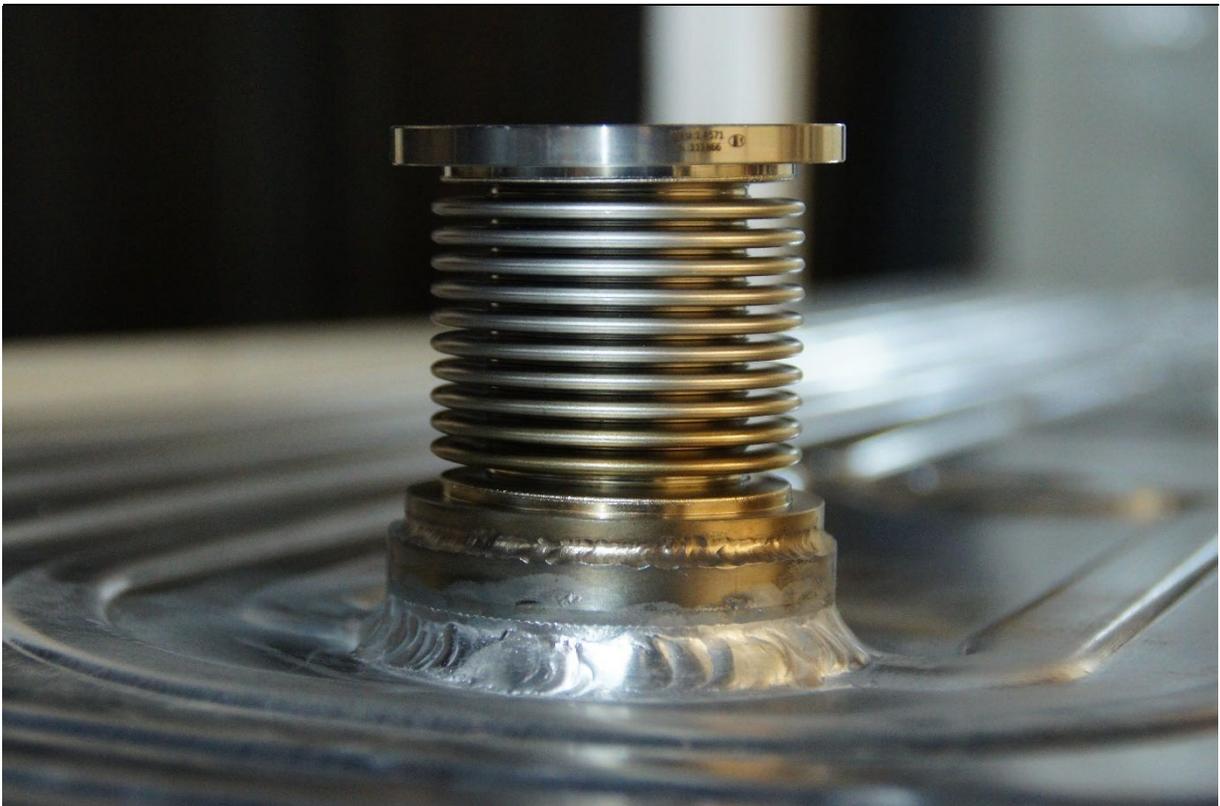




Schlussbericht vom 05.10.2023

PVT Copras

PVT Kollektor mit Überhitzungsschutz durch
Lageänderung eines Rollbondabsorbers



Quelle: © SPF 2023



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 02.10.2023

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Institut für Solartechnik SPF, Fachhochschule Ostschweiz OST
Oberseetrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autoren/-innen:

Alexandre Voirol, SPF, alexandre.voirol@ost.ch
Stefan Brunold, SPF, stefan.brunold@ost.ch
Daniel Zenhäusern, SPF, daniel.zenhaeusern@ost.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Stephan A. Mathez, Solar Campus GmbH, stephan.a.mathez@solarcampus.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502287-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt "PVT Copras" widmete sich der Entwicklung eines einfach abgedeckten PVT-Kollektors mit hoher elektrischer und thermischer Effizienz. Dieser Kollektor zeichnet sich durch einen eigenständigen Überhitzungsschutz aus, der durch das Verschieben des Absorbers realisiert wird. Die Entwicklungsarbeit umfasste insbesondere die Integration eines bereits im Projekt "ReSoTech" (SI/501397-02) erprobten Überhitzungsschutzmechanismus in einen Aluminium-Rollbondabsorber.

Es wurde ein Aluminium-Rollbondabsorber entwickelt, der zwei getrennte Fluidkreisläufe integriert. Ein Kreislauf des Rollbondabsorbers dient, wie bei Solarabsorbern üblich, zur effizienten Wärmeabnahme via Wärmeträgerfluid. Der andere Kreislauf bildet, zusammen mit mehreren damit verbundenen Metallfaltenbälgen, ein abgeschlossenes Gefäss für die Ausdehnung der Aktuatorflüssigkeit des Überhitzungsschutzmechanismus.

Es konnte gezeigt werden, dass ein rostfreier Metallfaltenbalg, der als Aktuator für das Anheben des Absorbers verantwortlich ist, vakuumdicht an einen Aluminium-Rollbondabsorber angebracht werden kann. Durch die Verwendung eines sprengplattierten Materials konnte eine zuverlässige Verbindung zwischen dem rostfreien Stahlbalg und dem Aluminium-Rollbondabsorber sichergestellt werden. Darüber hinaus wurde eine geeignete Flüssigkeit für den Überhitzungsschutzkreislauf evaluiert, die die Bildung von Gasen und die Korrosion des Absorbers verhindert.

Die erfolgreiche Umsetzung dieser innovativen Integration eines Überhitzungsschutzes ermöglicht die Realisierung äusserst effizienter PVT-Kollektoren. Da aber während des Projektverlaufs kein möglicher Umsetzungspartner mit substanzieller finanzieller Beteiligung gefunden werden konnte, wurde das definierte "Go-NoGo" Kriterium nicht erfüllt und das Projekt vor der Realisierung eines PVT-Kollektor Prototyp abgebrochen.

Résumé

Le projet "PVT Copras" a été consacré au développement d'un collecteur PVT à couverture simple avec une haute efficacité électrique et thermique. Ce collecteur se distingue par un système autonome de protection contre la surchauffe, réalisée par le déplacement de l'absorbeur. Le travail de développement a notamment consisté à intégrer un mécanisme de protection contre la surchauffe précédemment testé dans le projet "ReSoTech" (SI/501397-02) dans un absorbeur en Rollbond en d'aluminium.

Un absorbeur Rollbond en aluminium a été développé, qui intègre deux circuits de fluide séparés. Un circuit de l'absorbeur Rollbond sert, comme c'est généralement le cas pour les absorbeurs solaires, à capter efficacement la chaleur via le fluide caloporteur. L'autre circuit forme, avec plusieurs soufflets métalliques qui y sont reliés, un récipient fermé pour l'expansion du liquide d'actionnement du mécanisme de protection contre la surchauffe.

Il a pu être démontré qu'un soufflet métallique en acier inoxydable, responsable du soulèvement de l'absorbeur en tant qu'actionneur, peut être fixé de manière étanche au vide à un absorbeur en aluminium de type Rollbond. L'utilisation d'un matériel plaqué par explosion a permis d'assurer une liaison fiable entre le soufflet en acier inoxydable et l'absorbeur



Rollbond en aluminium. En outre, un liquide approprié a été évalué pour le circuit de protection contre la surchauffe, qui empêche la formation de gaz et la corrosion de l'absorbeur.

La mise en œuvre réussie de cette intégration innovante d'une protection contre la surchauffe permet de réaliser des capteurs PVT extrêmement efficaces. Cependant, comme il n'a pas été possible de trouver un partenaire de mise en œuvre possible avec une participation financière substantielle pendant le déroulement du projet, le critère "Go-NoGo" défini n'a pas été rempli et le projet a été interrompu avant la réalisation d'un prototype de capteur PVT.

Summary

The "PVT Copras" project was dedicated to the development of a simply enclosed PVT collector with high electrical and thermal efficiency. This collector is distinguished by an autonomous overheating protection system realized by moving the absorber. The development work notably included the integration of an overheating protection mechanism previously tested in the "ReSoTech" project (SI/501397-02) into an aluminium roll-bond absorber.

An aluminium roll-bond absorber was developed, incorporating two separate fluid circuits. One circuit of the roll-bond absorber is used, as is typical with solar absorbers, for efficient heat absorption via a heat transfer fluid. The other circuit, together with several associated metal bellows, forms a sealed vessel for the expansion of the actuating fluid of the overheating protection mechanism.

It was demonstrated that a stainless-steel bellows, responsible for raising the absorber, can be vacuum-tightly attached to an aluminium roll-bond absorber. By using explosively bonded materials, a reliable connection between the stainless-steel bellows and the aluminium roll-bond absorber was ensured. Furthermore, a suitable fluid for the overheating protection circuit was evaluated to prevent gas formation and corrosion of the absorber.

The successful implementation of this innovative overheating protection integration allows for the realization of highly efficient PVT collectors. However, as no potential implementation partner with substantial financial involvement could be found during the project, the defined "Go-NoGo" criterion was not met, and the project was terminated before the realization of a PVT collector prototype.



Take-home messages

- Die vakuumdichte Anbindung von rostfreien Metallen an Aluminium Rollbondabsorber kann über ein plattiertes Material erfolgen. Die Verbindung kann geschweisst oder in einem Schutzgas-Ofen gelötet werden.
- Der Überhitzungsschutz kann sowohl im Unterdruck (selbtsicher) oder aber auch im Überdruck (nicht selbtsicher) betrieben werden. Eine selbtsichere Umsetzung ist aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Dichtigkeit wesentlich aufwändiger als eine nicht selbtsichere.
- Für Aluminiumabsorber im Allgemeinen, aber vor allem für den Überhitzungsschutzkreislauf eines solchen Absorbers, können anorganische ionische Flüssigkeiten (IAS) ein geeignetes Fluid darstellen.
- Aluminium Rollbondabsorber bieten eine elegante Lösung für die Integration eines Überhitzungsschutz für hocheffiziente PVT-Kollektoren.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2	Motivation des Projektes.....	8
1.3	Projektziele	12
1.4	Struktur des Projekts.....	12
1.5	Vorarbeiten im Projekt «HiPer-PVT»	13
2	Aktuatoren für den Überhitzungsschutz.....	16
2.1	Gewicht des PVT Absorbers.....	16
2.2	Auslegung der Metallfaltenbälge.....	17
2.3	Fazit Aktuatoren für den Überhitzungsschutz	19
3	Entwicklung Rollbondabsorber	20
3.1	Auslegung Rollbondabsorber.....	20
3.2	Verbindung Metallfaltenbalg und Aluminium-Rollbondabsorber	23
3.2.1	Aluminium/Stahl Schweissversuche.....	25
3.2.2	Aluminium/Stahl Lötversuche	28
3.2.3	Plattierte Werkstoffe	29
3.2.4	Fazit Verbindung zwischen dem Metallfaltenbalg und dem Aluminium-Rollbondabsorber	35
3.3	Evaluation eines geeigneten Fluids	36
3.3.1	Wasser Glykol Gemisch	36
3.3.2	Hydrofluorether HFE.....	36
3.3.3	Anorganische Ionische Flüssigkeiten (IAS).....	37
3.3.4	Geeignete Beschichtungsmöglichkeiten	38
3.3.5	Fazit Evaluation eines geeigneten Fluids und Beschichtungsmöglichkeiten	38
3.4	Fazit Entwicklung Rollbondabsorber.....	39
4	Schlussfolgerungen und Fazit.....	39
5	Ausblick und zukünftige Umsetzung	40
6	Literaturverzeichnis.....	41



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CAD	Computer aided Design
cSi	Kristalline-Silizium-Solarzellen
DTI	Danish Technological Institute
EES	Engineering Equation Solver (Berechnungssoftware von f-Chart Software)
EL	Elektrolumineszenz
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere
HFE	Hydrofluorether
IAS	Inorganic aqueous solution
ILAG	Industrielack AG
NG	Nenngrösse
NW	Nennweite, innerer Durchmesser
PA	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaisch-thermisch
Si	Silizium
SPF	Institut für Solartechnik
ST	Solarthermie
T	Thermisch
TRL	Technology Readiness Level
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
WIG	Wolfram Inertgasschweissen



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Beim Umbau der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen spielt die Solarenergie eine wichtige Rolle. Dabei leistet die Solarthermie (ST) einen direkten Beitrag an den (in der Regel lokalen) Wärmebedarf, während die Photovoltaik (PV) einen Anteil an der Stromerzeugung übernimmt. Weil beide Technologien auf Flächen mit möglichst hoher solarer Einstrahlung angewiesen sind, kann dies zur Konkurrenz um diese bevorzugten Flächen führen. Da PV-Module weniger als 20 % der eingestrahlten Solarenergie in Strom umwandeln, hingegen aber 70 – 80 % in Wärme umsetzen, drängt es sich also geradezu auf, diese beiden Technologien zur „PVT“ Technologie zu vereinen. Dies führte in den letzten 10 - 15 Jahren zu zahlreichen Entwicklungen von PVT-Kollektoren, wobei es sich hierbei jedoch überwiegend um nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren handelte, d.h. ohne vorderseitige Glasscheibe zur Verminderung von konvektiven Wärmeverlusten. (siehe z.B. (Zenhäusern, Bamberger, und Baggenstos 2017) und Referenzen darin). Der Einsatzbereich solcher nicht-abgedeckter PVT-Kollektoren beschränkt sich damit im Wesentlichen auf Systeme mit Wärmepumpen, bei denen die Wärme direkt als Quellwärme oder zur Regeneration von Erdwärmesondenfeldern oder anderen „kalten“ Wärmespeichern genutzt wird, und auf solare Warmwasseranlagen mit niedrigem solaren Deckungsgrad (~ 20 % Deckungsgrad, also sogenannten Warmwasser-Vorwärmanlagen). Das wirkliche Potenzial der kombinierten photovoltaisch-thermischen Solarenergienutzung liegt erst dann vor, wenn Wärme auf einem direkt nutzbaren Temperaturniveau generiert werden kann. Dies ist nur mit abgedeckten PVT-Kollektoren möglich. Die wenigen in diesem Segment existierenden Produkte (6 gegenüber 38 in der Marktübersicht von (Zenhäusern, Bamberger, und Baggenstos 2017)) haben gegenüber rein thermischen Flachkollektoren jedoch eine deutlich geringere Leistungsfähigkeit, was insbesondere auf die schlechtere thermische Kopplung zwischen PV-Zellen und Wärmeabnehmer und die fehlende spektral selektive Beschichtung zurückzuführen ist. Damit erreichen sie nur relativ geringe Stagnationstemperaturen (< 150 °C), und müssen dennoch teilweise systemtechnisch (durch Rückkühler) vor Überhitzung geschützt werden, um deren Selbstzerstörung zu vermeiden. Im Bereich abgedeckter PVT-Kollektoren liegt also noch viel Entwicklungspotenzial, wie bereits auch verschiedene Forschungsprojekte gezeigt haben (siehe (Dupeyrat und Hermann 2013; Lämmle 2018; Matuska u. a. 2015) sowie Referenzen darin).

1.2 Motivation des Projektes

Um Wärme auf einem, für die Brauchwassererwärmung und/oder Heizung, direkt nutzbarem Temperaturniveau zu erzeugen, muss dieser "PVT-Absorber" in einem wärmegeprägten Gehäuse untergebracht sein, wie wir dies als Prinzip der solarthermischen Flachkollektoren kennen. Dies führt jedoch, im Falle von Stagnation, zu Absorbertemperaturen von 150°C bis über 200°C, was negative Auswirkungen auf den PVT-Absorber bis hin zu dessen Zerstörung haben kann, wie z.B:

- Reduktion der elektrischen Leistung aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten der Solarzellen
- Beschleunigte Alterung der eingesetzten Materialien (Zellen, Laminate, Isolationsschichten, Klebstoffe)
- Schwächung der Lotverbindungen bis zu deren Versagen
- Hohe mechanische Belastung aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der miteinander verbundenen Materialien



Dieser thermischen Belastung kann mit einem, in den PVT-Kollektor integrierten, Überhitzungsschutz begegnet werden. Und da bereits ein einmaliges Überschreiten einer, von der Bauweise und den eingesetzten Materialien abhängigen, Maximaltemperatur zu einer Zerstörung des PVT-Absorbers führen kann, muss der Überhitzungsschutz inhärent oder zumindest so sicher sein, dass dessen Versagen ausgesprochen unwahrscheinlich ist.

