

gefördert durch



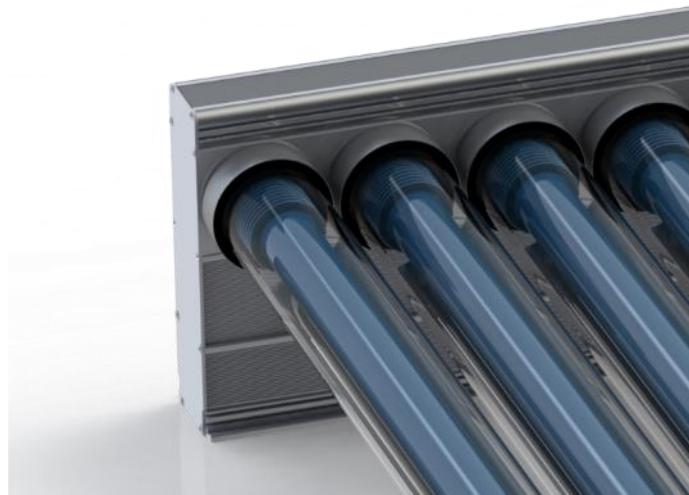
Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

# Abschlussbericht „ULA - Ultra Leicht Absorber“ ULA – Projektfortsetzung Phase 2

---

Gefördert unter dem AZ: 32450/02-03



Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Siems, airwasol GmbH & Co. KG  
Dr. Reinhard Dasbach, Almeco GmbH  
Dr. Andreas Bohren, Institut für Solartechnik SPF  
Dipl. Phys. Stefan Brunold, Institut für Solartechnik SPF  
Dr. Mihaela Dudita, Institut für Solartechnik SPF  
Dipl.-Ing. (BA) Michael Thiem, Tubacon GmbH

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Abteilung Umwelttechnik  
Referat Klimaschutz und Energie  
Frau Dr. Katrin Anneser  
Herr Dr.-Ing. Roland Digel  
Postfach 17 05  
49007 Osnabrück

Vers. 21121001

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>32450/02-03</b>	Referat	<b>24/2</b>	Fördersumme	<b>711.187,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>ULA – Ultra Leicht Absorber / Projektfortsetzung Phase 2</b>				
<b>Stichworte</b>	Erneuerbare Energien, Materialeinsparung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>48 Monate</b>	<b>15.10.2016</b>	<b>06.11.2020</b>	<b>2</b>		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	airwasol GmbH & Co. KG In der Kühweid 17 76661 Philippsburg			Tel	07256-938919-0
				Fax	
				Projektleitung	
				Hr. Siems	
				Bearbeiter	
				Hr. Siems	
<b>Kooperationspartner</b>	Almecco GmbH, Claude Breda Straße 3, 06406 Bernburg Dr. Laure Plasma Technologie GmbH, Schwanenstraße 12, 70329 Stuttgart SPF Institut für Solartechnik, Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil Tubacon GmbH, Dorfstraße 14, 37308 Schimberg OT Rüstungen				

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Für eine umweltfreundliche und zukunftssichere Energieversorgung können Solarluftkollektoren eingesetzt werden, welche eine effiziente Erzeugung von industrieller Prozesswärme zur Regenerierung von Sorptionspeichern, die Trocknung von Industrieteilen, Lacken, Agrarprodukten, Lebensmitteln oder Gärresten, die Beheizung von Industriehallen oder die Meerwasserentsalzung ermöglichen.

Zurzeit werden hauptsächlich Flach-Solarluftkollektoren eingesetzt, welche aufgrund ihres geringen thermischen Wirkungsgrades bei hohen Betriebstemperaturen > 100 °C oder bei sehr niedrigen Außentemperaturen mit geringer Sonneneinstrahlung keine oder nicht effiziente Energieversorgung dafür ermöglichen. Solarluftkollektoren mit Vakuumröhren können aufgrund ihres deutlich besseren thermischen Leistungsverhaltens hierfür eingesetzt werden. Die bis jetzt auf dem Markt verfügbaren Vakuumröhren-Solarluftkollektoren sind mit einseitig geschlossenen Vakuumröhren von Wasserkollektoren aufgebaut. Dadurch muss die Luft durch kleine Querschnitte und aufwendige interne Luftführungen geführt werden. Das dadurch entstehende Problem mit hohen Druckverlusten macht eine komplette Neukonstruktion bzw. -entwicklung notwendig. Auch soll eine gleichmäßigere Durchströmung der Röhren erreicht werden, damit ein idealer Wärmeübertrag zwischen Absorber und Luft stattfinden kann. Zielsetzung des Projektes ist diese Neuentwicklung einschließlich Produktionstechnik mit folgenden technischen Herausforderungen und Arbeitsschritten:

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Um kostengünstig einen neuen Kollektor herzustellen, müssen neue und effiziente Produktionstechniken entwickelt und eingesetzt werden. Z. B. soll der Metallbalg zur Längenkompensation zwischen Glas- und Absorberrohr direkt in das Absorberrohr mit eingearbeitet werden. Dies spart aufwendige Fügetechniken mit Materialmischen wie z.B. Alu und Edelstahl. Es ermöglicht auch einen sehr leichten Absorberrohraufbau. Damit dies möglich ist, muss das Absorberrohrmaterial aus Edelstahl bestehen, damit es als Balg verwendet werden kann.

Bisher verfügbare Absorberschichten auf Edelstahl werden größtenteils mittels nasschemischer Verfahren abgedungen und erreichen nicht die Effizienz der kommerziell auf Aluminium oder Kupfer mittels PVD-Verfahren abgedungenen selektiven Absorberbeschichtungen.

Ziel des Projektes ist es daher, eine Absorberbeschichtung für Edelstahlbleche zu entwickeln, die ähnliche optische Kennwerte wie die bereits auf Aluminiumblech verfügbaren selektiven Schichtsysteme besitzen.

Da Edelstahl nicht die hohe Reflexion im Infraroten wie Kupfer oder Aluminium aufweist, können nicht einfach die bestehenden Schichtsysteme auf Edelstahl abgeschieden werden. Es ist bekannt, dass in diesem Fall der thermische Emissionsgrad signifikant höher und somit die Leistungsfähigkeit dieser Absorber wesentlich geringer ist. Vor allem bei den für Prozesswärme benötigten Arbeitstemperaturen im Bereich von 100 – 200°C steigen die Verluste durch Infrarotstrahlung beträchtlich.

Daher muss Edelstahl zunächst mit einer zusätzlichen Infrarot-Reflektorschicht beschichtet werden, bevor die eigentliche Absorberschicht abgeschieden werden kann. Diese muss auch bei hohen Temperaturen ihr hohes Reflexionsvermögen erhalten, um die selektiven Eigenschaften der Absorberbeschichtung über die Lebensdauer von mindestens 20 Jahren gewährleisten zu können. Daneben soll die neu zu entwickelnde Beschichtung auch eine hohe mechanische Stabilität und eine gute Widerstandsfähigkeit gegen korrosiven Angriff aufweisen, da das Absorbermaterial in neuen Kollektortypen eingesetzt werden soll, für deren Fertigung spezielle Form- und Fügeverfahren verwendet werden. Die Absorberfertigung kann nur durch eine solche industrielle Fertigungsweise und durch Reduzierung des Material- und Energieeinsatzes kostengünstiger werden. Die Amortisationszeit kann so entscheidend gesenkt werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

### **Ergebnisse und Diskussion**

Folgende Bauteile des neuen Solarluftkollektors und die dazu benötigten Fertigungsverfahren wurden im Projekt neu entwickelt und in einer Prototypenfertigung umgesetzt und getestet. Mit den daraus entstandenen Erfahrungen wurde nach dem Projekt eine Kleinserienproduktion aufgebaut, welche nun schrittweise in eine automatisierte Produktion umgewandelt wird.

- Neue Absorberbeschichtungen auf Edelstahlsubstrat
- Beschichtetes Absorberrohr mit eingearbeitetem Metallbalg
- GMV (Glas-Metall-Verbindung) mit verschiedenen Verbindungstechniken
- Spiegel innenliegend: Alu-Blech-Freiformspiegel und halbrunder PVD-Spiegel

Vor Projektbeginn war das Ziel eine Absorberröhren-Stillstandstemperatur von ca. 230 °C zu erreichen. Durch die neue Konstruktion mit innenliegendem Spiegel und der neuen hocheffizienten Absorberschicht auf Edelstahlsubstrat werden nun Stillstandstemperaturen von über 303°C erreicht.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Projektergebnisse wurden z.B. auf dem Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2020 der Öffentlichkeit vorgestellt. Das Projekt wird auf der neuen Webseite von airwasol präsentiert.

### **Fazit**

Das Projektziel, eine neue Ultra Leicht Absorberröhre zu entwickeln, wurden erfolgreich erreicht. Teils kamen aber durch die vielen neuen Erkenntnisse neue Ideen hinzu oder neue Fragen tauchten auf, welche nach dem Projektende weiterbearbeitet werden.

Die Folgearbeiten bei airwasol sind nun die gewonnenen Erkenntnisse in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern als Zulieferer in eine effiziente Produktion umzusetzen.

Durch die gute Projektzusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konnten neue, sehr innovative Ideen verwirklicht werden. Die Zusammenarbeit wird auch in Zukunft weiterhin vertieft.

Bei airwasol wurden durch das Projekt und die darauf angestiegene Nachfrage nach dem neuen Kollektor 6 neue Arbeitsstellen geschaffen. Weitere befinden sich in der Planung. Almecco konnte ein neues Produkt mit stabiler Absorberschicht auf dem Markt neu platzieren wovon auch andere Kollektorhersteller profitieren. Tubacon beliefert die airwasol mit Absorberröhren. Das SPF wird das Thema Solarluftkollektor mit der Vermessung, deren thermische Wirkungsgrade in Zukunft vertiefen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

# Inhalt

<b>Projektkennblatt</b> .....	2
1. Zusammenfassung .....	7
2. Einleitung.....	8
3. Kurzdarstellung der Projektpartner .....	10
airwasol GmbH & Co. KG.....	10
Almecco GmbH.....	10
Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH.....	11
SPF .....	11
Tubacon GmbH.....	12
4. Vorstellung des Produkts .....	13
Funktionsweise des Kollektors .....	13
Die Vakuumröhre .....	14
Optimierte Modulbauweise.....	15
5. Projektphasen.....	16
Projektphase 1 .....	16
Projektphase 2 .....	17
6. Arbeitspakete der Projektpartner .....	17
Arbeitspakete airwasol GmbH & Co. KG .....	17
Arbeitspakete Almecco GmbH.....	17
Arbeitspakete SPF Institut für Solartechnik.....	18
Arbeitspakete Tubacon GmbH .....	19
A1 Entwicklung einer hochtemperatur- und korrosionsstabilen Infrarot Reflektorschicht für Edelstahlsubstrat (Almecco/SPF) .....	19
A1.1 Auswahl eines geeigneten Edelstahlwerkstoffes und Definition der Oberflächenqualität .....	20

A1.2 Literatur-/Patentrecherche zur Auswahl geeigneter Materialien für eine Infrarot Reflektorschicht.....	20
A1.3 Abscheidung verschiedener ausgewählter IR-Reflektor Schichtsysteme auf Edelstahlblech.....	23
A1.4 Charakterisierung der IR-Reflektor Schichtsysteme.....	24
A2 Optimierung des Antireflexschichtsystems (Almecco/SPF) .....	25
A2.1 Literatur-/Patentrecherche und Simulationen zur Auswahl eines mechanisch stabilen Antireflex-Schichtsystems .....	25
A2.2 Versuche zur Abscheidung des neuen Absorberschichtsystems mit ZrO <sub>2</sub> Antireflexschicht.....	26
A2.3 Charakterisierung des neuen Antireflex Schichtsystems.....	27
A3 Optimierung des Gesamtschichtsystems (Almecco/SPF) .....	30
A3.1 Simulationen zur Abstimmung des Absorberschichtsystems auf das IR-Reflektor- und das Antireflexschichtsystem.....	30
A3.2 Versuche zur Abscheidung des Gesamtschichtsystems .....	30
A3.3 Charakterisierung des Gesamtschichtsystems.....	31
A4 Verarbeitungstests des neuen Edelstahlabsorbers (airwasol/Tubacon).....	51
A5 Optimierung des Schichtsystems und Optimierung der Abscheidung (Almecco).....	54
A6 Fertigung und Charakterisierung von Prototypen und Testanlagen (airwasol/Almecco/Tubacon) .....	56
A6.1 Arbeiten beim Rohr-/Balgherstellungprozess .....	56
A6.2 Konstruktionsarbeiten (airwasol).....	78
A6.3 Kollektortests.....	86
A6.4. Aluminiumblech-Spiegel (Almecco).....	89
A7 Charakterisierung (SPF) .....	96
A7.1 Test der Langzeitstabilität der Absorberschicht durch das SPF .....	96
A7.2 Test des Absorberrohrs (SPF/airwasol).....	110
A7.3 Test der Spiegel durch das SPF .....	119

A8 Anlagen-/Kollektorentest (airwasol/SPF).....	123
7. Fazit/Ausblick .....	130
8. Literaturverzeichnis.....	131
9. Abbildungsverzeichnis .....	132

## 1. Zusammenfassung



*Abbildung 1: TSTair-S (Draufsicht)*

In dem von der DBU geförderten Projekt „ULA – Ultra Leicht Absorber“ wurden alle Bauteile des Vakuumröhren-Solarluftkollektors mit den Projektpartnern zusammen neu entwickelt, konstruiert und getestet. Die Fertigung der Kollektorgehäuse und die Endfertigung der Vakuumröhren erfolgt nun in-house bei airwasol. Bei allen Industriepartnern wurden neue Fertigungsverfahren/-maschinen entwickelt welche zur effizienten Fertigung der neuen Absorberrohre dienen.

In der Projektlaufzeit kamen immer wieder neue und sehr knifflige technische Fragen auf, welche neue Fertigungsschritte zur Folge hatten. Vor Projektbeginn war nicht abzusehen, dass z.B. neue Laser-/Plasmaschweißanlagen oder besondere Beschichtungsstufen für den erfolgreichen Projektverlauf notwendig sind. Dank der großartigen Unterstützung durch die DBU waren auch diese zeitlich aufwendigen und budgetreichen Projektänderungen/-verzögerungen zu meistern.

Im Projekt wurden verschiedene Materialvarianten der Vakuumröhre untersucht, daraus Prototypen gefertigt und getestet. Bauteile wie verschiedene Dichtungsmaterialien, innenliegender Spiegel, Absorberbeschichtungen, Geometrien, Metall-/Glassorten und auch die Kombination dieser mit verschiedenen Fertigungsverfahren wurden im Detail untersucht.

Eine ausgesuchte Version der o.g. Kombinationen ermöglicht nun einen effizienten und wirtschaftlichen Solarbetrieb mit Stillstandstemperaturen von bis zu 300 °C (Absorbtemperatur).

## 2. Einleitung

Ziel in dieser zweiten Projektphase war die Weiterführung und Vertiefung der Projektarbeiten aus Projektphase 1. Die Priorität lag weiterhin auf der Optimierung des Solarluftkollektors der Firma airwasol GmbH & Co KG durch Kostenreduktion in der Fertigung, Erhöhung der Materialbeständigkeit mit Hilfe eines neuen sehr dünnen und leichten Edelstahlabsorbers (50 x 0,2 mm), einem rückseitigen Spiegel innerhalb der Glasröhre und einer Antireflexbeschichtung der Glasröhre (innen und außen).

Durch eine stabile Edelstahlabsorberschicht gegen Umwelteinflüsse soll auch der Markt für kleine CSP-Receiver (concentrated solar power), mit und ohne Vakuum, erschlossen werden. Besonders die günstige Variante ohne Vakuum ist für einfache und kostengünstige Anlagen in südlicheren Ländern mit hoher jährlicher Sonneneinstrahlung interessant.

Für Kollektorsysteme in nicht so sauberer Umgebung zur Erzeugung von industrieller Prozesswärme für z.B. die Regenerierung von Sorptionsspeichern, Trocknung von Lacken, Holz-Hackschnitzeln, Lebensmitteln, Klärschlämmen, Beheizung von Industriehallen, Vorheizen von Öfen z.B. in Betonwerken oder die Meerwasserentsalzung werden korrosionsstabile und robuste hocheffektive Solarabsorberschichten auf Edelstahlblechen benötigt, die bei Arbeitstemperaturen bis 200 °C langzeitstabil sind.

Bisher verfügbare Absorberschichten auf Edelstahl werden größtenteils mittels nasschemischer Verfahren abgeschieden und erreichen nicht die Effizienz der kommerziell auf Aluminium oder Kupfer mittels PVD-Verfahren (physical vapour deposition) abgeschiedenen selektiven Absorberbeschichtungen.

Ein Ziel des ULA-Projektes war es daher, eine Absorberbeschichtung für Edelstahlbleche zu entwickeln, die ähnliche optische Kennwerte wie die bereits auf Aluminium- oder Kupferblech verfügbaren selektiven Schichtsysteme besitzt.

Da Edelstahl nicht die hohe Reflexion im Infraroten wie Kupfer oder Aluminium aufweist, können die bestehenden Schichtsysteme nicht einfach auf Edelstahl abgeschieden werden. Es ist bekannt, dass in diesem Fall der thermische Emissionsgrad signifikant höher ist und somit die Leistungsfähigkeit dieser Absorber wesentlich geringer ist. Vor allem bei den für Prozesswärme benötigten Arbeitstemperaturen im Bereich von 100 – 200 °C steigen die Verluste durch Infrarotstrahlung beträchtlich.

Daher muss Edelstahl zunächst mit einer zusätzlichen Infrarot-Reflektorschicht beschichtet werden, bevor die eigentliche Absorberschicht abgeschieden werden kann. Diese muss auch

bei hohen Temperaturen ihr hohes Reflexionsvermögen erhalten, um die selektiven Eigenschaften der Absorberbeschichtung über die Lebensdauer von mindestens 20 Jahren gewährleisten zu können.

Daneben muss die neue Beschichtung auch eine hohe mechanische Stabilität und eine gute Widerstandsfähigkeit gegen korrosiven Angriff aufweisen, da das Absorbermaterial in neuen Kollektortypen eingesetzt werden soll, für deren Fertigung spezielle Form- und Fügeverfahren eingesetzt werden. Die Absorberfertigung kann nur durch eine solche industrielle Fertigungsweise und durch Reduzierung des Material- und Energieeinsatzes kostengünstiger werden. Die Amortisationszeit kann nun so entscheidend gesenkt werden.

Daneben sollte ein PVD beschichteter Aluminiumspiegel entwickelt werden, der in das Glas-  
hüllrohr eingebracht werden kann, um die Solarstrahlung auf das Absorberrohr zu fokussieren. Dabei muss der Aluminiumspiegel stabil bei den hohen Arbeitstemperaturen im Vakuumrohr sein.

Dazu sollten erst gängige PVD beschichtete Aluminiumspiegel auf Eignung untersucht werden und ggf. für die Arbeitsbedingungen optimiert werden.

### **3. Kurzdarstellung der Projektpartner**

#### **airwasol GmbH & Co. KG**

Die airwasol GmbH & Co. KG wurde im Jahr 2012 gegründet. Haupttätigkeit der airwasol ist die Herstellung und der Vertrieb von innovativen Solarluftkollektoren für industrielle und private Solaranwendungen.

Ein Marktziel der airwasol Solarluftkollektoren ist die industrielle Prozesswärmetrocknung. Solarbetrieben ist dies noch ein sehr junger aber stark wachsender Bereich mit viel Zukunftspotential. Der Marktbereich erstreckt sich von kleinen Trocknungsanlagen in der Agrartechnik bis hin zu großen Industrietrocknungsanlagen.

#### **Almeco GmbH**

Die Firma Almeco GmbH in Bernburg (Sachsen-Anhalt) produziert seit über 12 Jahren mittels Rollcoating PVD-Verfahren selektive Solarabsorberschichten unter dem Handelsnamen „TiNOX energy“ auf der Basis eines Cermet Multilayersystems und einer Antireflexschicht aus Quarzglas. Derzeit werden diese Schichten auf Aluminium- und Kupferblechen abgeschieden und hauptsächlich in Flachkollektoren eingesetzt.

Für die effektive Nutzung von Solarenergie bietet Almeco zwei verschiedene Produktgruppen an:

Unter dem Namen TiNOX energy wird eine breite Palette von Absorberbeschichtungen für verschiedene Anwendungsbereiche produziert. Almeco GmbH hat eine hochselektive Absorberbeschichtung entwickelt, die Solarstrahlung nicht nur hocheffektiv absorbiert, sondern auch durch die patentierte Schichtstruktur verhindert, dass die aufgenommene Solarenergie wieder durch Wärmestrahlung verloren geht. So kann mehr als 90% der absorbierten Solareinstrahlung als Wärmeenergie genutzt werden.

Unter dem Namen VEGA energy bietet Almeco hochreflektierende Spiegelsysteme auf Aluminiumbasis mit einer Reflexion von bis zu 98% an. Die VEGA energy Spiegelsysteme sind mit ihren hochreflektierenden Oberflächen mit äußerst geringer diffuser Reflexion für die punktgenaue Konzentration von Solarstrahlung optimiert und daher prädestiniert für den Einsatz in CPC-Systemen (Compound Parabolic Concentrator) für Vakuumröhren-Kollektoren.

## **Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH**

Die Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH aus Stuttgart beschäftigte sich mit der Entwicklung von Anlagen und Verfahren zur plasmagestützten Oberflächenbehandlung. Die Produktpalette reichte von der Ganzkarossen-Plasmabehandlung für Automobile über die Plasmabehandlung und -beschichtung verschiedenster Bauteile wie Turbinenschaufeln, Motorenteile oder CPC-Spiegel bis hin zur Erzeugung von Anti-Reflexschichten für Vakuumkollektoren.

Zu Projektstart war der Plan der Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH neben der Entwicklungsdienstleistung zusätzlich die Geschäftsfelder Beschichtungsdienstleistung und Anlagenbau auszubauen. Durch die hier im Projekt entwickelten neuen Fertigungstechniken und Einsatzverfahren sollten weitere Geschäftsfelder optimal bedient werden.

Durch die eröffnete Insolvenz der Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH im Laufe des Projektes konnten leider die angefangenen Entwicklungslösungen nicht weiter im Projektverlauf eingesetzt werden.

Aufgrund dieser Situation wird in diesem Abschlussbericht nicht näher auf die Arbeitspakete der Dr. Laure Plasmatechnologie GmbH eingegangen. Damit das Projekt doch noch erfolgreich beendet werden konnte wurden vom Konsortium neue Lösungsansätze erfolgreich erarbeitet und umgesetzt.

## **SPF**

Das Institut für Solartechnik SPF ist an die Hochschule für Technik in Rapperswil (HSR) angegliedert. Seit 1981 befassen sich die derzeit etwa 40 Mitarbeiter mit nahezu allen Aspekten der thermischen Solartechnik und verwandten Themen in den drei Abteilungen:

### **SPF Testing**

Prüfungen an Materialien, Komponenten, Speichern, Kollektoren und Systemen nach internationalen Standards und selbst entwickelten Methoden

### **SPF Research**

Anwendungsorientierte Forschung in nationalen und internationalen Projekten im öffentlichen Auftrag, Forschung und Entwicklung für die Industrie

### **SPF Wissenstransfer**

Ausbildung von Studierenden an der HSR, Weiterbildung von Fachkräften, Vorträge und Seminare

Das SPF ist Schnittstelle zwischen Anwendern, Investoren, Hochschulen, Herstellern und Installateuren durch den Technologietransfer zwischen Forschungs- und Entwicklungsstellen auf der einen sowie der Industrie und dem Gewerbe auf der anderen Seite. Das Bundesamt für Energie (BFE) ist seit Beginn einer der wesentlichen Auftraggeber des Instituts. Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit konnte sich das Institut zu einem international anerkannten Kompetenzzentrum entwickeln.

## **Tubacon GmbH**

Die Tubacon GmbH produziert seit 2015 dünnwandige Edelstahlrohre bis zu einer Wandstärke von 0,5 mm. Weiterhin beschäftigt sich das Unternehmen mit der Weiterverarbeitung dieser Edelstahlrohre. Hierzu gehören unter anderen die Verfahren der mechanischen und hydraulischen Umformung. Ein weiteres Tätigkeitsfeld des Unternehmens liegt im Fügen der hergestellten Edelstahlelemente. Hierzu gehören diverse Schweiß- und Lötverfahren, unter anderem WIG, MAG, Mikroplasma Vakuum- und Schutzgaslöten.

## 4. Vorstellung des Produkts

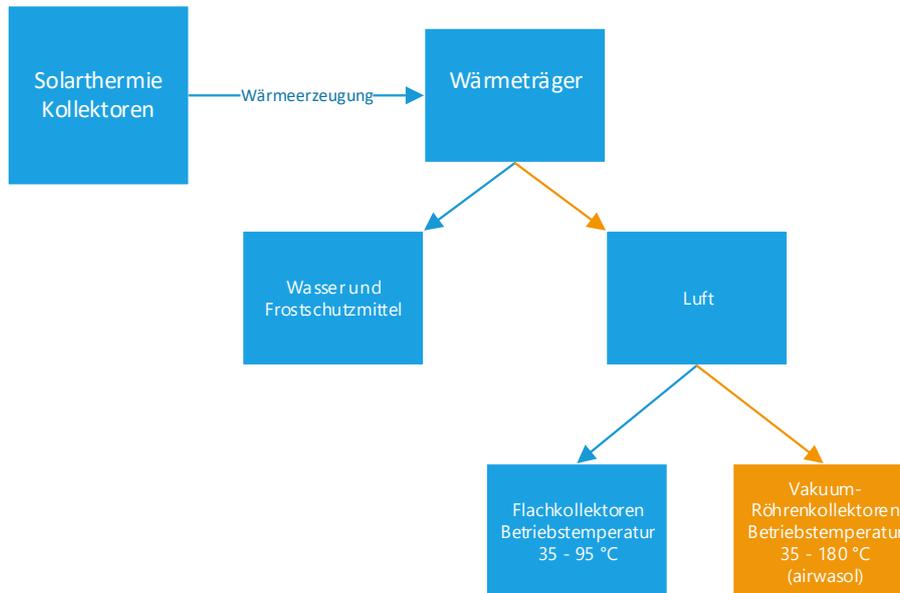


Abbildung 2: Kollektorarten

Solarthermie Kollektoren werden bezüglich ihres Wärmeträgermediums und ihrer konstruktiven Ausführung in verschiedene Kollektorarten unterteilt. airwasol setzt hier auf die Kombination aus sicherem Wärmeträgermedium Luft und effizienten Vakuumröhren.

### Funktionsweise des Kollektors

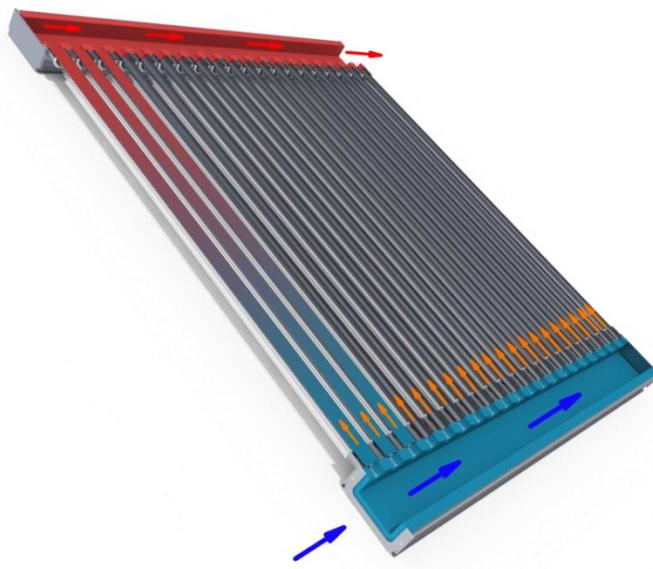


Abbildung 3: Durchströmung des TSTair-Kollektors

Die grundsätzliche Funktionsweise des Solarluftkollektors:

1. Die zu erwärmende Kaltluft strömt links unten in das Verteilgehäuse. Die Durchströmung erfolgt mit Hilfe eines Ventilators. Der Strom dafür kann von einem Photovoltaikmodul geliefert werden. Die kalte Luft verteilt sich gleichmäßig im Verteilgehäuse und strömt nun durch die parallel verschalteten Absorberröhren.
2. Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich die innere Absorberröhre und erwärmt die Luft während ihres Durchströmens.
3. Das obere Sammlergehäuse leitet die heiße Luft weiter zum Kollektoraustritt, wo sie über Lüftungsrohre zum Wärmeverbraucher gelangt.

## Die Vakuurröhre



*Abbildung 4: TST-Absorberröhren*

Die Vakuurröhre ist das wichtigste aber auch komplexeste Bauteil eines Röhrenkollektors. Hier setzt airwasol GmbH & Co. KG auf eine eigene Konstruktion welche beidseitig offen ist und somit den Vorteil des sehr geringen Druckverlustes zur Konkurrenz hat. Im inneren Absorberröhr strömt Luft hindurch und wird durch die Sonne, welche durch das äußere Glasrohr hindurch scheint, erhitzt. Zwischen innerem Absorberröhr und Glasrohr befindet sich ein Vakuum. Dieses bewirkt, dass nur wenig Wärme an die Umgebung verloren geht.

Im Projekt wurde eine neue „ultra-leichte“ Absorberröhre entwickelt. Durch das geringere Gewicht des inneren Absorberröhrs von nur 250 g/m, der Verwendung von korrosionsfreiem Edelstahl und einer hoch selektiven Beschichtung ist eine sehr hocheffiziente Solarwärmeerzeugung möglich. Durch diese Materialoptimierungen ist eine deutlich schnellere Aufheizung durch die Sonne möglich. Für den Kunden bedeutet dies einen preiswerten Solarluftkollektor, eine kurze Amortisationszeit und die Möglichkeit industrielle Solarprozesswärme einfach und sicher zu nutzen.

Die Absorberröhre wird aus verschiedenen Zulieferteilen (Glasrohr, Absorberschicht, Endkappen) in-house bei airwasol GmbH & Co.KG fertiggestellt.

## Optimierte Modulbauweise

Die Kollektoren sind modular aufgebaut. Kollektorteilfelder können mit Größen von 1 m<sup>2</sup> bis zu 100 m<sup>2</sup> realisiert werden. Teilfelder können zu großen Kollektorfeldern verbunden werden. Hierbei gibt es aus technischer Sicht, keine Größenbegrenzung.

Gleiche Komponenten werden in den 3 Standard Gehäusegrößen S, M und L (Abbildung 6) sowie in den kundenspezifischen Fassadenkollektoren eingesetzt. Durch diese Modulbauweise mit immer derselben Vakuumröhre können verschieden große Solarluftkollektorfelder schnell und höchst wirtschaftlich hergestellt werden. Die Kollektoren werden Vorort auf der Baustelle zusammengebaut. Somit ist ein einfacherer Transport zur und auf der Baustelle möglich. Auch ist der Transport in Übersee-Containern somit einfach realisierbar



Abbildung 5: Modulare Bauweise Header+Röhren

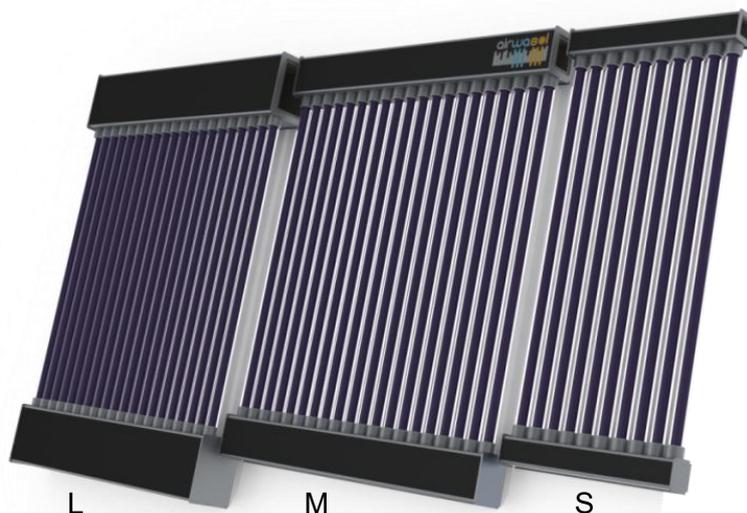


Abbildung 6: Kollektorgrößen S, M und L

## 5. Projektphasen

Das Projekt wurde in 2 Entwicklungsphasen unterteilt. Da viele neue und sehr innovative Ideen untersucht und verwirklicht werden sollten, bestand deswegen ein Restrisiko für eine Neuausrichtung der Arbeitspakete während der Projektlaufzeit. Das Projektziel „eine neue beidseitig offene Absorberröhre für Luftkollektoren“ war immer fix.

In der Projektphase 1 konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden, welche eine Änderung bzw. Erweiterung der Arbeitspakete in der Projektphase 2 mit zwei neuen Projektpartnern bewirkte.

### Projektphase 1

In der Projektphase 1 fanden die Neukonstruktion und der Prototypenbau der neuen Absorberröhre statt. Hierfür wurden verschiedene Beschichtungstests durchgeführt. Das Ziel war eine schweißbare und umformbare Absorberschicht. Der daraus entstehende Edelstahlrohrabsorber mit Ausdehnungsbalg sollte mit den neuen Röhrenbauteilen zum neuen Absorberrohr mit Glasrohr außen verbaut werden. Bei der Prototypenfertigung wurden verschiedene Fertigungstechniken getestet und bewertet.

Das SPF führte in Projektphase 1 die Messungen zur optischen Charakterisierung der selektiven Schichten auf Edelstahl ( $\alpha$ ,  $\epsilon$ ) in Begleitung der Schichtentwicklung durch, sowie die Untersuchungen zu den Degradationsmechanismen. Die Bestimmung der maximalen Arbeitstemperatur der Schicht für eine Lebensdauer von 20 Jahren, wenn die Absorberschicht in nicht evakuierten Kollektoren (d. h. in Atmosphäre) eingesetzt wird, konnte erst nach Abschluss aller Arbeiten zur Schichtentwicklung durchgeführt werden, also in Projektphase 2.

Daneben wurden die Degradationsmechanismen der Absorberschicht unter Vakuum untersucht. Dazu fanden Messungen mit Temperaturlagerung beim SPF in einem Vakuumofen statt. Aus diesen Degradationsuntersuchungen konnte eine Lebensdauer für die Absorberschicht in der Vakuumröhre abgeschätzt werden.

### Arbeitsziele Projektphase 1

Folgende Bauteile sollten in der 1. Projektphase als Prototypen hergestellt werden. Die Langzeittests und mögliche Optimierungen dieser Komponenten erfolgten in Projektphase 2.

- Beschichtetes Absorberrohr mit Metallbalg
- GMV (Glas-Metall-Verbindung) mit verschiedenen Verbindungstechniken

- Vakuumstutzen integriert in GMV mit Abschlusstechnik nach der Vakuumherzeugung
- Spiegel innenliegend / aufgedampft
- Getter mit verschiedenen Positionen, Aktivierungsmechanismen, Größe und Materialien
- Montagehülse für die Anbindung an das Kollektorgehäuse

Die Ergebnisse aus Projektphase 1 sind in dem Abschlussbericht AZ32450/01 dokumentiert.

## **Projektphase 2**

In Projektphase 2 wurden die Absorberröhren einzeln und als gesamter Kollektor weiterentwickelt, optimiert und getestet. Neue Fertigungsanlagen mit z.B. Diodenlaser für die einzelnen Komponenten wurden konstruiert, getestet und teils auf Kleinserienfertigung hin angepasst da der Prozess für eine Einzelstückfertigung nicht skalierbar war. Andere Arbeitspakete aus Projektphase 1 werden im zweiten Projektabschnitt weitergeführt und vertieft.

## **6. Arbeitspakete der Projektpartner**

### **Arbeitspakete airwasol GmbH & Co. KG**

Das Ziel der Arbeiten der airwasol GmbH & Co KG war die Optimierung des Solarluftkollektors der Firma airwasol durch Kostenreduktion in der Fertigung, Erhöhung der Materialbeständigkeit mit Hilfe eines neuen, sehr dünnen und leichten Edelstahlabsorbers (50 x 0,2 mm) und einem rückseitigen Spiegel innerhalb der Glasröhre.

Alle Komponenten wurden schon ab der ersten Konstruktionsphase an rein für die Anwendung in einem Solarluftkollektor und nicht für Wasser geführte Kollektoren mit kleinen Querschnitten entworfen. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf einem geringen Materialeinsatz für leichte und nicht überdimensionierte Komponenten, umweltfreundliche Fertigungsverfahren mit z.B. Wärmerückgewinnungen und einem möglichst geringen Druckverlust im späteren Anlagenbetrieb beim Kunden.

### **Arbeitspakete Almeco GmbH**

Das Ziel der Arbeiten der Almeco GmbH war es, hochselektive Solarabsorberbeschichtungen auf Edelstahlblech zu entwickeln, welche ähnliche optische Kennwerte wie die bereits auf Aluminium- oder Kupferblech verfügbaren selektiven Schichtsysteme besitzen.

Bisher verfügbare Absorberschichten auf Edelstahl werden größtenteils mittels nasschemischer Verfahren abgeschieden und erreichen nicht die Effizienz der kommerziell auf Aluminium oder Kupfer mittels PVD-Verfahren abgeschiedenen selektiven Absorberbeschichtungen.

Dabei sollte je eine Absorberbeschichtung entwickelt werden, die für den Einsatz in der evakuierten Version und einmal in der nicht evakuierten Version der Solarabsorberröhre der Firma airwasol eingesetzt werden kann.

Mit der nicht evakuierten Absorberröhre soll der Markt für kleine CSP-Receiver erschlossen werden. Diese günstige Variante ohne Vakuum ist für einfache und kostengünstige Anlagen in südlicheren Ländern mit hoher jährlicher Sonneneinstrahlung interessant.

Für Kollektorsysteme in mit Abgasen belasteter industriellen Umgebung, die zur Erzeugung von industrieller Prozesswärme für die Regenerierung von Sorptionsspeichern, Trocknung von Lacken, Holz-Hackschnitzeln, Lebensmitteln, Klärschlämme, Beheizung von Industriehallen, Vorheizen von Öfen z.B. in Betonwerken oder die Meerwasserentsalzung eingesetzt werden, sollte die Absorberschicht für die nicht evakuierte Absorberröhre besonders korrosionsstabil sein. Dabei sollte diese Beschichtung bei Arbeitstemperaturen bis 200 °C langzeitstabil sein.

