden. Grundsätzlich können drei Wärmespeicher unterschieden werden: das heiße Fluid, die Wärmetauscherwand und das kalte Fluid, wobei zu beachten ist, dass diese Wärmespeicher nicht an einem Ort konzentriert sind. Dem Ansatz von Profos (1943) folgend, wird der Wärmetauscher in infinitesimal kleine Abschnitte, wie in Figur 3.2 gezeigt, aufgeteilt.



Figur 3.2: Wärmetauscherabschnitt heißes Fluid – Wand – kaltes Fluid; die Temperaturen T_H , T_K und T_W , die Stoffwerte c_{pHz} und c_{pKz} sowie die Wärmedurchgangskoeffizienten k_H und k_K hängen von Zeit und Ort ab.

Für die Formulierung des zeitlichen Verhaltens des Wärmetauschers werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- keine Vermischung in Strömungsrichtung
- keine Wärmeleitung in Strömungsrichtung
- konstante Temperatur und Geschwindigkeit im Strömungsquerschnitt
- inkompressible Fluide
- keine Wärmeleitung längs der Wärmetauscherwände

Die Wärmedurchgangskoeffizienten k_H und k_K sind sinngemäss der Gl. 3.21 zwischen dem betreffenden Fluid und der Wandmitte definiert, sie sind Funktionen des jeweiligen Massenstromes und der lokalen Fluidtemperatur respektive des Ortes. Die Richtung der Ortskoordinaten z_H und z_K wird durch die Strömungsrichtung festgelegt.

Für die einzelnen Speicherelemente ergeben sich folgende Bilanzgleichungen (Figur 3.3):

heisses Fluid:

$$dM_H \cdot c_{pHz} \cdot \frac{\partial T_H}{\partial t} + \dot{m}_H \cdot c_{pHz} \cdot dz_H \cdot \frac{\partial T_H}{\partial z_H} = -k_H \cdot dA_H \cdot (T_H - T_W)$$

Gl. 3.7

Wand:

$$dM_W \cdot c_W \cdot \frac{\partial T_W}{\partial t} = k_H \cdot dA_H \cdot (T_H - T_W) + k_K \cdot dA_K \cdot (T_K - T_W)$$

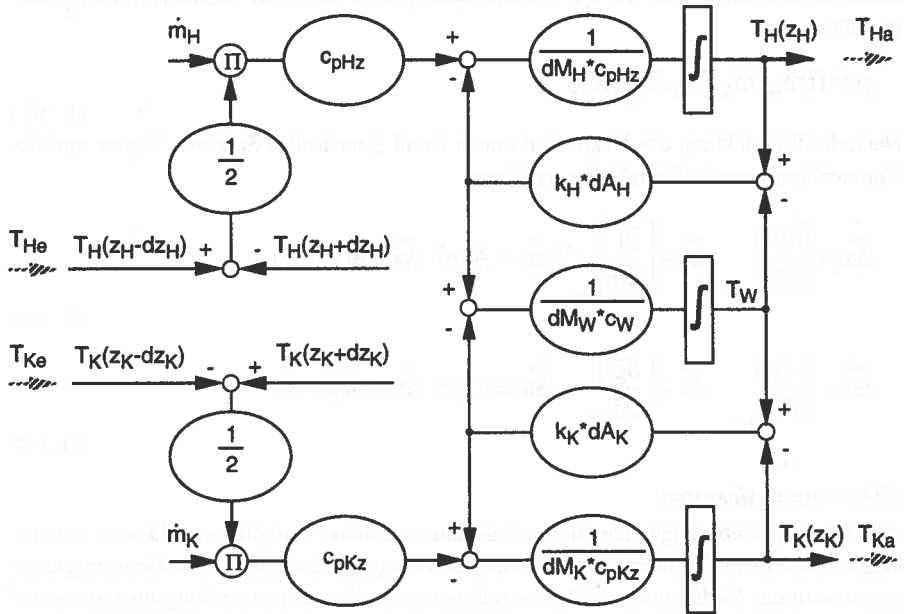
Gl. 3.8

kaltes Fluid:

$$dM_K \cdot c_{pKz} \cdot \frac{\partial T_K}{\partial t} + \dot{m}_K \cdot c_{pKz} \cdot dz_K \cdot \frac{\partial T_K}{\partial z_K} = -k_K \cdot dA_K \cdot (T_K - T_W)$$

Gl. 3.9

Aus diesen Gleichungen können Uebertragungsfunktionen auf analytischem Weg gefunden werden (Literaturhinweise siehe Kapitel 3.4.1 Seite 58f.).



Figur 3.3: Signalflussbild eines Wärmetauscherabschnittes (Gl. 3.7, Gl. 3.8, Gl. 3.9)

Zustandsgleichung des Wärmetauschers

Werden die Gl. 3.7, Gl. 3.8 und Gl. 3.9 diskretisiert, können sie in folgender Form dargestellt werden (Linearisierung gemäß Föllinger (1990) sowie Glattfelder und Schauffelberger (1995)):

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}) \quad \text{Gl. 3.10}$$

$$\vec{y} = \vec{g}(\vec{x}, \vec{u}) \quad \text{Gl. 3.11}$$

Linearisierung:

In die Zustandsdifferential-Gl. 3.10 werden anstelle von x und u die Abweichungen

$$\vec{\Delta x} = \vec{x} - \vec{x}_{p,\infty} \quad \vec{\Delta y} = \vec{y} - \vec{y}_{p,\infty} \quad \text{Gl. 3.12}$$

von einem stationären Wert eingeführt. Die Abhängigkeit der Linearisierung vom stationären Betriebspunkt und von der Verschmutzung wird mit einem Parametervektor p dargestellt.

$$p = f(\dot{m}_H, \dot{m}_K, T_{He}, T_{Ke}, R_f) \quad \text{Gl. 3.13}$$

Nach der Entwicklung der Vektorfunktionen f und g nach dem Satz von Taylor und der Vernachlässigung der Restglieder ergibt sich:

$$\vec{\Delta \dot{x}} = \left[\frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}} \right]_{p,\infty} \cdot \vec{\Delta x} + \left[\frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{u}} \right]_{p,\infty} \cdot \vec{\Delta u} = A(p) \cdot \vec{\Delta x} + B(p) \cdot \vec{\Delta u} \quad \text{Gl. 3.14}$$

$$\vec{\Delta y} = \left[\frac{\partial \vec{g}}{\partial \vec{x}} \right]_{p,\infty} \cdot \vec{\Delta x} + \left[\frac{\partial \vec{g}}{\partial \vec{u}} \right]_{p,\infty} \cdot \vec{\Delta u} = C(p) \cdot \vec{\Delta x} + D(p) \cdot \vec{\Delta u} \quad \text{Gl. 3.15}$$

Uebertragungsfaktoren

Als statisches Uebertragungsverhalten wird das stationäre Verhalten von kleinen Auslenkungen aus einem Betriebspunkt 1 in einen Betriebspunkt 2 definiert. Als Uebertragungsfaktor wird das Verhältnis zwischen resultierender Auslenkung einer Ausgangsgrösse und eingeführter Aenderung einer Eingangsgrösse bezeichnet.

Die Uebertragungsmatrix und die Uebertragungsfaktoren können aus den Gl. 3.15 und Gl. 3.18 bestimmt werden (Geering, 1994).

Uebertragungsmatrix:

$$G(s, p) = C(p) \cdot (s \cdot I - A(p))^{-1} \cdot B(p) + D(p) \quad \text{Gl. 3.16}$$

Uebertragungsfaktoren:

$$G(s=0, p) = D(p) - C(p) \cdot A^{-1}(p) \cdot B(p)$$

Gl. 3.17

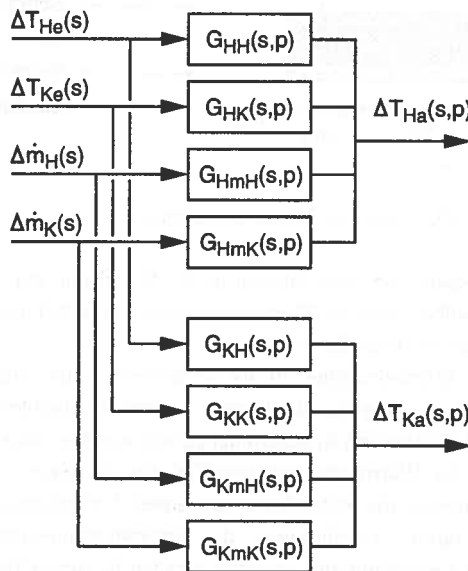
Die einzelnen Uebertragungsfaktoren sind die partiellen Ableitungen einer Ausgangsgrösse y nach einer Eingangsgrösse u .

$$G_{yu}(s=0, p) = K_{yu}(p) = \frac{\partial y}{\partial u}$$

Gl. 3.18

Uebertragungsfunktionen

Für den instationären Betrieb werden die Beziehungen zwischen den Ein- und Ausgangsgrössen durch Uebertragungsfunktionen modelliert (Figur 3.4) (Literaturhinweise zu den Uebertragungsfunktionen siehe Kapitel 3.4.2 Seite 59, konkretes Beispiel siehe Kapitel 4.3.5 Seite 70).



Figur 3.4: Abhängigkeiten der Ausgangs- von den Eingangsgrössen, betriebspunktabhängiges Kleinsignalverhalten

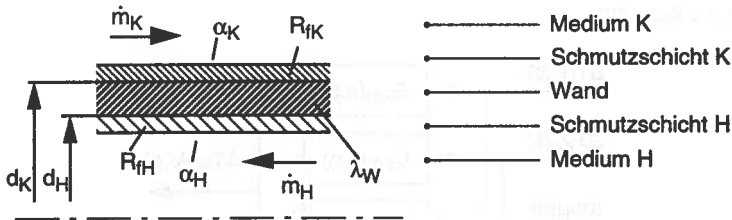
Der Figur 3.4 entsprechend, beschrieben die Gl. 3.19 und Gl. 3.20 das Kleinsignalverhalten.

$$\begin{aligned}\Delta T_{Ha}(s, p) = & G_{HH}(s, p) \cdot \Delta T_{He}(s) + G_{HK}(s, p) \cdot \Delta T_{Ke}(s) \\ & + G_{HmH}(s, p) \cdot \Delta \dot{m}_H(s) + G_{HmK}(s, p) \cdot \Delta \dot{m}_K(s)\end{aligned}\quad \text{Gl. 3.19}$$

$$\begin{aligned}\Delta T_{Ka}(s, p) = & G_{KH}(s, p) \cdot \Delta T_{He}(s) + G_{KK}(s, p) \cdot \Delta T_{Ke}(s) \\ & + G_{KmH}(s, p) \cdot \Delta \dot{m}_H(s) + G_{KmK}(s, p) \cdot \Delta \dot{m}_K(s)\end{aligned}\quad \text{Gl. 3.20}$$

3.1.3 Wärmedurchgangskoeffizient, Verschmutzung

Der Einfluss der Verschmutzung kann als Anteil des Wärmedurchgangskoeffizienten k modelliert werden:



Figur 3.5: Wärmetauscherwand mit Schmutzschichten

Nebst dem Wärmeübergang von den Medien an die Wand und dem Wärmedurchgangswiderstand der Wand selber wird der Wärmedurchgang durch Schmutzschichten, die sich an der Wand bilden können, beeinflusst.

Auf die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit der Schmutzschichten wird im weiteren nicht eingegangen. Die Schichten werden durch zwei Wärmedurchgangswiderstände, welche im folgenden zu einem Widerstand R_f zusammengefasst werden, dargestellt.

Als Bezugsflächen für die Wärmeübergangskoeffizienten α werden unabhängig von der Dicke der Schmutzschichten die Rohrwände verwendet. Veränderungen des Wärmeüberganges, welche sich durch Änderungen der Strömungsquerschnitte (Strömungsgeschwindigkeit) infolge Verschmutzung ergeben, werden R_f zugeschlagen.

Für den Wärmeübergang durch eine Rohrwand ergibt sich so aus den einzelnen Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmedurchgangswiderständen (Roetzel, 1988) (k auf A_K bezogen):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} \cdot \frac{d_K}{d_H} + \underbrace{\frac{d_K}{2 \cdot \lambda_w} \cdot \ln\left(\frac{d_K}{d_H}\right)}_{\text{Wandwiderstand d Rohr}} + \frac{1}{\alpha_K} + R_f}$$

Gl. 3.21

$$\alpha_H = (\dot{m}_H, T_{He}, T_{Ha}, \text{Stoffwerte H})$$

Gl. 3.22

$$\alpha_K = (\dot{m}_K, T_{Ke}, T_{Ka}, \text{Stoffwerte K})$$

Gl. 3.23

$$R_f = R_{fH} + R_{fK}$$

Gl. 3.24

Für eine ebene Wand ist der Wandwiderstand in Gl. 3.21 gleich der Wandstärke dividiert durch λ_w .

3.2 Statisches Uebertragungsverhalten

Für die Berechnung der Uebertragungsfaktoren müssen der Betriebspunkt des Wärmetauschers, seine Stromführung sowie sein momentaner mittlerer Wärmedurchgangswiderstand berücksichtigt werden.

Die Funktionen, welche die Zusammenhänge zwischen Stromführung, Betriebspunkt und mittlerer Temperaturdifferenz beschreiben, sind mit Hilfe dimensionsloser Kenngrößen ermittelt worden (Bosnjakovic et al, 1951). Deshalb werden die Wärmetransport-Gl. 3.5 und die Wärmebilanz-Gl. 3.6 so umgeformt, dass dimensionslose Kenngrößen entstehen und die Berechnungen zum statischen Uebertragungsverhalten mit diesen dimensionslosen Kenngrößen durchgeführt werden können. Zusätzlich werden mit diesem Vorgehen die Sensitivitätsuntersuchungen stark vereinfacht, da die zu variierende Anzahl Parameter kleiner ist als bei dimensionsbehafteten Betrachtungen.

Die Berechnungen folgen dem Ansatz von Gl. 3.18 respektive von Gl. 3.17, wobei so vorgegangen wird, dass die Stromführungsabhängigkeit erst im Schlussresultat mit drei stromführungsspezifischen Funktionen Φ_K , g_μ und g_{NTU} berücksichtigt wird (vergleiche Gl. 3.30 und Gl. 3.31 sowie Kapitel 3.2.6 Seite 35).

Nach Umformung der Wärmetransport-Gl. 3.5 und Wärmebilanz-Gl. 3.6 entstehen die dimensionslosen Kenngrößen Wärmeübertragungseinheiten NTU_K und Wärmekapazitätsstromverhältnis μ_K :

$$NTU_K = \frac{k \cdot A_K}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}} = \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{\Delta T_m} \quad \text{Gl. 3.25}$$

$$\mu_K = \frac{\dot{m}_H \cdot c_{pH}}{\dot{m}_K \cdot c_{pK}} = - \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ha} - T_{He}} \quad \text{Gl. 3.26}$$

Zusammen mit dem Austauschgrad Φ_K

$$\Phi_K = \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{He} - T_{Ke}} \quad \text{Gl. 3.27}$$

und der dimensionslosen mittleren Temperaturdifferenz Θ

$$\Theta = \frac{\Phi_K}{NTU_K} = \frac{\Delta T_m}{T_{He} - T_{Ke}} \quad \text{Gl. 3.28}$$

kann die Wärmetransport-Gl. 3.5 dimensionslos dargestellt werden:

$$\Phi_K = \Theta \cdot NTU_K \quad \text{Gl. 3.29}$$

Die dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz Θ – und somit auch der Austauschgrad Φ_K – hängen vom Betriebspunkt, welcher durch das Wärmekapazitätsstromverhältnis μ_K und die Anzahl Wärmeübertragungseinheiten NTU_K gegeben ist, sowie von der Stromführung des Wärmetauschers ab.

$$\Phi_K = f(\mu_K, NTU_K) \quad \text{Gl. 3.30}$$

Für einige sehr oft angewandte Stromführungen ist Φ_K berechnet worden (Bosnjakovic et al, 1951). Diese Funktionen werden zur Berechnung der Uebertragungsfaktoren in Kapitel 3.2.6 Seite 35 partiell nach einer der Eingangsgrößen abgeleitet; die partiellen Ableitungen des Austauschgrades Φ_K werden dabei als Summe (Kettenregel) der partiellen Ableitung von μ_K multipliziert mit einer stromführungsspezifischen Funktion g_μ und der partiellen Ableitung von NTU_K multipliziert mit einer zweiten stromführungsspezifischen Funktion g_{NTU} dargestellt (Gl. 3.31).

Zusammen mit den partiellen Ableitungen von Gl. 3.26 (Gl. 3.32) lassen sich mit der nach der Kettenregel gewonnenen Gl. 3.31 die Uebertragungsfaktoren berechnen.

In den partiell abgeleiteten Wärmetransport- und Wärmebilanzgleichungen steht das Zeichen ' für die partielle Ableitung nach einer der Eingangsgrößen (T_{He} , T_{Ke} , $\dot{m}_H$ oder $\dot{m}_K$):

$$\begin{aligned}\Phi_K(T_{He}, T_{Ke}, T_{Ka})' &= \Phi_K(\mu_K, NTU_K)' \\ &= \mu_K' \cdot g_\mu(\mu_K, NTU_K) + NTU_K' \cdot g_{NTU}(\mu_K, NTU_K)\end{aligned}\quad \text{Gl. 3.31}$$

$$\mu_K(T_{He}, T_{Ha}, T_{Ke}, T_{Ka})' = \mu_K(\dot{m}_H, \dot{m}_K, c_{pH}, c_{pK})' \quad \text{Gl. 3.32}$$

Bei den partiellen Ableitungen von NTU_K

$$NTU_K' = NTU_K \cdot \left(\frac{k'}{k} - \frac{\dot{m}_K'}{\dot{m}_K} - \frac{c_{pK}'}{c_{pK}} \right) \quad \text{Gl. 3.33}$$

werden für den Wärmedurchgangskoeffizienten k die folgenden Abhängigkeiten von den Ein- und Ausgangsgrößen berücksichtigt:

$$k = f(\dot{m}_H, \dot{m}_K, T_{Hm}, T_{Km}) \quad \text{Gl. 3.34}$$

Für die Bestimmung der Stoffwerte werden mittlere Temperaturen verwendet:

$$T_{Hm} = \frac{T_{He} + T_{Ha}}{2} \quad T_{Km} = \frac{T_{Ke} + T_{Ka}}{2} \quad \text{Gl. 3.35}$$

Bei den partiellen Ableitungen von NTU_K und μ_K

$$\mu_K' = \mu_K \cdot \left(\frac{\dot{m}_H'}{\dot{m}_H} + \frac{c_{pH}'}{c_{pH}} - \frac{\dot{m}_K'}{\dot{m}_K} - \frac{c_{pK}'}{c_{pK}} \right) \quad \text{Gl. 3.36}$$

werden für die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten die Abhängigkeiten von den Ein- und Ausgangstemperaturen beachtet:

$$c_{pH} = f(T_{He}, T_{Ha}) \quad c_{pK} = f(T_{Ke}, T_{Ka}) \quad \text{Gl. 3.37}$$

3.2.1 Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten k von den Änderungen der Eingangsgrößen

Wird eine Eingangstemperatur oder ein Massenstrom verändert, ändert sich der Wärmedurchgangskoeffizient k , da die beiden Wärmeübergangskoeffizienten α_H und α_K von der

Strömungsgeschwindigkeit und von verschiedenen Stoffgrössen abhängen, welche selber Funktionen der Temperatur sind.

Die Abhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten von den Massenströmen, Temperaturniveaus und Stoffeigenschaften lässt sich dimensionslos mit der Nusseltzahl beschreiben. Sehr oft kann der folgende Ansatz zur Berechnung der Nusseltzahl verwendet werden:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad \text{Gl. 3.38}$$

In der Literatur werden für gewisse Probleme, zum Beispiel die Querströmung um Rohrbündel (Gnielinski, 1988), nicht reine Potenzansätze vorgeschlagen. In solchen Fällen ist es für das hier gewählte Vorgehen zweckmässig, im interessierenden Bereich diese detaillierten Gleichungen mit dem Potenzansatz Gl. 3.38 zu approximieren.

Mit den Definitionen:

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l_r \quad Re = \frac{\dot{m}}{\eta} \cdot \frac{l_r}{A_Q} \quad Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad \text{Gl. 3.39}$$

erhalten wir folgende Abhängigkeit für α :

$$\alpha = c \cdot \dot{m}^m \cdot \eta^{n-m} \cdot c_p^n \cdot \lambda^{1-n} \quad \text{Gl. 3.40}$$

Die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte η , c_p und λ kann ihrerseits mit Potenzfunktionen der mittleren Fluidtemperatur dargestellt werden:

$$\eta = c_1 \cdot T_m^p \quad c_p = c_2 \cdot T_m^q \quad \lambda = c_3 \cdot T_m^r \quad \text{Gl. 3.41}$$

so dass schliesslich für α gilt:

$$\alpha = c \cdot \dot{m}^m \cdot T_m^{\overbrace{(n-m)p+nq+(1-n)r}^b} \quad b \equiv (n-m) \cdot p + n \cdot q + (1-n) \cdot r \quad \text{Gl. 3.42}$$

Partielle Ableitung der Gl. 3.21:

$$k' = \frac{k^2}{\alpha_H} \cdot \frac{d_K}{d_H} \cdot \left(m_H \cdot \frac{\dot{m}_H'}{\dot{m}_H} + b_H \cdot \frac{T_{He}' + T_{Ha}'}{T_{He} + T_{Ha}} \right) + \frac{k^2}{\alpha_K} \cdot \left(m_K \cdot \frac{\dot{m}_K'}{\dot{m}_K} + b_K \cdot \frac{T_{Ke}' + T_{Ka}'}{T_{Ke} + T_{Ka}} \right) \quad \text{Gl. 3.43}$$

Unter welchen Bedingungen welche Temperatureinflüsse nicht berücksichtigt werden müssen, wird später in Kapitel 3.3.1 erörtert.