Eine Reduktion der Stagnationstemperatur führt darüber hinaus auch zu einer Kostensenkung der solarthermischen Systeme, wie dies in dem vom SPF bearbeiteten BFE-Projekt "ReSoTech" (SI/501397-01 und -02) gezeigt wurde. Mit dem Ziel, die Stagnationstemperatur auf 100°C zu begrenzen, wurden dort folgende Kategorien des Überhitzungsschutzes, evaluiert:

- U_L -Switch (Schaltung des Wärmeverlustkoeffizienten U_L zwischen Absorber und Umgebung)
- α -Switch (Schaltung des optischen Absorptionsgrads α des Absorbers (bzw. des Reflexionsgrads ρ))
- τ -Switch (Schaltung des Transmissionsgrads τ der Abdeckscheibe, bzw. des Reflexionsgrads ρ und/oder des Absorptionsgrads α)

Für einen PVT-Kollektor kommt von diesen Kategorien nur der U_L -Switch in Frage, da die anderen (mit den derzeit bestehenden Technologien) einen zu grossen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit im Normalbetrieb hätten. Unter den unterschiedlichen U_L -Switch-Mechanismen scheint die Variation des Absorber-Scheiben-Abstands (Absorber-Shifting) am geeignetsten für einfach abgedeckte PVT-Kollektoren zu sein. Mit dieser Methode ist eine Temperaturbegrenzung auf ca. 100°C erreichbar, und es sind keine unabwägbar grossen technologischen Entwicklungen ab TRS < 4 notwendig.

Dieser Ansatz wurde dann auch bereits in den Projekten «HiPer-PVT» (Zenhäusern u. a. 2022) sowie «ReSoTech» (Philippen u. a. 2020) verfolgt. Das Prinzip "Absorber-Shifting" ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die zentralen Anforderungen, die an einen Aktuator für das Anheben und Absenken des Absorbers zu stellen sind, seien im Folgenden nochmals zusammengefasst:

- Der Verstellweg des Absorbers (maximaler Abstand zwischen Absorber und Abdeckscheibe) muss für einen genügenden Überhitzungsschutz zwischen 10 und 15 mm liegen. Ein Aktuator muss diesen Weg entweder direkt oder mit Hilfe einer Übersetzung leisten können. Wenn ein Aktuator nur einen Hub von wenigen Millimetern erreicht und eine grosse Übersetzung nötig ist, so erschwert dies jedoch eine einfache Konstruktion.
- Der Aktuator (Mechanismus) soll möglichst inhärent sicher sein, um im Fall eines Versagens die überhitzungsbedingte Zerstörung des Kollektors zu vermeiden. Ein nicht-inhärent-sicherer Mechanismus müsste umgekehrt eine deutlich höhere Langzeitbeständigkeit aufweisen.
- Bei einem inhärent sicheren Mechanismus muss der Aktuator den Absorber, wenn die Temperatur unter die Abschalttemperatur sinkt, gegen eine Kraft von der Abdeckscheibe wegziehen. Der Aktuator arbeitet also unter Zugbelastung. Im Fall eines nicht-selbstsicheren Mechanismus muss der Aktuator den Absorber, wenn die Temperatur über die Abschalttemperatur steigt, gegen eine Kraft (im Minimum die Gewichtskraft des Absorbers) gegen die Abdeckscheibe drücken (siehe Abbildung 1).
- Damit die Effizienz des Kollektors im Betrieb möglichst nicht beeinträchtigt wird, sollte der Hub in einem möglichst kleinen Temperaturbereich stattfinden. Angestrebt werden 10 – 20 K.



- Das Gewicht des Absorbers liegt im Bereich von 10 kg. Unter wie viel Zug- beziehungsweise Druckkraft ein Aktuator genau arbeiten muss, um einen solchen Absorber anzuheben und abzusenken, hängt wiederum von der genauen Konstruktion ab. Um eine einfache Konstruktion zu ermöglichen, sollte ein Aktuator jedoch unter einer Krafteinwirkung von mehreren Kilogramm arbeiten können.

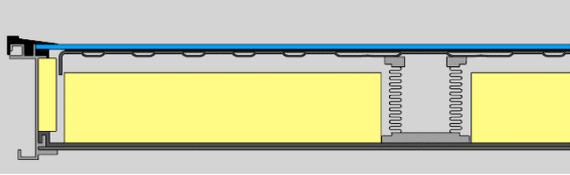
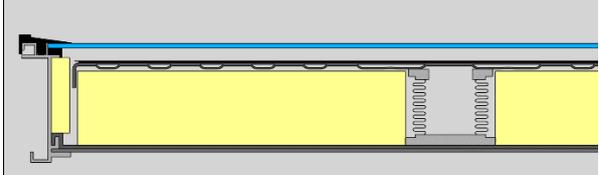
	
<p>Überhitzungsschutzzustand:</p> <p>Selbstsicherer Mechanismus im „deaktivierten“ Zustand: Die Stützfeder trägt den Absorber und ist nur durch dessen Gewichtskraft gestaucht. Der Aktuator ist „deaktiviert“ und übt keine Kraft auf den Absorber aus.</p> <p>oder</p> <p>Nicht-selbtsicherer Mechanismus im „aktivierten“ Zustand: Die Stützfeder wird entlastet. Der Aktuator ist „aktiviert“, er drückt den Absorber gegen die Gewichtskraft nach oben.</p>	<p>Betriebszustand:</p> <p>Selbtsicherer Mechanismus im „aktivierten“ Zustand: Der Aktuator ist „aktiviert“ und zieht den Absorber gemeinsam mit der Gewichtskraft nach unten. Die Stützfeder ist gestaucht.</p> <p>oder</p> <p>Nicht-selbtsicherer Mechanismus im „deaktivierten“ Zustand: Der Aktuator ist „deaktiviert“ und übt keine Kraft auf den Absorber aus. Die Stützfeder trägt den Absorber und wird durch dessen Gewichtskraft gestaucht.</p>

Abbildung 1: Illustration des Kollektors mit Überhitzungsschutzmechanismus. Eine Stützfeder ist in grün dargestellt. Sie bringt den Absorber in die Ausgangsposition. Der Aktuator ist schematisch in Orange dargestellt. Dieser muss in gutem thermischem Kontakt mit dem Absorber sein.



Für das Absorber-Shifting in Frage kommend, wurden in den voraus gegangenen Projekten 8 unterschiedliche Aktuator-Varianten analysiert:

Variante	Beschreibung	Selbstsicher	Reliabilität	Beurteilung
1	Festkörper (Kunststoffstab) mit hohem Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK)	Ja	Hoch	E-Modul zu klein
2	Kommerzielle Wachs-Dehnstoffelemente	Nein	Nieder	Zu wenig Sicherheit
3a	Künstliche Muskeln aus PA-Fasern (homochiral)	Ja	Nieder	Bringt zu wenig Kraft auf
3b	Künstliche Muskeln aus PA-Fasern (heterochiral)	Nein	Nieder	Zu wenig Sicherheit
4	Metallfaltenbalg mit Phasenübergang flüssig/gasförmig	Ja	Hoch	Geeignet
5	Metallfaltenbalg mit Phasenübergang fest/flüssig	Nein	Mittel	Zu wenig Sicherheit
6	Bourdonfedern (mit Flüssigkeit befüllt)	Nein	Hoch	Bringt zu wenig Kraft auf
7	Bourdonfedern (mit Wachs befüllt)	Nein	Mittel	Zu wenig Sicherheit
8	Edelstahlwellrohr (mit Flüssigkeit befüllt)	Nein	Hoch	Geeignet

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass zwei der acht untersuchten Varianten als Überhitzungsschutz in einem PVT-Kollektor in Frage kommen. Beide Varianten wurden im Projekt HiPer-PVT untersucht. Variante 8 führte zu einer mechanisch nicht optimalen Übersetzung zur Höhenverstellung des Absorbers. Der Überhitzungsschutz konnte nicht im gesamten Kollektor erreicht werden. Dies lag vor allem daran, dass sich der Absorber durch die hohe Kräfteinwirkung verbog und dann im Überhitzungsfall nicht flächig an die Scheibe gedrückt wurde.

Variante 4 konnte im Rahmen des Projektes HiPer-PVT aufgrund von Lieferverzögerungen nicht umgesetzt werden. Die Überlegungen dazu sind der Ausgangspunkt des vorliegenden Projektes.

Variante 4:

Der PVT-Absorber ist auf Metallfaltenbälgen gelagert. Die Bälge sind so ausgelegt, dass deren Federkraft ausreicht, um den Absorber gegen die Abdeckscheibe anzuheben. Die Bälge sind über ein kleines Fluidreservoir, welches thermisch an den Absorber gekoppelt ist, hydraulisch miteinander verbunden, zu einem sogenannten Überhitzungsschutzkreislauf. Dieser wird mit einem geeigneten Fluid befüllt, der Absorber wird durch zusammenpressen der Bälge in Arbeitsposition gebracht (d.h. ca. 10 mm Scheibenabstand), und anschliessend wird der Kreis hermetisch verschlossen. Die Eigenschaften der nun angespannten Bälge und die Wahl des Fluids sind so aufeinander abgestimmt, dass sich die Bälge ab einer bestimmten Temperatur, aufgrund des sich im Überhitzungsschutzkreislauf bildenden Dampfes, zu entspannen beginnen. Dadurch heben sie den Absorber an, so dass dieser bei ca. 100°C in (beinahe) Kontakt mit der Scheibe tritt. Da dies auch der Position eines unbefüllten Überhitzungsschutzkreislauf entspricht (z.B. bei Leckage), ist Variante 4 selbstsicher.

Diese Variante wurde in «ReSoTech» unter Verwendung eines konventionellen «Blech-Rohr» Absorbers umgesetzt, was jedoch zu einer deutlich zu aufwendigen Konstruktion führte.



1.3 Projektziele

Um einen abgedeckten PVT-Kollektor, basierend auf einem Alu-Rollbondabsorber als Wärmeübertrager und einem Überhitzungsschutzmechanismus mit Faltenbälgen, zu realisieren, müssen folgende Ziele erreicht werden:

1. Der Aufbau des PVT-Absorbers muss so gestaltet sein, dass eine Schüsselung im heissen Zustand (ca. 100°C) auf ein Minimum reduziert ist. Folgende Werte sollen auf einer Fläche von ca. 1 m x 1.6 m nicht überschritten werden:
 - a. konkave Schüsselung max. 2 mm
 - b. konvexe Schüsselung max. 4 mm(eine konvexe Schüsselung kann eine Leistungsreduktion bereits unterhalb der geplanten Maximaltemperatur bewirken, eine konkave Schüsselung führt hingegen zu einer Überschreitung der geplanten Maximaltemperatur).
2. Das Fluid im Aktuatorkreis darf mit den damit in Kontakt befindlichen Materialien (Aluminium, Edelstahl) nicht zur Gasbildung führen, weder durch Ausgasung von gelösten Gasen noch durch Reaktionen aufgrund chemischer oder elektrochemischer Prozesse.
3. Der Aktuatorkreis mit der Verbindung zwischen dem Rollbond und den Faltenbälgen muss Vakuumdicht sein, d.h. die Leckrate darf maximal $2E-7$ (mbar l)/s¹ betragen.
4. Der elektrische und der thermische Wirkungsgrad des PVT-Kollektors sollen bei $T_{\text{Absorber}} < 80^\circ\text{C}$ und unter Berücksichtigung der im Demonstrator eingesetzten Materialien nahezu den theoretisch möglichen Maximalwerten entsprechen. Bei $T_{\text{Absorber}} > 80^\circ\text{C}$ soll der thermische Wirkungsgrad stetig fallen und bei ca. 100°C den Wert 0 erreichen. Allfällige Abweichungen müssen auf Qualitätsmängel aufgrund der händischen Fertigung rückführbar sein. Da insbesondere die optischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien noch nicht feststehen, können an dieser Stelle keine definitiven Zielwerte für den Wirkungsgrad angegeben werden.

1.4 Struktur des Projekts

Das Projekt wurde in folgende Arbeitspakete gegliedert WP1 - WP5 gegliedert:

WP1: Aktuator

Auslegung des Aktuators, d.h. Bestimmung von Material, Durchmesser, Länge und Federkonstante der Metallfaltenbälge. Die Federkraft der Bälge wird optional durch zusätzliche Federelemente unterstützt bzw. den gegebenen Randbedingungen angepasst.

WP2: Rollbond

Auslegung des Rollbondabsorbers. Neben der Bestimmung von Material, Dicke und Grösse muss insbesondere das Kanalbild festgelegt werden. Das Volumen des Kanalsystems für den Überhitzungsschutzkreislauf muss gross genug sein, um durch die Verdrängung von Fluid beim Verdampfen die Bälge von der Arbeitsposition bei $T < 80^\circ\text{C}$ in die Abschaltposition bei $T \leq 100^\circ\text{C}$ auszudehnen.



WP3: Überhitzungsschutz

- Evaluation einer geeigneten Technik zur vakuumdichten Verbindung der Bälge mit dem Überhitzungsschutzkreislauf des Rollbonds.
- Evaluation eines geeigneten Fluids für den Überhitzungsschutzkreislauf.
- Evaluation von Beschichtungsmöglichkeiten des Überhitzungsschutzkreislauf, um eine Reaktion zwischen diesem und dem Fluid zu unterbinden.
- Versuche zum Ausgasungsverhalten und zur Überhitzungsschutzfunktion.

WP4: PVT-Absorber

Basierend auf Erfahrungen aus dem Projekt "HiPer-PVT" wird, durch das Aufbringen von Si-Solarzellen auf den Rollbondabsorber, ein PVT-Absorber hergestellt, der die Bedingungen an die Formstabilität beim Aufheizen erfüllt. Durch vollflächiges Laminieren mit EVA ist dies nicht erreichbar. Es werden insbesondere folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen:

- Parzellierung des Verbundes Si-Zellen – EVA – Rollbond auf Si-Zellengröße und Ausfüllen der Zwischenbereiche durch Silikon
- Vollflächiges Verkleben mit Silikon (statt EVA)
- Aufbringen einer geeigneten Folie auf der Vorderseite der Si-Zellen als Gegenzug
- Versteifung des Rollbonds durch geeignete Streben rückseitig
- Verarbeitung des Rollbonds zu einem Sandwich-Board durch Aufbringen einer zusätzlichen Schicht eines geeigneten Materials auf der Rückseite des Rollbonds

WP5: PVT-Kollektor

Aufbau des PVT-Kollektors durch Einbau des PVT-Absorbers in ein Kollektorgehäuse und Messung des elektrischen sowie thermischen Wirkungsgrades als Funktion der Absorbertemperatur bis über 100°C zur Demonstration des Überhitzungsschutzmechanismus. Anschliessend wird der Kollektor auf dem Testdach des Instituts zur Langzeitbeobachtung exponiert.

1.5 Vorarbeiten im Projekt «HiPer-PVT»

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung dieser Variante ist die Verbindung der Kompensatoren mit dem Rollbondabsorber aufgrund der unterschiedlichen Materialien. Die Kompensatoren müssen aus Elastizitäts- und Beständigkeitsgründen aus rostfreiem Stahl gefertigt sein. Der Rollbondsabsorber besteht hingegen aus Aluminium.

Durch die Firma Construtec wurden einige Versuche unternommen, um die Verbindung dieser beiden Materialien mit einem Hartlötprozess zu realisieren. Beim Hartlötprozess von Aluminium mit Stahl verbinden sich das Aluminium sowie der Stahl unterhalb der Liquidustemperatur der Verbindungspartner mit dem Lot. Es diffundieren Atome aus den festen Verbindungspartner ins Lot und werden dabei legiert, obwohl der Grundwerkstoff im festen Zustand verbleibt. Die Tiefe der Diffusionszone ist massgeblich für die Festigkeit der Lotverbindung. Diese kann von wenigen Mikrometern bis zu einigen Millimetern betragen. Eine Grundvoraussetzung für eine tiefe Diffusionszone sind optimale Prozessparameter (Reisgen und Stein 2016).



