

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

10/09/2015

Fertigungstechnologie für ein Bimetall - Längs- rippenrohr für die Anwendung in Latentwärmespeichern

Projektnummer: 843934

Energieforschungsprogramm - E!MISSION 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	E!MISSION 4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2014
Projektende	31/07/2015
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	17 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Institut für Energietechnik und Thermodynamik/TU-Wien Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik/TU- Wien
AnsprechpartnerIn	Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heimo WALTER
Postadresse	Institut für Energietechnik und Thermodynamik Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien
Telefon	++43 (1) 58801 302318
Fax	++43 (1) 58801 302399
E-mail	heimo.walter@tuwien.ac.at
Website	http://www.tuwien.ac.at/iet

Fertigungstechnologie für ein Bimetall - Längsrippenrohr für die Anwendung in Latentwärmespeichern

Autoren:

Heimo WALTER

Georg URSCHITZ

Jens BRIER

Markus HAIDER

Roland MERTZ

Friedrich BLEICHER

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung.....	8
3.1	Vorbereitende Analysen.....	8
3.2	Kurz- und Langzeitversuche der Verbindungsprototypen	17
3.3	Langzeituntersuchung des Kriechverhaltens des Aluminiums	18
3.4	Verbesserung der Aluminiuminnenrohrkontur.....	20
3.5	Fertigungstechnische Umsetzung der Bimetall-Herstellung.....	21
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	22
4.1	Experimentelle Voruntersuchung an ausgewählten Verbindungsvarianten	22
4.1.1	Kurzzeitversuche	22
4.1.2	Langzeitverhalten.....	25
4.2	Langzeituntersuchung zum Kriechverhalten des Aluminiums.....	27
4.3	Fertigung der Fügevorrichtung und der Bimetall-Rippenrohrverbindung	28
4.4	Experimentelle Untersuchung der Bimetall-Rippenrohrverbindung	28
5	Ausblick und Empfehlungen.....	29
6	Literaturverzeichnis	30
7	Kontaktdaten	32

2 Einleitung

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen (bezogen auf 1990) sowie die Erhöhung der Energieeffizienz um 20% bis 2020 wurden von der europäischen Union als Ziel gesetzt. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, ist es notwendig den Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoendenergieverbrauch sowie die Energieeffizienz zu erhöhen. In [1] kommen die Studienautoren zur Schlussfolgerung, dass sich der Prozess einer Energiestrategie den Herausforderungen der **Ausweitung der erneuerbaren Energien** und der **Erhöhung der Energieeffizienz** zu stellen hat. Ein Maßnahme zur Erhöhung der Energieeffizienz stellt u.a. auch die **verstärkte Nutzung von Abwärme in der Industrie und im produzierenden Gewerbe** dar (siehe dazu auch [2], [3]). Zahlreiche Industriebetriebe benötigen Dampf und setzen für die Fertigung u.a. Industrieöfen, welche zum großen Teil im Batch-Betrieb arbeiten, ein und haben daher ein großes Potential zur Abwärmenutzung. Ein **thermischer Speicher** kann hier dazu dienen, den intermittierend anfallenden Abwärmestrom in einen kontinuierlich zur Verfügung stehenden Wärmestrom zu transferieren und somit z.B. eine kontinuierliche Dampfproduktion gewährleisten. Viele Technologien zur Bereitstellung erneuerbarer Energien, die zweite Herausforderung laut [1], wie z.B. die Stromgewinnung mit Hilfe von Wind- oder Solarfarmen, stellen die erzeugte Energie unabhängig vom gerade benötigten Bedarf zur Verfügung. Wird der Anteil der regenerativ erzeugten Energie im Stromnetz weiter erhöht, so muss für Zeiten in denen ein Energieüberschuss oder ein Energiemangel vorliegt Vorsorge getroffen werden, was den **Bedarf an Speichermöglichkeiten** ebenfalls **erhöht**. Auch hier können thermischer Speicher zum Einsatz kommen, da Wärme sich wesentlich billiger speichern lässt als Strom [4]. Dieser technologische Ansatz zur Speicherung der elektrischen Energie wird Power-to-Heat bezeichnet (siehe dazu u.a. [5], [6], [7]). In [8] wird, neben der Reduktion der Subvention von fossilen Energieträgern, als **wichtigste Maßnahme**, die die Voraussetzungen für einen beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien schafft, der Infrastrukturausbau, allen voran die **Schaffung leistungsfähiger Übertragungsnetze und Speicher** (siehe dazu auch [9], [10]), gefordert. Die IEA weist in ihrer Roadmap [11] für den thermischen Mittel- und Hochtemperaturspeicher u.a. auf den erhöhten Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der **Reduktion der Systemkosten** und der **Verbesserung** der Speicher und des **dazugehörigen Equipments** hin (siehe dazu auch [12]). Dies führt dazu, dass für die nächsten Jahrzehnte die erneuerbare Energieerzeugung, die Energiespeicherung sowie die Energieverteilung zu einem wichtigen und stark wachsenden Markt und somit auch zu einem wichtigen Thema in Forschung und Entwicklung werden.

Aufgabenstellung

Die Speicherung thermischer Energie stellt neben der Speicherung von mechanischer, chemischer und elektrischer Energie eine Form der Energiespeicherung dar. Neben der simplen Ein- und Ausspeicherung von Wärmeenergie können thermische Energiespeicher im Zuge der Einbindung in thermodynamische Prozesse (Rankine, Brayton,...) auch eine attraktive Methode der Stromspeicherung darstellen. Um die thermische Energie von z.B. überhitztem Dampf zu speichern, wird ein Speicher auf Basis latenter Wärme als Subsystem benötigt um die Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme exergetisch günstig speichern zu können. Die am meisten diskutierten Speichermedien für Latentwärmespeicher sind

Salze und ihre Eutektika. Diese weisen jedoch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf ([13], [14], [15], [16], [17]). Zur Überwindung dieser Wärmetransportlimitierung in Latentwärmespeicher können z.B. Rippenrohre eingesetzt werden um eine hohe spezifische Oberfläche zu erzielen. Für die Einbindung eines Latentwärmespeichers in Kraftwerks- und Industrieprozesse, dessen Rippenrohre aus Aluminium gefertigt wurden, ist ein reines Aluminiumrohr aufgrund seiner Festigkeitswerte nicht geeignet. Es ist daher notwendig, die **höhere Warmfestigkeit des Stahls** mit der **guten Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums zu kombinieren**. Um die Eigenschaften beider Materialien in einem Wärmeübertragerrohr zu realisieren ist es erforderlich, das Rohr als **Bimetall-Rippenrohr** auszuführen.

Schwerpunkte des Projektes

Ziel des Sondierungsprojektes war es eine **Technologie**, welche eine **mechanische Verbindungsmöglichkeit für Bimetall-Rohre mit Längsrippen**, welche den speziellen Randbedingungen in einem Mittel- und Hochtemperatur-Latentwärmespeicher genügen, sowie deren grundsätzliche **Herstellungsverfahren zu entwickelt**. Diese Innovation zielte auf Einfachheit und Kosteneffizienz ab.

Angestrebt waren Erkenntnisse für ein validiertes Design-Konzept des Fertigungsprozesses sowie aussagekräftige Daten über die mechanische Verbindung zwischen den beiden Rohren unter den Betriebsbedingungen eines Hochtemperaturlatentwärmespeichers.

Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelte innerhalb der 4. E!MISSION Ausschreibung des Energieforschungsprogrammes prioritär den **Schwerpunkt TF 5: Speicher** mit dem **Subschwerpunkt TF 5/5.4: Thermische Speicher**, da im Zuge des Sondierungsprojektes eine effiziente Technologie (Verfahren) entwickelt werden sollte, welche eine wirtschaftliche und effiziente Herstellung von **Bimetall-Rohren mit Längsrippen** ermöglicht. Diese Technologie stellt einen wichtigen Schritt bei der Systementwicklung von Lade- und Entladekomponenten für Latentwärmespeicher dar. Der Einsatz der Bimetallrohre kann auf unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgen.

Erledigen

Verwendete Methoden

Um die angestrebten Ziele für das Sondierungsprojekt zu erreichen, wurden die zu verrichtenden Forschungstätigkeiten und organisatorischen Arbeiten in die nachstehend angeführten Arbeitspakete untergliedert:

AP1: Projektmanagement:

Im AP 1 erfolgte das Management des Gesamtprojektes und der einzelnen Arbeitspakete. Dabei wurden Projektmeetings und Besprechungen organisiert und koordiniert sowie für eine effiziente Kommunikation innerhalb des Projektkonsortiums gesorgt. Es erfolgte die Initiierung von Abstimmungsgesprächen für die Feindefinition zu den einzelnen Arbeitspaketen. Das Projektmanagement führte auch die finanzielle Abwicklung des Projektes sowie das gesamte Berichtswesen durch. Dabei wurden während des Berichtszeitraumes sowohl ein Zwischen- als auch der Endbericht erstellt. Das Projektmanagement war darüber hinaus auch für die Kommunikation zum Fördergeber zuständig.

AP2: Mechanische Gestaltung des Bimetall-Rippenrohres:

Um das Ziel der mechanischen Gestaltung des Bimetall-Rippenrohres zu erreichen, wurde in einem ersten Schritt ein detailliertes Anforderungsprofil für die gesuchte Verbindung erstellt, um mögliche Verbindungsvarianten, unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Umsetzung, zu ermitteln. Ergänzend dazu wurde auch eine Literatur- und Patentrecherche durchgeführt. Basierend auf der Variantenvielfalt wurde in einem zweiten Schritt durch die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verbindungen eine Auswahl getroffen, welche der mechanischen Verbindungsmöglichkeiten näher untersucht werden soll. Die ausgewählten Varianten wurden modelliert und mittels Finiter-Elemente-Berechnungen auf ihre Eignung (plastische Verformungen und Spannungszustände in den beiden Rohren bei unterschiedlichen Betriebszyklen des Speichers) untersucht. Die für eine Umsetzung geeigneten Verbindungen wurden anhand der gewonnenen Simulationsergebnisse für weitere experimentelle Analysen ausgewählt und in der mechanischen Werkstatt gefertigt. Die gefertigten Verbindungsmöglichkeiten wurden bei Umgebungstemperatur und unter den Betriebsbedingungen eines Hochtemperaturlatentwärmespeichers experimentell untersucht. Nach Auswertung der experimentell gewonnenen Daten wurde die am erfolversprechendste mechanische Verbindung für die weitere Umsetzung ausgewählt.

AP3: Fertigungstechnische Umsetzung der Bimetall-Herstellung:

Aufbauend auf den Ergebnissen des AP2 wurde für die ausgewählte mechanische Verbindung ein detailliertes fertigungstechnisches Engineering der Vorrichtung zur Herstellung des Bimetall-Rippenrohres vorgenommen. Dies beinhaltet die fertigungstechnische Auslegung und konstruktive Konzeption sowie ein Detail-Engineering nach dem Stand der Technik (Basic Engineering).

AP4: Fertigung und Testen der Fertigungseinheit:

Im Zuge dieses Arbeitspakets wurde der Apparat für die Herstellung der Bimetall-Längsrippenrohre gefertigt, in Betrieb genommen und die ersten Prototypen der Bimetall-Rippenrohre hergestellt. Die Fertigung der einzelnen Komponenten der Vorrichtung zur Herstellung des Bimetallrohres wurde in der mechanischen Werkstätte des Institutes für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik durchgeführt.

AP5: Experimentelle Erprobung des Bimetall-Rippenrohr-Prototyps:

Mit Hilfe des in AP4 gefertigten Apparates wurden Prototypen der Bimetall-Rippenrohre hergestellt, welche experimentell untersucht wurden. Dazu wurden die Proben in einem Muffelofen den Betriebsbedingungen eines Hochtemperaturlatentwärmespeichers über einen Zeitraum von 5 Stunden ausgesetzt. Nach Beendigung der Langzeitversuche wurden die Bimetallrohr-Prototypen aus dem Muffelofen entnommen und die Verbindung auf seine mechanische Festigkeit hin untersucht.

AP6: Dissemination:

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Sondierungsprojektes wurden einerseits beim österreichischen Patentamt zur Patentierung angemeldet [18] und andererseits wurden diese auf internationalen Konferenzen präsentiert [19], [20], [21].