3.2.2 Partielle Ableitung des Mittelwertes für die spezifische Wärmekapazität

Werden die Mittelwerte der spezifischen Wärmekapazitäten (Gl. 3.3) partiell abgeleitet, ergibt sich:

$$c_p' = \frac{c_{pa} - c_p}{T_a - T_c} \cdot T_a' - \frac{c_{pc} - c_p}{T_a - T_c} \cdot T_c' \quad c_p = \frac{\partial h}{\partial T}$$

Gl. 3.44

3.2.3 Zusammenhang zwischen T_{Ha}' und T_{Ka}'

Aus Gl. 3.32 ergibt sich mit Berücksichtigung von Gl. 3.44:

$$\mu_K \cdot \underbrace{\frac{c_{pHa}}{c_{pH}}}_{\gamma_{Ha}} \cdot T_{Ha}' + \underbrace{\frac{c_{pKa}}{c_{pK}}}_{\gamma_{Ka}} \cdot T_{Ka}' =$$

$$\mu_K \cdot \underbrace{\frac{c_{pHe}}{c_{pH}}}_{\gamma_{He}} \cdot T_{He}' + \underbrace{\frac{c_{pKc}}{c_{pK}}}_{\gamma_{Kc}} \cdot T_{Kc}' + \Phi_K \cdot \Delta T_{rH} \cdot \dot{m}_H' - \Phi_K \cdot \Delta T_{rK} \cdot \dot{m}_K'$$

Gl. 3.45

3.2.4 Uebertragungsfaktoren bei Eingangstemperaturänderung

Nach Einsetzen und Umformen aller Zwischenresultate in Gl. 3.31 und der Berücksichtigung von Kenngrössen ergibt sich für die partiellen Ableitungen nach den Eingangstemperaturen T_{He} respektive T_{Kc} (Kenngrössenverzeichnis siehe Seite XIV; Funktionen g_μ und g_{NTU} siehe Kapitel 3.2.6, Seite 35):

$$K_{HH} = \partial T_{Ha} / \partial T_{He}$$

$$K_{HK} = \partial T_{Ha} / \partial T_{Ke}$$

$$K_{KH} = \partial T_{Ka} / \partial T_{He}$$

$$K_{KK} = \partial T_{Ka} / \partial T_{Ke}$$

$$\frac{\partial T_{Ha}}{\partial T_{He}} = \frac{-\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} \cdot \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ka} - 1) + \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \cdot \frac{\Phi_K}{\mu_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}}}{\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ka} - 1) + 1}$$

Gl. 3.46

$$\frac{\partial T_{Ha}}{\partial T_{Ke}} = \frac{-\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} + \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \cdot \frac{\Phi_K}{\mu_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}}}{\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ka} - 1) + 1}$$

Gl. 3.47

$$\frac{\partial T_{Ka}}{\partial T_{He}} = \frac{\frac{g_{NTU}}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_K} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{He}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \Phi_K}{\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ka} - 1) + 1}$$

Gl. 3.48

$$\frac{\partial T_{Ka}}{\partial T_{Ke}} = \frac{\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} + \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ke}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ke} - 1) + 1 - \Phi_K}{\frac{g_{NTU}}{\mu_K} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOH}} \cdot \frac{b_H}{Tb_H} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - \frac{g_{NTU}}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{NTU_K^2}{NTU_{KOK}} \cdot \frac{b_K}{Tb_K} + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot \left(\frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} - 1 \right) + \frac{g_{NTU}}{NTU_K} \cdot \frac{\gamma_{Ka}}{\gamma_{Ha}} \cdot (\gamma_{Ka} - 1) + 1}$$

Gl. 3.49

Einfache Zusammenhänge zwischen einzelnen Uebertragungsfaktoren für $b=0$, $\gamma=1$

Für einzelne Uebertragungsfaktoren lassen sich, sofern die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte vernachlässigt wird ($b=0$, $\gamma=1$), einfache Zusammenhänge finden, welche unabhängig von der Wärmetauscherbauart sind¹.

Aus Gl. 3.45, Gl. 3.46 und Gl. 3.47 ergibt sich:

$$\frac{\partial T_{Ha}}{\partial T_{He}} = 1 - \frac{\Phi_K}{\mu_K} \quad \text{Gl. 3.50}$$

$$\frac{\partial T_{Ha}}{\partial T_{Ke}} = \frac{\Phi_K}{\mu_K} \quad \text{Gl. 3.51}$$

$$\frac{\partial T_{Ka}}{\partial T_{He}} = \Phi_K \quad \text{Gl. 3.52}$$

$$\frac{\partial T_{Ka}}{\partial T_{Ke}} = 1 - \Phi_K \quad \text{Gl. 3.53}$$

Dieses Resultat bedeutet, dass für das Gleichungssystem (Kapitel 4.1) nicht zwei Uebertragungsfaktoren mit Temperatureingängen und demselben Temperatúrausgang gleichzeitig als unabhängige Grössen gewählt werden dürfen, da die Austauschgrade Φ_K respektive $\Phi_H = \Phi_K / \mu_K$ nicht voneinander unabhängig sind (wegen der Energiebilanz Gl. 3.1 und Gl. 3.2).

3.2.5 Uebertragungsfaktoren bei Massenstromänderung

Nach Einsetzen und Umformen aller Zwischenresultate in Gl. 3.31 und der Berücksichtigung von Kenngrössen ergibt sich für die partiellen Ableitungen nach den Massenströmen $\dot{m}_H$ respektive $\dot{m}_K$ (Kenngrössenverzeichnis siehe Seite XIV; Funktionen g_μ und g_{NTU} siehe Kapitel 3.2.6, Seite 35):

¹ Diese speziellen Resultate entsprechen denjenigen früherer Arbeiten, siehe z. B. Pütter (1972).

GL 3.54

GI. 3.55

GI. 3.56

GI. 3.57

3.2.6 Austauschgrade sowie Funktionen g_μ und g_{NTU} für verschiedene Stromführungen

Die Funktionen der Austauschgrade sind aus Bosnjakovic et al (1951) entnommen.

$$\Phi_K = f(\mu_K, NTU_K) \quad \Phi_K' = \mu_K' \cdot g_\mu + NTU_K' \cdot g_{NTU} \quad \text{Gl. 3.58}$$

Gegenstrom

$$\Phi_K = \frac{1 - e^{\left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K}}{\frac{1}{\mu_K} - e^{\left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K}} \quad \text{Gl. 3.59}$$

$$g_\mu = \frac{\Phi_K^2}{\mu_K^2} \cdot \frac{NTU_K \cdot \left(1 - \frac{1}{\Phi_K}\right) \cdot e^{\left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K} + 1}{1 - e^{\left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K}} \quad \text{Gl. 3.60}$$

$$g_{NTU} = \left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot \frac{\Phi_K \cdot (\Phi_K - 1)}{e^{-\left(1 - \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K} - 1} \quad \text{Gl. 3.61}$$

Gleichstrom

$$\Phi_K = \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{1}{\mu_K}\right) \cdot NTU_K}}{1 + \frac{1}{\mu_K}} \quad \text{Gl. 3.62}$$

$$g_\mu = \frac{NTU_K \cdot \Phi_K}{\mu_K^2} - \frac{NTU_K - \Phi_K}{\mu_K} \cdot \frac{1}{1 + \mu_K} \quad \text{Gl. 3.63}$$

$$g_{NTU} = 1 - \Phi_K - \frac{\Phi_K}{\mu_K}$$

Gl. 3.64

Kreuzstrom beidseitig quervermischt

$$\Phi_K = \frac{1}{\frac{1}{\mu_K} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}} + \frac{1}{1 - e^{-NTU_K}} - \frac{1}{NTU_K}}$$

Gl. 3.65

$$g_\mu = \frac{\Phi_K^2}{\mu_K^2} \cdot \left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}} - \frac{NTU_K}{\mu_K} \cdot \frac{e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}}{\left(1 - e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}\right)^2} \right)$$

Gl. 3.66

$$g_{NTU} = \Phi_K^2 \cdot \left(\frac{e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}}{\mu_K^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}\right)^2} + \frac{e^{-NTU_K}}{\left(1 - e^{-NTU_K}\right)^2} - \frac{1}{NTU_K^2} \right)$$

Gl. 3.67

Kreuzstrom H quervermischt

$$\Phi_K = \mu_K - \mu_K \cdot e^{-\frac{1 - e^{-NTU_K}}{\mu_K}}$$

Gl. 3.68

$$g_\mu = \frac{\Phi_K}{\mu_K} \cdot \left(1 - \frac{\Phi_K}{\mu_K} \right) \cdot \frac{1 - e^{-NTU_K}}{\mu_K}$$

Gl. 3.69

$$g_{NTU} = \left(1 - \frac{\Phi_K}{\mu_K} \right) \cdot e^{-NTU_K}$$

Gl. 3.70

Kreuzstrom K quervermischt

$$\Phi_K = 1 - e^{-\mu_K \left(1 - e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}\right)}$$
Gl. 3.71

$$g_\mu = (1 - \Phi_K) \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{NTU_K}{\mu_K}\right) \cdot e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}\right)$$
Gl. 3.72

$$g_{NTU} = (1 - \Phi_K) \cdot e^{-\frac{NTU_K}{\mu_K}}$$
Gl. 3.73

Haarnadelsinsatz H in Nadel (Zweigangeinsatz) K quervermischt

$$\Phi_K = \frac{2}{1 + \frac{1}{\mu_K} + \frac{1 + e^{-NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}}{1 - e^{-NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}$$
Gl. 3.74

$$g_\mu = \frac{\Phi_K^2}{\mu_K^2} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(\frac{NTU_K}{e^{NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}} - \frac{1 - e^{-2 \cdot NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}} \right) \cdot \frac{1}{\mu_K \cdot \left(1 - e^{-NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}\right)^2} \right)$$
Gl. 3.75

$$g_{NTU} = \left(1 + \frac{1}{\mu_K^2}\right) \cdot \frac{\Phi_K^2 \cdot e^{-NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}}{\left(1 - e^{-NTU_K \sqrt{1 + \frac{1}{\mu_K^2}}}\right)^2}$$
Gl. 3.76

3.2.7 Berücksichtigung des Betriebspunktes

Um die betriebspunktbedingten Änderungen der Wärmedurchgangskoeffizienten von den Veränderungen durch Abnutzung zu unterscheiden, müssen die Temperatur- und Massenstromabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten und die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten beachtet werden. In den Gleichungen für die Uebertragungsfaktoren sind diese Abhängigkeiten in den Grössen μ_k , NTU_K , $NTU_{K\alpha H}$, $NTU_{K\alpha K}$, NTU_{KW} und in der unbekannte Grösse NTU_{KRf} enthalten. Ebenfalls temperaturabhängig sind die Verhältniszahlen γ und der Exponent b .

Der erste Index der NTU -Grössen steht für den Bezug auf den Wärmekapazitätsstrom $\dot{m}_k \cdot c_{pK}$, die folgenden Indices für den betrachteten Anteil am Wärmedurchgang k (siehe auch Kenngrössenverzeichnis Seite XIV).

Aus Gl. 3.21 erhält man den Zusammenhang zwischen den einzelnen NTU -Grössen:

$$NTU_K = \frac{1}{\frac{1}{NTU_{K\alpha H}} + \frac{1}{NTU_{K\alpha K}} + \frac{1}{NTU_{KW}} + \frac{1}{NTU_{KRf}}}$$

Gl. 3.77

Betriebspunktabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten

Die Temperatur- und Massenstromabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten wird dadurch berücksichtigt, dass die aktuellen Wärmedurchgangskoeffizienten mit Potenzansätzen aus dem Verhältnis von aktuellen zu Referenzwerten berechnet werden (analog zu Kapitel 3.2.1) (ähnliche Vorgehensweise wie Bayer (1972)).

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} \right)^m \cdot \left(\frac{T_m}{T_{m0}} \right)^b$$

Gl. 3.78

Variieren die Temperaturen in einem grossen Bereich, wird für die Temperaturabhängigkeit präziser mit Polynomen gerechnet.

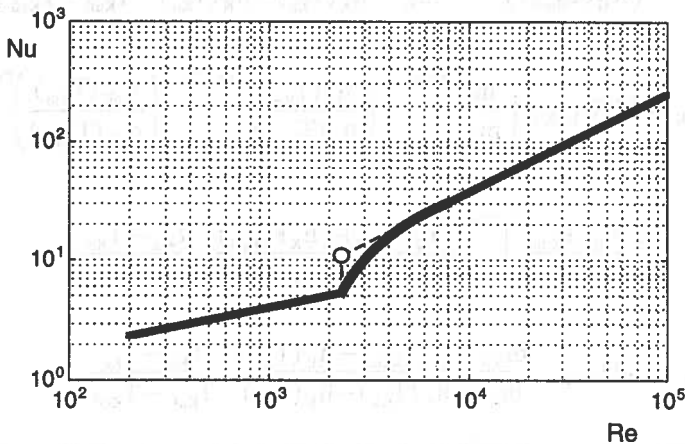
$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} \right)^m \cdot \left(\frac{\eta(T_m)}{\eta(T_{m0})} \right)^{n-m} \cdot \left(\frac{c_p(T_m)}{c_p(T_{m0})} \right)^n \cdot \left(\frac{\lambda(T_m)}{\lambda(T_{m0})} \right)^{1-n}$$

Gl. 3.79

In Gl. 3.78 und Gl. 3.79 sind für laminare und turbulente Strömung verschiedene Exponenten einzusetzen. Das heisst, dass mit den folgenden Beziehungen nur aktuelle Betriebspunkte im laminaren oder im turbulenten Bereich mit Referenzmassenströmen im gleichen Bereich verglichen werden können.

Müssen Betriebsbedingungen in beiden Bereichen verglichen werden, könnte als Behelf der Referenzpunkt in den Uebergangsbereich laminar-turbulent gelegt werden. Ist der ak-

tuelle Massenstrom kleiner als der Referenzmassenstrom, wird mit den Exponenten für laminare Strömung gerechnet, ist der aktuelle Massenstrom grösser mit denjenigen für turbulente Strömung. Dieses Vorgehen ist nicht exakt, da der Umschlag laminar-turbulent nicht bei einer genau berechenbaren Geschwindigkeit respektive dem entsprechenden Massenstrom erfolgt, sondern in einem nicht genau definierbaren Geschwindigkeitsbereich; der Referenzwert ist somit ein definierter, nicht wirklicher Zwischenwert:



Figur 3.6: Referenzpunkt für den Umschlag laminar-turbulent

Betriebspunktabhängigkeit der stoffwertabhängigen Verhältniszahlen γ und des Exponenten b

Ändern die Stoffwerte im zu untersuchenden Bereich stark, müssen auch die Temperaturabhängigkeit der Verhältniszahlen γ und des Exponenten b mit Polynomen approximiert werden; bei der mittleren spezifischen Wärmekapazität kann die Temperaturabhängigkeit mit Polynomen für die spezifische Enthalpie berücksichtigt werden.

Referenzwerte

Die Referenzwerte werden den Auslegungsdaten entnommen und nach der Inbetriebnahme des Wärmetauschers validiert und wenn nötig angepasst (in Gl. 3.77 mit $1/NTU_{Rf}=0$ für neuen Wärmetauscher).

Um den aktuellen Betriebspunkt mit dem Referenzbetriebspunkt verknüpfen zu können, wird in Gl. 3.77 sowie Gl. 3.46, Gl. 3.47, Gl. 3.48, Gl. 3.49 und Gl. 3.54, Gl. 3.55, Gl. 3.56, Gl. 3.57 für $NTU_{K\alpha H}$, $NTU_{K\alpha K}$ und NTU_{KW} mit den folgenden Beziehungen gerechnet:

$$NTU_{K\alpha H} = NTU_{K\alpha H0} \cdot \left(\frac{\dot{m}_H}{\dot{m}_{H0}} \right)^{m_H} \cdot \left(\frac{\eta_H(T_{Hm})}{\eta_H(T_{Hm0})} \right)^{n_H - m_H} \cdot \left(\frac{c_{pH}(T_{Hm})}{c_{pH}(T_{Hm0})} \right)^{n_H} \cdot \left(\frac{\lambda_H(T_{Hm})}{\lambda_H(T_{Hm0})} \right)^{1-n_H} \cdot \frac{\dot{m}_{K0}}{\dot{m}_K} \cdot \frac{h_K(T_{Ka0}) - h_K(T_{Ke0})}{h_K(T_{Ka}) - h_K(T_{Ke})} \cdot \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ka0} - T_{Ke0}}$$

Gl. 3.80

$$NTU_{K\alpha K} = NTU_{K\alpha K0} \cdot \left(\frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_{K0}} \right)^{m_K - 1} \cdot \left(\frac{\eta_K(T_{Km})}{\eta_K(T_{Km0})} \right)^{n_K - m_K} \cdot \left(\frac{c_{pK}(T_{Km})}{c_{pK}(T_{Km0})} \right)^{n_K} \cdot \left(\frac{\lambda_K(T_{Km})}{\lambda_K(T_{Km0})} \right)^{1-n_K} \cdot \frac{h_K(T_{Ka0}) - h_K(T_{Ke0})}{h_K(T_{Ka}) - h_K(T_{Ke})} \cdot \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ka0} - T_{Ke0}}$$

Gl. 3.81

$$NTU_{KW} = NTU_{KW0} \cdot \frac{\dot{m}_{K0}}{\dot{m}_K} \cdot \frac{h_K(T_{Ka0}) - h_K(T_{Ke0})}{h_K(T_{Ka}) - h_K(T_{Ke})} \cdot \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ka0} - T_{Ke0}}$$

Gl. 3.82

Betriebspunktkorrigiert ergibt sich für die Abnützung bei normierten Bedingungen:

$$NTU_{KRf0} = \frac{R_f \cdot A_K}{\dot{m}_{K0} \cdot c_{pK0}} = NTU_{KRf} \cdot \frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_{K0}} \cdot \frac{h_K(T_{Ka}) - h_K(T_{Ke})}{h_K(T_{Ka0}) - h_K(T_{Ke0})} \cdot \frac{T_{Ka0} - T_{Ke0}}{T_{Ka} - T_{Ke}}$$

Gl. 3.83

Wird die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten berücksichtigt ergibt sich für μ_K :

$$\mu_K = - \frac{T_{Ka} - T_{Ke}}{T_{Ha} - T_{He}}$$

Gl. 3.84

Die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten, welche mit Polynomen für die spezifische Enthalpie berücksichtigt worden ist, kann für viele Stoffe vernachlässigt werden. Zudem ist der Wandanteil des Wärmedurchgangswiderstandes meistens vernachlässigbar.

3.3 Uebertragungsfaktor-Sensitivitätsuntersuchungen

Für vier Wärmetauscher eines Blockheizkraftwerkes (Gasmotor, $\lambda=1$), sowie zusätzlich für einen Oelkühler, wie er in Kälteanlagen verwendet wird, und einen Luftkühler¹, wurden die Einflüsse der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte, der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten, der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten sowie der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren untersucht.

Die Uebertragungsfaktoren und die zu ihrer Berechnung notwendigen Kenngrößen sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die Kenngrößen wurden aus den Wärmetauscher-Auslegungs- und Konstruktionsdaten ermittelt.

Fluid H	Abgas	Abgas	Wasser	Luft	Oel	Wasser
Fluid K	Wasser	Wasser	Wasser	Luft	Wasser	Luft
Typ	Rohrb. (a)	Rohrb. (b)	Platten	Platten	Rohrb.	Glattrohr
Stromführung	Gegenstrom	Gegenstrom	als Gegenstrom ber.	als Gegenstrom ber.	Gegenstrom	Kreuzstr. H querver.
μ_K	0.0090	0.0118	1.26	1	0.333	0.567
NTU_K	0.0269	0.0035	1.14	0.7	0.294	0.194
Φ_K	0.0085	0.0030	0.5624	0.4118	0.1818	0.1516
Φ_H	0.9456	0.2563	0.4464	0.4118	0.5460	0.2673
NTU_{KoH}	0.0273	0.0036	2.57	1.4	0.39	5.28
NTU_{KoK}	2.72	0.175	224	1.4	1.2	0.201
b_H	0.26	0.33	1.35	0.36	4.4	2.25
b_K	2.12	2.18	1.39	0.36	2.89	0.33
Tb_H	2.77	3.09	53.3	28	12.3	6.39
Tb_K	1.71	1.35	52.9	26	11.0	4.81
γ_{He}	1.03 (1.029)	1.01	1	1	1.02	1
γ_{Ha}	0.97 (0.968)	0.99	1	1	0.98	1
γ_{Ke}	1	1	1	1	1	1
γ_{Ka}	1	1	1	1	1	1
m_H	0.8	0.8	0.6	0.6	0.8	0.80
m_K	0.8	0.8	0.6	0.6	0.8	0.65

¹ Konstruktionsdaten aus Schmachtenberg (1981)

ΔT_{r_H}	766	965	617	100	82.5	84.2
ΔT_{r_K}	24.9	38.8	776	100	57.4	11.4
K_{HH}	0.0415	0.720	0.548	0.585	0.347	0.726
K_{HK}	0.937	0.239	0.441	0.409	0.471	0.241
K_{KK}	0.992	0.997	0.444	0.592	0.846	0.863
K_{KH}	0.0089	0.0035	0.569	0.415	0.226	0.155
K_{HmH}	25.1	46.8	182	25.4	12.8	18.6
K_{HmK}	-0.0524	-0.147	-156	-15.7	-5.40	-1.71
K_{KmH}	6.32	2.37	118	15.8	10.8	2.22
K_{KmK}	-0.212	-0.116	-240	-25.5	-8.68	-0.761

Tabelle 3.2: Uebertragungsfaktoren K berechnet aus Wärmetauscherkenngrössen (unterer Teil), Kenngrössen berechnet aus Auslegungs- und Konstruktionsdaten

Um die Abweichungen zwischen vereinfachten und detaillierten Berechnungen besser beurteilen und miteinander vergleichen zu können, sind insbesondere die betragsmässig kleinen Werte in den Tabellen mit einer für die praktische Anwendung zu grossen Genauigkeit aufgelistet. Beim Vergleich von Modell- und effektiven, an einer Anlage gemessenen Werten, muss mit Abweichungen von einigen Prozenten gerechnet werden. Die erreichbare Genauigkeit der Modellrechnungen wird durch die Wärmetauscherbauart, die Art der Medien und die Qualität ihrer Stoffdaten bestimmt.

Beim Vergleich zwischen vereinfachter und detaillierter Berechnung wurden Abweichungen auf die vereinfacht berechneten Werte bezogen.

Wie die Figur 3.7 und folgende verwendet werden können, wird in einem Beispiel erläutert.

Beispiel Wasser-Luft-Wärmetauscher $\mu_K=0.567$, $NTU_K=0.194$, ΔK_{HK}

Erklärung zum Vorgehen:

- Aus den Kenngrössen Tabelle 3.2 wird der Wert der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaH} \cdot b_H/T_{bH}$ berechnet.
- In den für den Uebertragungsfaktor K_{HK} berechneten Figuren sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaH} \cdot b_H/T_{bH}$ aufgezeichnet, welche einer K_{HK} -Abweichung von 5% z. B. wegen Stoffwertänderungen entsprechen. Für den μ_K - und NTU_K -Wert des Beispielwärmetauschers wird der 5%-Wert von $1/NTU_{KaH} \cdot b_H/T_{bH}$ abgelesen.
- Mit dem 5%-Wert und dem für den Beispielwärmetauscher effektiven Wert von $1/NTU_{KaH} \cdot b_H/T_{bH}$ wird die Abweichung für den konkreten Fall berechnet (Punkt 7).