In industriellen Prozessen werden die zu verbindenden Elemente meistens mittels Induktionsschleifen erwärmt. Da die beiden Materialien sich aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit und der Wärmeleitung sehr unterschiedlich aufheizen, war es mit den vorhandenen Mitteln nicht möglich, eine starke metallische Verbindung zu erzeugen. Im Rahmen des Projekts «HiPer-PVT» wurde deshalb entschieden, die Verbindung über ein Zwischenstück aus Aluminium zu lösen, auf welches der Balg geschraubt und mittels X-Ring gedichtet wird. Dies erlaubt es, den Mechanismus auf seine Funktionalität zu prüfen. Für ein späteres Produkt wäre jedoch eine geschweisste Variante zu bevorzugen, da ein Verbindungsstück zusätzliche Kosten verursacht und die Abdichtung der kraftschlüssigen Verbindung eine potenzielle Fehlerquelle darstellt.

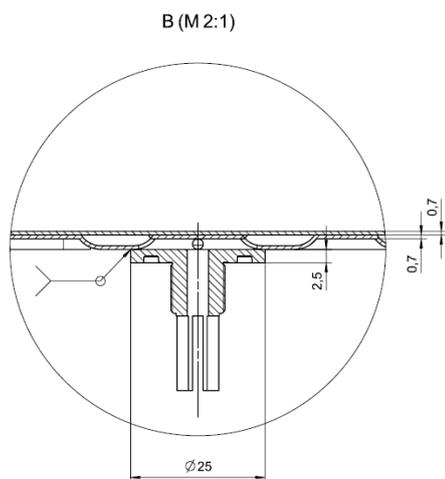


Abbildung 2: Schnitt durch das Anschlussstück an der Unterseite des Rollbondabsorbers.



Abbildung 3: Im Vordergrund das aufgeschweisste Anschlussstück, im Hintergrund der montierte Kompensator.

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen das Anschlussstück des Rollbondabsorbers. Dieses ist aus Aluminium gefertigt und wird mittels Laserschweißen an den Rollbondabsorber angebracht. Der Kompensator wird mit einem Feingewinde am Anschlussstück befestigt. Eine X-Ring Dichtung aus EPDM hält die Verbindung dicht. Der obere geschlitzte Teil dient als Anschlag für den Kompensator.

Befüllen des Überhitzungsschutzkreislauf

Damit der Überhitzungsschutz korrekt funktioniert, muss das eingefüllte Fluid entgast werden. Es wurde deshalb ein Aufbau für das gleichzeitige Entgasen des Fluides und das Befüllen des Überhitzungsschutzkreislauf aufgebaut (Abbildung 4).



Abbildung 4: Aufbau für das Befüllen des Aktuatorkreises. In der rechten oberen Ecke des Bildes befindet sich der Rollbondabsorber mit dem Aktuator. Der Absorber ist oben über einen durchsichtigen Schlauch mit dem Drucksensor verbunden. Unten ist der Rollbondabsorber mit dem Wasser-Glykolgemisch Behälter verbunden. Auf der rechten Seite befindet sich (blau-grau) die Vakuumpumpe.

Im linken Bildteil ist der Versuchsrollbondabsorber zu sehen mit dem Faltenbalg in der oberen linken Ecke. Auf der rechten Seite ist die Vakuumpumpe. Im unteren Teil ist der Behälter mit dem Fluid zum Befüllen des Überhitzungsschutzkreislauf zu sehen. Für die Befüllung wird folgendermassen vorgegangen: Zuerst werden die Ventile vom Behälter zum Absorber und vom Absorber zur Vakuumpumpe geschlossen. Danach wird der Behälter mit dem Fluid so weit wie möglich evakuiert (Das Fluid fängt bei genügend kleinem Partialdruck an zu sieden). Danach wird das Ventil vom Behälter zur Vakuumpumpe geschlossen. In einem zweiten Schritt wird dann der Absorber (durch Öffnen des Ventils vom Absorber zur Pumpe) evakuiert. Das Fluid verdampft bei Raumtemperatur ab einem Druck von ca. 20 mbar. Im Absorber wird dementsprechend auf einen niedrigeren Druck evakuiert. Durch diesen Druckunterschied kann nun das Fluid in den Absorber gesogen werden. Ein durchsichtiger Schlauch oberhalb des Absorbers zeigt das Niveau der Flüssigkeit an. Danach werden die Ventile vor und nach dem Absorber geschlossen.

Materialverträglichkeit

Da der Rollbond-Absorber aus Aluminium und der Balg aus Edelstahl besteht, wurde eine Materialverträglichkeitsprüfung durchgeführt. Hierfür wurde der Überhitzungsschutzkreislauf mit entsalztem Wasser befüllt und über etwas mehr als zwei Monate geschlossen gehalten. Dabei wurde die Produktion von Wasserstoff im Überhitzungsschutzkreislauf beobachtet, welche jedoch mutmasslich auf die Verwendung einer Messingverschraubung als Verschluss des Überhitzungsschutzkreislauf zurückzuführen ist.

Daher wurde im Anschluss die Messingverschraubung durch eine aus Edelstahl ersetzt und der Überhitzungsschutzkreislauf mit einem Glykol-Wassergemisch mit speziellen Inhibitoren für Aluminium befüllt und während drei Monaten beobachtet. Nun konnte keine Wasserstoffproduktion mehr festgestellt werden.



Abbildung 5: (a) Glykol-Wassergemisch vor und (b) nach dem Versuch

Abbildung 5 zeigt die Glykol-Wasser Mischung mit den Korrosionsinhibitoren (a) vor und (b) nach dem Versuch. Es trat eine leichte farbliche Veränderung auf und ein paar einzelne, sehr kleine Partikel wurden aus dem Absorber geschwemmt. Es könnte sein, dass die Partikel und Verfärbung noch aus dem vorhergehenden Experiment (mit Wasserstoffproduktion) stammen.

Anschliessend wurde der Versuch mit gewöhnlichem demineralisiertem Wasser anstatt des Wasser-Glykol-Gemischs mit Inhibitoren wiederholt. Während drei Monaten konnte abermals kein Auftreten von Wasserstoff festgestellt werden. Nach der Versuchsperiode wurden das demineralisierte Wasser und der Rollbondabsorber untersucht. Das Wasser enthielt keine Ausfällungen und hatte auch keine Trübung in der Farbe. Der Rollbondabsorber wies ebenfalls keine Anzeichen von Korrosion auf.

2 Aktuatoren für den Überhitzungsschutz

Ein zentrales Element des neuartigen PVT-Kollektors stellt die Temperaturbegrenzung dar. Diese wird, sobald der Absorber eine vorgegebene Temperatur erreicht, durch eine Reduktion des Abstandes zwischen Absorber und Abdeckscheibe realisiert. Die Anhebung des Absorbers soll dabei durch Metallfaltenbälge erfolgen.

Um die aufwändige Konstruktion aus dem BFE Projekt «ReSoTech» zu vermeiden, wird der Überhitzungsschutzkreislauf in das Design eines Rollbondabsorbers integriert. Die Metallfaltenbälge werden stoffschlüssig mit dem Überhitzungsschutzkreislauf des Rollbondabsorbers verbunden. Der Rollbondabsorber hat nun zwei Fluidkreisläufe die unabhängig voneinander sind. Zum einen gibt es den klassischen Wärmeabnehmerkreislauf und zum anderen den Überhitzungsschutzkreislauf (geschlossenen Kreislauf) mit den Aktuatoren.

Um den Metallfaltenbalg auszulegen, muss dessen hydraulischer Durchmesser und Federkonstante auf das Gewicht des Absorbers und die Eigenschaften des Expansionsfluid abgestimmt sein.

2.1 Gewicht des PVT Absorbers

Um das Gewicht des PVT-Absorbers zu bestimmen, wurde mithilfe eines CAD-Programmes der PVT-Absorber konstruiert. Mithilfe der Dichte der einzelnen Werkstoffe wurde dann das Gewicht des Absorbers berechnet und mit einer Handrechnung überprüft. Die Berechnung aus dem CAD ergab ein Gewicht des fertigen Absorbers von 12.22 kg.



Tabelle 1: Handrechnung zur Bestimmung des Absorbergewichts. Das Absorbergewicht ist ohne Fluid.

Handrechnung: Gewicht des PVT-Absorbers							
Name	Werkstoff	Dimension Objekt mm	Volumen Objekt mm ³	Dichte Werkstoff g/mm ³	Gewicht Objekt g	Anzahl pro Absorber -	Gewicht Total kg
Rückseitenfolie	PET	1642*984*0.4	646'291	0.0014	898	1	0.898
Schutzfolie oben	ETFE	1642*984*0.075	121'180	0.0018	212	1	0.212
	EVA	1642*984*0.4	660'618	0.0010	628	2	1.255
Silizium Zelle	Silizium	156*156*0.18	4'370	0.0023	10	60	0.611
Rollbond	Aluminium	1642*984*1	1'615'728	0.0027	4'362	2	8.725
Gewicht Absorber							11.70

Tabelle 1 zeigt die Handrechnung zur Überprüfung des Gewichts aus dem CAD. Die Flüssigkeit, welche sich im Absorber befindet, wurde nicht berücksichtigt.

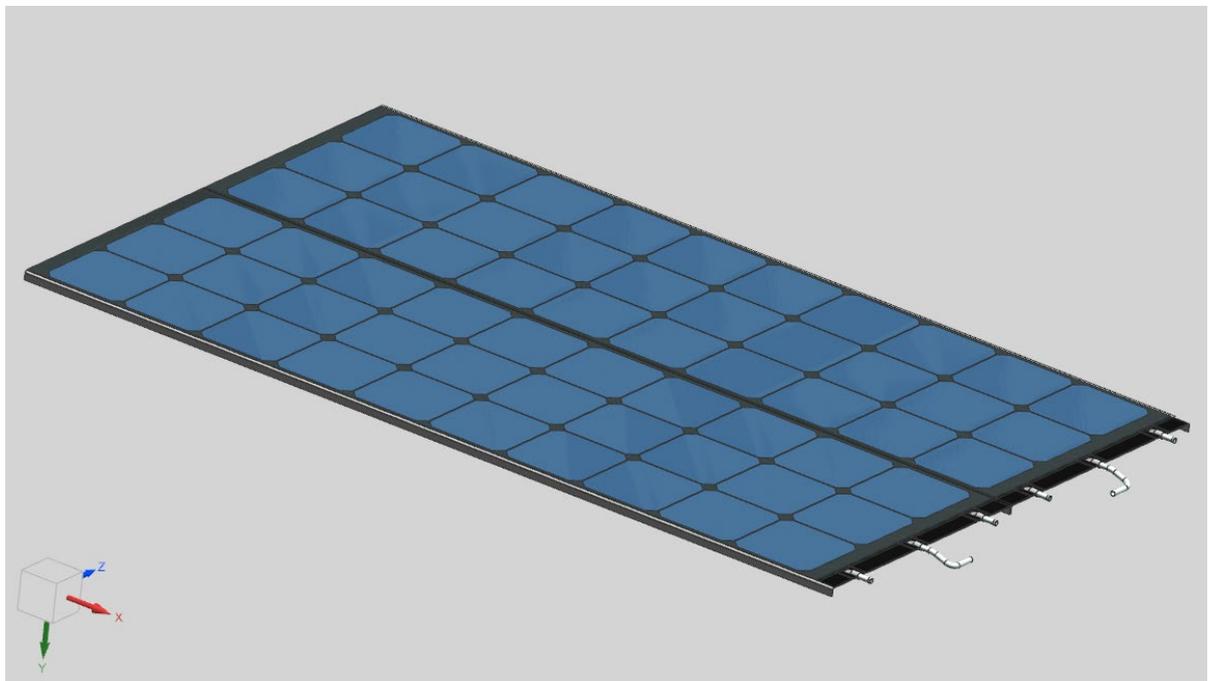


Abbildung 6: CAD-Ansicht des Rollbondabsorber mit dem PV-Laminat.

Abbildung 6 zeigt die CAD-Ansicht des Aluminium Rollbondabsorbers mit dem PV-Laminat. Es wurden Standard M2 Zellen für die Konstruktion des Absorbers verwendet.

2.2 Auslegung der Metallfaltenbälge

Im Betriebszustand, also bei $T_{\text{Abs}} < \text{ca. } 80^\circ\text{C}$ befindet sich der Absorber 10 mm unterhalb der Abdeckscheibe. Für einen inhärent sicheren Überhitzungsschutz muss der Absorber beim Versagen des Schutzmechanismus um diese 10 mm angehoben werden. Ein Versagen des Mechanismus liegt bei einer Undichtigkeit des Überhitzungsschutzkreislauf vor. Daraus folgt, dass die Federkraft der Metallfaltenbälge bei einem Innendruck von 1 bar ausreichen muss, um den Absorber entsprechend anzuheben. Dabei können die Bälge gegebenenfalls auch durch zusätzliche Federn unterstützt werden.

Im Betriebszustand bis 80°C muss der Unterdruck im Überhitzungsschutzkreislauf dafür sorgen, dass der Absorber (gegen die Federkraft) einen Abstand von (mindestens) 10 mm zur Abdeckscheibe



einhält. Dies ist genau dann der Fall, wenn der Druck im Überhitzungsschutzkreislauf, gegeben durch das Produkt der Federkraft und der hydraulisch wirksamen Fläche der Bälge und korrigiert um das wirksame Gewicht des Absorbers, dem Dampfdruck des Fluids bei 80 °C entspricht.

Mit Wasser als Fluid werden diese Bedingungen durch einen Metallfaltenbalg (Witzenmann GmbH 2015) mit einem hydraulischen Querschnitt von $A_{\text{Balg}} = 14.2 \text{ cm}^2$, einer axialen Federrate $D_{\text{Balg}} = 3.7 \text{ N/mm}$ und 10 Wellen erfüllt, wenn dieser durch eine zusätzliche Feder mit einer Federkonstanten von ca. $D_{\text{Feder}} = 2 \text{ N/mm}$ unterstützt wird. Eine Feinabstimmung wird in der Praxis durch die tatsächliche Wahl der zusätzlichen Feder vorgenommen werden.

In Abbildung 7 ist der Metallfaltenbalg mit den Anschlusssteilen (schraffiert) zu sehen. Die Anschlusssteile werden direkt von der Herstellerfirma mittels Laserschweissen an den Balg befestigt. Ein Heliumlecktest mit Aufnahme der Leckrate garantiert eine Leckrate $< 1 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$.

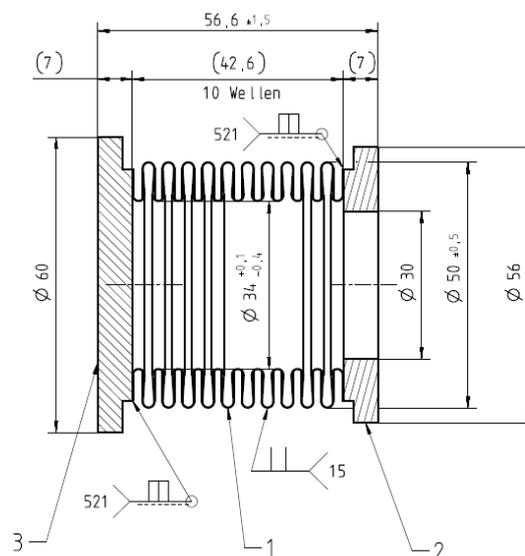


Abbildung 7: Ausgewählter Metallfaltenbalg von Witzenmann. Der Balg hat einen Referenzdurchmesser von 34 mm und verfügt über 10 Wellen. Die Federrate des Balges beträgt 3.7 N/mm. Der Hydraulische Querschnitt beträgt 124.2 cm^2 . An den jeweiligen Enden des Metallfaltenbalg sind (schraffiert) die Anschlusssteile an den Balg gezeigt.

In Abbildung 4 ist die Balgposition als Funktion der Temperatur aufgetragen. Es ist zu sehen, dass der Balg unterhalb von 80°C mit einem Anschlag daran gehindert wird sich weiter zusammen zu ziehen. Die Position der Kollektorscheibe (blaue Linie) begrenzt den Balg in der Ausdehnung bei hohen Temperaturen. Die beiden rot gestrichelten Linien zeigen die minimal und maximal zulässige Ausdehnung des Balges. Dies bedeutet, dass der Balg sich nur zwischen diesen beiden Linien bewegen darf, um die berechneten 10'000 Lastspiele zu garantieren.