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Vorbereitende Analysen

Ziel des Sondierungsprojektes war es, eine mechanische Verbindungsmöglichkeit sowie eine Technologie zur Herstellung eines Bimetallrohres mit Längsrippen zu entwickeln, welche für den Einsatz in Hochtemperaturlatentwärmespeicher geeignet ist. Im Rahmen des Sondierungsprojekts sollten folgende zwei grundlegende Fragestellungen gelöst werden:

- 1) Wie sollte eine mechanische Verbindung zwischen einem Stahl- und Aluminiumrohr gestaltet sein, so dass ein Eindringen des Wärmespeichermaterials zwischen die beiden Rohre verhindert wird um eine gute Wärmeleitfähigkeit zu gewährleisten? Dabei sollte die Verbindung zwischen den beiden Rohren so gestaltet sein, dass sowohl im Betriebs- als auch im kalten (abgeschalteten) Zustand des Wärmespeichers immer ein Anpressdruck gegeben ist.
- 2) Wie sollte ein dazugehörige Vorrichtung bzw. Apparat aussehen, welcher für die Fertigung der Bimetall-Rippenrohre geeignet ist? Diese Produktionsvorrichtung sollte eine möglichst schnelle, günstige und nichtspanende Fertigung des Bimetall-Rippenrohres ermöglichen.

Zum Beginn des Sondierungsprojektes wurde daher eine umfangreiche Literatur- und Patentrecherche durchgeführt um bestehende Patente im Bereich der Fertigung von Bimetallrohren nicht zu verletzen bzw. doppelte Entwicklungen von vornherein auszuschließen. Nach der Studie der maßgeblichen Literatur und Patente wurde ein Anforderungskatalog erstellt, welchen die zu entwickelnde mechanische Verbindung des Bimetall-Rippenrohres erfüllen sollte. Dieser Anforderungskatalog wurde unter dem Gesichtspunkt erstellt, dass Realisierbarkeit und andere Kriterien in dieser Phase noch nicht berücksichtigt wurden. Diese Vorgehensweise wurde gewählt um die Variantenvielfalt für die mögliche Verbindung möglichst groß zu halten. In diesem Anforderungskatalog wurden u.a. folgende Punkte aufgenommen:

- Temperaturbeständigkeit der mechanischen Verbindung.
- Wechselnde, dynamische thermische Beanspruchung im Bereich von 270-360°C (Der Temperaturbereich ist abhängig von der Phasenwechseltemperatur des Speichermediums).
- Gewünschte Lebensdauer von 10 Jahren. Ein Kriechen (Relaxieren) des Materials muss bei dessen Auswahl als Rippenwerkstoff beachtet werden.
- Kein Überschreiten der Dehngrenze bei beiden an der Verbindung beteiligten Materialpartner.
- Kein Eindringen des Salzes in die Verbindung.
- Gute Wärmeleitfähigkeit des Rippenrohres.
- Geringe Korrosionsneigung der zum Einsatz kommenden Materialien.
- Große Verbindungslängen sollen möglich sein (im Idealfall bis zu 20 m).
- Rohrwerkstoff möglichst „typischer Kesselstahl“ (P235GH TC1,...).
- Ähnliche Ausdehnungskoeffizienten für die an der Verbindung beteiligten Materialpartner.

Der Anforderungskatalog stellte den maximalen angestrebten Anspruch an die mechanische Verbindung für das Bimetall-Rippenrohr dar. Eine vollständige Erfüllung aller im Anforderungskatalog enthaltenen Notwendigkeiten können in einem Produkt jedoch nicht umgesetzt werden.

Die primäre Herausforderung bei der gesuchten mechanischen Verbindung von Stahlrohr mit Aluminium(rippen)rohr sind die großen Temperaturdifferenzen zwischen den Betriebs- und Stillstandszeiten des Speichers. Während der Stillstandszeiten des Wärmespeichers kann dieser, ausgehend von der Betriebstemperatur des Speichers, welche abhängig von der Schmelztemperatur des Phasenwechselmaterials bis ca. 360°C betragen kann, bis auf Umgebungstemperatur abkühlen. Aufgrund dieser großen Temperaturunterschiede und der unterschiedlichen Materialien des Rippenrohres ergeben sich wesentliche Differenzdehnungen im Durchmesser wie auch in der Länge. Die Kompensation dieser Differenzen ist, neben dem Anspruch der Beibehaltung einer immer gewährleisteten Anpresskraft über den gesamten Temperaturbereich, **eine wesentliche Herausforderung** an die Verbindung.

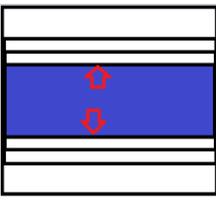
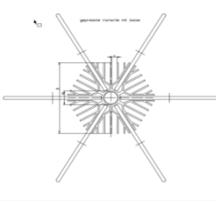
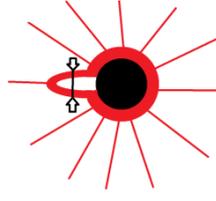
Tabelle 1: Auswahl der gefundenen grundlegenden Verbindungsmöglichkeiten

Verbindung	Beschreibung	Vorteil	Herausforderung
Presspassung	Befestigung der Welle auf der Nabe mittels Presspassung	<ul style="list-style-type: none"> Keine zusätzlichen Bauteile benötigt 	<ul style="list-style-type: none"> Zeitstandfestigkeit, Spaltbildung Fertigung bei großer Länge Dichtheit der Verbindung am unteren Ende bei Spalt
Schellenverbindung	Verspannung der Bauteile mittels Schelle	<ul style="list-style-type: none"> Kompensation der Längen- und Durchmesseränderung 	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Bauteile benötigt Platzbedarf der Schelle
Kontaktpartner zw. Aluminium und Stahl	Herstellen der Verbindung mittels Kontaktpartner	<ul style="list-style-type: none"> Schnelle und unkomplizierte Montage Kompensation der Längen- und Durchmesseränderung 	<ul style="list-style-type: none"> Mehr Bauteile und Materialien Wärmeleitfähigkeit geringer Dichtung zwischen Aluminium und Stahl notwendig
Seilspannung	Herstellen der Verbindung der Rohrbündel und Rippenrohr-elemente durch Seile	<ul style="list-style-type: none"> Gute Kompensation der Längen- und Durchmesseränderung 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwand Positionieren der einzelnen Rohre
Schraubverbindung	Verschrauben der Bauteile		<ul style="list-style-type: none"> bestehende Patente Zeitstandfestigkeit Platzbedarf fürs Schrauben Komplexität (Gewinde)

Basierend auf den Anforderungskatalog wurden in mehreren Brainstormings-Sitzungen unterschiedlichste grundlegende Verbindungsvarianten und deren Vor- und Nachteile aufgelistet und diskutiert. Bereits in diesem frühen Stadium der Variantenfindung wurden die möglichen Fertigungsmethoden der Verbindung nicht vollkommen außer Acht gelassen. Realisierbarkeit und andere Kriterien wurden in dieser Phase der Variantenbildung nicht berücksichtigt, wodurch es möglich wurde, die Variantenvielfalt entsprechend hoch zu halten. Eine Auswahl der während des Brainstormings gefundenen grundlegenden Verbindungsmöglichkeiten zwischen dem Stahl- und Rippenrohr, welches z.B. aus Aluminium gefertigt sein kann, sind samt kurzer Beschreibung und den Vor- und Nachteilen in der Tabelle 1 dargestellt. Stellvertretend für etwaige andere zum Einsatz kommende Rippenrohrmaterialien wird im Weiteren immer Aluminium verwendet.

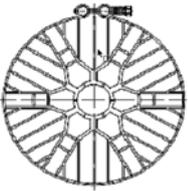
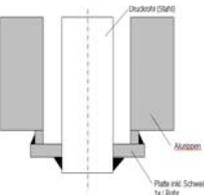
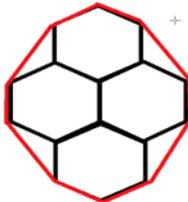
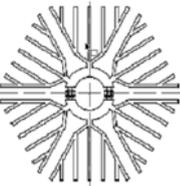
Ausgehend von der gefundenen Variantenvielfalt an denkbaren Verbindungsmöglichkeiten für das zu entwickelnde Bimetall-Rippenrohr wurden aus den einzelnen grundlegenden Verbindungsmöglichkeiten zwischen dem Stahl- und Rippenrohr mögliche Fertigungsverfahren abgeleitet. Somit konnte für jede einzelne Verbindungsmöglichkeit eine unterschiedliche Anzahl an weiteren Optionen an Fertigungsverfahren gefunden werden. In Tabelle 2 ist eine Auswahl an gefundenen Fertigungsmöglichkeiten für die Verbindung des Stahl- und Rippenrohres zusammengestellt.

Tabelle 2: Auswahl an gefundenen Fertigungsmethoden

Verbindung	Beschreibung	Vorteil	Herausforderung
	Aufweitung des Stahlrohrs durch hydrostatischen Druck	<ul style="list-style-type: none"> Gleichmäßiges dehnen des Innenrohrs 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwand Bleibende plastische Verformung groß genug für Passung? Stahlrohr muss plastisch verformt werden
	Rippenrohrprofil auf Stahlrohr aufwalzen	<ul style="list-style-type: none"> 	<ul style="list-style-type: none"> Zeitstandsfestigkeit Plastische Verformung Passung herstellbar? bereits patentiert
	Rippenrohrprofil mit Ausnehmung zum Spannen. Eventuell Schrauben mit Feder für gleichmäßige Vorspannung in allen Temperaturzuständen.	<ul style="list-style-type: none"> Passung gut fertigbar Presskraft über Lasche einstellbar Strangpressbar Größe Längen herstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> Zeitstandsfestigkeit Dichtheit an den Enden der Verbindung fraglich

Energieforschungsprogramm - E!MISSION 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

<p>Gelenkbolzen- schelle</p> 	<p>Vorspannung mit Feder kann thermische Längenänderungen kompensieren während die Vorspannung gehalten wird</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentfertigung möglich • konstanter Druck, Längsausdehnung möglich • Nachspannen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Benötigt Platz zwischen den Bimetallrohren für Schelle • eher runde Rippenrohrform notwendig
<p>Kleben</p> 	<p>Temperaturbeständiger Kleber wird aufgebracht</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Schnell, unkompliziert 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitung muss gegeben sein • Längenänderungen und Durchmesseränderungen müssen kompensiert werden
<p>Löten</p> 	<p>Hartlot mit Flussmittel wird aufgebracht, Rohre werden übereinander gesteckt und danach auf 450-600°C erwärmt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Wärmeleitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitung muss gegeben sein • Längenänderungen und Durchmesseränderungen müssen kompensiert werden • Patent existiert schon
<p>Anderes Medium</p> 	<p>Spalt zwischen Rippenrohr und Stahlrohr wird mit einem anderen gut wärmeleitenden Medium gefüllt, welches entweder in pulver- oder wollartiger Form bzw. anders vorliegt; ein Rohrende wird verschlossen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Kompensation der Längenänderung zw. Rippenrohr und Stahlrohr, keine Segmentierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Welches Material ist geeignet für den Spalt? • Abdichtung am Rohrende
<p>Seilspannung</p> 	<p>Rohrbündel wird von Seil im gesamten zusammenge-spannt, Seile in regelmäßigen Abständen über die Höhe verteilt, Halbschalen bei Rippenrohren</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Kompensation der Ausdehnung normal zur Rohrachse? • Lage zu den Sammlern verändert sich mit der Ausdehnung
<p>Schraub- variante</p> 	<p>Erarbeitete Lösung im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Flüssiges Salz eventuell in Verbindung? • Dichtungsmaßnahmen?

Aus der gesamten Variantenvielfalt wurden die erfolgversprechendsten 3 Möglichkeiten zur Herstellung einer Bimetallverbindung ausgewählt und erste Fertigungszeichnungen erstellt. Ausgehend von diesen Basisversionen wurden vor Fertigung der Proben Finite-Elemente Berechnungen der kritischen Stellen der verschiedenen Varianten durchgeführt, um diese zu optimieren. Die Länge der Proben wurde mit 120 mm fixiert, da diese noch gut in den für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung stehenden Muffelofen N11/HR der Firma Nabertherm eingebracht werden konnten. Die Rippen zur Wärmeübertragung sind für eine erste Überprüfung der grundlegenden Funktionalität der Verbindung nicht von entscheidender Bedeutung, und wurden daher in den experimentellen Untersuchungen dazu nicht berücksichtigt. Den handelnden Personen am Forschungsprojekt war jedoch bewusst, dass durch eine Nichtberücksichtigung der Rippen eine zusätzliche Steifigkeit, welche durch die Rippen vorhanden ist, verloren geht.