1. Einfluss Stoffwertänderung auf der Wasserseite:

Aus Tabelle 3.2: $1/NTU_{K_{\alpha H}} \cdot b_H / Tb_H = 0.07$

Aus der Figur 3.7: $1/NTU_{K_{\alpha H}} \cdot b_H / Tb_H = 1.3$ für -5% Abweichung

Da $0.07 < 1.3$, ist die Abweichung von K_{HK} wegen der Stoffwertänderung auf der Wasserseite viel kleiner als 5%.

2. Einfluss Stoffwertänderung auf der Luftseite:

Aus Tabelle 3.2: $1/NTU_{K_{\alpha K}} \cdot b_K / Tb_K = 0.34$

Aus der Figur A 3 Seite A 4: $1/NTU_{K_{\alpha K}} \cdot b_K / Tb_K = 0.18$ für -5% Abweichung

Da $0.34 > 0.18$, ist die Abweichung von K_{HK} wegen der Stoffwertänderung auf der Luftseite grösser als 5%.

3. Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten:

Kein Einfluss, da alle $\gamma = 1$.

4. Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten:

Kein Einfluss, da die Massenströme konstant bleiben.

5. Einfluss der Stromführung:

Aus der Figur 3.9 Seite 50 kann ein Unterschied von ca. 2% zwischen Gegen- und Gleichstromführung abgelesen werden. Der Beispielwärmetauscher ist kreuzstromgeführt mit Quervermischung auf der Wasserseite; der Stromführungseinfluss wird mit $\Delta K_{HK} = -1\%$ berücksichtigt.

6. Uebertragungsfaktor K_{HKG} :

Aus der Figur 3.16 Seite 54: $K_{HKG} = 0.28$

7. Wird mit einem linearen Zusammenhang gerechnet, ergibt sich für dieses Beispiel:

$$\Delta K_{HK} = 0.07/1.3 \cdot (-5\%) + 0.34/0.18 \cdot (-5\%) - 1\% = -10.7\%$$

$$K_{HK} = 0.28 \cdot (1 - 0.107) = 0.25$$

Zum Vergleich direkt berechneter Wert Tabelle 3.2 $K_{HK} = 0.241$

3.3.1 Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren

Wird eine Eingangsgrösse eines Wärmetauschers verändert, verändern sich die Mitteltemperaturen beider Fluide. Die Stoffwerte, welche zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten benötigt werden, ändern somit ebenfalls.

Der Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren ist in der Tabelle 3.3 aufgeführt.

In Gl. 3.85 sind die Einflüsse der Massenstromänderungen und der Verhältnisse γ zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten im Zähler und Nenner berücksichtigt.

$$\Delta K_{xy} = \frac{K_{xy}(T_m)}{K_{xy}(T_m = c)} - 1$$

Gl. 3.85

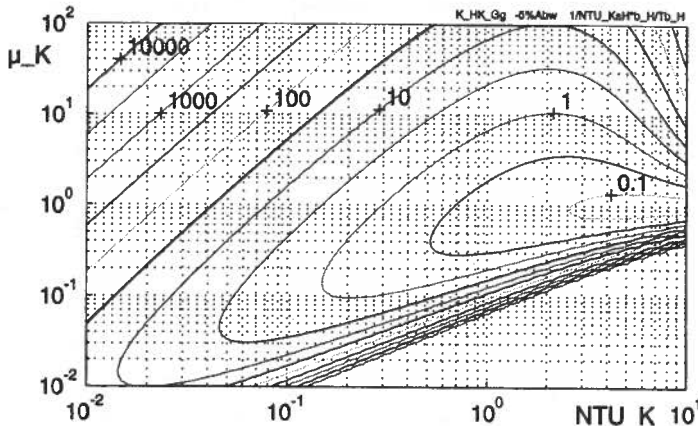
Fluid H	Abgas	Abgas	Wasser	Luft	Öl	Wasser
Fluid K	Wasser	Wasser	Wasser	Luft	Wasser	Luft
Typ	Rohrb. (a)	Rohrb. (b)	Platten	Platten	Rohrb.	Glatrohr
Stromführung	Gegenstrom	Gegenstrom	als Gegenstrom ber.	als Gegenstrom ber.	Gegenstrom	Kreuzstr. H querver.
μ_K	0.0090	0.0118	1.26	1	0.333	0.567
NTU_K	0.0269	0.0035	1.14	0.7	0.294	0.194
NTU_{KoH}	0.0273	0.0036	2.57	1.4	0.39	5.28
NTU_{KoK}	2.72	0.175	224	1.4	1.2	0.201
b_H	0.26	0.33	1.35	0.36	4.4	2.25
b_K	2.12	2.18	1.39	0.36	2.89	0.33
Tb_H	2.77	3.09	53.3	28	12.3	6.39
Tb_K	1.71	1.35	52.9	26	11.0	4.81
gesamte Daten siehe Tabelle 3.2 Seite 42						
ΔK_{HH}	-0.26	-0.052	-0.010	-0.005	-0.27	-0.009
ΔK_{HK}	-0.017	-0.077	-0.012	-0.008	-0.15	-0.098
ΔK_{KK}	0.000	0.000	0.015	0.006	0.03	0.017
ΔK_{KH}	0.015	0.152	0.012	0.008	0.22	0.025
ΔK_{HmH}	-0.014	-0.023	-0.004	-0.003	-0.10	-0.004
ΔK_{HmK}	-0.021	-0.028	-0.007	-0.004	-0.11	-0.009
ΔK_{KmH}	0.001	0.005	0.009	0.004	0.044	0.021
ΔK_{KmK}	0.000	0.000	0.006	0.003	0.026	0.011

Tabelle 3.3: Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren (Abweichungen > 5% fett markiert)

⇒ Die Resultate in Tabelle 3.3 zeigen, dass die Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte nicht nur bei öl-, sondern auch bei abgas-, luft- oder wasserdurchströmten Wärmetauschern für einzelne Uebertragungsfaktoren berücksichtigt werden muss. Neben

einer besonders grossen Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte ist ein besonders grosses oder kleines Wärmekapazitätsstromverhältnis ein Hinweis auf die Notwendigkeit, die Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte zu berücksichtigen.

Um den Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte beurteilen zu können, wird in Diagrammen für jeweils ein Fluid die Temperaturabhängigkeit der Uebertragungsfaktoren berücksichtigt und mit den Uebertragungsfaktoren ohne Einfluss der Temperaturabhängigkeit verglichen. Aus den Diagrammen können die Werte einer Parameterkombination für 5% Änderung wegen Temperaturabhängigkeit der Uebertragungsfaktoren entnommen und mit den entsprechenden Werten eines einzelnen Wärmetauschers verglichen werden. Die Verhältnisse γ zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten sind gleich eins gesetzt. Der Figur 3.7 entsprechende Diagramme sind für alle Uebertragungsfaktoren im Anhang zu finden.



Figur 3.7: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{HKGg} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha H} \cdot b_H / T_{bH}$ welche -5% Abweichung ergeben

3.3.2 Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten auf die Uebertragungsfaktoren

Der direkte Einfluss der Verhältnisse γ zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten ist in der Tabelle 3.4 aufgeführt. Die Einflüsse der Mitteltemperaturabhängigkeit und der Massenstromänderungen sind im Zähler und Nenner berücksichtigt.

$$\Delta K_{xy} = \frac{K_{xy}(\gamma)}{K_{xy}(\gamma = 1)} - 1$$

Gl. 3.86

Fluid H	Abgas	Abgas	Wasser	Luft	Oel	Wasser
Fluid K	Wasser	Wasser	Wasser	Luft	Wasser	Luft
Typ	Rohrb. (a)	Rohrb. (b)	Platten	Platten	Rohrb.	Glattrohr
Strom-führung	Gegen-strom	Gegen-strom	als Gegen-strom ber.	als Gegen-strom ber.	Gegen-strom	Kreuzstr. H querver.
μ_K	0.0090	0.0118	1.26	1	0.333	0.567
NTU_K	0.0269	0.0035	1.14	0.7	0.294	0.194
Φ_K	0.0085	0.0030	0.5624	0.4118	0.1818	0.1516
Φ_H	0.9456	0.2563	0.4464	0.4118	0.5460	0.2673
γ_{He}	1.03 (1.029)	1.01	1.00	1.00	1.02	1.00
γ_{Ha}	0.97 (0.968)	0.99	1.00	1.00	0.98	1.00
γ_{Ke}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
γ_{Ka}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
gesamte Daten siehe Tabelle 3.2 Seite 42						
ΔK_{HH}	0.13	0.021	0	0	0.05	0
ΔK_{HK}	0.005	0.008	0	0	0.01	0
ΔK_{KK}	0.000	0.000	0	0	0.001	0
ΔK_{KH}	0.026	0.009	0	0	0.02	0
ΔK_{HmH}	0.005	-0.008	0	0	0.01	0
ΔK_{HmK}	0.005	-0.008	0	0	0.01	0
ΔK_{KmH}	0.001	0.000	0	0	0.003	0
ΔK_{KmK}	0.000	0.000	0	0	0.002	0

Tabelle 3.4: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazität auf die Uebertragungsfaktoren (Abweichungen > 5% fett markiert)

⇒ Die Resultate in Tabelle 3.4 zeigen, dass die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten nur in Ausnahmefällen berücksichtigt werden muss, nämlich bei einer besonders grossen Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte oder bei einem sehr grossen Austauschgrad Φ_H oder Φ_K . Liegen die Werte γ im Bereich $0.99 < \gamma < 1.01$, kann die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazität vernachlässigt werden.

3.3.3 Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten respektive die Uebertragungsfaktoren

Der direkte Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten ist in der Tabelle 3.5 aufgeführt. Die Einflüsse der Mitteltemperaturabhängigkeit und die Verhältnisse γ zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten sind im Zähler und Nenner berücksichtigt.

$$\Delta K_{xy} = \frac{K_{xy}(\alpha_y(d\dot{m}_y))}{K_{xy}(\alpha_y = c)} - 1$$

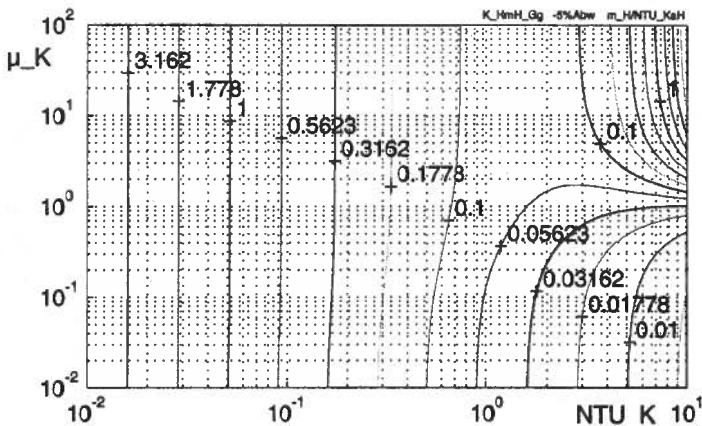
Gl. 3.87

Fluid H	Abgas	Abgas	Wasser	Luft	Oel	Wasser
Fluid K	Wasser	Wasser	Wasser	Luft	Wasser	Luft
Typ	Rohrb. (a)	Rohrb. (b)	Platten	Platten	Rohrb.	Glattr.
Stromführung	Haarnadel H in Nadel	Gegenstrom	als Gegenstrom ber.	als Gegenstrom ber.	Gegenstrom	Kreuzstr. H querver.
μ_K	0.0090	0.0118	1.26	1	0.333	0.567
NTU_K	0.0269	0.0035	1.14	0.7	0.294	0.194
NTU_{KoH}	0.0273	0.0036	2.57	1.4	0.39	5.28
NTU_{KoK}	2.72	0.175	224	1.4	1.2	0.201
m_H	0.8	0.8	0.6	0.6	0.8	0.80
m_K	0.8	0.8	0.6	0.6	0.8	0.65
ΔTr_H	766	965	617	100	82.5	84.2
ΔTr_K	24.9	38.8	776	100	57.4	11.4
gesamte Daten siehe Tabelle 3.2 Seite 42						
ΔK_{HmH}	-0.78	-0.78	-0.16	-0.22	-0.54	-0.027
ΔK_{HmK}	1.30	11	0.50	0.86	1.8	6.7
ΔK_{KmH}	0.14	4.0	0.63	0.85	0.86	0.15
ΔK_{KmK}	-0.001	-0.013	-0.21	-0.22	-0.12	-0.53

Tabelle 3.5: Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Uebertragungsfaktoren (Abweichungen > 5% fett markiert)

⇒ Der direkte Einfluss der Massenstromabhängigkeit auf die Uebertragungsfaktoren darf nur in Ausnahmefällen vernachlässigt werden, dies war auf Grund früherer Publikationen zu erwarten.

Aus Diagrammen können die Werte einer Parameterkombination für 5% Änderung infolge Massenstromabhängigkeit der Uebertragungsfaktoren entnommen und mit den entsprechenden Werten eines einzelnen Wärmetauschers verglichen werden. Der Einfluss der Mitteltemperaturänderungen ist in diesen Diagrammen nicht berücksichtigt. Die Verhältnisse γ zwischen den spezifischen Wärmekapazitäten sind gleich eins gesetzt. Der Figur 3.8 entsprechende Diagramme sind für alle Uebertragungsfaktoren im Anhang zu finden.



Figur 3.8: Einfluss Massenstromänderung Seite H auf den Uebertragungsfaktor $K_{HmHGg}/\Delta Tr_H$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe m_H/NTU_{KaH} welche -5% Abweichung ergeben

3.3.4 Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren

Häufig weicht die Stromführung vom Gegen- oder Gleichstrom ab. Für diese Fälle muss abgeschätzt werden, ob der Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren speziell beachtet werden muss, oder ob z. B. ein Kreuzgegen- wie ein Gegenstromwärmetauscher behandelt werden darf. Der Einfluss der Stromführung ist in der Tabelle 3.6 aufgeführt.

$$\Delta K_{xy} = \frac{K_{xyGg}}{K_{xyGl}} - 1$$

Gl. 3.88

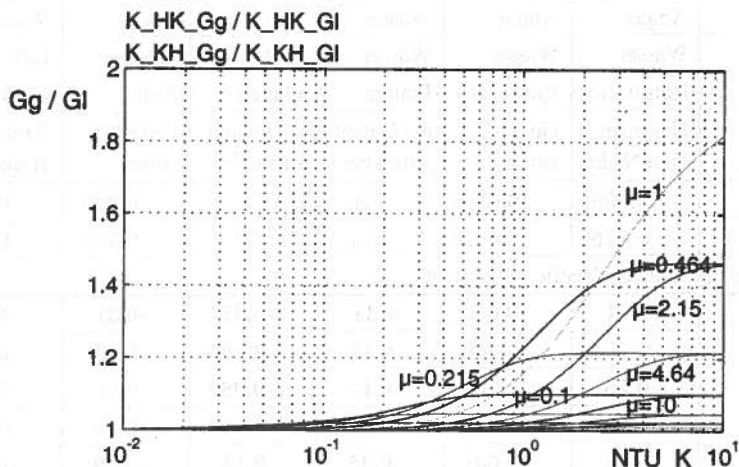
Fluid H	Abgas	Abgas	Wasser	Luft	Oel	Wasser
Fluid K	Wasser	Wasser	Wasser	Luft	Wasser	Luft
Typ	Rohrb. (a)	Rohrb. (b)	Platten	Platten	Rohrb.	Glattr.
Stromführung	Haarnadel H in Nadel	Gegenstrom	als Gegenstrom ber.	als Gegenstrom ber.	Gegenstrom	Kreuzstr. H querver.
μ_K	0.0090	0.0118	1.26	1	0.333	0.567
NTU_K	0.0269	0.0035	1.14	0.7	0.294	0.194
gesamte Daten siehe Tabelle 3.2 Seite 42						
ΔK_{HH}	-0.14	-0.000	-0.11	-0.057	-0.31	-0.007
ΔK_{HK}	0.006	0.000	0.15	0.092	-0.10	0.015
ΔK_{KK}	0.000	0.000	-0.14	-0.055	0.02	-0.003
ΔK_{KH}	0.007	0.000	0.17	0.094	0.29	0.018
ΔK_{HmH}	-0.13	-0.001	0.25	0.14	-0.09	0.034
ΔK_{HmK}	-0.74	-0.019	0.084	0.023	-0.19	0.023
ΔK_{KmH}	0.012	0.001	0.012	0.024	0.12	-0.058
ΔK_{KmK}	0.013	0.001	0.23	0.14	0.12	0.010

Tabelle 3.6: Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren (Abweichungen >5% fett markiert)

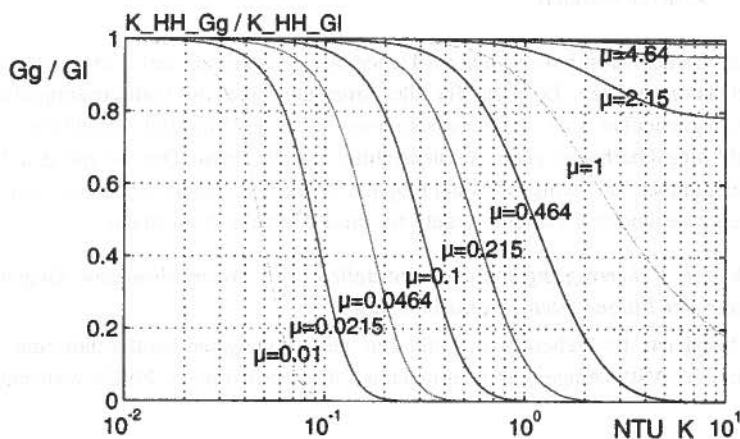
⇒ Der Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren darf nicht grundsätzlich vernachlässigt werden. Da nicht für alle Stromführungen die Uebertragungsfaktoren einfach berechenbar sind, ist es zweckmässig für jeden Einzelfall abzuklären, ob die Stromführung überhaupt genau berücksichtigt werden muss. Dies ist mit den folgenden Diagrammen mit wenig Aufwand möglich; daher wird darauf verzichtet, auf Grund der oben berechneten Resultate Regeln für diesen Entscheid zu finden.

Vergleich der Uebertragungsfaktoren bezüglich der Stromführungen Gegen- und Gleichstrom bei Eingangstemperaturänderung

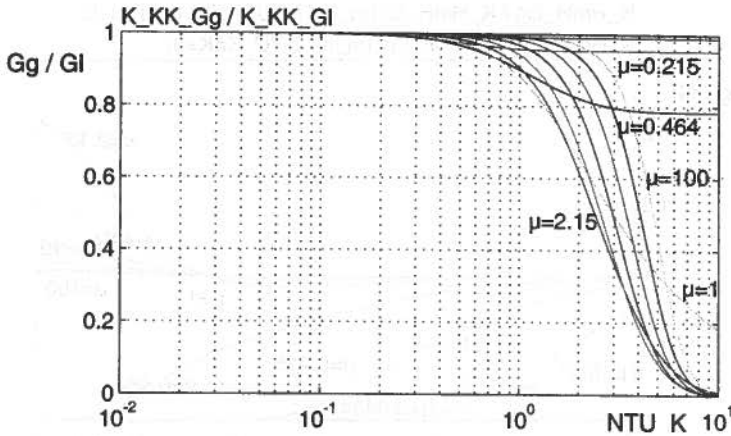
Für den Vergleich der Uebertragungsfaktoren bei Eingangstemperaturänderung wurde der Einfluss der Mitteltemperaturänderungen auf die Stoffwerte der Fluide vernachlässigt.



Figur 3.9: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Eingangstemperaturänderung des einen und Ausgangstemperaturänderung des anderen Fluids (K_{HKGg}/K_{HKGl} oder K_{KHGg}/K_{KHGl})



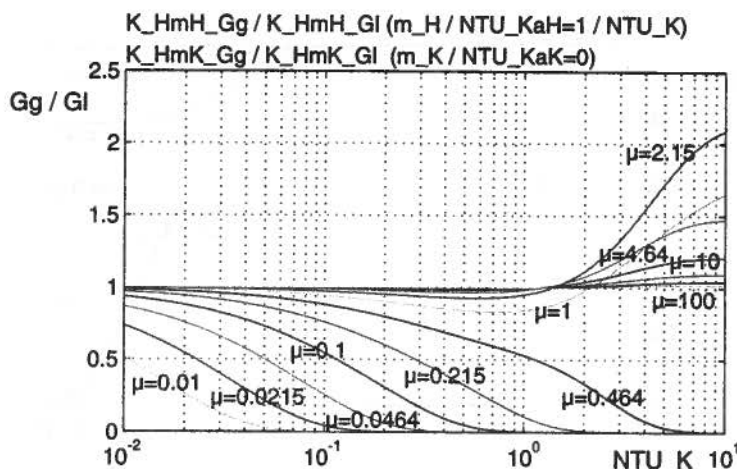
Figur 3.10: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Ein- und Ausgangstemperaturänderung des gleichen Fluids (Seite H)



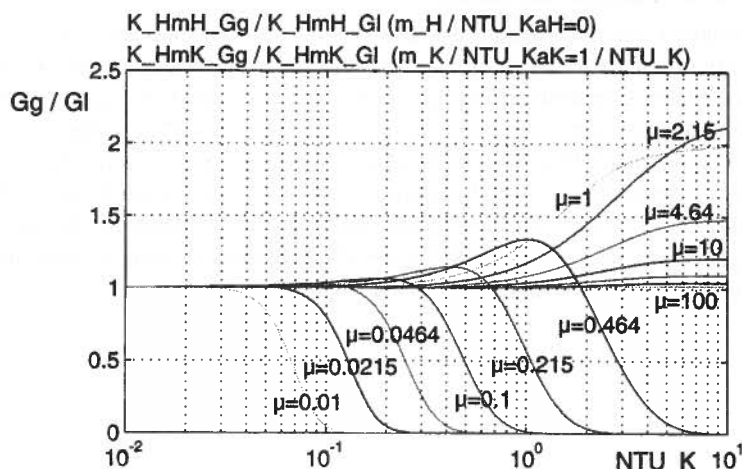
Figur 3.11: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Ein- und Ausgangstemperaturänderung des gleichen Fluids (Seite K)

Vergleich der Uebertragungsfaktoren bezüglich der Stromführungen Gegen- und Gleichstrom bei Massenstromänderung

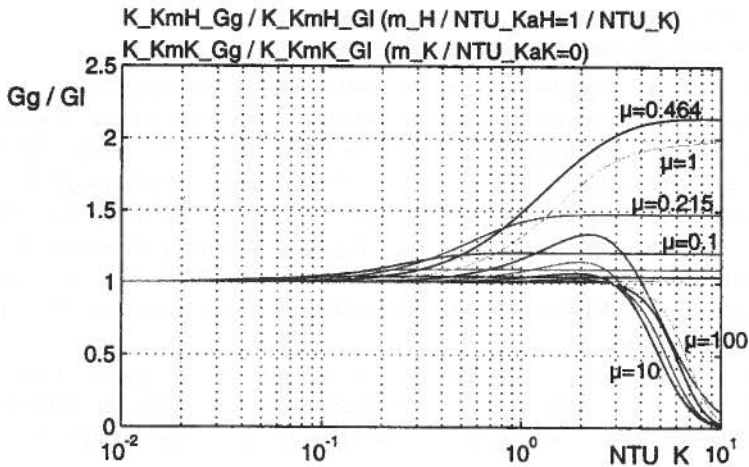
Für den Vergleich der Uebertragungsfaktoren bei Massenstromänderung wurde der Einfluss der Mitteltemperaturänderungen auf die Stoffwerte der Fluide vernachlässigt, der Einfluss der Massenstromänderung auf die Änderung der Wärmeübergangskoeffizienten wurde jedoch berücksichtigt. Die Werte für m_H/NTU_{KaH} und m_K/NTU_{KaK} liegen zwischen 0 und $1/NTU_K$. Für beide Extreme wurden die Uebertragungsfaktoren verglichen. Je zwei verschiedene Vergleiche zwischen Uebertragungsfaktoren sind identisch, wenn für den einen $m_H/NTU_{KaH} = 1/NTU_K$ und den anderen $m_K/NTU_{KaK} = 0$, respektive für den einen $m_H/NTU_{KaH} = 0$ und den anderen $m_K/NTU_{KaK} = 1/NTU_K$ eingesetzt wird; im Kopf der Diagramme sind die entsprechenden Angaben aufgeführt.



