Berichte zur
Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will

Schriftenreihe Heft 2023-1

KONSTANTIN HUBER

Entwicklung einer Wärmestromsensorik auf Basis der ALTP-Technik mit Zeitauflösung im Megahertzbereich

SHAKER
VERLAG

Entwicklung einer Wärmestromsensorik auf Basis der ALTP-Technik mit Zeitauflösung im Megahertzbereich

Der Technischen Fakultät

der Friedrich-Alexander-Universität

Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Konstantin Huber, M.Sc.

aus München

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 28.02.2023

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker
Prof. Dr.-Ing. Tim Rödiger

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 1/2023

Konstantin Huber

Entwicklung einer Wärmestromsensorik auf Basis der ALTP-Technik mit Zeitauflösung im Megahertzbereich

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9043-7
ISSN 2365-3957

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Landshut unter direkter Betreuung von Prof. Tim Rödiger. Unter Vielen, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich daher besonders bei ihm für all die Unterstützung, die Motivation, aber auch für die exzellente Zusammenarbeit bedanken. Die vielen Gespräche, Korrekturschleifen, Diskussionen und Fragestellungen haben die geleistete Arbeit stets verbessert und mich auch persönlich weiterentwickeln lassen. Dem BayWISS-Verbundkolleg Energie möchte ich an dieser Stelle auch für die finanzielle Unterstützung danken.

Mein Dank gebührt ebenso Herrn Prof. Michael Wensing, welcher durch seinen fachlichen, aber auch persönlichen Input das Forschungsvorhaben innerhalb des BayWISS Promotionsprogramms als universitärer Betreuer stets begleitet und verbessert hat. Für die Anfertigung des Zweitgutachtens und seine Rolle als Zweitkorrektor möchte ich mich bei Herrn Prof. Eberhard Schlücker bedanken.

Durch die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe FST sind auch abseits dieser Arbeit interessante Messaufgaben mit der entwickelten Sensorik adressiert worden. Speziell erwähnt seien die Herren Dr.-Ing. Lukas Weiß und Dr.-Ing. Dmitrii Mamaikin. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Myles Bohon und den Mitarbeitern des Lehrstuhls für druckverstärkende Verbrennung der TU-Berlin für die Messkampagne an RDE-Brennkammern und der Zurverfügungstellung der Druckmessdaten bedanken. Auch Prof. Guillermo Paniagua und seiner PETAL-Gruppe der Purdue Universität sei für die Kooperation und die gute Betreuung während meines Aufenthalts gedankt.

Für die sehr enge Zusammenarbeit mit Dr. Josef Betz, nicht nur bei der Versorgung mit Sensorsubstraten und Kalibriermöglichkeiten, sondern auch für die vielen fachlichen Diskussionen und Abende möchte ich mich bedanken. Ich habe mich stets gefreut zu dir zu fahren, auch wenn dies immer mehr Fragen aufgeworfen als beantwortet hat. Allen HAW-Kollegen und speziell Felix, Anton, Florian, Claudia und Prof. Peter Holbein sei gedankt. Die Vielzahl an Gesprächen und Aktivitäten haben mich nicht nur fachlich weitergebracht.

Nicht zuletzt will ich mich bei meiner Familie für die stetige Ermunterung, Betreuung und die Übernahme der Korrektur bedanken. Ohne sie hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Abstract