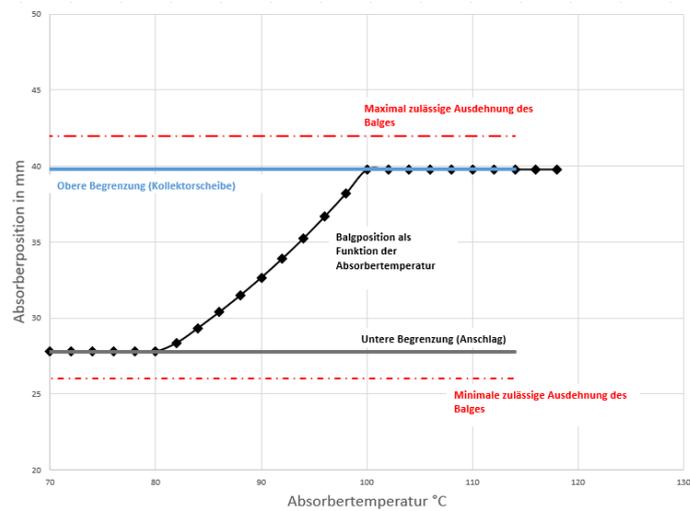


Abbildung 8: Balgposition als Funktion der Absorbtemperatur. Die Position des Balges wird bei Temperaturen $<80^{\circ}\text{C}$ und $>100^{\circ}\text{C}$ mechanisch durch Anschläge daran gehindert sich weiter aus bzw. zusammenzuziehen. Die roten gestrichelten Linien zeigen die maximal zulässige Ausdehnung des Metallfaltenbalges.

In Abbildung 9 ist der gelieferte Metallfaltenbalg der Firma Witzemann zu sehen. Der Metallfaltenbalg ist auf einem Rollbondabsorber aus dem Vorprojekt «HiPer-PVT» platziert. Der Balg besteht aus dem Metallfaltenbalg und den beiden Anschlussteilen. Das untere Anschlussteil an den Balg hat eine Öffnung, um die Zirkulation des Fluids mit dem Rollbondabsorber zu ermöglichen.



(a)



(b)

Abbildung 9: Metallfaltenbalg von Witzemann. (a) Seitenansicht des Metallfaltenbalg. Der Balg ist auf einem Rollbondabsorber aus dem Vorprojekt HiPerPVT platziert. (b) Ansicht von unten des Metallfaltenbalgs. Zu sehen ist die Öffnung für den Austausch des Expansionsfluids mit dem Rollbondabsorber.

2.3 Fazit Aktuatoren für den Überhitzungsschutz

Die Metallfaltenbälge sind sehr gut geeignet, um die Ausdehnung des Fluids in eine Lageänderung des Absorbers umzuwandeln. Die Metallfaltenbälge der Firma Witzemann werden in der Industrie standardmässig eingesetzt, und sind eine erprobte Technologie. Im Projekt «ReSoTech» (Philippen u. a. 2020) konnte bereits erfolgreich ein thermischer Kollektor mit Anwendung der Metallfaltenbälge vor Überhitzung geschützt werden. Um die Nachteile der damaligen Konstruktion zu eliminieren ist eine Integration in den Absorber unumgänglich.



3 Entwicklung Rollbondabsorber

3.1 Auslegung Rollbondabsorber

Für die Herstellung des Rollbondabsorbers musste aufgrund der schlechten Erfahrungen mit dem Lieferanten aus dem Vorprojekt ein neues Unternehmen gefunden werden. Rollbondabsorber werden durch den Markthochlauf der Elektromobilität sehr nachgefragt. Sie werden zur Temperierung der Batterie eingesetzt. (Kim, Oh, und Lee 2019)

Es konnte innerhalb nützlicher Frist kein Hersteller gefunden werden, der noch offene Kapazitäten hat, bzw. auch überhaupt die nötige breite herstellen konnte. Deshalb wurde entschieden eine Modular aufgebaute Lösung zu entwickeln. Der Hersteller TALUM IZPARILNIKI hat sich bereit erklärt die von uns entwickelten Aluminium-Rollbondabsorber herzustellen. Die maximale Breite der Fertigungslinie beträgt 520 mm. Die entwickelte Lösung besteht aus zwei Rollbondabsorber die miteinander verbunden werden.

Auf jedem Aluminium-Rollbondabsorber hat es Platz für bis zu fünf Bälge. Diese sind durch einen Kanal, welcher im Rollbondabsorber platziert ist, miteinander verbunden. Dies garantiert die simultane Bewegung der Bälge. Über einen Anschluss können die zwei Hälften miteinander verbunden werden. Damit genug Volumen für die Ausdehnung der Bälge vorhanden ist wurde der Fluidkanal im Querschnitt mit den Vorgaben von TALUM bezüglich Druckstabilität so ausgelegt, dass pro Absorber theoretisch fünf Bälge montiert werden können. Für einen Balg ist bei einem Hub von 12 mm ein Volumen von ca. 16 cm³ notwendig. Somit braucht es pro Aluminium-Rollbondabsorber ein Ausdehnungsvolumen von 83 cm³. Ein Aluminium-Rollbondabsorber hat mit dem aktuell ausgelegten Überhitzungsschutzkreislauf ein theoretisches Volumen von 130 cm³. Dies ergibt einen Sicherheitsfaktor von ca. 1.6. Abbildung 10 zeigt die CAD-Zeichnung des Rollbondabsorbers. Dieser hat in der Mitte den Überhitzungsschutzkreislauf mit den runden Anschlüssen für die Metallfaltensbälge. Die Anschlüsse sind durch Fluidkanäle miteinander verbunden.

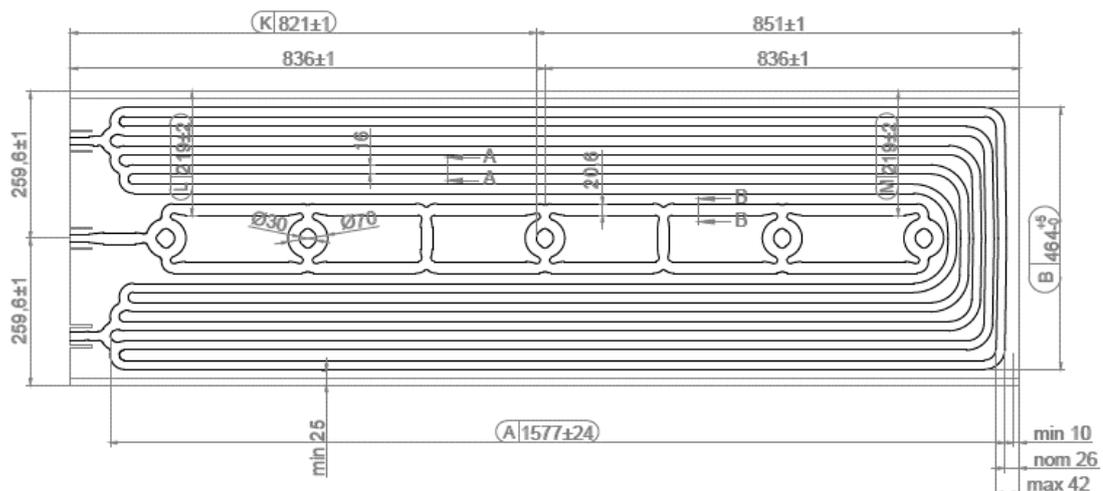


Abbildung 10: CAD-Zeichnung des Rollbondabsorbers. In der Mitte ist der Überhitzungsschutzkreislauf zu sehen mit den runden Anschlüssen für den Balg. Aussen ist der Fluidkreislauf für die Wärmeabnahme zu sehen.

Auf der Aussenseite in Abbildung 10 ist der Fluidkreislauf für die Wärmeabnahme zu sehen. Dieser verläuft möglichst über das gesamte Blech, um eine optimale Wärmeabnahme zu ermöglichen.



Abbildung 11 zeigt den Querschnitt des Fluidkanals für die Wärmeabnahme. Dieser hat einen Querschnitt von ca. 28 mm².

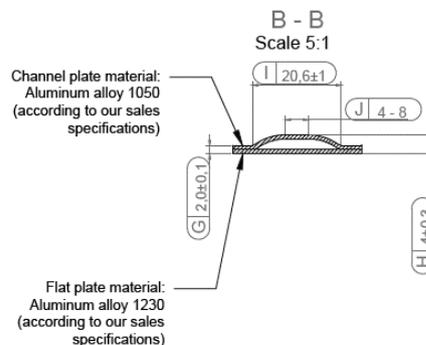


Abbildung 11: Querschnitt des Fluidkanals. Der Fluidkanal ist ca. 20 mm breit und insgesamt 4 mm dick. Das untere Blech besteht bei einem einseitig flachen Rollbond aus einem etwas härteren Aluminium als das Obere. Das weichere Blech (EN AW 1050) wird beim Aufpressen der Kanäle verbogen und bildet den Kanal.

Mit dem Querschnitt kann der Druckverlust des Absorbers abgeschätzt werden. Da der Rollbondabsorber fünf parallele Stränge hat ist der Druckverlust durch den Absorber ziemlich klein. Der Druckverlust eines einzelnen Kanals wurde für einen rechteckigen Querschnitt angenähert. Für das Projekt ist angedacht einen Kollektor mit zwei Rollbondabsorber zu verbauen, somit ergibt sich ein Druckverlust von 0.015 bar. Dies entspricht ungefähr einem Druckverlust eines Kollektors mit Harfenabsorber²

In Abbildung 12 sind die zwei Aluminium-Rollbondabsorber mit den Anschlüssen zu sehen. Die Rollbondabsorber werden vom Hersteller mit Anschlüssen für die Verbindung zueinander geliefert. Die Anschlüsse werden nach dem rollbonding Prozess an die Absorber angefügt. Aus diesem Grund sind zu Beginn alle Rollbondabsorber gleich. Erst nach dem Anfügen der Anschlüsse gibt es dann linke und rechte Absorber. Die Anschlüsse können durch den Ausschnitt im Rollbondblech nach unten gebogen werden, damit diese nicht an der Scheibe anstehen.

² <https://serv.spf.ch/spftesting/collectors/pdfs/scf1591de.pdf>

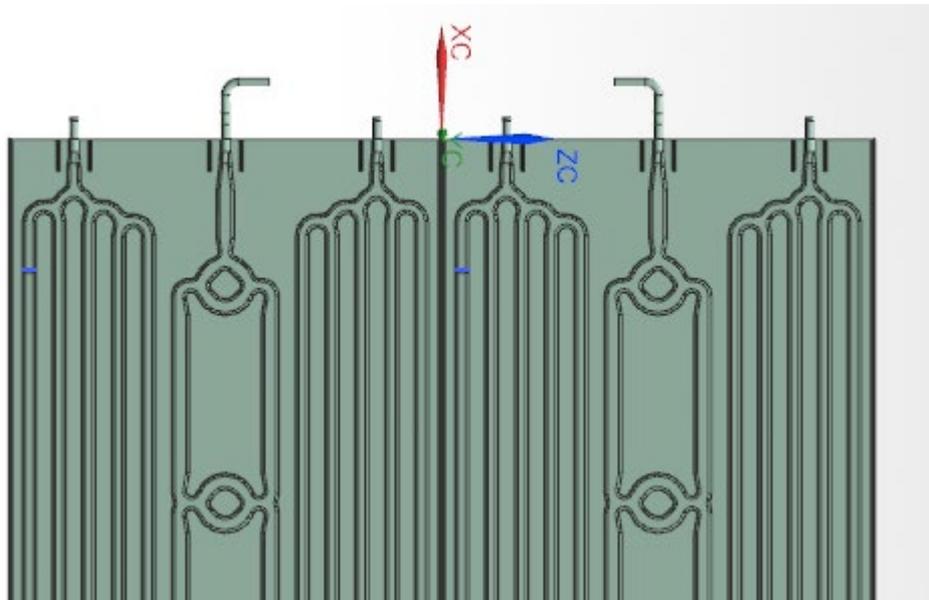


Abbildung 12: Aluminium-Rollbondabsorber mit den Anschlüssen für den Solarkreislauf und den Überhitzungsschutzkreislauf. Oben im Bild sind die Anschlüsse mit den Ausschnitten zu sehen. Mithilfe der Ausschnitte können die Anschlüsse nach unten gebogen werden.

Die Aluminium-Rollbondabsorber werden dann in der Mitte aneinander befestigt und mit den PV-Zellen versehen.

Die von TALUM gelieferten Aluminium-Rollbondabsorber sind von guter Qualität. Die Toleranzen in der Grösse und in der Lage werden eingehalten (Siehe 1.3 Projektziele). Abbildung 13 zeigt die Seitenansicht quer zum Absorber. Es ist zu sehen, dass der Absorber sehr eben ist und sich weder nach unten oder nach oben verzieht.



Abbildung 13: Seitenansicht des gelieferten Rollbondabsorber. Die Verbiegung des Rollbondabsorber beträgt in der Querrichtung weniger als einen Millimeter.

Auch die Seitenansicht längs zum Absorber in Abbildung 14 zeigt, dass der Absorber sehr sorgfältig hergestellt wurde. Lediglich in der Mitte liegt die Wasserwaage nicht ganz auf dem Absorber auf. Eine Messung mit dem Messschieber hat gezeigt, dass die Abweichung sich in der geforderten Toleranz von 2 mm befindet.

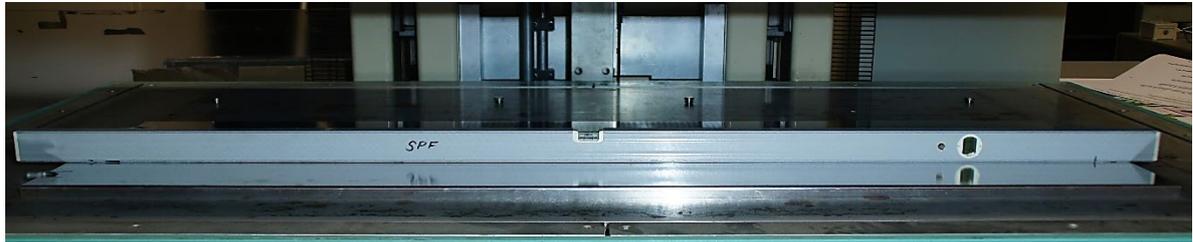


Abbildung 14: Seitenansicht in der Längsrichtung des Absorbers. Auf dem Absorber liegt zum Vergleich der Geradheit die Wasserwaage.

Optisch vermögen die Absorber genauso zu Überzeugen. Alle Fluidkanäle sind auf die gleiche Höhe aufgedrückt und auch die Anschlüsse wurden fachmännisch an die Rollbondabsorber gelötet.

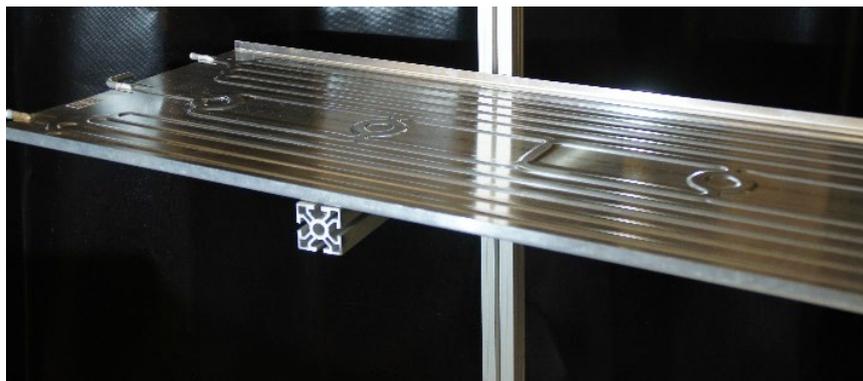


Abbildung 15: Rückseite des gelieferten Rollbondabsorber. Es sind einerseits die runden Anschlüsse mit dem Kanal für die Bälge zu sehen (Mitte), und die Kanäle für die Wärmeversorgung (aussen).

Abbildung 15 zeigt die Rückseite des Absorbers. Die Kanten sind aus stabilitätsgründen um 90° gebogen.

3.2 Verbindung Metallfaltenbalg und Aluminium-Rollbondabsorber

Der Kanal des Rollbondabsorber, welcher den Überhitzungsschutzkreislauf bildet, muss nach dessen Fertigung mit dem Metallfaltenbalg verbunden werden. Hierfür wird an den vorgefertigten Anschlussstellen der Fluidkanal mit kleinen Verbindungslöchern versehen. Diese ermöglichen einen Fluidaustausch zwischen dem Rollbondkanal und dem Metallfaltenbalg. Abbildung 16 zeigt die Aussparungen für den Fluidaustausch im Absorber. Die Aussparungen wurden nachträglich mit einem Fräser eingestochen.