Daneben sollte die neue Beschichtung auch eine hohe mechanische Stabilität aufweisen, da das Absorbermaterial in neuen Kollektortypen eingesetzt werden soll, für deren Fertigung spezielle Form- und Fügeverfahren eingesetzt werden.

Daneben sollte ein PVD beschichteter Aluminiumspiegel entwickelt werden, der in das Glas-hüllrohr eingebracht werden kann, um die Solarstrahlung auf das Absorberrohr zu fokussieren. Dieser Aluminiumspiegel muss stabil bei den hohen Arbeitstemperaturen im Vakuumrohr sein.

Dazu sollen erst Aluminium basierte PVD beschichtete Spiegelsysteme auf Eignung untersucht werden und ggf. für die Arbeitsbedingungen optimiert werden. Insbesondere sollte eine Silber basierte Beschichtung mit hoher solarer Reflexion entwickelt werden.

Daneben sollte die Abscheidung der Absorberschichten auf einer großtechnischen air to air PVD Bandbeschichtungsanlage bezüglich Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit optimiert werden.

## **Arbeitspakete SPF Institut für Solartechnik**

Das SPF führte die optischen Charakterisierungen und beschleunigten Degradationstests an den neuen Absorberschichten sowie Spiegelschichten von Almeco durch.

Es wurden verschiedene Kollektoren auf deren Durchströmungsverhalten, innerer Wärmeübergang zwischen Absorberrohr Innenfläche und dem Wärmeträgermedium Luft, thermische Leistung und Stillstandstemperatur auf dem Outdoor-Tracker untersucht.

## **Arbeitspakete Tubacon GmbH**

Das Ziel der Arbeiten der Tubacon GmbH ist die Verarbeitung der von der Fa. Almeco bereitgestellten beschichteten Edelstahlcoils. Diese werden zunächst zu Röhren verarbeitet, anschließend umgeformt und abgelängt.

Es wurden verschiedene Umformverfahren mit mechanischen Werkzeugen und Hochdruckfluiden untersucht.

Ein Hauptaugenmerk bestand auf dem „feinen“ Schweißverfahren für die dünnwandigen Absorberrohre mit einer Materialstärke von nur 0,2 mm. Ziel war hierbei eine vakuumdichte und mechanisch stabile Schweißnaht zu erhalten und dies mit einem geringen Ausschuss an Fehlerteilen bzgl. Schweißfehlern.

Für den Versand der dünnwandigen und bis zu 2500 mm langen Absorberrohre wurde ein Verpackungskonzept erarbeitet das einen sicheren und effizienten Transport von Tubacon zu airwasol gewährleistet.

## **A1 Entwicklung einer hochtemperatur- und korrosionsstabilen Infrarot Reflektorschicht für Edelstahlsubstrat (Almeco/SPF)**

Bei den selektiven Absorberschichtsystemen, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, handelt es sich um sogenannte Absorber-Reflektor Tandem Systeme, bei denen die Absorberschicht auf einen Reflektor mit hoher Reflexion im Infraroten Wellenlängenbereich abgeschieden wird [Gor 01] [Ken 02]. Da Kupfer oder Aluminium schon eine hohe Reflexion im Infraroten besitzen, kann die Absorberschicht direkt auf das Substrat aufgebracht werden.

Da Edelstahl im Vergleich zu Aluminium oder Kupfer nur eine geringe Reflexion (ca. 80%) im Infraroten besitzt, können Absorberschichtsysteme nicht einfach auf Edelstahl abgeschieden werden. Es ist bekannt, dass in diesem Fall der thermische Emissionsgrad signifikant höher ist und somit die Leistungsfähigkeit dieser Absorber wesentlich geringer ist. Vor allem bei den für Prozesswärme benötigten Arbeitstemperaturen im Bereich von 100 – 200°C steigen die Verluste durch Infrarotstrahlung beträchtlich.

Daher muss Edelstahl zunächst mit einer zusätzlichen Infrarot-Reflektorschicht beschichtet werden, bevor die eigentliche Absorberbeschichtung abgeschlossen werden kann. Diese muss auch bei hohen Temperaturen ihr hohes Reflexionsvermögen erhalten, um die selektiven Eigenschaften der Absorberbeschichtung über die Lebensdauer von mindestens 20 Jahren gewährleisten zu können.

### **A1.1 Auswahl eines geeigneten Edelstahlwerkstoffes und Definition der Oberflächenqualität**

Als Edelstahlwerkstoffe wurden zunächst Legierungen in die engere Wahl genommen, die schon für die Fertigung von Edelstahl Balgen verwendet werden: 1.4301; 1.4541; 1.4404; 1.4435, da im Rahmen des Projektes die Wärmeausgleichshalgen direkt in das Absorberrohr eingeprägt werden.

Als Bandmaterial für die Beschichtungstests wurde Edelstahl 1.4541 (X6CrNiTi18-10) und 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) ausgewählt, da sich beide Materialien gut weiterverarbeiten lassen und in einer für die PVD Beschichtung geeigneten Oberflächenqualität verfügbar sind. Nach Optimierung des Schweißverfahrens bei Tubacon wurde entschieden, den Edelstahlwerkstoff 1.4541 zu verwenden. Diese Legierung ist Titan stabilisiert und damit auch im geschweißten Zustand sehr korrosionsstabil. Da dieser Stahl kein Molybdän enthält ist er zudem kostengünstiger als z. B. 1.4404.

### **A1.2 Literatur-/Patentrecherche zur Auswahl geeigneter Materialien für eine Infrarot Reflektorschicht**

Für Vakuumabsorberrohre wurden schon verschiedene und teilweise komplexe IR-Reflektorschichtsysteme auf Edelstahlrohren untersucht und eingesetzt [Hil09].

Da das Absorbermaterial für Arbeitstemperaturen zwischen 80°C und 200°C sowohl an Atmosphäre und im Vakuum vorgesehen ist und nach Berechnungen des SPF Stagnationstemperaturen von etwa 300°C an Atmosphäre und bis zu 400°C im Vakuum erreicht werden können, darf die IR-Reflektorschicht auch unter diesen Bedingungen nicht oxidieren oder in die Absorberschichten bzw. in das Substrat hineindiffundieren. Daneben muss die Beschichtung den Ausheizprozess (30min bei 420°C) beim Evakuieren der Absorberrohre ohne Veränderung überstehen.

Bereits im ersten ULA Projektteil wurden Schichtsysteme aus Materialien ausgewählt, die zum einen mit hinreichend hohen Abscheideraten aufgebracht werden können und zum anderen kostengünstig sind.

Als Materialien mit einer hohen Reflexion kommen grundsätzlich Cu, Al, Ag, Mo, Pt, Re und Ni in Frage. Kupfer besitzt zwar eine sehr hohe Sputterrate und könnte damit effektiv aufgesputtert werden, diffundiert aber bei hohen Temperaturen leicht und wurde daher nicht verwendet. Ag, Mo, Pt und Re sind sehr teuer und wurden daher zunächst nicht in Betracht gezogen. Nachdem das Absorberschichtsystem auf Aluminiumsubstrat sowohl in Temperaturtests bei 400°C an Luft wie auch im Vakuum sehr stabil ist (siehe 7. Arbeitspakete SPF Institut für Solartechnik), wurde zunächst Aluminium als IR-Reflektorschicht auf Edelstahlsubstrat als IR-Reflektorschicht ausgewählt. Dabei wurden ähnlich niedrige Emissionswerte (< 5%) wie bei der Verwendung von Aluminiumsubstrat erzielt.

Daneben wurde Nickel als Material für die IR-Reflektorschicht ausgewählt, das nach Literaturangaben eine thermische Emission bei 100°C von etwa 4% aufweist. Nickel ist ebenfalls ein sehr temperatur- und vor allem korrosionsstabiles Material. Wie in der Abbildung 7 zu erkennen ist, ist die Reflexion im nahen Infraroten zwar nicht so hoch wie bei den anderen in Frage kommenden Materialien, jedoch ist diese ab einer Wellenlänge von 6000nm vergleichbar mit der Reflexion der anderen infrage kommenden Materialien. Da die Absorberschicht für eine Arbeitstemperatur bis 200°C ausgelegt ist, ist damit die Reflexion im Bereich der thermischen Infrarotstrahlung eines schwarzen Strahlers (BB: „black body“) mit 200°C Oberflächentemperatur noch hoch genug, um eine geringe thermische Emission zu erreichen.

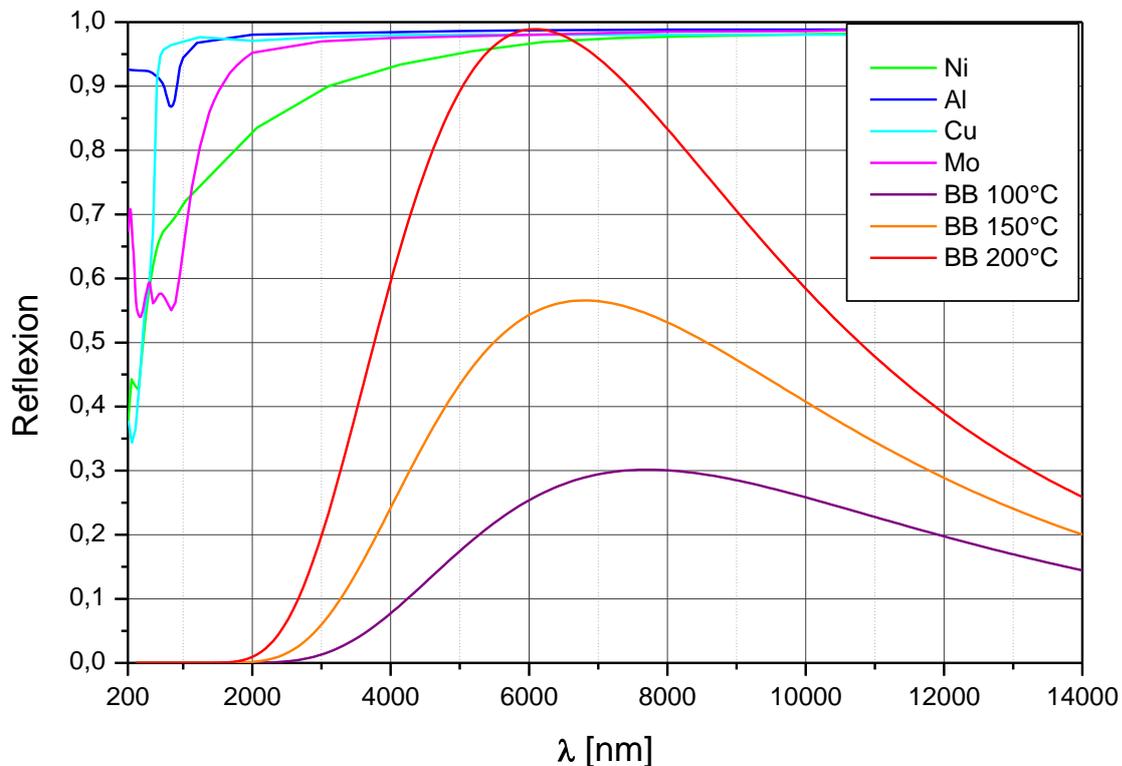


Abbildung 7: Reflexionsspektren der Metalle, die für die Infrarot-Spiegelschicht in Frage kommen. Zusätzlich sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen.

Da Nickel ferromagnetisch ist, stört es die Magnetfelder von Magnetron Sputteranlagen, was zu einer signifikanten Reduktion der Sputterrate führt. Daher wird Nickel mit anderen Elementen legiert, um den Ferromagnetismus zu unterdrücken. Standardmäßig werden folgende Legierungen zum Sputtern von Nickel verwendet: Ni-Cr 80/20wt%; Ni-Al 90/10wt%; Ni-V 93/7wt%. Die Zulegierung von anderen Elementen in Nickel führt allerdings zur Abnahme der Reflexion im Infraroten [Gel 04].

Daher wurde für die Versuche im Rahmen der Projektes Sputtertargets aus NiAl 90/10wt% und NiV 93/7wt% verwendet.

Außerdem wurde entschieden, auch Molybdän einzusetzen, das sehr teuer ist, sich aber schon in Vakuumabsorberrohren aus Edelstahl für Solarthermischen Kraftwerken mit Arbeitstemperaturen über 400°C erfolgreich als IR-Reflektorschicht bewährt hat [Hil09]. Die Reflexion von Molybdän ist im Infraroten annähernd so hoch wie von Aluminium (siehe Abbildung 7). Diese IR-Reflektorschicht erwies sich auch für die neue Absorberbeschichtung als äußerst temperaturstabil.

### **A1.3 Abscheidung verschiedener ausgewählter IR-Reflektor Schichtsysteme auf Edelstahlblech.**

Die Beschichtungsversuche wurden auf der industriellen air to air PVD Bandbeschichtungsanlage der Almeco GmbH durchgeführt. Die Anlage ist mit 10 Dual – Magnetron rotatable Sputterstationen und 3 Elektronenstrahlbeschichtungskammern ausgestattet.

Um auf einem Edelstahl Versuchsscoil verschiedene IR-Reflektor Schichtsysteme abscheiden zu können, wurde die industrielle Beschichtungsanlage (siehe Abbildung 8) mit allen für den Versuch nötigen Targets bestückt, die dann je nach gewünschtem Schichtsystem eingeschaltet wurden.



*Abbildung 8: Industrielle air to air PVD Bandbeschichtungsanlage der Almeco GmbH in Bernburg*

Es wurden zunächst IR-Reflexionsschichten die nur aus NiAl bzw. NiV bestanden auf Edelstahl aufgesputtert. Da zu erwarten war, dass die Reflexion durch die Zulegierung nicht das Niveau von reinen Nickelschichten erreicht, wurden auch IR-Reflektorschichtsysteme aus einer Nickellegierung mit einer zusätzlich darüber angeordneten Aluminiumschicht hergestellt. Daneben wurden auch Schichtsysteme mit Cr bzw. CrN als Diffusionsbarriere unter der Aluminiumschicht hergestellt. Zusätzlich wurden IR-Reflektorschichten aus reinem Molybdän aufgesputtert.

## A1.4 Charakterisierung der IR-Reflektor Schichtsysteme

Die Reflexionsspektren der abgedruckten Schichtsysteme (siehe Abbildung 9) wurde beim SPF vermessen (siehe A7.1). Zum Vergleich sind Reflexionsdaten aus der Literatur für Aluminium, Nickel und Molybdän aufgetragen. Daraus wurden die thermischen Emissionen (100°C) bestimmt.

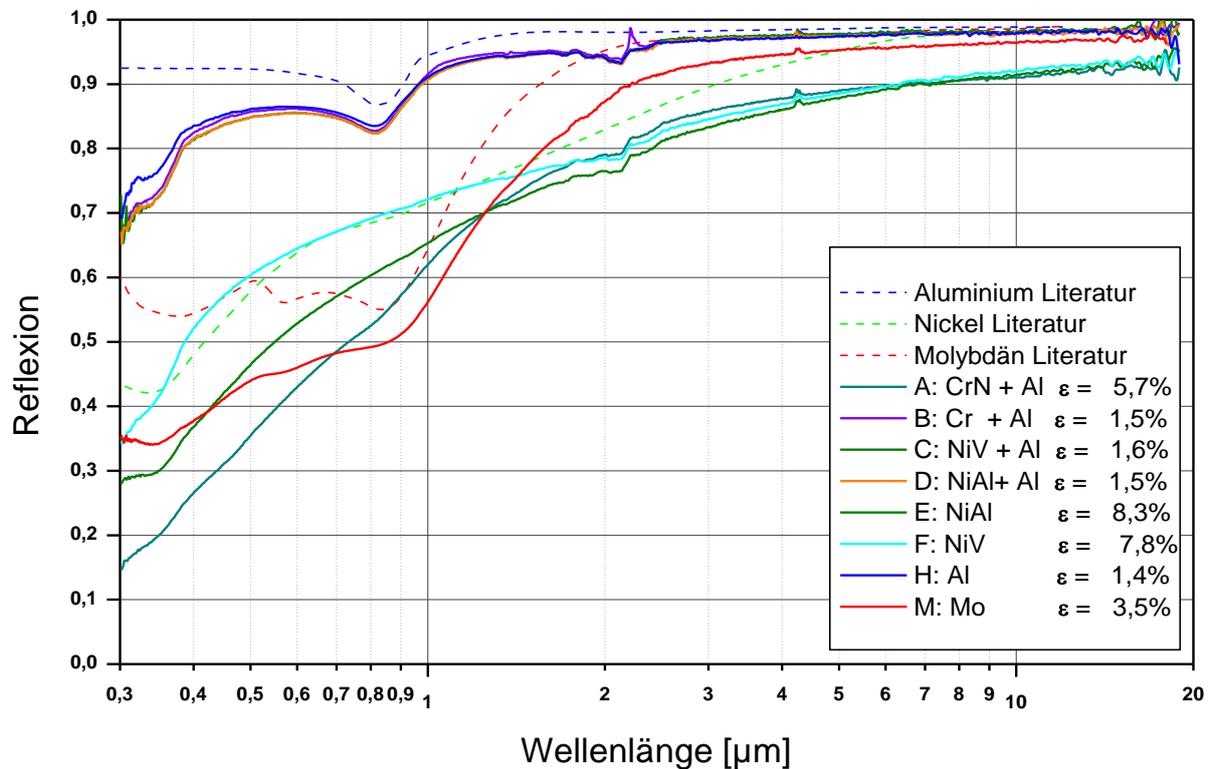


Abbildung 9: Reflexionsspektren der verschiedenen hergestellten IR-Reflektorschichtsysteme auf Edelstahlsubstrat mit den daraus berechneten thermischen Emissionswerten für 100°C Oberflächentemperatur.

Zunächst fällt auf, dass die aufgesputterten Schichten aus Aluminium und Molybdän eine etwas geringere Reflexion wie in der Literatur angegeben aufweisen. Das kann daran liegen, dass die Literaturwerte meist an Schichten auf glatten Substraten wie z. B. Glas gemessen werden. Das hier verwendete Edelstahlblech weist dagegen eine größere Rauigkeit auf. Zusätzlich kann es sein, dass die Schichten Fehlstellen oder leichte Verunreinigungen aufweisen. Daneben ist anzumerken, dass die aufgesputterten Molybdänschichten eine um etwa 2% höhere Emission wie die aufgesputterten Aluminiumschichten aufweisen.

Die aufgesputterten Nickellegierungen (siehe Abbildung 9 Kurve E und F) erreichen auch nicht die in der Literatur angegebenen Reflexionswerte für reines Nickel. Hier kommt hinzu, dass das dazulegierte Vanadium bzw. Aluminium eine „Verunreinigung“ darstellt, die ebenfalls zu einer Reduktion der Reflexion führt. Gegenüber reinem Nickel, das eine thermische Emission

(100°C) von 4% aufweist, wurde für die gesputterten NiAl und NiV Schichten eine thermische Emission (100°C) von etwa 8% gemessen. Die mit diesen Nickellegierungen hergestellten kompletten Absorberschichtsysteme wiesen eine Emission größer 10% im Neuzustand auf, so dass diese Schichtsysteme nicht den Leistungsanforderungen genügten.

Die Schichtsysteme mit einer zusätzlichen Aluminium IR-Reflektorschicht bzw. einer zusätzlichen Diffusionsbarrierschicht zwischen Edelstahlsubstrat und Aluminiumschicht weisen die höchste Reflexion bzw. niedrigste Emission auf. Das Absorberschichtsystem mit dem IR-Schichtsystem aus CrN und Aluminium weist allerdings eine Emission größer 10% auf. Eventuell fand eine Kontamination der Aluminiumschicht mit Stickstoff durch den reaktiven Sputterprozess des Chromnitrits in der benachbarten Sputterkammer statt.

## **A2 Optimierung des Antireflexschichtsystems (Almecco/SPF)**

### **A2.1 Literatur-/Patentrecherche und Simulationen zur Auswahl eines mechanisch stabilen Antireflex-Schichtsystems**

Im ULA 1 Projekt wurde bereits ZrOx als geeignete mechanisch kratzfeste und korrosionsstabile Antireflexschicht ausgewählt. Durch optische Simulation wurde das Absorberschichtsystem für eine Antireflexschicht aus ZrO<sub>2</sub> optimiert. Theoretisch konnte ein Absorptionsgrad von 94% erreicht werden (siehe Abbildung 10).

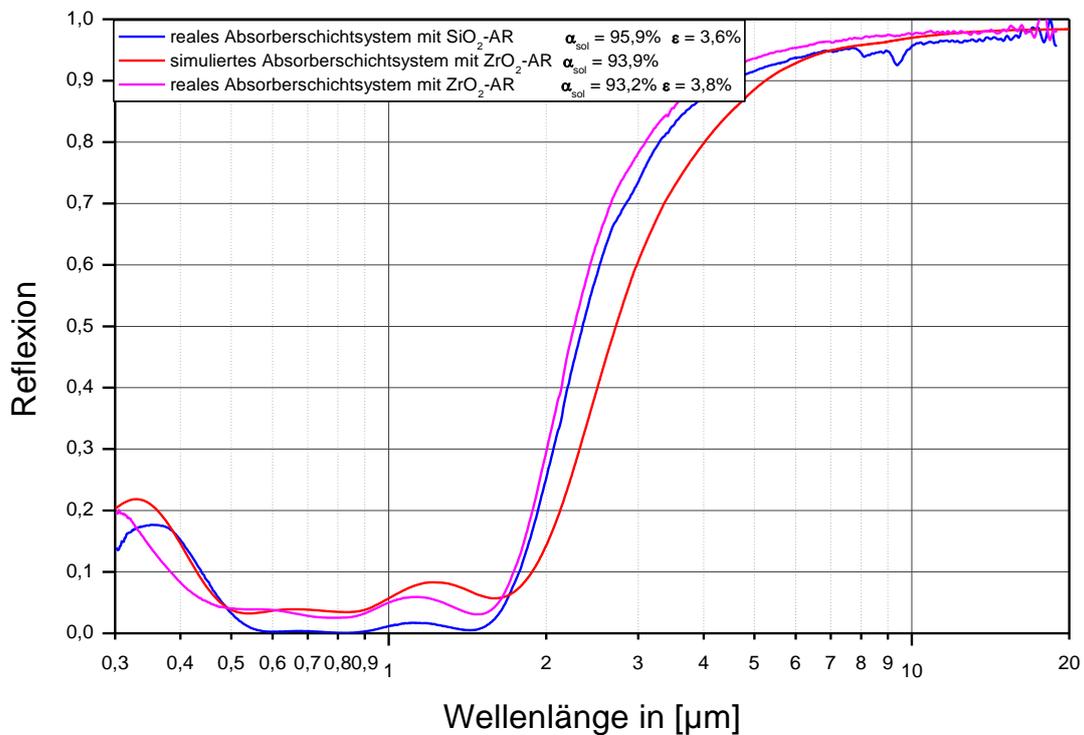


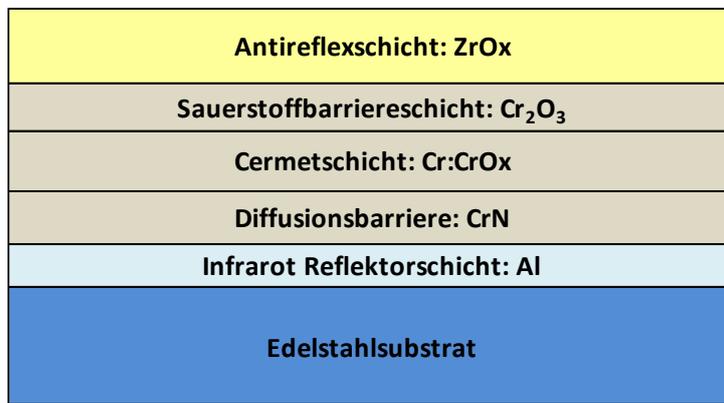
Abbildung 10: Vergleich des Reflexionsspektrums des simulierten Absorberschichtsystems mit ZrO<sub>2</sub> Antireflexschicht mit dem Reflexionsspektrum des real abgeschiedenen Absorberschichtsystems auf Edelstahlsubstrat. Zum Vergleich ist noch das Reflexionsspektrum des Absorbiermaterials auf Edelstahl mit Antireflexschicht aus SiO<sub>2</sub> aufgetragen.

## A2.2 Versuche zur Abscheidung des neuen Absorberschichtsystems mit ZrO<sub>2</sub> Antireflexschicht.

Im ersten Projektabschnitt wurde dieses neue Schichtsystem bereits auf Aluminiumsubstrat abgeschieden. Das ZrOx wurde dabei mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden. Hiermit konnten Aufdampfraten erzielt werden, die mit denen von SiO<sub>2</sub> vergleichbar sind. Allerdings musste dazu die Elektronenstrahlleistung wesentlich erhöht werden. Nach einiger Optimierung des Schichtsystems konnte ein gemessener Absorptionsgrad von 93,5% auf Aluminiumsubstrat erreicht werden.

Auf Aluminiumsubstrat erwies sich dieses Schichtsystem in Temperatur- und Feuchtetest als sehr stabil (siehe ULA 1). Auch im Salzspraytest (NSS / 24h) konnte keine signifikante Degradation beobachtet werden.

Um dieses Schichtsystem auf Edelstahl abscheiden zu können, wurde zunächst eine Aluminiumschicht aufgesputtert (siehe Abbildung 11), die als IR-Reflektorschicht dient, um ähnlich geringe Emissionswerte wie auf Aluminiumsubstrat zu erhalten.



*Abbildung 11: Schematischer Schichtaufbau des Absorberschichtsystems mit ZrO<sub>2</sub> Antireflexschicht*

### **A2.3 Charakterisierung des neuen Antireflex Schichtsystems**

Das Schichtsystem wurde optisch beim SPF charakterisiert (siehe Abbildung 10). Das im Projekt auf Edelstahlsubstrat abgeschiedene Absorberschichtsystem mit ZrO<sub>2</sub> Antireflexschicht erreicht einen Absorptionsgrad von etwas über 93% und erreicht somit fast die theoretisch berechneten Werte. Damit konnten vergleichbare optische Kennwerte wie auf Aluminiumsubstrat erreicht werden.

Da dieses Schichtsystem für nicht evakuierte Vakuumröhren konzipiert ist, wurden nur Temperaturtests an Luft bei 298°C durchgeführt. Das Schichtsystem erwies sich als sehr temperaturstabil. Nach 364 Stunden haben sich die optischen Kennwerte nicht signifikant verändert (siehe Abbildung 12).

Außerdem wurden Feuchte- und Korrosionstests durchgeführt. Im Dampf-Heat-Test (85°C / 85% r.H.) konnte selbst nach 1000 Stunden keine signifikante Veränderung festgestellt werden, allerdings wurde im Feuchtetest mit Kondensation bei 40°C/95% r.H./45°C nach 100 Stunden ein leichter Anstieg des Emissionsgrades beobachtet (siehe Abbildung 13).

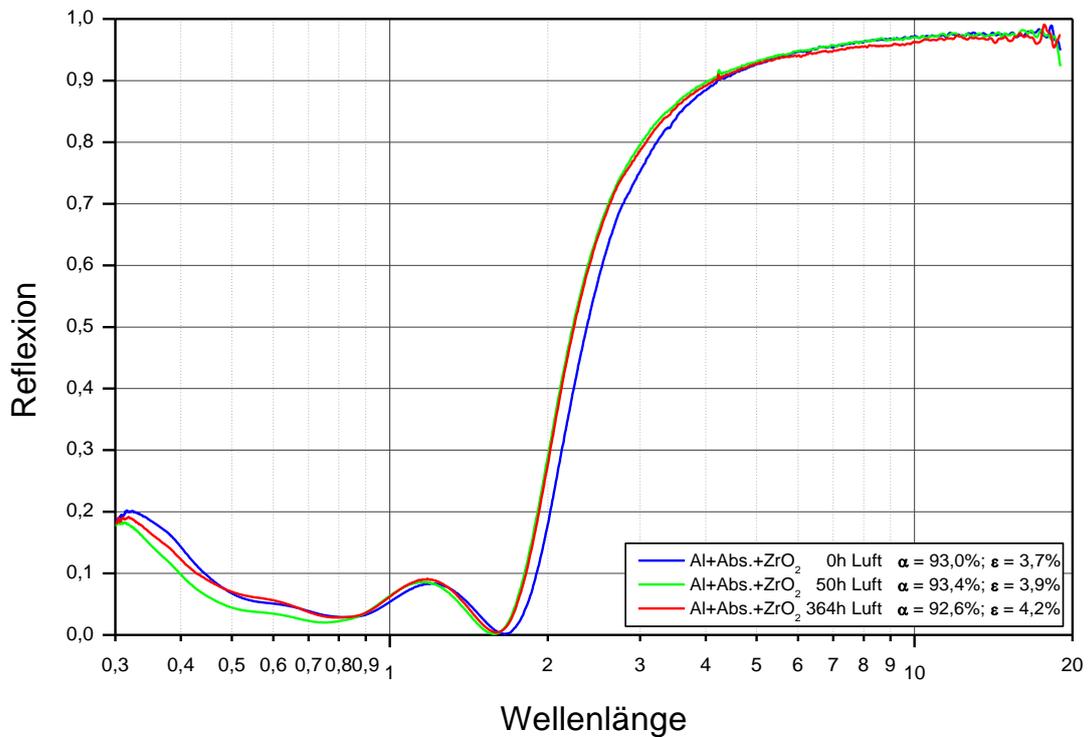


Abbildung 12: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium, Absorberschichten und ZrO<sub>2</sub> Antireflexschicht vor und nach der Alterung bei 298°C an Luft.

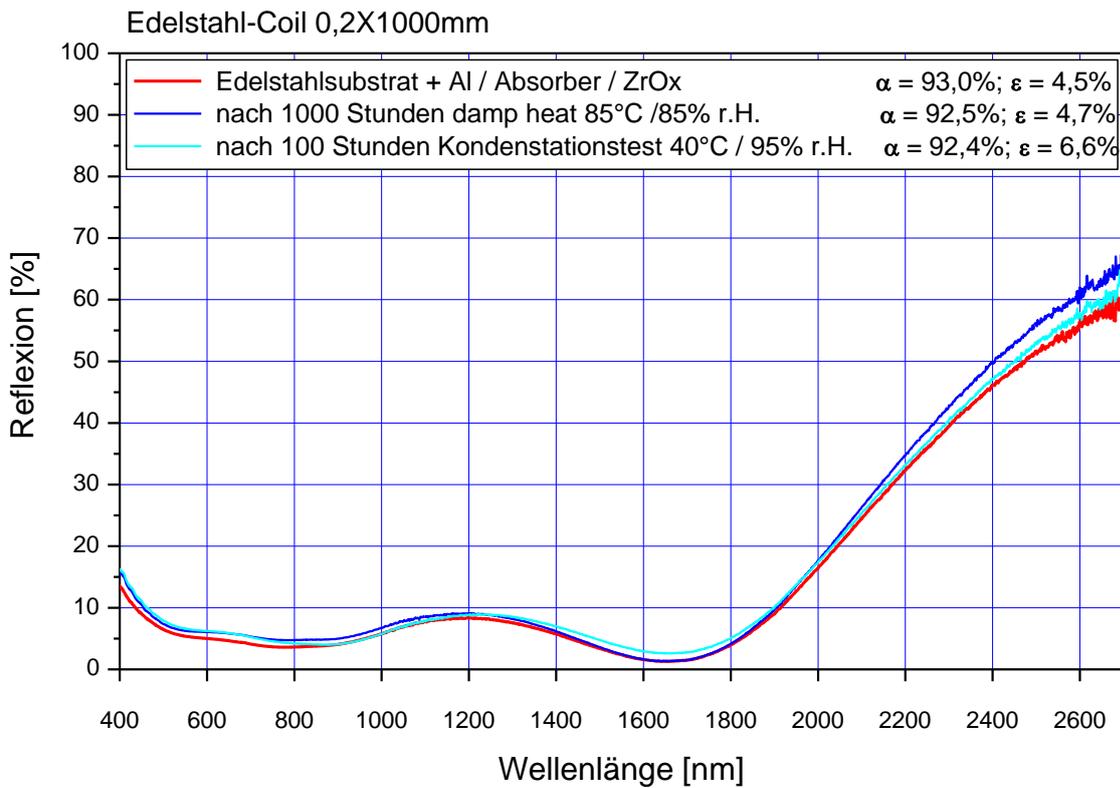
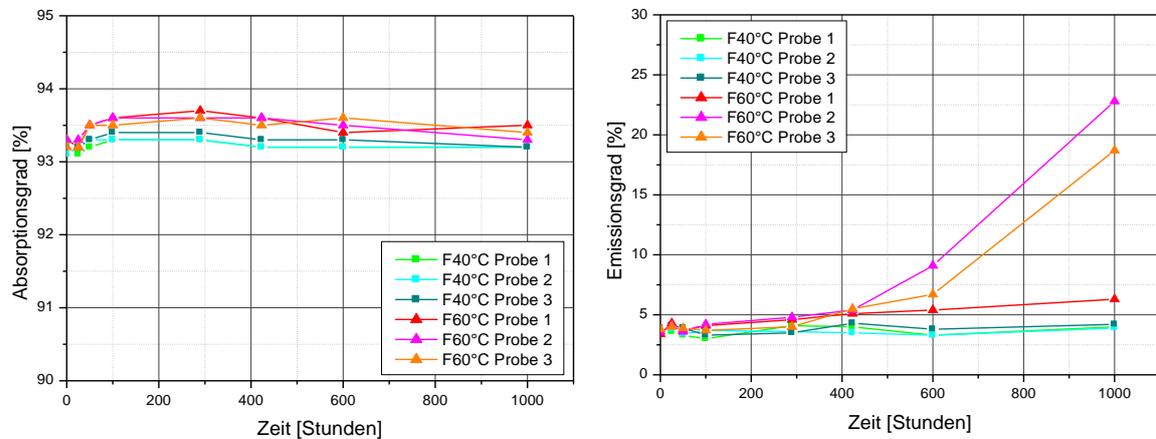


Abbildung 13: Reflexionsspektren der Absorberschicht mit Aluminium-IR-Reflektorschicht und ZrOx-Antireflexschicht nach verschiedenen Feuchtetests.

In Feuchtetests mit Kondensation bei 40°C/95% r.H./45°C und 60°C/95% r.H./65°C, die das SPF durchgeführt hat, wurden fast keine Veränderungen der optischen Kennwerte festgestellt (siehe Abbildung 14). Allerdings wurde im Kondensationstest 60°C/95% r.H./65°C bei zwei Proben nach etwa 500h ein signifikanter Anstieg des Emissionsgrades beobachtet, während sich bei einer Probe der Emissionsgrad kaum verändert hat (der Absorptionsgrad blieb bei allen Proben nahezu unverändert).



*Abbildung 14: Optische Werte der Proben mit Aluminium IR-Reflektorschicht auf Edelstahlsubstrat als Funktion der Zeit nach Feuchtetests mit Kondensation bei 40°C/95% r.H./45°C und 60°C/95% r.H./65°C vom SPF.*

## Korrosionstests

Nach einem Salzspraytest (NSS 24h) war das Schichtsystem zwar äußerlich nicht geschädigt, konnte allerdings leicht als Ganzes mit dem Finger vom Substrat abgerieben werden.

Damit traten unerwartet Korrosionserscheinungen auf, die bei dem neuen Schichtsystem auf Aluminiumsubstrat nicht beobachtet wurden. Da sich das Schichtsystem nach dem NSS als Ganzes abreiben ließ, kann davon ausgegangen werden, dass die Korrosion zwischen Edelstahlsubstrat und der als IR-Spiegel aufgesputterten Aluminiumschicht auftritt. Daher wurde das neue Schichtsystem ohne diese Aluminiumschicht auf Edelstahlsubstrat abgeschieden. In Feuchtetests mit Kondensation bei 60°C, die vom SPF durchgeführt wurden, wurde auch nach 1008 Stunden kein signifikanter Anstieg im Emissionsgrad und keine signifikante Veränderung im Absorptionsgrad festgestellt (siehe Abbildung 15). Die Schichthaftung war immer noch gut. Auch in Salzspraytests erwies sich dieses Schichtsystem als sehr korrosionsstabil.

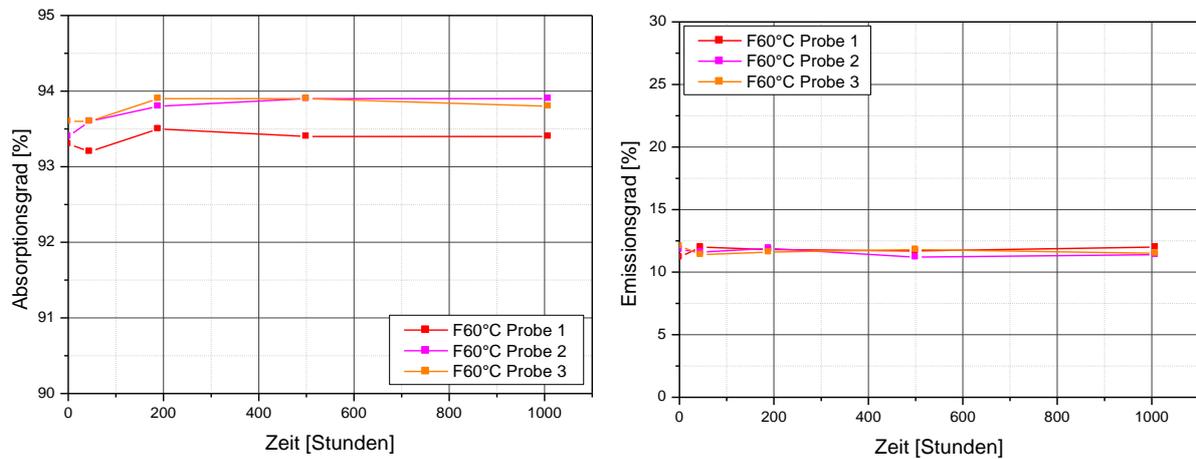


Abbildung 15: Optische Werte der Proben ohne IR-Reflektorschicht auf Edelstahlsubstrat als Funktion der Zeit nach Feuchtetests mit Kondensation bei 60°C/95% r.H./65°C vom SPF.

