

VDI

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

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 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.

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten. Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

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

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

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
Nomenklatur	VII
Kurzfassung	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit	6
1.3 Gliederung der Arbeit.....	8
2 Systemkonzeption einer dynamischen Medienkonditionierung	10
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 Stelleinrichtung	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
3 Wegbasiertes Kühler-Simulationsmodell	53
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
4	Validierung des neuen Wärmeübertragermodells	140
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
5	Experimentelle Untersuchung der dynamischen Medienkonditionierung	155
5.1	Technische Ausführung des dynamischen Konditioniersystems	155
5.2	Validierung des Konzeptes	157
5.3	Anwendung am Antriebsstrangprüfstand.....	159
6	Zusammenfassung und Ausblick	165
Anhang A	Grundlagen.....	168
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
Anhang B	Daten des untersuchten Wärmeübertragers	184
B.1	Technische Daten.....	184
B.2	Betriebsdaten	187
B.3	Instrumentierung Kühlerprüfstand	187
Anhang C	Verwendete Stoff- und Materialdaten.....	188
	Literaturverzeichnis	189

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.

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
αA	[W/K]	Wärmeübergangsfähigkeit
α_{ped}	[1]	Fahrpedalstellung
β	[1]	Ventilstellung
γ	[1]	Intermittenzfaktor
δ	[m]	Dicke
ε	[1]	normierte Temperaturänderung
η	[Pa s]	dynamische Viskosität
η_f	[1]	Rippenwirkungsgrad
θ	[°]	Louver-Winkel
κ	[1]	Korrekturfaktor
λ	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeit
Λ	[1]	Funktion der Wärmeübergangszahl, Wärmeleitfähigkeit und Dicke einer Rippe
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ξ	[1]	Druckverlustbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[-]	Standardfehler der Regression
τ	[s]	Zeitkonstante
φ	[°]	Winkel
χ	[1]	Mischungsverhältnis
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
A	[m ²]	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 ² 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 ²]	Fallbeschleunigung
h	[m]	Rippenhöhe
k	[1]	diskrete Zeit
k	[W/Km ²]	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 Wärmeübergangskorrelation
n_p	[1/min]	Pumpendrehzahl
n_{rad}	[1/min]	Raddrehzahl

N	[1]	Anzahl an Diskretisierungselementen in Kühlwasser- richtung
N	[1]	dimensionslose Übertragungsfähigkeit, NTU
N_i	[1]	Anzahl an Louver-Reihen
p	[bar]	Druck
\dot{q}	[W/K]	spezifischer Wärmestrom
\dot{q}_A	[W/m ²]	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_{Zg}	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
V	[-]	Vorsteuerung
V	[m ³]	Volumen
\dot{V}	[m ³ /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
Σ	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>i</i>	Element <i>i</i>
kor	korrigiert
K	Kühlwasser
KA	Kühlwasseraustritt
KE	Kühlwassereintritt
lam	laminar
log	logarithmisch
lok	lokal
L	Luft
LA	Luftaustritt
LE	Luft eintritt
L _p	Luft, mit L _p als charakteristischer Länge
m	Mittelwert
max	Maximalwert
mess	gemessene Größe
min	Minimum
N	N-ter Teil
X	

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

Dimensionslose Ähnlichkeitskennzahlen

<i>Gr</i>	Grashof-Zahl
<i>J</i>	Colburn-Zahl
<i>Nu</i>	Nußelt-Zahl
<i>Pr</i>	Prandtl-Zahl
<i>Re</i>	Reynolds-Zahl
<i>St</i>	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.