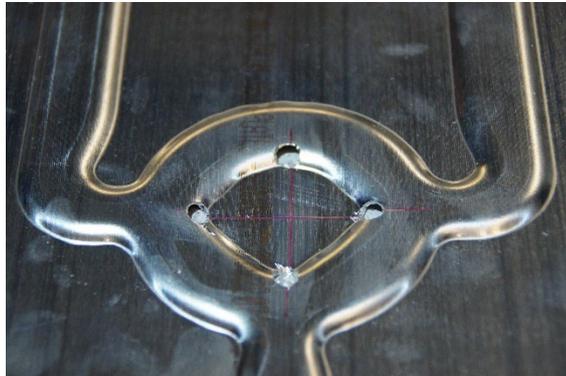


Abbildung 16: Aussparungen im Absorber für den Fluidaustausch zwischen dem Absorber und dem Balg.

Im Vorprojekt «HiPer-PVT» wurde der Metallfaltensbalg mit einer Schraubverbindung und einer X-Ring Dichtung am Absorber befestigt (Siehe: Abschnitt 1.5 Vorarbeiten im Projekt «HiPer-PVT»). Diese Art der Verbindung bzw. Dichtung bietet jedoch keine genügende Sicherheit für ein Produkt, von welchem eine Lebensdauer von mindestens 20-30 Jahren erwartet wird.

(Fedorov 2022) hat gezeigt, dass es möglich ist, eine direkte Verbindung von Aluminium und Stahl zu erzeugen. Dies ist durch Schweißen oder auch durch Löten möglich. Eine Möglichkeit die zwei Fügepartner zu verbinden, wäre durch einen Lichtbogenschweissprozess. Durch den Lichtbogen werden die Grund- und Zusatzwerkstoffe so weit erhitzt, dass auf der Stahlseite eine Lötverbindung und auf der Aluminiumseite eine Schweissverbindung entsteht.



3.2.1 Aluminium/Stahl Schweissversuche

Erste Versuche einer metallischen Verbindung von Aluminium mit Edelstahl wurden bei «Schutzgastechnik Lengnau» durchgeführt. Hierbei wurde der Metallfaltenbalg direkt auf den Aluminiumrollbondabsorber mit einem Laser und AlSi12 als Schweisszusatz geschweisst.

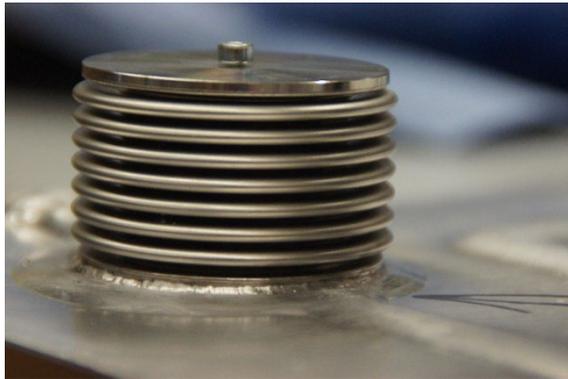


Abbildung 17: Direkt geschweisste Verbindung zwischen Aluminium-Rollbondabsorber und den Edelstahl-Metallfaltenbalg.

Die Schweissnaht sah optisch einwandfrei aus und auch deren mechanische Belastbarkeit machten einen guten Eindruck. Ein Dichtigkeitsversuch hat dann aber gezeigt, dass die Naht sehr porös ist. Das eingefüllte Fluid konnte fast ungehindert aus der Naht fließen. Eine Wiederholung des Versuchs einige Wochen später hat dann wiederum ein anderes Bild gezeigt. Die Naht hatte nur noch kleinste Flüssigkeitsaustritte. Abbildung 18 zeigt eine Detailaufnahme der Schweissnaht zwischen dem Rollbondabsorber und des Metallfaltenbalgs. Die Schweissnaht hat bei einem Überdruck von einem bar nur noch kleinste Flüssigkeitsaustritte.

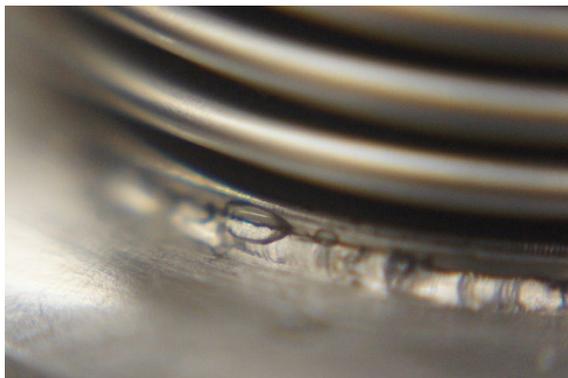


Abbildung 18: Detailansicht der Schweissnaht zwischen Rollbond-Absorber und Metallfaltenbalg. Um die Dichtigkeit der Naht zu prüfen, wurde der Rollbond, verbunden mit dem Metallfaltenbalg, mit entionisiertem Wasser bei einem Überdruck von einem bar gefüllt. Die Detailaufnahme zeigt kleinste Leckagen an der Schweissnaht im Bereich der Verbindung zum Metallfaltenbalg.

Um zu verstehen, weshalb die Naht nicht dicht ist, wurde ein Schliffbild des Querschnitts der Naht angefertigt. Dieses wurde dann unter dem Mikroskop untersucht. Aus der Probe konnten zwei Schliffbilder von unterschiedlichen Orten der Schweissnaht angefertigt werden.

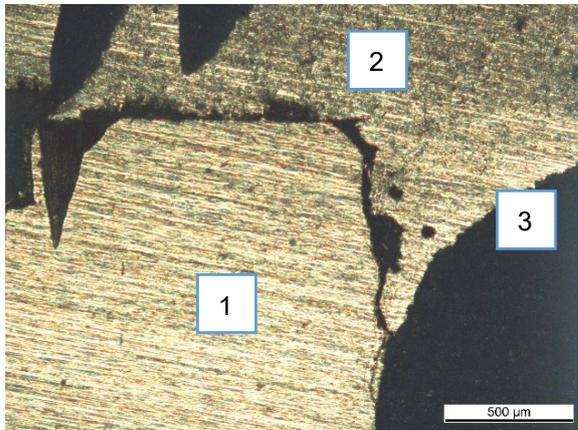


Abbildung 19: Schliffbild der Probe 2

Nr. 1 zeigt den Metallfaltenbalg aus Edelstahl, Nr. 2 den Aluminium Rollbondabsorber und Nr. 3 die Schweissnaht. Das Bild zeigt eine gute Verbindung der Schweissnaht mit dem Aluminium Rollbond. Die Verbindung zum Metallfaltenbalg ist nicht gegeben.

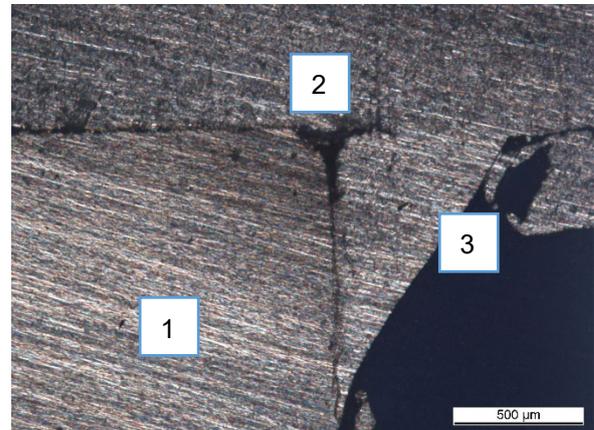


Abbildung 20: Schliffbild der Probe 1

Nr. 1 zeigt den Metallfaltenbalg aus Edelstahl, Nr. 2 den Aluminium Rollbondabsorber und Nr. 3 die Schweissnaht. Das Bild zeigt eine gute Verbindung der Schweissnaht mit dem Aluminium Rollbond. Die Verbindung zum Metallfaltenbalg ist hier wesentlich besser als bei der Probe 2

In Abbildung 19 und Abbildung 20 ist zu sehen, dass nicht die Verbindung vom Aluminiumgrundwerkstoff (2) mit dem Schweisszusatz (3) das Problem ist, sondern die Verbindung des Schweisszusatzes mit dem rostfreien Stahl (1). In der Probe 2 ist keine Verbindung zwischen dem rostfreien Material und dem Schweisszusatz entstanden. In Probe 1 ist bei dieser Auflösung nicht ersichtlich, ob sich das Material stoffschlüssig miteinander verbunden hat.

Abbildung 21 zeigt nochmals Probe 1, nachdem diese zur weiteren Untersuchung feiner geschliffen und zum Schluss poliert wurde.

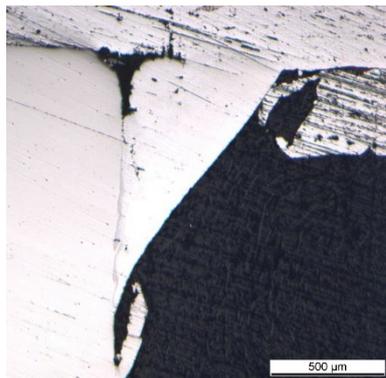


Abbildung 21; Probe 1 geschliffen und poliert.

Die geschliffene Probe zeigt die Stelle zwischen der Aluminiumnaht und dem Stahl wesentlich genauer. Es lässt sich bereits gut sehen, dass die Naht geschlossen ist. Eine Vergrößerung in

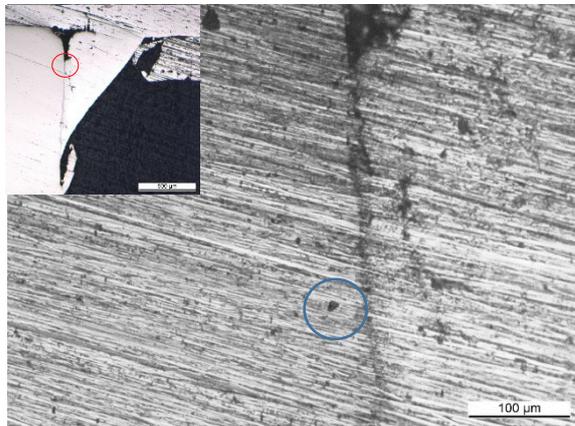


Abbildung 22: Vergrößerung der Probe 1 (Massstab 100 Mikrometer). Die Vergrößerung zeigt den Ausschnitt (rot) aus dem oberen rechten Bild. Der Blaue Kreis dient wiederum als Orientierungsmarke für die Vergrößerung in Abbildung 23

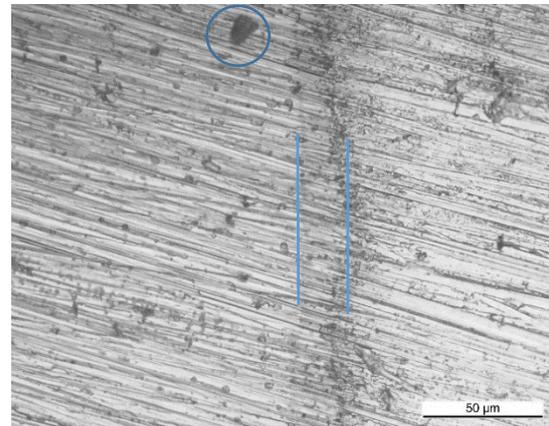


Abbildung 23: Vergrößerung der Probe 1 (Massstab 50 Mikrometer). Die Blauen Linien zeigen die Diffusionszone der Naht.

Abbildung 23 zeigt, dass die Naht geschlossen ist. Die Übergangszone weist auf der rechten Seite viele kleine Löcher auf. Die Reaktionszone der Verbindung ist in etwa 20 Mikrometer gross. Untersuchungen von (Fedorov 2022) haben gezeigt, dass die Reaktionszone möglichst dünn sein sollte. Die höchsten Festigkeiten erreichen dabei Verbindungen von Stahl und Aluminium mit Reaktionszonen kleiner 10 Mikrometer. Zudem sind an der rechten Seite der Reaktionszone kleine Löcher zu sehen.

Das Silizium im Schweisszusatz verhindert die Diffusion von Aluminiumatomen aus dem Aluminiumgrundwerkstoff und von Stahlatomen aus dem Stahlgrundwerkstoff in die Schweissnaht. Damit wird das Wachstum der intermetallischen Fe-Al-Schichten gehemmt und demzufolge die Dicke dieser Schichten reduziert (Dong u. a. 2012). Festgestellt wurde auch, dass der maximale Siliziumanteil im Schweisszusatz 10 Volumenprozent nicht übersteigen sollte (Cheng und Wang 2011). Das Verwenden eines Schweisszusatzes mit 12 % Silizium könnte diese Ausscheidungen bzw. die eingangs erwähnten Löcher erklären.

Weiterhin ist die Dicke der Reaktionszone von der Haltezeit bzw. der Wirkzeit des Schweissvorgangs abhängig. Der kleine thermische Einflussbereich des Lasers ist in diesem Falle sicherlich für die Güte der Schweissnaht von Vorteil, da nur ein kleiner Bereich sehr schnell erwärmt wird. Dieser kleine Einflussbereich macht es aber auch sehr schwierig über die gesamte runde Schweissnaht gleichbleibende Eigenschaften zu Erreichen. Da der Umfang der Arbeit beschränkt ist und die gewählte Verbindungsart sehr experimentell ist, wurde entschieden, diese Verbindungsart im Rahmen dieses Projektes nicht weiter zu verfolgen, obschon dies letztendlich eine sehr geeignete Methode wäre.



3.2.2 Aluminium/Stahl Lötversuche

Eine weitere Möglichkeit die Fügepartner zu verbinden ist das Löten. Auch hier können theoretisch die Fügepartner theoretisch direkt miteinander verbunden werden. Eine gute Auswahl über den Stand der Technik bietet auch hier (Fedorov 2022). Die Prozesse sind hier ebenfalls kompliziert und im besten Fall wird unter Ausschluss von Sauerstoff bei möglichst kurzen Prozesszeiten gelötet.

Wesentlich einfacher ist mit metallischen Zwischenschichten wie Zink oder Kupfer zu arbeiten.

Um diese Möglichkeit zu überprüfen wurde ein Versuch mit einer Aluminiumplatte und einer verkupferten Stahlrondelle unternommen. In Abbildung 24 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Die verkupferte Stahlrondelle wurde auf ein Stück Aluminiumblech gelegt und mit einem Flussmittel gefüllten Aluminiumhartlot im Ofen gelötet. Die beiden Fügepartner werden nach 15 Minuten, bei 450°C im Ofen durch das Lot verbunden.

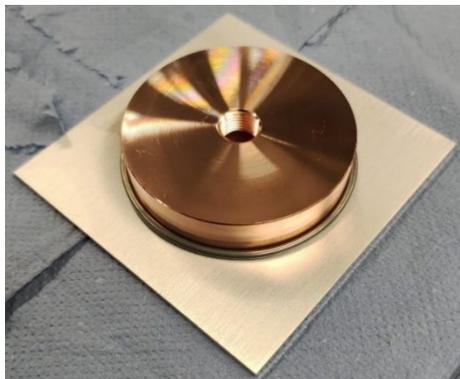


Abbildung 24: Verkupferte Stahlrondelle auf einem Stück Aluminiumblech mit einem Drahtlot um die Stahlrondelle gelegt. Es handelt sich hierbei um ein Aluminiumweichlot AF 631 NH (Flussmittelgefülltes Kapillarlot auf ZnAl-Basis).

Abbildung 25 zeigt die gelötete Aluminium-Stahl Probe. Obwohl ein falsches Aluminiumblech (AL EN AW 5083 anstatt Al EN AW1050) verwendet wurde, konnte die Verbindung hergestellt werden.



Abbildung 25: Gelötete Aluminium Stahl Probe. Die Probe wurde stahlseitig verkupfert. Die Abbildung zeigt die Probe nach dem Lötprozess im Ofen. Es konnte eine Verbindung ohne Schutzgasgespülten Ofen hergestellt werden.

Die direkte Verbindung der Metallfaltenbälge mit dem Aluminium Rollbondabsorber durch Beschichten des Stahls wäre theoretisch machbar. Die Materialpaarung von Aluminium mit Kupfer oder Zink ist jedoch höchst problematisch und führt in Anwesenheit einer leitenden Flüssigkeit zu Lochfrass im Aluminium (Ostermann 2007). Aus diesem Grund wurde die direkte Verbindung mit Beschichtung des Metallfaltenbalges nicht weiter untersucht.