Für nicht evakuierte Absorberrohre in stark korrosiver Umgebung sollte daher das Schichtsystem ohne IR-Reflektorschicht auf dem Edelstahlsubstrat verwendet werden, auch wenn der Emissionsgrad dann bei etwa 12% liegt. Dafür verändert sich dieser unter Temperaturbelastung auch über lange Zeit nicht signifikant.

### A3 Optimierung des Gesamtschichtsystems (Almecco/SPF)

#### A3.1 Simulationen zur Abstimmung des Absorberschichtsystems auf das IR-Reflektor- und das Antireflexschichtsystem

Bereits im Rahmen des ULA 1 Projektes wurden Simulationen durchgeführt, wodurch die optischen Eigenschaften des Gesamtschichtsystems optimiert werden konnten. Nach Auswertung der Versuche auf Aluminiumsubstrat, konnten die optischen Kennwerte für die auf Edelstahl abgeschiedenen Schichtsysteme nochmals optimiert werden (siehe Abbildung 17).

#### A3.2 Versuche zur Abscheidung des Gesamtschichtsystems

Auf das Versuchscoil aus Edelstahl, auf das unter A1.3 Abscheidung verschiedener ausgewählter IR-Reflektor Schichtsysteme auf Edelstahlblech bereits die verschiedenen IR-Schichtsysteme abgeschieden wurden, wurde in einem zweiten Beschichtungsdurchlauf das eigentliche Absorberschichtsystem abgeschieden, das aus einer Diffusionsbarriere aus CrN, einer Cermetschicht aus Cr:CrO<sub>x</sub>, einer Sauerstoffbarriereschicht aus Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und einer Antireflexschicht aus SiO<sub>2</sub> besteht (siehe Abbildung 16).

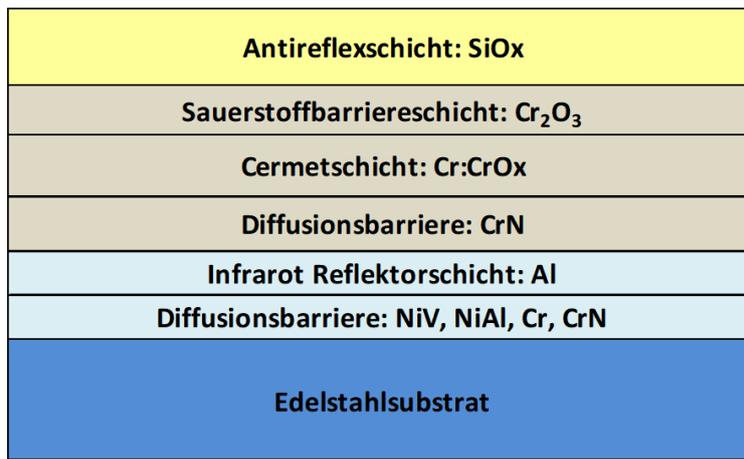


Abbildung 16: Schematische Darstellung der einzelnen Schichten des IR-Reflektorsystems und des Absorberschichtsystems mit SiO<sub>2</sub> Antireflexschicht.

### A3.3 Charakterisierung des Gesamtschichtsystems

Die Reflexion der abgeschiedenen Schichtsysteme (siehe Abbildung 17) wurde beim SPF vermessen (siehe A7.1). Daraus wurden die solare Absorption und die thermische Emission (100°C) bestimmt (siehe Tabelle 1).

Parameter	IR-Reflektor	Mit Absorberschichten		ohne Absorberschicht	d Emission
		solare Absorption	Emission (100°C)	Emission (100°C)	
		[%]	[%]	[%]	
A	CrN + Al	96,2	10,6	5,7	4,9
B	Cr + Al	96,1	4,2	1,5	2,7
C	NiV + Al	96,1	4,3	1,6	2,7
D	NiAl + Al	96,0	3,9	1,5	2,4
E	NiAl	95,4	11,9	8,3	3,6
F	NiV	95,7	10,5	7,8	2,7
G	ohne IR-Reflektor	96,2	12,2	12,0	0,2
H	Al	95,9	3,7	1,4	2,3
M	Mo	95,4	6,5	3,5	3,0

Tabelle 1: optische Kennwerte der selektiven Absorberschichtsysteme mit verschiedenen IR-Reflektorschichtsystemen.

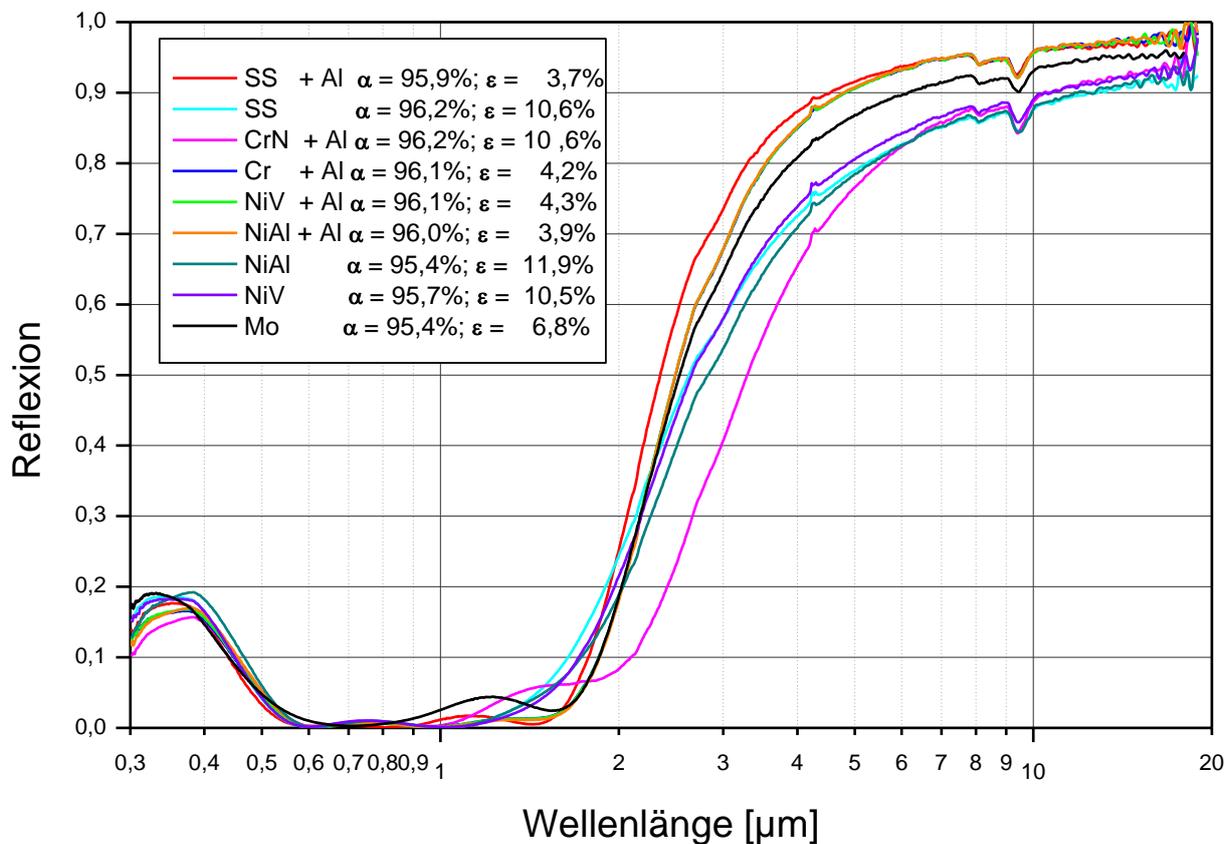


Abbildung 17: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit verschiedenen IR-Reflektorschichtsystemen.

Wie aus Tabelle 1 und Abbildung 17 zu erkennen ist, weisen die Schichtsysteme mit der höchsten Reflexion im Infraroten auch die geringsten Emissionswerte auf. Dabei korrelieren die IR-Reflexions- bzw. Emissionswerte der IR-Schichtsysteme ohne Absorberschichtsystem mit der IR-Reflexion bzw. Emission der kompletten Absorberschichtsysteme. Durch Aufbringen des Absorberschichtsystems steigt die Emission des Gesamtschichtsystems um etwa 2,5% an.

Die Schichtsysteme mit einer Aluminium IR-Reflektorschicht bzw. die Schichtsysteme mit einer zusätzlichen Diffusionsbarriereschicht zwischen Edelstahlsubstrat und Aluminiumschicht weisen die höchste Reflexion bzw. niedrigste Emission auf. Das Absorberschichtsystem mit dem IR-Schichtsystem aus CrN und Aluminium weist allerdings eine Emission größer 10% auf. Dieses IR-Reflektorschichtsystem wies allerdings schon eine signifikant höhere Emission ohne Absorberschichtsystem auf (siehe A1.3). Die Schichtsysteme, bei denen die IR-Reflektorschicht nur aus Nickellegierungen gebildet ist, weisen nur eine etwas geringere Emission wie reines Edelstahlsubstrat ohne IR-Reflektorschicht auf. Dabei ist die Reflexion des Schichtsystems mit NiAl etwas geringer, wie bei dem mit NiV, was eventuell auf den etwas höheren Legierungsanteil im Falle von NiAl zurückzuführen ist, der zu einer Reduktion der IR-Reflexion des Nickels führt.

Die Reflexion im Infraroten des Absorberschichtsystems mit Molybdän IR-Schicht ist etwas geringer wie bei den Schichtsystemen mit Aluminium IR-Reflektor, da die Reflexion der aufgesputterten Molybdänschicht im Infraroten etwas geringer ist, wie von der aufgesputterten Aluminiumschicht (siehe Abbildung 18). Dies resultiert in einem thermischen Emissionsgrad, der mit einem Wert von 6,3% höher ist wie bei einer Aluminium IR-Reflektorschicht aber geringer wie bei den getesteten Nickellegierungen. Damit ist dieser noch akzeptabel für eine selektive Absorberbeschichtung.

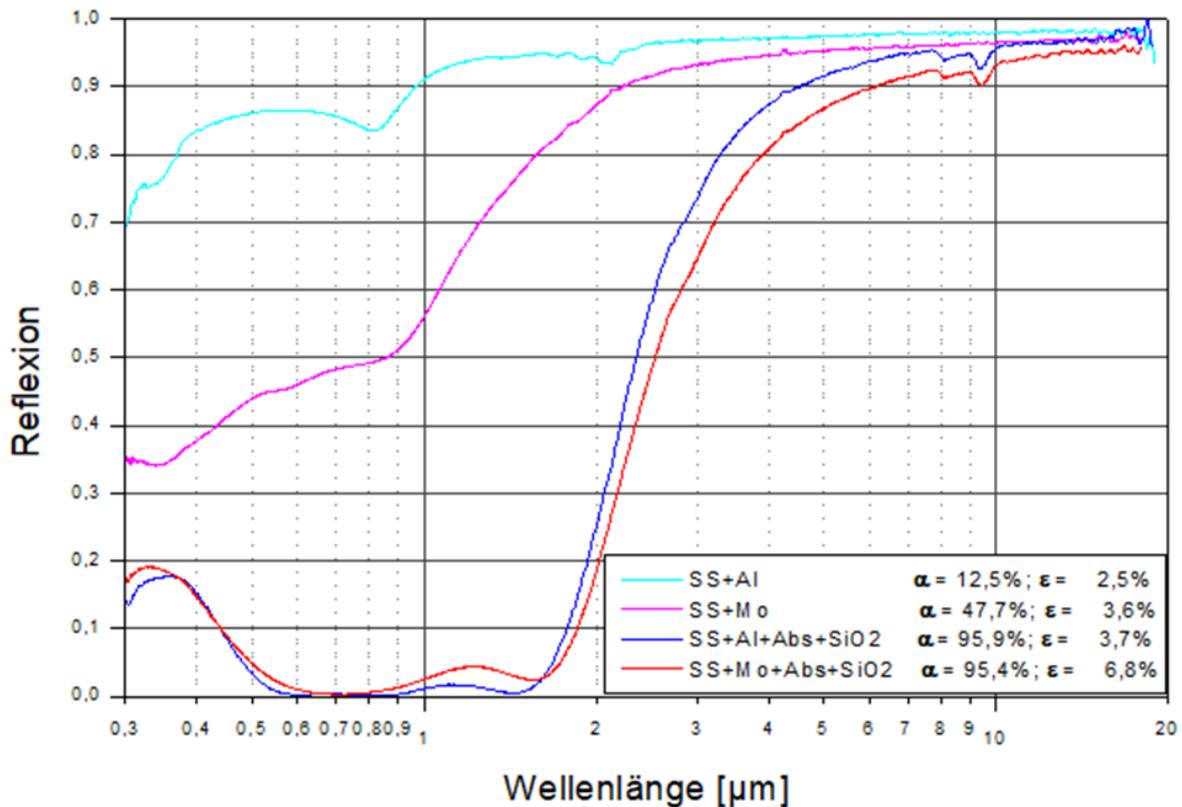
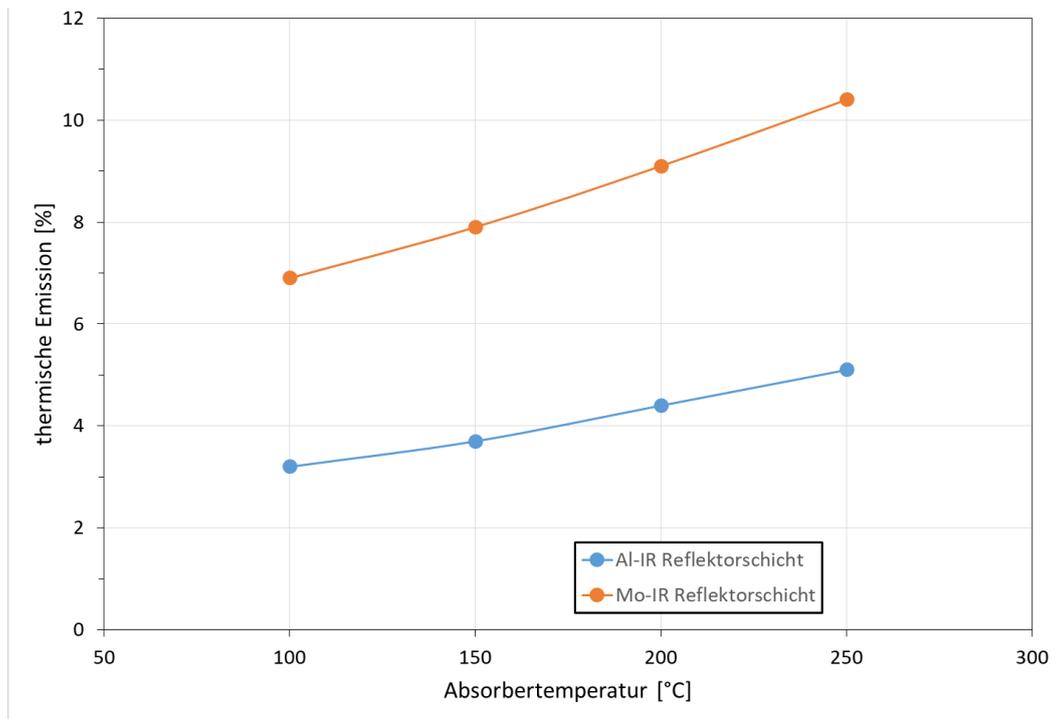


Abbildung 18: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit IR-Reflektorschicht aus Molybdän und zum Vergleich mit einer IR-Reflektorschicht aus Aluminium auf Edelstahl.

Aus den Reflexionsspektren der Absorberschichten mit Al und Mo IR Spiegelschicht wurde vom SPF die Temperaturabhängigkeit der thermischen Emission berechnet, um die IR-Verluste bei höheren Arbeitstemperaturen der Absorberrohre abschätzen zu können (siehe Abbildung 19).



*Abbildung 19: Abhängigkeit der thermischen Emission von der Absorbtemperatur des Absorberschichtsystems mit Al und Mo IR-Spiegelschicht.*

## Degradationstests

Um die Eignung der Schichtsysteme für den Einsatz in nicht evakuierten wie auch in evakuierten Absorberrohren beurteilen zu können, wurden bei Almeco und beim SPF Temperatur- und Kondensationstests durchgeführt.

Da nach Berechnungen des SPF in den ULA Absorberrohren Stagnationstemperaturen von etwa 300°C an Atmosphäre und bis zu 400°C im Vakuum erreicht werden können, wurden die hergestellten Schichtsysteme folgenden Degradationstests unterzogen. Um die Eignung in einem nicht evakuierten Absorberrohr beurteilen zu können, wurden bei Almeco Temperaturtests bei 291°C und zusätzlich Kondensationstests bei 40°C/95% r.H./45°C durchgeführt. Die Reflexion mit einem VIS-NIR Omega 20 Spektrometer gemessen und die Emission mit einem INGLAS TIR 100-2 Emissionsmeter bestimmt.

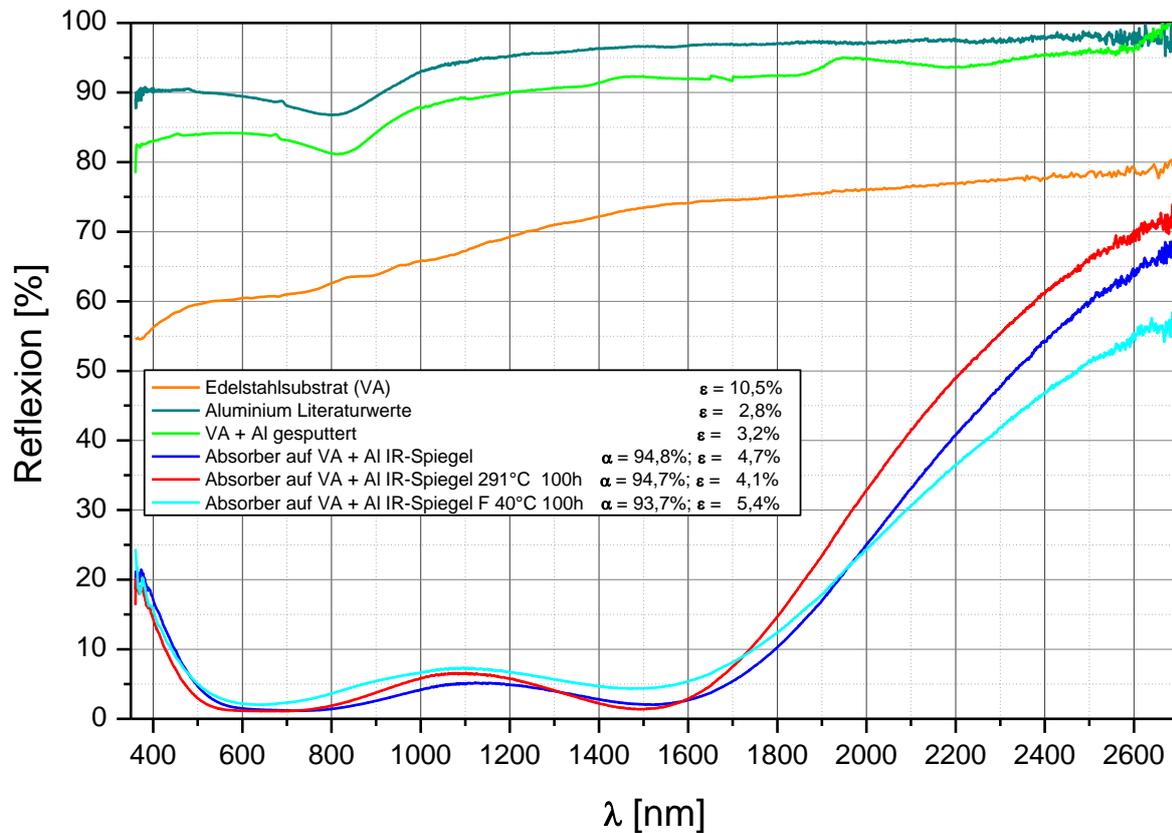


Abbildung 20: Reflexionsspektren von dem Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Spiegelschicht auf Edelstahl im Neuzustand, nach einem Temperaturtest bei 291°C und nach einem Kondensationstest bei 40°C/95% r.H./45°C über je 100h.

In Abbildung 20 sind die Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium vor und nach einem Temperaturtest bei 291°C und einem Kondensationstest bei 40°C/95% r.H./45°C über je 100 Stunden gezeigt. Die Spektren und die optischen Kennwerte haben sich nach den Tests nicht signifikant verändert, d. h. das Schichtsystem ist unter diesen Bedingungen sehr stabil.

## Analyse des Verhaltens des Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Spiegelschicht beim Ausheizprozess

Schon während des Ausheizens der Absorberrohre beim Evakuieren wird die Absorberschicht einer Temperaturbelastung unterzogen. Beim Ausheizen wird die gesamte Vakuumröhre aufgeheizt und gleichzeitig auf 0,08mbar evakuiert. Die Absorberröhre beträgt dabei für etwa 30 Minuten ca. 400°C. Um festzustellen, ob sich die optischen Eigenschaften der Absorberschicht dabei ändern, wurden die Absorber vor und nach dem Evakuierungsprozess vermessen. Dazu wurden die Absorberröhren wieder geöffnet und die Absorber wurden zum Vermessen entnommen.

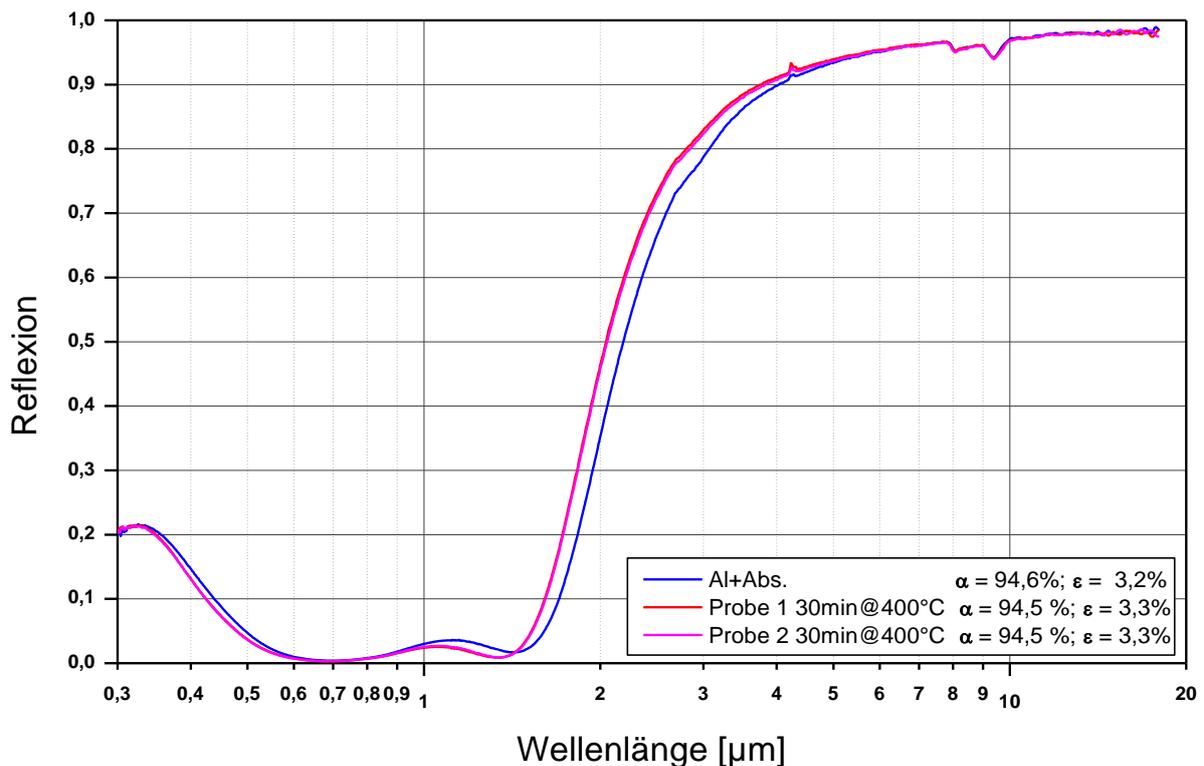


Abbildung 21: Reflexionsspektrum des Absorbermaterials vor und nach dem Ausheizprozess im Absorberrohr.

In Abbildung 21 sind die Reflexionsspektren des Absorbersystems mit Aluminium Infrarotspiegel vor und nach dem Ausheizprozess aufgetragen. Die optischen Eigenschaften haben sich nach dem Evakuierungsprozess nicht signifikant verändert. Damit ist dieses Absorberschichtsystem geeignet, die Herstellung des Absorberrohres ohne Veränderung zu überstehen.

## Langzeit Temperaturtests bei 400°C im Vakuum und an Luft

Für die Prüfung auf Eignung in evakuierten Absorberrohren wurden die Schichtsysteme Degradationstests im Vakuum und zum Vergleich an Luft bei 400°C beim SPF unterzogen. Der genaue Degradationsverlauf der einzelnen Schichtsysteme ist im AP7.1 vom SPF dargestellt.

Die Reflexionsspektren dieses Schichtsystems nach Alterung bei 400°C an Luft und im Vakuum sind in Abbildung 22 aufgetragen. Der Absorptionsgrad des Schichtsystems ist mit über 95% sehr gut und ist während des Temperaturtests sowohl an Luft wie auch im Vakuum sehr stabil. Das Reflexionsspektrum unterhalb 1µm verändert sich nicht signifikant.

Allerdings nimmt die Reflexion im Infraroten oberhalb 2µm schon nach 5h signifikant ab (siehe Abbildung 22), was zu einem starken Anstieg der thermischen Emission auf über 16% führt. Damit setzt bei 400°C anscheinend ein Mechanismus ein, der zu einem schnellen Anstieg der Emission führt, der so bei 291°C nicht beobachtet wurde. Nach den Untersuchungen vom SPF (siehe A7.1) bleibt der Emissionsgrad aber nach der schnellen Veränderung nach 5 Stunden stabil auf hohem Niveau.

Es ist auffällig, dass die Veränderungen an den Spektren des Gesamtschichtsystems wie auch der IR-Reflektorschicht aus Aluminium ohne Absorberschichten nach den einzelnen Degradationsschritten an Luft und im Vakuum ähnlich sind. Das deutet darauf hin, dass die Degradation eher auf Diffusionsvorgänge wie auf eine Oxidation der Aluminiumschicht zurückzuführen ist.

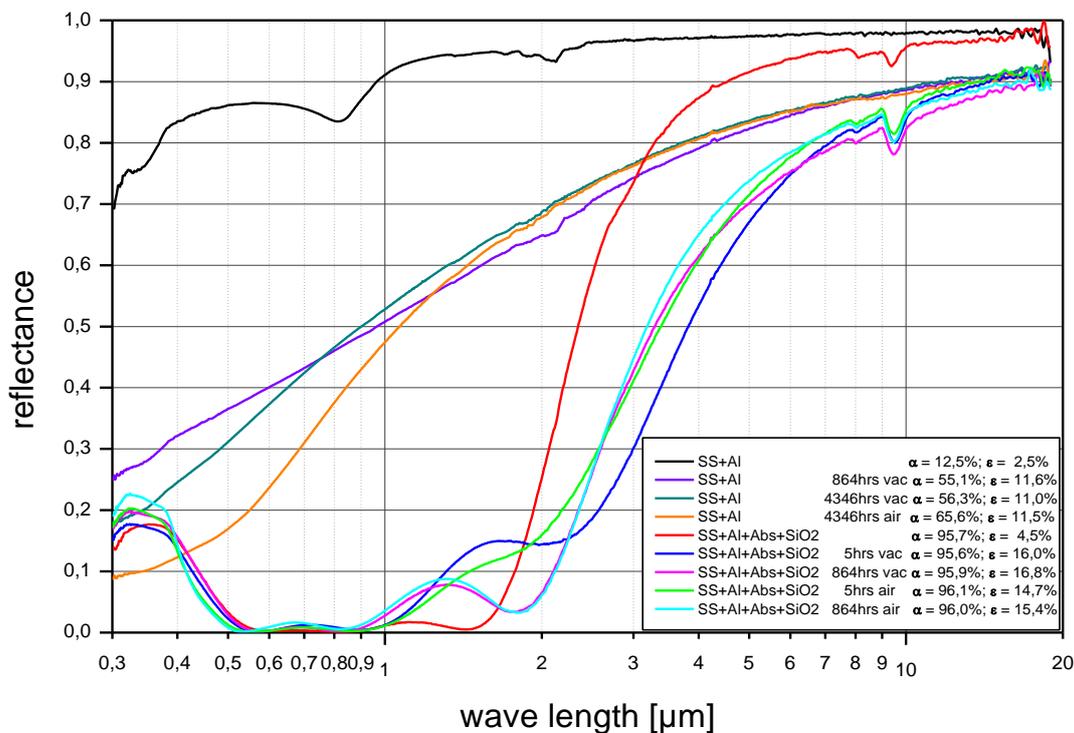


Abbildung 22: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium ohne und mit Absorberschicht vor und nach der Alterung bei 400°C an Luft und im Vakuum.

Aufgrund des schnellen Anstiegs der Emission bei 400°C im Vakuum scheinen Schichtsysteme auf Edelstahl mit reiner Aluminium IR-Reflektorschicht nur bedingt für den Einsatz in evakuierten Absorberrohren geeignet zu sein. Um dies im realen Einsatz zu verifizieren, wurden Absorberrohre aus diesem Absorbermaterial hergestellt und nach Stagnationstests beim SPF vermessen (siehe A7.2).

Die optischen Eigenschaften des Absorberschichtsystems mit Aluminium IR-Reflektorschicht haben sich nach der Stagnation bei durchschnittlich 300°C über 100 Tage nicht signifikant verändert (siehe Abbildung 23). Das steht im Widerspruch zu den Temperaturtests bei 400°C im Vakuum. Anscheinend sind diese Tests zu hart und repräsentieren die Degradation der Absorberbeschichtung in der Vakuumröhre unter Stagnation nicht, da die reale Stagnationstemperatur nur etwa 300°C beträgt.

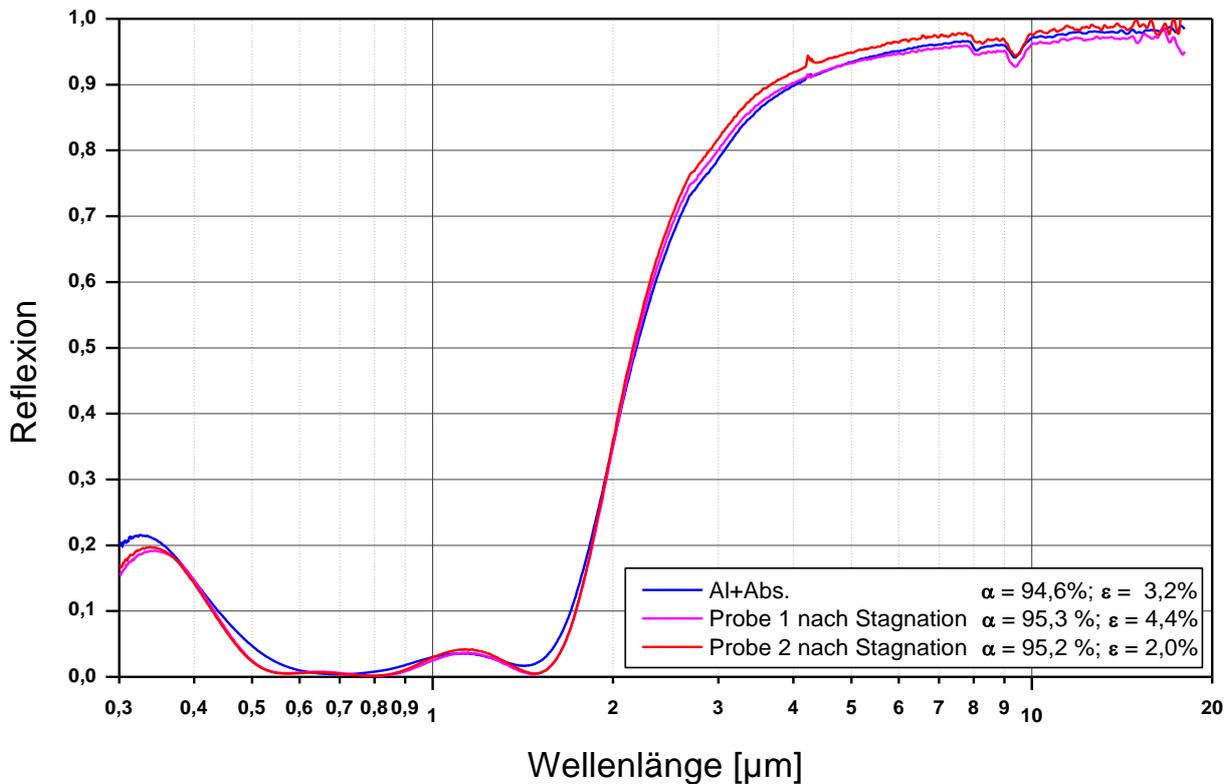


Abbildung 23: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium im Neuzustand und nach Stagnation im Vakuum.

Daher wurden Absorberschichtsysteme mit IR-Reflektorschichtsystemen mit zusätzlicher Diffusionsbarriereschicht unter der Aluminium IR-Reflektorschicht und die Nickel basierten Schichtsysteme als Alternative untersucht. Diese Schichtsysteme wurden beim SPF ebenfalls Temperaturtests bei 400°C an Luft und im Vakuum unterzogen (siehe A7.1). Der genaue Degradationsverlauf der einzelnen Schichtsysteme ist im A7.1 dargestellt.

Zur besseren Übersicht sind im Folgenden die Reflexionsspektren der IR-Reflektorschichtsysteme ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden (nach dieser Zeit wurde bei den meisten Schichtsystemen keine signifikante Veränderung mehr festgestellt) aufgetragen (siehe Abbildung 24 bis Abbildung 30).

