

**REIHE 08**

MESS-,  
STEUERUNGS-  
UND REGELUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Geneder,  
Graz

**NR. 1276**

Beitrag zur modellbasierten  
Emulation von Fluidkühlern  
zur Abbildung der  
thermischen Zustände des  
realen Fahrbetriebs am  
Prüfstand

**BAND**

**1 | 1**

**VOLUME**

**1 | 1**





**REIHE 08**

MESS-,  
STEUERUNGS-  
UND REGELUNGS-  
TECHNIK



# Fortschritt- Berichte VDI

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Geneder,  
Graz

**NR. 1276**

Beitrag zur modellbasierten  
Emulation von Fluidkühlern  
zur Abbildung der  
thermischen Zustände des  
realen Fahrbetriebs  
am Prüfstand

BAND

**1|1**

VOLUME

**1|1**

VDI verlag

Dipl.-Ing. (FH) Geneder, Stefan

## **Beitrag zur modellbasierten Emulation von Fluidkühlern zur Abbildung der thermischen Zustände des realen Fahrbetriebs am Prüfstand**

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 08, Nr. 1276. Düsseldorf: VDI Verlag 2022.

218 Seiten, 115 Bilder, 20 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527608-8, E-ISBN 978-3-18-627608-7, ISSN 0178-9546

76,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 68,40 EUR

**Für die Dokumentation:** Thermomanagement – Prüfstand – realer Fahrbetrieb – Kühleremulation – Medienkonditionierung – Wärmeübertragermodell – Simulation – Echtzeit

**Keywords:** thermal management – test bed – real-world driving conditions – radiator – media conditioning – heat exchanger model – simulation – real time

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Mess- und Prüfstandstechnik von Kraftfahrzeugen. Sie befasst sich mit der Emulation von Fahrzeugkühlern zur Abbildung der thermischen Zustände des realen Fahrbetriebs am Prüfstand. Die zwei behandelten Themenschwerpunkte sind die Konzeption eines dynamischen Medienkonditioniersystems und die Entwicklung eines instationären echtzeitfähigen Kühlermodells für dessen Ansteuerung. Das zuerst vorgestellte Konzept zur Medienkonditionierung erlaubt es durch einen direkten Wärmeaustausch und eine modellbasierte Regelung transiente Temperaturverläufe, wie sie im realen Fahrbetrieb auftreten, am Prüfstand darzustellen. Mit der im zweiten Schwerpunkt behandelten sequenziellen wegbasierten Modellbildung als neuen physikalisch basierten Berechnungsansatz ist es erstmals möglich alle für das dynamische Wärmeübertragerverhalten wesentlichen Effekte in Echtzeit abzubilden.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)**

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der IVD Prof. Hohenberg GmbH.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Jumar danke ich besonders für die mir gebotene Möglichkeit zur Promotion an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für sein Interesse an dieser Arbeit, für die wertvollen Anregungen und die immer sehr hilfreiche und freundliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Christian Beidl danke ich für das dieser Arbeit entgegengebrachte fachliche Interesse und die Übernahme des Korreferats sowie die sehr gute Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der TU Darmstadt.

Herrn Prof. Dr. Günter Hohenberg danke ich ganz herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen bei der IVD Prof. Hohenberg GmbH sowie für die fachlich intensiven und fruchtbaren Diskussionen und seine wertvollen Ratschläge.

Der AVL List GmbH danke ich für die finanzielle Förderung des Projektes. An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Theodor Sams für seine verlässliche Unterstützung des Vorhabens. Den Herren Dr. Heinz Petutschnig, Dr. Armin Traußnig und DI Andreas Ennemoser danke ich für die interessanten Diskussionen und Anregungen. Herrn DI Wolfgang Meixner danke ich für die Unterstützung bei den mechanischen Aufbauten und experimentellen Messungen am Prüfstand.

