

THEMA DER BACHELORARBEIT

Experimentelle Untersuchung der konduktiven Erwärmung eines durchströmten Wabenkörpers

*Experimental investigation of an aerated honeycomb body heated by direct resistance
heating*

Bearbeiter:

Rodmacher, Sophie
Studiengang: B-UWE

zur Erlangung des akademischen Grades:

Bachelor of Science

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Tobias M. Fieback

Übergabetermin des Themas:

15. April 2020

Abgabetermin der Arbeit:

16. September 2020



Vorsitzender des Prüfungsausschusses



Prof. Dr.-Ing. Tobias M. Fieback

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Sophie Rodmacher, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

„Experimentelle Untersuchung zur konduktiven Erwärmung eines durchströmten
Wabenkörpers“

beinhaltet interne und vertrauliche Informationen der Firma:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit und eventuell beiliegender Zeichnungen und Daten, im Gesamten oder in Teilen, ist grundsätzlich untersagt. Es dürfen keinerlei Kopien oder Abschriften – auch in digitaler Form – gefertigt werden.

Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt.

Der Sperrvermerk ist gültig bis zum **31.12.2023**.

Ort, Datum

Unterschrift

AUFGABENSTELLUNG ZUR BACHELORARBEIT

Experimentelle Untersuchung der konduktiven Erwärmung eines durchströmten Wabenkörpers

Experimental investigation of an aerated honeycomb body heated by direct resistance heating

Einführung

Die sichere, bezahlbare und nachhaltige Energieversorgung der Zukunft wird wesentlich durch die effiziente Wandlung primärer, überwiegend regenerativer Energieträger zu sekundären Energieträgern wie Strom und Wärme sowie deren effiziente Nutzung bestimmt. Power-to-Heat Technologien bieten für die Deckung des Wärmebedarfs lastflexible und energieeffiziente Lösungen an. Deshalb werden am Institut für Technische Thermodynamik des DLR-Stuttgart (DLR-TT) Power-to-Heat Konzepte in Kombination mit Wärmespeichern für den Hochtemperaturbereich $> 500^{\circ}\text{C}$ entwickelt und untersucht. Feststoffwärmespeicher mit einer integrierten Elektrobeheizung verfolgen das Ziel, elektrische Überschussleistungen im Netz während des Beladens in Hochtemperaturwärme umzuwandeln, diese zu speichern und während des Entladens in den Prozess einzukoppeln. Hierfür wird Luft aus der Umgebung als Wärmeträgerfluid verwendet. Für den Beladevorgang hat die konduktive Erwärmung eines keramischen und mit Luft durchströmten Wabenkörpers ein hohes Potential zur lastflexiblen Erzeugung von Hochtemperaturwärme bei hohen Prozesswirkungsgraden und gleichzeitig hohen Leistungsdichten. Ziel der ausgeschriebenen Abschlussarbeit ist es, durch eine experimentelle Untersuchung des Power-to-Heat Konzepts dieses Potential nachzuweisen.

Aufgabenstellung

Zur Erfüllung des übergeordneten Ziels müssen folgende Inhalte bearbeitet werden:

- Einarbeitung in das Themengebiet der konduktiven bzw. direkten Widerstandserwärmung
- Konzeptionelle Weiterentwicklung und technische Erweiterung des Laborteststands um die Teilsysteme: Wärmedämmung, Elektroden- und Strömungsanbindung
- Definition von Messgrößen und Messstellen sowie anschließende Integration der Messtechnik
- Inbetriebnahme des Teststands und Nachweis eines prozesssicheren Betriebs bei Zielvorgaben
- Definition konstanter und variabler Prozessparameter (Spannung, Anpressdruck, Volumenstrom, etc.)
- Vorbereitung und Durchführung einer Messkampagne zur Identifikation der Prozesseffizienz und Leistungsdichte im Hochtemperaturbetrieb
- Auswertung der experimentellen Ergebnisse und Bewertung des Power-to-Heat Konzeptes
- Erstellung einer Abschlussarbeit mit anschließender Präsentation der Ergebnisse

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Doreen Bayer-Buhr

Wissenschaftlicher Betreuer: M. Eng. Sergej Belik (DLR e. V.)

Technischer Betreuer: M. Eng. Lukas Hofer (DLR e. V.)


Prof. Dr.-Ing. Tobias M. Fieback

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Grundlagen der konduktiven Erwärmung	3
2.2 Elektrische Heizsysteme auf Basis keramischer Werkstoffe	7
2.2.1 Konzeptioneller Aufbau durchströmter Heizelemente	8
2.2.2 Konzepte zur Strömungsanbindung	10
2.2.3 Konzepte zur Elektrodenanbindung	12
2.3 Technische Keramiken	14
3 Konstruktionsmethodik	18
3.1 Konstruktionsablauf nach VDI 2221	18
3.2 Spezifikationsphase	19
3.2.1 Präzisierung der Aufgabenstellung	19
3.2.2 Definition der Zielgrößen und Ausarbeitung der Anforderungs-	
liste	20
3.3 Konzeptphase	20
3.3.1 Funktionsstruktur	21
3.3.2 Morphologischer Kasten	23
3.4 Gestaltungsphase	26
3.4.1 Auslegung der Teilsysteme	26
3.4.2 Gesamtentwurf	29
4 Experimentelle Untersuchungen	32
4.1 Vorversuche	32
4.2 Versuchsaufbau	36
4.3 Versuchsplanung und Durchführung	41
4.4 Ergebnisse und Diskussion	43
4.4.1 Standardunsicherheitsbetrachtung	46
4.4.2 Referenzversuch und Bestimmung des spezifischen elektrischen	
Widerstands	48
4.4.3 Aufheizversuche	49
4.4.4 Durchströmungsversuche	55