➤ **Variante 1: Biegelasche**

Die Variante der Biegelasche (siehe Abbildung 1) stellt eine elegante Möglichkeit dar, den Anpressdruck des Aluminiumprofils auf das Stahlrohr über die Lasche einstellbar zu gestalten. Das ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer reinen Presspassung. Als Ausgangsdesign geht man von einem einfachen Rohr mit Biegelasche aus. Von der Biegelasche wurden zwei Varianten untersucht: Variante 1a mit einer Biegelasche (siehe Abbildung 1) und Variante 1b mit zwei gegenüberliegenden Laschen.



Abbildung 1: Variante 1; Biegelasche



Abbildung 2: Variante 2; Presspassung

➤ **Variante 2: Presspassung**

Diese Variante diente als Referenzverbindung im Rahmen des vorliegenden Projektes. Für die reine Presspassung wird ein Aluminiumrohr mit dem Stahlrohr, entsprechend der Abbildung 2, zusammengefügt. Diese Möglichkeit der mechanischen Verbindung scheidet aber als mögliche Bimetall-Rippenrohrverbindung aus.



Abbildung 3: Variante 3; Zinkschicht



Abbildung 4: Variante 4; Presspassung mit Querrippen

- **Variante 3: Zinkschicht**
Das Verhalten der Presspassung im Beisein eines dritten Werkstoffes, welcher zwischen dem Stahl und dem Aluminiumrohr aufgebracht wird, soll bei dieser Variante untersucht werden. Dafür werden die Stahlrohre zusätzlich mit einer Zinkschicht versehen und danach mit dem Aluminiumrohr, entsprechend der Abbildung 3, zusammengefügt.
- **Variante 4: Querrippen mit Presspassung**
Da die Herstellung einer reinen Presspassung mit einer Länge >1m als schwierig erachtet wird (Knickung des Stahlrohres muss verhindert werden, Temperaturänderung beider an der Fügung beteiligten Partner ist gegeben), besteht die Grundidee bei dieser Variante im Aufteilen des Rippenrohres in Sektionen mit einer Querrippe und einem Aufschieben dieser Sektionen – Stück für Stück (siehe Abbildung 4). Damit sollte die Herstellung einer Presspassung auch über größere Länge möglich sein.

Im Folgenden sollen einzelne ausgewählte Ergebnisse der Finite-Elemente Berechnungen kurz dargestellt werden:

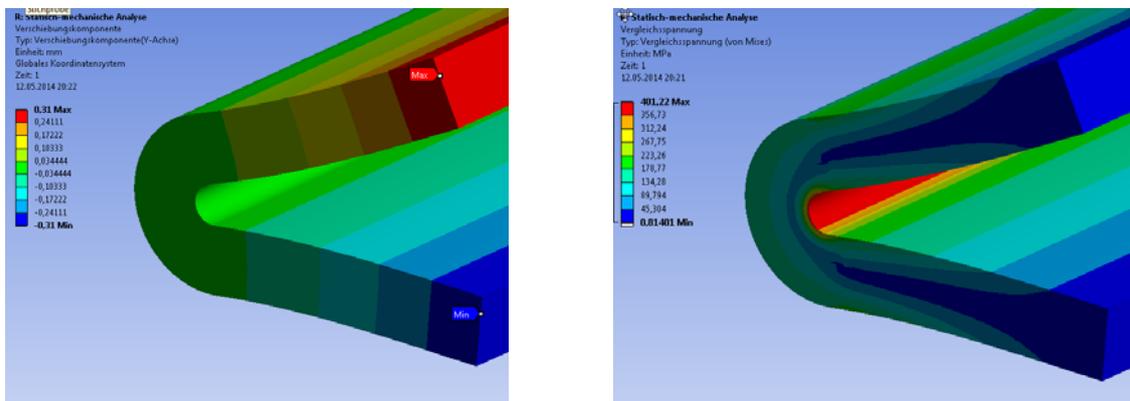


Abbildung 5: a) Verschiebungen und b) Vergleichsspannungen in der Lasche der Variante 1

Abbildung 5a und Abbildung 5b zeigen Ergebnisse einer Finite-Elemente Simulation des ersten Entwurfs der Geometrie der Lasche für die Varianten 1a und 1b. Bei einer Aufweitung der Lasche von ca. 0,3 mm (siehe Abbildung 5a – den Verschiebungen) entsteht an der Oberfläche des inneren Biegeradius der

Aluminiumlasche eine Vergleichsspannung deren Wert größer als 400 N/mm^2 ist (siehe Abbildung 5b – den Vergleichsspannungen). Bei der Verwendung des Aluminiumwerkstoffes EN AW6060 befindet man sich hier im Bereich der plastischen Verformung. Diese Verbindung entspricht somit nicht dem Anforderungskatalog, da die Zeitstandsfestigkeit nicht eingehalten werden kann. Schon beim Fügen der Verbindung würde es beim Aluminium zu einer ungewollten plastischen Verformung führen.

Wie mit Hilfe der Simulationsergebnisse dargestellt werden konnte, entstehen im Biegeradius der Lasche lokal sehr hohe Materialspannungen. Diese Materialspannungen müssen durch Änderungen an der Laschengeometrie so verändert werden, dass es zu keiner plastischen Verformung kommt. Das bedeutet, dass die Maximal auftretenden Materialspannungen an der Oberfläche des inneren Biegeradius der Aluminiumlasche in einen Bereich $< 200 \text{ N/mm}^2$ sein müssen. In Bezug auf das Langzeitverhalten sollten diese Maximalspannungen jedoch um eine Zehnerpotenz kleiner ausfallen, um ein Kriechen und eine Relaxation des zum Einsatz kommenden Aluminiummaterials zu reduzieren. Um eine geeignete Geometrie der Lasche zu erhalten, wurde eine Variation der Laschengeometrie mit Hilfe der numerischen Simulation durchgeführt, um die Geometrie der Lasche für die experimentellen Untersuchungen endgültig festlegen zu können. Folgende Parameter der Laschengeometrie wurden variiert (siehe dazu auch Abbildung 6):

1. Länge der Lasche l
2. Innerer Biegeradius der Lasche r
3. Wandstärke der Lasche s

Um den Einfluss der einzelnen Parameter zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der jeweils zwei der drei Parameter fixiert und danach eine der geometrischen Größen variiert wurde. Dadurch konnte der unterschiedliche Einfluss der einzelnen Parameter auf die maximal zu erwartenden Materialspannungen ermittelt werden.

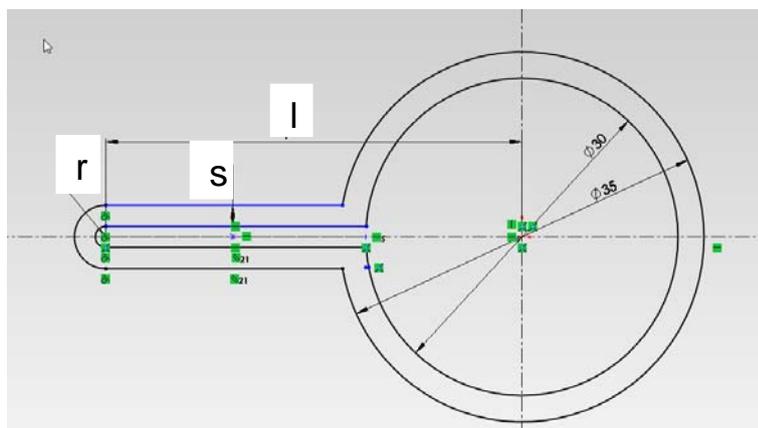


Abbildung 6: Skizze der Lasche mit Bezeichnungen der Parameter, Variante 1a

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchung wurden ausgewertet und sind in der Abbildung 7 und Abbildung 8 zusammenfassend dargestellt.

Energieforschungsprogramm - E!MISSION 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

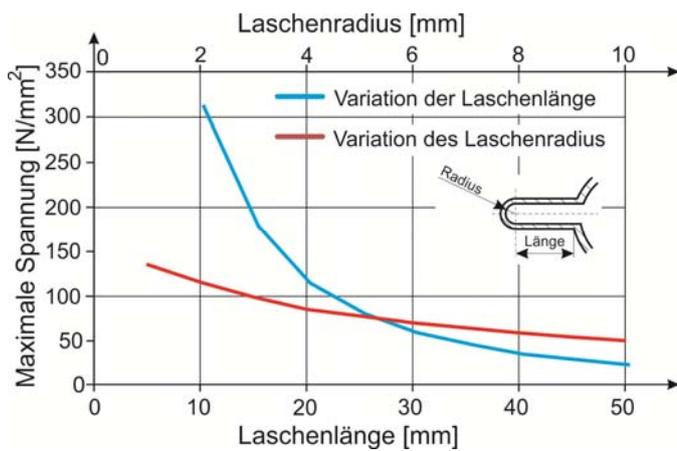


Abbildung 7: Maximale Spannungen in der Lasche bei Variation der Länge l und des Radius r

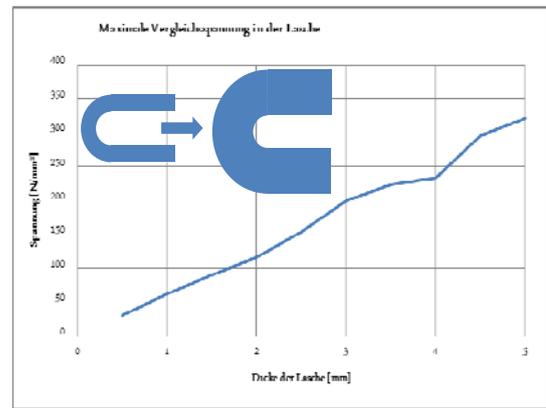


Abbildung 8: Variation der Wandstärke s

Den Diagrammen in der Abbildung 7 und Abbildung 8 kann entnommen werden, dass eine Veränderung der Länge der Lasche wesentlich effektiver als eine Vergrößerung des inneren Biegeradius oder eine Verringerung der Wandstärke der Lasche ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte ein Design für die Variante 1 festgelegt werden.

Als zweites Beispiel soll hier ein Ergebnis für die Variante 4 kurz dargestellt werden. Aus Symmetrie- und Rechenzeitgründen konnte die Berechnung mit einer Viertelkreisgeometrie (siehe Abbildung 9) durchgeführt werden. Der Innendurchmesser der Aluminiumnabe ist dabei um 0,2 mm kleiner als der Außendurchmesser des Stahlrohrs. Über eine Kontakttrandbedingung wird die Presspassung numerisch simuliert. Die numerische Analyse wurde für eine Materialtemperatur von 22 °C (Umgebungszustand) durchgeführt, da hier die größten Spannungen im Material zu erwarten waren.

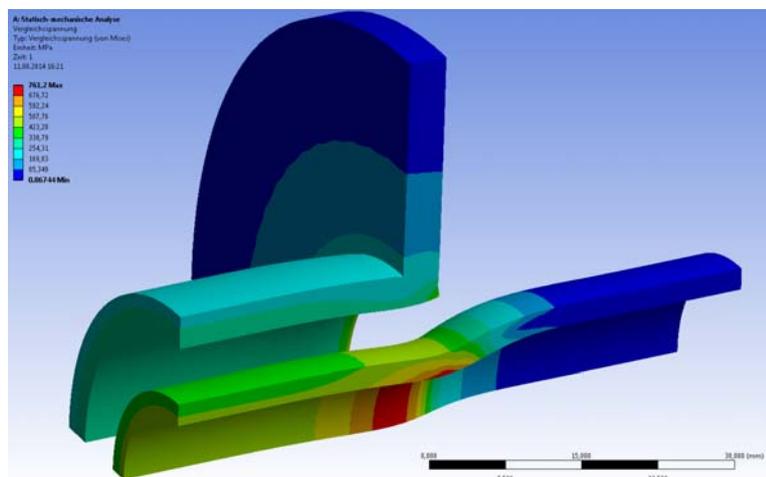


Abbildung 9: Maximale Vergleichsspannung bei einer Presspassung mit Querrippe, Materialtemperatur = 22°C, Kontaktfläche rau

Wie das Ergebnis der Finite-Elemente Berechnung in Abbildung 9 zeigt, bewirkt die Querrippe eine sehr hohe Steifigkeit gegen eine Dehnung des Aluminiummaterials. Vergleicht man den in Abbildung 9 dargestellten gefügten (Bereich unterhalb des Aluminiums) mit dem nicht gefügten Bereich des Stahlrohres, so erkennt man, dass das Stahlrohr nach dem Fügen im Bereich des Aluminiums eine deutliche Einschnürung im Gebiet unterhalb des Aluminiums aufweist. Dies hat zur Folge, eine sehr hohe Presskraft und damit eine sehr hohe Vergleichsspannung (ca. 760 N/mm^2) auftritt. Daher ist auch von einer plastischen Verformung des Stahlrohres auszugehen.