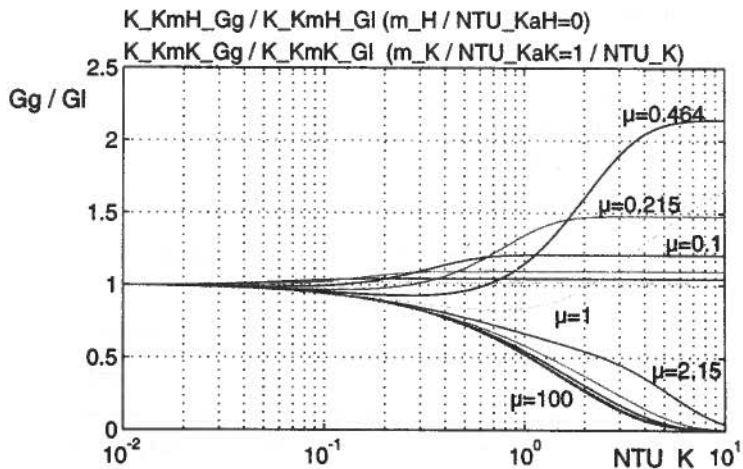
Figur 3.12: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite H, Wärmeübergang Seite K viel besser als Seite H



Figur 3.13: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite H, Wärmeübergang Seite H viel besser als Seite K



Figur 3.14: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite K, Wärmetübergang Seite K viel besser als Seite H



Figur 3.15: Vergleich der Uebertragungsfaktoren zwischen Gegen- und Gleichstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite K, Wärmetübergang Seite H viel besser als Seite K

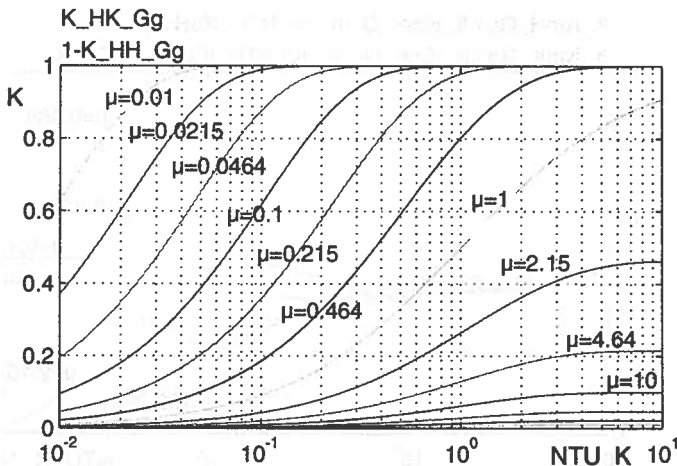
3.3.5 k-Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren – Uebertragungsfaktor-Diagramme

k-Wert-Sensitivitäts-Diagramme dienen der Beurteilung der Abhängigkeit der Uebertragungsfaktoren von der Verschmutzung. Nun besteht das Ziel der gesamten Untersuchungen darin, den Verschmutzungswiderstand R_f respektive die entsprechende Aenderung des Wärmedurchgangskoeffizienten k aus der Veränderung der Uebertragungsfaktoren K zu bestimmen (mit k gleichwertig sind auch die Ausdrücke NTU_K und NTU_H). Da verschiedene Varianten von K vorkommen (K_{HH} , K_{HK} etc.), ist es nötig, diejenigen beizuziehen, welche bei einer durch R_f verursachten Aenderung von NTU_K relativ stark variieren, nach Möglichkeit bei allfälligen betriebspunktbedingten Aenderungen von NTU_K und μ_K jedoch konstant bleiben.

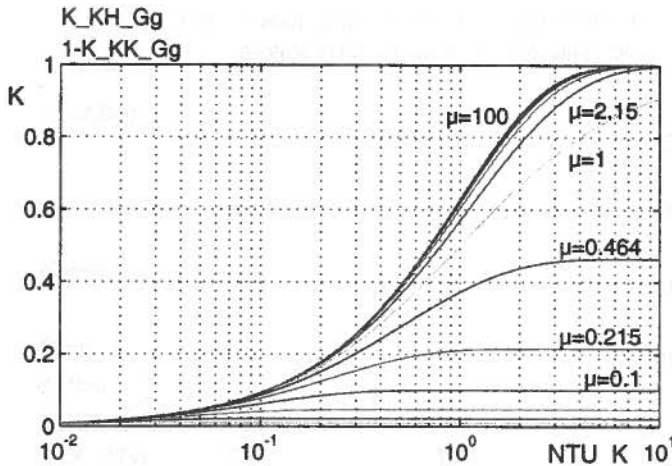
NTU_K ist in den Diagrammen logarithmisch aufgetragen, so dass sich gleiche Distanzen für gleich grosse relative Aenderungen von k , respektive von R_f ergeben. Im weiteren können die Diagramme zur näherungsweisen Bestimmung der Uebertragungsfaktoren benutzt werden.

k-Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren bei Eingangstemperaturänderung

Für die Berechnung der Uebertragungsfaktoren bei Eingangstemperaturänderung wurde der Einfluss der Mitteltemperaturänderungen auf die Stoffwerte der Fluide vernachlässigt.



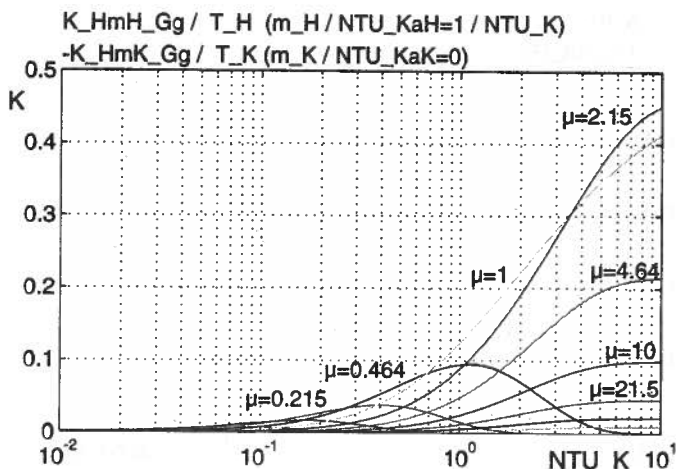
Figur 3.16: Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Eingangstemperaturänderung
Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite H



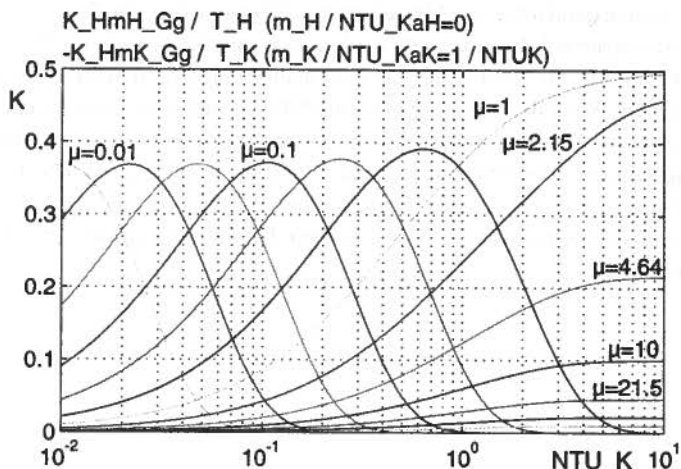
Figur 3.17: Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Eingangstemperaturänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite K

k-Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren bei Massenstromänderung

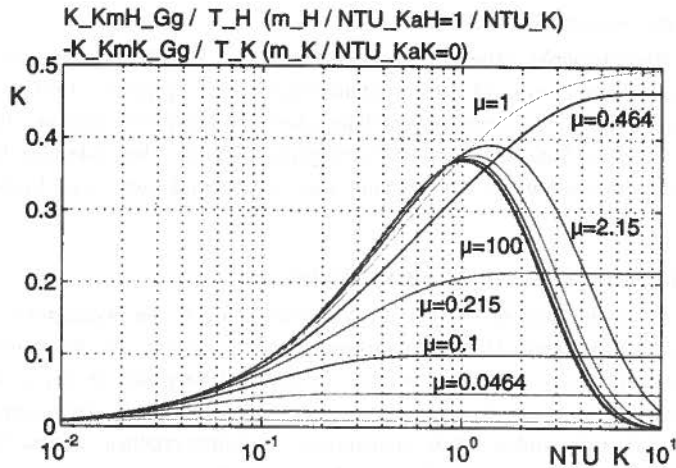
Für die Uebertragungsfaktoren bei Massenstromänderung wurde der Einfluss der Mitteltemperaturänderungen auf die Stoffwerte der Fluide vernachlässigt, der Einfluss der Massenstromänderung auf die Änderung der Wärmeübergangskoeffizienten wurde jedoch berücksichtigt. Die Werte für $m_H/NTU_{K\alpha H}$ und $m_K/NTU_{K\alpha K}$ liegen zwischen 0 und $1/NTU_K$. Für beide Extreme wurden die Uebertragungsfaktoren berechnet. Je zwei verschiedene Uebertragungsfaktoren sind identisch, wenn für den einen $m_H/NTU_{K\alpha H} = 1/NTU_K$ und den anderen $m_K/NTU_{K\alpha K} = 0$, respektive für den einen $m_H/NTU_{K\alpha H} = 0$ und den anderen $m_K/NTU_{K\alpha K} = 1/NTU_K$ eingesetzt wird; im Kopf der Diagramme sind die entsprechenden Angaben aufgeführt.



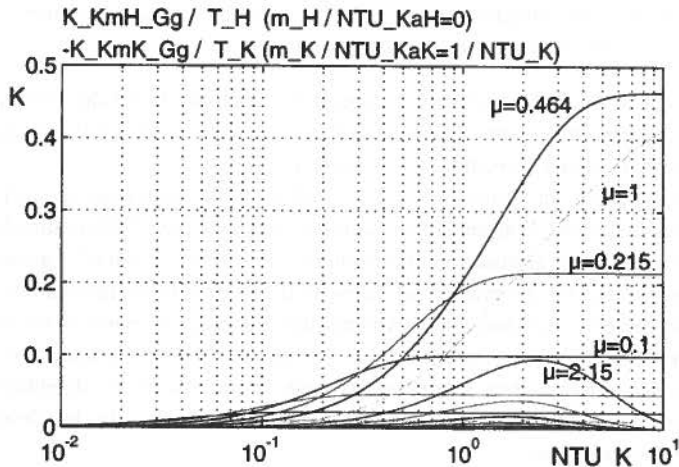
Figur 3.18: Normierte Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite H, Wärmeübergang Seite K viel besser als Seite H



Figur 3.19: Normierte Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite H, Wärmeübergang Seite H viel besser als Seite K



Figur 3.20: Normierte Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite K, Wärmeübergang Seite K viel besser als Seite H



Figur 3.21: Normierte Uebertragungsfaktoren bei Gegenstrom für Massenstromänderung Seite H oder K und Ausgangstemperaturänderung Seite K, Wärmeübergang Seite H viel besser als Seite K

Wichtigkeit der verschiedenen Einflüsse

Neben dem Betriebspunkt haben die Stromführung und die Abhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten von Massenstromänderungen den grössten Einfluss auf die Uebertragungsfaktoren. Die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte fällt im allgemeinen weniger ins Gewicht. Sind jedoch die Uebertragungsfaktoren klein oder die Stoffwerte besonders temperaturabhängig, können auch diese Abhängigkeiten einen Einfluss > 5% erreichen.

3.4 Dynamisches Uebertragungsverhalten

An sich könnte auch versucht werden, die Verschmutzung R_f aus Kenngrössen, welche das dynamische (transiente) Uebertragungsverhalten beschreiben, zu bestimmen. Dieser Ansatz verspricht jedoch keine wesentlichen Vorteile im Vergleich zu den zusätzlichen Schwierigkeiten, welche sich bei der Untersuchung des Einflusses verschiedener Stromführungen und Betriebspunkte auf das dynamische Verhalten ergeben, so dass für die Bestimmung von R_f die Uebertragungsfaktoren K verwendet werden.

$$G(s, p) = \frac{K(p)}{1 + \tau(p) \cdot s + \dots}$$

Gl. 3.89

Für eine regelbasierte Ueberwachung, welche nicht kleine Veränderungen, sondern Störungen detektieren und diagnostizieren soll, kann das dynamische Verhalten trotz der oben erwähnten Einschränkungen Verwendung finden.

Auch wenn das dynamische Uebertragungsverhalten nicht direkt für die Bestimmung der Verschmutzung verwendet wird, muss es modelliert werden, damit die Uebertragungsfaktoren aus den Messdaten berechnet werden können.

Ein Wärmetauscher ist ein System, das sich mit partiellen Differentialgleichungen beschreiben lässt. Für bestimmte Wärmetauscher konnten die partiellen Differentialgleichungen unter Berücksichtigung gewisser Vereinfachungen analytisch ("exakt") gelöst werden. Diese Lösungen sind für die praktische Verwendung zwar schwer handhabbar, ermöglichen aber ein besseres Verständnis der dynamischen Vorgänge in einem Wärmetauscher. Verschiedene Autoren haben gezeigt, dass mit Modellen 1. oder 2. Ordnung sowie Totzeit die wesentlichen dynamischen Eigenschaften von Wärmetauschern abgebildet werden können. Diese vereinfachten dynamischen Modelle sind für die hier beschriebene Anwendung genügend genau.

3.4.1 Analytisch bestimmte Uebertragungsfunktionen in der Literatur

Doppelrohrwärmetauscher

- Takahashi (1952): Transfer Function Analysis of Heat Exchange Processes

- Law (1962): The Dynamic Response of Shell-and-Tube Heat Exchangers to Flow Changes
- Grothaus (1984): Eigenschaften instationärer isobarer eindimensionaler Gleich- und Gegenstrom-Doppelrohr-Wärmeaustauscher mit konstanten Massenströmen unter der Vernachlässigung der axialen Wärmeleitfähigkeiten der beiden Phasen und der Wärmekapazität der Wände

Kreuzstromwärmetauscher

- Bender (1971): Das dynamische Verhalten von Kreuzstromwärmeaustauschern für reine Temperaturschwingungen
- Bender (1972): Das dynamische Verhalten von Kreuzstromwärmeaustauschern für Massenstromvariationen

3.4.2 Vereinfachte dynamische Modelle in der Literatur

Rohrbündelwärmetauscher, Doppelrohrwärmetauscher flüssig/flüssig

- Takahashi (1953): Regeltechnische Eigenschaften von Gleich- und Gegenstromwärmeaustauschern
- Finlay and Dalglish (1965): Response of Single-Pass Heat Exchangers to Disturbances in Flow Rate
- Pütter (1972): Einfache dynamische Modelle für Doppelrohr- und Rohrbündel-Wärmeaustauscher

Kreuzstromwärmetauscher

- Franck (1984): Zum dynamischen Verhalten wasserstromgestellter Kreuzstromwärmeübertrager in Klimaanlage

Plattenwärmetauscher Gegenstrom

- Khan et al. (1988): The dynamic characteristics of a countercurrent plate heat exchanger

4. ERMITTELN DES ZUSÄTZLICHEN WÄRMEDURCHGANGSWIDERSTANDES INFOLGE VERSCHMUTZUNG

In Kapitel 3 sind die Uebertragungsfunktionen in Abhängigkeit des Betriebspunktes und der Verschmutzung der wärmeaustauschenden Flächen beschrieben worden. Diese Zusammenhänge werden im folgenden verwendet, um den zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand R_f infolge Verschmutzung ermitteln zu können. Mit Hilfe der zu einem System zusammengefassten Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen werden die zu messenden Grössen und – falls der konkrete Anwendungsfall die Wahl lässt – die anzuregenden Wärmetauschereingangsrößen bestimmt. Das Gleichungssystem kann weiter zur Berechnung von R_f verwendet werden. Im zweiten Teil des Kapitels wird die Methode für die Ueberwachung eines Abgaswärmetauschers angewendet.

4.1 System der Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen

In der Planungsphase für die Anwendung der Ueberwachungsmethode müssen folgende Entscheide getroffen werden:

- Bestimmen der benötigten Messgrössen, welche direkt gemessen oder aus Messungen berechnet werden können (Kapitel 4.1.1),
 - bestimmen der benötigten Sensoren (Kapitel 4.1.1) und
 - bestimmen, welche Eingangsgrössen künstlich angeregt werden müssen (Kapitel 4.1.2).
- Das Entscheiden wird durch das System der Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen unterstützt.

In der Anwendungsphase muss von Messwerten auf die Abnützung geschlossen werden (Kapitel 4.1.3). Diese Aufgabe kann entweder mit Hilfe

- des zuvor erwähnten Gleichungssystems gelöst werden, indem dieses mit aktuellen Werten gelöst wird oder indem
- gemessene Grössen und geschätzte Parameter mit im voraus berechneten Werten verglichen werden (bei manuellem Vorgehen mit Diagrammen).

Gleichungssystem

Die Gleichungen aus Kapitel 3.2 zusammengefasst ergeben ein System mit maximal 10 Gleichungen (Gl. 3.21; Gl. 3.5 und Gl. 3.6; Gl. 3.46, Gl. 3.47, Gl. 3.48 und Gl. 3.49 respektive Gl. 3.50, Gl. 3.51, Gl. 3.52 und Gl. 3.53 sowie Gl. 3.54, Gl. 3.55, Gl. 3.56 und Gl. 3.57) und 15 Unbekannten (T_{He} , T_{Ha} , T_{Ke} , T_{Ka} , $\dot{m}_H$, $\dot{m}_K$, K_{HHe} , K_{HKe} , K_{HmH} , K_{HmK} , K_{KHe} , K_{KKe} , K_{KmH} , K_{KmK} sowie R_f).

Um das Gleichungssystem auflösen zu können, müssen fünf Unbekannte mittels Messungen bestimmt werden.

4.1.1 Wahl der Messgrößen für das Gleichungssystem

Die Uebertragungsfaktoren werden aus Messungen mit stationären Eingangs- und Ausgangssignalen bestimmt.

Es ist zu beachten, dass die für das Gleichungssystem vorzugebenden, direkt gemessenen oder aus Messungen berechneten Größen – Massenströme berechnet aus der Laufzeit von Temperaturänderungen zwischen zwei Temperaturfühlern –, nicht frei wählbar sind (siehe “Einfache Zusammenhänge zwischen einzelnen Uebertragungsfaktoren” Seite 33). Die Wahlfreiheit wird weiter dadurch eingeschränkt, dass mindestens ein Massenstrom oder ein Massenstromübertragungsfaktor als Vorgabe ins Gleichungssystem eingegeben werden muss, damit sich der Betriebspunkt und R_f bestimmen lassen.

Als Vorgabe wurde angenommen, dass alle instationären Eingangsgrößen gemessen werden.

Die Zahl der notwendigen Sensoren hängt von der Anzahl instationärer Eingangsgrößen ab. Wird nämlich nicht nur ein stationärer Zustand bestimmt (Anzahl instationäre Eingangsgrößen gleich null), sondern werden instationäre Verläufe beobachtet, so gibt ein und dasselbe Sensorpaar nicht nur zwei sondern drei Auskünfte, nämlich zusätzlich eine Information über die Auswirkungen der Aenderung einer Eingangsgröße auf die Aenderung einer Ausgangsgröße. Deshalb kann die Zahl der Sensoren kleiner sein als die vorzugebenden Größen (Tabelle 4.1).

Anzahl					
instationäre Eingangsgrößen	0	1	2	3	4
Gleichungen	2	4	6	8	10
Unbekannte	7	9	11	13	15
mindestens vorzugebende Größen	5	5	5	5	5
Sensoren	5	3	3	4	5

Tabelle 4.1: Anzahl vorzugebende Größen und Sensoren in Abhängigkeit der Anzahl instationärer Eingangsgrößen, die Anzahl Sensoren ergibt sich aus Tabelle 4.2

In der Tabelle 4.2 und in der Tabelle 4.3 sind die notwendigen Messungen zusammengestellt, abhängig davon, welche Eingangsgrößen konstant sind. Die Uebertragungsfaktoren können dabei aus den beteiligten Ein- und Ausgangsgrößen berechnet werden.

Die Tabellen enthalten nicht alle möglichen Sensorkombinationen; oft kann gewählt werden, ob auf der heißen oder auf der kalten Seite gemessen werden soll; in den Tabellen wurde bei zwei Möglichkeiten immer $\dot{m}_H$ respektive T_{Ha} gewählt.

Variiert zumindest die Temperatur eines Einganges und bleibt der entsprechende Massenstrom konstant, dann kann aus der Laufzeit des Fluides mittels Kreuzkorrelation zwischen den Temperaturein- und -ausgangssignalen der Massenstrom der entsprechenden Wärme-tauscherseite ermittelt werden. Die auf diese Weise ermittelten Massenströme sind in der Tabelle 4.2 mit (X) gekennzeichnet.