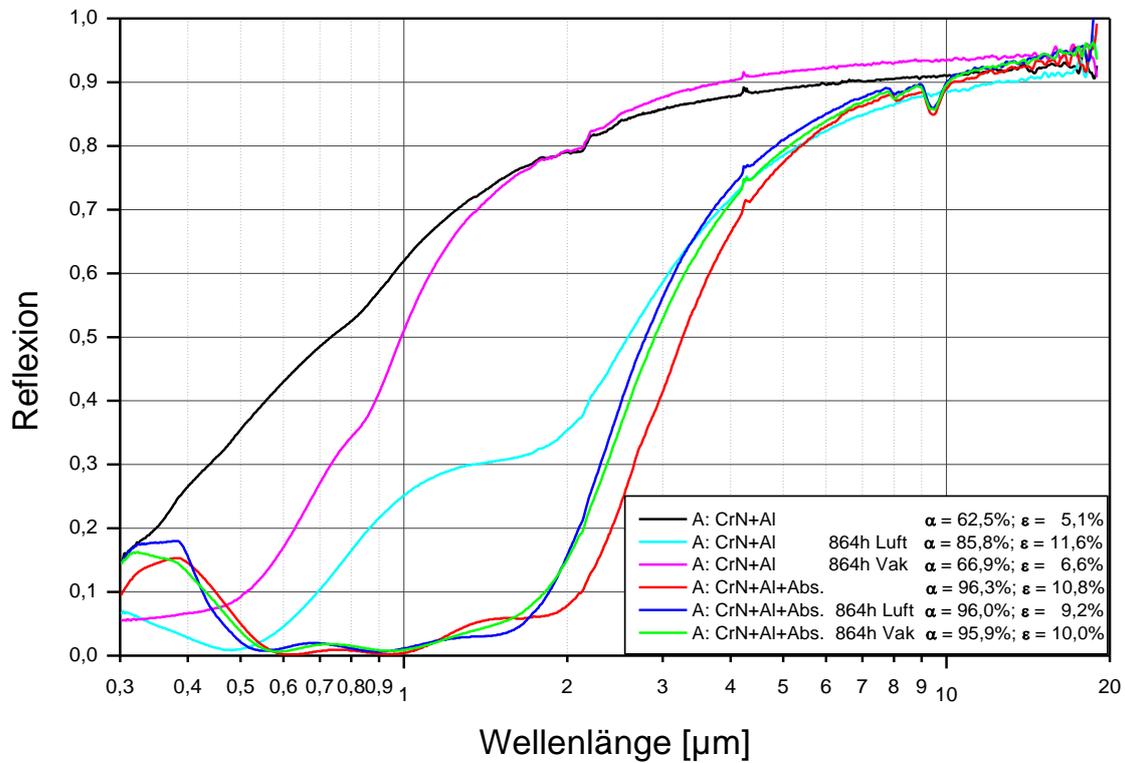


Abbildung 24: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems A aus CrN und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

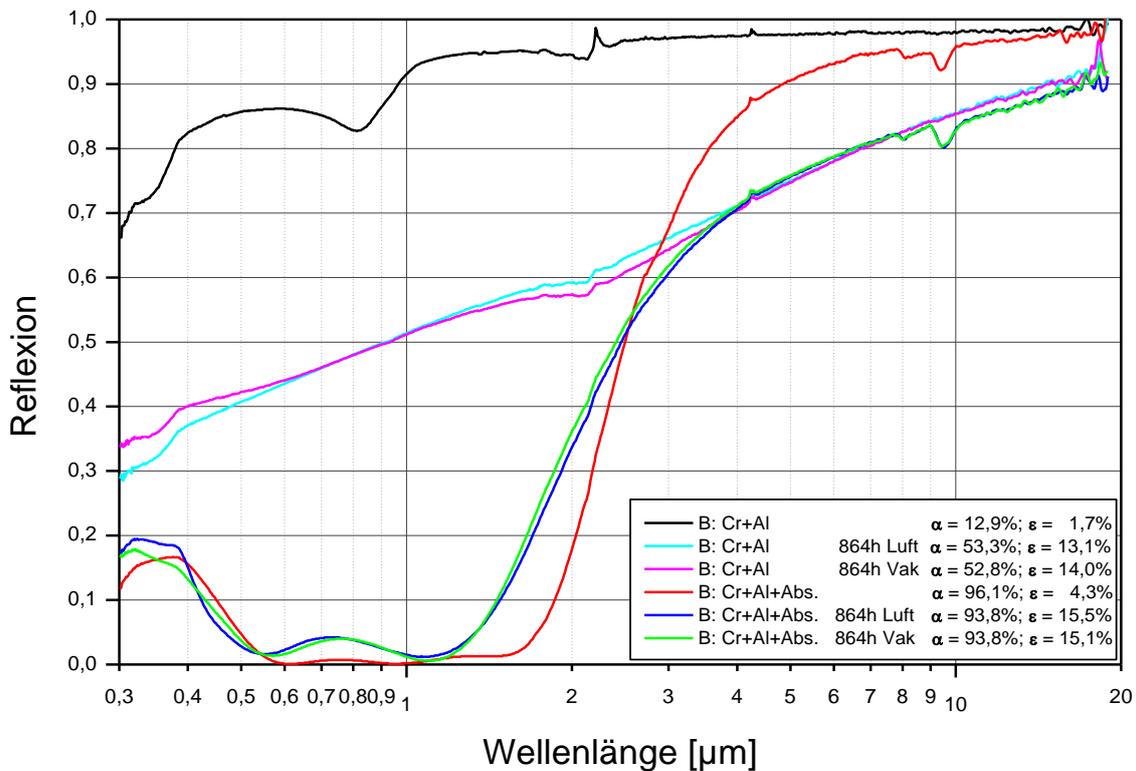


Abbildung 25: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems B aus Chrom und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

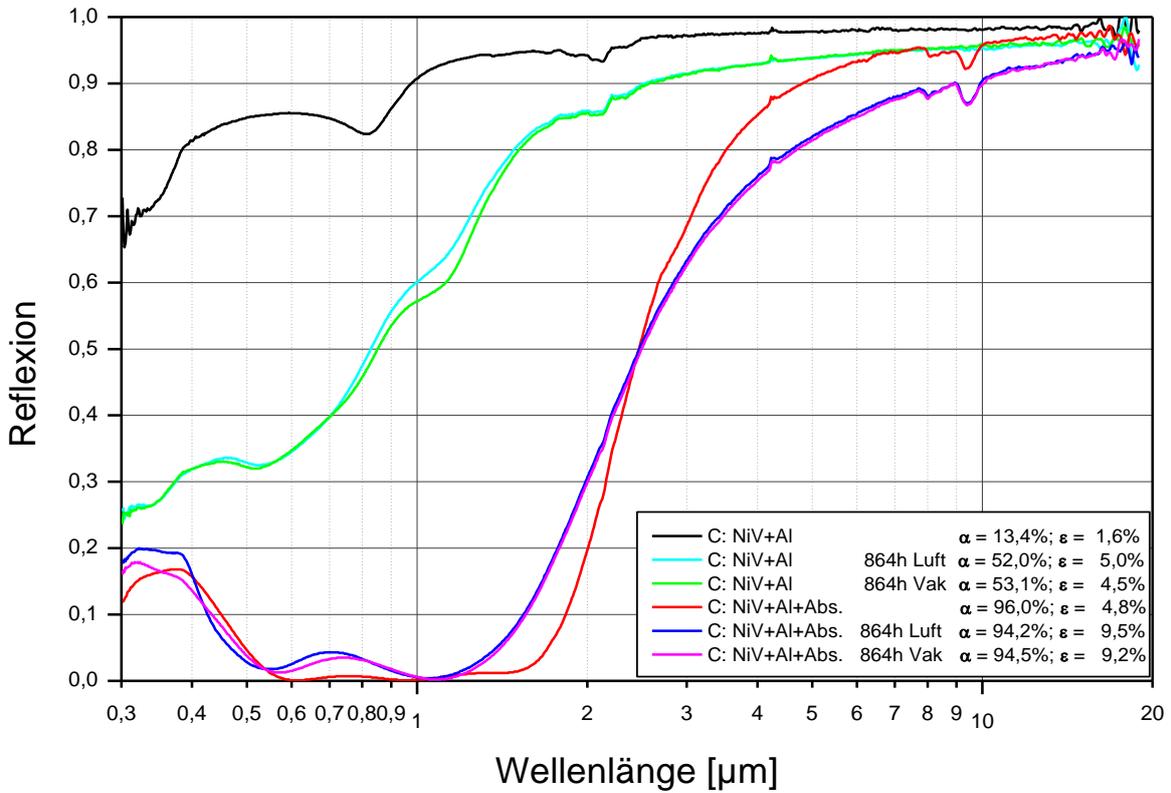


Abbildung 26: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems C aus NiV und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

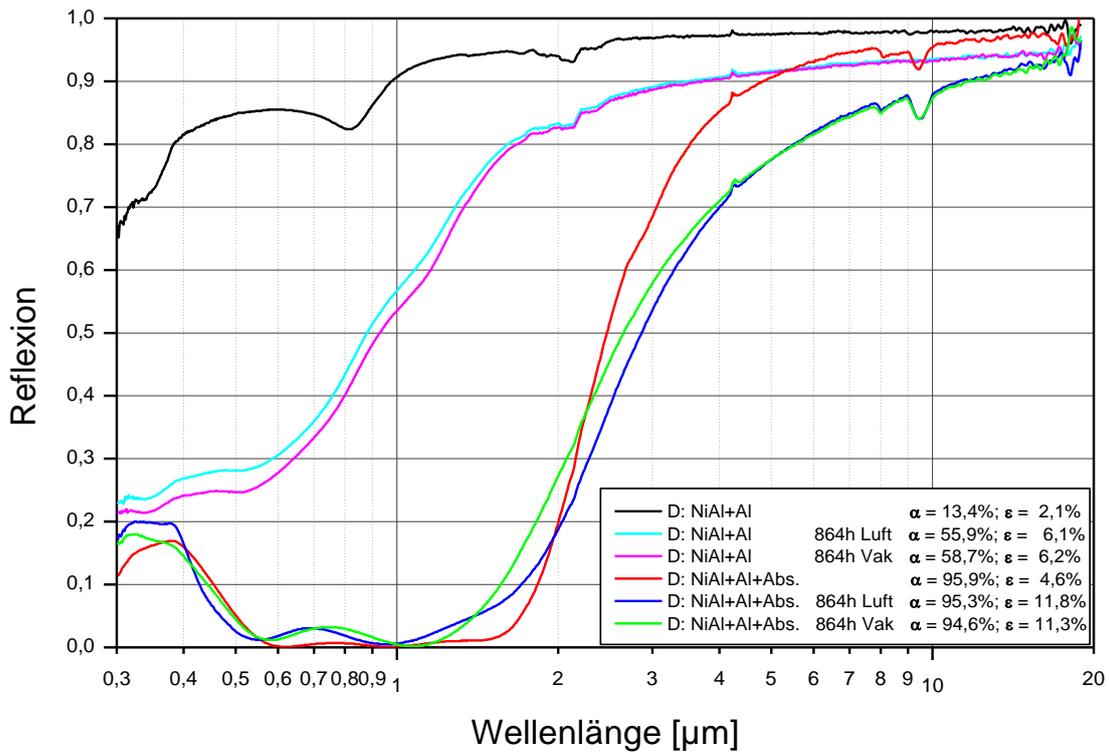


Abbildung 27: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems D aus NiAl und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

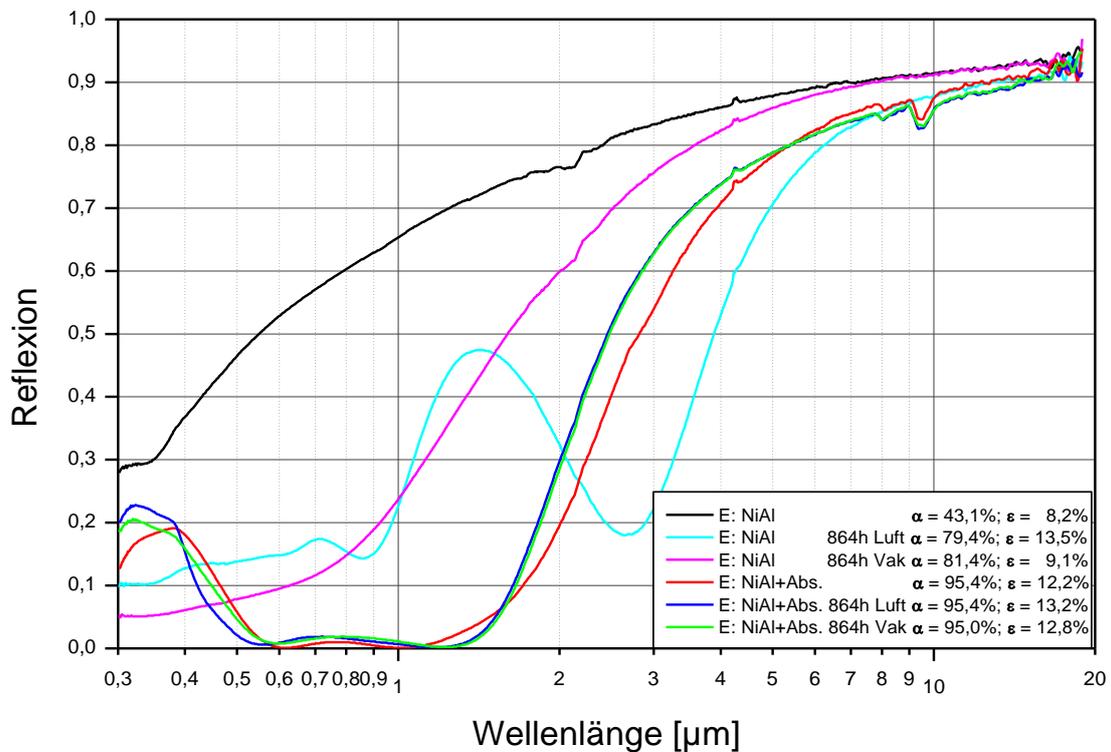


Abbildung 28: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems E aus NiAl ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

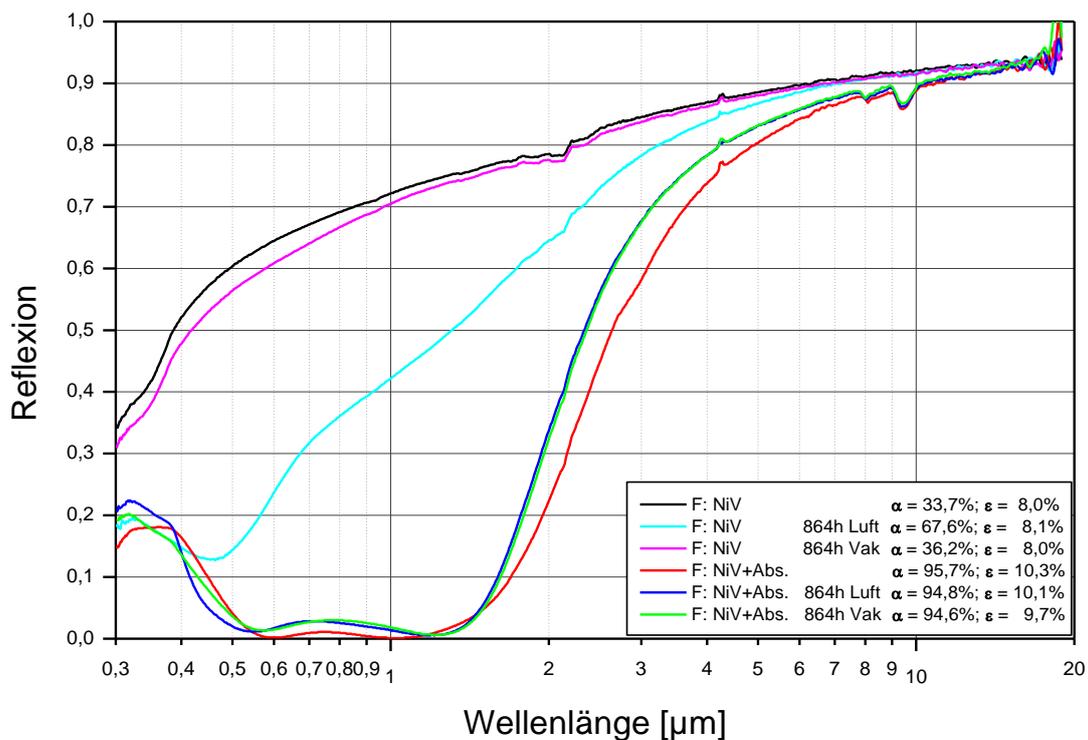


Abbildung 29: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems F aus NiV ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

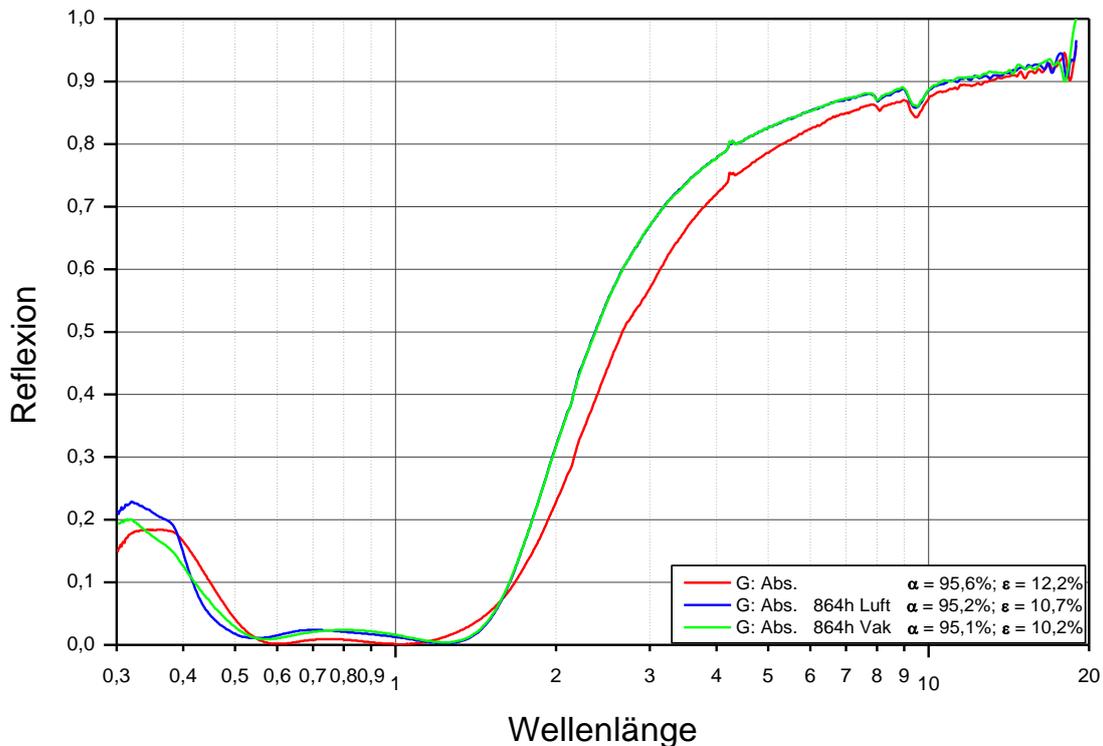


Abbildung 30: Reflexionsspektren des kompletten Absorberschichtsystems auf Edelstahlsubstrat ohne IR-Reflexionschichtsystem vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Absorptionsgrad aller Schichtsysteme ist sowohl im Vakuum wie auch an Luft sehr stabil. Bei dem IR-Schichtsystem aus CrN und Aluminium Schicht bleibt der Absorptionsgrad im Test über 2500 Stunden an Luft konstant auf einem Wert von etwa 96% und im Vakuum nimmt er nur geringfügig ab (siehe A7.1). Auch bei Verwendung von NiAl als IR-Reflektorschicht ist der Absorptionsgrad sehr stabil sowohl an Luft wie auch im Vakuum.  
Selbst bei dem am schnellsten degradierenden Schichtsystem mit einem Cr-Al IR-Reflektorschichtsystem nimmt der Absorptionsgrades sowohl im Vakuum wie auch in Luft nach 2500 Stunden nur um 3% ab. Die Abnahme des Absorptionsgrades stagniert nach etwa 500 Stunden bei allen Schichtsystemen.
- Da der Degradationsverlauf sowohl des Absorptionsgrades wie der Emission im Vakuum wie auch an Luft bei den kompletten Absorberschichtsystemen nahezu gleich ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Degradation im Wesentlichen nicht durch Oxidations- sondern durch Diffusionsvorgänge bestimmt wird.  
Betrachtet man dagegen die Veränderung der Spektren der IR-Reflektorschichtsysteme ohne Absorberschichten B, C, D und E so fällt auf, dass die Systeme mit Diffusi-

onsbarriereschicht und Aluminiumschicht sich ähnlich an Luft wie auch im Vakuum verändern (IR-Reflektorschichtsystem A bildet eine Ausnahme). Bei den Nickellegierungen ist die Degradation an Luft wesentlich stärker wie im Vakuum.

Das deutet darauf hin, dass die Aluminiumschicht die darunterliegende Nickellegierung vor Degradation schützt.

- Da die Absorberlayer über dem IR-Reflexionssystem in allen Fällen gleich sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Diffusionsvorgänge im Wesentlichen vom IR-Reflexionssystem bestimmt werden.
- Auffällig ist, dass sich beim Schichtsystem (G) bei dem die Absorberschichten direkt auf das Edelstahlsubstrat abgeschieden wurden, der Absorptionsgrad über 2500 Stunden sowohl in Luft wie auch im Vakuum kontinuierlich abnimmt, während die Emission nahezu konstant bleibt. Das deutet darauf hin, dass es eine Diffusion vom Edelstahl in die Absorberschicht stattfindet. Vergleicht man dies mit dem Schichtsystem (A) mit dem CrN-Al IR-Reflexionsschichtsystem bei dem sich der Absorptionsgrad auch nach 2500 Stunden nicht signifikant ändert, kann man daraus schließen, dass die CrN Schicht eine effektive Diffusionsbarriere darstellt.
- Alle anderen Schichtsysteme mit einem IR-Reflektorschichtsystem aus einer Diffusionsbarriereschicht und einer Aluminiumschicht (B, C, D) zeigen wie das Schichtsystem (H) mit einer einzelnen Aluminium IR-Schicht einen starken Anstieg des Emissionsgrades schon nach 5 Stunden sowohl mit als auch ohne Absorberschichtsystem (siehe A7.1). Dies ist nochmal ein Hinweis darauf, dass die Degradation durch Diffusionsvorgänge bestimmt wird.

Demnach weisen die Schichtsysteme mit dem CrN-Al und dem NiV IR-Reflektor die höchste thermische Stabilität auf. Allerdings ist der Ausgangswert der thermischen Emission mit etwa 10% im Neuzustand nur knapp geringer als bei dem Absorberschichtsystem (G), das direkt auf Edelstahl ohne IR-Reflektorschichtsystem abgeschieden wurde, wo der Emissionsgrad etwa 12% beträgt.

Die anderen untersuchten Schichtsysteme mit Diffusionsbarriere- und Aluminiumschicht wiesen zwar im Neuzustand eine Emission kleiner 5% auf, allerdings zeigten sie wie die reinen Aluminiumschichten in den 400°C Temperaturtests einen schnellen Anstieg in der Emission auf Werte über 10%.

Daher wurde entschieden, auch Molybdän als IR-Schicht auszuprobieren, welches zwar teurer als die anderen IR-Schichtsysteme ist, sich aber schon in Vakuumabsorberrohren aus Edelstahl für Solarthermischen Kraftwerken mit Arbeitstemperaturen über 400°C erfolgreich als IR-Reflektorschicht bewährt hat [Hil09], [Ken02].

Um zu untersuchen, ob Absorberschichtsysteme mit Molybdän als IR-Reflektorschicht für den Einsatz in nicht evakuierten Absorberrohren geeignet sind, wurden die Schichtsysteme ebenfalls Temperaturtests bei 291°C und Kondensationstests bei 40°C/95% r.H./45°C unterzogen. In Abbildung 31 sind die Reflexionsspektren und die optischen Kennwerte vor und nach Degradation gezeigt.

Im Feuchtetest mit Kondensation sind bei 40°C/95% r.H./45°C wurde bereits nach 100h ein signifikanter Anstieg der thermischen Emission um mehr als 5% festgestellt. Bei einem Feuchtetest bei 60°C/95% r.H./65°C wurde ein noch größerer Anstieg der thermischen Emission auf einen Wert von etwa 15% ebenfalls schon nach 96h festgestellt (siehe Abbildung 32 und A7.1) beobachtet.

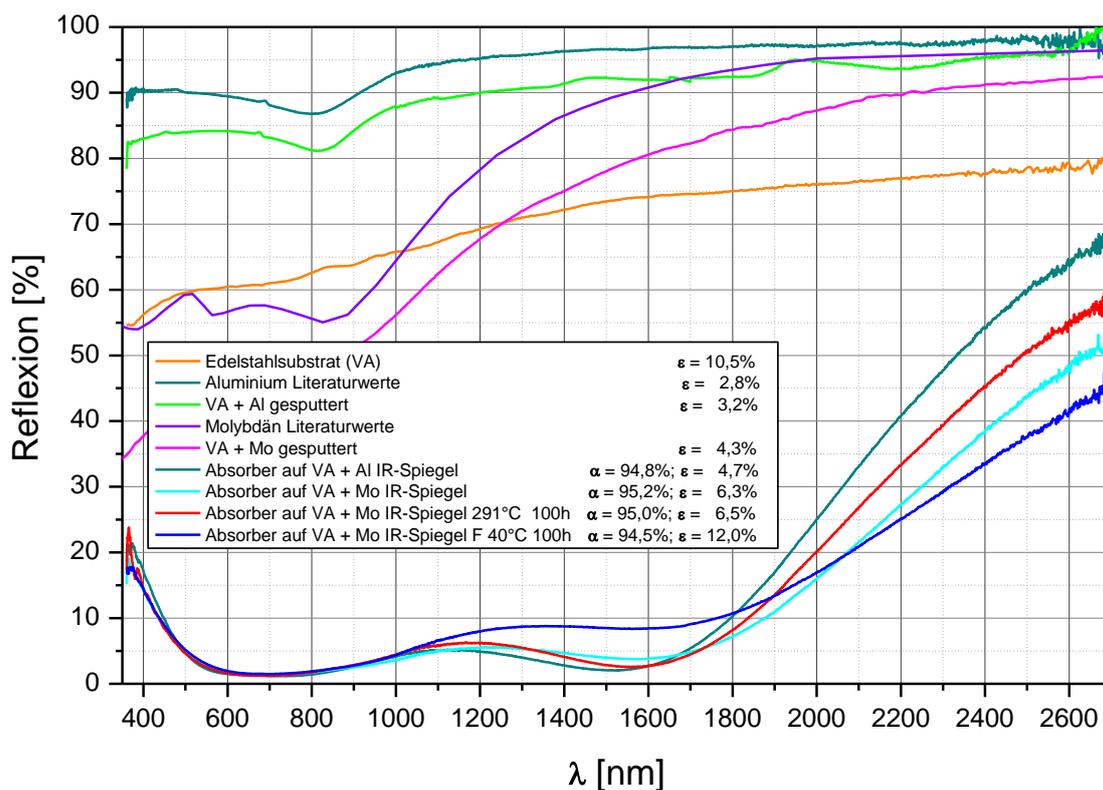


Abbildung 31: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Molybdän im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 291°C und Kondensationstest 40°C/95% r.H./45°C für 100 Stunden. Zum Vergleich ist das Reflexionsspektrum der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Aluminium aufgetragen.

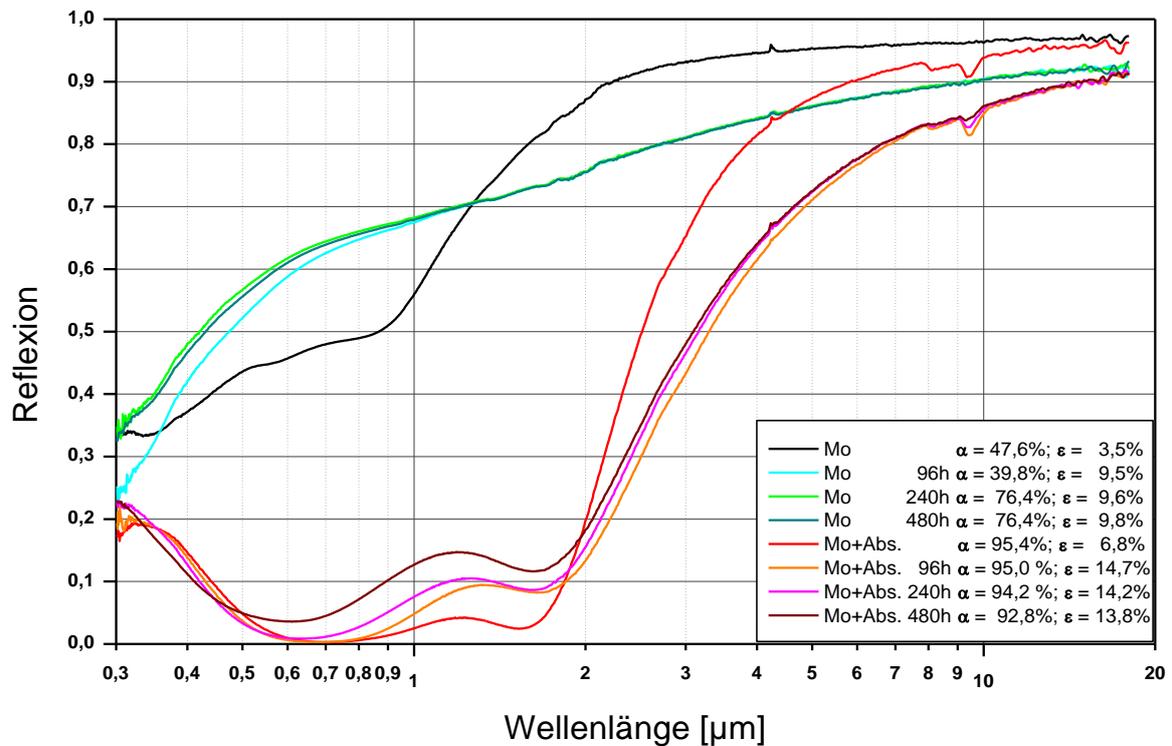


Abbildung 32: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Molybdän im Neuzustand und nach Kondensationstest 60°C/95% r.H./65°C.

### Analyse des Verhaltens des Absorberschichtsystem mit Molybdänspiegel IR-Spiegelschicht beim Ausheizprozess

Das Verhalten des Absorbersystems mit Molybdän Infrarotreflektorschicht im Ausheizprozess wurde unter den gleichen Bedingungen wie das Absorbersystem mit Aluminium Infrarotreflektorschicht untersucht.

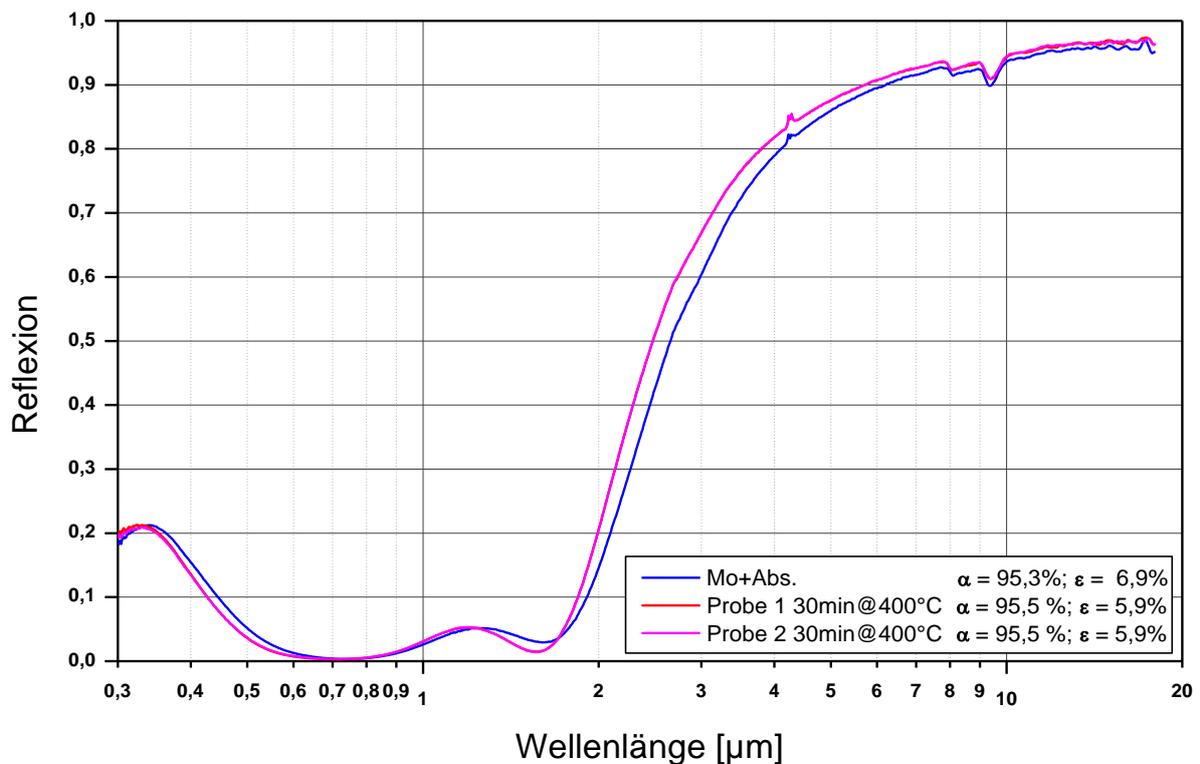


Abbildung 33: Reflexionsspektrum des Absorbermaterials mit Molybdän Reflektorschicht vor und nach dem Ausheizprozess im Absorberrohr.

In Abbildung 33 ist das Reflexionsspektrum des Absorbermaterials mit Molybdän Reflektorschicht vor und nach dem Ausheizprozess im Absorberrohr aufgetragen. Die optischen Eigenschaften ändern sich nicht signifikant. Daher ist dieses Schichtsystem für den Produktionsprozess der Absorberrohre geeignet.

### Langzeit Temperaturtests bei 400°C im Vakuum und an Luft

Daneben wurde das Schichtsystem mit Molybdän IR-Reflektorschicht beim SPF auch einem Temperaturtest bei 400°C an Luft und im Vakuum unterzogen (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35). Selbst nach 1000 Stunden wurde kein Anstieg des thermischen Emissionsgrades beobachtet. Auch beim Absorptionsgrad wurde nach 1000h keine signifikante Veränderung an Luft festgestellt. Nur im Vakuum wurde nach 525 Stunden eine leichte Abnahme des Absorptionsgrades um 1% beobachtet. Bei der anschließenden Fortsetzung des Tests über 1500 Stunden wurde keine weitere Abnahme des Absorptionsgrads beobachtet (siehe A7.1).

Vor allem die hohe Temperaturstabilität dieses Schichtsystems an Luft ist bemerkenswert, da die Proben mit Molybdänschicht auf Edelstahlsubstrat ohne Absorberschichtsystem einen erheblichen Anstieg der Emission auf Werte über 16% zeigten. Die Interferenzeffekte im Spektrum deuten auf eine starke Oxidation der Molybdän Schicht hin, da Molybdänoxid transparent

ist. Aus der Literatur ist bekannt, dass Molybdän bei erhöhten Temperaturen an Luft leicht oxidiert. Daher wird in der Literatur berichtet, dass sich Molybdän als IR-Reflektorschicht nur für evakuierte Absorberrohre eignet.

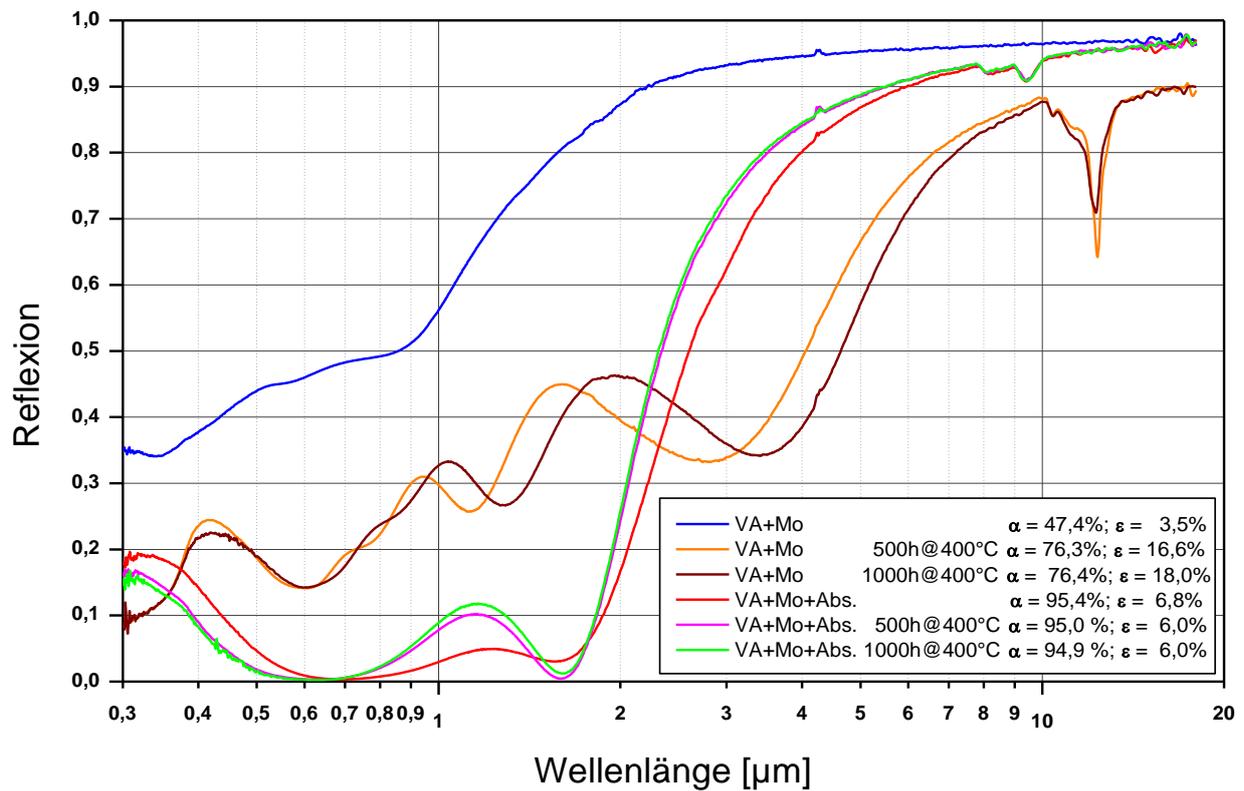


Abbildung 34: Spektren der Molybdän IR-Reflektorschicht auf Edelstahl und des kompletten Absorberschichtsystems jeweils im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 400°C an Luft. Daneben sind die aus den Spektren berechneten optischen Kennwerte aufgelistet.

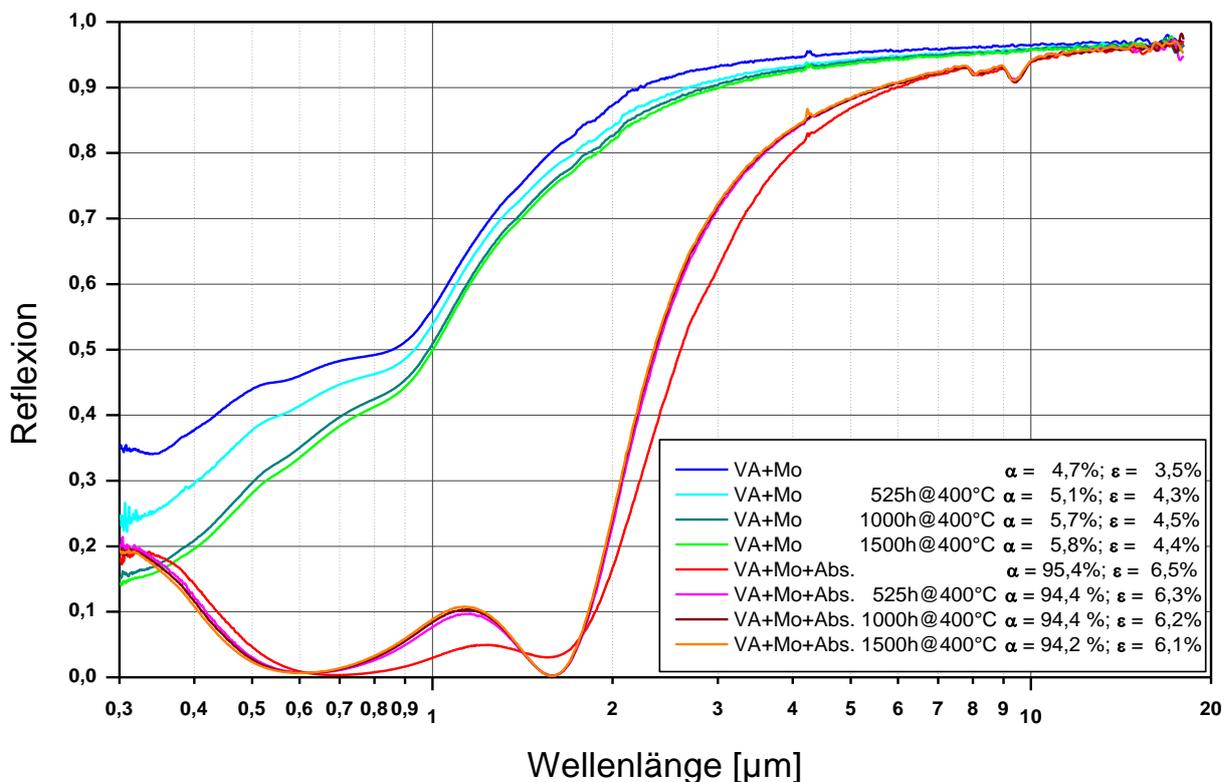


Abbildung 35: Spektren der Molybdän IR-Reflektorschicht auf Edelstahl und des kompletten Absorberschichtsystems jeweils im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 400°C im Vakuum. Daneben sind die aus den Spektren berechneten optischen Kennwerte aufgelistet.