3.2.3 Plattierte Werkstoffe

Eine weitere Möglichkeit zur Verbindung von Aluminium mit Stahl ist das Plattieren dieser Werkstoffe. Dadurch wird eine intermetallische Verbindung durch Druck und/oder Temperatur bzw. der nachfolgenden Wärmebehandlung (z. B. Diffusionsglühen) erzielt. Als Verfahren kommen dabei etwa das Walzplattieren und das Sprengplattieren bzw. Sprengschweissen (Schuler und Twrdek 2019) in Frage.

Der Vorteil des plattierten Materials liegt darin, dass auf jeder Seite der Verbindung nur gleichartige Materialien miteinander verbunden werden müssen. Dies erlaubt es mit aktuellen Standardverfahren für die Verbindung zu arbeiten.

Walzplattieren:

Das Walzplattieren bezeichnet Festkörperfertungsverfahren, bei denen durch Kalt- oder Warmwalzen von Platten oder Blechen gleichartige und ungleichartige Werkstoffe nach dem Prinzip der starken plastischen Verformung verbunden werden (Khan u. a. 2021). Hier kann ebenfalls wieder in verschiedene Verfahren unterteilt werden.

Als schwierig im Rahmen dieses Projekts stellte sich die Beschaffung von geeignetem Material in kleinen Mengen heraus. Glücklicherweise konnte über die Kuhn Rikon AG, welche walzplattierte Rondellen in ihren Pfannen einsetzen, Material für eigene erste Untersuchungen der Verbindung bezogen werden.

Tabelle 2: Eigenschaften der Walzplattierten Rondellen

Schicht	Material	Dicke
1	Stahl 1.4301	0.4 mm
2	Aluminium EN AW 3003	2.4 mm
3	Stahl 1.4016	0.7 mm

Aus den 300 mm grossen Rondellen mit Eigenschaften nach Tabelle 2 wurden kleinere Rondellen für Schweissversuche hergestellt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass der Schichtaufbau des Materials (zumindest für die Schweissmöglichkeiten im Rahmen dieses Projektes) ungeeignet ist. Die Schicht #3 besteht aus einem sehr schlecht schweisbaren Stahl. Diese Schicht wurde deshalb entfernt. Schicht #1 war dann aber zum Anschweissen mittels WIG (Wolfram Inertgas-Schweissen) an den Balg zu dünn. Es ist jedoch möglich, dass Schweissen mit einem anderen Verfahren (z.B. Laser) und/oder einem Roboter möglich ist.

Um die grundsätzliche Eignung der Verbindung eines kaltgewalzten Materials einzuschätzen, wurde ein Schliffbild erstellt.

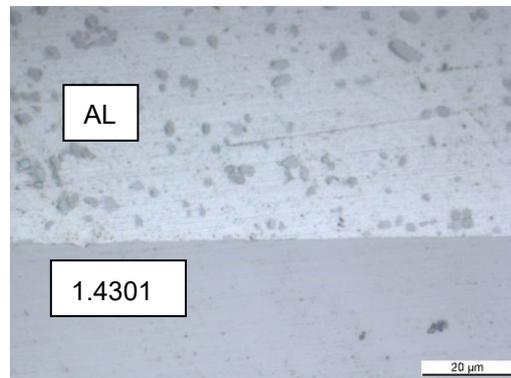


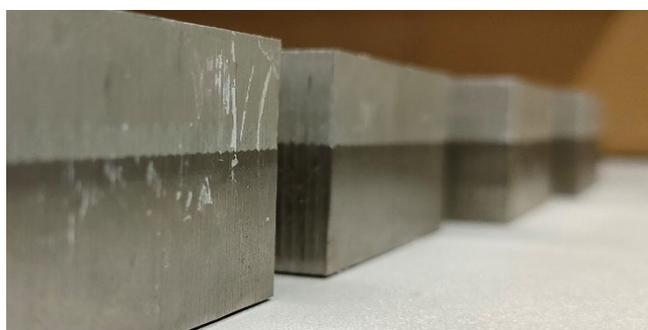
Abbildung 26: Schliffbild der Walzplattierten Verbindung zwischen Aluminium und rostfreiem Stahl.

Abbildung 26 zeigt, dass die Verbindung keine intermetallische Zwischenschicht aufweist. Dies deutet nach (Akramifard, Mirzadeh, und Parsa 2014) darauf hin, dass das Material nicht nachbehandelt wurde. Eine Nachbehandlung des Materials bei ca. 500-600°C während einer Stunde ergibt eine intermetallische Schicht von ungefähr zehn Mikrometer. Mit diesen Eigenschaften kann eine Verbindung hergestellt werden mit Festigkeiten vom schwächeren Grundmaterial.

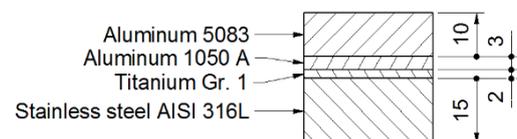
Aufgrund des vielversprechenden Ansatzes wurde bei unterschiedlichen Herstellern für ein Material mit je 2 mm Dicke angefragt. Alle uns angebotenen Standardmaterialien hatten eine zu dünne Stahlschicht, um in diesem Projekt Verwendung zu finden. Eine Herstellung eines speziell auf unsere Anwendung zugeschnittenen Materialverbundes überschreitet die finanziellen Möglichkeiten dieses Projekts.

Sprengplattieren:

Während das Walzplattieren auf eine gewisse Dicke der Platten aufgrund des Walzdrucks beschränkt ist, wird beim Sprengplattieren mit immensen Kräften gearbeitet. Nach (Schuler und Twrdek 2019) wird beim Sprengschweißen das Auflagematerial mit 500 m/s auf das Grundmaterial geschleudert. Dabei werden Drücke bis zu 6000 MPa erzeugt. An den Kontaktstellen in der Fügezone kommt es zu einer plastischen Verformung, die bis hin zur Annäherung der atomaren Ebenen führt. Bei Nobelclad konnten wir ein Standardmaterial bestellen, welches unseren Anforderungen entspricht.



(a)



(b)

Abbildung 27: (a): Die Rohbarren aus dem sprengplattierten Material; (b): Aufbau des sprengplattierten Materials. Bei der Angabe AISI 316L handelt es sich um die amerikanische Bezeichnung für rostfreien Stahl 1.4301.

Die Rondellen mit 60 mm Durchmesser wurden aus den Rohbarren geschnitten, welche zunächst beidseitig in einem Abstand von 6 mm zur Titanschicht überfräst wurden. Dies bedeutet, dass eine



Scheibe entsteht mit einer Stahldicke von 4 mm (EN 1.4301) und einer Aluminiumdicke (Al EN AW 5083) von 3 mm. Dazwischen befindet sich das Reinaluminium (Al EN AW 1050A) und das Titan (GR1). In Tabelle 3 ist der Schichtaufbau der Rondelle aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht des Schichtaufbau der Rondelle aus dem sprengplattierten Material von Nobelclad

Schicht	Material	Dicke
1	Aluminium En AW 5083	3 mm
2	Aluminium EN AW 1050 A	3 mm
3	Titan GR1 (3.7025)	2 mm
4	Rostfreier Stahl 1.4301	4 mm



Abbildung 28: Rondelle aus plattiertem Material. Die Rondelle besteht (von oben nach unten) aus 1.4541 rostfreiem Stahl, Titan Gr1, Aluminium 1050A und Aluminium 5083.

Abbildung 28 zeigt die Rondelle mit den einzelnen Schichten.

Zur Verbindung der Rondelle mit dem Balg wurde diese stahlseitig mittels WIG-Verfahren an den Flansch des Balgs geschweisst. Das Verfahren kommt in Industriezweigen zur Anwendung, bei denen hochwertige Nähte erforderlich sind (Fahrenwaldt, Schuler, und Twrdek 2014). Abbildung 29(a) zeigt den Metallfaltenbalg mit der von Hand geschweissten Verbindung. In einem zukünftigen Prozess würde der Balg direkt an das plattierte Material geschweisst werden (d.h., ohne zusätzlichen Flansch). Mit einer Laserschweißung auf einer automatischen Maschine kann somit gleich die Materialdicke optimiert werden. Die Firma Witzenmann gibt eine minimale Dicke des Anschlusssteils von zwei mm vor. Bei der jetzigen Konfiguration sind es 11 mm.



(a)



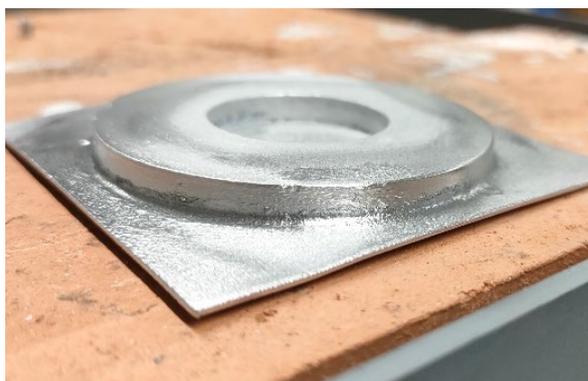
(b)

Abbildung 29: (a) Metallfaltenbalg an plattierte Rondelle geschweisst. (b) Detailaufnahme der Schweissnaht.

Abbildung 29(b) zeigt eine Detailaufnahme der Schweissverbindung zwischen Metallfaltenbalg und dem plattierten Werkstoff. Die Abbildung zeigt eine gleichmässige Naht, die sich auf beiden Seiten mit dem Bindungspartner verbindet.

Um die plattierten Werkstoffe aluminiumseitig zu verbinden, kommen unterschiedliche Verfahren in Betracht. Einerseits kann die Verbindung wie stahlseitig geschweisst werden. Andererseits kann die Verbindung auch gelötet werden.

Die Verbindung zu lötén, bringt den Vorteil, dass der Prozess einfach automatisiert in einem Ofen gemacht werden kann. Leider konnte zum Zeitpunkt der Versuche kein genügend grosser Ofen gefunden werden, in dem der gesamte Absorber hineingepasst hätte³. Ein Versuch an einem kleinen Prototyp hat zu qualitativ guten Ergebnissen geführt. Die Teile wurden hierzu im Ofen bei 430°C vorgewärmt. Danach wurde das Flussmittel aufgetragen und mit der Flamme lokal nachgewärmt. Als Lot diente AlSi12. In Abbildung 30 ist die Verbindung zwischen dem Aluminiumblech und der Aluminiumrondelle per Flammenlötén zu sehen. Das Lot wurde sehr schön in den Spalt gezogen.



(a)



(b)

Abbildung 30: (a) Al-Al Lötverbindung an einem Prototyp. (b) Verbiegung des Rollbondabsorbers durch das Vorwärmen mit einer Heizplatte.

³ In der Industrie werden Ofenlötungen oft in einem Durchlaufofen gemacht, bei dem automatisch das Flussmittel und z.B. ein Lotzusatz als dünne Folie aufgetragen wird. Dies ermöglicht es Bauteile zwar vorzuwärmen, aber dennoch mit Flussmittel zu arbeiten.



Um die Verbindung an einem Rollbondabsorber realisieren zu können wurde das Blech manuell vorgewärmt. Hierfür wurde unter der zu schweisenden Stelle eine Heizplatte positioniert.

In Abbildung 30(b) ist der Aufbau des Versuchs am Rollbondabsorber zu sehen, mit einer unterlegten Heizplatte als Vorwärmung. Der Absorber hat sich in der Zone der Vorwärmung um ca. 10-15 mm gesenkt. Die Ebenheit des Absorbers ist für den zu erreichenden Überhitzungsschutz sehr wichtig. Deshalb wurde das manuelle Verfahren verworfen.

Löten im Schutzgasdurchfluteten Ofen

Um die Durchbiegung des Bleches möglichst gering zu halten, ist eine gleichmässige Erwärmung während des Lötprozess erforderlich. Dies kann am einfachsten mit einem Ofen erreicht werden. Dieser sollte entweder vakuumiert oder mit Schutzgas geflutet werden können. Dadurch wird sichergestellt, dass das Flussmittel, welches die Oxidschicht des Aluminiums oxidiert, verdampft, bevor das Material und vor allem das Lot die gewünschte Temperatur erreicht hat. Abbildung 31 zeigt einen Metallfaltenbalg der auf einen Teil eines Aluminium -Rollbondabsorber gelötet wurde. Der Metallfaltenbalg wurde nachträglich mit dem plattierten Material verschweisst. Der Lötprozess wurde in einem Argon gefluteten Ofen bei 595°C durchgeführt. Es wurde ein Flussmittelgefülltes Aluminiumhartlot (Fontargen AF 407 LIBCs) verwendet. Die zu verlötenden Teile wurden zunächst auf 595°C vorgewärmt und dann das Lot (160 mm) zwischen dem Aluminium-Rollbondabsorber und dem plattierten Material platziert. Die Lötdauer betrug zehn Minuten.

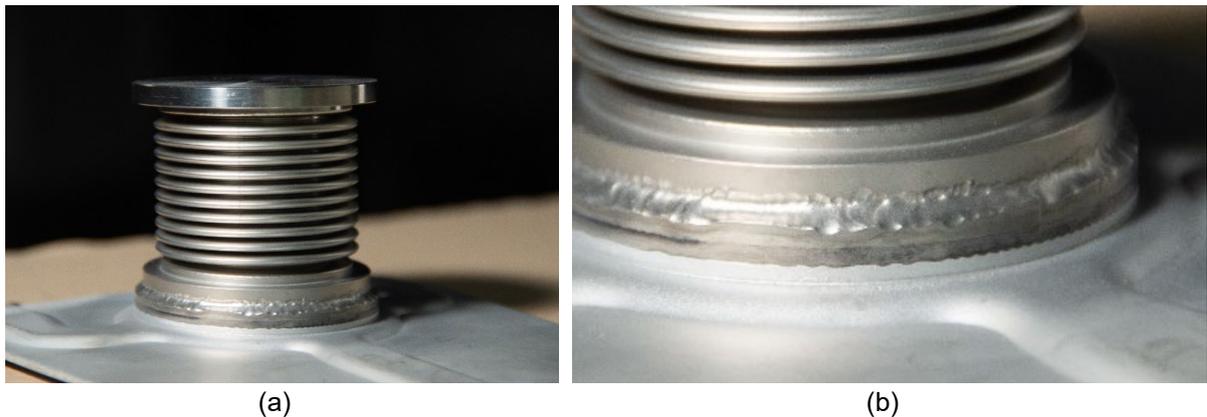


Abbildung 31: (a) Lötverbindung zwischen Alu-Rollbondabsorber und Metallfaltenbalg. Der Metallfaltenbalg wurde im Nachhinein an das plattierte Material geschweisst. (b) Detailaufnahme der Verbindung

Um die Herstellung des Metallfaltenbalgs mit einem Anschluss aus plattiertem Material zu ermöglichen, wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem der Metallfaltenbalg zunächst an das plattierte Material geschweisst und anschliessend im Ofen gelötet wurde. Es wurden die gleichen Parameter wie oben verwendet. Um eine Lötnaht zu erhalten, die bis zum Rand reicht, wurde mehr Lot (350 mm). Die Detailaufnahme zeigt, wie das Lot eine gute Verbindung zwischen dem Rollbond-Absorber und dem plattierten Material herstellt.

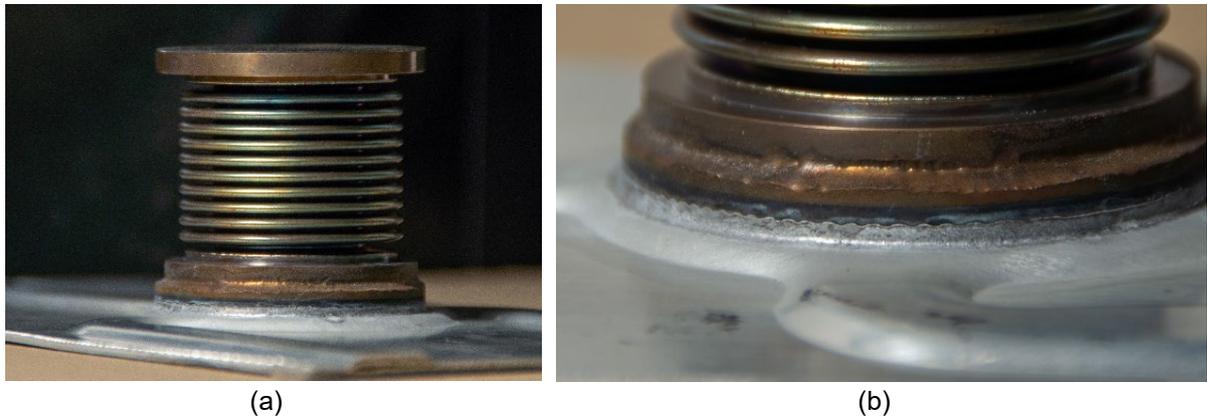


Abbildung 32: (a) Lötverbindung zwischen Alu-Rollbondabsorber und Metallfaltenbalg. Der Metallfaltenbalg wurde vor der Ofenlötung an das plattierte Material geschweisst. (b) Detailaufnahme der Verbindung.