Herrn DI Werner Moser und meiner Familie danke ich für das Korrekturlesen der Arbeit.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>VII</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit .....	6
1.3 Gliederung der Arbeit.....	8
<b>2 Systemkonzeption einer dynamischen Medienkonditionierung</b> .....	<b>10</b>
2.1 Stand der Wissenschaft und Technik .....	13
2.2 Hydraulische Grundstruktur der vorgeschlagenen Medienkonditionierung.....	20
2.3 Modellbasiertes Regelungskonzept des Konditioniersystems .....	26
2.3.1 Einfluss der Wahl der Stalleinrichtung .....	31
2.3.2 Regelung der Temperatur.....	33
2.3.3 Regelung des Wärmestroms .....	36
2.4 Analyse und Optimierung der Systemdynamik .....	37
2.4.1 Streckendynamik .....	37
2.4.2 Messung sich schnell ändernder Temperaturen .....	38
2.4.3 Dynamik des Ventilstellers und der Durchfluss-Sensorik.....	47
2.5 Anpassung des hydraulischen Verhaltens des substituierten Kühlers.....	47
2.5.1 Anpassung des Kühlwasservolumens .....	48
2.5.2 Anpassung des Druckwiderstands des Konditioniersystems.....	49
<b>3 Wegbasiertes Kühler-Simulationsmodell</b> .....	<b>53</b>
3.1 Stand der Wissenschaft und Technik .....	53
3.1.1 Grundlagen der Wärmeübertragung und Ähnlichkeitstheorie .....	53
3.1.2 Modellbildung von Wärmeübertragern.....	64
3.2 Geometrische Verhältnisse am realen Fahrzeugkühler .....	82
3.3 Anforderungen an das Modell.....	85
3.4 Vorüberlegungen zum Modellkonzept .....	89
3.5 Theorie der sequenziellen wegbasierten Modellbildung des Kühlers .....	92
3.5.1 Konzept der sequenziellen wegbasierten Modellierung .....	93
3.5.2 Berechnung bei niedrigen Massenströmen .....	98
3.5.3 Modellierung der Verteil- und Sammelbehälter.....	99

3.5.4	Übergang zwischen zeit- und wegbasierter Berechnung .....	102
3.6	Methodik zur Bestimmung der Wärmedurchgangsfähigkeiten .....	104
3.6.1	Bestimmung aus der Theorie .....	105
3.6.2	Bestimmung mittels Messung .....	114
3.6.3	Bestimmung mittels vereinfachter Vorgehensweise .....	115
3.6.4	Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen .....	118
3.7	Diskretisierung .....	119
3.7.1	Ausmaß der Diskretisierung .....	120
3.7.2	Einfluss auf die Temperaturdifferenz und die Wärmeübertragung .....	121
3.7.3	Berücksichtigung des Diskretisierungseinflusses .....	128
3.8	Einordnung der neuen Berechnungsmethodik .....	135
<b>4</b>	<b>Validierung des neuen Wärmeübertragermodells .....</b>	<b>140</b>
4.1	Ergebnisse der Kühlerberechnung .....	140
4.1.1	Temperaturverlauf im stationären Zustand .....	140
4.1.2	Synthetischer Temperatursprung .....	142
4.2	Validierung am Kühlerprüfstand .....	144
4.2.1	Prüfeinrichtung zur Identifikation des transienten Kühlerverhaltens .....	145
4.2.2	Vergleich von Experiment und Modellrechnung .....	151
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der dynamischen Medienkonditionierung .....</b>	<b>155</b>
5.1	Technische Ausführung des dynamischen Konditioniersystems .....	155
5.2	Validierung des Konzeptes .....	157
5.3	Anwendung am Antriebsstrangprüfstand .....	159
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>165</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>168</b>
A.1	Korrelationen zur Beschreibung des Wärmeübergangs .....	168
A.2	Methoden zur Ermittlung der Wärmeübergangsbeziehungen .....	176
A.3	Wärmeübergang an berippten Rohren .....	180
A.4	Gegenüberstellung der stationären Berechnungskonzepte .....	183
<b>Anhang B</b>	<b>Daten des untersuchten Wärmeübertragers .....</b>	<b>184</b>
B.1	Technische Daten .....	184
B.2	Betriebsdaten .....	187
B.3	Instrumentierung Kühlerprüfstand .....	187
<b>Anhang C</b>	<b>Verwendete Stoff- und Materialdaten .....</b>	<b>188</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>189</b>



# Nomenklatur

## Formelverzeichnis

Nachfolgend werden die wichtigsten in der Arbeit verwendeten Symbole erläutert. Um nicht von der allgemein üblichen Bezeichnung abweichen zu müssen, werden einige Symbole mehrfach verwendet. Deren Bedeutung erschließt sich jedoch aus dem Kontext.