Das sich die Spektren des Gesamtschichtsystems nach der Degradation an Luft und im Vakuum nicht signifikant unterscheiden, deutet darauf hin, dass die Absorberschichten die Molybdänschicht effektiv vor Oxidation schützt.

In Kombination mit den verwendeten Absorberschichten (siehe Abbildung 16) konnte somit ein selektives Absorberschichtsystem mit Molybdän IR-Reflektorschicht entwickelt werden das auch an Luft bis 400°C stabil ist.

Da aber dieses Absorberschichtsystem einen signifikanten Anstieg der Emission unter Feuchteeinwirkung zeigte, ist es nur bedingt für den Einsatz in nicht evakuierten Absorberrohren einsatzfähig.

Für den Einsatz in den evakuierten ULA Absorberrohren mit Stagnationstemperaturen bis 400°C ist dieses Absorberschichtsystem dagegen hervorragend geeignet, da in einem evakuierten Röhrenkollektor keine Feuchtigkeit auftritt. Daher wurde entschieden, Molybdän als IR-Reflektorschicht für die evakuierten ULA Absorberrohren zu verwenden.

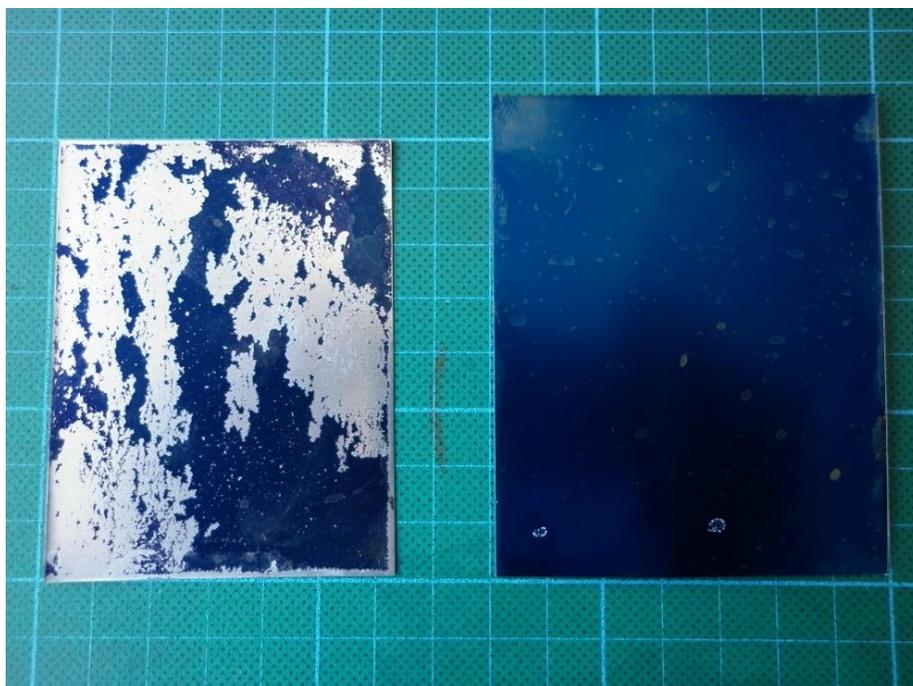
Bei nicht evakuierten Absorberrohren sollte besser das Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Reflexionsschicht verwendet werden, da hier im 40°C/95% r.H./45°C Kondensationstest

keine signifikante Veränderung der optischen Kennwerte beobachtet wurde. Daneben ist bei den evakuierten Absorberrohren ohne Sekundärspiegel (nicht der innenliegende Spiegel) auch nur eine Stagnationstemperatur von maximal 300°C zu erwarten. Bei diesen Temperaturen wurde kein signifikanter Anstieg der Emission beobachtet.

### **Korrosionstests**

Daneben wurden Korrosionstests an diesen beiden Schichtsystemen H + M (siehe Tabelle 1) durchgeführt, bei denen die Absorberproben für 24h in einer Salzlösung mit 5% NaCl gelagert wurden.

Bei dem Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Reflektor gab es Probleme mit der Ablösung des gesamten Schichtsystems, wohingegen bei dem Schichtsystem mit Molybdän IR-Reflektorschicht keine Veränderung der Schicht und keine Schichtablösung beobachtet wurde (siehe Abbildung 36).



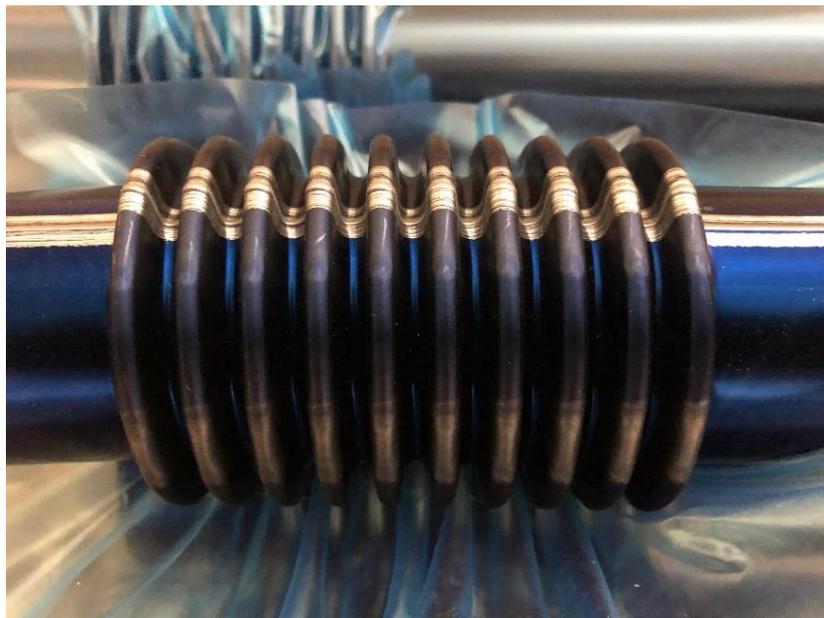
*Abbildung 36: Absorberschichtsystem mit Aluminium (H, links) und Molybdän-IR-Reflektorschicht (M, rechts) nach einem Tag Korrosionstest in Salzlösung mit 5% NaCl.*

Daher sollte das Schichtsystem mit Aluminium IR-Reflektorschicht nicht in nicht evakuierten Absorberrohren in Gegenden mit starker korrosiver Belastung eingesetzt werden.

## A4 Verarbeitungstests des neuen Edelstahlabsorbers (airwasol/Tubacon)

Die verschiedenen Absorberschichtsysteme auf Edelstahlsubstrat wurden zu Verarbeitungstests an Tubacon gesandt. Hier wurden die verschiedenen Fertigungsschritte beim Rohr-/Balgherstellungsprozess validiert und auf die verschiedenen Absorberschichtsysteme angepasst. Daraufhin wurden die fertigen Absorberrohre an airwasol zur Weiterverarbeitung gesandt.

Das Absorbermaterial mit Aluminium IR – Reflektorschicht und Antireflexschicht aus  $\text{SiO}_2$  konnte gut zu Rohren verarbeitet und verschweißt werden. Bei der Formung des Balges kam es zu keiner Schichtablösung (siehe Abbildung 37).



*Abbildung 37: Absorbermaterial mit Aluminium IR – Reflektorschicht und Antireflexschicht aus  $\text{SiO}_2$  nach dem Verschweißen und der Balgformung.*

Die Verarbeitung des Edelstahlabsorbermaterials mit  $\text{ZrO}_x$  Antireflexschicht war dagegen problematisch. Bei Verwendung der gleichen Schweißparameter wie bei dem Absorbermaterial mit  $\text{SiO}_2$  Antireflexschicht entstanden teilweise Löcher in der Schweißnaht (siehe Abbildung 38). Auch nach Optimierung der Schweißparameter traten noch immer Schweißprobleme auf. Vermutlich ist dafür der im Vergleich zum Siliziumdioxid wesentlich höhere Schmelzpunkt des Zirkonoxides verantwortlich. Tubacon konnte für weitere Produktionsschritte bei airwasol mit hoher Ausschussrate noch genügend Absorberrohre mit ausreichend guter vakuumdichter Schweißnaht aus den Mustercoils herstellen.



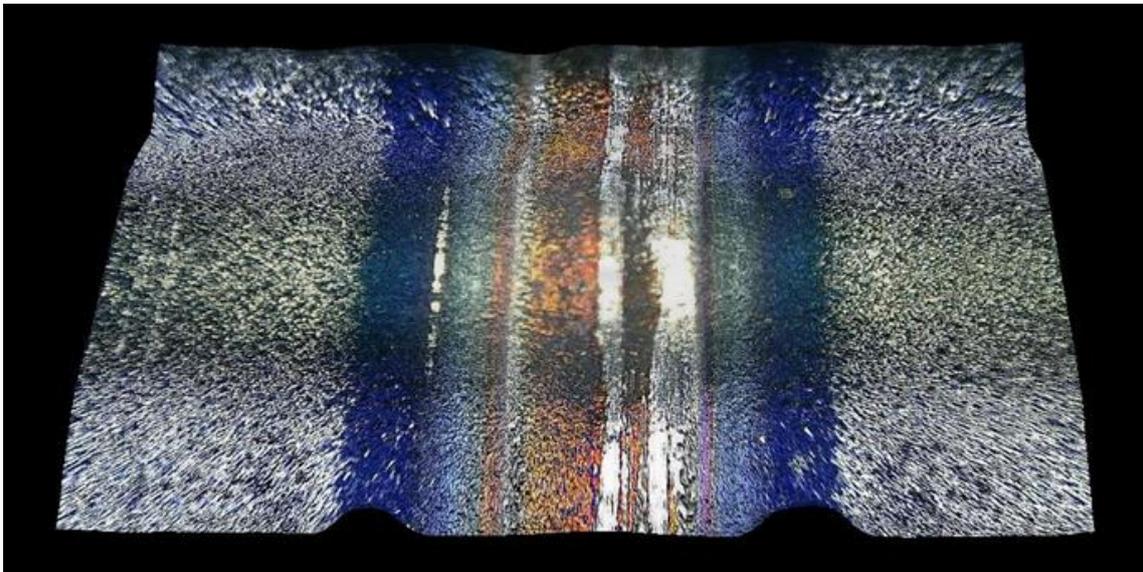
*Abbildung 38: Schweißnaht des Absorbermaterials mit ZrOx Antireflexschicht.*

Bei der Verwendung des Edelstahl Absorbermaterials mit IR-Reflektorschicht aus Molybdän kam es auch zu Schweißproblemen.

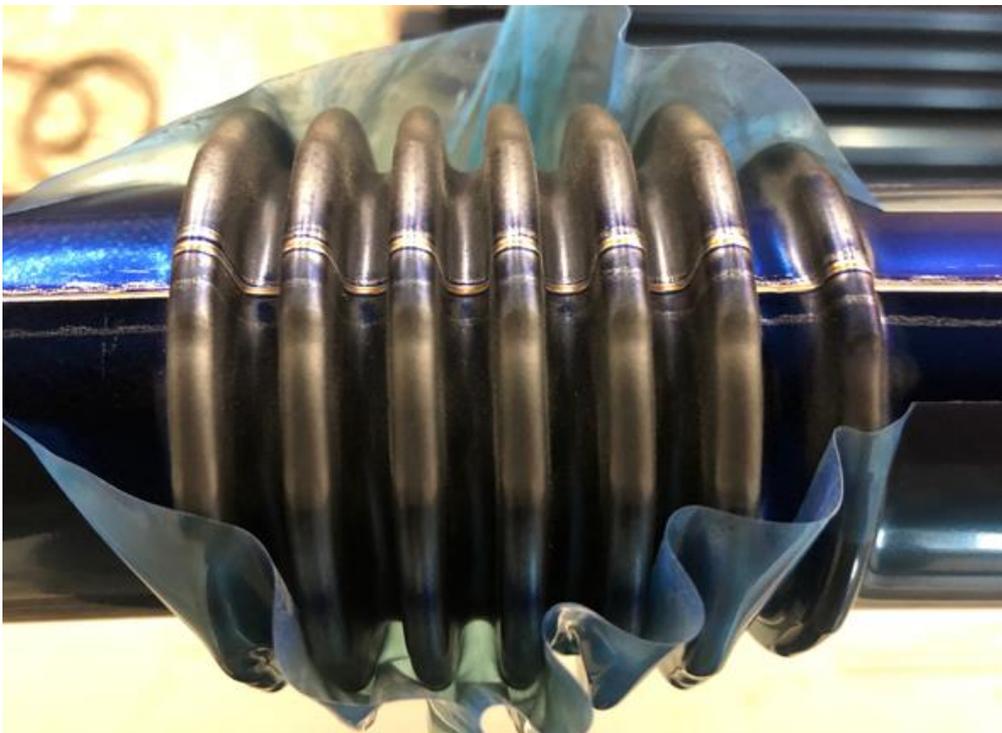
Bei der mikroskopischen Untersuchung der Schweißnaht wurde ersichtlich, dass die Schweißnaht bei der Verwendung von Aluminium als IR-Reflektorschicht blank und gleichmäßig ist (siehe Abbildung 39) während diese bei der Verwendung von Molybdän angelaufen und ungleichmäßig erscheint (siehe Abbildung 40).



*Abbildung 39: Mikroskopische Untersuchung der Schweißnaht von Edelstahlabsorbermaterial mit Aluminium IR Reflexionsschicht*



*Abbildung 40: Mikroskopische Untersuchung der Schweißnaht von Edelstahlabsorbermaterial mit Molybdän IR Reflexionsschicht*



*Abbildung 41: Absorbermaterial mit Molybdän IR – Reflektorschicht und Antireflexschicht aus SiO<sub>2</sub> nach dem Verschweißen und der Balgformung.*

Daneben kam es bei der Verwendung von Molybdän als IR-Reflektorschicht zu Schichtablösungen bei der Balgformung (siehe Abbildung 41).

Eventuell sollte daher noch eine Haftschiicht zwischen Edelstahl und Molybdän Schicht eingefügt werden oder die Dicke der Molybdän Schicht sollte reduziert werden um Schichtspannungen zu reduzieren. Eventuell könnten auch die Schweißprobleme damit reduziert werden.

Die Schichtablösung ist im Bereich des Balges eher eine ästhetische Frage. Die Ablösung setzt sich auch nicht weiter fort. Der Balg zählt nur teils zur aktiven Absorberfläche wo die Sonneneinstrahlung direkt verwendet werden kann.

## **A5 Optimierung des Schichtsystems und Optimierung der Abscheidung (Almecco)**

Vor allem bei der Abscheidung der Antireflexschicht aus Zirkonoxid gab es Optimierungsbedarf.

Es wurden weitere Abscheidungsversuche auf der industriellen Beschichtungsanlage zur Optimierung des Schichtsystems und zur Optimierung der Prozessstabilität und zur Reduktion der Produktionskosten durchgeführt. Zum einen wurde nun statt Zirkonoxid-Granulat Zirkonoxid in Form von gesinterten Würfeln eingesetzt. Dadurch konnte eine wesentlich bessere Stabilität der Aufdampfrate erreicht werden. Auch konnte die Ausnutzung des Zirkonoxid Materials im Tiegel verbessert werden, was zu einer Reduktion der Abscheidungskosten geführt hat.

Allerdings war die benötigte Leistung der Elektronenstrahlkanonen noch sehr hoch, so dass das Substrat während der Beschichtung sehr heiß wurde, was zu Problemen mit den Gummrollen in der PVD-Anlage führte. Daher wurden weitere Tests zur Optimierung der Verdampferfigur durchgeführt. Dadurch konnte die benötigte Verdampferleistung um über 1/3 reduziert werden. Damit konnte das Überhitzungsproblem des Substrates gelöst werden. Daneben konnte so nochmals die Ausnutzung des Zirkonoxid Materials im Tiegel verbessert und es konnten die Energiekosten reduziert werden.

Um die Dickenhomogenität der Zirkonoxid Antireflexschicht zu optimieren, wurde eine Homogenisierungsmaske in die Elektronenstrahlverdampfungskammer eingebaut. Dazu wurde zunächst die Dickenverteilung über die Bandbreite optisch ausgemessen. Unter Berücksichtigung dieser Daten wurden Simulationen zur Schichtdickenverteilung durchgeführt (siehe Abbildung 42 ) Daraus konnte die Form der Homogenisierungsmaske berechnet werden.

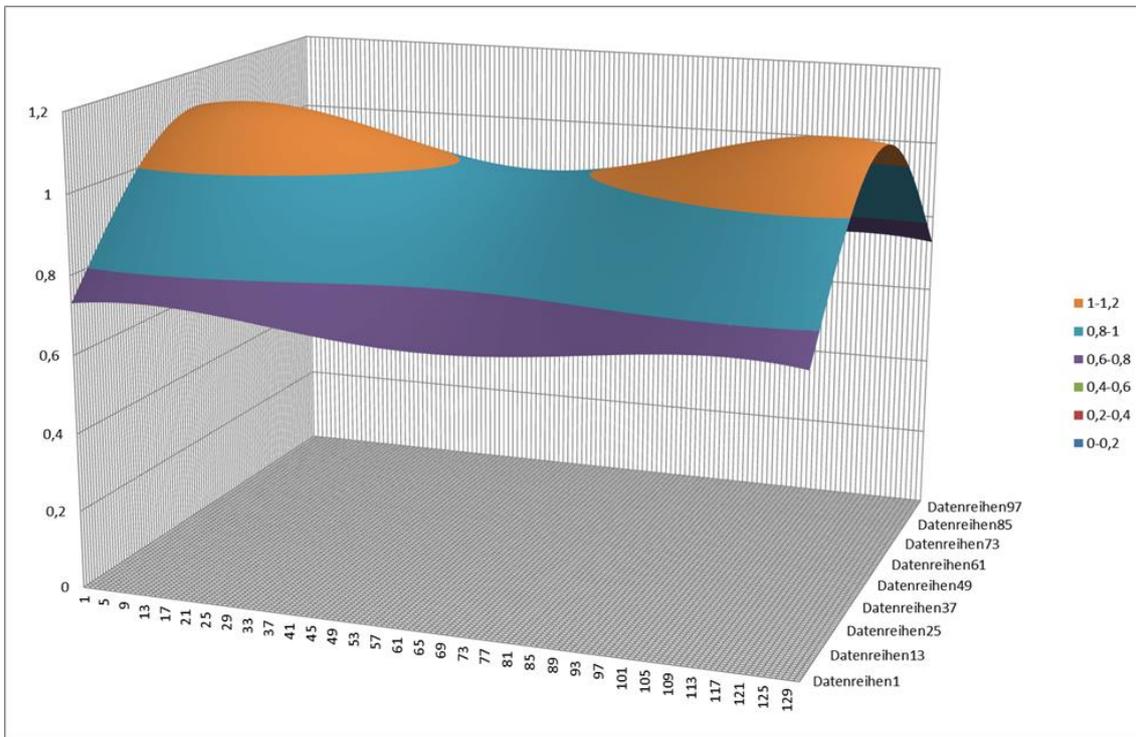


Abbildung 42: Simulierte Ratenverteilung in der Elektronenstrahlverdampfungskammer

Die Reflexionsspektren der Schichten, die mit der neuen Homogenisierungsmaske abgeschieden wurden, sind über die gesamte Bandbreite nahezu identisch (siehe Abbildung 43).

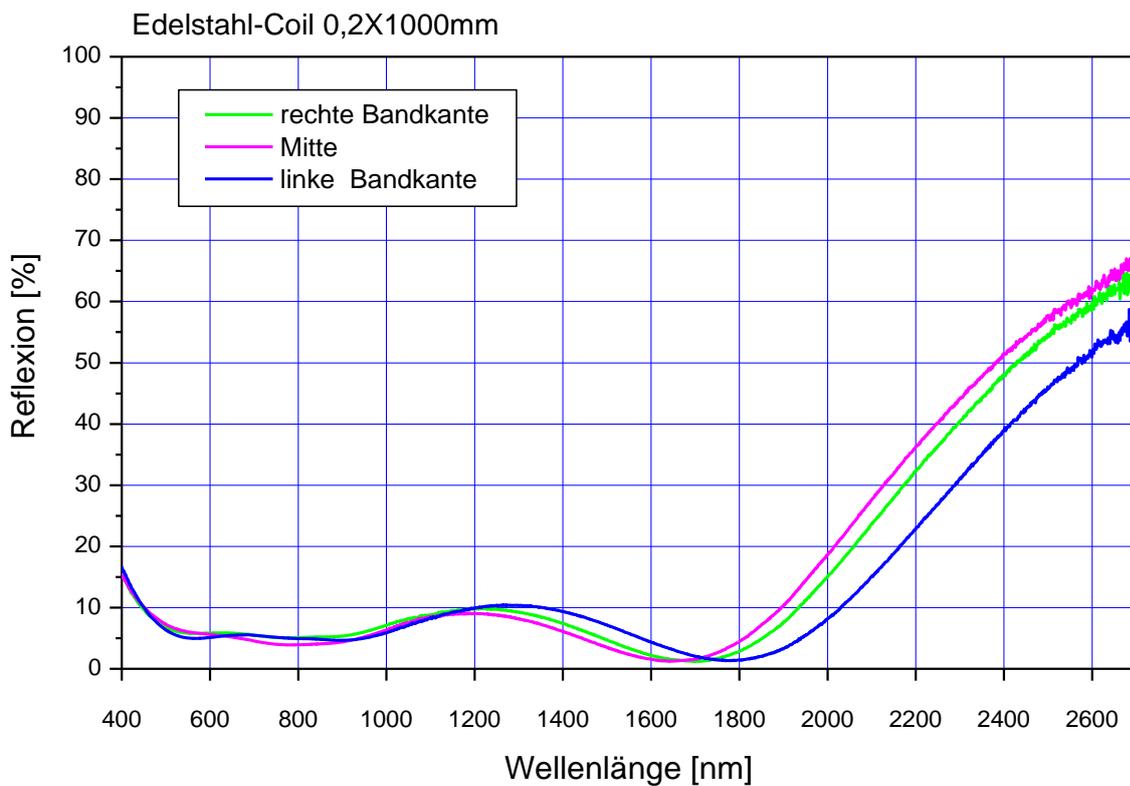


Abbildung 43: Reflexionsspektren der Absorberschicht mit ZrOx-Antireflexschicht von verschiedenen Positionen über die Bandbreite nach Einbau der Homogenisierungsmaske.

## **A6 Fertigung und Charakterisierung von Prototypen und Testanlagen (airwasol/Almecco/Tubacon)**

### **A6.1 Arbeiten beim Rohr-/Balgherstellungprozess**

#### **A6.1.1 Verfahrensoptimierung zur Vermeidung von Kratzern bei der Röhrenfertigung**

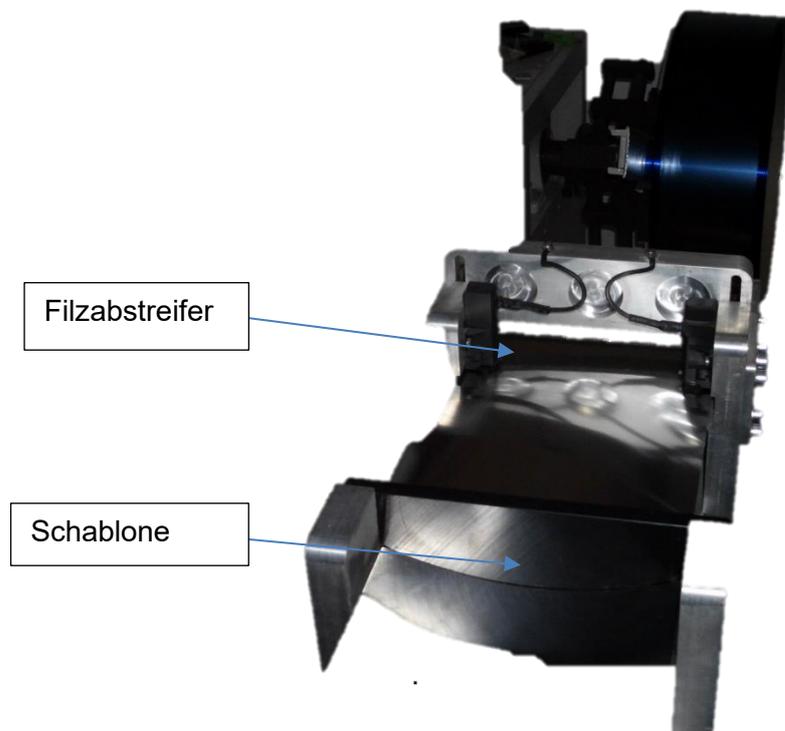
Um mögliche Kratzer auf den umgeformten und geschweißten Absorberröhren auf ein Minimum oder auf „nicht sichtbar“ zu reduzieren, wurden im Wesentlichen zwei Maßnahmen erprobt und umgesetzt.



*Abbildung 44: Längskratzer auf Absorberrohr nach Umformung*

Es wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Murtfeldt in Dortmund verschiedene Kunststoffschablonen gefertigt und erprobt. Hier stellte sich der Werkstoff Murytal ESD schwarz als besonders vorteilhaft heraus. Anschließend wurden alle Schablonenteile aus diesem Werkstoff hergestellt.

In weiteren Test stellte sich heraus, dass jegliche Verschmutzung bedingt durch Staub etc. Kratzer und Spuren verursacht. Dies entsteht im Laufe des Ziehprozesses durch Anhäufung an einer willkürlichen Position an den Umformwerkzeugen. Um dies zu verhindern wurde am Bandeinlauf ein Filzabstreifer installiert. Dieser streift jeglichen Grobschmutz, welcher sich auf dem Band befinden kann, ab.



*Abbildung 45: Bandeinlauf in Rohrfertigung mit Abstreifer*

### **A6.1.2 Untersuchuchung der Beschichtung und deren Einfluss auf den Schweißprozess**

Die von der Fa. Almeco zur Verfügung gestellten Coils verschiedener Beschichtungsvarianten wurden hinsichtlich deren Verarbeitbarkeit getestet. Im Folgenden sind zwei verschiedene Resultate von der Längsnaht abgebildet.



*Abbildung 46: Links Aluminium IR – Reflektorschicht, rechts ZrOx Antireflexschicht*

Durch eine große Anzahl von Verarbeitungstests der verschiedenen Absorberschichtaufbauten stellte sich bei der Röhrenherstellung und der Umformung das Material mit der Aluminium IR- Reflektorschicht klar als Favorit heraus.

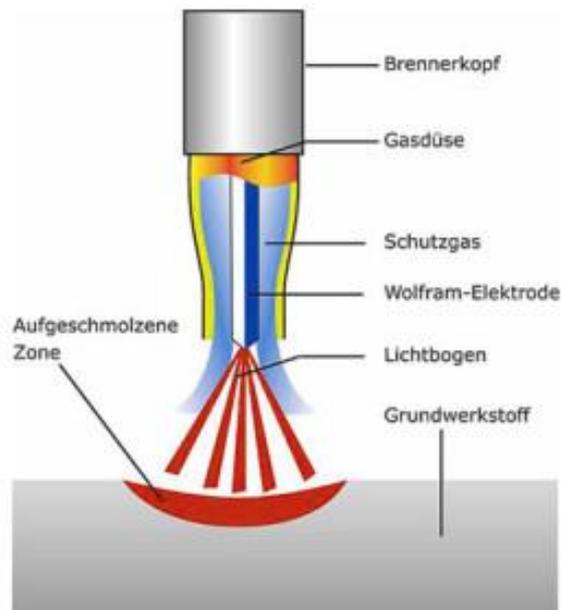
Das Material mit ZrOx oder Molybdän Antireflexschicht lassen sich wesentlich schwieriger verarbeiten. Hier treten immer wieder Schweißfehler auf. Eine typische Schweißfehlerreihe ist auf in Abbildung 47 zu sehen.



*Abbildung 47: Schweißfehlerreihe - Längsnaht*

### **A6.1.3 Test der verschiedenen Schweißverfahren WIG und Mikroplasma**

Als erstes Schweißverfahren wurde das Wolfram-Inertgasschweißen eingesetzt. Hier stellten sich aber nach kurzer Anlagenlaufzeit von nur wenigen Meter Absorberrohr die ersten Probleme ein. Bedingt durch die hochselektive Beschichtung kommt es während des Schweißprozesses zu Verdampfungen bzw. Verbrennungen/Aufschmelzungen der Absorberblechschnittkanten. Beim Schweißen verdampfen Bestandteile der Beschichtung und schlagen sich auf der Wolframelektrode nieder.



*Abbildung 48: WIG-Schema [www.handschweissen.eu]*

Dieser Niederschlag führt zu Schweißfehlern wie auch in Abbildung 49 zu sehen.



*Abbildung 49: Schweißfehler mit WIG an der Längsnaht*

Um dem Problem der Wolframnadelverschmutzung vorzubeugen wurde als Schweißverfahren Microplasma-schweißen eingesetzt. Abbildung 50 zeigt den Aufbau eines Microplasmabrenners. Vorteil ist hier die Gasumspülung der Wolframelektrode. Diese Gasumspülung führt zum Schutz der Wolframelektrode und verhindert die Ablagerung von Schweißdämpfen an der Elektrode.

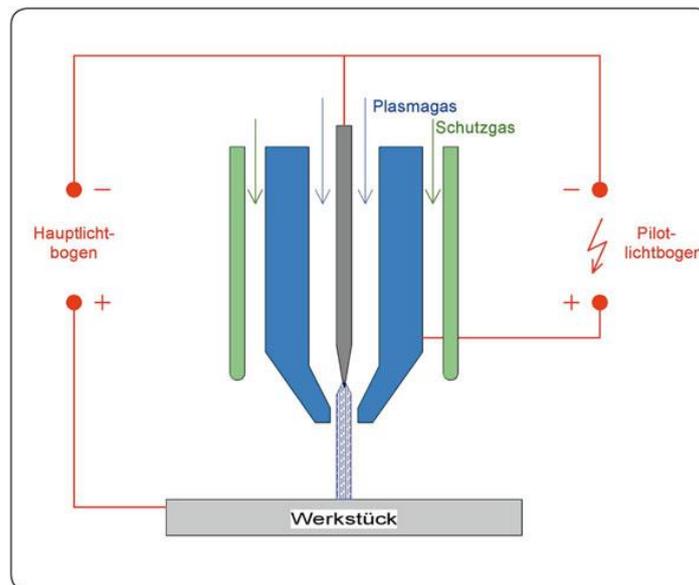


Abbildung 50: Microplasmatechnik [www.dsl-schweisstechnik.de]

Durch den Einsatz der Microplasmatechnik konnte der Ausschuss beim Rohrschweißprozess bei schwer zu schweißenden Absorberschichten auf unter 10% gesenkt werden. Dies ist aber immer noch zu hoch um einen Absorber wirtschaftlich herzustellen. Somit gibt es Schichtaufbauten die beim Rohrschweißen mit WIG und Microplasma aktuell keine Anwendung für die Praxis finden können.

#### A6.1.4 Test der Schweißanlage mit verschiedenen Schutzfolien

Die Versuche mit verschiedenen Schutzfolien in Kombination mit WIG und Microplasma wurden nicht durchgeführt. In Rücksprache mit der Fa. Polyfilm wurde die verwendete Schutzfolierung als die geeignetste bewertet. Auch die Verarbeitung bei Almecco und airwasol war optimal. Bei airwasol und im Labor von Laserherstellern wurden aber in diesem Zuge verschiedene Schweißversuche mit Dioden- und Faserlasern durchgeführt. Aber auch hier wurde keine bessere Folie als die aktuell verwendete gefunden.

#### A6.1.5 Schweißversuche mit verschiedenen Schablonenanordnungen

Schweißversuche mit verschiedenen Schablonenanordnungen wurden durchgeführt. Des Weiteren wurde die sogenannte Rohrblume in Zusammenarbeit mit der Fa. UBECO in Iserlohn neu berechnet und entsprechend den Vorgaben ausgelegt.



*Abbildung 51: Verschiedene Schablonenstufen zum Rohrformen - Rohrblume*

Anschließend wurden die Schablonen an der Anlage neu gefertigt und ausgerichtet. Die Profilierung funktioniert nach eingehenden Tests problemlos.

#### **A6.1.6 Schweißversuche mit Buchse und Rollenbandeinlauf**

In diesem Abschnitt konzentrierte sich die Arbeit auf die Optimierung der Schweißbuchse. Versuche mit Rollbandeinlauf wurden bei diesem ungünstigen Durchmesser- Wandstärkenverhältnis als nicht zielführend bewertet.

Die Schweißbuchse wurde im Material und Form mehrfach optimiert. Hier wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Ampco die Legierung Ampco 18 gewählt. Hierbei handelt es sich um eine Messing Legierung welche sich durch sehr gute Gleiteigenschaften und hohe Verschleißfestigkeit auszeichnet.

Des Weiteren wurde die Einlaufgeometrie optimiert und die Oberfläche der Buchse hochglanzpoliert.

Die anschließenden Tests zeigten gute Ergebnisse in Hinblick auf die Oberfläche des hergestellten Rohrs. Auch konnte somit die Standzeit der Buchse deutlich erhöht werden.

#### **A6.1.7 Schweißversuche mit verschiedenen Bändern**

Schweißversuche mit verschiedenen Bändern wurden durchgeführt. Die Folierung wurde vor der Verarbeitung von Hand entfernt. Ein Einfluss auf den Schweißprozess konnte nicht bestätigt werden. Diese Tests wurden anschließend nicht weiter vertieft.

#### **A6.1.8 Verschiedene Folierungsabstände zur Schweißnaht**

Bei den Folierungsabständen zur Schweißnaht zeigten sich die eingestellten 10mm zu Projektbeginn bei den Arbeitsschritten bei Almeco, Tubacon und airwasol als optimal. Die Folie ist in den Fertigungsschritten (Coilanlage, Rohr-/Balgherstellung, Endkappenlaserschweißung in der Röhrenfertigung) durchwegs stabil auf der Absorberschicht und schützt diese vor mechanischen Einflüssen. Sie stört in keinem Fertigungsprozess, ist leicht aufbringbar und ist im

letzten Schritt auch einfach zu entfernen. Auch hat sie keinen Einfluss auf die optischen oder mechanischen Werte der Absorberbeschichtung.

### A6.1.9 Verschiedene Schweißgeschwindigkeiten

Zur Optimierung des Schweißprozesses und der daraus resultierenden Senkung der Prozesskosten wurden Versuche gemacht die Schweißgeschwindigkeit zu steigern. Es wurden jeweils fünf Stücke Rohr a drei Meter gefertigt. Anschließend wurde die Schweißgeschwindigkeit um 0,1m/min erhöht und der Vorgang wiederholt. Als Kriterium wurde die Anzahl der optisch erkennbaren Fehler pro 3m Länge festgelegt und gezählt. Wie im nachfolgenden Diagramm zu sehen verschlechtert sich die Schweißnahtqualität mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit. Ab 2m/min nimmt die Fehlerhäufigkeit stark zu. Daraus resultierend wurde die Schweißgeschwindigkeit auf 1,9m/min festgelegt.

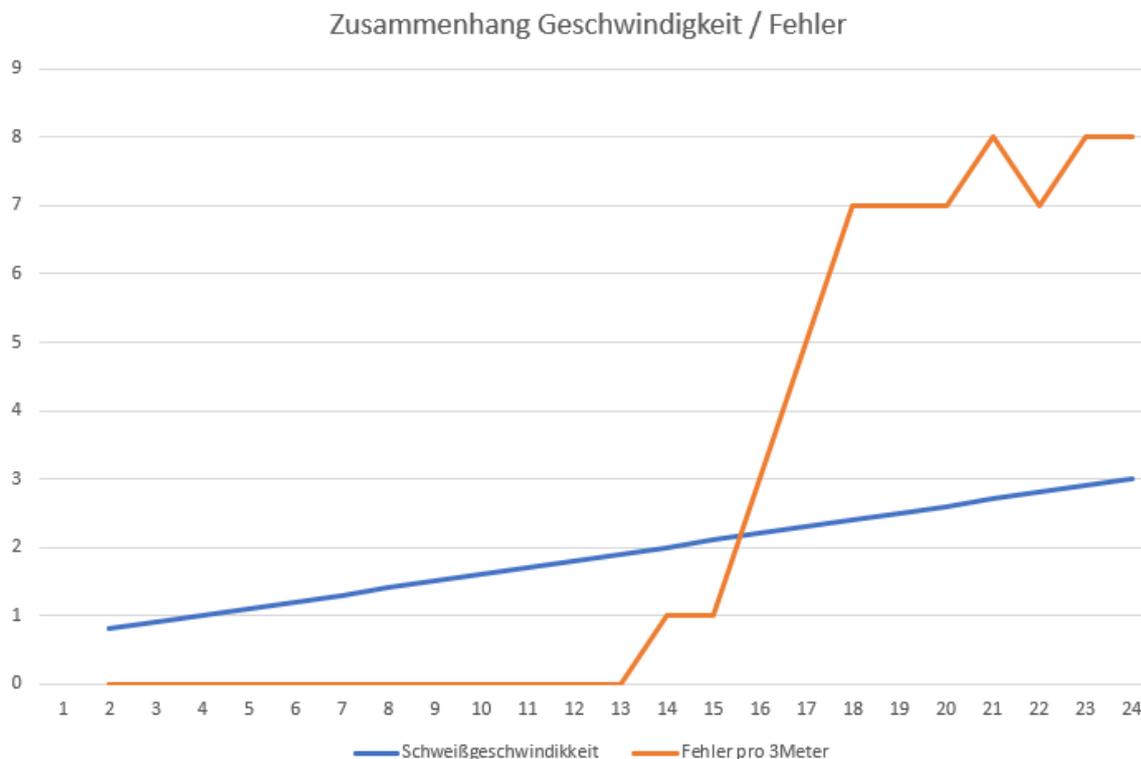


Abbildung 52: Zusammenhang Geschwindigkeit/Schweißfehler

Alle gefertigten Absorberrohre mit einer Schweißgeschwindigkeit bis zu 1,9m/min aus diesen Schweißversuchen wurden bei airwasol in der Röhrenfertigung inklusive Heliumleckagetests nach dem kompletten Röhrenfertigungsprozess als gut befunden.

### A6.1.10 Schweißversuche mit verschiedenen Schutzgasen

Die Schweißversuche mit verschiedenen Gasqualitäten fanden in Zusammenarbeit mit der Fa. Linde statt. Hier wurden Gasqualitäten/-mischungen mit Argon als Basis verwendet.