Eingang instationär				benötigte Größen					benötigte Sensoren					
$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	1	2	3	4	5	$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	T_{Ka}
				$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	T_{Ka}	X		X	X	X	X
X				$\dot{m}_H$	T_{Ha}	T_{Ka}	K_{HmH}	K_{KmH}	X				X	X
	X			$\dot{m}_K$	T_{Ha}	T_{Ka}	K_{HmK}	K_{KmK}		X			X	X
		X		$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HH}	(X)		X	X	X	
			X	$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ka}	K_{KK}		(X)	X	X		X
X	X			$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{Ha}	K_{HmH}	K_{HmK}	X	X			X	
X		X		$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ha}	K_{HmH}	K_{HH}	X		X		X	
X			X	$\dot{m}_H$	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HmH}	K_{HK}	X			X	X	
	X	X		$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ha}	K_{HmK}	K_{HH}		X	X		X	
	X		X	$\dot{m}_K$	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HmK}	K_{HK}		X		X	X	
		X	X	$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HH}	(X)		X	X	X	
X	X	X		$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ha}	K_{HmH}	X	X	X		X	
X	X		X	$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HmH}	X	X		X	X	
X		X	X	$\dot{m}_H$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HmH}	X		X	X	X	
	X	X	X	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	K_{HmK}		X	X	X	X	
X	X	X	X	$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	X	X	X	X	X	

Tabelle 4.2: Notwendige Messungen in Abhängigkeit von der Art der Eingangssignale, benötigte Größen möglichst direkt gemessen.

Messungen, aus welchen K-Werte berechnet werden, müssen nicht die Absolutwerte von Temperatur oder Massenstrom richtig erfassen, sondern es genügt, wenn die Änderungen korrekt gemessen werden. Das heisst, eine Nullpunktverschiebung kann toleriert wer-

4. Ermitteln des zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstandes infolge Verschmutzung

den. Falls Sensoren nur relativ und nicht absolut genaue Messungen ermöglichen, kann es somit von Interesse sein, ohne zusätzliche Sensoren möglichst viele (Tabelle 4.3) oder mit zusätzlichen Sensoren alle (Tabelle 4.4) direkt gemessenen Größen im Gleichungssystem zu vermeiden.

Eingang instationär				benötigte Größen					benötigte Sensoren					
$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	1	2	3	4	5	$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	T_{Ka}
X	X	X		K_{HmH}	K_{HmK}	K_{HH}	T_{He}	T_{Ha}	X	X	X		X	
X	X		X	K_{HmH}	K_{HmK}	K_{HK}	T_{Ke}	T_{Ha}	X	X		X	X	
X		X	X	K_{HmH}	K_{HH}	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	X		X	X	X	
	X	X	X	K_{HmK}	K_{HH}	T_{He}	T_{Ha}	T_{Ha}		X	X	X	X	
X	X	X	X	K_{HmH}	K_{HmK}	K_{HH}	T_{He}	T_{Ha}	X	X	X	X	X	

Tabelle 4.3: Notwendige Messungen in Abhängigkeit der Art der Eingangssignale, benötigte Größen möglichst nicht direkt gemessen (Absolutwerte), sondern aus gemessenen Aenderungen berechnet (Uebertragungsfaktoren K), keine zusätzlichen Sensoren im Vergleich zu Tabelle 4.2.

Eingang instationär				benötigte Größen					benötigte Sensoren					
$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	1	2	3	4	5	$\dot{m}_H$	$\dot{m}_K$	T_{He}	T_{Ke}	T_{Ha}	T_{Ka}
X	X	X		K_{HmH}	K_{KmH}	K_{HmK}	K_{KmK}	K_{HH}	X	X	X		X	X
X	X		X	K_{HmH}	K_{KmH}	K_{HmK}	K_{KmK}	K_{HK}	X	X		X	X	X
X	X	X	X	K_{HmH}	K_{KmH}	K_{HmK}	K_{KmK}	K_{HH}	X	X	X	X	X	X

Tabelle 4.4: Notwendige Messungen, um im Gleichungssystem nur Uebertragungsfaktoren K zu verwenden, damit auf direkt gemessene Größen (Absolutwerte) verzichtet werden kann, mit zusätzlichen Sensoren im Vergleich zu Tabelle 4.2.

4.1.2 Wahl der anzuregenden Wärmetauschereingangsgrößen und der zu messenden Ausgangstemperatur

Um die Parameter von Uebertragungsfunktionen schätzen zu können, müssen die Eingangs- und Ausgangsgrößen geeignet variieren. Diese Variationen können entweder durch den normalen Betrieb zustande kommen oder sie müssen gezielt erzeugt werden. Falls der konkrete Anwendungsfall die Wahl der anzuregenden Wärmetauschereingangsgrößen zulässt, sind bei dieser Wahl die folgenden Kriterien zu beachten:

1. Temperatureingänge variieren, da
 - die Massenströme oft indirekt aus der Laufzeit des Fluides zwischen Ein- und Ausgang berechnet werden können,

- Aenderungen der Massenströme unerwünschte Aenderungen der Zeitkonstanten der Temperatursensoren verursachen,
 - die Totzeiten der Totzeitglieder der Uebertragungsfunktionen von den Massenströmen abhängen.
2. Falls ein Massenstrom variiert werden muss, denjenigen Massenstrom ändern, der nur kleine Aenderungen der Zeitkonstanten der Temperatursensoren verursacht.
 3. Falls ein Massenstrom variiert werden muss, ihn auf derjenigen Seite ändern, auf welcher der Wärmeübergangskoeffizient wegen der Massenstromvariation weniger ändert.
 4. Ausgangstemperatur auf der Wärmetauscherseite ohne Massenstromänderung messen.
 5. Ausgangstemperatur auf der Wärmetauscherseite mit kurzer Verweilzeit des Fluides messen.
 6. Eine Eingangsgrösse variieren und eine Ausgangsgrösse messen, welche die Bestimmung eines k -Wert-sensitiven Uebertragungsfaktors ermöglichen (Kapitel 3.3.5 Seite 54).

4.1.3 Ermitteln von R_t mittels im voraus berechneter Werte

Prinzipiell kann R_t direkt aus dem zuvor beschriebenen Gleichungssystem berechnet werden. Dieses Vorgehen verursacht jedoch einen beträchtlichen numerischen Aufwand. Zudem führen Ungenauigkeiten der gemessenen Eingabedaten zu Konvergenzproblemen. Als Alternative können die Uebertragungsfaktoren und gemessene Grössen mit im voraus berechneten Wertegruppen (Vektoren) verglichen werden. Diese Vektoren enthalten die Uebertragungsfaktoren, die Ein- und Ausgangsgrössen sowie die Abnützung; sie werden im Bereich aller erwarteten Betriebspunkte und Abnützungswerte berechnet. Für die Darstellung des Anlagezustandes oder für manuelle Auswertungen können sie als Diagramme dargestellt werden.

Bei der zweiten Vorgehensweise kann ein wesentlicher Teil des rechnerischen Aufwandes im voraus erbracht werden.

4.2 Bestimmung der Uebertragungsfunktionsparameter – praktische Aspekte

4.2.1 Dynamisches Verhalten der Massenstromstelleinrichtung

Häufig wird es in der Praxis aus finanziellen Gründen nicht möglich sein, Massenstromänderungen direkt zu messen. In diesen Fällen ist es notwendig, von einer Stellgrösse auf den Massenstrom zu schliessen. Als Stelleinrichtungen kommen Drosselklappen und Ventile sowie Pumpenmotoren mit mehreren Drehzahlen in Frage, deren dynamisches Verhalten modelliert und bei der Parameterschätzung berücksichtigt werden muss.

4.2.2 Dynamisches Verhalten der Temperatursensoren

Das dynamische Verhalten der Temperatursensoren (Thermoelemente und Pt-100-Widerstandsthermometer) kann in zwei Bereiche geteilt werden,

- a) einen, in dem das Verhalten durch den Wärmeübergang Fluid-Sensor bestimmt wird und
- b) einen zweiten, in dem der Wärmetransport im Sensor selbst mitzuberechnen ist.

a) Wärmeübergang Fluid-Sensor bestimmend

Dieser Fall trifft oft für strömende Gase zu. Lieneweg (1976) definiert als Bereich für dieses Verhalten $Bi < 0.16$ (Biotzahl $Bi = \alpha_s / \lambda_s \cdot l_r$, $l_r = d/2$). Ist diese Bedingung erfüllt, kann der Temperatursensor als System 1. Ordnung modelliert werden.

$$\tau_s = \tau_{s0} \cdot \frac{\alpha_{s0}}{\alpha_s}$$

Gl. 4.1

Bei einem gegebenen Sensor hängt die Zeitkonstante nur von der Strömungsgeschwindigkeit ab, sie ändert sich umgekehrt proportional zum Wärmeübergangskoeffizienten α .

b) Interner Wärmeübergang des Sensors mitbestimmend

Wird die Temperatur von Flüssigkeiten gemessen, ist oft der interne Wärmeübergang zwischen verschiedenen Sensorschichten für das dynamische Verhalten mitbestimmend. Diese Sensoren verhalten sich nicht genau wie Systeme 1. Ordnung und würden deshalb eine aufwendige Sensormodellierung verlangen. Um dies zu vermeiden und die Biotzahl so tief zu treiben, dass der Fühler trotzdem als System 1. Ordnung approximiert werden darf, empfiehlt es sich, flinke Sensoren mit möglichst hoher äquivalenter Leitfähigkeit λ_s , also kleiner Biotzahl zu wählen, welche aus wenigen Schichten bestehen und keine internen Luftschichten aufweisen.

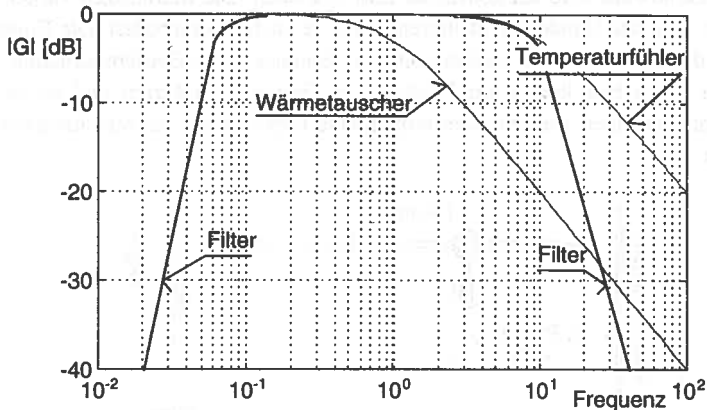
4.2.3 Gleichzeitigkeit der Messung, Messort der Temperaturen

In der Praxis darf die Zeit zwischen den Messungen einzelner Größen oft nicht vernachlässigt werden, da die Messeinrichtungen (z. B. Speicherprogrammierbare Steuerungen) die verschiedenen Größen häufig nicht schnell nacheinander messen können. Bei der Messung von Temperaturen langsam strömender Medien spielt zudem der Messort eine Rolle, da die Temperaturen meistens nicht unmittelbar vor und nach dem Wärmetauscher gemessen werden können.

Der Messort und die Messzeit können entweder direkt bei der Parameterschätzung im Wärmetauschermodell oder vorgängig bei der Datenvorbereitung berücksichtigt werden.

4.2.4 Datenvorbereitung

Vor der eigentlichen Parameterschätzung werden die Daten gefiltert und der Messort und die Messzeit berücksichtigt. Als Referenzzeit wird z. B. die Messzeit des Kühlwassermassenstroms gewählt.



Figur 4.1: Bodediagramm Filterung-Temperatur Sensordynamik-Wärmetauscher, normiert mit der Eckfrequenz eines Wärmetauschers, der als System 1. Ordnung modelliert werden kann

4.3 Ermitteln von R_f bei einem Abgaswärmetauscher

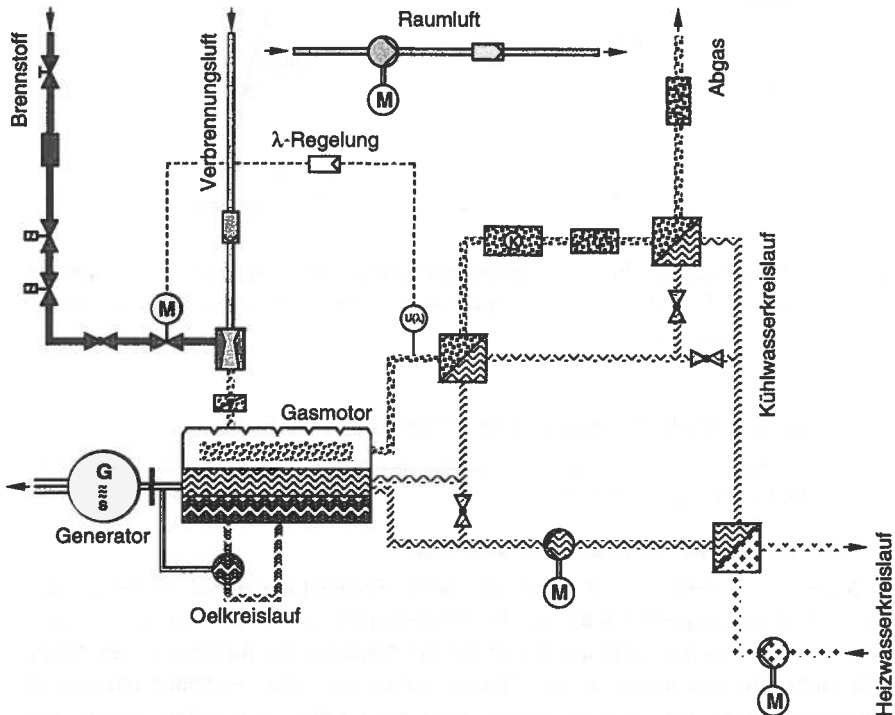
Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Abgaswärmetauscher eines Blockheizkraftwerkes durchgeführt.

4.3.1 Funktionsweise des Blockheizkraftwerkes

Ein Ottomotor, in welchem ein stöchiometrisches Erdgas-Luftgemisch verbrannt wird, treibt einen Synchrongenerator an, welcher Wechselstrom an das Elektrizitätsnetz abgibt (Figur 4.2). Der Gasmotor wird mit Wasser gekühlt. Nachdem das Kühlwasser den Motorblock durchströmt hat, passiert es den Abgasvorkühler. Der Abgasvorkühler reduziert die Abgastemperatur so weit, dass die Abgase durch einen Katalysator geführt werden können. Im Abgaskatalysator wird die Schadstoffmenge vermindert. Nach dem Katalysator werden die Abgase im Abgaswärmetauscher durch das Kühlwasser möglichst stark abgekühlt und nachher über einen Kamin an die Umgebung abgegeben. Das Kühlwasser wird nach dem Abgaswärmetauscher in den Kühlwasserwärmetauscher geleitet. Es gibt dort

Wärme an den Heizkreislauf ab und strömt danach, wieder mit tiefer Temperatur, in den Motorblock. Das Kühlwassertemperaturniveau wird durch eine heizwasserseitig eingreifende Vorlauf-Regelung konstant gehalten. Der Kühlwasserkreislauf wird durch eine Pumpe angetrieben. Diverse Bypassrohre und Drosselklappen dienen der Feinregulierung des Kühlwasserkreislaufes bei der Inbetriebnahme.

Das Blockheizkraftwerk wird bei konstanter Last betrieben. Die Betriebszeit variiert zwischen weniger als einer Stunde und mehreren Tagen, je nach Wärmebedarf. Die Eingangstemperaturen der Wärmetauscher sind ein bis zwei Stunden nach Betriebsaufnahme konstant. Bei den Versuchen¹ konnte die Leistung des Gasmotors reduziert und so der Abgasmassenstrom verringert werden. Dies ermöglichte Experimente bei verschiedenen Betriebspunkten.



Figur 4.2: Blockheizkraftwerk, hydraulische Einbindung der Wärmetauscher

¹ Die Versuche wurden an einer im praktischen Einsatz stehenden Anlage durchgeführt, welche mit einigen zusätzlichen Sensoren instrumentiert wurde.

4.3.2 Anregung der Abgaswärmetauschereingangsgrößen

Der Wärmetauscherzustand könnte mit der Anregung eines der beiden oder beider Temperatureingänge allein mit dem geringsten Aufwand erfasst werden (Tabelle 4.1 Seite 62 und Tabelle 4.2 Seite 63). Im untersuchten Fall können die Eingangstemperaturen jedoch nicht direkt beeinflusst werden. Da die indirekt durch die heizwasserseitige Regelung induzierten Temperaturschwankungen im Kühlwasserkreislauf für die Schätzung der Modellparameter zu klein sind, muss der Kühlwassermassenstrom variiert werden. Die Änderungen werden durch sprunghaftes Verstellen von Drosselklappen erzwungen.

Die Kühlwassermassenstromänderung bewirkt indirekt die Änderung der Eingangstemperaturen, so dass sich gesamthaft drei Eingangsgrößen ändern und nur eine, der Abgasmassenstrom, während eines Messabschnitts konstant bleibt.

Als Ausgangsgrösse wurde die Abgastemperatur gemessen, da der Kühlwassermassenstrom variiert wird und da die Verweilzeit der Abgase im Wärmetauscher sehr kurz ist (nach Kriterien Kapitel 4.1.2).

4.3.3 Temperatursensoren Abgaswärmetauscher

Abgasseitig entspricht das Verhalten der Temperatursensoren dem Fall a) und kann ohne Vorbehalte mit Systemen 1. Ordnung nachgebildet werden ($Bi < 0.01$ für alle Betriebspunkte). Kühlwasserseitig entspricht das Sensorverhalten dem Fall b) ($Bi > 0.2$), es wird mit einem System 1. Ordnung approximiert.

4.3.4 Konstruktions- und Auslegungsdaten des Abgaswärmetauschers

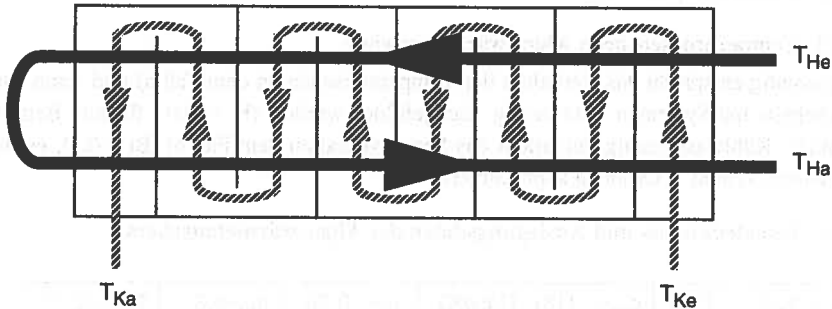
$T_{He} = 520$ [°C]	$c_{pH} = 1181$ [J/kg/K]	$p_H = 0.70$	$m_H = 0.8$	$Tb_H = 2.77$
$T_{Ha} = 120$ [°C]	$c_{pHe} = 1216$ [J/kg/K]	$q_H = 0.074$	$n_H = 0.33$	$Tb_K = 1.71$
$T_{Ke} = 91.5$ [°C]	$c_{pHa} = 1143$ [J/kg/K]	$r_H = 0.85$	$b_H = 0.26$	$\Delta T_{rH} = 766$
$T_{Ka} = 95$ [°C]	$c_{pK} = 4208$ [J/kg/K]	$p_K = -4.1$	$m_K = 0.8$	$\Delta T_{rK} = 24.9$
$\dot{m}_H = 0.56$ [kg/s]	$c_{pKe} = 4207$ [J/kg/K]	$q_K = 0.087$	$n_K = 0.33$	$\gamma_{He} = 1.03$
$\dot{m}_K = 17.2$ [kg/s]	$c_{pKa} = 4210$ [J/kg/K]	$r_K = 0.27$	$b_K = 2.12$	$\gamma_{Ha} = 0.97$
$\mu_K = 0.0090$	$NTU_{K\alpha H} = 0.0273$	$\Phi_K = 0.008$		$\gamma_{Ke} = 1$
$NTU_K = 0.0269$	$NTU_{K\alpha K} = 2.72$	$\Phi_H = 0.945$		$\gamma_{Ka} = 1$

Tabelle 4.5 Konstruktions- und Auslegungsdaten des Abgaswärmetauschers

4.3.5 Uebertragungsfunktionen Abgas-Kühlwasser Kreuzgegenstrom-Rohrbündelwärmetauscher

Stromführung

Die Stromführung des Kreuzgegenstrom-Rohrbündelwärmetauschers ist in Figur 4.3 skizziert. Für die Berechnung der Uebertragungsfaktoren muss die dieser Stromführung am besten entsprechende analytisch beschriebene Stromführung ausgewählt werden (Kapitel 3.2.6 Seite 35). In diesem Fall kommen die Funktionen für den Haarnadeleinsatz oder für Gegenstromführung in Frage. Die Funktion für Haarnadelstromführung geht von einer Quervermischung des Aussenstromes aus (siehe Bosnjakovic et al (1951) Seite 25). Im hier untersuchten Fall wird die Quervermischung des Aussenstromes durch zahlreiche Umlenkbliche unterbunden, so dass die Gegenstromführung den wirklichen Gegebenheiten näher kommt.



Figur 4.3: Stromführung des Abgaswärmetauschers

Dynamische Eigenschaften

Der Kreuzgegenstrom-Rohrbündelwärmetauscher wurde numerisch untersucht, um dynamische Eigenschaften zu klären, welche experimentell nicht ermittelt werden konnten. Die Diskretisierung bei der numerischen Untersuchung wurde derart vorgenommen, dass während eines Zeitschrittes der Berechnung die Strömung genau um eine Zellenlänge fortschreitet. Dies erforderte auf beiden Seiten des Wärmetauschers eine unterschiedliche Zahl von Zellen und, da sprunghafte Änderungen der Massenströme untersucht wurden, eine variable Zellenlänge, respektive Zellenanzahl.

Als Resultat der numerischen Untersuchungen und gestützt auf die in Kapitel 3.4.2 Seite 59 erwähnte Literatur werden für diesen Wärmetauscher die folgenden Uebertragungsfunktionen verwendet:

$$G_{HH}(s) = K_{HH}$$

Gl. 4.2

Die Wärmekapazität des Abgases ist im Vergleich zur Wärmekapazität der Wärmetauscherwände so klein, der Wärmeübergang Abgas-Wand so gross und die Durchströmzeit des Abgases durch den Wärmetauscher so kurz, dass sich Aenderungen der Abgaseingangstemperatur praktisch verzugslos am Abgasausgang auswirken.

$$G_{HK}(s) = \frac{K_{HK}}{1 + \tau_{HK} \cdot s}$$

Gl. 4.3

Die Wärmekapazität des Kühlwassers ist im Vergleich zu den Wärmekapazitäten des Abgases und der Wärmetauscherwände so gross und die Durchströmzeit des Abgases durch den Wärmetauscher so kurz, dass sich der Zusammenhang zwischen Aenderung der Kühlwassereingangstemperatur und Aenderung der Abgasausgangstemperatur mit einem System 1. Ordnung beschreiben lässt.

$$G_{HmK}(s) = \frac{K_{HmK}}{1 + \tau_{HmK} \cdot s}$$

Gl. 4.4

Für die Begründung der Verwendung eines Systems 1. Ordnung für G_{HmK} gelten die gleichen Argumente wie für G_{HK} .

Die Uebertragungsfunktion G_{HmH} wird nicht benötigt, da im untersuchten Fall der Abgasmassenstrom während der Messung konstant bleibt.