WIG-Schweissen

Alternativ zum Löten kann die Alu-Alu Verbindung auch durch Schweissen hergestellt werden. Ein Versuch wurde mit dem WIG-Verfahren durchgeführt. Es wurde von Hand mit AlSi 5 als Schweisszusatz geschweisst.

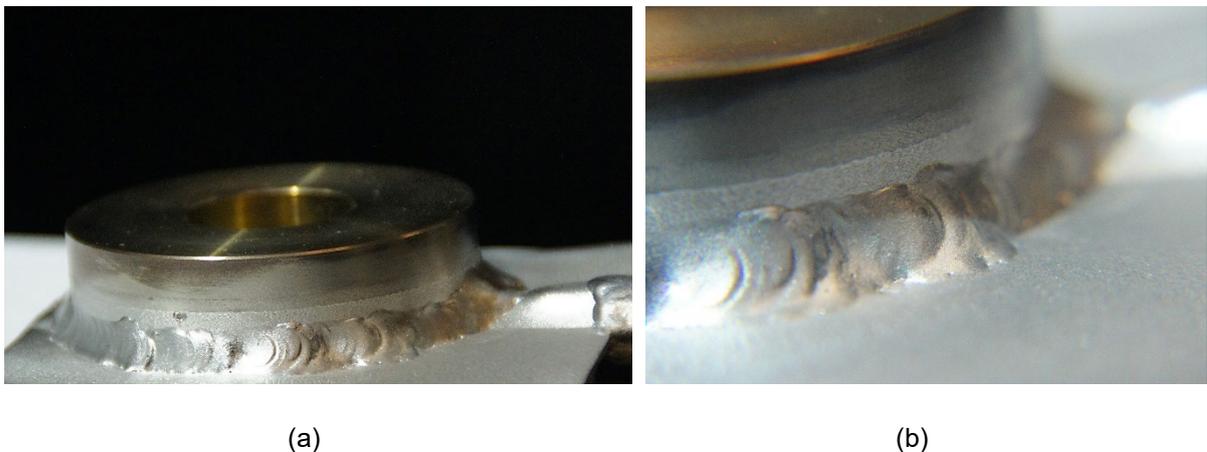


Abbildung 33: (a) Alu-Alu Schweissnaht auf Rollbondabsorber. (b) Detailaufnahme der Schweissnaht.

Abbildung 33 zeigt die Schweissnaht zwischen der plattierten Rondelle und dem Aluminium-Rollbondabsorber. Die Schweissnaht ist an einem Anschluss für den Balg geschweisst. Dieser Anschluss ist gegenüber dem Blech leicht erhöht. Abbildung 33a zeigt, dass diese Erhöhung vollständig von der Schweissnaht überdeckt wird. Nach den erfolgreichen Versuchen an den Prototypen wurde versuchsweise ein Metallfaltenbalg auf einen Aluminium-Rollbondabsorber geschweisst. Abbildung 34 zeigt das Ergebnis dieses Versuches. Die Schweissnaht zwischen dem Aluminium-Rollbondabsorber wurde mit einem WIG-Schweissverfahren hergestellt. Als Schweisszusatz wurde AlSi5 verwendet. Die Schweissnaht ist sauber und zeigt keine Oxidation oder Kaltverschweißungen auf. Dies ist eine gute erste optische Kontrolle der Dichtheit der Schweissnaht.

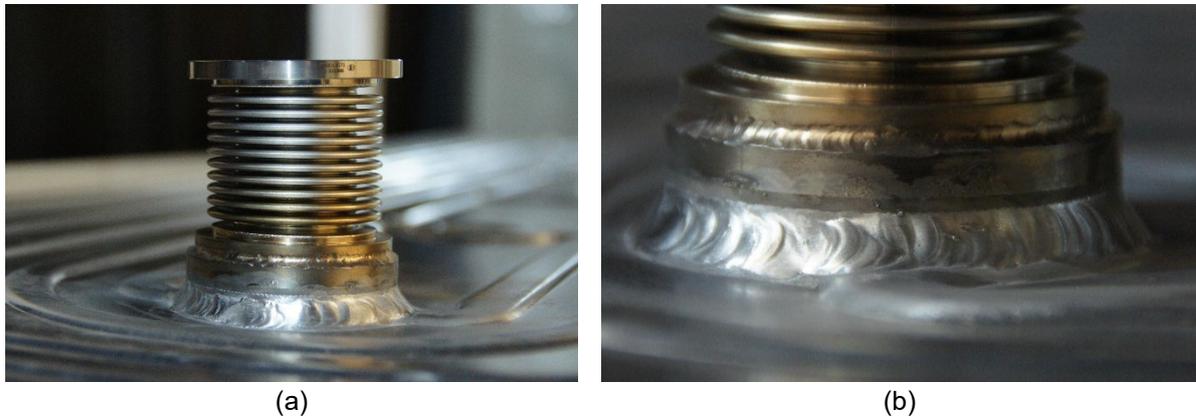


Abbildung 34: (a) Verbindung des Metallfaltenbalgs mit dem Aluminium-Rollbondabsorber. (b) Detailaufnahme der Schweissnaht zwischen dem Aluminium-Rollbondabsorber und dem Metallfaltenbalg bzw. dem Zwischenstück aus plattiertem Material. Die Schweissnaht wurde mit einem WIG-Schweissprozess mit Schweisszusatz AlMg5 hergestellt.

Untersuchungen zur Vakuumdichtheit

Die geschweissten Absorber wurden einer Druckanstiegsprüfung unterzogen. Die Untersuchungen und die anschliessenden Heliumlecktests haben gezeigt, dass sowohl mit dem Schweißen sowie auch mit dem Löten eine gute Vakuumdichtheit erreicht werden kann. Die Verbindungen weisen eine Leckrate die kleiner ist als die geforderten $2E-7$ (mbar l)/s auf. Bei den Prototypen hat sich gezeigt, dass die Anschlüsse, mit welchen der Überhitzungsschutzkreislauf befüllt und entleert wird die grösste Leckrate aufweisen. Bei einem zukünftigen Produkt werden diese Anschlüsse nach dem Befüllen dauerhaft geschlossen. Deshalb stellen diese Leckagen kein Problem dar.

3.2.4 Fazit Verbindung zwischen dem Metallfaltenbalg und dem Aluminium-Rollbondabsorber

Es konnte gezeigt werden, dass eine Verbindung zwischen dem Metallfaltenbalg und dem Aluminium-Rollbondabsorber möglich ist. Da die Verbindung mit dem plattierten Material aus zwei «handelsüblichen» Verbindungen besteht ist dies technisch sicher umsetzbar. Eine Schwierigkeit ist den Prozess für eine schnelle und günstige Fertigung zu optimieren. Ein erster Optimierungsschritt für folgende Arbeiten wird sein, den Balg gleich mit einem Anschlussstück aus plattiertem Material anfertigen zu lassen. Die Fertigung dieser Naht wird von Witzenmann mit einem Laserroboter ausgeführt und auch gleich auf Vakuumdichtheit getestet. Somit würde sich die Verbindung bereits um eine Schweissnaht reduzieren.

Um den Metallfaltenbalg mit dem Aluminium-Rollbondabsorber zu verbinden, würde sich eine Ofenlötung anbieten. In einem Durchlaufofen könnten die Rollbondabsorber mit den gelieferten Metallfaltenbälge ohne grossen personellen Aufwand verbunden werden.

Die zu Beginn des Projektes versuchten direkten Verbindung zwischen den zwei unterschiedlichen Materialien konnten nicht realisiert werden. Die Technologie ist hier noch sehr experimentell und es gibt gerade für Bauteile mit unterschiedlichen Geometrien keine Standardlösung. Eine direkte Verbindung zwischen Metallfaltenbalg und Aluminium-Rollbondabsorber zu erreichen ist nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Dies weiter zu untersuchen, würde den Umfang dieses Projektes überschreiten.



3.3 Evaluation eines geeigneten Fluids

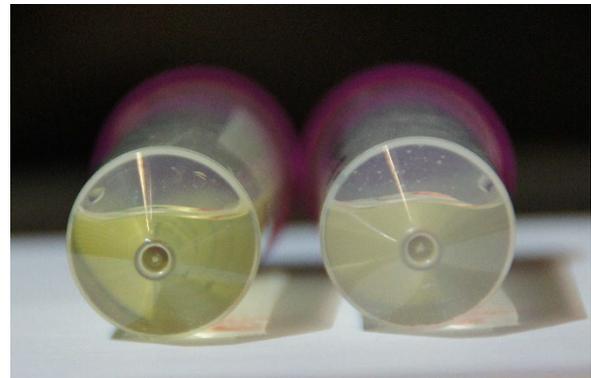
Die Vorversuche im Projekt «HiPer-PVT» legten den Schluss nahe, dass die Aluminiumabsorber, mit Edelstahlanschlüssen und Faltenbälgen versehen, weder mit inhibiertem Glykol noch mit deionisiertem Wasser zur Produktion von Wasserstoff neigen. Durch die sehr verspätete Lieferung der Absorber war die Dauer der Fluidversuche im Projekt «HiPer-PVT» mit jeweils 3 Monaten jedoch knapp bemessen. In (Peterson 1994) wurde ein Hinweis gefunden, dass bei der Verträglichkeitsprüfung von Wasser mit Aluminium als Heat-pipe Material Gasbildung beobachtet wurde. Daher wurde in diesem Projekt ein zusätzlicher Versuch mit einem handelsüblichem Wasser-Glykolgemisch (d.h. 33% Ethylenglykol und 67% deionisiertes Wasser) durchgeführt.

3.3.1 Wasser Glykol Gemisch

Der Aluminium Rollbondabsorber mit befestigtem Balg wurden zu diesem Zweck mit einem Wasser-Glykol Gemisch⁴ befüllt und die Länge des Balges wurde während neun Monaten beobachtet. Die Balghöhe hat sich innerhalb dieser Zeit um 0.44 mm geändert. In Abbildung 35(a) ist das Wasser-Glykol Gemisch nach dem Test zu sehen. Es befinden sich einige Ausfällungen im Gemisch. Zudem zeigt Abbildung 35(b), dass die Farbe des Wasser-Glykol Gemisch sich während des Tests verändert hat. Das Gemisch vor dem Test befindet sich im linken Behälter und hat eine klare gelbliche Farbe. Nach dem Test hat die Farbsättigung abgenommen und die Flüssigkeit wirkt trüber. Angesichts der Tests kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Wasser-Glykol Gemisch mit dem Aluminiumabsorber reagiert. Deshalb wurden unterschiedliche Möglichkeiten evaluiert, die eine Reaktion verhindern können.



(a)



(b)

Abbildung 35: (a) Ausfällungen im Wasser-Glykolgemisch nach dem Test. (b) Vergleich des Glykols (links) vor und (rechts) nach dem Test. Es ist eine leichte Farbänderung des Glykols zu sehen.

3.3.2 Hydrofluorether HFE

Hydrofluorether (HFE) als alternativer Wärmeträger bzw. als Ersatz des Glykols im Überhitzungsschutzkreislauf wäre eine Möglichkeit die Bildung von Wasserstoff zu verhindern. HFE's sind nicht leitend und würden allfällige elektrochemische Vorgänge im Aktuatorkreis unterbinden. Im spezifischen Fall könnte eine Mischung aus den HFE-7500 und HFE 7200⁵ zum Einsatz kommen. Die Kompatibilität mit Metallen ist sehr gut, und das Fluid hat eine lange Lebensdauer. Berechnungen im EES zeigen, dass mit der Mischung aus dem HFE 7200 und dem 7500 eine ähnliche Absorberpositionskurve, wie mit Wasser in Abbildung 4 zu sehen, erreicht werden könnte. Ein Nachteil

⁴ http://www.abderhalden-fluids.ch/images/antifrogen/pdf/Antifrogen_N_TM_de.pdf

⁵ <https://multimedia.3m.com/mws/media/65496O/3m-novec-7500-engineered-fluid.pdf>



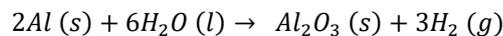
von HFE's sind das erhöhte Erderwärmungspotenzial von Faktor 90 gegenüber CO₂ und die erhöhten Kosten gegenüber Ethylenglykol.

3.3.3 Anorganische Ionische Flüssigkeiten (IAS)

Als ionische Flüssigkeiten werden allgemein Salze bezeichnet, deren Schmelzpunkt unterhalb von 100 °C liegt. Die ionischen Flüssigkeiten zeichnen sich durch ein breites Spektrum interessanter Eigenschaften aus. Sie sind thermisch stabil, nicht entzündlich, haben einen äusserst geringen Dampfdruck und verfügen über gute Lösungseigenschaften. Als Einsatz im Aluminiumabsorber als geeignetes Fluid für den Überhitzungsschutzkreislauf ist die hohe elektrochemische Stabilität gegen Oxidation und Reduktionen von Interesse (Freudenmann u. a. 2011).

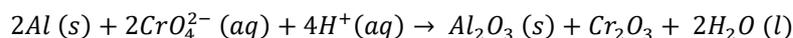
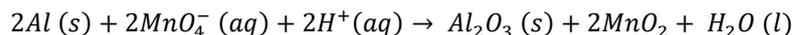
(Yao 2016) beschreibt ein IAS welches sehr gute elektrochemische Stabilität aufweist und das Aluminium passiviert. Für die Passivierung werden hauptsächlich zwei Substanzen verwendet. Permanganat und Chromat sind Oxidationsmittel für Aluminium. Permanganat ist stärker und reagiert schneller, weshalb es für die erste Passivierung der Aluminiumoberfläche verwendet wird. Das langsamer reagierende aber in grösserer Menge vorhandene Chromat steht zur Verfügung, um mögliche Verletzungen der Aluminiumoxidschicht zu reparieren und die Passivierung während der gesamten Lebensdauer des Absorbers aufrechtzuerhalten. Formel 1 zeigt auf wie Wasser in Kontakt mit Aluminium zu Aluminium(III) Verbindungen oxidiert und dabei nicht kondensierbares Wasserstoffgas bildet.

Formel 1: Entstehung von Wasserstoffgas bei Kontakt von Wasser mit Aluminium



Formel 2 zeigt wie durch den Einsatz von Permanganat und Chromat der gelöste Wasserstoff gebunden und als Aluminium- und Mangan- bzw. Chromoxid ausgefällt wird.

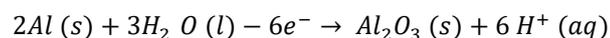
Formel 2: Passivierung des Aluminiums durch Permanganat und Chromat



Das Überhitzungsschutzsystem besteht bei genauerer Betrachtung aus einer Verdampfungs- und einer Kondensationszone. In der Verdampfungszone ist aufgrund der wesentlich höheren Verdampfungstemperatur von Chromat und Permanganat immer genügend Oxidationsmittel vorhanden, um eine schützende Schicht aus Aluminiumoxid zu bilden.

In der Kondensationszone befindet sich reines Wasser, aber kein Chromat oder Permanganat, da die Verdampfung des Überhitzungsschutzfluid den Balg ausdehnt.

Formel 3: Reaktion von Aluminium und Wasser zu Wasserstoffgas und Aluminiumhydroxid

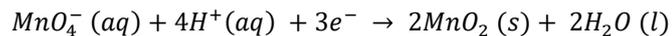


In der Kondensationszone kann durch Ausdehnung des Aluminiums eine blanke Aluminiumoberfläche entstehen. Wie Formel 3 zeigt, verliert ein Aluminiumatom sofort drei Elektronen und verbindet sich mit drei Hydroxidionen zu Aluminiumoxid. Die blanke Aluminiumoberfläche wird passiviert. Die Elektronen wandern durch den Aluminiumkörper des Absorbers und reagieren dann mit den Oxidationsmitteln im Reservoir. Formel 4 und Formel 5 zeigen wie auf der Flüssigkeitsseite die

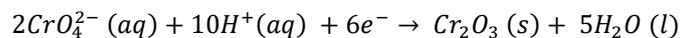


restlichen Wasserstoffionen durch den Flüssigkeitsrücklauf zurück in den Verdampfungsbereich transportiert werden. Dort nehmen sie an den Reaktionen zwischen den Oxidationsmittel und den Elektronen teil.