Aufgrund der Ergebnisse der numerischen Berechnung ist bei dieser Variante von einer sehr hohen Haltekraft der Verbindung auszugehen, was auch durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden konnte (siehe Kapitel 4.1)

Um die favorisierten Verbindungsvarianten für das Bimetall-Rippenrohr anhand einfacher experimenteller Untersuchungen auf ihre Tauglichkeit hin analysieren zu können, wurden Werkstattzeichnungen erstellt, anhand dieser die einzelnen Prototypen gefertigt wurden (siehe dazu auch Tabelle 3). Die Fertigung der Bimetall-Rohrproben erfolgte in diesem Schritt jedoch ohne die noch zu entwickelnde Vorrichtung, da erst auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse mit der Konstruktion der Fertigungseinheit begonnen werden konnte. Die Fügung der Prototypen erfolgte in diesem Fall mit Hilfe einer Zwick Zug/Druck Universalprüfmaschine Z250 (siehe Abbildung 10). Diese Vorgehensweise war möglich, da die Länge der mechanischen Verbindung der Prototypen und die somit auftretenden Kräfte nicht zu groß waren. In einem ersten Schritt wurden für die einzelnen Verbindungsvarianten die notwendigen Werkstattzeichnungen erstellt.

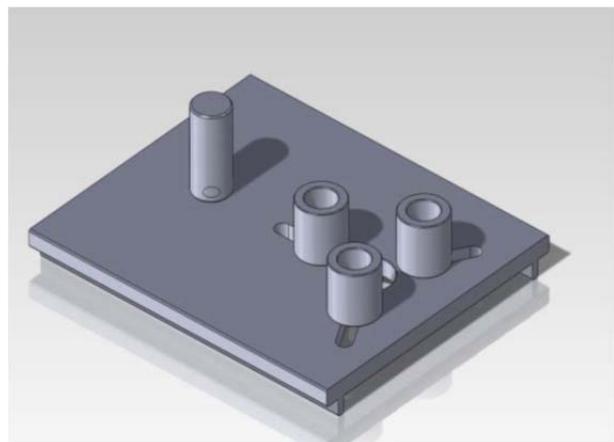
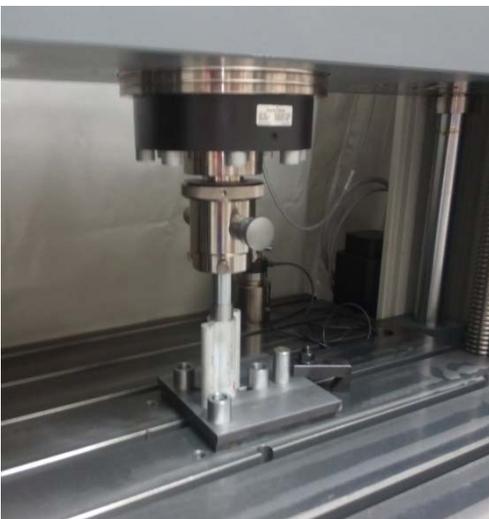


Abbildung 10: links: Versuchsaufbau für die Ein- und Auspressversuche, rechts: Ein- und Auspressvorrichtung

Tabelle 3: Verwendete Verfahren zur Prototypenfertigung

Verbindungs-variante	Abmessungen (Passungsmaße) Aluminiumrohr / Stahlrohr (Toleranz = +-0,05 mm)	Verwendete Fertigungsverfahren für die Herstellung des Aluminiumrohrs
1a	$D_{i,Alu} = 31,80 \text{ mm}$, $D_{a,Stahl} = 32,00 \text{ mm}$	Erodiert aus Aluminium-Rundmaterial
1b	$D_{i,Alu} = 31,80 \text{ mm}$, $D_{a,Stahl} = 32,00 \text{ mm}$	Erodiert aus Aluminium-Rundmaterial
2	$D_{i,Alu} = 31,80 \text{ mm}$, $D_{a,Stahl} = 32,00 \text{ mm}$	Gedreht aus Aluminium-Rundmaterial, vorgebohrt und auf Maß gedreht
3	$D_{i,Alu} = 32,00 \text{ mm}$, $D_{a,Stahl} = 32,14 \text{ mm}$	Gedreht aus Aluminium-Rundmaterial, vorgebohrt und auf Maß gedreht
4	$D_{i,Alu} = 31,80 \text{ mm}$, $D_{a,Stahl} = 32,00 \text{ mm}$	Gedreht aus Aluminium-Rundmaterial, vorgebohrt und auf Maß gedreht

Für die Herstellung der Prototypen der einzelnen Varianten, welche für die experimentellen Kurz- und Langzeitversuche benötigt wurden, wurden die in Tabelle 3 zusammengefassten Fertigungsverfahren angewendet. Das Stahlrohr wurde bei allen Varianten von Durchmesser 33,7 mm auf einen Außendurchmesser von 32,00 mm abgedreht. Die Aluminiumrohre der Varianten 1a und 1b wurden aus Rundmaterial heraus erodiert. Bei der Variante 2 und 3 wurde das Aluminiumrohr aus einem Vollmaterial auf den gewünschten Außendurchmesser abgedreht und anschließend der Innendurchmesser vorgebohrt und auf Maß gedreht. Der Unterschied in den Varianten 2 und 3 liegt im Innendurchmesser des Aluminiumrohres. Bei Variante 2 beträgt dieser 31,80 mm, bei Variante 3 hingegen weist das Aluminiumrohr aufgrund der zusätzlichen Zinkschicht am Stahlrohr einen Innendurchmesser von 32,00 mm auf. Bei Variante 4 (Querrippen) wurde das Aluminiumrohr mit dem Flansch aus einem Rundmaterial außen auf Maß gedreht und anschließend wurde der Innendurchmesser entsprechend der Vorgehensweise der Varianten 2 und 3 vorgebohrt und auf das Maß 31,80 mm abgedreht.

Nach der Fertigung der Prototypen für die ausgewählten Verbindungsvarianten des Bimetall-Rippenrohrs erfolgte deren experimentelle Überprüfung, deren Ergebnisse in Kapitel 4 dargestellt sind.

Um die Verbindungsqualität der einzelnen ausgesuchten Verbindungsvarianten über einen längeren Zeitraum im Einsatz zu beobachten, wurden Langzeitversuche durchgeführt.

3.2 Kurz- und Langzeitversuche der Verbindungsprototypen

Der für die Langzeitversuche zum Einsatz gekommene Muffelofen besitzt eine programmierbare Regelung, in welcher der erforderliche Zyklus für die experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 4.1.2, Abbildung 20) umgesetzt wurde.

In der Praxis ergibt sich das Problem eines Temperatursprungs von 280°C auf 340°C und retour (Schmelztemperatur des zum Einsatz kommenden Phasenspeichermaterials Natriumnitrat NaNO_3 ist ca. 306 °C [22], [23]). welcher in der gewünschten Form nicht umsetzbar ist. So muss beim Temperaturanstieg als auch beim Temperaturabfall eine Rampe vorgegeben werden. Während das Heizen mit dem Ofen relativ rasch erfolgt (ca. 10-15°C/min) benötigt das Abkühlen aufgrund der guten thermischen Isolierung des Muffelofens eine deutlich längere Zeitdauer (Abkühlrate ca. 0,5°C/min).

Um den Abkühlvorgang zu beschleunigen, wurde eine Muffelofen-Öffnungsvorrichtung (siehe Abbildung 11) konstruiert und montiert, welche die Türe des Ofens, entsprechend dem gewünschten Zyklus, öffnet und somit die Abkühlung der Proben beschleunigte.



Abbildung 11: Muffelofen mit Öffnungsvorrichtung und Steuerung

Die Öffnungsvorrichtung besteht im Wesentlichen aus zwei Pneumatikzylinder die an einem Gestell und an der Muffelofentür befestigt sind. Durch ein pneumatisches Regelventil kann mit Hilfe der Zylinder die Tür des Ofens geöffnet und geschlossen werden. Das pneumatische Ventil wird über eine elektrische Schaltung und einem Prozessrechner angesteuert. Dadurch kann der Öffnungszyklus und die Öffnungszeit beliebig eingestellt werden und die Vorrichtung öffnet bzw. schließt den Ofen vollautomatisch, was für die angestrebten Langzeitversuche von großer Wichtigkeit war. Die Temperatur im Inneren des Ofens wurde zusätzlich mit Hilfe eines PT100 Thermofühlers gemessen. Das Messsignal des PT100 wurde im Prozessrechner aufbereitet, verarbeitet und gespeichert. Durch diese Maßnahmen konnte der Abkühlgradient auf bis zu 6°C/min erhöht und ein Zyklusbetrieb, wie er für die Untersuchungen benötigt wurde, umgesetzt werden.

3.3 Langzeituntersuchung des Kriechverhaltens des Aluminiums

Wie die Langzeitversuche an den ausgewählten Prototypen für die mechanische Verbindung der Bimetall-Rippenrohre gezeigt hat (siehe Kapitel 4) kann das Langzeitverhalten des Aluminiums unter höheren Temperaturen mit einem Kriechverhalten des Materials verbunden sein. Bei Einsatztemperaturen >100°C ist das Kriechen einer der dominierenden Faktoren für die Langzeitstabilität. Wie in [24] beschrieben, ist die Zeitstandfestigkeit von Aluminium stark von der Einsatztemperatur abhängig. Für Temperaturen > 300°C erreicht die Zeitstandfestigkeit von z.B. Aluminium EN-AW6082 Werte kleiner als 20 N/mm² bei einer Einsatzzeit von 10⁵ Stunden. In der Literatur können Werte für die Zeitstandfestigkeit nur für ausgewählte Aluminiumwerkstoffe gefunden werden. Die meisten in der Literatur verfügbaren Werte für die Zeitstandfestigkeit beziehen sich auf Temperaturen < 300°C, welche für den benötigten

Temperaturbereich nicht aussagekräftig sind. Für den eingesetzten Werkstoff EN-AW6060 konnten keine Werte im benötigten Temperaturbereich gefunden werden. Daher wurde anhand einer einfachen experimentellen Untersuchung das Zeitstandfestigkeitsverhalten des Werkstoffes EN-AW6060 abgeschätzt um Rückschlüsse auf das tatsächliche Verhalten zu erlangen. Dazu wurde eine einfache Versuchsanordnung entwickelt, bei der U-förmige Formstücke anhand speziell gefertigter Platten aufgeweitet wurden (siehe Abbildung 12). Sowohl Platte als auch das U-förmige Formstück bestanden aus dem Werkstoff EN-AW6060. Im entspannten Zustand weisen die U-förmigen Formstücke eine Steghöhe von 6 mm auf.

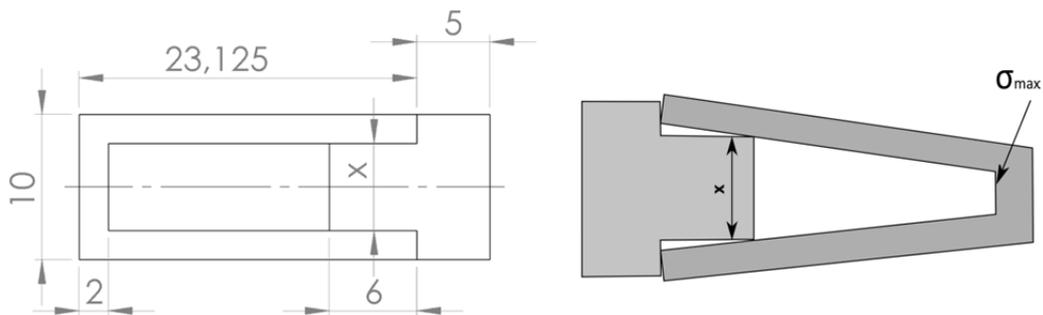


Abbildung 12: U-Formstück; links: Dimensionen des Formstücks und der Platte, rechts: Schema des vorgespannten U-Formstücks

Das U-förmige Formstück wurde in seinen Abmessungen so gefertigt, dass diese der Laschengeometrie der Variante 1 entsprach. Es wurden mehrere Platten mit unterschiedlichen Abmessungen x des Plattensteges, wie in Abbildung 12 rechts dargestellt, gefertigt. Die Höhe des Plattensteges x basierte auf vorhergehenden Berechnungen mittels Finiter-Elemente Methode. Durch diese Vorgehensweise war es möglich eine definierte Vorspannung im Laschenbogen aufzubringen.