Die Uebertragungsfunktionen für den Kühlwassertemperaturausgang werden nicht benötigt (Kapitel 4.3.2).

Uebertragungsfaktoren

Mit Hilfe der Diagramme von Kapitel 3.3 "Uebertragungsfaktor-Sensitivitätsuntersuchungen" können die Uebertragungsfaktoren beurteilt werden (Vorgehen analog zu Beispiel Seite 42).

Konkreter Fall: $\mu_K = 0.009$, $NTU_K = 0.027$

- Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren:

K_{HK}	Figur 3.7 Seite 45	$1/NTU_{K\alpha H} \cdot b_H / T_{bH} = 10$	-5% Abweichung
	im konkreten Fall	$1/NTU_{K\alpha H} \cdot b_H / T_{bH} = 3.4$	-1.7% Abweichung
	Figur A 3 Seite A 4	$1/NTU_{K\alpha K} \cdot b_K / T_{bK} = 4$	-5% Abweichung
	im konkreten Fall	$1/NTU_{K\alpha K} \cdot b_K / T_{bK} = 0.46$	-0.6% Abweichung
K_{HH}	Figur A 6 Seite A 5	$1/NTU_{K\alpha H} \cdot b_H / T_{bH} = 0.8$	-5% Abweichung
	im konkreten Fall	$1/NTU_{K\alpha H} \cdot b_H / T_{bH} = 3.4$	-20% Abweichung
	Figur A 7 Seite A 6	$1/NTU_{K\alpha K} \cdot b_K / T_{bK} = 30$	-5% Abweichung

	im konkreten Fall	$1/NTU_{KaK} \cdot b_K / Tb_K = 0.46$	-0.1% Abweichung
K_{HmK}	Figur A 10 Seite A 7	$1/NTU_{KaH} \cdot b_H / Tb_H = 10$	-5% Abweichung
	im konkreten Fall	$1/NTU_{KaH} \cdot b_H / Tb_H = 3.4$	-1.7% Abweichung
	Figur A 14 Seite A 9	$1/NTU_{KaK} \cdot b_K / Tb_K = 1.5$	-5% Abweichung
	im konkreten Fall	$1/NTU_{KaK} \cdot b_K / Tb_K = 0.46$	-1.5% Abweichung

$\Rightarrow K_{HH}$ ist stark von Aenderungen der Mitteltemperatur abhängig (nicht im Sinne von betriebspunktbedingten Aenderungen der Mitteltemperatur, sondern von dynamikbedingten Aenderungen).

- *Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten auf die Uebertragungsfaktoren:*

Die Werte γ_{HE} und γ_{Ha} weichen mehr als 1% von 1 ab (Tabelle 4.5 Seite 69). Sie müssen daher bei der Berechnung der Uebertragungsfaktoren berücksichtigt werden. Eine einfache Quantifizierung ihres Einflusses auf die einzelnen Uebertragungsfaktoren ist nicht möglich. Die Berechnungen für Tabelle 3.4 Seite 46 ergaben einen Einfluss von 13% auf K_{HH} und Einflüsse von weniger als 1% auf K_{HK} und K_{HmK} .

- *Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten respektive die Uebertragungsfaktoren:*

$K_{HmKg} / \Delta Tr_K$	Figur A 17 Seite A 11	$m_K / NTU_{KaK} = 0.01$	+5% Abweichung
	im konkreten Fall	$m_K / NTU_{KaK} = 0.3$	ca.+150% Abweichung

$\Rightarrow K_{HmK}$ ist sehr stark von der Aenderung des Wärmeüberganges wegen Kühlwasser-massenstromänderung abhängig.

- *Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren:*

K_{HK} hängt nicht von der Stromführung ab (Figur 3.9 Seite 50).

K_{HH} ist bei Gleichstrom ca. 15% kleiner als bei Gegenstrom (Figur 3.10 Seite 50).

K_{HmK} erreicht bei Gleichstrom nur ca. 15% des Gegenstromwertes (Figur 3.12 Seite 52).

Die Differenz zwischen Gegen- und Gleichstrom wird für K_{HmK} etwas überschätzt, da Figur 3.12 für $m_K / NTU_{KaK} = 0$ gilt, für den untersuchten Wärmetauscher aber ist $m_K / NTU_{KaK} = 0.3$ (im Vergleich dazu ist die Figur 3.13 für $m_K / NTU_{KaK} = 1/NTU_K = 30$ gültig, Figur 3.12).

$\Rightarrow$ Für die Beurteilung von K_{HmK} ist die korrekte Modellierung der Stromführung ausschlaggebend, für K_{HH} darf sie nicht ausser acht gelassen werden.

- *k-Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren:*

Die Figur 3.16 Seite 54 zeigt eine starke NTU_K - respektive R_f -Abhängigkeit der Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HK} , währendem K_{HmK} nur wenig von NTU_K - respektive R_f abhängt (Figur 3.18 Seite 56).

$\Rightarrow K_{HH}$ und K_{HK} sind geeignete Indikatoren für R_f .

Die den beiden erwähnten Figuren entnommenen Werte der Uebertragungsfaktoren betragen etwa:

$$K_{HKG_g} = 0.95$$

$$K_{HHG_g} = 0.05$$

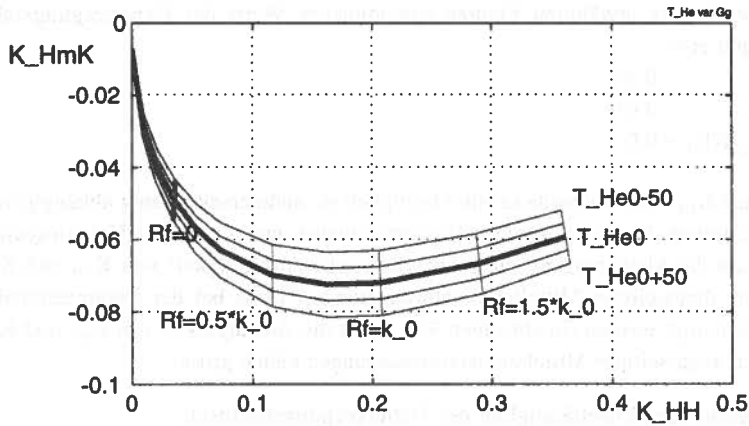
$$K_{HmKG_g}/\Delta Tr_K < 0.01$$

⇒ K_{HH} und K_{HK} sind einerseits sensitiv bezüglich R_f , andererseits wenig abhängig von der Stromführung. Dies sind günstige Voraussetzungen, um von diesen Uebertragungsfaktoren auf die Abnützung zu schliessen. Die starke Abhängigkeit von K_{HH} und K_{HK} bezüglich abgasseitiger Mitteltemperaturänderungen muss bei der Parameterschätzung berücksichtigt werden (in absoluten Werten ist die Abhängigkeit von K_{HH} und K_{HK} bezüglich abgasseitiger Mitteltemperaturänderungen gleich gross).

4.3.6 Betriebspunktabhängigkeit der Uebertragungsfaktoren

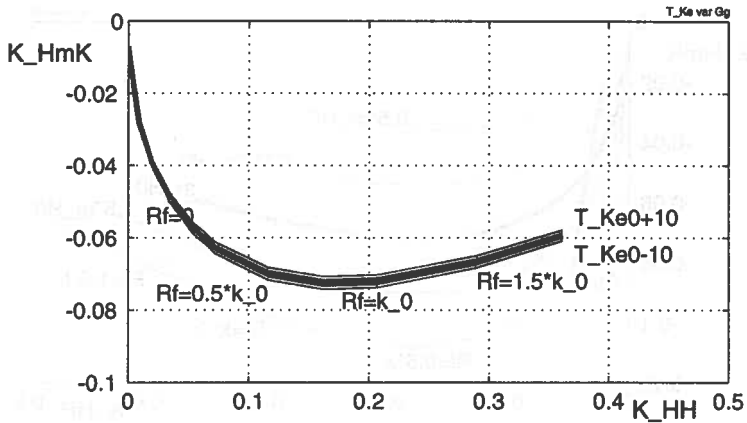
Um die Abhängigkeit der Uebertragungsfaktoren von Betriebspunktänderungen der einzelnen Eingangsgrössen beurteilen zu können, werden die Eingangsgrössen im Bereich der erwarteten Betriebspunkte variiert. So kann eruiert werden, welche Uebertragungsfaktoren sich besonders gut als Indikatoren für die Abnützung eignen.

Die Summe der Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HK} ergibt über dem gesamten untersuchten Betriebspunktbereich $1 \pm 2\%$ (vergleiche "Einfache Zusammenhänge zwischen einzelnen Uebertragungsfaktoren" Seite 33), daher werden im folgenden nur die Zusammenhänge zwischen K_{HH} und K_{HmK} dargestellt. Die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte wurde bei den Berechnungen berücksichtigt.



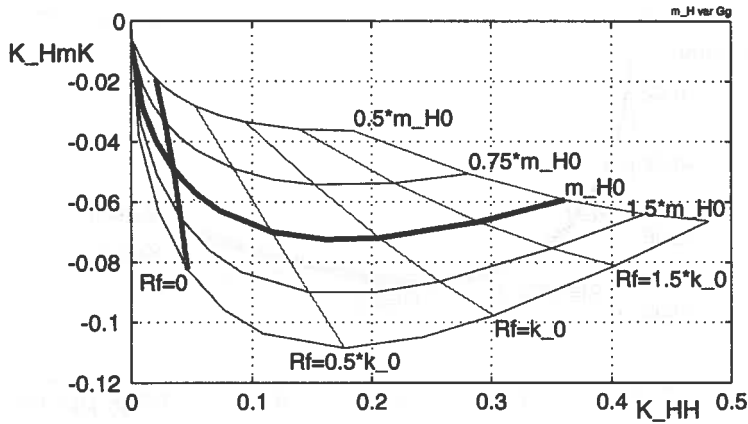
Figur 4.4: Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} in Abhängigkeit der Verschmutzung R_f und der Eingangstemperatur T_{He} für die Sollwerte von T_{Ke} , $\dot{m}_H$ und $\dot{m}_K$ (T_{Ke0} , $\dot{m}_{H0}$, $\dot{m}_{K0}$) (R_f als vielfaches des Wärmedurchgangswiderstandes des unverschmutzten Wärmetauschers, T_{He} als Abweichung von der Auslegungseingangstemperatur T_{He0})

⇒ Änderungen der Eingangstemperatur T_{He} beeinflussen den Uebertragungsfaktor K_{HH} nur sehr wenig, er hängt praktisch nur von der Verschmutzung R_f ab. K_{HmK} wird vor allem durch R_f und nur wenig durch T_{He} beeinflusst.



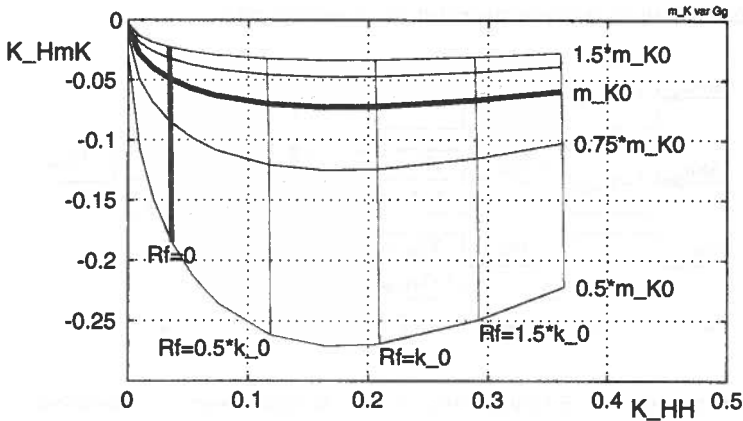
Figur 4.5: Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} in Abhängigkeit der Verschmutzung R_f und der Eingangstemperatur T_{Ke} für die Sollwerte von T_{He} , $\dot{m}_H$ und $\dot{m}_K$ (T_{He0} , $\dot{m}_{H0}$, $\dot{m}_{K0}$) (R_f als vielfaches des Wärmedurchgangswiderstandes des unverschmutzten Wärmetauschers, T_{Ke} als Abweichung von der Auslegungseingangstemperatur T_{Ke0})

⇒ Änderungen der Eingangstemperatur T_{Ke} beeinflussen die Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} nur sehr wenig, beide hängen beide praktisch nur von der Verschmutzung R_f ab.



Figur 4.6: Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} in Abhängigkeit der Verschmutzung R_f und des Massenstromes $\dot{m}_H$ für die Sollwerte von T_{He} , T_{Ke} und $\dot{m}_K$ (T_{He0} , T_{Ke0} , $\dot{m}_{K0}$) (R_f als vielfaches des Wärmedurchgangswiderstandes des unverschmutzten Wärmetauschers, $\dot{m}_H$ als vielfaches des Auslegungsmassenstromes $\dot{m}_{H0}$)

⇒ Änderungen des Massenstromes $\dot{m}_H$ beeinflussen die Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} stark. K_{HH} und K_{HmK} hängen gleichermassen von der Verschmutzung R_f und von $\dot{m}_H$ ab.



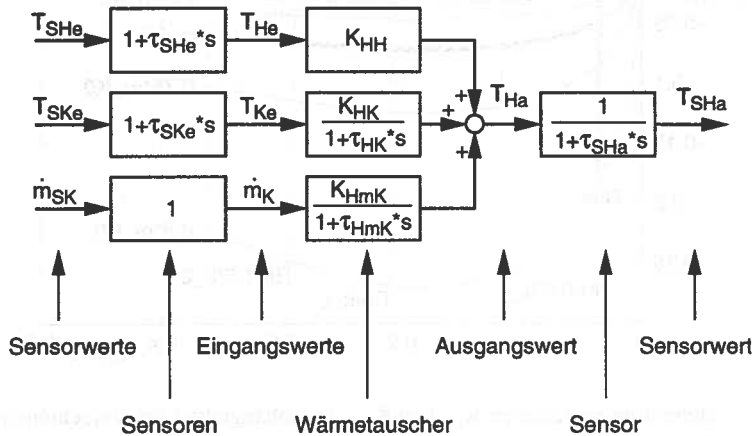
Figur 4.7: Uebertragungsfaktoren K_{HH} und K_{HmK} in Abhängigkeit der Verschmutzung R_f und des Massenstromes $\dot{m}_K$ für die Sollwerte von T_{He} , T_{Ke} und $\dot{m}_H$ (T_{He0} , T_{Ke0} , $\dot{m}_{H0}$) (R_f als vielfaches des Wärmedurchgangswiderstandes des unverschmutzten Wärmetauschers, $\dot{m}_K$ als vielfaches des Auslegungsmassenstromes $\dot{m}_{K0}$)

⇒ Änderungen des Massenstromes $\dot{m}_K$ beeinflussen den Uebertragungsfaktor K_{HH} nur sehr wenig, er hängt praktisch nur von der Verschmutzung R_f ab. K_{HmK} wird durch R_f und durch $\dot{m}_K$ beeinflusst.

Beurteilung der Betriebspunktabhängigkeit

K_{HH} hängt nur von R_f und $\dot{m}_H$ ab und bleibt im Bereich der untersuchten Betriebspunktveränderungen von T_{He} , T_{Ke} und $\dot{m}_K$ nahezu konstant. K_{HmK} wird nur wenig durch Betriebspunktveränderungen von T_{He} und T_{Ke} beeinflusst, so dass für diesen Uebertragungsfaktor nur die Einflüsse von R_f , $\dot{m}_H$ und $\dot{m}_K$ auseinanderzuhalten sind. Es sind somit drei Größen zu beachten, nämlich R_f , $\dot{m}_H$ und $\dot{m}_K$. Daraus folgt, dass sich R_f mit der Kenntnis von K_{HmK} und K_{HH} , respektive $K_{HK} = c - K_{HH}$, sowie von $\dot{m}_H$ oder $\dot{m}_K$, unabhängig vom momentanen Betriebspunkt bestimmen lässt.

4.3.7 Signalflussbild, Abgastemperatur als Ausgangsgrösse



Figur 4.8: Signalflussbild mit Sensoren, Abgastemperatur als Ausgangsgrösse

Die Temperaturfühler werden als Systeme 1. Ordnung modelliert und ihre Zeitkonstanten werden mit Hilfe der Sensorherstellerangaben unter Berücksichtigung der effektiven Wärmeübergangsverhältnisse Fluid-Sensor berechnet (Lieneweg, 1976). Für die Erfassung des Massenstroms wird eine verzögerungsfreie Messung angenommen. Die Transportzeiten für die Fluide zwischen Messort und Wärmetauscher werden zusammen mit den Messzeitpunktunterschieden der einzelnen Messungen bei der Datenvorverarbeitung berücksichtigt.

4.3.8 Zustandsraummodell in beobachtbarer Standardform

Für die Schätzung der Wärmetauschermodellparameter wird ein Zustandsraummodell in Standardform benutzt:

$$\dot{\vec{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix}}_A \cdot \vec{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & b_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{53} \end{bmatrix}}_B \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{He}(t) \\ \Delta T_{Ke}(t) \\ \Delta \dot{m}_K(t) \end{bmatrix}$$

$$\Delta T_{Ha}(t) = \underbrace{[1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0]}_C \cdot \vec{x}(t) + \underbrace{[d_{11} \quad 0 \quad 0]}_D \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{He}(t) \\ \Delta T_{Ke}(t) \\ \Delta \dot{m}_K(t) \end{bmatrix}$$

Gl. 4.5

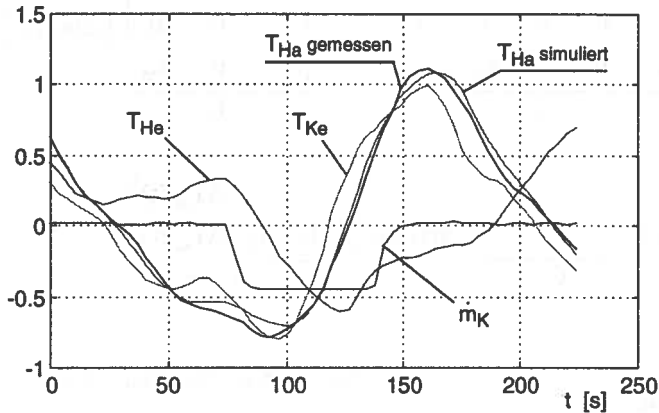
$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{1}{\tau_{SHa}} & b_{11} &= -K_{HH} \cdot a_{11} \cdot (\tau_{SHe} \cdot a_{11} - 1) \\ a_{32} &= -\frac{1}{\tau_{HK} \cdot \tau_{SHa}} & b_{22} &= -K_{HK} \cdot \tau_{SHe} \cdot a_{32} \\ a_{33} &= -\left(\frac{1}{\tau_{HK}} + \frac{1}{\tau_{SHa}} \right) & b_{32} &= -K_{HK} \cdot a_{32} + a_{33} \cdot b_{22} \\ a_{54} &= -\frac{1}{\tau_{HmK} \cdot \tau_{SHa}} & b_{53} &= -K_{HmK} \cdot a_{54} \\ a_{55} &= -\left(\frac{1}{\tau_{HmK}} + \frac{1}{\tau_{SHa}} \right) & d_{11} &= -K_{HH} \cdot \tau_{SHe} \cdot a_{11} \end{aligned}$$

Gl. 4.6

Bei der Parameterschätzung wird zusätzlich der Zusammenhang $K_{HH} + K_{HK} \equiv c$ ($c = 0.985$) berücksichtigt. Diese Annahme ist für diesen Wärmetauscher im in Kapitel 4.3.6 untersuchten Betriebsbereich zweckmässig; sie ermöglicht eine zuverlässigere Parameterschätzung, verursacht aber systematische Fehler. Die numerischen Untersuchungen zeigten, dass $\tau_{HK} \equiv \tau_{HmK}$ ist; diese Eigenschaft wird bei der Parameterschätzung ebenfalls berücksichtigt. Mit diesen beiden Vereinfachungen sind nur noch eine Zeitkonstante und zwei Uebertragungsfaktoren zu bestimmen.

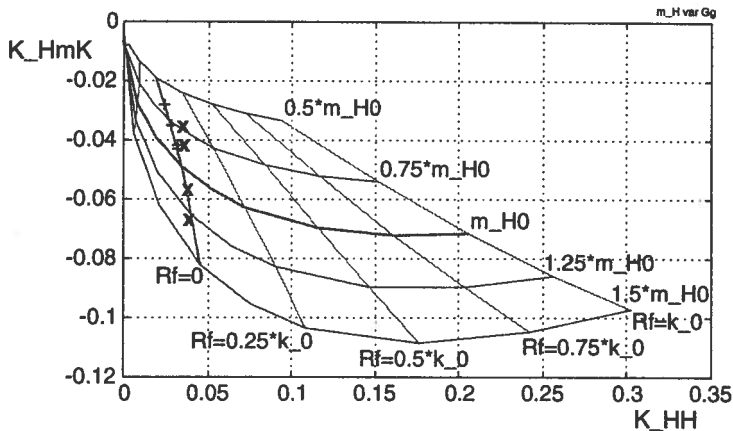
Die Parameterschätzung wurde mit den Werkzeugen von Ljung (1992) und (1987) durchgeführt. Die verwendete Methode basiert auf der iterativen Suche des Minimums einer quadratischen Zielfunktion.

4.3.9 Messdatenbeispiel



Figur 4.9: Reaktion der Abgastemperatur T_{Ha} auf Änderungen der Eingangsgrößen T_{He} , T_{Ke} und $\dot{m}_K$, wobei die Massenstromänderungen künstlich erzwungen wurden; die Änderungen der Temperaturmesswerte sind in [K], die Massenstromänderungen relativ zum Nennwert aufgetragen. T_{Ha} -simuliert wurde mit den geschätzten Modellparametern berechnet.

4.3.10 Parameterschätzergebnisse



Figur 4.10: Experimentell ermittelte Uebertragungsfaktoren im Vergleich zu den im voraus berechneten. Berechnete Werte +, experimentell ermittelte Werte x

Beurteilung der Schätzergebnisse

Die Experimente wurden alle kurz nacheinander durchgeführt, so dass der Wärmetauscher während der Versuchszeit nicht zusätzlich verschmutzen konnte. Die für verschiedene Betriebspunkte ermittelten Parameter müssten folglich auf einer Linie konstanter Verschmutzung R_f liegen. Werden die Schätzergebnisse für die einzelnen untersuchten Betriebspunkte gemittelt, wird diese Erwartung erfüllt.