Within this work a new highly time-resolving heat-flux sensor based on the atomic layer thermopile (ALTP) technique including the complete measurement chain and signal amplification is developed. The module allows local, direct measurements of heat fluxes up to $10\,000\,\mathrm{W\,cm^{-2}}$ with a frequency resolution of over 1 MHz. The sensor withstands even demanding temperature and pressure-loaded applications by featuring an active cooling solution and a sealed housing. With its directly integrated signal chain and amplifier system, measurements in applications prone to electromagnetic interference benefit from higher signal-to-noise-ratios. A precise calibration as well as a comparison with other established techniques was conducted in two specifically developed radiation and convection-based calibration facilities. The ALTP is well within the calibration accuracy for both facilities. This could not be observed for all techniques. A temperature analysis suggests an influence of $\approx 0{,}3\,\%\,\mathrm{K^{-1}}$ on the ALTP's sensitivity.
A simulative approach featuring a thermal transient FE-study with combustion engine boundary conditions shows neither temporal inconsistencies nor temperature distribution anomalies on the ALTP's measuring principle. This also applies to operation with cooling. Soot deposites suggest a 10 % amplitude damping.
The installation in a combustion engine reveals that conventional procedures based on cycle averaging show significant differences in contrast to the signal properties featuring the precise time and peak resolution of the ALTP-technique. Measured peak heat fluxes reach $1200\,\mathrm{W\,cm^{-2}}$ and more, displaying five times higher heat fluxes than reported in literature until now. A linear trend between produced engine power and measured wall heat flux could be found for most operating points. The comparison with pressure data shows significant benefits of supplementing pressure data with locally conducted heat flux data in phases of charge exchange, structure-borne noise and for resolving high signal gradients during the combustion process.
The development of a new circuit technology for a combined temperature and heat-flux measurement with the ALTP-technique allows a direct and highly time-resolved determination of heat transfer coefficients and local Nusselt-numbers. This enables for the first time a direct heat transfer characterization without the necessity of simulative, numerical or theroretical approaches or assumptions.

Kurzdarstellung

In dieser Arbeit wird eine neue Sensorik mit Messkette und Signalverstärkung zur Messung von Wandwärmeströmen auf Basis der Atomic Layer Thermopile (ALTP) Technik entwickelt. Das Modul ermöglicht es Wärmeströme direkt und lokal bis zu $10\,000\,\mathrm{W\,cm^{-2}}$ mit einer zeitlichen Auflösung von über 1 MHz zu erfassen. Die aktive Kühleinrichtung und das gedichtete Gehäuse ermöglichen den Einsatz in Hochtemperatur- und Hochdruck Anwendungen. Eine integrierte Messkette mit Signalverstärkung bietet eine höhere Signalqualität bei starken elektromagnetischen Störpotentialen. Die Kalibrierung und der Vergleich mit anderen gängigen Wärmestrommesstechniken wird in speziell entwickelten konvektiven und strahlungsbasierten Prüfständen durchgeführt. Die ALTP-Sensorik liegt in beiden Lastfällen innerhalb der Kalibriergenauigkeit. Dieser Übertrag der Sensitivität ist nicht für alle untersuchten Messtechniken möglich. Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der ALTP-Sensitivität zeigen $\approx 0{,}3\,\%\,\mathrm{K^{-1}}$.
Eine simulative FE-Untersuchung auf Basis zyklischer, stark transienter motorischer Lasten zeigt weder die zeitliche Konstanz, noch die Temperaturverteilung der ALTP beeinträchtigt. Dies gilt auch für den Betrieb mit Kühleinrichtung. Rußablagerungen legen eine Amplitudendämpfung von 10 % nahe.
Der Einsatz im Motor zeigt, dass herkömmliche Mittelwertverfahren die vorteilhaften Signaleigenschaften der ALTP-Sensorik in Bezug auf Zeit- und Spitzenwertauflösung stark einschränken. Gemessene Spitzenwerte über $1200\,\mathrm{W\,cm^{-2}}$ liegen ca. fünfmal höher als aktuelle Literaturwerte. Ein linearer Zusammenhang von Motorleistung und Wandwärmestrom konnte für die meisten Betriebspunkte gefunden werden. Der Vergleich mit Druckmessdaten offenbart signifikante Vorteile der ALTP-Sonde und des Wärmestromsignals gerade im Ladungswechselbereich, bei Körperschallbelastung und bei Auflösung großer lokaler Signalgradienten während der Verbrennung.
Die Entwicklung einer Schaltungstechnik zur kombinierten Temperatur- und Wandwärmestrommessung auf Basis der ALTP-Technik ermöglicht Wärmeübergangskoeffizienten und lokale Nusseltzahlen mit hohem Signal-zu-Rausch-Verhältnis und hoher Zeitauflösung zu messen. Damit ist erstmals eine direkte Charakterisierung des Wärmeübergangs ohne die Notwendigkeit simulativer, numerischer bzw. theoretischer Annahmen möglich.