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha A$	[W/K]	Wärmeübergangsfähigkeit
$\alpha_{\text{ped}}$	[1]	Fahrpedalstellung
$\beta$	[1]	Ventilstellung
$\gamma$	[1]	Intermittenzfaktor
$\delta$	[m]	Dicke
$\varepsilon$	[1]	normierte Temperaturänderung
$\eta$	[Pa s]	dynamische Viskosität
$\eta_{\text{r}}$	[1]	Rippenwirkungsgrad
$\theta$	[°]	Louver-Winkel
$\kappa$	[1]	Korrekturfaktor
$\lambda$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit
$\Lambda$	[1]	Funktion der Wärmeübergangszahl, Wärmeleitfähigkeit und Dicke einer Rippe
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\xi$	[1]	Druckverlustbeiwert
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[-]	Standardfehler der Regression
$\tau$	[s]	Zeitkonstante
$\varphi$	[°]	Winkel
$\chi$	[1]	Mischungsverhältnis
$a$	[m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
$b$	[m]	Breite
$B$	[1]	Funktion der dimensionslosen Übertragungsfähigkeiten
$c$	[-]	Konstante Kennfeldapproximation, Nußelt-Korrelation

$C_{dis}$	[1]	Faktor Laufzeitreduzierung durch Dispersion
$C_f$	[1]	Reibungsbeiwert
$C_S$	[J/m <sup>2</sup> K]	Sensorkonstante
$c_p$	[J/kg K]	spezifische Wärmekapazität
$C$	[1]	Verhältnis der Wärmekapazitätsströme
$C$	[-]	Koeffizienten Wilson-Diagramm
$d$	[m]	Durchmesser
$d$	[1]	Störgröße
$e$	[-]	Fehler, Regeldifferenz
$e_p$	[kg]	Pumpenkonstante
$f$	[Hz]	Frequenz
$F$	[1]	Korrekturfaktor für mittlere Temperaturdifferenz
$F$	[-]	Streckenverhalten
$F_d$	[m]	Rippenbreite
$F_l$	[m]	Durchgangshöhe zwischen zwei Rohren
$F_p$	[m]	Rippenabstand
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Fallbeschleunigung
$h$	[m]	Rippenhöhe
$k$	[1]	diskrete Zeit
$k$	[W/Km <sup>2</sup> ]	Wärmedurchgangskoeffizient
$kA$	[W/K]	Wärmedurchgangsfähigkeit
$l$	[m]	Länge
$L_b$	[m]	Louver-Breite
$L_h$	[m]	projizierte Louver-Höhe
$L_l$	[m]	mittlere Louver-Länge
$L_p$	[m]	projizierte Louver-Breite
$m$	[kg]	Masse
$m$	[1]	Exponent Prandtl-Zahl
$\dot{m}$	[kg/s]	Massenstrom
$\dot{m}_0$	[kg/s]	Hauptmassenstrom
$\dot{m}_1$	[kg/s]	Nebenmassenstrom
$M$	[1]	Anzahl an Diskretisierungselementen in Luftrichtung
$n$	[1]	Exponent einer Strömungsgröße einer Wärmeübergangs-korrelation
$n_p$	[1/min]	Pumpendrehzahl
$n_{rad}$	[1/min]	Raddrehzahl