Für die Betriebspunkte ergeben sich Abweichungen zwischen den erwarteten (+) und den experimentell ermittelten Werten (x). Dies kann einerseits auf nicht ganz zutreffende Wärmeübergangskoeffizienten α zurückgeführt werden. Andererseits entspricht die Stromführung des Wärmetauschers nicht genau den Modellannahmen, so dass ein Teil der Abweichung durch Stromführungsmodellierungsfehler verursacht wird. An sich könnte Übereinstimmung erzielt werden, wenn die α -Werte und die Stromführung angepasst würden; dies ist aber in diesem Fall nicht erforderlich, da bei der Ueberwachung eine R_f Differenz ermittelt werden soll, welche hier ohne diese Korrektur schon klar ersichtlich ist. Je nach Situation kann ein Abgleich jedoch zu notwendig sein, da im sauberen Zustand die wirklichen Werte von den geplanten Auslegungswerten abweichen können.

4. Ermitteln des zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstandes infolge Verschmutzung

Für den zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand R_f wurde der Wert 0 ermittelt. Dies bedeutet, dass zum Versuchszeitpunkt der Wärmedurchgangswiderstand dem Auslegungswert entsprach.



Die Messung des zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstandes R_f wurde durchgeführt, um den Einfluss von Verschmutzungen auf den Wärmedurchgang zu quantifizieren. Der gemessene Wert von $R_f = 0$ zeigt, dass die Wärmeübertragung im Versuchszeitpunkt dem Auslegungswert entspricht. Dies ist ein positives Ergebnis, das darauf hindeutet, dass die Bauteile in gutem Zustand sind und keine signifikanten Verschmutzungen vorliegen. Die Messung wurde unter standardisierten Bedingungen durchgeführt, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wärmetauscher sind Systeme mit verteilten Parametern, deren dynamisches Verhalten betriebspunktabhängig ist. Die analytische Modellierung der Wärmetauscher führt zu komplizierten Gleichungen, welche für die Parameterschätzung kaum verwendet werden können. Das dynamische Verhalten kann für praktische Anwendungen jedoch vereinfacht mit Systemen 1. oder 2. Ordnung sowie Totzeit mit guter Genauigkeit beschrieben werden.

Für die Ermittlung der Abnutzung wird auf die Uebertragungsfaktoren zurückgegriffen, denn diese können aus den Gleichungen, welche das stationäre Verhalten beschreiben, ermittelt werden.

5.1 Aufwand, Eignung und Schwierigkeiten bei der Anwendung der Methode in Bezug auf die betrieblichen Randbedingungen

Die Wärmetauscherabnutzung kann durch Beobachten und Analysieren des zeitlichen Verlaufes von Wärmetauschereingangs- und -ausgangsgrößen überwacht werden. Die technische und kommerzielle Anwendbarkeit der ausgearbeiteten Wärmetauscherüberwachungsmethode hängt wesentlich von den betrieblichen Randbedingungen der einzelnen Anlage ab.

Wird ein Wärmetauscher in verschiedenen Betriebspunkten verwendet, erschwert dies die Handhabung der Methode nicht erheblich; der Aufwand und die Schwierigkeiten hängen vielmehr davon ab, ob nur die Eingangstemperaturen oder auch die Massenströme variieren.

Fluktuieren die Massenströme oder Eingangstemperaturen eines Wärmetauschers so stark, dass nicht mehr von beschränkten kleinen Aenderungen um einen Betriebspunkt gesprochen werden kann, dann ist die Methode in der vorliegenden Form nicht anwendbar.

Massenströme stationär

Die günstigsten Verhältnisse für die Anwendung der Ueberwachungsmethode liegen dann vor, wenn die Massenströme konstant gehalten und die Eingangstemperaturen variiert werden können. Unter diesen Voraussetzungen kann der Wärmetauscher in einem Betriebspunkt als lineares, zeitinvariantes System behandelt und die Modellparameter

können zuverlässig bestimmt werden. Die Massenströme müssen in diesem Fall meistens nicht durch Massenstrommessgeräte bestimmt werden, denn sie lassen sich indirekt über die Laufzeit von Temperaturänderungen zwischen Wärmetauscher Ein- und Ausgang berechnen. Bei konstantem Massenstrom ändert sich zudem der Wärmeübergang zwischen strömendem Medium und Temperaturfühler kaum, so dass während eines einzelnen Experimentes das dynamische Verhalten des Messfühlers konstant bleibt.

Massenströme instationär

Ändert ein Massenstrom oder variieren beide während der Parameterschätzung, verhält sich der Wärmetauscher nicht mehr streng linear, und er darf nicht mehr a priori als zeitinvariantes System betrachtet werden. Das nichtlineare Verhalten wird durch die Massenstromabhängigkeit des Wärmeüberganges, die Zeitabhängigkeit durch die sich ändernde Verweilzeit der Medien verursacht. Liegen nicht spezielle, in den folgenden Abschnitten erläuterte Verhältnisse vor, müssen nichtlineare Modelle und entsprechend leistungsfähige Parameterschätzmethoden eingesetzt werden.

Wärmetauscher mit sehr kleinem oder sehr grossem Wärmekapazitätsstromverhältnis und mit zumindest um eine Größenordnung verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten können dann als lineare Systeme behandelt werden, wenn nur der Massenstrom mit dem grösseren Wärmeübergangskoeffizienten variiert, da die Änderung des sehr grossen Wärmeübergangskoeffizienten auf den gesamten Wärmedurchgang nur einen geringen Einfluss hat.

Das Teilsystem für den Temperatúrausgang auf der Seite mit kleinem Wärmekapazitätsstrom ist nahezu invariant, falls der grössere Wärmekapazitätsstrom im Verhältnis zur Verweilzeit auf dieser Wärmetauscherseite rasch variiert, das heisst, wenn der über die Verweilzeit gemittelte Wärmekapazitätsstrom konstant bleibt.

Das Teilsystem für den Temperatúrausgang auf der Seite mit grossem Wärmekapazitätsstrom ist zeitvariant, da die Transport- und somit die Totzeit zwischen Ein- und Ausgang direkt vom Massenstrom abhängen.

5.2 Ermitteln der Wärmetauscherabnutzung

Beurteilung der Wärmetauscherabnutzung

Die quantitative Beurteilung der Wärmetauscherabnutzung kann mit Hilfe geschätzter Uebertragungsfaktoren sowie einzelner gemessener Ein- und Ausgangsgrössen erfolgen. Einzelne Schätzergebnisse und Messungen ermöglichen jedoch keine zuverlässige Berechnung der momentanen Abnutzung, es sind mehrere, in kurzen Zeitabständen durchgeführte Schätzungen notwendig.

Werden die gemittelten Schätzergebnisse über einen längeren Zeitraum aufgetragen, können die Parameter eines Abnutzungsmodells geschätzt und der weitere Verlauf der Abnutzung vorhergesagt werden. Bei diesem Vorgehen ist es möglich, Wärmetauscher zu-

standorientiert instand zu halten. Die gewählte Abnutzungsprädiktionmethode ist zuverlässiger als andere Methoden, welche den Abnutzungszustand ohne Berücksichtigung von Messungen oder Abnutzungsmodellen prognostizieren, da Wärmetauscher zwar ein charakteristisches Abnutzungsverhalten aufweisen, die Abnutzungsgeschwindigkeit aber von Apparat zu Apparat je nach Betriebsbedingungen verschieden sein kann.

Ermitteln der Abnutzung aus den Uebertragungsfaktoren

Die momentane Abnutzung lässt sich auf zwei Arten aus den Uebertragungsfaktoren und anderen zusätzlichen Grössen ermitteln: Entweder indem ein Gleichungssystem bestehend aus den Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungen gelöst wird oder indem aus dem Vergleich zwischen aktuellen und im voraus berechneten Werten auf die momentane Abnutzung geschlossen wird. Die erste Methode bedingt einen im Vergleich zur zweiten grösseren rechnerischen Aufwand zum Zeitpunkt der Abnutzungsermittlung und ihre Konvergenz ist unklar. Die zweite Methode ermöglicht die Vorausberechnung aller Wertepaare – Uebertragungsfaktoren sowie Ein- und Ausgangsgrössen in Funktion aller erwarteten Betriebspunkte und der Abnutzung – und erfordert zum Zeitpunkt der Abnutzungsermittlung nur noch den Vergleich zwischen vorausberechneten und gemessenen, respektive geschätzten Werten.

5.3 Uebertragungsfaktoren

Die Uebertragungsfaktoren sind auf analytischem Weg mittels physikalischer Modellbildung gewonnen worden. Mit diesen Modellen ist es möglich, die Empfindlichkeit der Uebertragungsfaktoren bezüglich verschiedener Einflüsse einfach zu untersuchen. Wird für die Berechnung der Abnutzung aus den gemessenen Werten und den geschätzten Parametern das Wärmetransport-, Wärmebilanz- und Uebertragungsfaktorgleichungssystem verwendet, ist es von Nutzen, gewisse Einflüsse nicht berücksichtigen zu müssen und das Gleichungssystem so vereinfachen zu können. Wird die Methode des Vergleichs zwischen aktuellen Werten und vorausberechneten Werten eingesetzt, verursacht die Berücksichtigung aller Einflüsse keinen besonderen rechnerischen Aufwand, sofern die Stoffdaten der Medien in geeigneter Form vorliegen.

Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren

Die Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte muss nicht nur bei Medien mit besonders grosser Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte wie z.B. Öl, sondern für einzelne Uebertragungsfaktoren auch bei anderen Medien wie Abgas, Luft oder Wasser berücksichtigt werden. Neben einer besonders grossen Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte

ist ein besonders grosses oder kleines Wärmekapazitätsstromverhältnis ein Hinweis auf die Notwendigkeit, die Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte zu berücksichtigen.

Einfluss der Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten auf die Uebertragungsfaktoren

Die Temperaturabhängigkeit der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten muss nur in Ausnahmefällen berücksichtigt werden, nämlich bei einer besonders grossen Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte oder bei einem sehr grossen Austauschgrad.

Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten respektive die Uebertragungsfaktoren

Der direkte Einfluss der Massenstromabhängigkeit auf die Uebertragungsfaktoren darf nur in Ausnahmefällen vernachlässigt werden. Dies war auf Grund früherer Publikationen zu erwarten.

Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren

Der Einfluss der Stromführung auf die Uebertragungsfaktoren darf nicht grundsätzlich vernachlässigt werden. Für verschiedene Stromführungen wurden die Uebertragungsfaktoren aus bereits bekannten, analytisch berechneten Austauschcharakteristiken ermittelt. Je nach Wärmekapazitätsstromverhältnis und Anzahl Wärmeübertragungseinheiten muss der zu überwachende Wärmetauscher besonders sorgfältig einer der analytisch berechenbaren Stromführungen zugeordnet werden.

5.4 Praktische Vorgehensweise

Um die Ueberwachung eines Wärmetauschers zu konzipieren, ist ein Vorgehen in folgenden Schritten zweckmässig:

1. Konstruktions- und Auslegungsdaten des Wärmetauschers sowie Stoffdaten der Fluide beschaffen
2. Betriebsweise ermitteln
 - a) Betriebspunkt: Betriebsbereich des Wärmetauschers
 - b) Dynamik der Eingangsgrössen: welche sind, nachdem sich ein bestimmter Betriebspunkt eingestellt hat, stationär, welche fluktuieren
 - c) Abnutzung: wie gross ist die zulässige Verschmutzung
3. Welche Eingangsgrössen können gezielt variiert, respektive angeregt werden
4. Charakteristische Kenngrössen NTU_K , μ_K und Φ_K berechnen, Verhältnis von α_H zu α_K abschätzen oder berechnen

5. Bestimmen der k-Wert-Sensitivität der Uebertragungsfaktoren zu allen Eingangsgrössen, welche variieren oder welche künstlich angeregt werden können (Kapitel 3.3.5 Seite 54)
6. Wahl der Messgrössen und der anzuregenden Eingangsgrössen (Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 Seite 62ff.)
7. Modellierung der benötigten Uebertragungsfunktionen mit vereinfachten dynamischen Modellen (Literaturhinweise Kapitel 3.4.2 Seite 59) unter Beachtung der Limiten linearer Modelle (Kapitel 5.1 Seite 83)
8. Abklären, welche Sensitivitäten bezüglich Temperaturen, Massenströmen und Stromführung für die Uebertragungsfaktoren zu berücksichtigen sind (Kapitel 3.3 Seite 41)
9. Berechnen der benötigten Uebertragungsfaktoren sowie Ausgangsgrössen in Funktion der möglichen Betriebspunkte und der Verschmutzung (Kapitel 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6 und 3.2.7 Seite 31ff.)
10. Ueberprüfen, ob die Verschmutzung mit den gewählten Uebertragungsfaktoren sowie Ein- und Ausgangsgrössen eindeutig bestimmt werden kann (Beispiel Seite 77: Beurteilung der Betriebspunktabhängigkeit)
11. Geeignete Sensoren auswählen (Dynamik), Datenerfassung und Verarbeitung (Parameterschätzverfahren, Abnützungsmodell) implementieren
12. Nach Inbetriebnahme: gemessene Werte mit Auslegungswerten vergleichen, falls nötig Null- respektive Referenzpunkte abgleichen

Für die Bearbeitung der Punkte 6, 7 und 8 kann ein iteratives Vorgehen zweckmässig sein, wobei für den Punkt 8 ein Abschätzen der Hilfsgrössen (z.B. $NTU_{K\alpha H}$ und $NTU_{K\alpha K}$ mit Hilfe von α_H , α_K und NTU_K) oft genügt.

5.5 Ausblick

Grosse Aenderungen der Eingangsgrössen

Die Einsetzbarkeit des beschriebenen Verfahrens wird besonders durch die Massenstromabhängigkeit des Wärmeüberganges eingeschränkt. Wärmetauscher, deren Massenströme betriebsbedingt stark variieren, müssen nichtlinear modelliert werden. Variieren die Eingangstemperaturen in einem grossen Bereich, ändern die Wärmeübergangskoeffizienten auch wegen des Temperatureinflusses. Bei der nichtlinearen Modellierung dieser beiden Einflüsse sollten einzelne Parameter weiterhin analytisch der Wärmetauscherabnützung zugeordnet werden können. Dies könnte dadurch erfolgen, dass die bereits in Funktion der Ein- und Ausgangsgrössen formulierten Uebertragungsfaktoren in ein nichtlineares Modell eingebettet werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- Bayer, C. (1972). Diagramm zur Umrechnung von Leistungsdaten von Wärmeaustauschern auf veränderte Betriebsbedingungen. *Gesundheits-Ingenieur* **93**, 193-224.
- Bender, E. (1971). Das dynamische Verhalten von Kreuzstromwärmeaustauschern für reine Temperaturschwingungen. *Neue Technik*, **3**, 132-140.
- Bender, E. (1972). Das dynamische Verhalten von Kreuzstromwärmeaustauschern für Massenstromvariationen. *Regelungstechnik und Prozess-Datenverarbeitung*, **20**, 13-20.
- Bosnjakovic, F., M. Vilicic und B. Slipcevic (1951). Einheitliche Berechnung von Rekuperatoren. VDI-Forschungsheft Nr. 432. VDI, Düsseldorf.
- DIN 31051, (1985). Instandhaltung, Begriffe und Massnahmen. Beuth, Berlin.
- Finlay, I. C. and N. Dalgleish (1965). Response of Single-Pass Heat Exchangers to Disturbances in Flow Rate. *Journal Mechanical Engineering Science*, **7**, 318-326.
- Föllinger, O. (1990). Regelungstechnik. 6. Auflage. Hüttig, Heidelberg.
- Franck, G. (1985). Zum dynamischen Verhalten wasserstromgestellter Kreuzstromwärmeübertrager in Klimaanlage. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 83. VDI, Düsseldorf.
- Geering, H.P. (1994). Regelungstechnik. Springer, Berlin.
- Gericke, E. und E. Schulz (1981). Zuverlässigkeitstechnik als Grundlage für eine systematische Instandhaltung. In: *Instandhaltung Grundlagen*, (H.J. Warnecke, Hrsg.), Kap. 2.3, S. 126-150. TÜV Rheinland, Köln.
- Glattfelder, A.H. und Schaufelberger, W. (1995). Lineare Regelsysteme. Institut für Automatik Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Gnielinski, V. (1988). Wärmeübertragung bei Querströmung um einzelne Rohrreihen und durch Rohrbündel. In: *VDI-Wärmeatlas*, Abschn. Gf. VDI, Düsseldorf.
- Grothaus, J.G. (1984). Eigenschaften instationärer isobarer eindimensionaler Gleich- und Gegenstrom-Doppelrohr-Wärmeaustauscher mit konstanten Massenströmen unter Vernachlässigung der axialen Wärmeleitfähigkeiten der beiden Phasen und der Wärmekapazität der Trennwand. Diss. Universität-Gesamthochschule, Paderborn.
- Jäger, P. (1981). Ausfallverhalten von Bauelementen. In: *Instandhaltung Grundlagen*, (H.J. Warnecke, Hrsg.), Kap. 2.2, S. 103-125. TÜV Rheinland, Köln.

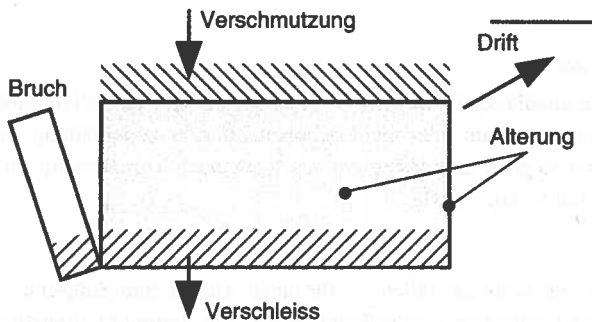
-
- Khan, A.R., N.S. Baker und A.P. Wardle (1988). The dynamic characteristics of a counter-current plate heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31**, 1269-1278.
- Kraus, Th. (1981). Ablauforganisation. In: *Instandhaltung Grundlagen*, (H.J. Warnecke, Hrsg.), Kap. 4.2, S. 352-383. TÜV Rheinland, Köln.
- Krause, S. (1986). Fouling an Wärmeübertragungsflächen durch Kristallisation und Sedi-mentbildung. VDI-Forschungsheft Nr. 635. VDI, Düsseldorf.
- Lieneweg, F. (1976). Statische und dynamische Einflüsse der Wärmeübertragung auf die Temperaturanzeige von Thermometern. In: *Handbuch der technischen Temperaturmessung*, (F. Lieneweg Hrsg.), Kap. 7, S. 214-267. Vieweg, Braunschweig.
- Law, W.M. (1962). The Dynamic Response of Shell-and-Tube Heat Exchangers to Flow Changes. *Neue Technik*, **4**, 34-44.
- Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ.
- Ljung, L. (1992). *System Identification Toolbox for Use with Matlab*. MathWorks, Natick MA.
- Profos, P. (1943). Die Behandlung von Regelproblemen mittels des Frequenzganges des Regelkreises und ihre Anwendung auf die Temperaturregelung durchströmter Rohrsysteme. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Pütter, L. (1972). Einfache dynamische Modelle für Doppelrohr- und Rohrbündel-Wärmeaustauscher. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- Roetzel, W. (1988). Berechnung von Wärmeübertragern. In: *VDI-Wärmeatlas*, Abschn. C. VDI, Düsseldorf.
- Schmachtenberg, H. (1981). Zum dynamischen Verhalten grosser Kreuzstromwärmeüber-trager. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- Schnell, H. (1988). Verschmutzung. In: *Handbuch der Kältetechnik*, (H. Plank, Hrsg.), Band 6 Teil B *Wärmeaustauscher* (F. Steimle und K. Stephan, Hrsg.), Kap. 10, S. 395-410. Springer, Berlin.
- Takahashi, Y. (1952). Transfer Function Analysis of Heat Exchange Processes. In: *Automatic and Manual Control* (A. Tustin, Hrsg.), S. 235-248. Butterworths, London.
- Takahashi, Y. (1953). Regeltechnische Eigenschaften von Gleich- und Gegenstromwär-me-austauschern. *Regelungstechnik*, **1**, 32-35.

ANHANG

Begriffe der Abnutzungsprädiktion

Abnutzung

Als Abnutzung wird der Abbau des Abnutzungsvorrates infolge physikalischer oder chemischer Einwirkungen bezeichnet (DIN 31051, 1985) (Figur A 1).



Figur A 1: Abnutzungsarten

Abnutzungsvorrat

Vorratsmenge, welche noch abgebaut werden kann. Der Abnutzungsvorrat kann durch Instandsetzung wieder angelegt werden.

Bei Wärmetauschern zum Beispiel ist ein Abnutzungsvorrat die noch auftragbare Schmutzschicht, welche trotz erhöhtem Wärmedurchgangswiderstand und Druckverlust für den Prozess noch zulässig ist.

Abnutzungsmodell

Mathematisch formuliertes Gesetz über den erwarteten zeitlichen Verlauf der Abnutzung.

Abnützungsprädiktion

Schätzen der künftigen Abnutzung; zum Beispiel auf Grund eines Abnutzungsmodells, der bisherigen Istzustandswerte und der bisherigen Abnutzung.

Lebensdauer

Zeit zwischen Inbetriebnahme und Ausfall einer Komponente oder eines Teilsystems.

Restlebensdauer

Verbleibende Zeit bis zum Ausfall der Komponente oder des Teilsystems.

Nutzungsdauer

Effektive Verwendungszeit der Komponente oder des Teilsystems.

Instandhaltung

Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes von technischen Mitteln eines Systems (DIN 31051, 1985).

Fehler und Schaden

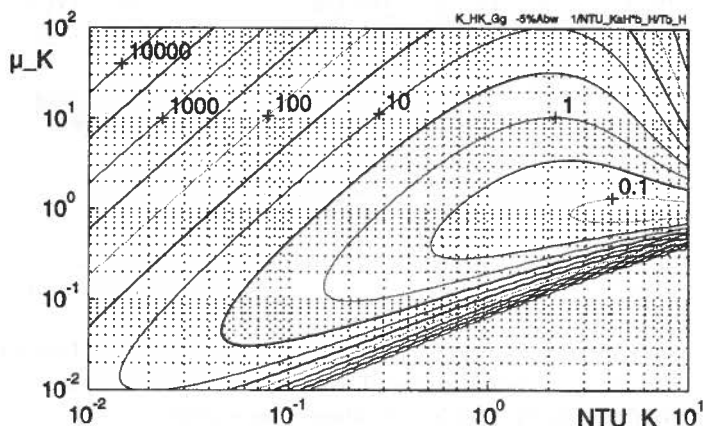
Ein Fehler ist eine unzulässige Abweichung eines Merkmals von Sollvorgaben.

Wird ein Fehler nicht erkannt oder nicht behoben, führt er zeitabhängig meist zu einem Schaden, das heisst zu einer unzulässig grossen bleibenden Veränderung der betrachteten Einheit (Gericke und Schulz, 1981).