Tabelle 4: Laschentyp und berechnete Vorspannungen

Laschentyp	Steghöhe x [mm]	Aufweitung [mm]	Berechnete Vorspannung [N/mm ²]
6,03	6,03	0,03	14,9
6,08	6,08	0,08	26,8
6,16	6,16	0,16	55,0
6,48	6,48	0,48	132,3

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung der unterschiedlichen gefertigten Laschentypen (benannt nach den jeweiligen Steghöhen) mit den zugehörigen Steghöhen x und Aufweitungen sowie die errechneten Vorspannungen. Die Aufweitung der Laschen wurde an einzelnen Proben soweit vergrößert, dass die Vorspannung die zulässige Zugfestigkeit des Werkstoffes EN-AW6060, welche bei 130-250 N/mm² liegt, erreicht. Wobei die Streckgrenze des Werkstoffes, welche bei ca. 150 N/mm² liegt, von größerem Interesse für die Untersuchungen war. Die Vorspannung durfte dabei die Streckgrenze bei Raumtemperatur auf keinen Fall überschreiten, da es ansonsten zu einer plastischen Verformung des Werkstoffes gekommen wäre. Eine plastische Verformung sollte aber vermieden werden. Von jeder Probe wurden in

der mechanischen Werkstatt acht Laschen gefertigt um eine entsprechende Anzahl an Proben vorliegen zu haben (siehe auch Abbildung 13).

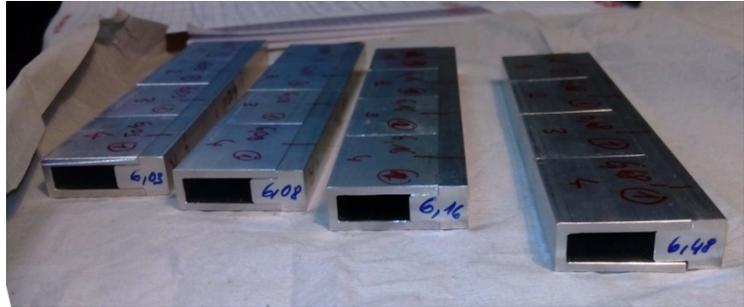


Abbildung 13: Vorgespannte Proben

Abbildung 13 zeigt die bereits vorgespannten Proben, bevor diese in den Muffelöfen gelegt wurden. Nach der Platzierung der Proben im Muffelofen N11/HR der Firma Nabertherm wurde dieser auf 340°C aufgewärmt. Die Proben wurden für definierte Zeitspannen von 1 bis 1000 Stunden der thermischen Belastung ausgesetzt. Die Zeitintervalle umfassten dabei folgende Zeitdifferenzen: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h, 9h, 10h, 20h, 50h, 100h, 200h, 500h und 1000h. Nach Erreichen der jeweiligen Zeitdifferenz wurden die Proben entnommen und bei Raumtemperatur wurde die Aufweitung der U-förmigen Formstücke gemessen. Diese Daten wurden anschließend mittels einer linearen Finiten-Elemente Berechnung in Spannungen umgerechnet (siehe Kapitel 4).

3.4 Verbesserung der Aluminiuminnenrohrkontur

Durch den Fügevorgang des Aluminiumprofils auf das Stahlrohr kommt es bei einem runden Aluminiuminnenrohroberfläche zu einer ungleichen Auflage (Anpressung) des Aluminiumprofils an das Stahlrohr (siehe Abbildung 14). Der in Abbildung 14 blau dargestellte Bereich weist einen Spalt zwischen Aluminiumprofil und Stahlrohr auf. Laut Anforderungskatalog für die mechanische Verbindung sollte jedoch kein Spalt vorhanden sein. Daher wurde mittels einer Finite-Elemente Berechnung eine erste Optimierung der Aluminiuminnenrohrkontur vorgenommen.

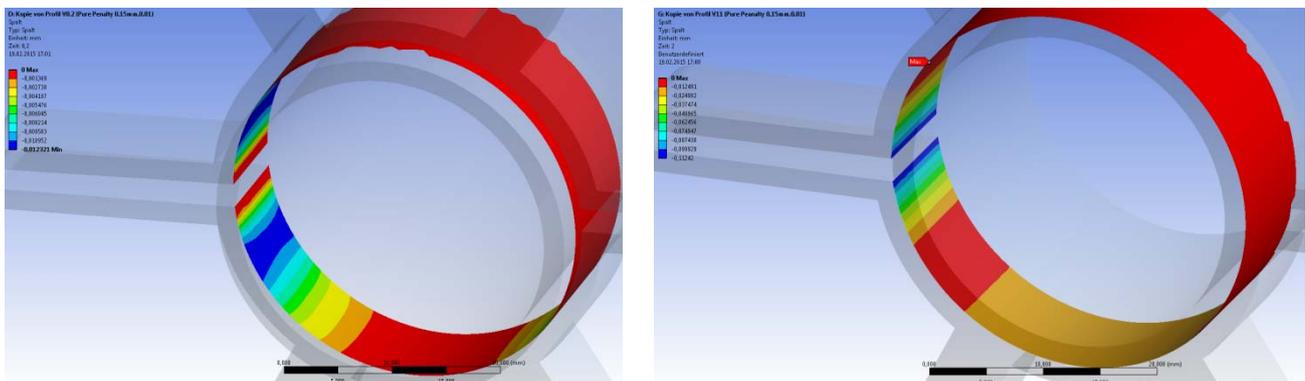


Abbildung 14: Spaltanalyse nach dem Fügevorgang; links: vor einer ersten Optimierung, rechts: nach einer ersten Optimierung

Das Ergebnis dieser ersten Optimierung kann der Abbildung 14 und Abbildung 15 entnommen werden (siehe blauer Bereich in Abbildung 14 rechts). Die Aluminiuminnenrohrkontur weicht nun von der eines Kreises ab. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass der zuvor vorhandene Spalt an die Kante der Lasche gerückt werden konnte und somit ist ein Presssitz über die gesamte verbleibende Aluminiuminnenrohrfläche vorhanden.

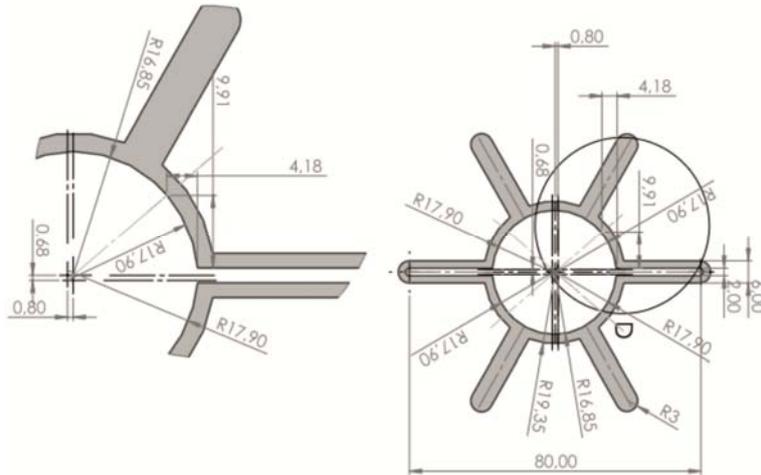


Abbildung 15: gefertigtes Aluminiumrippenprofil

Das in Abbildung 15 dargestellte Profil wurde in der mechanischen Werkstätte mittels Drahterodierung hergestellt.

3.5 Fertigungstechnische Umsetzung der Bimetall-Herstellung

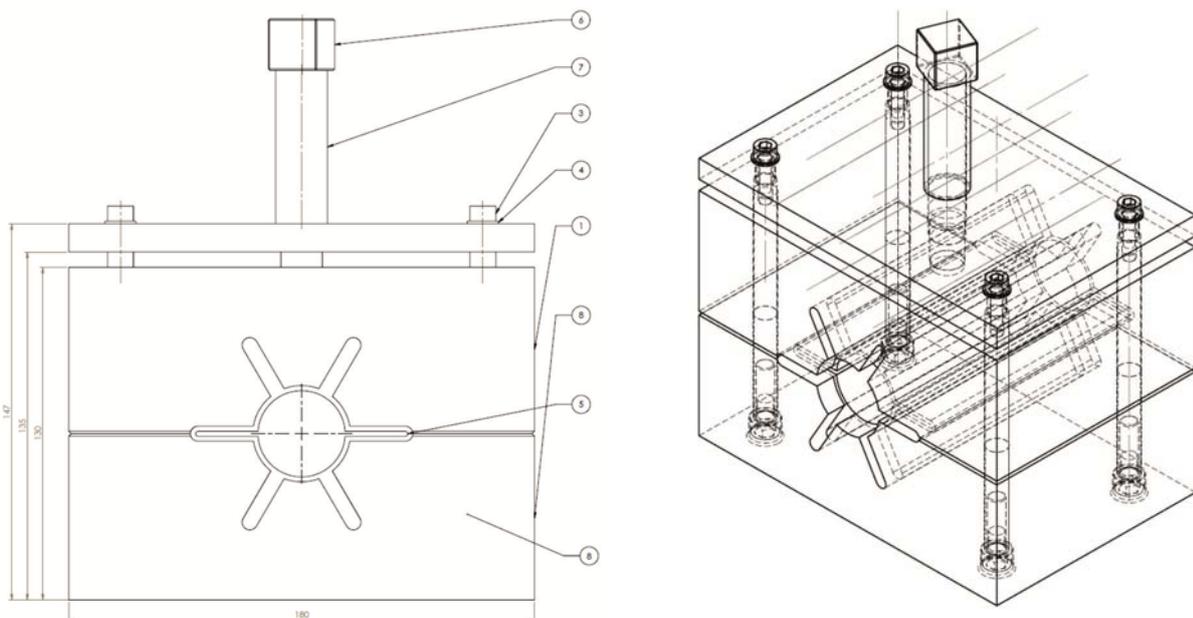


Abbildung 16: Konstruktionszeichnungen der Fügevorrichtung für das Bimetall-Rippenrohr

Basierend auf den numerischen und experimentellen Voruntersuchungen wurde die am erfolgversprechendste mechanische Verbindungsmöglichkeit ausgewählt und mit der fertigungstechnischen Umsetzung der Bimetall-Herstellung begonnen. Dazu wurde eine fertigungstechnische Auslegung und konstruktive Konzeption sowie ein Detail-Engineering nach dem Stand der Technik durchgeführt. Abbildung 16 zeigt als Beispiel den Aufriss der Zusammenstellungszeichnung sowie eine dreidimensionale Darstellung der gesamten Fügevorrichtung. Die Zusammenstellungs- und Werkstattzeichnungen der einzelnen Komponenten wurden zur Fertigung der Fügevorrichtung an die mechanische Werkstätte übergeben.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Experimentelle Voruntersuchung an ausgewählten Verbindungsvarianten

Die Voruntersuchungen an den ausgewählten Verbindungsvarianten wurden in Kurz- und Langzeitversuche untergliedert. Dabei umfassten die Kurzzeitversuche jene Experimente, bei denen die Füge und Löseversuche in kurzem zeitlichem Abstand erfolgten. Bei den Langzeitversuchen bestand zwischen dem Füge und Lösevorgang der Verbindung eine Zeitdifferenz von ca. drei Wochen. Während dieser Zeitspanne wurden die Proben einer definierten thermischen Belastung, wie sie in einem Wärmespeicher auftreten, ausgesetzt.

4.1.1 Kurzzeitversuche

Für die experimentelle Untersuchung zur Qualität der Verbindung (Widerstand der Pressverbindung gegenüber einer Verschiebung des Stahlrohres) wurde, wie bereits oben erwähnt, eine Zwick Zug/Druck Universalprüfmaschine Z250 mit einer Maximalkraft von 250 kN verwendet. In der Abbildung 10 links ist das Einpressen einer Probe der Variante 2 beispielhaft für alle anderen Proben dargestellt. Bei den vorgenommenen Untersuchungen wurde neben der Kraft auch der zurückgelegte Stempelweg aufgezeichnet und als Excel-Datensatz ausgegeben. Durch die Aufnahme des Kraft-Wege-Diagramms lässt sich das Verhalten der einzelnen untersuchten Verbindungen während des Füge- und Lösungsprozesses bzw. die Aufnahmen unterschiedlicher Testläufe sehr gut gegeneinander gegenüberstellen. Darüber hinaus lässt sich durch Integration der Fläche unter der Kraft-Wege-Kurve die für den Füge- bzw. Trennprozess aufgewendete Arbeit ermitteln.