$N$	[1]	Anzahl an Diskretisierungselementen in Kühlwasser- richtung
$N$	[1]	dimensionslose Übertragungsfähigkeit, NTU
$N_l$	[1]	Anzahl an Louver-Reihen
$p$	[bar]	Druck
$\dot{q}$	[W/K]	spezifischer Wärmestrom
$\dot{q}_A$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
$Q$	[J]	Wärme
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$R$	[K/W]	Wärmewiderstand
$R$	[-]	Regler
$R^2$	[1]	Bestimmtheitsmaß
$s$	[1]	Abmaße Rippensegment und Louvergeometrie
$t$	[s]	Zeit
$T$	[-]	Übertragungsverhalten
$T$	[°C]	Temperatur
$T_0$	[°C]	Eingangstemperatur Mischung
$T_1$	[°C]	Temperatur Zumischung
$T_2$	[°C]	Ausgangstemperatur Mischung
$\bar{T}$	[°C]	Mischtemperatur
$T_p$	[m]	vertikaler Rohrmittenabstand
$T_d$	[m]	gesamte Rohrtiefe
$u$	[-]	Eingangsgröße
$U$	[m]	Umfang
$v$	[1]	Flächenverhältnis
$v_{fzg}$	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$V$	[-]	Vorsteuerung
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$w$	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{W}$	[W/K]	Wärmekapazitätsstrom
$x$	[m]	Ortskoordinate
$X$	[1]	dimensionslose Ortskoordinate
$y$	[m]	Ortskoordinate
$Y$	[1]	dimensionslose Ortskoordinate
$z$	[m]	Ortskoordinate

## Indizes

0	Ausgangswert
$\Sigma$	Summe
A	Austritt
akt	aktiver Wärmeübertrager
d	Durchgang zwischen Rippen und Rohren
dis	gesamter Wärmeübertrager und Berücksichtigung der Dispersion
dyn	dynamisch
E	Eintritt
f	Rippen
F	Fluid
FA	Fluidaustritt
FE	Fluideintritt
gr	Grenzschicht
ges	Gesamt
H	Hydraulisch
i	Element i
kor	korrigiert
K	Kühlwasser
KA	Kühlwasseraustritt
KE	Kühlwassereintritt
lam	laminar
log	logarithmisch
lok	lokal
L	Luft
LA	Luftaustritt
LE	Lufteintritt
Lp	Luft, mit $L_P$ als charakteristischer Länge
m	Mittelwert
max	Maximalwert
mess	gemessene Größe
min	Minimum
N	N-ter Teil

X

$N/M$	Anzahl an $N$ Diskretisierungselementen in Kühlwasser- und $M$ Elementen in Luftrichtung
$o$	Oberfläche
$P$	Prozesswasser
$PA$	Prozesswasseraustritt
$PE$	Prozesswassereintritt
$pfr$	gesamter Wärmeübertrager unter Annahme einer Pfropfenströmung
$r$	Kühlwasserrohr
$ra$	Kühlwasserrohr, außen
$ri$	Kühlwasserrohr, innen
$R$	Größe aus Regelung
$s$	konstante Rechenschrittweite
$soll$	Sollgröße
$stat$	stationär
$sv$	variable Rechenschrittweite
$S$	Sensor
$tr$	Übergang
$tur$	turbulent
$T$	thermisch
$V$	Größe aus Vorsteuerung
$VR$	Größe aus Vorsteuerung und Regelung
$W$	Wand
$WT$	Wassertank
$'$	Größen bei Medienkonditionierung am Prüfstand, mit Modell berechnete Werte

### Dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen

$Gr$	Grashof-Zahl
$J$	Colburn-Zahl
$Nu$	Nußelt-Zahl
$Pr$	Prandtl-Zahl
$Re$	Reynolds-Zahl
$St$	Stanton-Zahl

## Abkürzungen

ARX	engl. autoregressive model with exogeneous input
ARMAX	engl. autoregressive model with moving average and exogeneous input
CFD	engl. computational fluid dynamics, numerische Strömungsrechnung
DGL	Differentialgleichung
DoE	engl. design of experiments, statistische Versuchsplanung
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
HiL	Hardware-in-the-Loop
LMTD	engl. Logarithmic Mean Temperature Difference, mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
LPV	engl. linear parameter-varying, linear mit variierenden Parametern
NTU	engl. Number of Transfer Units dimensionslose Übertragungsfähigkeit
RDE	Real Driving Emissions
RMSE	engl. root-mean-square error Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

## Kurzfassung

Die Bedeutung des Fahrzeugthermomanagements ist durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebs signifikant gestiegen. Besondere Herausforderungen sind hierbei u. a. die Batterietemperierung sowie die Abfuhr hoher Wärmemengen einer Brennstoffzelle oder beim Schnellladen einer Batterie. Zur Optimierung des Thermomanagements während der Entwicklung ist es wichtig, vor allem die Fahrzeugkühler als Hauptkomponente an Prüfständen emulieren zu können. Die vorliegende Arbeit liefert hierzu einen Beitrag. Die zwei behandelten Themenschwerpunkte sind:

- die Konzeption eines dynamischen Medienkonditioniersystems und
- die Entwicklung eines instationären echtzeitfähigen Kühlermodells zur modellbasierten Ansteuerung des dynamischen Medienkonditioniersystems.