Die Versuche wurden in drei verschiedenen Schritten unter der Grundlage von 1,9m/min Schweißgeschwindigkeit festgelegt. Es wurden wieder je fünf Röhren a 3m geschweißt und die optisch sichtbare Fehlerhäufigkeit ermittelt. Zur Verwendung kamen folgende Gasqualitäten:

1. Reinargon 4.6
2. Argon mit 2% Wasserstoffanteil
3. Argon mit 5% Wasserstoffanteil

Die Summe der Fehler ist in folgendem Diagramm zu sehen.

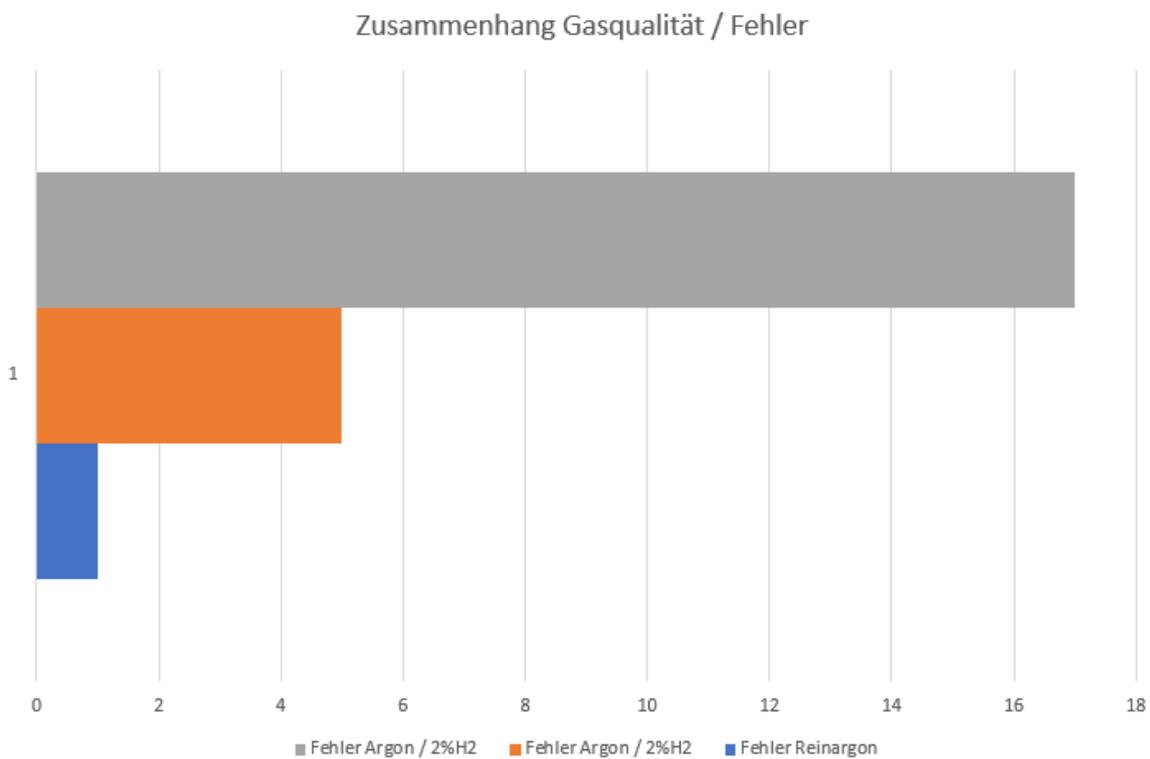


Abbildung 53: Zusammenhang Gasqualität//Schweißfehler

Wie in Abbildung 53 zu erkennen ist, ist die Fehlerhaftigkeit mit Reinargon am geringsten. Zurückzuführen ist das auf die Schmelzbadtemperaturerhöhung durch den Wasserstoffanteil. Um das Schmelzbad wieder anzupassen wurde die Stromstärke reduziert. Dies führt allerdings dazu, dass der Lichtbogen immer ungenauer wird. Der eigentliche Schweißprozess lässt sich

kaum noch kontrollieren. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde Reingargon als das geeignetste Schutzgas festgelegt.

#### **A6.1.11 Verschiedene Versuche zur Masseanbindung des Bandes**

Ein kritischer Punkt im Schweißprozess ist die Masseanbindung des Bandes an die Rohrschweißanlage. Bedingt durch die Beschichtung, welche nicht leitfähig ist, muss die Masseanbindung auf der Innenseite des Bandes erfolgen. Hier hat sich eine Kombination aus Schleifbürste und zwei Kohlen als besonders vorteilhaft herausgestellt. Auf den folgenden Bildern sind die beiden Anordnungen zu sehen.



*Abbildung 54: Masseanbindung über gefederte Kohlen*



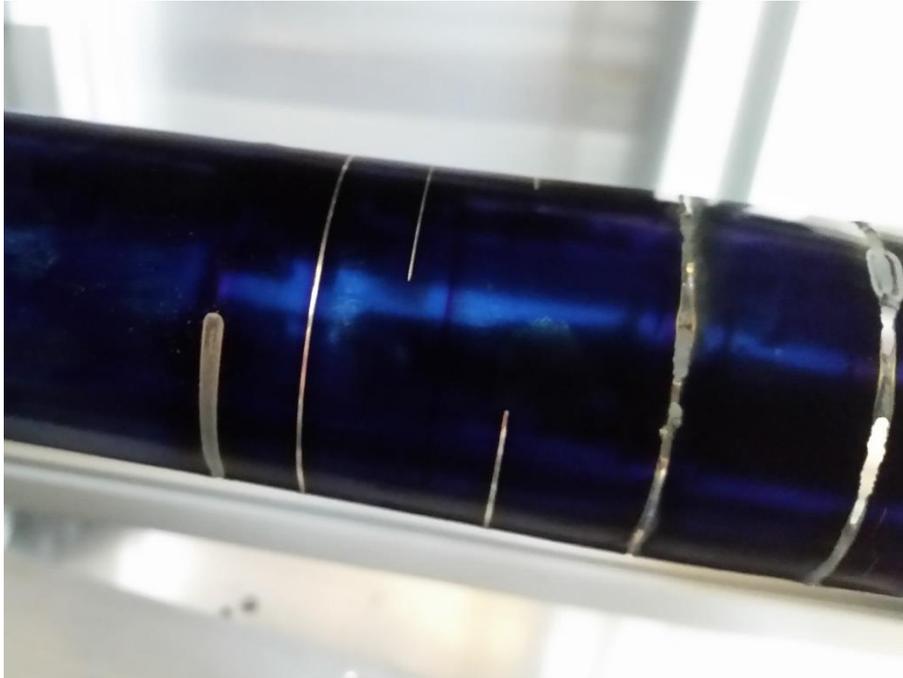
*Abbildung 55: Massenbindung über Schleifbuchse*

#### **A6.1.12 Schweißversuche mit entfernter Beschichtung**

Da sich der Einfluss der Absorberbeschichtung auf den Schweißprozess in vielerlei Gesichtspunkten z.B. der Prozessstabilität und Schweißgeschwindigkeit als nachteilhaft herausgestellt hat, wurden während der ersten Projektphase Überlegungen angestellt, die Beschichtung partiell zu entfernen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst versucht die Beschichtung mechanisch zu entfernen. Dies wurde mittels Bürsten erprobt. Es stellte sich jedoch heraus, dass dadurch die Beschichtung zum einen nicht kontrolliert entfernt werden kann und zum anderen kommt es zu Beschädigungen der Bandkanten welche auch zu Schweißfehlern führt. Auf Grund dieser Vielzahl an Problemen wurde entschieden, die Schicht thermisch mittels eines Lasers zu entfernen.

Erste Versuche dazu wurden in der Absorberlaserschweißanlage (ALSA) bei airwasol durchgeführt.



*Abbildung 56: Leistungstests in der ALSA für Absorberschichtentfernung*

Es wurden verschieden beschichtete Absorberrohre in die Drehvorrichtung eingespannt. Mittels unterschiedlicher Programme mit Impuls- und Dauerlaser, Frequenzen und Leistungen wurde eine Laserleistung von 135 W bei einer Schweißgeschwindigkeit von 1,9m/min ermittelt. Die besten Ergebnisse konnten mit einem Dauerlaser erzielt werden. Die gepulsten Programme, welche weniger Energie und somit Wärme ins Material eintragen, können vielleicht bei langsameren Schweißgeschwindigkeiten von Interesse sein.

Mit diesen Erkenntnissen sollten weitere Versuche inline der Rohrschweißanlage bei Tubacon durchgeführt werden. Hierzu wurde ein gebrauchter Linienlaser der Fa. Laserline angeschafft und die entsprechenden Versuche durchgeführt. Gebrauchtgerät deswegen, da der Ausgang der Tests im realen Schweißprozess ungewiss war.

### **Versuchsergebnisse bei Tubacon**

Die Laseroptik wurde vor der Microplasma-schweißstelle in der Rohrschweißanlage eingebaut, siehe Abbildung 58. Es wurden Tests mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt:

- Verschiedene Absorberschichten
- Schweißgeschwindigkeiten von 1,1 bis 1,9 m/min
- Laserleistung 40 – 180 W (max. 275W)
- Abstand variiert zwischen Absorberschicht und Laseroptik um die Größe der Einstrahlfläche zu ändern.



*Abbildung 57: Laserkopf*



*Abbildung 58: Montageposition Laser in Rohrschweißanlage*

Mittels des Lasers ist es zwar möglich die Beschichtung zu entfernen, gleichzeitig wird aber auch bei diesem Verfahren die Bandkante derart in Mitleidenschaft gezogen, sodass eine Weiterverarbeitung des Blechbandes nicht möglich war. Bedingt durch den kurzen thermischen Prozess verschmelzen die Bandkanten und runden sich ab. Diese abgerundeten Bandkanten lassen sich nicht prozesssicher voreinander stellen. Dies führt dazu dass kein brauchbares Schweißbad erzeugt werden kann.

### **A6.1.13 Verschiedene Ausrichtungen und Geometrien der Abzugsvorrichtung**

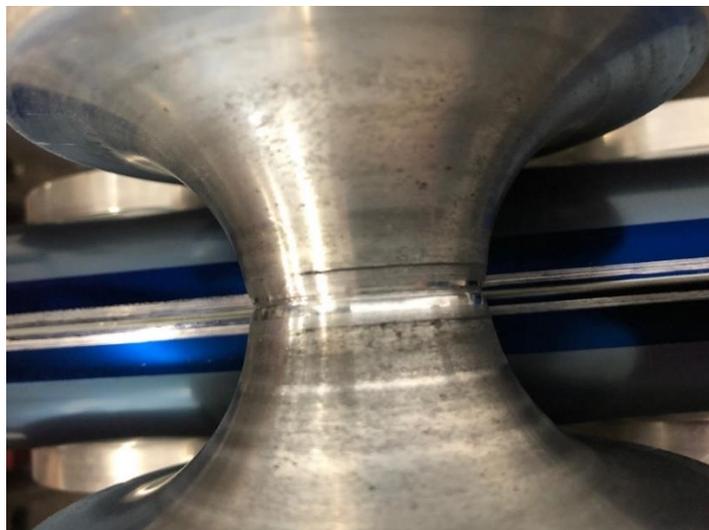
Um verschiedene Ausrichtungen der Abzugsvorrichtung in der Rohrschweißanlage einstellen zu können, wurde diese mit Einstellmöglichkeiten versehen. Anschließend wurde die optimale Einstellung ermittelt und eingestellt.



*Abbildung 59: Verstellmöglichkeit der Abzugsvorrichtung*

### **A6.1.14 Verschiedene Richtrollenkonfigurationen**

Um die Geradheit des Rohrs weiter zu verbessern, wurde die Richtrollen-Ausrichtung hinter der Schweißstelle optimiert und verbessert. In der Probeproduktion stellte sich heraus das die obere Richtrolle bedingt durch die Schweißnaht einem erheblichen Verschleiß unterliegt. Die Schweißnaht gräbt sich in die Rolle ein.

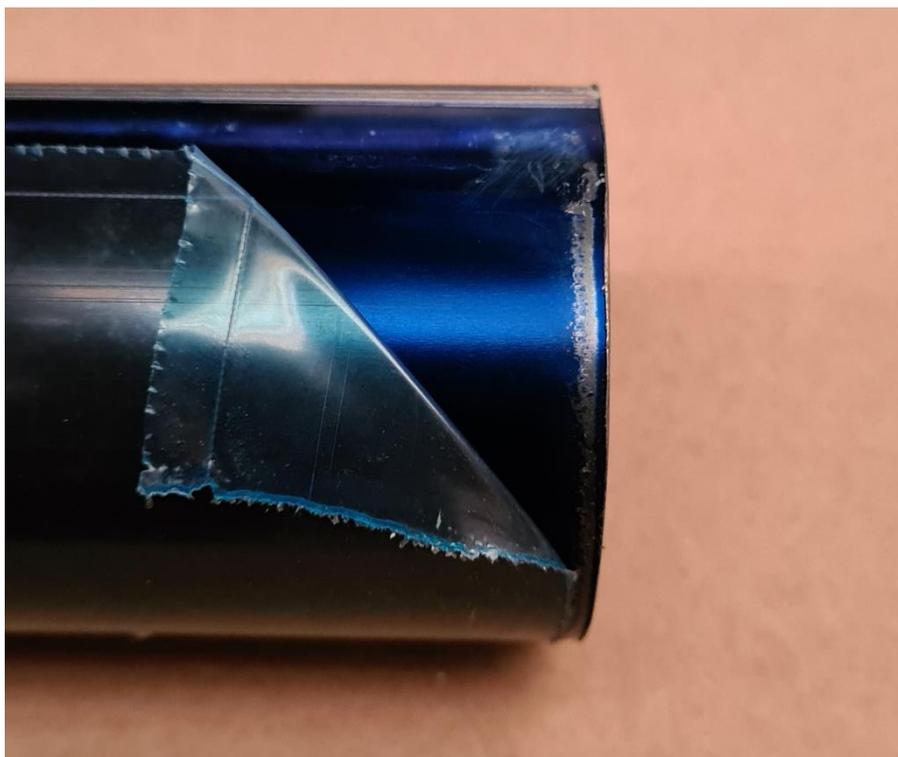


*Abbildung 60: Richtrolle mit Verschleißerscheinungen mittig*

Diese Richtrollen wurden gegen gehärtete Rollen getauscht. Somit wurde dieses Problem behoben.

#### **A6.1.15 Einfluss des Rohrtrennens auf die Schutzfolierung**

Der zunächst angestrebte und umgesetzte Prozess des Rohrtrennens mittels einer Trennschleifmaschine stellte sich als nachteilig heraus. Als Grund ist hier insbesondere die Verschmelzung der Schutzfolierung mit dem Bandmaterial zu nennen. Bei der Schutzfolie handelt es sich um eine Polyethylen-Folie. Diese Folien haben die Eigenschaft bereits bei ca. 80°C zu schmelzen. Dieses Verschmelzen hatte eine Verunreinigung der Oberfläche zur Folge. Des Weiteren können die Folie und die verschmolzenen Reste nur schlecht entfernt werden.



*Abbildung 61: Schutzfolienreste nach Rohrabtrennung*

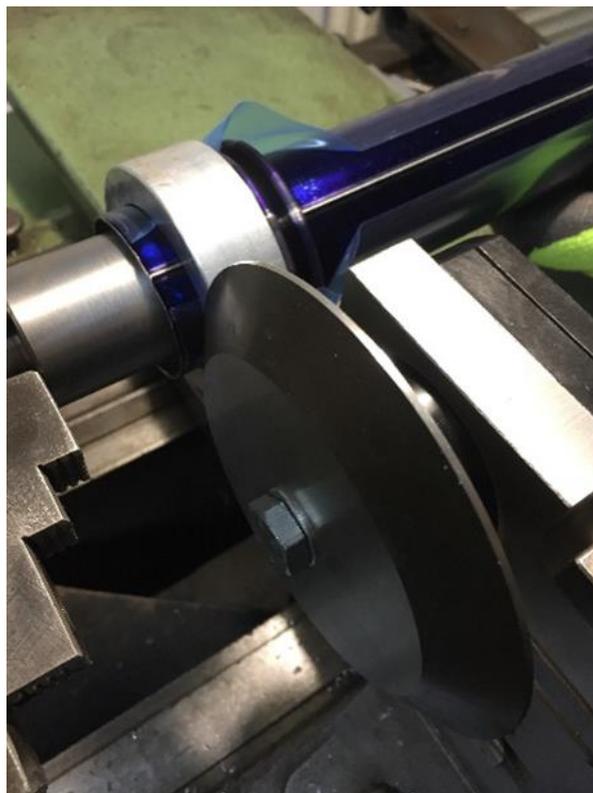
Um die Materialien thermisch bzw. abrasiv trennen zu können muss deren Schmelzpunkt überschritten werden. Der Schmelzpunkt des Trägermaterials liegt bei 1450°C. Somit weit über der Schutzfolierung.

Um dennoch die Vorteile eines direkten Trennens nach der Rohrschweißanlage nutzen zu können, wurde Kontakt zu Herstellern von Plasmaschneidgeräten aufgenommen. Insbesondere mit der Fa. Kjellberg wurden hier nähere Untersuchungen durchgeführt. Aus diesen Versuchen ist hervorgegangen, dass es zwar prinzipiell möglich ist den Werkstoff zu trennen aber dabei sehr starke Prozessschwankungen auftreten können. Die Schnittgeschwindigkeit mit

5000 mm/min ist sehr schnell und würde für den Umfang eine schnelle Drehachse mit Brenneraufnahme benötigen. Dies konnte im Projekt nicht konstruiert werden.

Auf Grund der vorgenannten Problematiken wurde entschieden die beiden Prozesse Rohrtrennen und Feinschnitt zu trennen. Diese Trennung wird auf zwei Arbeitsschritte aufgeteilt. Weiterhin wird zuerst nach der Rohrschweißmaschine das Rohr durch einen Trennschleifprozess abgelängt. Anschließend werden die Kompensationswellen in das Rohr geformt. Als letzter Bearbeitungsschritt wird dann ein Feinschnitt durchgeführt.

Für den Feinschnitt wurde ein sogenannter Scherprozess ausgewählt. In Abbildung 62 ist die erste Versuchsvorrichtung zu sehen.



*Abbildung 62: Erste Versuchs-Schervorrichtung*

Es handelt sich hierbei um jeweils ein kreisrundes Innen- und Außenmesser. Zunächst wird das Absorberrohr in Rotation versetzt. Anschließend wird das Außenmesser auf das Innenmesser zubewegt. Sobald sich Innen- und Außenmesser überschneiden, startet der Scherprozess.

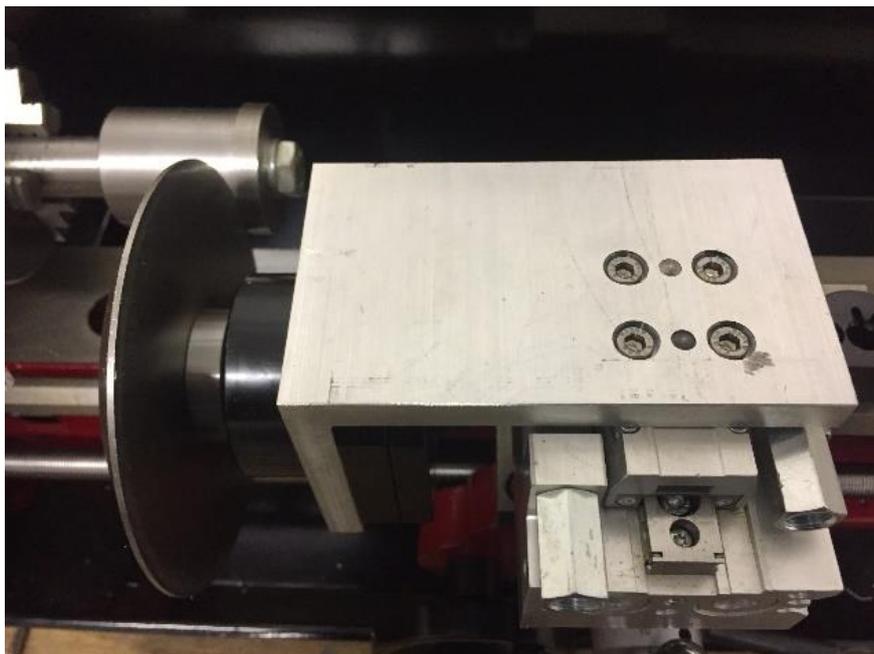
Das Ergebnis ist auf folgendem Bild zusehen.



*Abbildung 63: Rohrende abgeschert.*

Dieser Prozess hat im Wesentlichen zwei Vorteile. Zum einen wird keinerlei thermische Energie verwendet, welche die Folierung negativ beeinflussen könnte. Zum anderen entsteht eine saubere und im Prinzip gratfreie Schnittfläche.

Um den Prozess weiter zu automatisieren, wurde eine neue Drehbank angeschafft und mit einem pneumatischen Antrieb ausgerüstet. Diese ist auf folgendem Bild zu sehen.

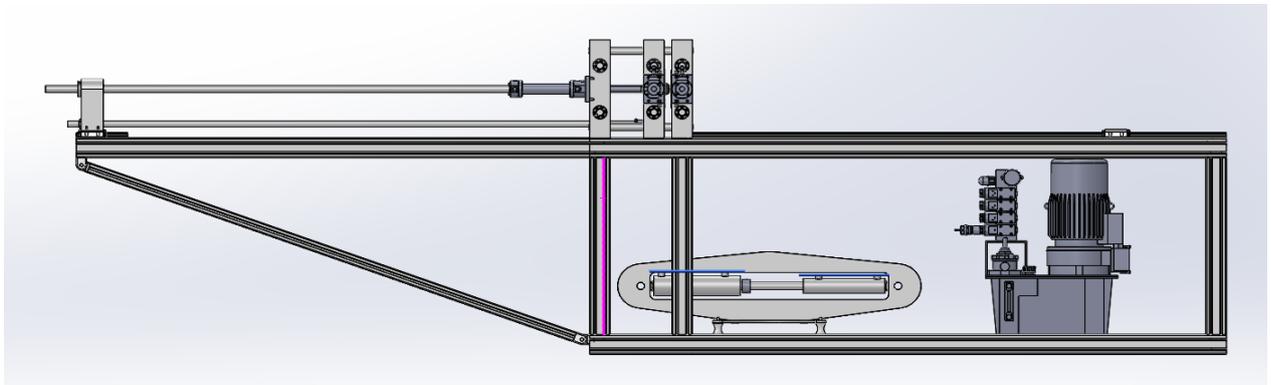


*Abbildung 64: Pneumatikzylinder mit Rundmesser*

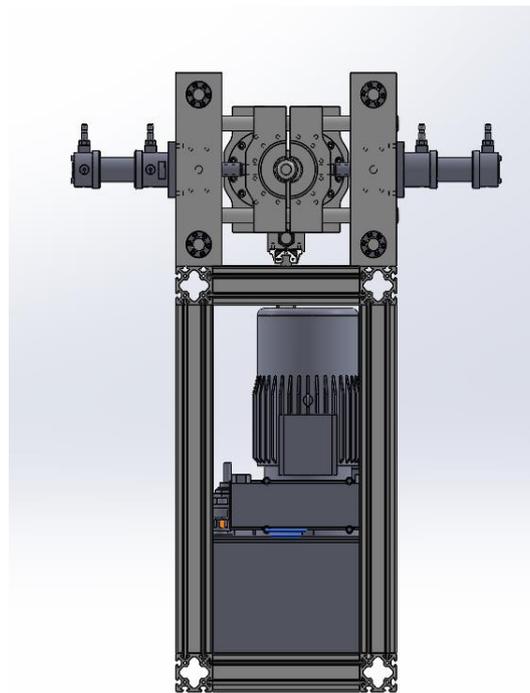
Musterröhren wurden hiermit hergestellt und airwasol zur Verfügung gestellt. Die Verarbeitbarkeit wurde als gut bewertet.

### A6.1.16 Umformung mit Hydroforming

Um den Umformprozess wirtschaftlicher, materialschonender und prozesssicherer zu gestalten wurde ein sogenannter Hydroformer entwickelt, konstruiert und gebaut.



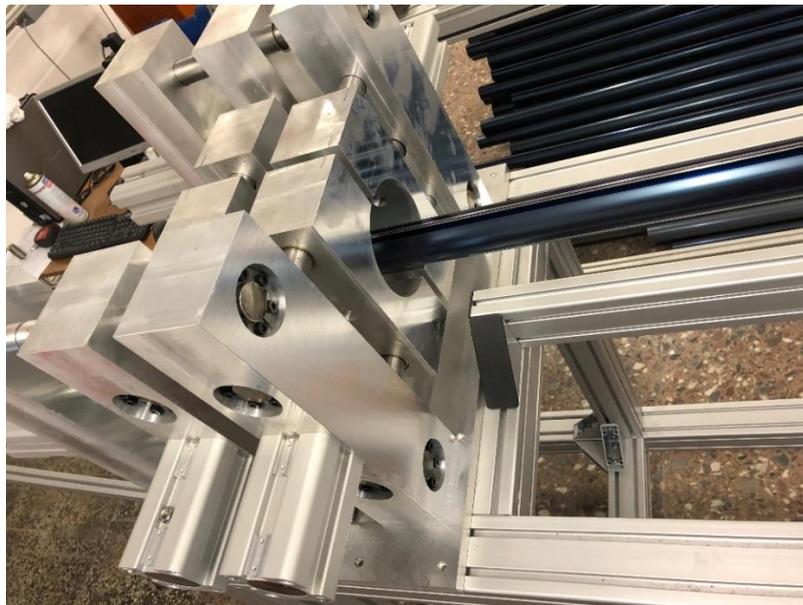
*Abbildung 65: Konstruktion des Hydroformers - Seitenansicht*



*Abbildung 66: Konstruktion des Hydroformers - Frontansicht*

Die prinzipielle Funktion des Hydroformers ist die, dass das umzuformende Rohr von außen mit einem beweglichen Werkzeug umschlossen wird. Anschließend wird die innere abgedichtete Kammer des Rohrs mit hohem Druck beaufschlagt. Eine sogenannte Blase bildet sich welche von den außen befindlichen Werkzeugen zu einer Kompensationswelle geformt wird.

In Abbildung 67 ist der gebaute Hydroformer zu sehen. Links im Bild befinden sich die hochdruckfesten Werkzeugbacken. Sie werden mit Pneumatikzylindern angetrieben um automatisch die Geometrie der Balgwellen zu formen. Manuell geht dies nicht da die Bewegung der Werkzeugbacken exakt an den eingestellten Innendruck angepasst werden muss.



*Abbildung 67: Hydro-Werkzeugbacken*

Bei der Inbetriebnahme und Testphase kam es jedoch zu erheblichen Problemen mit der Abdichtung der inneren Rohrseite. Bedingt durch den Schweißprozess kommt es zu einer Nahtüberhöhung wie auf folgendem Bild zu sehen.



*Abbildung 68: Nahtüberhöhung trotz Richtrollen*

Diese Nahtüberhöhung führt dazu, dass das Wasser welches die Welle mit Überdruck erzeugen soll entweicht. Ein Druckaufbau ist nur sehr schwer möglich. Es wurde auf Grund der Abdichtungsprobleme Kontakt mit verschiedenen Dichtungsherstellern aufgenommen welche bei der Lösung des Problems unterstützen sollten. Aus dieser Zusammenarbeit ist es gelungen die Abdichtung soweit zu optimieren, dass Wellen erzeugt werden konnten.



*Abbildung 69: Vorgeformte Einzelwelle mit Hydroumformung*

Um diese Maschine in die Serienproduktion zu überführen sind noch weitere Optimierungsarbeiten an der Abdichtung, Steuerung und den Werkzeugbacken notwendig. Es hat sich gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist mit dieser Anlage Wellen zu formen.

Um eine gleichförmige und möglichst ruckfreie Ausformung zu erzeugen ist der Druckaufbau nur mit einem Druckübersetzer möglich. Ein solcher Druckübersetzer ist schematisch auf folgender Abbildung 70 zu sehen.

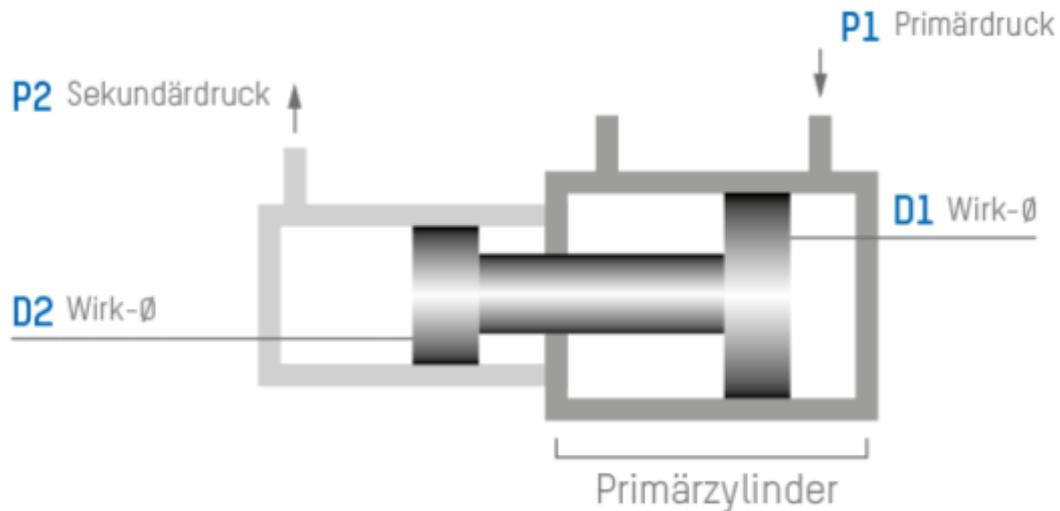


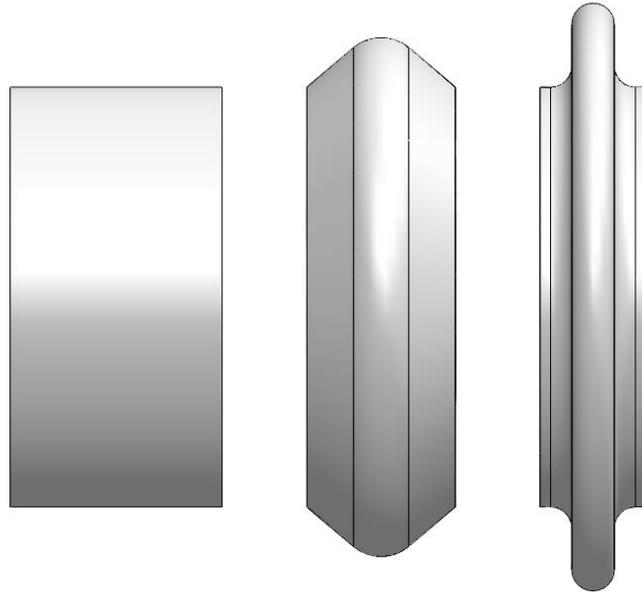
Abbildung 70: Schema von einem Druckübersetzer

Das Volumen welches zur Umformung zur Verfügung steht befindet sich im Sekundärdruckkreis. Kommt es nun zu hohen Leckagen, kann der Druck nicht mehr aufrechterhalten werden und bricht bei Erreichen des Endes der Kolbenstange zusammen. Um hohe Leckagen auszugleichen muss ein Verdichter mit sehr hohen Volumen entwickelt und gebaut werden. Diese sind am Markt nicht als Standardprodukt verfügbar.

Zurzeit ist aber die Ausschussrate viel zu hoch, da immer wieder die Abdichtung an der Schweißnaht versagt. Da der gewünschte Effekt durch das Kantenreinigen mit Hilfe des Linienlasers ausblieb wird nach dem Projekt auf ein schweißnahtgeführter Diodenlaser gesetzt. Dieser Umbau befindet sich aktuell in der Planungs- und Konstruktionsphase. Mit diesem Umbau der Rohrschweißanlage soll eine feinere und nicht so hohe Schweißnaht möglich sein. Diese optimierte Schweißnaht hätte auch weitere Vorteile in der Weiterverarbeitung bei airwasol, dort z.B. beim Endkappenlaserschweißen.

Eine weitere Überlegung ist die Abdichtung mit einer sogenannten Blase zu erzeugen. Aus der Praxis sind hier zwei Verfahren bekannt.

Das eine Verfahren ist die Elastomerumformung. Hier wird ein Elastomer, welcher gewöhnlich aus Polyurethan besteht, als formendes Medium eingesetzt. Dieser ringförmige Polyurethankörper wird hier in Achsrichtung komprimiert und bildet dadurch die sogenannte Blase. Dieses Verfahren wird in der Regel in der Großbalgherstellung angewandt. In Abbildung 71 sind die beiden Zustände Grundstellung und komprimierter Zustand zu sehen.

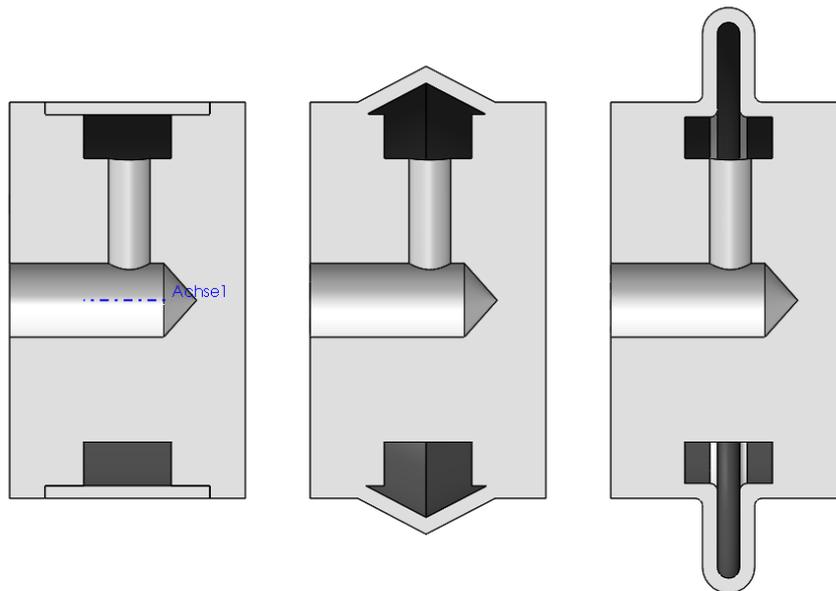


*Abbildung 71: Balgformen während der Umformung*

Wie auf der Skizze zu sehen ist, werden die Elastomere sehr stark umgeformt, woraus zwei wesentliche Probleme dieses Verfahrens entstehen. Zum einen unterliegt das Elastomer sehr hohem Verschleiß. Je nach Anwendung widerstehen die Elastomere der Umformung nur wenige Wellen. Ein weiteres Problem ist das Lösen oder Zurückziehen des Elastomers aus der fertig geformten Welle.

Bei schmalen und hohen Wellen, wie dies beim ULA Absorber der Fall ist, ziehen sich die Elastomere nicht aus eigener Rückstellenergie zurück. Dieses führt zum Verklemmen und somit zum Stopp des Fertigungsprozesses. Auf Grund dieser Probleme ist eine Automatisierung nicht möglich und aus der Praxis nicht für den Einsatz bei großen Losgrößen bekannt. In der Regel handelt es sich bei solchen Maschinen um Handarbeitsplätze. Für die ULA Fertigung ist dieses Verfahren nicht geeignet.

Ein weiteres aus der Praxis bekanntes Verfahren ist die Blasenformung mit separatem Elastomerkörper. Hier wird ein Elastomer auf einen Metallträger aufvulkanisiert. In Abbildung 72 ist ein solcher Körper beispielhaft dargestellt.



*Abbildung 72: Blasenformung mit separatem Elastomerkörper*

Der aufvulkanisierte Körper besteht meist aus Gummi welches eine hohe Dehnbarkeit aufweist. Realistisch ist aber eine Dehnung über 40% nur theoretisch abbildbar. Somit stellt sich auch hier das Problem bei sehr hohen Wellen wie im Fall des ULA Absorbers.

Als Ausblick lässt sich zusammenfassen, dass die mechanische Umformung ohne Elastomere das zielführendste Verfahren darstellt. Zum einen kann komplett auf Flüssigkeiten verzichtet werden, zum anderen lassen sich auch hohe Wellen wie beim ULA Absorber ausformen. Der Nachteil der relativ langsamen Umformung lässt sich nur durch Erhöhung der Maschinenkapazitäten erreichen. Ganzheitlich betrachtet ist dies jedoch der beste Weg einen hohen Automatisierungsgrad bei gleichzeitig hoher Verfügbarkeit zu erreichen.

### **A6.1.17 Verpackung und Transport**

Um die gefertigten Absorberröhren sicher und effizient zu transportieren, wurde ein Verpackungskonzept entwickelt.

Endgültig wurde hier ein System auf Basis einer Europalette konstruiert und gefertigt. Hierbei werden die Absorberröhren stehend transportiert. Das hat den entscheidenden Vorteil, dass die dünnwandigen Absorberröhren sich nicht gegenseitig durch ihre Gewichtskraft deformieren können.

Die horizontale Variante wurde mit Absorberlängen von 2000mm und 2500mm im realen Transport zwischen Tubacon und airwasol mit je 100 und 160 Stück auf einer Transportpalette

getestet. Die horizontalen Röhren wurden durch den Transport zu stark beschädigt. Es entstanden Kratzer beim Entnehmen und die Gewichtsbelastung bei den 2500mm langen Absorberröhren war in der Rohrmitte zu groß.

Durch die Europalette als Basis können die Transporte nun relativ preisgünstig und wirtschaftlich realisiert werden.