In Abbildung 10 rechts ist Vorrichtungsplatte dargestellt wie sie für das Fügen und Lösen der Proben verwendet wurde. Das Einpressen erfolgte auf der linken Seite der Vorrichtungsplatte mittels eines Fixierdorns und des nicht abgebildeten Stempels. Eine universelle Führung wird durch die 3 Rollenkörper erreicht, so dass die Vorrichtung nur einmal auf die Außenmaße einer Probe eingestellt werden musste. Die Ergebnisse für mehrmaliges Fügen und Auspressen der Proben bei Raumtemperatur (20 °C) sind in der Abbildung 17 zusammengefasst. Als Auspressweg wurden 15 mm festgelegt. Variante 1b (2 gegenüberliegende Biegelaschen) weist die geringste aufzubringende Kraft mit bis zu 10 kN zum Fügen und Auspressen auf.

Bei der konventionellen Ausführung der Presspassung der Variante 2 wurde im Vergleich zu Variante 1 mit bis zu 40 kN eine deutlich größere Kräfte benötigt. Es ist die Tendenz bei beiden mehrfach gefügten

und ausgepressten Proben der Varianten 1b und 2 zu erkennen, dass die dafür benötigten Kräfte relativ konstant und von gleicher Größenordnung (innerhalb einer Variante) bleiben.

Ein deutlich höherer Kraftaufwand, welcher zwischen 80-110 kN liegt, wurde mit der Variante 3 erreicht. Hier wirkten sich die veränderten Passungsmaße in Kombination mit der Zinkschicht deutlich auf die aufzubringende Kraft aus. Des Weiteren konnte ein Ansteigen der Kraft mit nachfolgendem Abfallen beobachtet werden. Der gezackte Kurvenverlauf der Variante 3 ergibt sich aus dem Umstand, dass es während des Auspressversuchs zu einem sogenannten Slip-Stick-Effekt gekommen ist. Dies führte zu einer starken Belastung der Universalprüfmaschine, weshalb von weiteren Untersuchungen dieser Variante (nochmaliges Fügen und Lösen der **gleichen** Probe) Abstand genommen wurde.

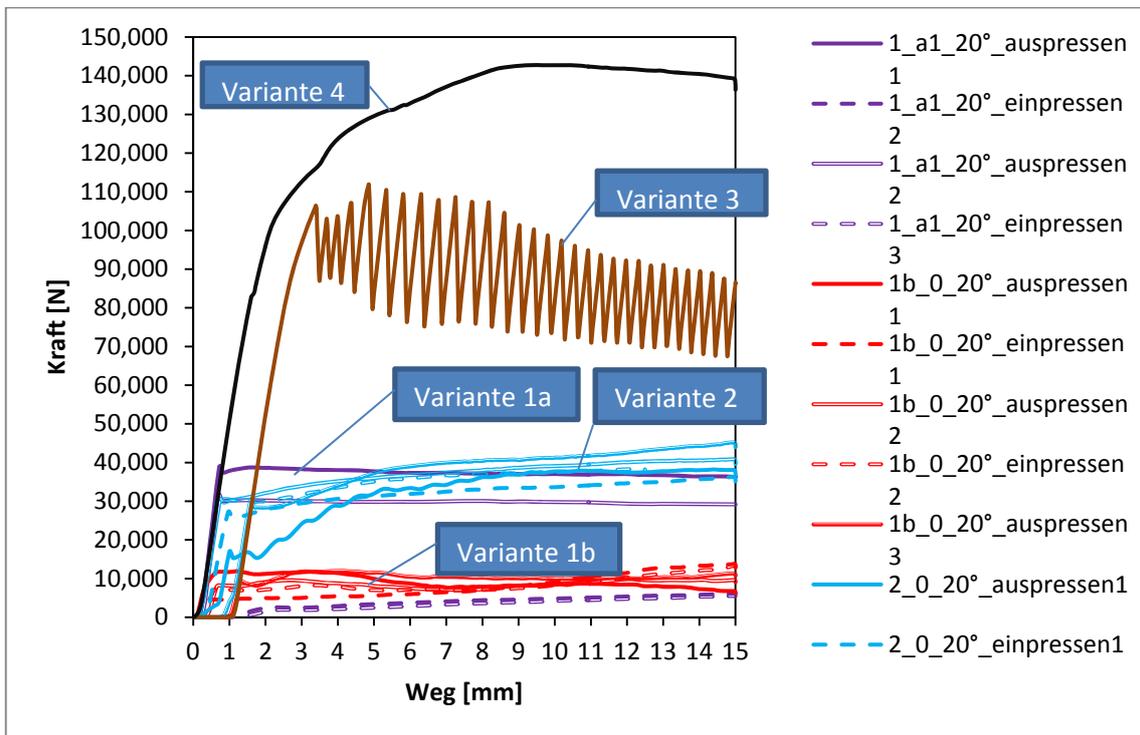


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Füge- und Auspresskraft der verschiedenen Varianten bei 20°C Probentemperatur

Mit bis zu 140 kN war die aufzuwendende Kraft für die Variante 4 am höchsten. Diese hohen Werte für die aufzuwendenden Kräfte kann auf 2 Effekte zurückgeführt werden: zum einen sorgt der Flansch für eine hohe Flächenpressung im Passungsitz und zum anderen wurden 4 Proben nacheinander auf das Stahlrohr gefügt. Somit steigt die benötigte Kraft zum Herauspressen des Rohres stark an. Dies bestätigt die in Kapitel 3.1 beschriebene Finite-Elemente Berechnung bezüglich der auftretenden Spannungen der Variante 4. Aufgrund der hohen aufzuwendenden Kräfte kam es zu einer Deformation der Aluminiumhülle (siehe Abbildung 18), weshalb hier keine weiteren Untersuchungen mit dieser Variante (nochmaliges Fügen und Lösen der **gleichen** Probe) vorgenommen wurden. Für alle weiteren Versuche mit der Variante 4 wurde nur mehr eine anstatt der 4 Querrippen verwendet.

Ein von den Varianten 1b (beidseitige Lasche) und 2 (reine Pressverbindung) stark abweichendes Verhalten konnte für die Variante 1a (einseitige Lasche) festgestellt werden. Während für den Fügeprozess eine aufzuwendende Kraft, welche deutlich kleiner als 5 kN ist, vonnöten war, musste beim Auspressen

eine Kraft von 30-40 kN aufgewendet werden. Eine Begründung bzw. eine Verifikation für dieses Verhalten konnte nicht gefunden werden.



Abbildung 18: Deformationen an den Aluminiumproben der Variante 4

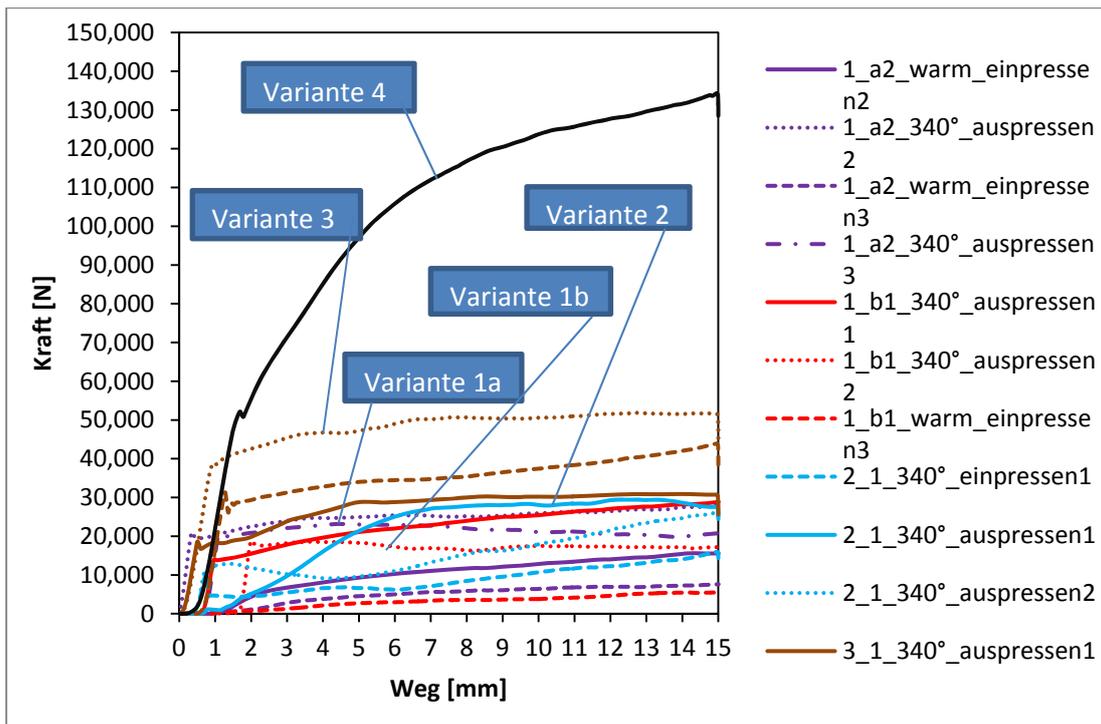


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Füge- und Auspresskraft der verschiedenen Varianten bei 340°C Probertemperatur

Ein Erwärmen der Proben auf die Betriebstemperatur des Wärmespeichers von 340°C ändert an der Tendenz der benötigten Kräfte nur wenig (siehe dazu Abbildung 19). Wie bereits bei den experimentellen Untersuchungen, welche bei Raumtemperatur (20°C) vorgenommen wurden, liegen die Messkurven für die Variante 2 bei den niedrigsten Werten für die aufzuwendenden Kräfte. Ein höherer Kraftaufwand gegenüber der Variante 2 verzeichnet die Variante 3 und für Variante 4 ist wieder der höchste Kraftaufwand erforderlich. Im Vergleich zu den Versuchen mit einer Probertemperatur von 20°C ist die benötigte

Kraft zum Fügen und Lösen bei einer Betriebstemperatur von 340°C tendenziell geringer. Dies liegt an der geringeren Festigkeit des Aluminiums bei 340°C im Vergleich zur Probe bei 20°C. Variante 2 benötigt im Gegensatz zum Versuch bei Raumtemperatur um ca. 10 kN weniger Kraft. Noch deutlicher ist es bei der Variante 3 mit der Zinkschicht zwischen Stahlrohr und Aluminiumrohr. Diese Probenversion benötigt im Betriebszustand des Speichers (340°C) zwischen 30-40 kN weniger an Kraft um die Verbindung zu lösen. Dies ist weniger als die Hälfte der aufgebrauchten Kräfte des Versuchs bei 20°C. Die Ursache dafür ist die zwischen dem Stahlrohr und dem Aluminiumrohr befindliche Zinkschicht, welche bei einer Betriebstemperatur von 340°C sehr weich und somit der Füge- und Auspresswiderstand deutlich verringert wird. Bei der Variante 4 wurden, wie beim Versuch bei Raumtemperatur, die mit Abstand höchsten Kräfte für das Fügen- und Auspressen benötigt. Diese liegen jedoch aufgrund der geringen Festigkeit des Aluminiums bei 340°C um ca. 10 kN unter denen bei Raumtemperatur. Wie bei den bei Raumtemperatur erzielten Ergebnissen ist bei den Ergebnissen für eine Temperatur von 340°C die gleiche Tendenz bezüglich der benötigten Füge- und Auspresskräfte zu erkennen. Variante 1a streut im Vergleich zur Variante 1b deutlich stärker. Das Verhalten während des Füge- und Auspressvorganges bei einer Temperatur der Probe von 340°C ist im Vergleich zur Probe bei Raumtemperatur ähnlich.

4.1.2 Langzeitverhalten

Um die Verbindungsqualität der einzelnen ausgesuchten Verbindungsvarianten über einen längeren Zeitraum im Einsatz zu beobachten, wurden Langzeitversuche durchgeführt. Dazu wurden jeweils zwei Proben von allen Varianten über einen Zeitraum von ca. drei Wochen einer definierten thermischen Belastung ausgesetzt. Danach erfolgte das Lösen der Verbindung unter den gleichen Voraussetzungen wie die Probenanalyse der Kurzzeitversuche.

Die thermische Last für die Langzeitversuche wurde dermaßen ausgewählt, dass sie einem Temperaturzyklus in einem Latentwärmespeicher entspricht. Dazu wurde die Temperatur jeweils 1h bei 340°C (Laden) und 1h bei 280°C gehalten (Entladen). Dieser Zyklus wurde 260-mal wiederholt, was einem Zeitraum von ca. drei Wochen entspricht.