5 Zusammenfassung und Ausblick	64
Lateinisches Symbolverzeichnis	66
Griechisches Symbolverzeichnis	67
Indizes	68
Abkürzungsverzeichnis	71
Abbildungsverzeichnis	72
Tabellenverzeichnis	75
Literaturverzeichnis	76
Anhang A: Anforderungsliste	81
Anhang B: Aufheizversuche	85
Anhang C: Durchströmungsversuche	89

1 Einleitung

In Deutschland hat sich mit dem fortschreitenden Klimawandel der Wunsch nach einer umweltfreundlichen Energieerzeugung entwickelt. 14,5 % der Wärme wird in Deutschland aus erneuerbaren Energien bereitgestellt. Ein Großteil davon kommt jedoch aus der Verbrennung von biogenen Brennstoffen und Gasen [42], welche nicht emissionsfrei ist.

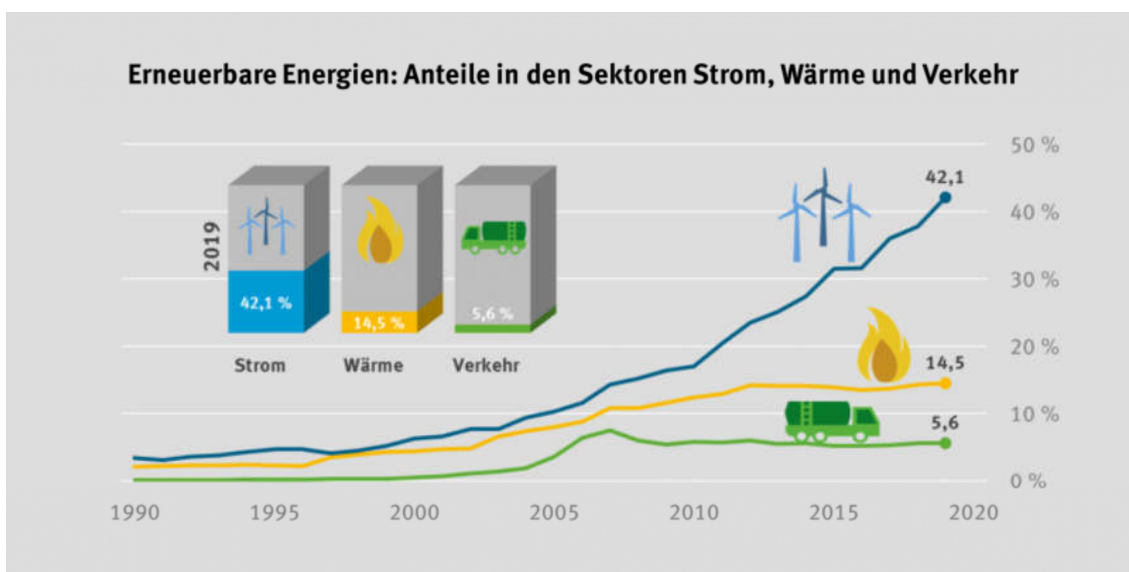


Abbildung 1: Anteile erneuerbarer Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (AGEE-Stat / Umweltbundesamt [42])

Power-to-Heat-Technologien ermöglichen es Überschussstrom aus erneuerbaren Energien effizient in Nutzwärme umzuwandeln. In der vorliegenden Arbeit wird als Power-to-Heat-Konzept die konduktive Erwärmung eines mit Luft durchströmten keramischen Wabenkörpers untersucht. Dabei wird Umgebungsluft möglichst leistungsstark und effizient erwärmt. Das Hauptziel ist der Nachweis einer Heizleistung von mindestens 2,5 kW sowie einer Wabenkörpertemperatur von 700 °C.

Für die Untersuchungen wird ein Teststand um die Komponenten Strömungsanbindung, Elektrodenanbindung und Wärmedämmung erweitert, aufgebaut und in Betrieb genommen. In experimentellen Voruntersuchungen werden zunächst die Haupteinflussgrößen auf die konduktive Erwärmung identifiziert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine definierte Messkampagne zur Durchströmung des konduktiv

erwärmten Wabenkörpers mit zuvor festgelegten variablen und konstanten Prozessparametern durchgeführt. Abschließend erfolgt eine energetische Bewertung der Prozesseffizienz in verschiedenen Leistungsbereichen.