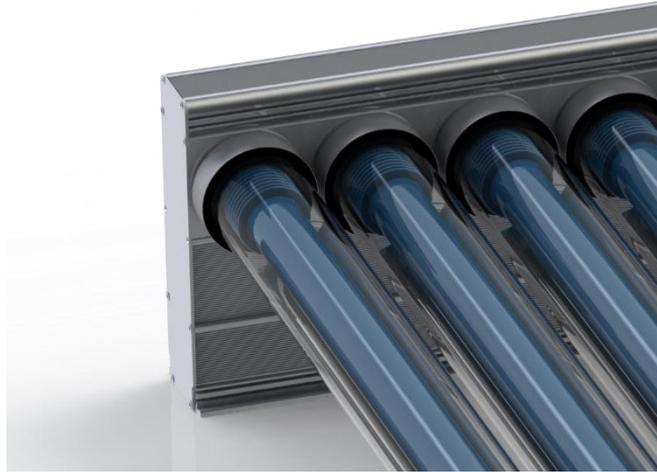
*Abbildung 73: Röhrentransporteinheit – stehend während dem Transport*

Um die Absorberröhren noch besser zu schützen, wurden spezielle röhrenförmige Schaumstoffringe beschafft. Diese Schaumstoffringe können wiederverwendet werden was den Transport noch wirtschaftlicher macht. Die Be- und Entladung erfolgt im liegenden Zustand.

## **A6.2 Konstruktionsarbeiten (airwasol)**

### **A6.2.1 Röhrenadapter**

Ein großer Unterschied zwischen Standardkollektoren mit nur einem Kollektorgehäuse ist, dass durch die durchgängige Absorberröhre zwei Kollektorgehäuse benötigt werden. Die Gehäuse sowie die Röhrenverbinder (schmale Gehäuse mit einem Durchgangsloch je Röhre) werden zunächst auf dem Dach installiert. Erst danach folgt der Einbau der Absorberröhren. Hierfür ist eine sichere Verbindung zwischen Röhre und Gehäuse notwendig welche z.B. regendicht, Schneelast sicher ist, flexibel auf Dachbewegungen reagiert und Dachschrägentoleranzen ausgleichen kann. Hierfür wurden mehrere Varianten konstruiert, hergestellt und auf dem Regen- und Hagelteststand sowie auf mechanische Belastungen hin getestet und optimiert.



*Abbildung 74: Röhrenhalterung - Schraubvariante*

Die Schraubvariante war ein Bauteil welches auf einem Drehautomaten gefertigt werden konnte. Jedoch war im Feldtest die Montagefreundlichkeit auf dem Dach nicht gegeben. Bei größerer Stückzahl ist das Eindrehen für den Monteur sehr aufwendig und belastend (monoton).



*Abbildung 75: Röhrenhalterung – Bajonettverschluss mit verschiebbarer Innenhülse*

Die Schraubvariante wurde durch einem Bajonettverschluss abgelöst. Somit ist eine schnellere Montage mit Montageschlüssel möglich.

### **A6.2.2 Glasdurchmesser und innenliegender Spiegel**

Die erste Röhrenvariante hatte einen Glasaußendurchmesser von 70 mm. Dabei war der Spiegel darunter im Außenbereich angeordnet.



*Abbildung 76: 70er Glasröhren mit Spiegel*

In Abbildung 76 sieht man schon nach 6 Monaten, dass der Spiegel nicht gut platziert ist. Hierzu muss aber auch gesagt werden, dass es eine Flachdachanwendung mit nur 5° Kollektorneigung war. Da airwasol jedoch auch die Märkte mit Flachdächern anvisiert, musste die Spiegelgeometrie geändert werden. Hierfür wurde die Absorberröhre komplett neu konstruiert und ein Glas mit Außendurchmesser von 90 mm eingesetzt.



*Abbildung 77: Konstruktion Absorberröhre mit 90mm Glas*

Mit der größeren Glasröhre mussten auch die Vakuumgetter und Endkappen angepasst werden. Nun entstand so viel Freiraum zwischen Absorberröhre und Glaswand, dass der Spiegel in die Röhre integriert werden konnte. Hierzu wurden am SPF Raytracing Simulationen durchgeführt. Dies waren Formen wie runde U, V und W.



*Abbildung 78: Glasröhre mit W-Spiegel und Absorberrohr*

In Abbildung 78 ist das neue 90mm Glasrohr mit dem 50mm Absorberrohr und einem W-Spiegel abgebildet. Die Herstellung und der Einbau dieser Spiegelgeometrie ist recht praktikabel. Der Transporttest konnte mit dieser Geometrie bzgl. Verschieben und Verdrehen erfolgreich durchgeführt werden



*Abbildung 79: W-Spiegel im Kleinserientest*

Es wurden auch V-Formen mit verschiedenen Winkeln hergestellt und getestet.



*Abbildung 80: Glasröhre, V-Spiegel, Absorberrohr*

Die V-Form ist die einfachste Form für die Fertigung. Jedoch sitzt diese Variante zu locker in der Röhre und benötigt eine extra Fixierung für den „harten“ Transportfall. Auch gab es Probleme beim Ausheizen der Röhren bei Temperaturen  $> 350\text{ °C}$ . Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, kann es teilweise vorkommen, dass der Spiegel seine Form im Randbereich nicht hält, er wird wellig. Dies kommt vermutlich von inneren Blechspannungen und Hotspots im Ausheizofen.



*Abbildung 81: V-Spiegel nach Ausheizofen*

Unterschiede zwischen den verschiedenen Spiegelvarianten von Almedco bzgl. Einbau und Fertigung gab es auf der Seite von airwasol nicht. Auch die Spiegel-Schutzfolien waren alle gut zu verwenden.

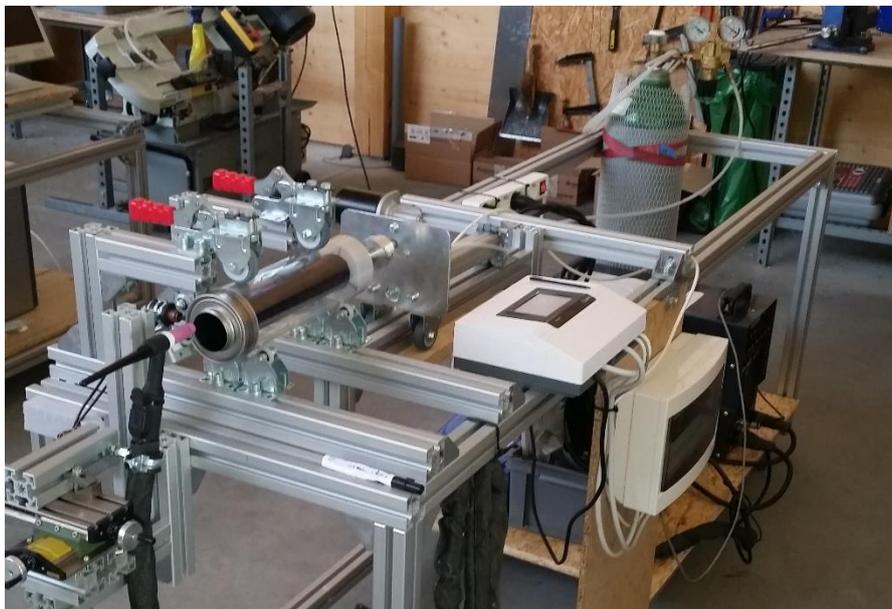
### **A6.2.3 Fertigungsmaschinen**

#### **Absorberrohr-Endkappen-Schweißen**

Im Projekt wurden verschiedene Fertigungsmaschinen für die Röhrenprototypenfertigung selbst konstruiert und in-house gebaut. Dazu erfolgten im Vorfeld viele verschiedene Versuche in den Techniklaboren von den Maschinenherstellern wie z.B. Trumpf-Lasertechnik, 3M, Loc-tite, Amada Miyachi.

Um das innere Absorberrohr mit den je zwei Röhrenendkappen vakuumdicht zu verbinden müssen beide Bauteile miteinander verschweißt werden. Beide Bauteile haben nur eine Wandstärke von je 0,2 mm.

Als erste Lösung wurde hierfür eine Drehvorrichtung mit einem WIG-Schweißgerät gebaut.



*Abbildung 82: WIG-Rundschweißanlage mit eingespannter 30cm Musterröhre*



*Abbildung 83: WIG-Schweißung - Stoßnaht*

Die Stoßnaht konnte grundsätzlich damit hergestellt werden jedoch dauerte die Schweißung je Röhrende zwischen 90 bis 105 Sekunden. Die Bauteilränder mussten exakt zueinander ausgerichtet werden und durch den geringen Schweißstrom war der Lichtbogen sehr anfällig auf größere Toleranzen und die Qualität der Röhrende.

Durch erfolgreiche Laborschweißversuche bei der Firma Trumpf wurde entschieden eine eigene Absorber-Laser-Schweißanlage (ALSA) zu bauen, siehe Abbildung 84.



*Abbildung 84: Absorber-Laser-Schweißanlage (ALSA)*

Die Anlage besteht aus einer Drehachse mit Spann-/Kalibriervorrichtung für die Absorberrohre, einem Diodenlaser 900W und eine verfahrbare X-Y-Achse mit einer Länge von 2800 mm über

Schrittmotoren. Die Anlage wird manuell bestückt. Der Schweißvorgang läuft an den verschiedenen Röhrenpositionen automatisch ab.



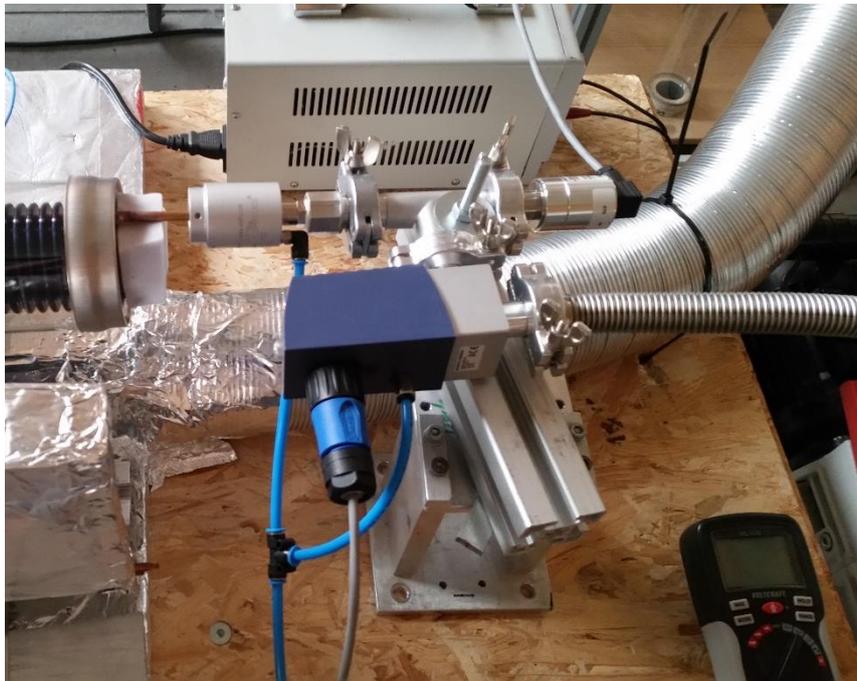
*Abbildung 85: Laser-Überlappnaht*

Mit der Anlage können nun die Endkappen mit dem inneren Absorberrohr in je knapp 20 Sekunden verschweißt werden. Die Anlage war aber auch sehr hilfreich um andere Fragestellungen zu bearbeiten wie z.B. die Schichtentfernung für die Absorberrohr-Schweißanlage bei Tubacon. Des Weiteren wurden auch verschiedene Vakuumgetter damit aktiviert, verschiedene Verbundwerkstoffe geschweißt und Beschichtungs-/Trennversuche durchgeführt.

### **Vakuumpumpstand**

Zur Reduzierung der Wärmeverluste an die Umgebung wird ein Vakuum zwischen inneren Absorberrohr und der Glasröhre erzeugt. Ziel ist ein Vakuum  $< 1 \cdot 10^{-4}$  mbar zu erhalten.

Hierfür wurden mit verschiedenen Vakuumpumpen und deren Kombinationen experimentiert.



*Abbildung 86: Vakuumpump-Einzelröhren-Teststand*

Um den Prozess der Vakuumerzeugung zu optimieren, wurden verschieden große Saugstutzen mit unterschiedlicher Länge an den Absorberröhren befestigt. Über einen kleinen Teststand konnte somit eine Druck-Zeitkurve aufgenommen werden. Der folgende Schritt war, die Stückzahl der gleichzeitig zu evakuierenden Röhren zu erhöhen um die richtige Vakuumpumpengröße für die Fertigung zu finden.



*Abbildung 87: Erweiterungstests am Vakuumpumpstand*

### **A6.3 Kollektortests**

Parallel zur Konstruktion und dem Aufbau der Fertigung waren viele Material- und Funktionstests notwendig.

## Heliumleckagetest

Einer der wichtigsten Tests ist und war der Heliumleckagetest in der Entwicklungsphase und jetzt in der Fertigung. Hierfür wurde ein ASM 340 Lecksucher der Firma Pfeiffer Vakuum gekauft. Der Lecksucher zeichnet sich durch seine hohe Empfindlichkeit mit der kleinsten nachweisbaren Leckrate für He im Vakuummodus mit  $5 \times 10^{-13}$  Pa m<sup>3</sup> /s aus. Hiermit können feinste, nicht mit dem Auge sichtbare Schweißfehler, Materialrisse oder Verbindungsfehler detektiert werden. Dies war auch zur Materialfindung wichtig und ist nun in der Fertigung zur „100% Kontrolle“ integriert.



Abbildung 88: Heliumleckagetest an einer Absorberröhre

## Temperaturschwankungstest

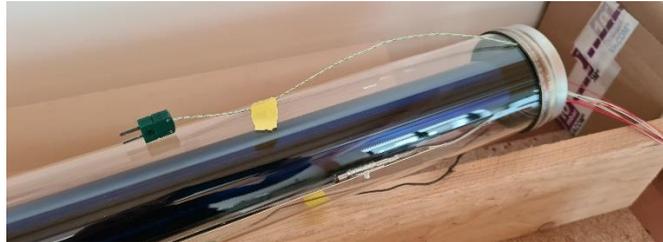
Die Absorberröhren müssen während ihrer Einsatzzeit viele tausend Temperaturschwankungen absolvieren. Das bedeutet Spannungen, Stress und Schwankungen von -40°C bis +300°C. Um dies zu simulieren wurden die Röhren im Wechsel eingefroren und über Anwendungstemperatur hinweg erhitzt. Dies wurde mit Musterröhren mit den Längen 300 mm und 2000 mm durchgeführt.



Abbildung 89: Temperaturwechseltests

## Temperaturmessung an den Röhrenbauteilen

Zur Kontrolle der einzelnen Bauteile und deren Temperatur in der Fertigung und im Betrieb wurden verschiedene Absorberröhren mit Temperatursensoren ausgestattet.



*Abbildung 90: Temperaturmessungen an den Endkappen und am Spiegel*

Für die Temperaturen der Bauteile im Röhreninneren wurden Endkappen mit Durchgangslöchern gefertigt. Somit war es auch möglich die Temperatursensoren im Vakuum zu platzieren. Diese Informationen waren für die Fertigung der Absorberröhren und zur Kontrolle im Anlagenbetrieb von Interesse.



*Abbildung 91: Vakuumdurchführung von Temperatursensoren*

## Glasspannungen

Für die Fertigung der Absorberröhren war außerdem die Verteilung der Spannung im Glas von Interesse. Hierfür eine einfache Apparatur mit verschiedenen optischen Filtern aufgebaut um die Spannungen teilweise sichtbar zu machen.

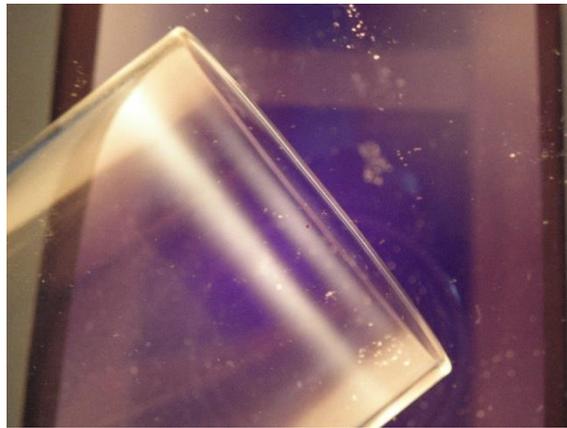


Abbildung 92: Helle sichtbare Spannungen in einem Glasrohr (Rohzustand)

#### A6.4. Aluminiumblech-Spiegel (Almecco)

##### Entwicklung von temperaturstabilen PVD beschichteten Aluminiumspiegeln für einen innenliegenden Spiegel.

Im Rahmen des ULA 2 Projektes wurden zwei Lösungsansätze verfolgt: PVD beschichtete Aluminiumblech-Spiegel mit freier Formgebung (Almecco) und direkt auf das Glasrohr aufgedampfte PVD-Spiegel (Dr. Laure Plasmatechnologie). Als kostengünstige Solarspiegel bieten sich PVD beschichtete Aluminiumspiegelbleche an. Der Vorteil ist, dass die Spiegelgeometrie frei gewählt und daher für das eingesetzte Absorberrohr optimiert werden kann.

Grundsätzlich werden Aluminiumspiegelbleche zunächst elektrochemisch poliert und anodisiert. Danach wird eine Spiegelschicht aus Aluminium oder Silber mittels PVD-Verfahren aufgebracht. Dabei ist es wichtig, hochreines Material zu verwenden, da Verunreinigungen die intrinsische Reflexion reduzieren. Darüber wird ein reflexionsverstärkendes Wechselschichtsystem aus einem niedrig brechenden und einem hochbrechenden dielektrischem Material (meist  $\text{SiO}_2$  und  $\text{TiO}_2$ ) mittels PVD aufgebracht.

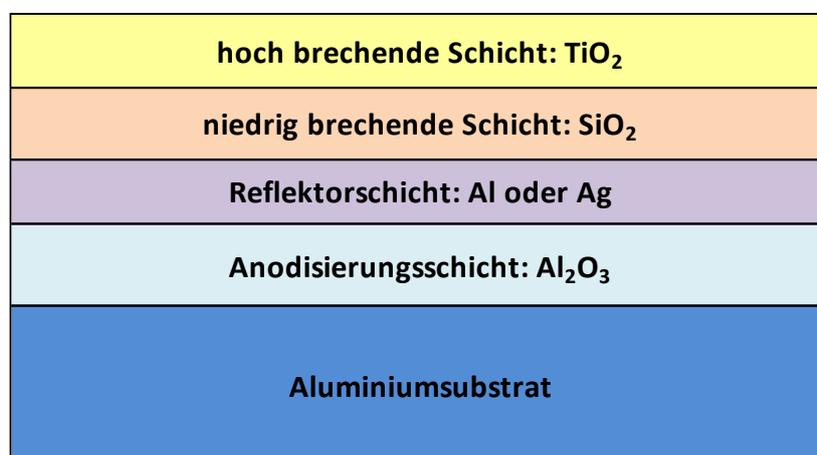


Abbildung 93: Schema des grundsätzlichen Schichtaufbaus von hochreflektierenden Reflektorschichtsystemen.

## Schichtsysteme mit Spiegelschicht aus hochreinem Aluminium

Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass auf Aluminium basierende Reflektorschichten wesentlich unempfindlicher gegenüber Diffusions- und Oxidationsdegradation wie silberbasierte Schichtsysteme sind. Daher wurde für die ersten Tests zunächst ein solar optimiertes PVD Schichtsystem mit Spiegelschicht aus hochreinem Aluminium abgeschlossen.

Die Reflexionsspektren dieses Schichtsystems sind in der Abbildung 94 aufgetragen. Schichtsysteme mit Aluminiumspiegelschicht weisen ein Reflexionsminium bei etwa 800nm auf, die durch die intrinsischen Reflexionseigenschaften des Aluminiums bedingt sind. Um eine maximale solare Reflexion zu erhalten, wurden die Schichtdicken des Wechselschichtsystems aus SiOx und TiOx gegenüber Spiegeln die in der Beleuchtungsindustrie eingesetzt werden etwas angepasst (siehe Abbildung 94).

So wurde mit dem Aluminium basierten Schichtsystem eine solare Reflexion von etwa 92% erreicht. Mit Silber basierten Spiegelschichtsystemen kann eine solare Reflexion von über 95% erreicht werden.

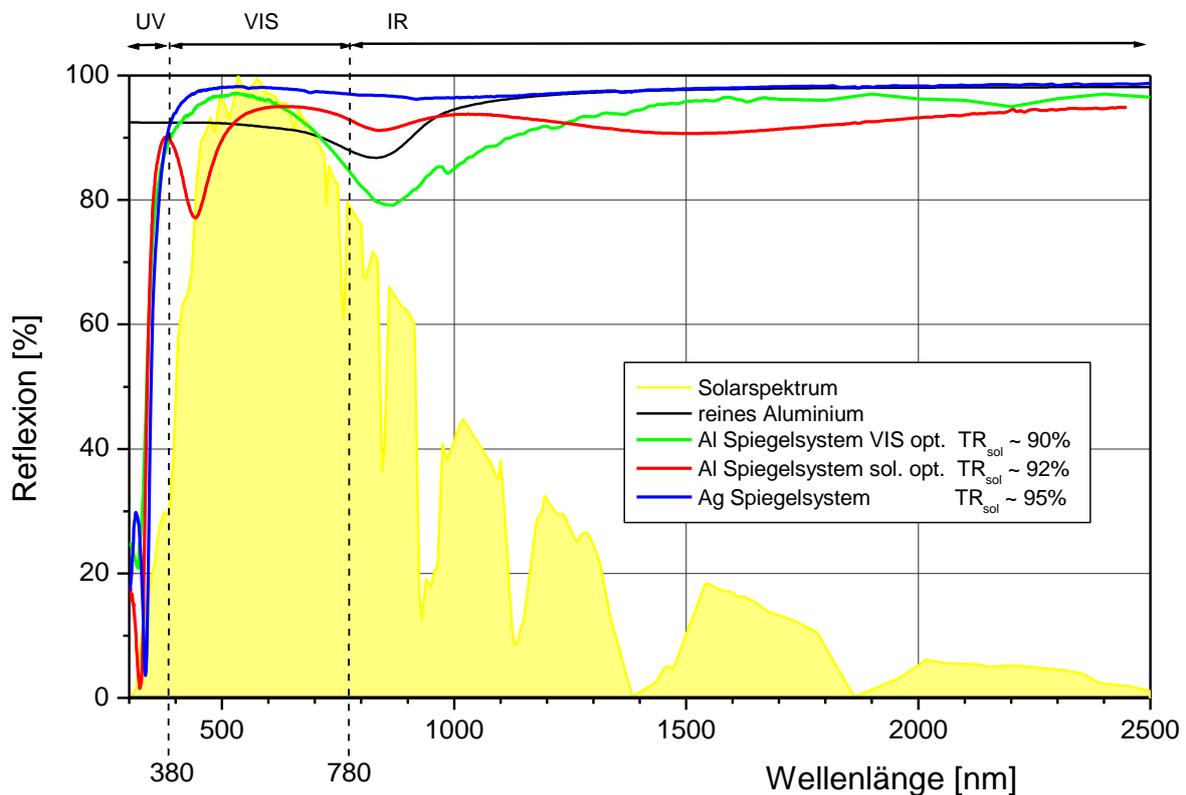


Abbildung 94: Reflexionsspektren von Aluminium basierten Schichtsystemen optimiert für Beleuchtungsanwendungen und für solare Reflexion. Zum Vergleich ist das Reflexionsspektrum eines Silber basierten Reflektorschichtsystems aufgetragen.

### Analyse des Degradationsverhaltens.

Das Problem von PVD beschichteten Spiegelsystemen besteht darin, dass aus technologischen und aus Kostengründen die Spiegelschicht in der Regel nicht dicker als 150nm ist. Das

ist ausreichend, um eine optisch dichte Schicht zu erhalten, die eine hohe Reflexion gewährleistet. Bei solchen dünnen Schichten kann es unter den geplanten Einsatztemperaturen bis 200°C oder unter Stagnationsbedingungen (siehe oben) zur Diffusion der Metallschicht kommen. Eventuell kann es auch während dem Herstellungsprozess der Absorberrohre, bei dem die Rohre während dem Evakuieren auf etwa 400°C für 30min aufgeheizt werden, zu Oxidationsprozessen durch Restsauerstoff oder Restwasser kommen.

Um zu ermitteln, ob das für den Einsatz vorgesehene Spiegelschichtsystem mit Aluminiumspiegelschicht ausreichend temperaturstabil ist, wurden Degradationstests bei unterschiedlichen Temperaturen an Luft durchgeführt. Aus Abbildung 95, in der die Totalreflexion als Funktion der Testzeit aufgetragen ist, ist zu erkennen, dass das Spiegelschichtsystem bis zu einer Temperatur von 300°C auch nach 3000 Stunden keine Degradationserscheinungen zeigt. Erst ab einer Temperatur von 350°C setzt eine Degradation ein.

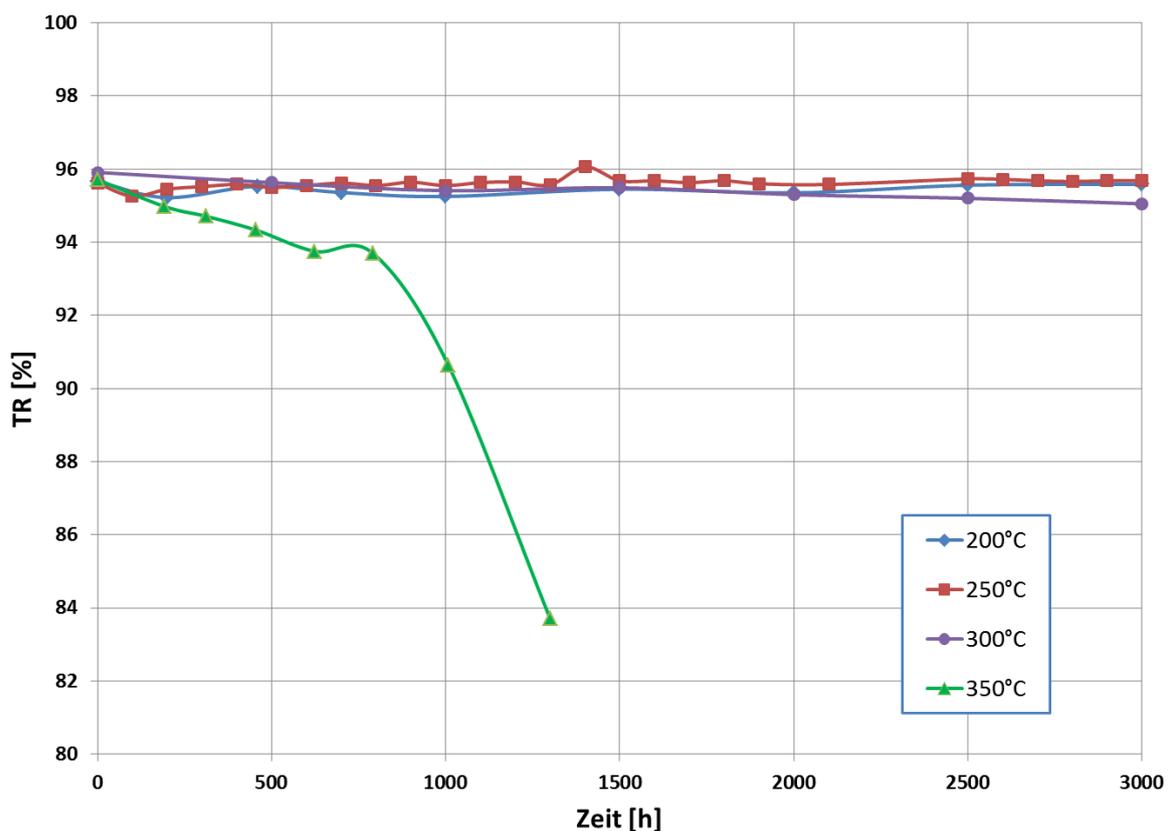


Abbildung 95: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Aluminiumspiegelschicht nach Test bei verschiedenen Temperaturen an Luft.

Da die Evakuierung der Absorberrohre bei etwa 400°C erfolgt, könnte bei diesem Prozess eine leichte Degradation auftreten. Daher wurde das Spiegelschichtsystem vor und nach dem Evakuierungsprozess beim SPF vermessen. Da dieser Prozess nur etwa 30min dauert, wurden keine signifikanten Veränderungen der Reflexionseigenschaften gefunden (siehe A7.2).

## Schichtsysteme mit Spiegelschicht aus hochreinem Silber

Da mit einem Aluminium basierten Schichtsystem eine solare Reflexion von nur etwa 92% und dagegen mit einem Silber basierten Schichtsystem eine solare Reflexion von über 95% erreicht werden kann (siehe Abbildung 94), wurden auch Silber basierte Schichtsysteme für den innenliegenden Spiegel hergestellt und auf Eignung untersucht.

Zunächst wurde eine Silber basierte Schicht untersucht, die für die Beleuchtungsindustrie eingesetzt wird. Hier besteht die Haftschrift für Silber aus Kupfer.

### Analyse des Degradationsverhaltens.

Schon ab 150°C findet eine Abnahme der Reflexion nach kurzer Zeit statt (siehe Abbildung 97). Bei 250°C tritt eine Abnahme der Reflexion um mehr als 3% schon nach 100 Stunden auf (siehe Abbildung 98). Aufgrund von vorgesehenen Arbeitstemperaturen zwischen 80 und 200°C und Stagnationstemperaturen bis zu 300°C ist dieses Schichtsystem nicht für den Einsatz im ULA Absorberrohr geeignet.

In XPS Tiefenprofiluntersuchungen wurde gefunden, dass bei diesen Temperaturen das Kupfer aus der Haftschrift in die Silberschicht hineindiffundiert und dadurch die Reflexion abnimmt. Daneben wurde durch EDX-Mapping gefunden, dass das Silber agglomeriert, was ebenfalls zu einer Abnahme der Reflexion führt.

Daher wurde die Kupferschicht durch eine Nickellegierung ersetzt und eine zusätzliche Silber-schutzschicht unterhalb und oberhalb der Silberreflexionsschicht eingefügt.

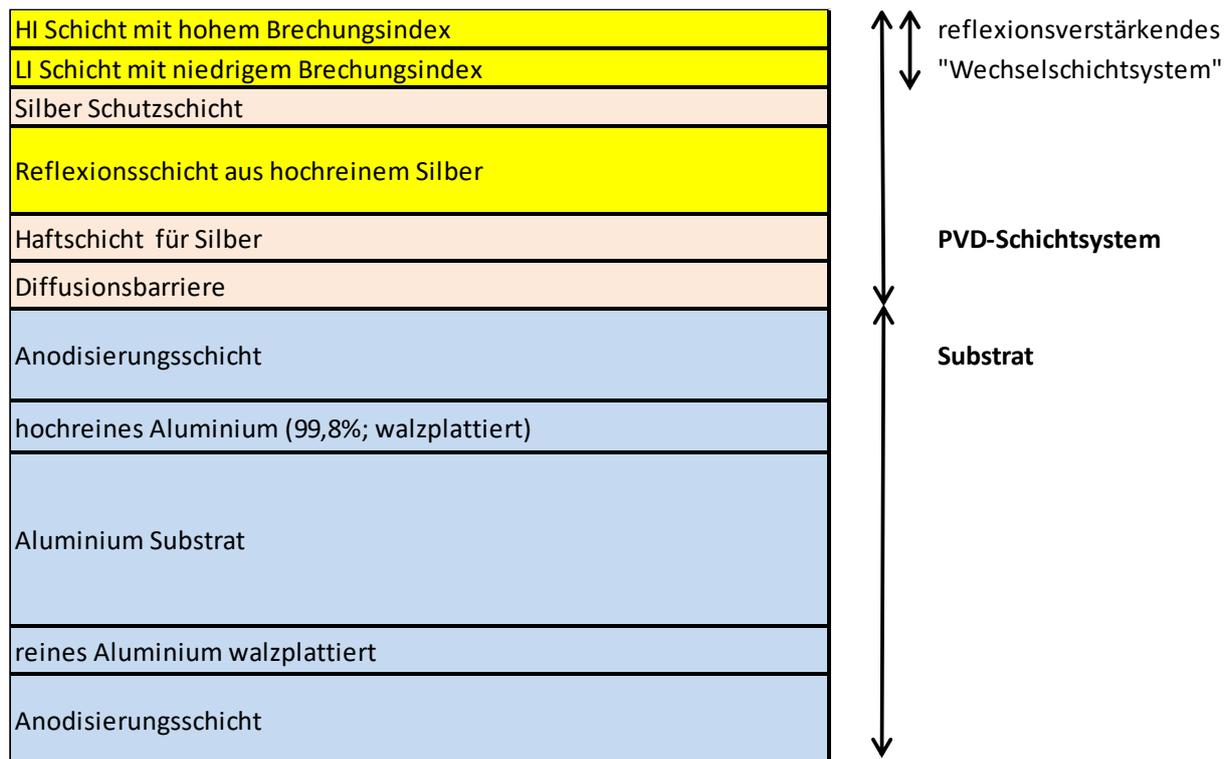


Abbildung 96: Schema des Schichtaufbaus des optimierten Silber basierten Reflektorschichtsystems.

Damit konnte die Temperaturstabilität wesentlich erhöht werden. Nach 6000h im Degradationstest bei 150°C nimmt die Reflexion um weniger als 1% ab (siehe Abbildung 97). Im 250°C Test ist die schnelle Abnahme der Reflexion die bei der Schicht mit Kupferhaftschiicht beobachtet wurde, nicht mehr zu beobachten (siehe Abbildung 98). Über 6000h nimmt die Reflexion nur noch sehr langsam ab. In Abbildung 99 sind Reflexionsspektren des optimierten Schichtsystems mit Spiegelschicht aus Silber nach Ofentests an Luft bei verschiedenen Temperaturen aufgetragen. Es wurde keine signifikante Veränderung des Reflektionsspektrums selbst nach 100 Stunden bei 350°C festgestellt.

Somit konnte die Temperaturstabilität des Silber basierten Schichtsystems signifikant erhöht werden. Aus diesem Material wurden ebenfalls Reflektoren gefertigt und in ULA Absorberrohre eingebaut. Nach dem Einschweißvorgang wurden Proben des Spiegelmaterials entnommen und beim SPF vermessen. Auch hier wurden nur geringe Veränderungen der Reflexionseigenschaften gefunden (siehe A7.2).

Damit ist das optimierte Spiegelmaterial mit Spiegelschicht aus Silber für den Einsatz im ULA Absorberrohr geeignet.

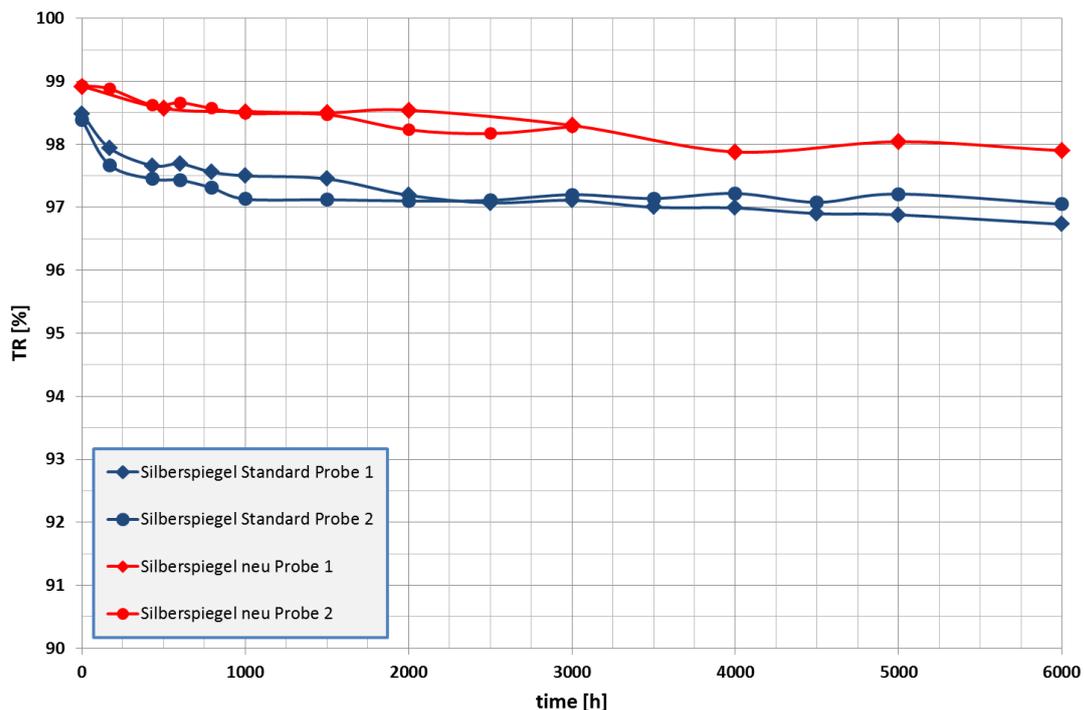


Abbildung 97: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Standardversion für die Beleuchtungsindustrie und der neuen Version des Silber basierten Schichtsystems im 150°C Temperaturtest an Luft.

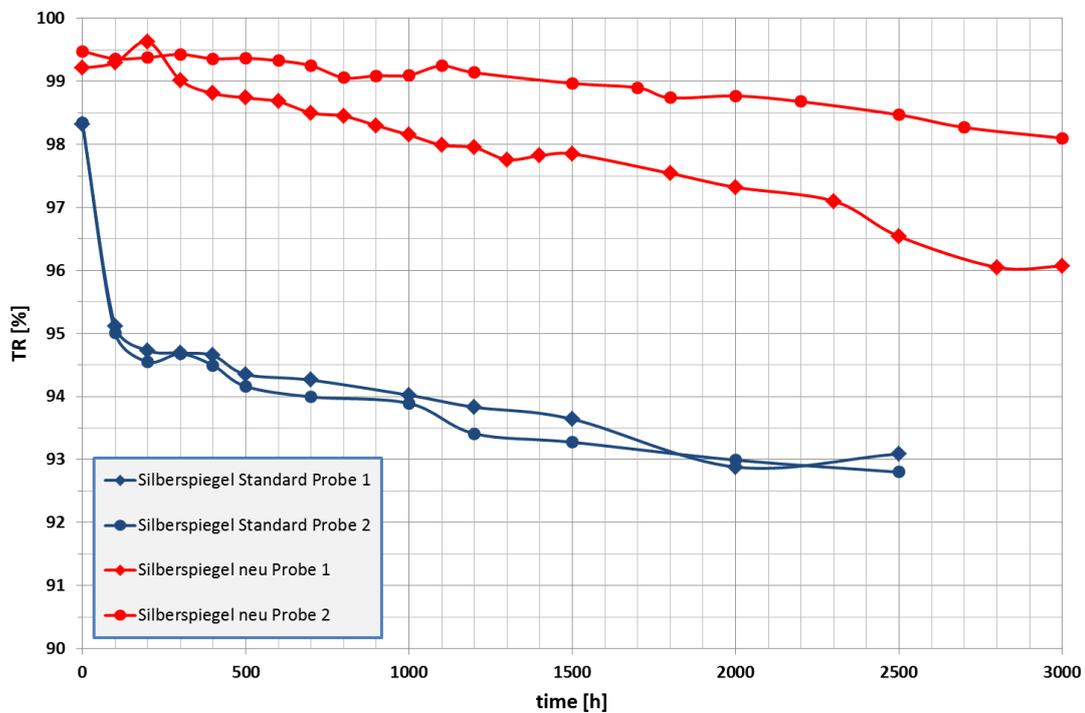


Abbildung 98: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Standardversion für die Beleuchtungsindustrie und der neuen Version des Silber basierten Schichtsystems im 250°C Temperaturtest an Luft.