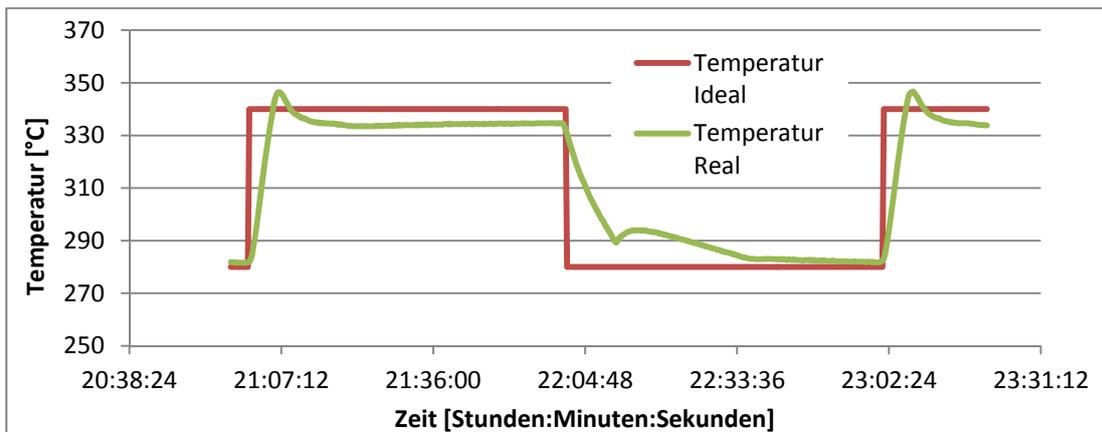


Abbildung 20: Schematische Gegenüberstellung des realen Temperaturverlauf und des idealem Temperaturverlaufs

Abbildung 20 zeigt eine Gegenüberstellung des realen und des idealen Temperaturverlaufs im Muffelofen. Im Unterschied zu den Kurzzeitversuchen wurden die Proben der Langzeitversuche auf die gesamte Länge ausgepresst um bessere Rückschlüsse auf das Lösungsverhalten zu bekommen. Es sei

daher auf die Skalierung der x-Koordinatenachse in den nachfolgenden Diagrammen zu achten. Für eine grundlegende Aussage zur Haltekraft spielt diese Änderung gegenüber den Kurzzeitversuchen keine Rolle, da das Maximum der Haltekraft im Normalfall in den ersten 15mm der ausgepressten Länge auftritt. Im Folgenden sollen einige ausgewählte Ergebnisse kurz dargestellt werden. Für weitere Informationen sei auf [19], [20] verwiesen.

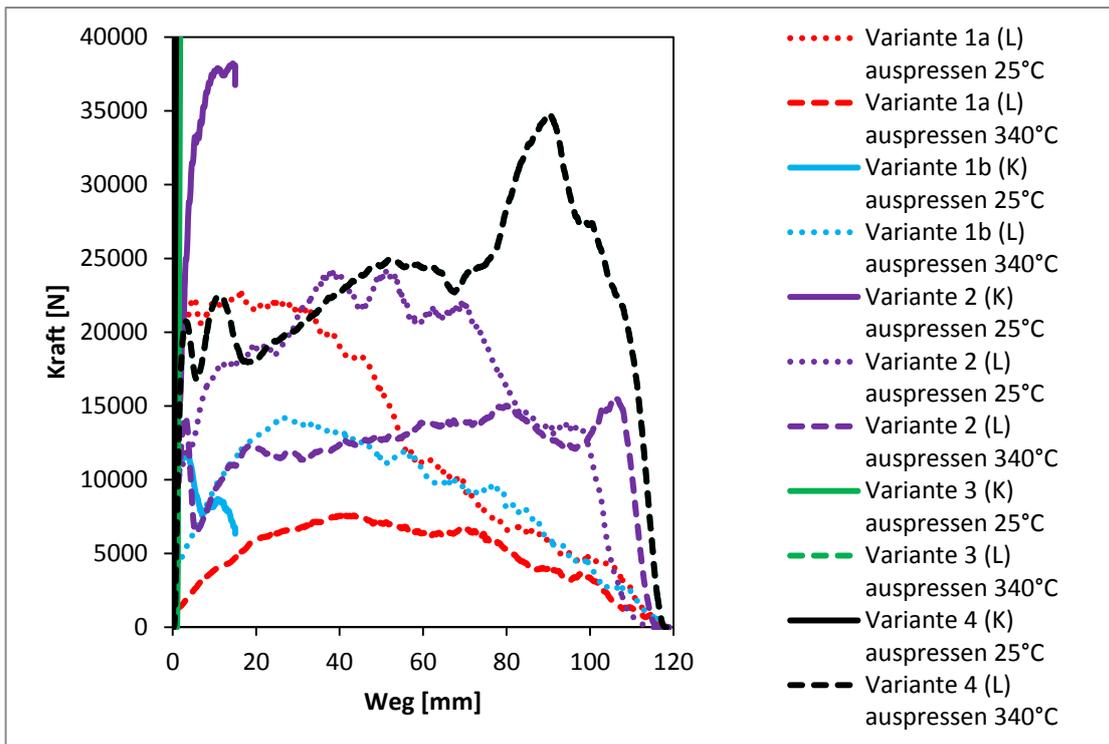


Abbildung 21: Vergleich des Lösevorganges bei 25°C (vor der thermischen Belastung) und 340 °C (nach der zeitlichen thermischen Belastung)

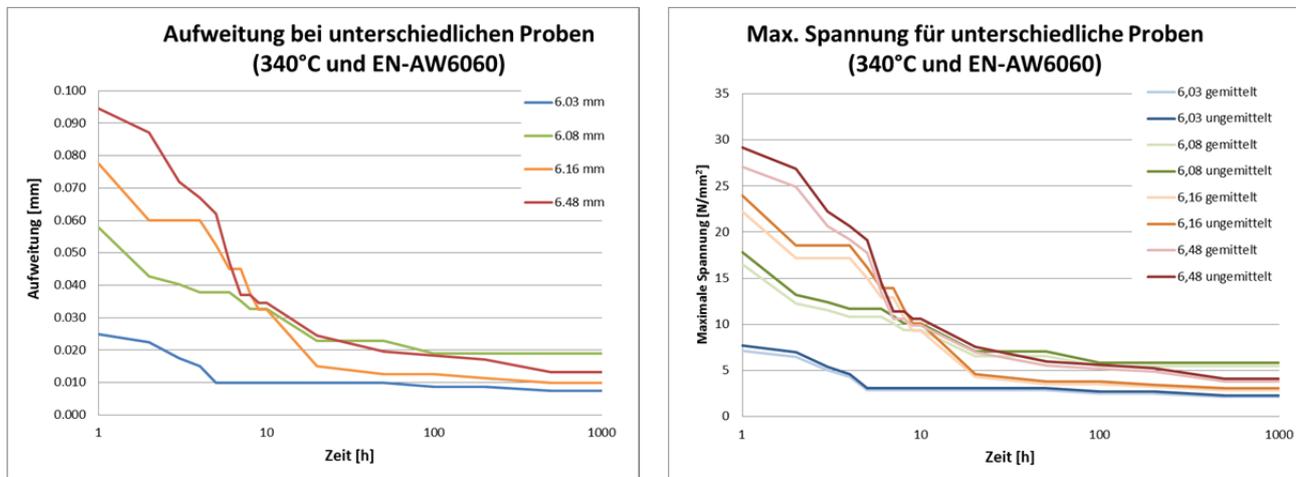
Abbildung 21 zeigt eine Gegenüberstellung der einzelnen Proben beim Lösevorgang der Verbindung, welcher sowohl bei Umgebungstemperatur (vor der thermischen Belastung) als auch bei einer Temperatur von 340 °C (nach der zeitlichen thermischen Belastung) durchgeführt wurde. Wie aus Abbildung 21 ersichtlich, sind für die verschiedenen Varianten unterschiedliche Kräfte zum Lösen der Verbindung notwendig. Abhängig von der Größe der vorliegenden Haltekraft kann von einer sicheren Verbindung zwischen Aluminium und Stahlrohr ausgegangen werden, oder eben nicht. Auffallend sind die Kurzzeitversuche der Variante 3 und 4. Sie besitzen eine sehr hohe Haltekraft, im Vergleich zu den restlichen Varianten. Alle anderen Varianten liegen mit der für die Lösung der Verbindung benötigten Kraft im Bereich zwischen 5000N und 25000N, wobei bei manchen der Proben die Temperatur eine wichtige Rolle spielt. So weist zum Beispiel die Variante 1a, eine nach den Langzeitversuchen bei 340°C wesentlich reduzierte Haltekraft gegenüber dem Versuch bei Umgebungstemperatur auf. Dieser Effekt ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Kriechen zurückzuführen. Für Variante 1b ist dies nicht so klar erkennbar. Hier ist die notwendige Kraft bei Umgebungstemperatur und nach den Kurzzeitversuchen ähnlich hoch wie nach den Langzeitversuchen und 340°C. Ein anderes Verhalten zeigt wiederum Variante 2, wo die Haltekräfte mit der Wärmebehandlung eindeutig sinken.

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen hat **Variante 1 – die Biegelasche** ein **hohes Potential für die Umsetzung**, sowohl aus festigkeits- als auch fertigungstechnischer Sicht. Diese weist eine rela-

tiv geringe benötigte Fügekraft, was die fertigungstechnische Umsetzung erleichtert, auf. Anhand dieser ersten experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die vorliegende Haltekraft bei Betriebstemperatur des Speichers noch groß genug ist um eine stabile Verbindung zwischen den beiden Rohren zu gewährleisten. Grundsätzlich kann bei einigen Proben auf ein Kriechverhalten durch die Langzeitversuche geschlossen werden. Als positiv ist anzumerken, dass **alle Verbindungen auch nach der thermischen Belastung noch fest und belastbar waren**. Jedoch ist bei dieser Art von Versuchen mit einer hohen Streuung der Messergebnisse zu rechnen. Dies konnte bei der Auswertung der Ergebnisse festgestellt werden.

4.2 Langzeituntersuchung zum Kriechverhalten des Aluminiums

Abbildung 22 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Langzeit-Kriechversuche der verschiedenen U-förmigen Formstücke. Aufgrund der schnellen Abnahme der Aufweitung, welche innerhalb der ersten 10 Stunden gemessen wurde, wurde die x-Achse in den Diagrammen der Abbildung 22 logarithmisch dargestellt. Wie der Abbildung 22a entnommen werden kann, ist die Abnahme einer Aufweitung des U-förmigen Profils nach 10 Stunden noch nicht vollkommen abgeschlossen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass Kriechen in den ersten Stunden der thermisch-mechanischen Belastung stattfindet und stark von der Ausgangsbelastung abhängt. Dies stimmt auch mit vergleichbaren Daten für Aluminium aus der Literatur, wie z.B. EN-AW6081, (siehe u.a. [25]) überein.



a) Aufweitung der Proben
b) max. Spannung in den Proben
Abbildung 22: Ergebnisse der Langzeit-Kriechversuche

Nach ca. 20 Stunden unter thermische Beanspruchung blieben die Aufweitungen der U-förmigen Proben für den Rest der untersuchten Zeitspanne von 1000 Stunden ungefähr auf einem konstanten Wert von 0.007 mm bis 0.019 mm. In Abbildung 22b sind die mittels einer linearen Finite-Elemente Berechnung umgerechneten maximal auftretenden Spannungen in den U-förmigen Proben dargestellt. Auch die maximal auftretenden Spannungen nehmen in den ersten Stunden der Belastung aufgrund des Materialkriechens ab und verbleiben anschließend konstant auf einem niedrigen Niveau. So nimmt die maximale Spannung des Probentyps 6.48 (siehe Tabelle 4) ausgehend von Wert 132.2 N/mm² auf einen Wert von 4 N/mm² nach 1000 Stunden ab. Eine Lasche der Variante 1, welche eine ähnliche Geometrie wie der

Probentyp 6.48 aufweisen würde, würde weiterhin eine Kraft auf das Stahlrohr ausüben und somit eine sichere Verbindung zwischen den beiden Materialpartnern garantieren.