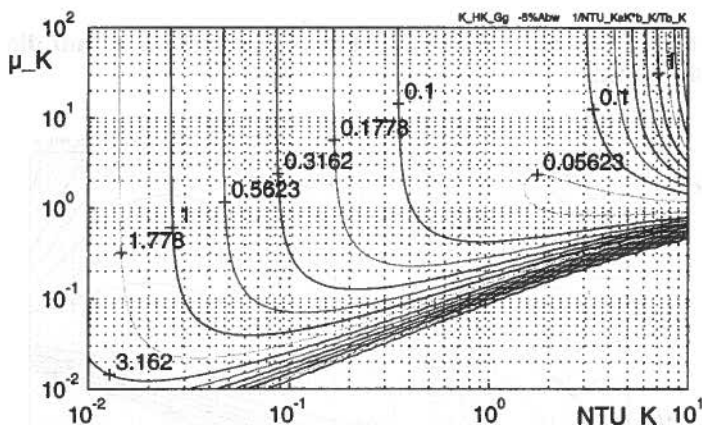
Ausfallrate

Die Ausfallrate ist die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall zum Zeitpunkt t im Zeitraum dt , bezogen auf die Ueberlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t (ausführlicher in Gericke und Schulz (1981)).

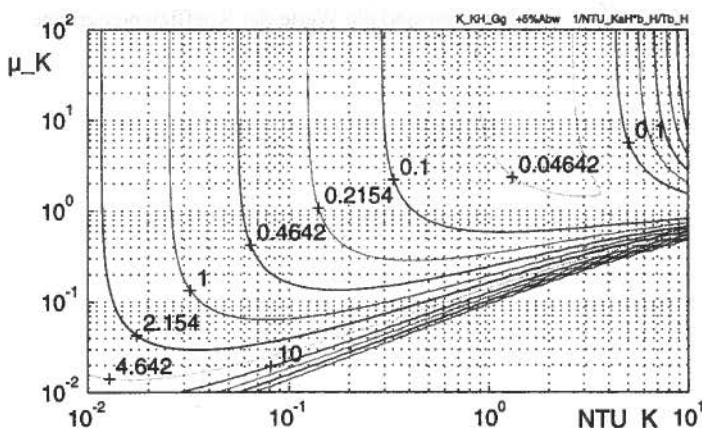
Einfluss der Mitteltemperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren



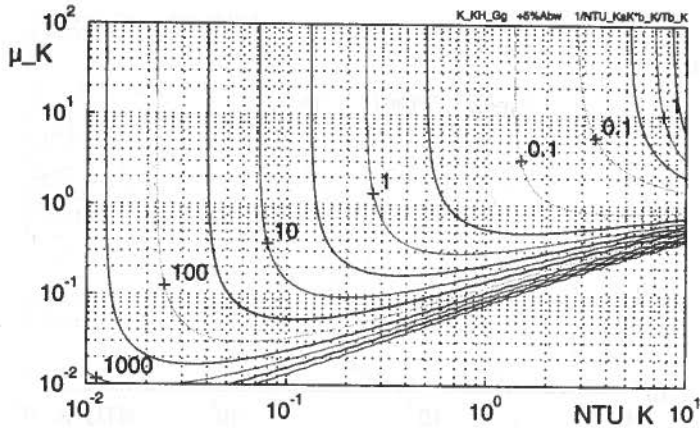
Figur A 2: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{HKGg} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaHb_H} * b_H / Tb_H$ welche -5% Abweichung ergeben



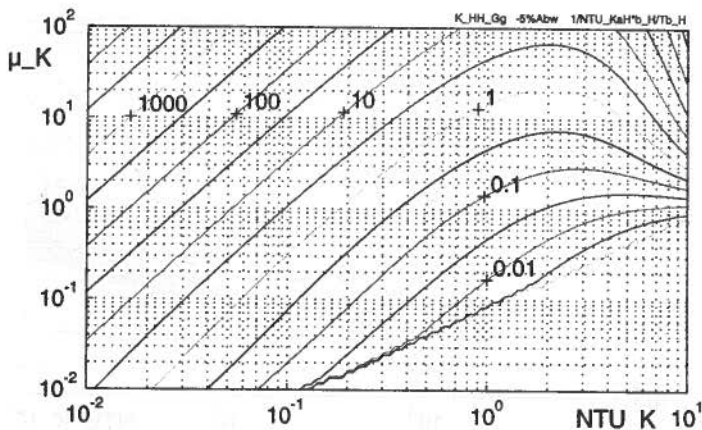
Figur A 3: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{HKG} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha K} * b_K / T_{b_K}$ welche -5% Abweichung ergeben



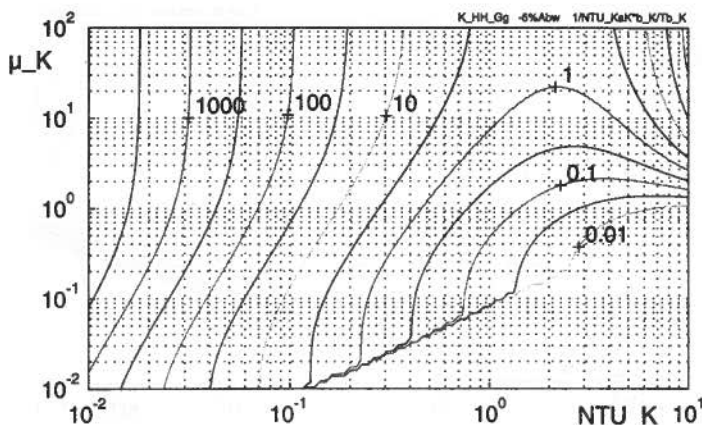
Figur A 4: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{KHG} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha H} * b_H / T_{b_H}$ welche +5% Abweichung ergeben



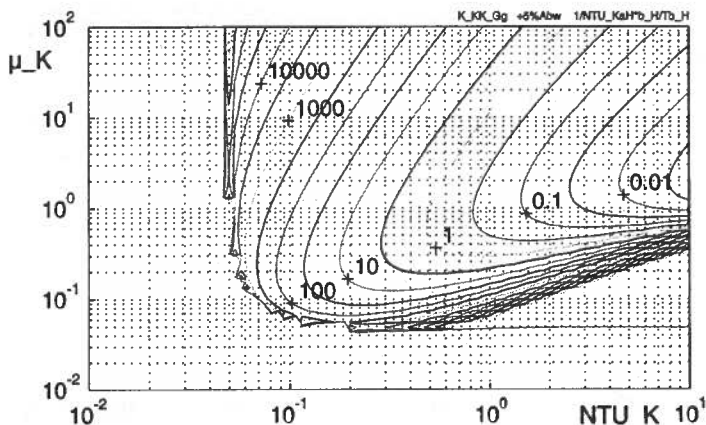
Figur A 5: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{KHGg} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaK} * b_K / Tb_K$ welche +5% Abweichung ergeben



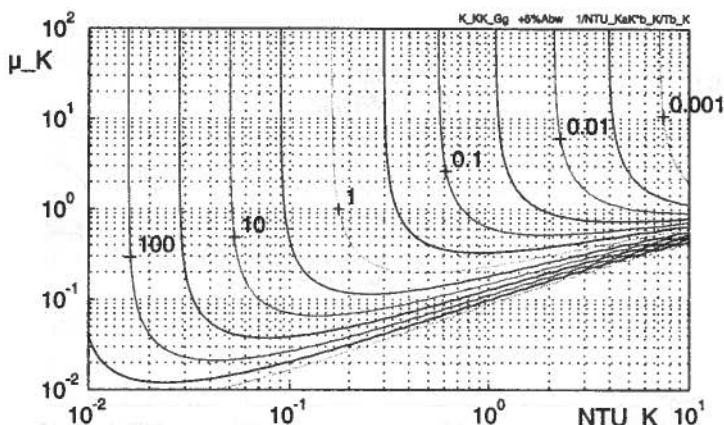
Figur A 6: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{HHGg} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaH} * b_H / Tb_H$ welche -5% Abweichung ergeben



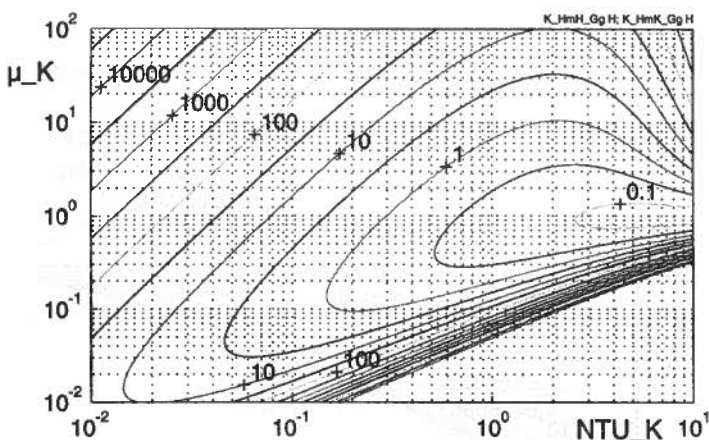
Figur A 7: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{HHG} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha K} * b_K / T_{bK}$ welche -5% Abweichung ergeben



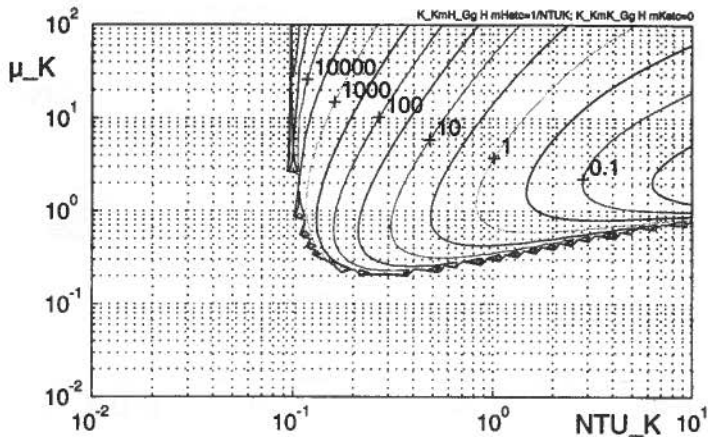
Figur A 8: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{KKG} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha H} * b_H / T_{bH}$ welche +5% Abweichung ergeben



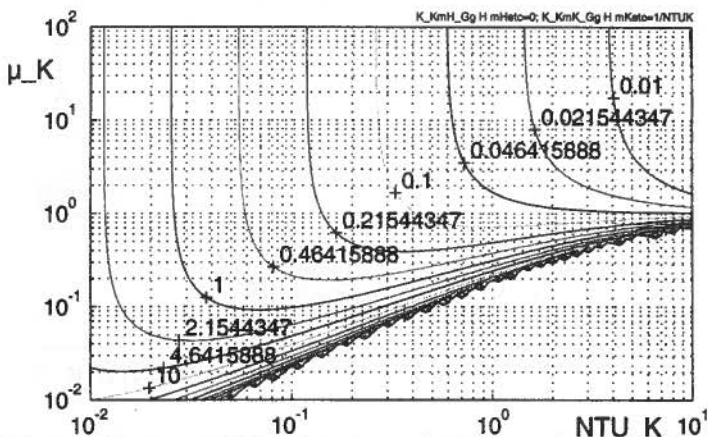
Figur A 9: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor K_{KKG} ; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha K} * b_K / Tb_K$ welche +5% Abweichung ergeben



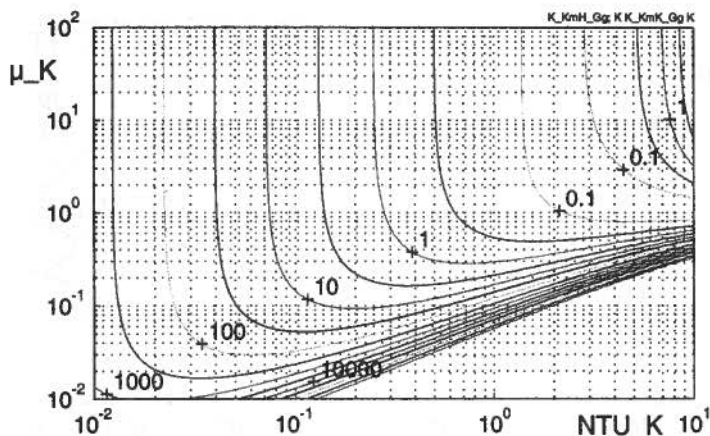
Figur A 10: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren $K_{HmHGg}/\Delta Tr_H$ und $K_{HmKGg}/\Delta Tr_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha H} * b_H / Tb_H$ welche -5% Abweichung ergeben



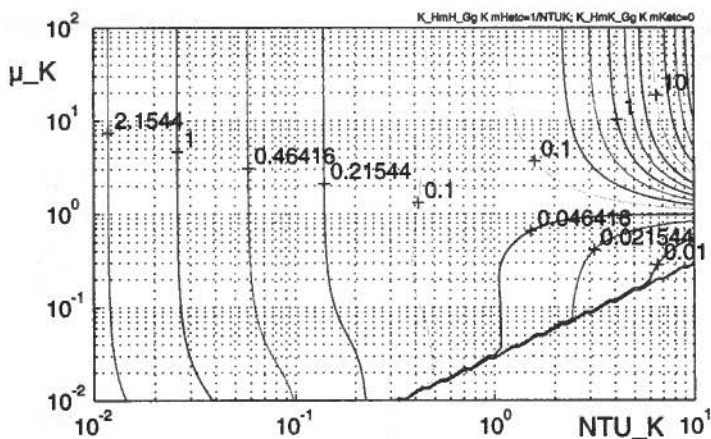
Figur A 11: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor $K_{KmHGg}/\Delta Tr_H$ für $m_H/NTU_{KaH}=1/NTU_K$ und den Uebertragungsfaktor $K_{KmKGg}/\Delta Tr_K$ für $m_K/NTU_{KaK}=0$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaH} * b_H / Tb_H$ welche +5% Abweichung ergeben



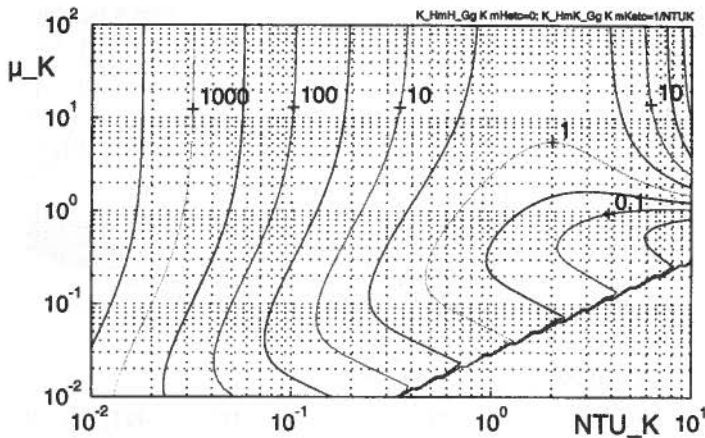
Figur A 12: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor $K_{KmHGg}/\Delta Tr_H$ für $m_H/NTU_{KaH}=0$ und den Uebertragungsfaktor $K_{KmKGg}/\Delta Tr_K$ für $m_K/NTU_{KaK}=1/NTU_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaH} * b_H / Tb_H$ welche +5% Abweichung ergeben



Figur A 13: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die Uebertragungsfaktoren $K_{KmHGg}/\Delta Tr_H$ und $K_{KmKGg}/\Delta Tr_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha K} * b_K / Tb_K$ welche +5% Abweichung ergeben

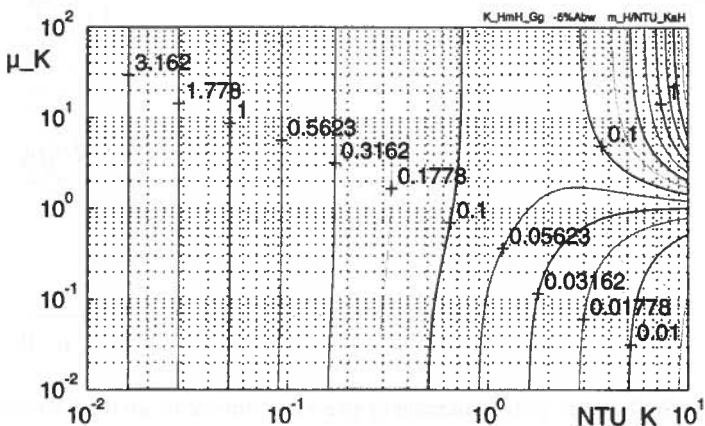


Figur A 14: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor $K_{HmHGg}/\Delta Tr_H$ für $m_H/NTU_{K\alpha H} = 1/NTU_K$ und den Uebertragungsfaktor $K_{HmKGg}/\Delta Tr_K$ für $m_K/NTU_{K\alpha K} = 0$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{K\alpha K} * b_K / Tb_K$ welche -5% Abweichung ergeben

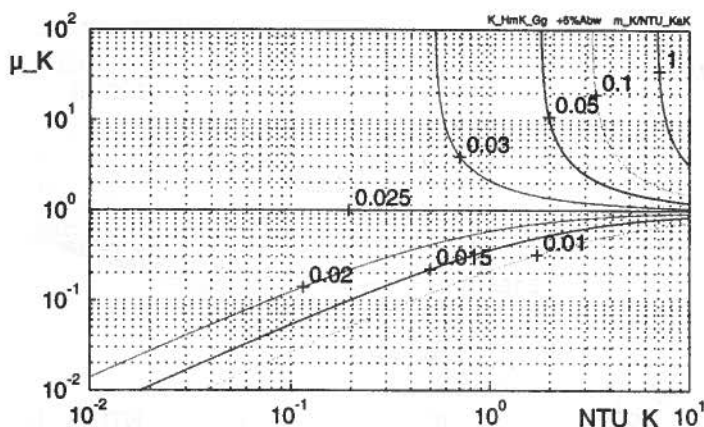


Figur A 15: Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf den Uebertragungsfaktor $K_{HmHGg}/\Delta Tr_H$ für $m_H/NTU_{KaH}=0$ und den Uebertragungsfaktor $K_{HmKGg}/\Delta Tr_K$ für $m_K/NTU_{KaK}=1/NTU_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $1/NTU_{KaK} * b_K/Tb_K$ welche -5% Abweichung ergeben

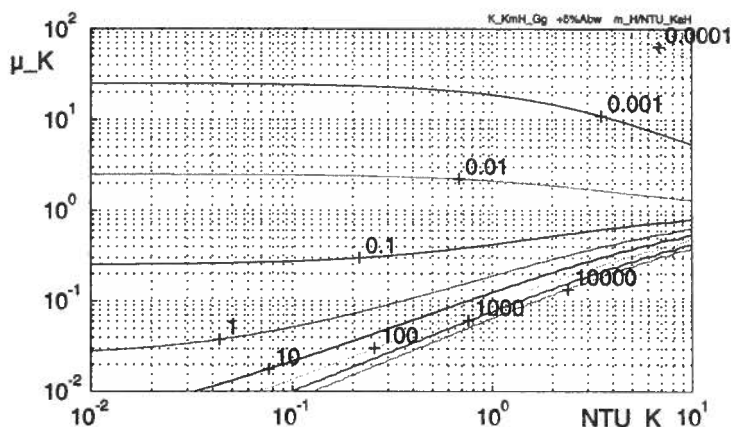
Direkter Einfluss der Massenstromänderungen auf die Wärmeübergangskoeffizienten respektive die Uebertragungsfaktoren



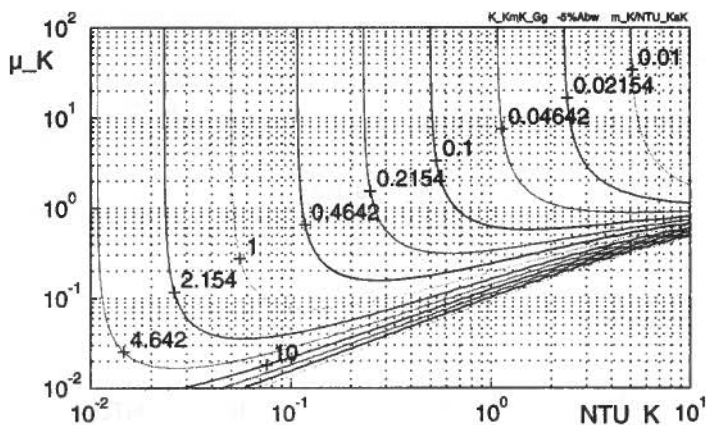
Figur A 16: Einfluss Massenstromänderung Seite H auf den Uebertragungsfaktor $K_{HmHGg}/\Delta Tr_H$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe m_H/NTU_{KaH} welche -5% Abweichung ergeben



Figur A 17: Einfluss Massenstromänderung Seite K auf den Uebertragungsfaktor $K_{HmKGg}/\Delta Tr_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $m_K/NTU_{K\alpha K}$ welche +5% Abweichung ergeben



Figur A 18: Einfluss Massenstromänderung Seite H auf den Uebertragungsfaktor $K_{KmHGg}/\Delta Tr_H$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $m_H/NTU_{K\alpha H}$ welche +5% Abweichung ergeben



Figur A 19: Einfluss Massenstromänderung Seite K auf den Uebertragungsfaktor $K_{KmKGg}/\Delta Tr_K$; eingetragen sind die Werte der Koeffizientengruppe $m_K/NTU_{K\alpha K}$ welche -5% Abweichung ergeben

LEBENS LAUF

Name	Peter Neuenschwander
Geburtsdatum	13. September 1962
Heimatort	Signau, Kanton Bern
Eltern	Roland und Adèle Neuenschwander-Glanzmann
1969 – 1971	Primarschule Altweg, Stadt Zürich
1971 – 1973	Primarschule Schliern
1973 – 1978	Sekundarschule Köniz
1978 – 1982	Berufslehre als Maschinenzeichner in der Firma w+f Bern
1979 – 1982	Berufsmittelschule Bern
1982	Lehrabschluss als Maschinenzeichner
1982 – 1985	Studium an der Ingenieurschule Biel, Abteilung Maschinenbau, Vertiefungsfächer Fördertechnik und Thermodynamik Praktische Tätigkeit als Austauschstudent bei der Firma Starlift in Den Haag, Niederlande und als Maschinenzeichner in der Firma w+f Bern
1985	Diplom als Maschineningenieur HTL
1986 – 1987	Uebertrittskurs HTL – ETHZ am Technikum Winterthur und an der ETH-Zürich
1987 – 1989	Studium an der ETH-Zürich, Abteilung für Maschineningenieur- wesen, Vertiefungsfächer Fluidodynamik und Energiesysteme Tätigkeit als Hilfsassistent bei Prof. Dr. H. H. Thomann am Institut für Fluidodynamik
1989	Diplom als Maschineningenieur ETH, Diplomarbeit in Fluidodynamik bei Prof. Dr. T. K. Fanneløp
1990 – 1996	Assistent am Laboratorium für Energiesysteme des Instituts für Energietechnik der ETH-Zürich bei Prof. Dr. P. Suter Arbeiten zur regelbasierten Störungsdiagnose und zur Emissions- überwachung bei Blockheizkraftwerken sowie zur Wärmetauscher- überwachung