

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

## ZUSAMMENFASSUNG

---

*Schlagworte: Abnutzung, 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 Abnutzung, 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 Abnutzungsprädiktionmethoden zeigt, dass für Wärmetauscher die zustandsorientierte Instandhaltung und die Abnutzungsprädiktion mit einem Abnutzungsmodell, welches den zeitlichen Verlauf der Abnutzung beschreibt, zweckmässig sind. Die Parameter dieses Abnutzungsmodells werden dem individuellen, periodisch erfassten Abnutzungsverhalten angepasst.

Als Eingabegrösse des Abnutzungsmodells wird der bisherige Verlauf der Abnutzung – in diesem Fall des Foulings respektive der Verschmutzung – benötigt. Die Abnutzung verändert das statische und dynamische Uebertragungsverhalten eines Wärmetauschers. Das Verhalten ändert sich jedoch nicht nur wegen der Abnutzung, 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 Abnutzung verwendet werden, hängen unter anderem von Änderungen der Wärmeübergangskoeffizienten, der Änderung 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.