So wird erstens ein neues Konzept zur dynamischen Medienkonditionierung vorgestellt, mit dem transiente Temperaturverläufe, wie sie im realen Fahrbetrieb auftreten, am Prüfstand dargestellt werden können. Das Konzept besitzt drei wesentliche Merkmale: Das Prinzip des direkten Wärmeaustausches durch Mischung ohne Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse im Kühlkreislauf, den Einsatz einer modellbasierten Regelung unter Nutzung der Mischtemperaturen sowie die konsequente Minimierung der Systemträgheiten und -laufzeiten. Damit ergeben sich gegenüber bisherigen Systemen folgende Vorteile: eine deutlich höhere Dynamik, eine Invarianz gegen Störungseinflüsse, eine robuste Funktion sowie eine einfache Handhabbarkeit ohne aufwendige Parametrierung.

Der zweite Schwerpunkt ist die sequenzielle wegbasierte Modellbildung als neuer physikalisch basierter Berechnungsansatz. Es werden hier erstmals alle für das dynamische Wärmeübertragerverhalten wesentlichen Effekte, d. h. die nichtlineare Wärmeübertragung, die thermische Trägheit, die Fluidlaufzeit sowie die Dispersion (Strömungsungleichverteilung), in Echtzeit abgebildet. Die Grundgedanken der Modellbildung sind eine ausreichend hohe Diskretisierung des Modells und eine wegbasierte Betrachtung, wodurch die Annahme eines quasistationären Zustandes für einen einzelnen Rechenschritt gestattet ist. So ist nur ein einfacher algebraischer Zusammenhang zu lösen, wodurch die echtzeitfähige Berechnung möglich wird.

Unter ausführlicher Analyse der Ähnlichkeitstheorie wird zusätzlich eine vereinfachte Vorgehensweise als evolutionärer Weg zur Bestimmung der Wärmedurchgangsfähigkeit vorgeschlagen.

## Abstract

The importance of vehicle thermal management has increased significantly with the advent of the powertrain electrification. Challenges are here the conditioning of the battery and the dissipation of high amount of heat from a fuel cell or when fast charging the battery. For the optimization of the thermal management in the vehicle development process it is helpful that it is possible to emulate the radiator as the main component at the test bed. This work contributes to this topic. The two evaluated special issues are:

- The conception of a dynamic conditioning unit and
- the development of a transient real-time capable heat exchanger model for the model-based driving of the dynamic conditioning unit.

At first a novel concept for a dynamic conditioning unit is presented, that enables transient temperature profiles, as they occur during real driving, to be reproduced on a test bed. This concept has three significant features: the use of direct heat exchange through mixture without affecting the hydraulic behavior of the cooling circuit as the main principle, the application of a model-based control using the mixing temperatures as well as the consequent minimization of thermal inertia and transit times. This results in the following advantages compared to currents systems: high dynamic response, insensitivity to disturbances, a robust function as well as an ease of use, as no time-consuming parametrization is required.

The second issue is the sequential way-based modelling as a new physically based modelling approach. This approach allows for the first time the real-time calculation of the heat exchanger with for the dynamic behavior fundamental effects, which are the nonlinear heat transfer, the thermal inertia, the fluid transport time as well as the flow maldistribution. The key idea of the modelling is a sufficient discretization of the model and a way-based treatment. This allows quasi-stationary consideration for a single calculation step of a discrete element. Thus, it is possible to solve algebraic equations only instead of a system of differential equations which enables a calculation in real time.

Based on a detailed analysis of the similarity theory moreover, a simplified approach for the determination of the overall heat transfer as evolutionary path is recommended.