Liste zu beitragenden peer-reviewed Veröffentlichungen

Veröffentlichungsliste - Hauptverfasser
Zeitschriftenbeiträge:

- Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: Highly time resolved, combined temperature and heat flux measurement technique based on ALTP sensors. In: The American Society of Mechanical Engineers (2022) – Journal of Turbomachinery, Nr. 144(12), S. 121011 – ISSN 0889504X

- Huber, Konstantin ; Gackstatter, Felix ; Rödiger, Tim ; Wensing, Michael: Highly time-resolved heat flux measurement in a combustion engine. In: International Journal of Engine Research (2022), S. 14680874221118970 – ISSN 1468–0874

- Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim ; Bhatnagar, Lakshya ; Paniagua, Guillermo: Atomic Layer Thermopiles: Comprehensive Calibration, Comparisonand Application in High Speed Flows. In: International Journal of Thermal Sciences (2022), Nr. 183, S. 107881 – ISSN 1290-0729

- Huber, Konstantin ; Gackstatter, Felix ; Rödiger, T.: Short Communication: A novel method for parallel measurement of temperature and heat flux with a single layer probe. In: Measurement 193 (2022), S. 110915. – ISSN 02632241

Konferenzbeiträge:

- Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: Comparison of Radiation and Convection-Based Calibration of Fast-Response Heat Flux Sensors. In: Volume 5: Controls, Diagnostics, and Instrumentation – Proceedings of the ASME Turbo (2020), Nr. GT2020-14412

- Huber, Konstantin ; Gackstatter, Felix ; Rödiger, Tim: Untersuchung von Miniatur-Verstärkersystemen für Breitbandsensorsignale am Beispiel des ALTP-Messsystems. In: Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2022 (2022)

- Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: A transient thermal analysis of a fast-response heat flux sensor. In: 25th International Congress of Theoretical- and Applied Mechanics ICTAM 20+1 (2021), ISBN 978-83-65550-31-6, Nr. O107621 - FS03

- Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: Highly time resolved, combined temperature and heat flux measurement technique based on ALTP sensors. In: The American Society of Mechanical Engineers – Proceedings of the ASME Turbo (2022), Nr. GT2022-82873

Veröffentlichungsliste - Mitverfasser
Konferenzbeiträge:

- Gackstatter, Felix ; Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: Ein neuartiges Atomlagenthermosäulen-basiertesSensorsystem für hochzeitaufgelöste Wandwärmestrommessungen. In: Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2020 (2020)

- Gackstatter, Felix ; Huber, Konstantin ; Rödiger, Tim: Bestimmung der thermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und -kapazität einer Lithium-Ionen Pouchzelle. In: Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2022 (2022)

Liste studentischer Arbeiten welche vom Autor betreut wurden und einen signifikanten Beitrag geleistet haben

- Lukas Brunner (Bachelorarbeit): Entwicklung einer wassergeksühlten Kaliriereinrichtung zur konvektiven Langzeitmessung von Wärmestromsensoren (2021)

- Fabian Taubenthaler (Bachelorarbeit): Simulative Analyse von Wärmestromsensoren in konvektiven Kalibriereinrichtungen (2021)

- Markus Haas (Masterarbeit): Simulative Untersuchung einer Ebenen Plattenströmung mit integriertem Wärmeflusssensor anhand einer gekoppelten CFD/CHT-Simulation (2021)