Formel 4:Elektrochemische Reaktion von Permanganat und Wasserstoffionen



Formel 5:Elektrochemische Reaktion von Chromat und Wasserstoffionen



Beim Einsatz als Korrosionsschutz ist darauf zu achten, dass die Aluminiumoberfläche im Überhitzungsschutzkreislauf immer mit Flüssigkeit benetzt ist.

3.3.4 Geeignete Beschichtungsmöglichkeiten

Um die Gasbildung zu verhindern, wurde eine Beschichtung des Rollbond-Absorbers bzw. des Überhitzungsschutzkanals untersucht. Für eine geeignete Beschichtung des Rollbond-Aluminiumabsorbers wurden die Industrielack AG (ILAG) und ein Spezialist des Dänischen Technologie Institut (DTI) kontaktiert. Die ILAG hat grosse Erfahrung in der Anwendung von Beschichtungen für Industrieprodukte. Insbesondere hat das Unternehmen zusammen mit dem DTI verschiedene Beschichtungen für Wärmetauscher im Projekt «TRI-HP»⁶ durchgeführt. Es könnten Beschichtungen auf Basis von feuchtigkeitshärtendem Polysiloxan zum Einsatz kommen. Das Polysiloxan wird in den Überhitzungsschutzkreislauf eingebracht und gleichmässig verteilt. Anschliessend werden die Bauteile mit feuchter Luft durchströmt, wodurch das Polysiloxan aushärtet. Problematisch ist die Sicherstellung einer gleichmässigen Beschichtung. Bei dem genannten Projekt wurden an einigen Stellen Abplatzungen festgestellt. Diese sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass beim Fluten zu viel Beschichtung aufgetragen wird und diese beim Aushärten Risse bildet.

Ähnliches gilt für eine mögliche «Solgel»-Beschichtung (Figueira 2020), die bei 200-280°C aushärtet.

Andere Beschichtungen müssten vor dem rollbonding Prozess auf das Blech oder an den entsprechenden Orten des Überhitzungsschutzkreislauf aufgetragen werden. Meistens werden hierfür die Bleche entsprechend vorbehandelt. Es wird sehr aufwendig werden eine geeignete Vorbehandlung oder Beschichtung nur an bestimmten Orten auf einem Blech aufzutragen. Eine komplette Beschichtung des Blechs ist nicht möglich, da beim Rollbonding das Blech zusammengewalzt wird und die Aluminiumflächen sich dabei Kaltverschweissen(Khan u. a. 2021).

3.3.5 Fazit Evaluation eines geeigneten Fluids und Beschichtungsmöglichkeiten

Nach (Yao 2016) sollten wässrige Lösungen ohne Inhibitoren nicht als Arbeitsmedium in Aluminium Wärmeübertragungsgeräten mit Phasen Wechsel verwendet werden. Deshalb müssen in wässrigen Lösungen unbedingt Inhibitoren verwendet werden. Diese bilden einen stabilen Passivierungsfilm auf der Oberfläche des Aluminiums. Chromat und Permanganat können die Wasserstoffbildung verhindern und das Aluminium gegen Korrosion schützen. Auch (Asadikiya, Zhong, und Ghorbani 2019) berichten über Korrosion von Aluminium EN-AW 3030 in Wasser Ethylen Glykol Mischungen. Insbesondere thermische Schockwirkungen beeinflussen die Korrosivität der Lösung erheblich. In



Kombination mit zusätzlichen Metallen, welche das elektronegativitätspotential erhöhen, kann z.B. Natriumdiphosphat das Aluminium nachhaltig schützen.

Hydrofluorether (HFE) wären eine Möglichkeit als Ersatz für Glykol. HFE's gehören zu den fluorierten organischen Verbindungen. Sie haben interessante Eigenschaften insbesondere guter Verträglichkeit zu Metallen und kleiner Dampfdrücke. HFE haben zwar kein Ozonabbaupotential weisen jedoch ein hohes Erderwärmungspotential auf. Ethylenglykol ist somit den HFE's zu bevorzugen, da dieses günstiger und auch ein kleineres Erderwärmungspotenzial hat.⁷

Beschichtungen wären theoretisch möglich, bedeuten aber einen weiteren Arbeitsschritt. Zudem sind seitens der Experten Bedenken da, dass sich eine gleichmässige Schicht in den engen Fluidkanal realisieren lässt. Auch müssten Tests durchgeführt werden, ob das Polysiloxan gegenüber Glykol langzeitstabil ist. Deshalb ist, wenn anders möglich, auf eine Beschichtung zu verzichten.

3.4 Fazit Entwicklung Rollbondabsorber

Ein Aluminium-Rollbondabsorber mit einem Fluidkreislauf für die Wärmeabnahme sowie einem Überhitzungsschutzkreislauf konnte erfolgreich ausgelegt und in kleiner Stückzahl hergestellt werden. Die gelieferten Absorber wurden auf Ihre Masshaltigkeit überprüft und für qualitativ gut empfunden. Mit den plattierten Materialien konnte eine Verbindung gefunden werden, die breit verfügbar ist und mit dem auch eine Verbindungstechnik gewählt werden kann, die qualitativ hochstehend, in der Industrie aber dennoch gängig ist. Es konnte gezeigt werden, dass diese Verbindung mindestens bis zur geforderten Leckrate von $2E-7$ (mbar l)/s vakuumdicht ist.

Mit den IAS konnte ein Fluid bzw. ein Inhibitorpaar gefunden werden, die den Überhitzungsschutzkreislauf effektiv vor Gasbildung und vor Korrosion schützen sollte. Reale Tests am Rollbondabsorber mit den IAS müssen durchgeführt werden, um die Effektivität im Betrieb zu bestätigen. HFE und Beschichtungen sind, wenn möglich nicht zu verwenden.

Obwohl kein Partner für die praktische Umsetzung des Absorbers in ein Produkt gefunden wurde, wurde dieser so entwickelt, dass er problemlos mit PV-Zellen bestückt werden kann. Die Integration in ein Kollektorgehäuse stellt ebenfalls eine machbare Aufgabe dar. Es besteht somit weiterhin Potenzial für die Implementierung dieser Lösung in kommerzielle Anwendungen. Im Zuge einer Implementierung müssen Funktionstest und umfangreiche Leistungstest die Wirksamkeit der Lösung bestätigen.

4 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt zeigen, dass die Integration eines Überhitzungsschutzes in einen hoch effizienten PVT-Kollektor direkt im Absorber umsetzbar ist. Die Verwendung eines Rollbondabsorbers, der den Wärmeabnahme- und Überhitzungsschutzkreislauf integriert, ermöglicht einen schlanken und effektiven Aufbau des Absorbers. Dies gewährleistet eine direkte und flächendeckende Wärmeaufnahme an der Rückseite der Zellen, was zu einer erheblichen Steigerung der thermischen Effizienz führt. Gleichzeitig ermöglicht es eine optimale Kühlung der PV-Zellen.

Durch die Anwendung plattierter Materialien konnte eine optimale Verbindung zwischen dem Aluminium-Rollbondabsorber und dem rostfreien Stahlbalg erreicht werden. Die Integration dieser plattierten Rondellen in den Herstellungsprozess der Metallfaltenbälge steigert die Automatisierung

⁷ 3M ein Hersteller der untersuchten HFE's hat sich aus Umweltschutzgründen entschieden bis 2025 komplett aus dessen Fertigung auszusteigen.



der Lösung und senkt die Produktionskosten erheblich. Dies führt zudem zu einer kompakteren Gesamtkonstruktion des Kollektors.

Die Verwendung von IAS mit den Elementen Permanganat und Chromat zeigt vielversprechendes Potenzial für den Schutz gegen Gasbildung und Korrosion im Zusammenhang mit dem Aluminium-Rollbondabsorber. Eine umfassende Validierung dieser Ergebnisse durch weiterführende Tests ist jedoch noch notwendig.

Die beschriebene Lösung eröffnet die Möglichkeit einer neuen Generation hoch effizienter PVT-Kollektoren, deren erzeugte Solarwärme auf einem Niveau liegt, das eine direkte Nutzung ermöglicht. Dies erweitert das Anwendungsspektrum von PVT-Kollektoren erheblich (vgl. auch (Zenhäusern u.a. 2022)).

Die Gespräche mit Vertretern der Industrie haben deutlich gemacht, dass ein Interesse an hoch effizienten PVT-Kollektoren besteht, insbesondere an solchen, die auch Umweltwärme nutzen können, wenn keine Solarstrahlung vorhanden ist. Allerdings zeigt sich, dass die Entwicklung neuer Lösungen derzeit nicht zu den obersten Prioritäten der Unternehmen gehört. Viele von ihnen sind bereits stark in die Bewältigung der gestiegenen Nachfrage nach erneuerbaren Heizsystemen involviert. Der Mangel an Fachkräften bindet einen Grossteil der Mitarbeiter an die laufenden Aufgaben, was die Umsetzung von Neuentwicklungen verzögert.

5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die im Vorfeld dieser Arbeit veröffentlichte "HiPer-PVT"-Studie (Zenhäusern u. a. 2022) hat eindrucksvoll demonstriert, dass PVT-Kollektoren auf begrenzter Dachfläche eine höhere Solarenergieausbeute ermöglichen, als eine Kombination aus herkömmlichen PV- mit herkömmlichen Solarthermie-Systemen. Besonders in Mehrfamilienhäusern eröffnet die PVT-Technologie die Möglichkeit, die Energiegestehungskosten erheblich zu reduzieren. Dennoch bedarf es weiterer Untersuchungen und Forschungsbemühungen, um solche hoch effizienten PVT-Kollektoren zur Serienreife zu bringen.

Die Umsetzung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methoden muss in realen Kollektoren noch getestet werden. Insbesondere betrifft dies die Planität des Absorbers, welcher im Falle des aktivierten Überhitzungsschutzes, möglichst vollflächig am Glas anliegen muss. Weiterhin sollten Untersuchungen zeigen, ob EVA oder andere Materialien zur Laminierung verwendet werden können. Zudem ist die Entwicklung von Low-E-Beschichtungen von grosser Bedeutung, um Abstrahlungsverluste, insbesondere bei höheren Temperaturen, zu reduzieren.

Um die Entwicklung hoch effizienter PVT-Kollektoren weiter zu unterstützen, ist es entscheidend, die optimalen Einsatzgebiete für diese Technologie zu identifizieren. Einige Ansätze dazu wurden bereits im Vorprojekt umgesetzt. Es wäre ratsam, Best-Practice-Anlagen zu entwickeln, die die Vorteile hoch effizienter PVT-Kollektoren verdeutlichen.

Besonders in stark bebauten Gebieten könnten PVT-Kollektoren eine sinnvolle Ergänzung zu Erdwärmesonden darstellen. Durch die sommerliche Regeneration könnte ein unerwünschtes Auskühlen vermieden und die Länge der Sonden im Durchschnitt reduziert werden (Ruesch u. a. 2022).



Die Entwicklung hoch effizienter PVT-Kollektoren erfordert eine Integration des PVT-Absorbers in wärmeisoliertes Gehäuse mit Glasabdeckung. In den Wintermonaten und bei geringer Sonneneinstrahlung kann die Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen von besonderem Interesse sein. Durch das hier vorgestellte Prinzip wird die thermische Ankopplung des Absorbers an die Umgebung im Überhitzungsschutzstatus erhöht. Dadurch könnte in diesem Zustand auch die Nutzung von Umweltwärme ermöglicht werden und die PVT-Kollektoren als alleinige Energiequelle in Wärmepumpensystemen dienen.

6 Literaturverzeichnis

- Akramifard, H. R., H. Mirzadeh, und M. H. Parsa. 2014. „Cladding of Aluminum on AISI 304L Stainless Steel by Cold Roll Bonding: Mechanism, Microstructure, and Mechanical Properties“. *Materials Science and Engineering: A* 613 (September): 232–39. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>.
- Asadikiya, Mohammad, Yu Zhong, und Mohammad Ghorbani. 2019. „Corrosion Study of Aluminum Alloy 3303 in Water-Ethylene Glycol Mixture: Effect of Inhibitors and Thermal Shocking“. *International Journal of Corrosion* 2019 (Januar): e9020489. <https://doi.org/10.1155/2019/9020489>.
- Cheng, Wei-Jen, und Chaur-Jeng Wang. 2011. „Effect of silicon on the formation of intermetallic phases in aluminide coating on mild steel“. *Intermetallics* 19 (Oktober): 1455–60. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.013>.
- Dong, Hong-gang, Wen-jin Hu, Yuping Duan, Xu-dong Wang, und Chuang Dong. 2012. „Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu and Zn–Al filler wires“. *Journal of Materials Processing Technology* 212: 458–64.
- Dupeyrat, P., und M. Hermann. 2013. *Thermal collector and PVT collector*. Google Patents. <http://google.com/patents/EP2565554A1?cl=ru>.
- Fahrenwaldt, Hans J., Volkmar Schuler, und Jürgen Twrdek. 2014. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 5., Vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03141-1>.
- Fedorov, Dipl.-Ing. Vasilii. 2022. „Mikrostrukturorientierte Charakterisierung mechanischer Eigenschaften von AlSi10 gelöteten CrNi Stahl/Aluminium Mischverbunden“.
- Figueira, Rita B. 2020. „Hybrid Sol-Gel Coatings for Corrosion Mitigation: A Critical Review“. *Polymers* 12 (3): 689. <https://doi.org/10.3390/polym12030689>.
- Freudenmann, Dominic, Silke Wolf, Michael Wolff, und Claus Feldmann. 2011. „Ionische Flüssigkeiten – neue Perspektiven für die anorganische Synthesechemie?“ *Angewandte Chemie* 123 (47): 11244–55. <https://doi.org/10.1002/ange.201100904>.
- Khan, Haris Ali, Kamran Asim, Farooq Akram, Asad Hameed, Abdullah Khan, und Bilal Mansoor. 2021. „Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives“. *Metals* 11 (9). <https://doi.org/10.3390/met11091344>.
- Kim, Jaewan, Jinwoo Oh, und Hoseong Lee. 2019. „Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles“. *Applied Thermal Engineering* 149 (Februar): 192–212. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>.
- Lämmle, M. 2018. „Thermal Management of PVT Collectors“. Freiburg i. B.: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE).
- Matuska, T., B. Sourek, V. Jirka, und N. Pokorny. 2015. „Glazed PVT Collector with Polysiloxane Encapsulation of PV Cells: Performance and Economic Analysis“. *International Journal of Photoenergy*, Nr. 2015.
- Ostermann, Friedrich, Hrsg. 2007. „Korrosionsverhalten von Aluminium“. In *Anwendungstechnologie Aluminium*, 227–78. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69451-9_5.
- Peterson, G. P. 1994. „An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing, and Applications“. In .



- Philippen, D., D. Zenhäusern, A. Voirol, M. Dudita, R. Haberl, L. Leuenberger, V. T. H. Ying, S. M. L. Maricar, M. Haller, und S. Brunold. 2020. „ReSoTech 2 – Reduktion der Marktpreise solarthermischer Anlagen durch neue technologische Ansätze“. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=65866>.
- Reisgen, U., und L. Stein. 2016. *Grundlagen der Fügetechnik: Schweißen, Löten und Kleben*. DVS Media. <https://books.google.ch/books?id=KA4PswEACAAJ>.
- Ruesch, Florian, Lukas Füglistner, Michel Haller, Andrii Zakovorotnyi, und Tobias Sommer. 2022. „Cool2Regen - Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade“. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik. P:\SPF-Publikationen\2022\20221110_Cool2Regen_Bericht.pdf.
- Schuler, Volkmar, und Jürgen Twrdek. 2019. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24266-4>.
- Witzenmann GmbH. 2015. „Handbuch der Metallschläuche“.
- Yao, Qi. 2016. „Investigation of the Use of an Inorganic Aqueous Solution (IAS) in Phase Change Heat Transfer Devices“. UCLA. <https://escholarship.org/uc/item/805215b9>.
- Zenhäusern, D., S. Brunold, A. Voirol, K. Erb, S. Cramer, M. Schubert, M. Battaglia, u. a. 2022. „HiPer-PVT - Abgedeckter PVT-Kollektor mit Überhitzungsschutz“. Final Report SFOE Project no 501613-01. Rapperswil: Bundesamt für Energie BFE.