4.3 Fertigung der Fügevorrichtung und der Bimetall-Rippenrohrverbindung



Abbildung 23: Bimetall-Rippenrohr vor und nach der Fertigung

In der Abbildung 23 ist das Bimetall-Rippenrohr vor und nach der Fertigung sowie die dazu notwendige Vorrichtung dargestellt. Mit Hilfe dieser einfachen Vorrichtung konnte gezeigt werden, dass die für die Fertigung des Bimetall-Rippenrohrs angedachte Methode auch einer experimentellen Überprüfung standhält. Die mittels der Vorrichtung gefertigten Rippenrohrprototypen wurden einer experimentellen Analyse unter den Betriebsbedingungen eines Hochtemperaturwärmespeichers unterzogen. Die Ergebnisse dieser experimentellen Überprüfung zeigten, dass die entwickelte mechanische Verbindung für das Bimetall-Rippenrohr den an die Verbindung gestellten Anforderungen genügt.

4.4 Experimentelle Untersuchung der Bimetall-Rippenrohrverbindung

Basierend auf den numerischen und experimentellen Voruntersuchungen wurden nun mit Hilfe der vorhandenen Rippenrohrverbindung experimentelle Untersuchungen, welche die Festigkeit der Verbindung gegen ein Lösen prüfen, durchgeführt. Dabei ging es um die Fragestellung ob die mechanische Verbindung bei Betriebstemperatur des Latentwärmespeichers sowie in dessen Einsatzumgebung (Speicher-material NaNO_3) funktionstüchtig und somit eine sichere Verbindung von Stahlrohr und Aluminiumrippen gewährleistet ist.

Um die Rippenrohrverbindung auf ihre Festigkeit zu prüfen wurde eine entsprechende Versuchsvorgehensweise entwickelt. Dazu wurde das Rippenrohr im Muffelofen auf die Betriebstemperatur des Latentwärmespeichers gebracht und dort für 5 h bei dieser konstanten Temperatur gehalten, wobei die Rip-

penrohrverbindung in einer vertikalen Position in den Ofen eingebracht wurde. Am Ende der thermischen Belastung wurde die Probe aus dem Muffelofen entnommen und auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Nach erfolgter Abkühlung des Rippenrohres wurde die mechanische Verbindung auf seine Festigkeit hin überprüft. Wie die Überprüfung der mechanischen Verbindung ergab, hat diese den gewünschten Anforderungen entsprochen.

Um ein eventuelles Eindringen des Natriumnitrates zwischen die Presspassung des Aluminium- und Stahlrohres festzustellen (NaNO_3 befindet sich bei einem Betrieb des Latentwärmespeichers auch im Spalt der Biegelasche), wurde eine weitere experimentelle Untersuchung durchgeführt. Dazu wurde die Rippenrohrverbindung in einen mit NaNO_3 gefüllten Behälter, in vertikaler Position, eingebracht. Zu Beginn des Versuchs wurde das Rippenrohr in den mit nicht geschmolzenem Natriumnitrat gefüllten Behälter gestellt. Daran anschließend wurde der Muffelofen auf die Betriebstemperatur des Latentwärmespeichers erwärmt. Diese Temperatur wurde ebenso wieder für 5 h konstant gehalten. Das NaNO_3 wechselte dabei seinen Aggregatzustand von fest auf flüssig. Das flüssige Natriumnitrat konnte nun in etwaige vorhandene Spalten der Presspassung zwischen Aluminium- und Stahlrohr eindringen. Nach Ablauf der Versuchsdauer von 5 h wurde der Behälter mit der Probe aus dem Muffelofen entnommen und an der Luft auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Nach der Abkühlung lag ein fester Block Natriumnitrat vor, in dem die Rippenrohrverbindung steckte. Wie die Überprüfung der mechanischen Verbindung für diesen Fall ergab, hat diese auch den gewünschten Anforderungen entsprochen.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass auch bei diesen experimentellen Untersuchungen die prinzipielle Einsatztauglichkeit der Rippenrohrverbindung unter Beweis gestellt werden konnte. Weder Betriebstemperatur des Latentwärmespeichers noch Speichermedium haben einen Einfluss auf die Grundfunktion der Rippenrohrverbindung, nämlich der festen Verbindung zwischen Aluminiumkörper und Stahlrohr.

5 Ausblick und Empfehlungen

Mit der weiteren Zunahme des stark fluktuierenden regenerativen Energieanteils am österreichischen und europäischen Stromerzeugungsmix wird die Anforderung an die Betreiber der elektrischen Netze diese stabil zu halten immer größer und Weiteres wird durch die Energieeffizienz-Richtlinie (2012/27/EU) [26], welche Anreize und Zwänge für eine erhöhte Wärmerückgewinnung in der energieintensiven Industrie schafft, ein zukünftiges Marktpotential für Speichertechnologien aufgebaut. Daher spielt in allen Energieszenarien die Speichertechnologie eine zentrale Rolle einerseits in der Flexibilisierung der Energieerzeugung und andererseits im Ausgleich zwischen der Energiebereitstellung und der Energienachfrage. Thermische Energiespeichersysteme (sowohl sensibel als auch latent) stellen, neben den mechanischen, chemischen und elektrischen/elektromagnetischen Speicher, eine attraktive Möglichkeit dar elektrische Energie aber auch Wärme zu speichern. Insbesondere dann, wenn diese in einem thermodynamischen Prozess integriert werden können. Die latente Energiespeicherung weist dabei gegenüber der sensiblen Speicherung durch die hohe Energiedichte und der konstanten Temperatur, bei der die Energie durch Ausnutzung des Wechsels des Aggregatzustandes des Phasenwechselmaterials gespeichert bzw. abgegeben werden kann, einen großen Vorteil auf.

Hoch- und Mitteltemperatur-Latentwärmespeicher können somit z.B. bei der Energierückgewinnung in industriellen Batch-Prozessen, an allen Standorten mit einem Dampfversorgungsnetz bzw. in Dampf-

kraftwerken oder solarthermische Anlagen für Mitteltemperaturwärme eingesetzt werden. Es können jedoch angesichts der großen Unsicherheiten im Energiemarkt und der großen Anzahl an konkurrierenden Speichertechnologien keine Marktvolumina genannt werden, da **noch kein kommerzieller Markt für Latentwärmespeichersysteme vorhanden ist**. Die Wahrscheinlichkeit, dass mittelfristig in einem oder mehreren dieser Segmente eine substantielle Kapazität von Latentwärmespeichern realisiert werden kann, wird aber als hoch eingeschätzt.

Die im Sondierungsprojekt verfolgte Technologieentwicklung zur Herstellung von Bimetallrohren zielte ganz klar darauf ab, sowohl die Fertigungs- als auch die Investitionskosten derartiger Systemkomponenten für Latentwärmespeicher maßgeblich zu reduzieren und gleichzeitig die Verfügbarkeit der Anlagen zu erhöhen. Aufgrund der durch die Projektergebnisse erwarteten Kostenreduktion, kann ein wertvoller Beitrag zur Marktdurchdringung von Latentwärmespeicher geleistet werden.

Im gegenständlichen Projekt konnte **eine mechanische Verbindung sowie eine Produktionsmethode für ein Bimetallrohr mit Längsrippen mit einem sehr hohem Potential** für eine industrielle Umsetzbarkeit entwickelt werden. Die marktreife Entwicklung einer solchen Energieeffizienztechnologie kann natürlich nicht im Rahmen eines einjährigen Sondierungsprojektes erfolgen. Daraus ergibt sich zwingend, dass es **wichtig und notwendig** ist eine **weitere industrielle Forschung** anzuschließen um noch **grundlegende offene Fragestellungen einer Lösung zuzuführen** und um danach über den Weg einer experimentellen Entwicklung zum marktreifen Produkt zu gelangen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] B. Gebetsroither, A. Karner, C. Kettner, A. Köppl, N. Nakicenovic, R. Lang, S. Schleicher, H. Schnitzer, K. Steininger und G. Wallner, „Energiestrukturen für 2020 - Technisches Basisdokument für die österreichische Energiestrategie,“ 2009.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, „1. Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich gemäß EU-Richtlinie 2006/32/EG,“ Austrian Energy Agency, 2007.
- [3] European Association for Storage of Energy, „Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030,“ European Energy Research Alliance, 2013.
- [4] A. Thess, F. Trieb, A. Wörner und S. Zunft, „Herausforderung Wärmespeicher,“ Physik Journal, Bd. 14, pp. 33-39, 2015.
- [5] B. Armbrrecht und T. Schütte, „Anwendung von P2H zur Begrenzung der Einspeisung aus Photovoltaikanlagen,“ in Dialogplattform Power to Heat, 5.bis 6. Mai, Goslar, Deutschland, 2015.
- [6] U. Nepustil und D. Laing, „P2H in Hochtemperatur-Latentwärmespeichern für Prozesswärmeanwendungen,“ in Dialogplattform Power, 5. bis 6. Mai, Goslar, Deutschland, 2015.
- [7] C. Pieper, N. Sykora, M. Beckmann, D. Böhning, N. Hack und T. Bachmann, „Die wirtschaftliche Nutzung von Power-to-Heat-Anlagen im Regelenergiemarkt,“ Chem. Ing. Tech., Bd. 87, Nr. 4, p. 390–402, 2015.

- [8] Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, „Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation / WBGU, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen,“ Berlin, 2011.
- [9] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, „Energieland Österreich,“ Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Wien, Österreich, 2014.
- [10] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, „Welt im Wandel - Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation,“ AZ Druck und Datentechnik Berlin, Berlin, 2011.
- [11] International Energy Agency, „Technology Roadmap Energy storage,“ International Energy Agency – IEA, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, 2014.
- [12] F. Graeter und J. Rheinländer, „Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C,“ in FVS-Workshop 2001: Wärmespeicherung, 28. – 29.05.2001, Köln, Deutschland, 2001.
- [13] M. Kenisarin, „High-temperature phase change materials for thermal energy storage,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 14, p. 955–970, 2010.
- [14] M. Kenisarin und K. Mahkamov, „Solar energy storage using phase change materials,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 11, p. 1913–1965, 2007.
- [15] S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight und S. McGarry, „Selection of materials for high temperature latent heat energy storage,“ Solar Energy Materials & Solar Cells, Bd. 107, p. 20–27, 2012.
- [16] B. Cárdenas und N. León, „High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 27, p. 724–737, 2013.
- [17] M. Rathod und J. Banerjee, „Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 18, p. 246–258, 2013.
- [18] G. Urschitz, R. Mertz, H. Walter, M. Hameter, M. Haider und F. Bleicher, „Rippenrohr mit Biegelsche, Patentanmeldung A 50834/2014,“ 2014.
- [19] G. Urschitz, J. Brier, H. Walter, R. Mertz, F. Bleicher und M. Haider, „New design of a bimetallic finned tube for the use in a latent heat thermal energy storage unit,“ in Proceedings of the 2015 ASME Power & Energy Conversion Conference, 28.06.2015 - 02.07.2015, San Diego, CA, USA, 2015.
- [20] G. Urschitz, H. Walter und J. Brier, „Experimental Investigation on Finned Bimetal Tube Compositions for the use in Latent Heat Thermal Energy Storage Units,“ in 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, Sept. 27–Oct 3, 2015.
- [21] H. Walter, „Thermische Energiespeicher - Stand und zukünftige Forschungsarbeiten,“ in 2nd Swiss Symposium Thermal Energy Storage, Luzern, Schweiz, 2015.

- [22] T. Bauer, D. Laing und R. Tamme, „Characterization of Sodium Nitrate as a Phase Change Material,“ Int. Journal of Thermophysics, pp. 91-104, 2012.
- [23] T. Jriri, J. Rogez, C. Bergman und J. C. Mathieu, „Thermodynamic study of the condensed phases of NaNO₃, KNO₃, CsNO₃ and their transitions,“ Thermochemica Acta, Bd. 266, pp. 147-161, 1995.
- [24] B. Korischem, H. Dinulescu, E. Volkmer und R. Witte, „Verfahren zu Verbindung von Stahlrohren mit Aluminiumrippen“. Deutschland Patent EP1250208B1, 2004.
- [25] S. Schoft, H. Löbl und J. Kindersberger, „Abbau der Verbindungskraft in Aluminium-Hochstromverbindungen durch Kriechen des Leitermaterials,“ Elektrie, pp. 470-477, 2001.
- [26] Amtsblatt der Europäischen Union, „Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG,“ Brüssel, 14.11. 2012.

7 Kontaktdaten

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Heimo WALTER
Institut für Energietechnik und Thermodynamik/TU-Wien
Getreidemarkt 9/302,
1060 Wien
Tel.: ++43 (1) 58801 302318
Fax: ++43 (1) 58801 302399
e-mail: heimo.walter@tuwien.ac.at
<http://www.tuwien.ac.at/iet>

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Friedrich BLEICHER
Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik/TU-Wien
Getreidemarkt 9/302,
1060 Wien