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen **xi**

1 Motivation der Arbeit **1**

2 Grundlagen zu den untersuchten Wärmestrommessmethoden und der ALTP-Technik **3**
2.1 Indirekte Wärmestrommessmethoden 3
2.1.1 Massenkalorimeter 3
2.1.2 Koaxiale Thermoelemente und Oberflächenthermoelemente 4
2.1.3 Numerische Wärmestrombestimmung auf Temperaturbasis 6
2.2 Direkte Messmethoden 7
2.2.1 Rundflächensensor 7
2.2.2 Differenzschichtsensoren 8
2.2.3 Die Atomlagenthermosäule und der transversale Seebeck-effekt 9
Sensormodul für hohe Belastungen und aktiver Kühleinheit 11
Vorverstärkereinheit 12

3 Kalibrierung von Wärmestromsensoren **17**
3.1 Statische strahlungsbasierte Kalibrierung 18
3.1.1 Umgebung und Kalibrierprozess 19
3.1.2 Ungenaugigkeit des Mess- und Kalibriervorgangs 20
3.1.3 Kalibrierung der ALTP-Sensoren 20
3.1.4 Vergleich mit anderen Wärmestrommessmethoden 23
3.2 Statische Konvektionskalibrierung 26
3.2.1 Kalibriereinrichtung und Prozedur 27
3.2.2 Strömungseigenschaften des Prüfaufbaus 28
3.2.3 Sensorkalibrierung und Vergleich 31
Fester Düsenabstand 32
Variabler Düsenabstand 33
3.2.4 Signaleigenschaften und Sensorcharakteristiken 36

4 Temperaturabhängigkeit der ALTP-Sensorik **41**
4.1 Temperatureigenschaften der Seebeck-Koeffizienten 41
4.2 Temperaturabhängige Sensitivitätsformulierung und -regression . 43
4.3 Temperaturabhängigkeit des Schichtwiderstands 49

5 Simulative Untersuchung der ALTP-Technik mit thermisch-transienten Lasten 51
5.1 Materialeigenschaften 52
5.2 Randbedingungen und synthetische Lasten 53
5.3 Diskretisierung und Modellerstellung 55
5.4 Analyse des Funktionsprinzips 58
5.5 Netzstudie 64
5.6 Invasivität der ALTP-Sonde im motorischen Betrieb 66
5.7 Theoretische Untersuchung der ALTP Zeitauflösung für motorische Anwendungen 67

6 Die ALTP-Technik im Verbrennungsmotor 71
6.1 Motorprüfstand und Motorparameter 71
6.2 Messinstrumentierung und Testkonditionen 72
6.3 Motormessergebnisse 74
6.3.1 Vergleich von Einzelzyklusdaten und zyklusgemittelten Messdaten 75
6.3.2 Wandwärmestrommessungen 79
6.3.3 Einordnen der Messdaten anhand Literaturdaten 81
6.3.4 Frequenzbereichsanalyse des Messsignals 87
6.3.5 Detailanalyse der Motorzyklen 92
6.3.6 Energiebilanzierung 99
6.4 Konsistenz- und Wiederholbarkeitsuntersuchung 100
6.5 Fehlerrechnung und Ungenauigkeitsanalyse 103

7 Entwicklung einer kombinierten Temperatur- und Wärmestrommessung für ALTP-Sensoren 107
7.1 Theoretischer Ansatz 107
7.2 Methodikaufbau und elektrische Schaltung 108
7.3 Schaltungstechnische Simulation der Methodik 112
7.4 Kalibrierung der Messmethodik 115
7.5 Signalzeitverläufe in den Kalibrierprüfständen 116
7.5.1 Wärmelast durch Strahlung 117
7.5.2 Konvektive Wärmelast 118
7.6 Vergleich von direkten und indirekten Wärmestromsignalen . . . 120
7.6.1 Wärmelast durch Strahlung 121
7.6.2 Konvektive Wärmelast 122
7.6.3 Nusseltzahlbestimmung und direkte Bestimmung von hochfrequenten Wärmeübergangsgrößen 127
7.7 Vorteile der kombinierten Methodik 131

8 Ausblick und Zusammenfassung 133

Literaturverzeichnis 139