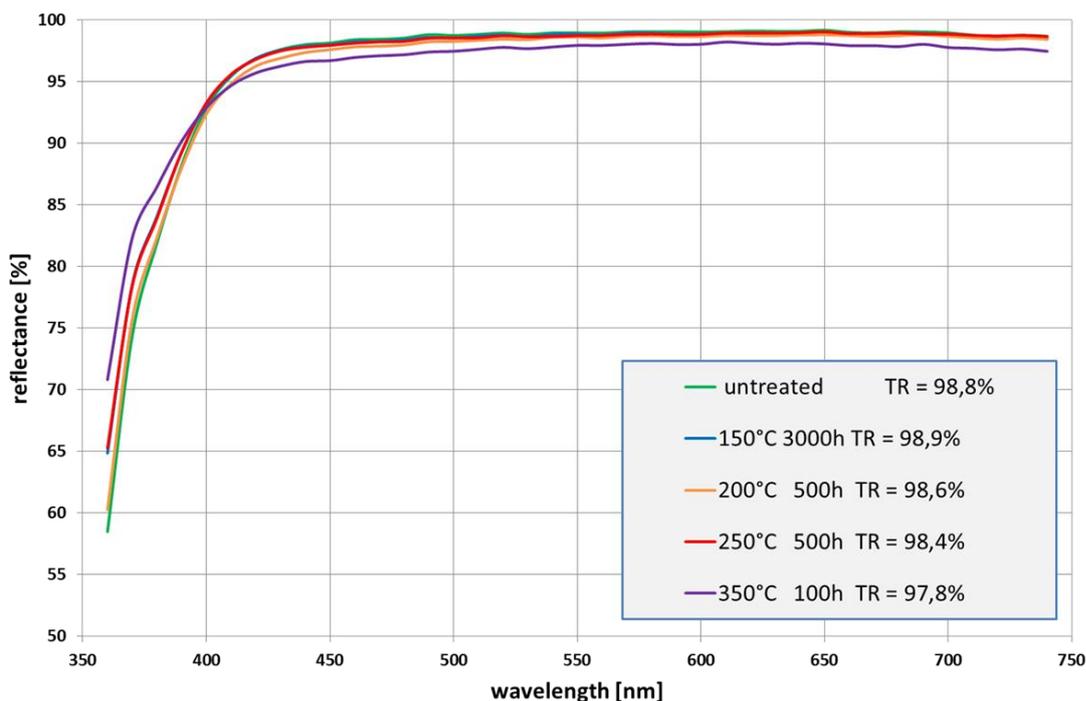


Abbildung 99: Reflexionsspektren des optimierten Schichtsystems mit Spiegelschicht aus Silber nach Ofentests an Luft bei verschiedenen Temperaturen.

Um die Reflektorgeometrie zu optimieren, wurden Raytracing Simulationen beim SPF durchgeführt. Nach den Vorgaben des SPF wurden danach Reflektoren aus diesem Aluminium-Reflektormaterial gefertigt und in Absorberröhren eingebaut (siehe Abbildung 100).



*Abbildung 100: Absorberrohr mit Aluminiumreflektor.*

## **A7 Charakterisierung (SPF)**

### **A7.1 Test der Langzeitstabilität der Absorberschicht durch das SPF**

#### **Charakterisierung (SPF)**

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung neuer und stabiler hochselektiver Solarabsorber, bestehend aus Edelstahlblech als Substrat mit darauf appliziertem Schichtsystem. Die neuen bereitgestellten Materialien stammten von Kooperationspartner Almeco GmbH. Die am SPF durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich auf die Charakterisierung der optischen Eigenschaften der Substrate, der einzelnen Schichten (wie Diffusionsbarriere, Reflektor-, Absorber- und Entspiegelungsschichten) sowie der kompletten Schichtsysteme. Zudem wurden umfangreiche Versuche zur Bewertung der Langzeitstabilität dieser Solarabsorber unter dem Einfluss hoher Temperaturen, sowohl in Vakuum als auch in Umgebungsluft, durchgeführt. Zusätzlich wurden Korrosionstests bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation für den Einsatz in nicht evakuierten Absorberrohren durchgeführt. [Bru01].

Die Ergebnisse der optischen Messungen und Degradationstests sind in den vorangegangenen Kapiteln detailliert beschrieben und diskutiert (siehe Kapitel A1 bis A3). In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieses Projektes eingesetzte Infrastruktur, die Versuchsaufbauten und die Verfahren vorgestellt.

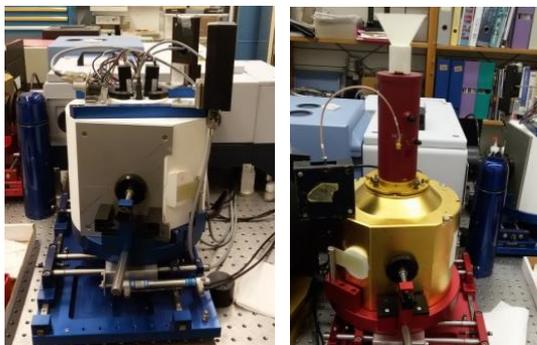
#### **Infrastruktur für die optische Charakterisierung und Degradationstest**

Die optische Leistung der neuen Beschichtungen wurde durch Analyse der Reflexionsspektren bewertet, die mit einem FTIR-Spektrometer (Bruker VERTEX 70) mit integrierenden Ulbricht-Kugeln (Durchmesser 200 mm, siehe Abbildung 101) gemessen wurden. Auf der Grundlage der optischen Spektren wurden die folgenden Parameter berechnet:

- der solare Absorptionsgrad ( $\alpha$ ), welcher den Anteil der absorbierten Solarstrahlung (AM1.5) darstellt
- der thermische Emissionsgrad ( $\epsilon$ ). Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen der Energie pro Flächeneinheit, die von der Absorberoberfläche in Form von elektromagnetischer Strahlung abgestrahlt wird, und der Energie, welche von einem perfekt schwarzen Körper bei derselben Temperatur abgestrahlt wird. Der Emissionsgrad wurde für verschiedene Temperaturen berechnet (siehe Abbildung 19). Standardmäßig wird  $\epsilon$  für 100°C angegeben.

Die Bewertung der Langzeitstabilität basiert in Anlehnung an das in ISO 22975-3 "Beständigkeit von Solarabsorberoberflächen" beschriebenen Verfahren. Es wurden beschleunigte Alterungstests hinsichtlich dreier unterschiedlicher Belastungsarten durchgeführt und deren Einfluss auf die optischen Eigenschaften wurde in definierten Zeitintervallen ermittelt:

- "Lufttest": Exposition der Proben in Luft bei hoher Temperatur (400°C). Es wurde ein Snijstaal P2000 Umluftofen verwendet (siehe Abbildung 102);
- "Vakuumtest": Exposition der Proben im Vakuum bei hoher Temperatur (400°C). Es wurde ein selbst entwickelter Vakuumrohrföfen verwendet (siehe Abbildung 103);
- "HHC-Test": Exposition der Proben bei hoher Luftfeuchtigkeit und unter dem Einfluss von Kondensation (High Humidity & Condensation, HHC). Diese Tests wurden in einem Klimaschrank von CTS (Modell CL-40/350/S, siehe Abbildung 104) bei einer Luftfeuchte von konstant 95% r. F. durchgeführt. Um die Probertemperatur kontrollieren zu können und um eine permanente Kondensation auf der Probenoberfläche zu gewährleisten, sind die Proben auf einem speziell angefertigten Probenhalter montiert, dessen Temperatur konstant 5 K unter der Lufttemperatur im Schrank gehalten wird.



*Abbildung 101: Integrierende Kugeln für Messungen im solaren Spektralbereich (links) und im Infrarotspektrum (rechts) zur optischen Charakterisierung von selektiven Absorberschichten.*



*Abbildung 102: Snijstaal P2000 Ofen für Temperaturstabilitätstest an Luft.*



*Abbildung 103: SPF-Ofen für Temperaturstabilitätstests im Vakuum.*



*Abbildung 104: CTS-Klimakammer für die Korrosionstests.*

Die optische Leistung der Referenzproben vor Durchführung des Alterungstests ist in Tabelle 1 und Abbildung 17 dargestellt. Die optische Leistung vor und nach der Degradation wird in Abschnitt A3 und A7.1 detailliert dargestellt.

## Langzeit Temperaturtests bei 400°C im Vakuum und an Luft

Für die Prüfung auf Eignung in evakuierten Absorberrohren wurden die Schichtsysteme (Tabelle 1) Degradationstests im Vakuum und zum Vergleich an Luft bei 400 °C unterzogen. Edelstahlsubstrate (1.4404) wurden unterschiedlich beschichtet: entweder mit Infrarot-Reflektorschichten (ULI-Proben), oder aber mit Infrarot-Reflektorschicht und darauf abgeschiedener Absorberschicht (ULA-Proben). Parameter G bedeutet "kein IR-Reflektor" (also Absorberschicht direkt auf Substrat).

In einem ersten Schritt wurden die Proben mit den Parametern A bis H bei hoher Temperatur (400 °C) im Vakuum und zum Vergleich an Luft untersucht. Die Temperatur wurde unter Berücksichtigung der erwarteten Stagnationstemperatur ausgewählt. Optische Messungen (Reflexion) wurden in unterschiedlichen Zeitintervallen durchgeführt und die Ergebnisse (Solare Absorption und thermische Emission) sind in Abbildung 105 und Tabelle 2 dargestellt.

Bei den ULI-Proben lieferten die Proben mit CrN und Al (Parameter A) und jene mit NiV (Parameter F) als IR-Reflektor die besten Ergebnisse in Bezug auf die Stabilität der optischen Eigenschaften (d.h. Emission, da nur Reflektorschicht), sowohl im Vakuum (Abbildung 105) als auch in Luft (Abbildung 106). Bei den durch eine zusätzliche Absorberschicht ergänzten ULA Typen, zeigten ebenfalls die A-Proben mit CrN und Al die geringste Abnahme der optischen Leistung. Dies könnte durch das Vorhandensein von Chromnitrid (CrN) erklärt werden, welches als Diffusionsbarriere wirken kann. CrN hat bekanntlich eine hohe chemische Stabilität und gute mechanische Eigenschaften.

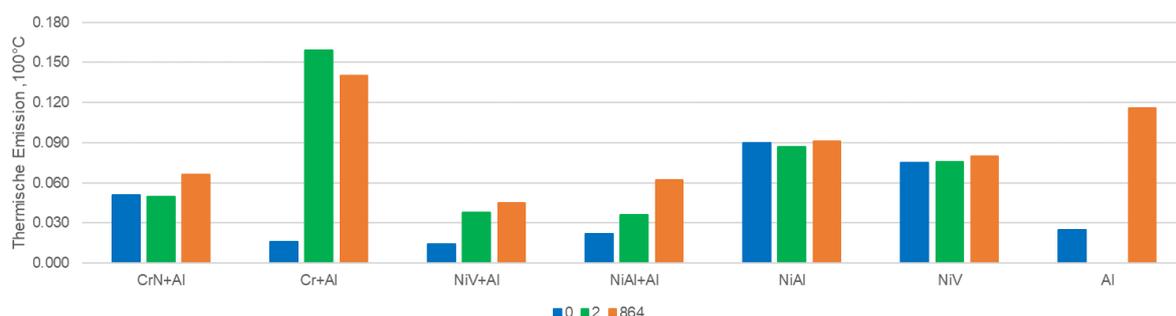


Abbildung 105: Thermische Emission (100 °C) der IR-Reflektorschichtsysteme nach Temperaturtest bei 400 °C in Vakuum.

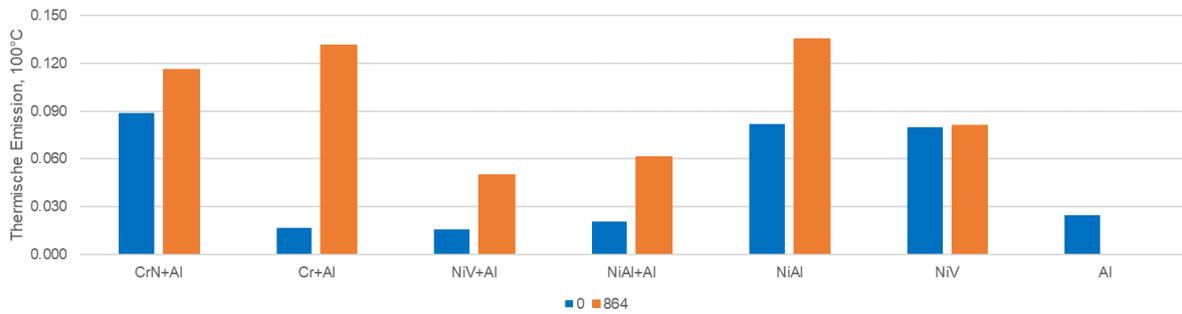
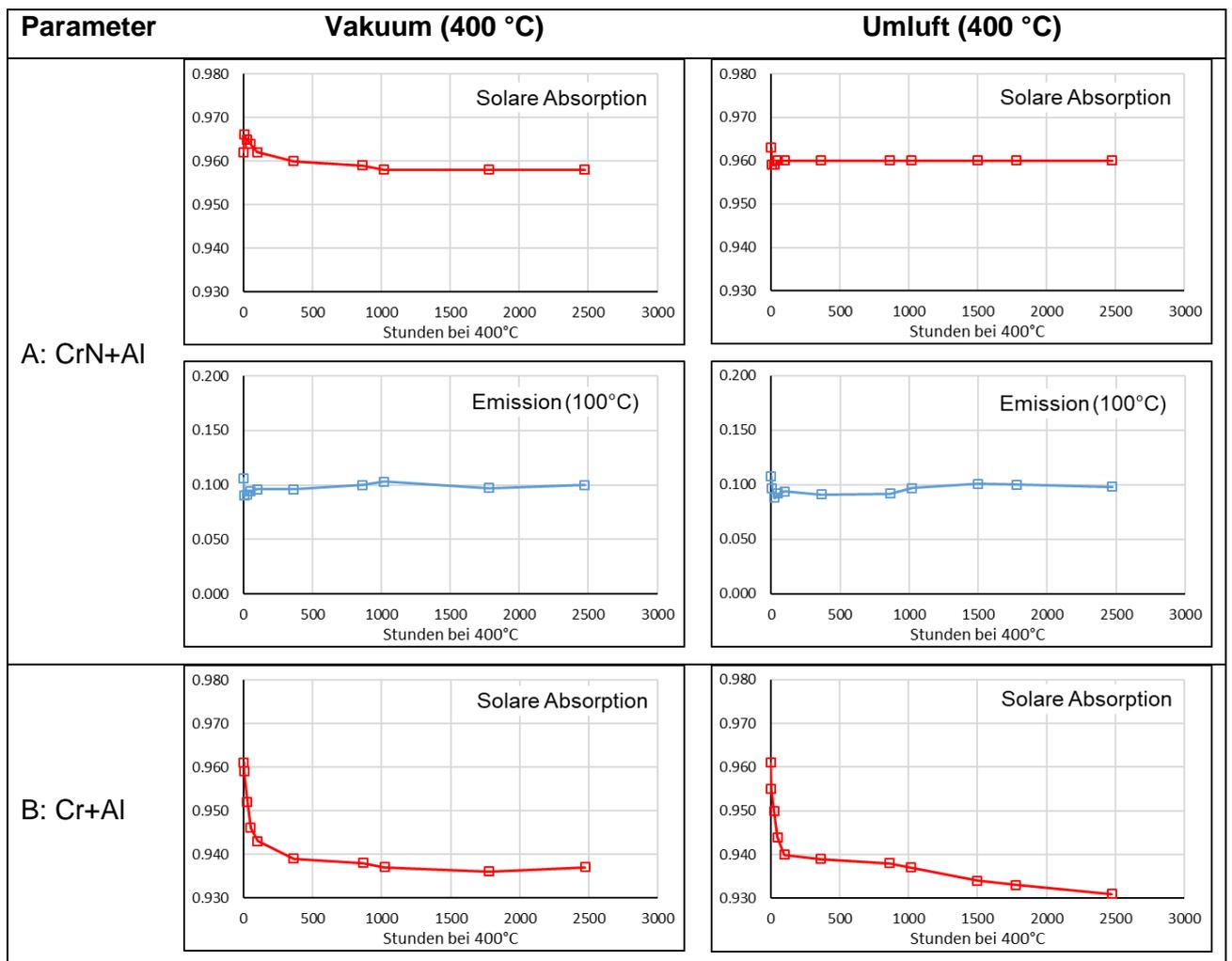
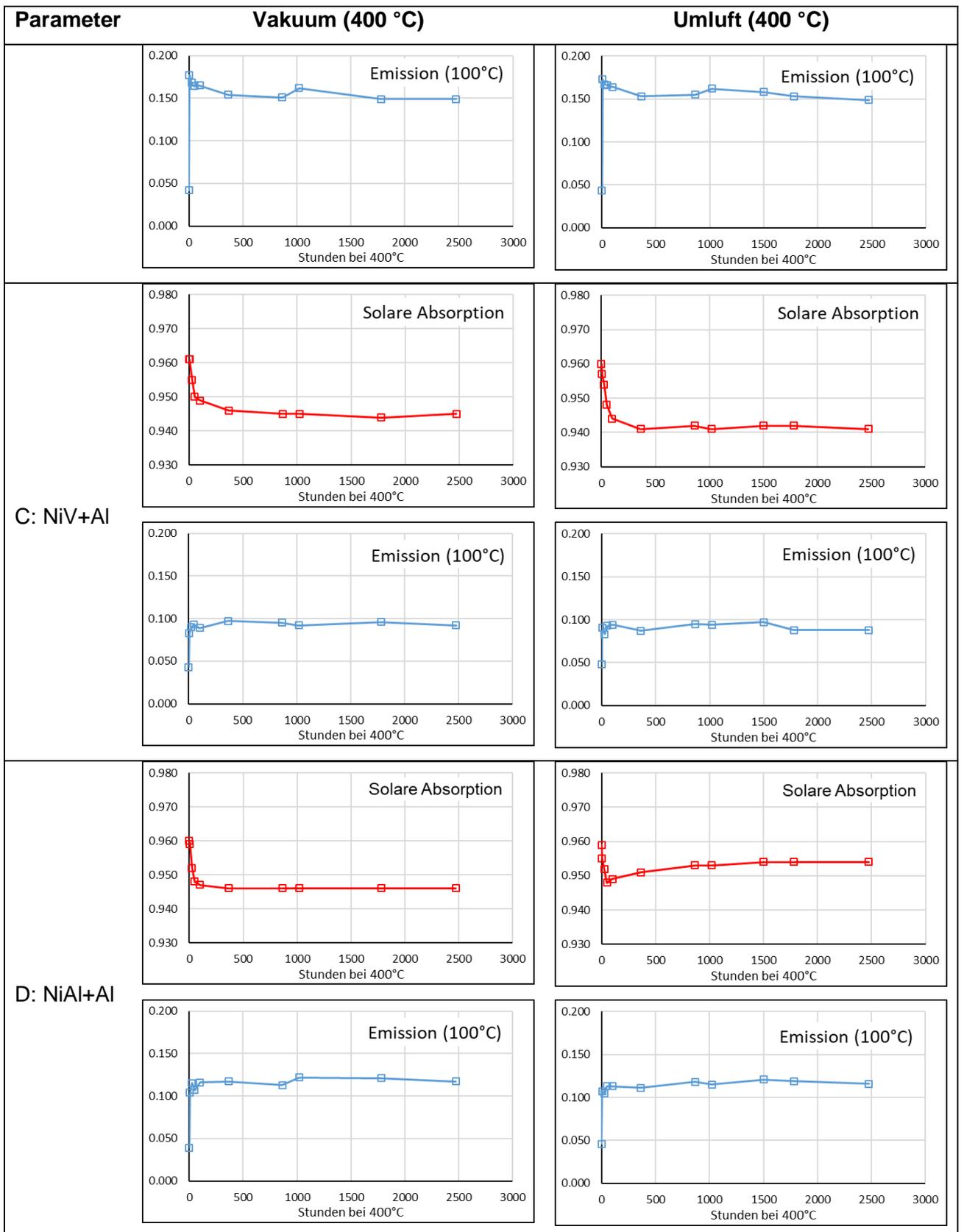


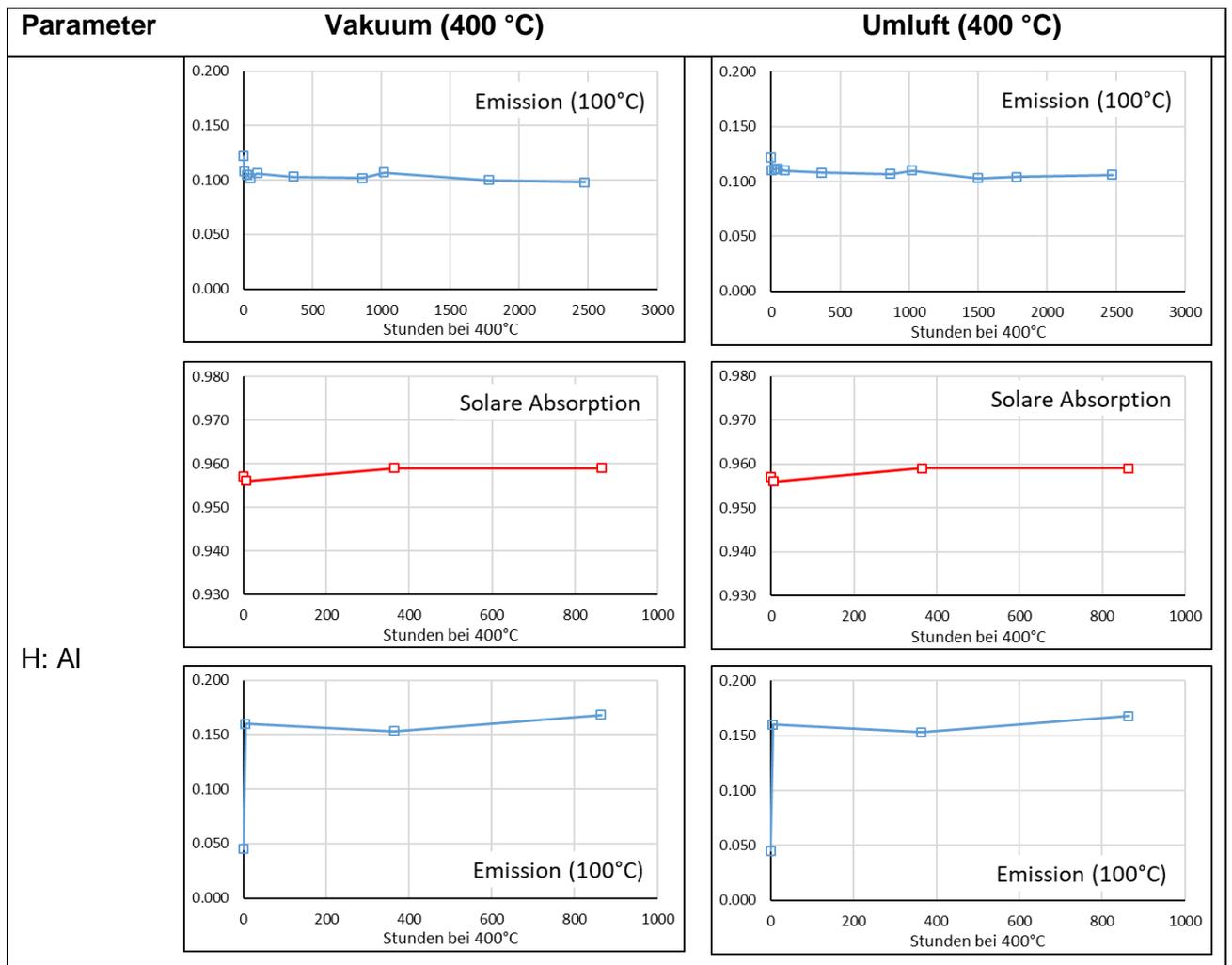
Abbildung 106: Thermische Emission (100 °C) der IR-Reflektorschichtsysteme nach Temperaturtest bei 400 °C in Luft.

Die Ergebnisse für den zeitlichen Verlauf der Absorption und Emission für die kompletten Absorberschichtsysteme (Parameter A bis H) getestet bei hoher Temperatur (400 °C) in Vakuum und zum Vergleich an Luft sind in Tabelle 2 zusammengefasst:





Parameter	Vakuum (400 °C)	Umluft (400 °C)
E: NiAl	<p>Solare Absorption</p>	<p>Solare Absorption</p>
	<p>Emission (100°C)</p>	<p>Emission (100°C)</p>
F: NiV	<p>Solare Absorption</p>	<p>Solare Absorption</p>
	<p>Emission (100°C)</p>	<p>Emission (100°C)</p>
G: ohne IR-Reflektor	<p>Solare Absorption</p>	<p>Solare Absorption</p>



*Tabelle 2: Zusammenfassung der optischen Kennwerte (Solare Absorption und Emission) bei den Degradationstests für Gesamtschichtsysteme (ULA-Proben) getestet bei hoher Temperatur (400 °C) in Vakuum und in Luft.*

Die Ergebnisse für die kompletten Absorberschichtsysteme (Parameter A bis G) getestet bei hoher Temperatur (400 °C) im Vakuum und an Luft können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Absorptionsgrad aller Absorberschichtsysteme ist sowohl in Vakuum wie auch an Luft sehr stabil.

Die besten Ergebnisse wurden mit dem Absorberschichtsystem mit CrN und Aluminium Schicht (Parameter A) erzielt. Der Absorptionsgrad bleibt im Test über 2500 Stunden fast konstant auf einem Wert von etwa 96 %. Auch bei Verwendung von NiAl als IR-Reflektorschicht (Parameter E) ist der Absorptionsgrad sehr stabil sowohl an Luft wie auch im Vakuum (ca. 95 %).

- Die Abnahme des Absorptionsgrades stagniert nach etwa 500 Stunden bei fast allen Schichtsystemen.

Bei allen Proben kommt es zunächst zu einem Degradationseffekt und danach zu einer Stabilisierung der optischen Eigenschaften. Die Veränderungen erfolgten in unterschiedlichen Zeitintervallen, abhängig von den beteiligten Materialien. Nach etwa 500 Stunden stagnieren die optischen Kennwerte. Dieses Verhalten ist bei den an Luft und bei hohen Temperaturen getesteten Proben ausgeprägt. In Luft kann das Vorhandensein von Oxidschichten auf der Oberfläche als Diffusionsbarriere wirken und die Verdampfungsrates effektiv begrenzen. Damit ließe sich dieses Verhalten erklären. In Anbetracht dieses Effekts wird eine anfängliche thermische Behandlung empfohlen.

- Die höchste Degradation sowohl im Vakuum als auch in Luft trat bei den Proben mit einer Aluminiumschicht (B, C, D, H) im IR-Reflektorschichtsystem auf. Die Probe mit Al und Cr (Parameter B und H), zeigt einen starken Anstieg des Emissionsgrades schon nach 5 Stunden.

Obwohl anfänglich die Emission und die Solare Absorption bemerkenswert gut waren, sind die optischen Kennwerte der Proben unter den getesteten Bedingungen nicht stabil. Die Degradation im Vakuum (ca.  $10^{-5}$  mbar) und bei hoher Temperatur kann durch Materialverlust (z.B. Sublimation) und Diffusion innerhalb der Probe erklärt werden. Al und Cr Diffusion durch die Absorberschichten wurde zuvor bereits gezeigt [Dud 02].

- Der Degradationsverlauf des Absorptionsgrades und der Emission sind im Vakuum wie auch an Luft bei den kompletten Absorberschichtsystemen nahezu gleich. Dies bedeutet, dass die Degradation hauptsächlich durch Diffusion und nicht durch Oxidation erfolgt.

Die Schichtsysteme mit dem CrNAI und dem NiV IR-Reflektor (Parameter A und F) weisen die beste thermische Stabilität auf. Da der Emissionsgrad dieser Schichtsysteme jedoch zu hoch ist, wurde die Molybdänschicht als IR-Reflektor (Parameter M) weiter untersucht.

Der Einfluss von Molybdän (Mo) als Infrarotreflektor (Tabelle 1, Parameter M) und die Stabilität des kompletten Absorbersystems (Edelstahlsubstrat + Mo IR-Reflektorbeschichtung + Absorberschicht + Antireflexschicht) wurde in Vakuum und in Luft bei hoher Temperatur (400 °C) bewertet. Darüber hinaus wurden Korrosionstests bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation durchgeführt, um die Stabilität der neuen Materialien für die nicht evakuierte Absorberröhre zu beurteilen.

Edelstahlsubstrate (1.4541, AISI 321) wurden entweder nur mit Infrarot (IR)-Reflektormaterial (Proben ULIM) oder mit dem kompletten Absorberschichtsystem (Proben ULAM) beschichtet. Es wurden drei Arten von Proben untersucht:

- Typ 1: beschichtet mit Mo als IR-Reflektorschicht;
- Typ 2: beschichtet mit Mo IR-Reflektorschicht + Absorber + Antireflexschicht;
- Typ 3: beschichtet mit Mo (doppelte Dicke) IR-Reflektorschicht + Absorber + Antireflexschicht.

Der Unterschied zwischen Typ 2 und 3 ist die Schichtdicke der Molybdänbeschichtung.

Die optische Leistung der Referenzproben vor der Durchführung des Alterungstests ist in Tabelle 3 aufgeführt. Die durchschnittliche Solare Absorption für Proben vom Typ 1 beträgt 47,5 % (was jedoch von untergeordneter Bedeutung ist, da nur Reflektorschicht), während die durchschnittliche thermische Emission 3,8 % beträgt. Proben vom Typ 2 und Proben vom Typ 3 haben eine sehr ähnliche optische Leistung: 95,4 % für die durchschnittliche Solare Absorption und 7.0% für die thermische Emission.

Proben Code	Probenart	Test	$\alpha$	$\epsilon$
ULIM1903C10	<b>Typ 1</b> mit Mo als IR-Reflektorschicht	Probe 1   Referenz für "HHC-Test" <sup>1</sup>	47,80%	4,00%
ULIM1903C20		Sample 2   Referenz für "HHC-Test"	47,30%	3,50%
ULIM1903C30		Sample 3   Referenz für "HHC-Test"	47,60%	3,80%
ULIM1812U00		Referenz   "Lufttest" <sup>2</sup>	47,40%	4,00%
ULIM1812V00		Referenz   "Vakuumtest" <sup>3</sup>	47,40%	3,50%
ULAM1903C10	<b>Typ 2</b> mit Mo IR-Reflektorschicht + Absorber + Antireflexschicht	Probe 1   Referenz für "HHC-Test"	95,40%	7,10%
ULAM1903C20		Probe 2   Referenz für "HHC-Test"	95,40%	6,90%
ULAM1903C30		Probe 3   Referenz für "HHC-Test"	95,50%	6,80%
ULAM1812U10		Referenz   "Lufttest"	95,30%	6,80%
ULAM1812V10		Referenz   "Vakuumtest"	95,40%	7,20%
ULAM1903K10	<b>Typ 3</b> Ähnlich wie Typ 2, aber doppelte Dicke für Mo-Schicht	Probe 1   Referenz für "HHC-Test"	95,40%	7,00%
ULAM1903K20		Probe 2   Referenz für "HHC-Test"	95,50%	7,10%
ULAM1903K30		Probe 3   Referenz für "HHC-Test"	95,30%	7,20%
ULAM1812U20		Referenz   "Lufttest"	95,40%	7,10%
ULAM1812V20		Referenz   "Vakuumtest"	95,40%	6,50%

*Tabelle 3: Solare Absorption  $\alpha$  und Emission  $\epsilon$  der untersuchten Proben mit Mo als IR-Reflektorschicht.*

Die optischen Eigenschaften der im Vakuum bei 400 °C getesteten Beschichtungen sind für unterschiedlichen Alterungszeiten (z. B. 525 h, 1000 h und 1500 h) in Abbildung 107 und Abbildung 108 dargestellt. Wie in Abbildung 107 zu erkennen ist, ist das komplette Absorbersystem sehr stabil: nach einer leichten initialen Abnahme von ca. 1 % stabilisiert sich die Solare Absorption und es erfolgt keine weitere Degradation. Die Alterung bewirkt eine leichte Verbesserung der thermischen Emission des gesamten Absorbersystems (Abbildung 108). Dieses Verhalten wurde bei den zuvor getesteten IR-Reflektoren (Parameter A bis H) nicht beobachtet. Dort nahm die thermische Emission nach Alterung im Vakuum bei gleicher Temperatur zu.

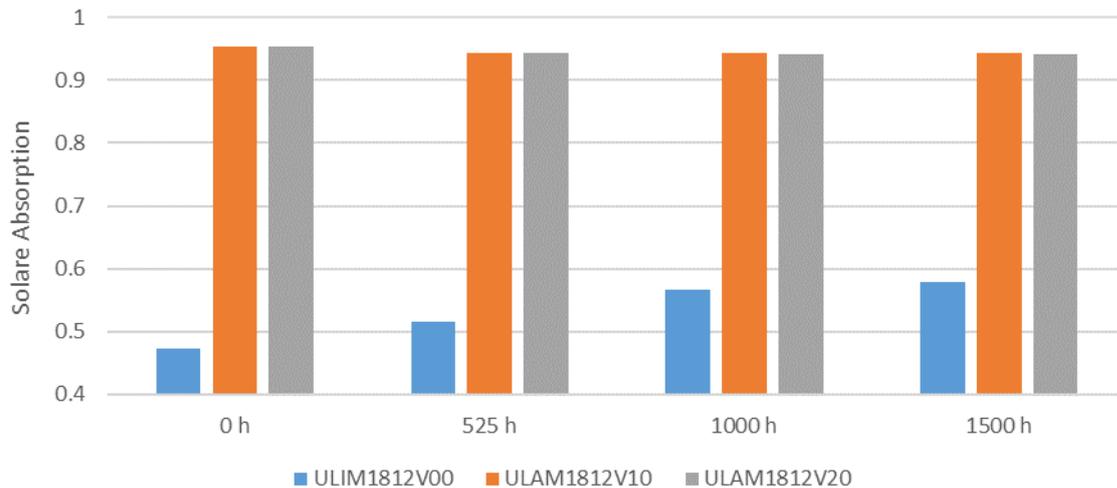


Abbildung 107: Änderung der Solaren Absorption für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812V00) und für Proben mit gesamt Absorbersystem (Proben ULAM1812V10 und ULAM1812V20), nach Alterung im Vakuum bei 400 °C.

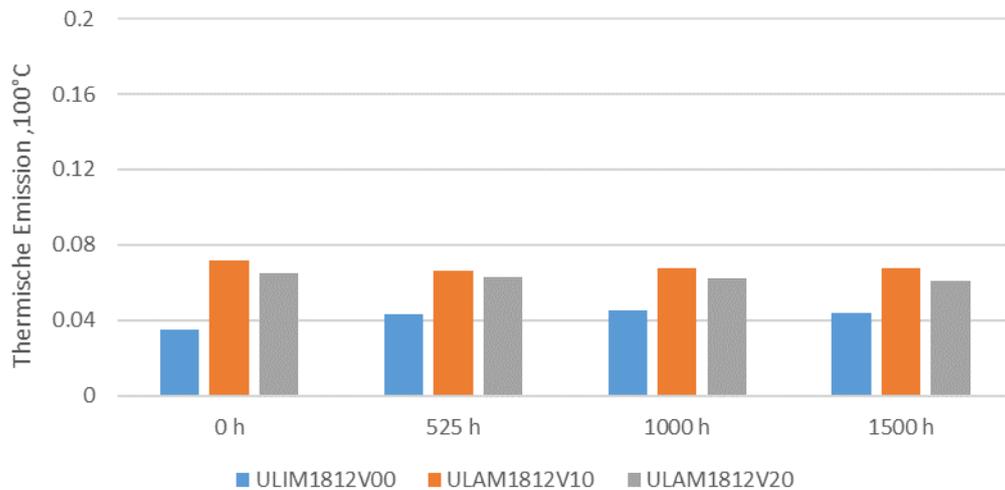


Abbildung 108: Änderung der Emission für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812V00) und für Proben mit gesamt Absorbersystem (Proben ULAM1812V10 und ULAM1812V20), nach Alterung im Vakuum bei 400°C.

Die Absorberproben mit Mo als Infrarotreflektor wurden ebenfalls an Luft bei der gleichen Prüftemperatur (400 °C) wie im Vakuumtest geprüft. Ziel war es, deren thermische Stabilität bei belüfteten Rohren zu überprüfen.

Die optischen Veränderungen sind ähnlich wie beim Vakuumtest, z.B. nach einer leichten Abnahme der Solaren Absorption stabilisieren sich die Werte für die Proben mit dem gesamten Absorbersystem. Dies deutet darauf hin, dass im Vakuum und in Luft der gleiche Abbaumechanismus auftritt und dieser nicht durch die Anwesenheit von Sauerstoff (Oxidation) induziert wird, sondern vielmehr durch die Diffusion der Elemente aufgrund erhöhter Temperatur auftritt.

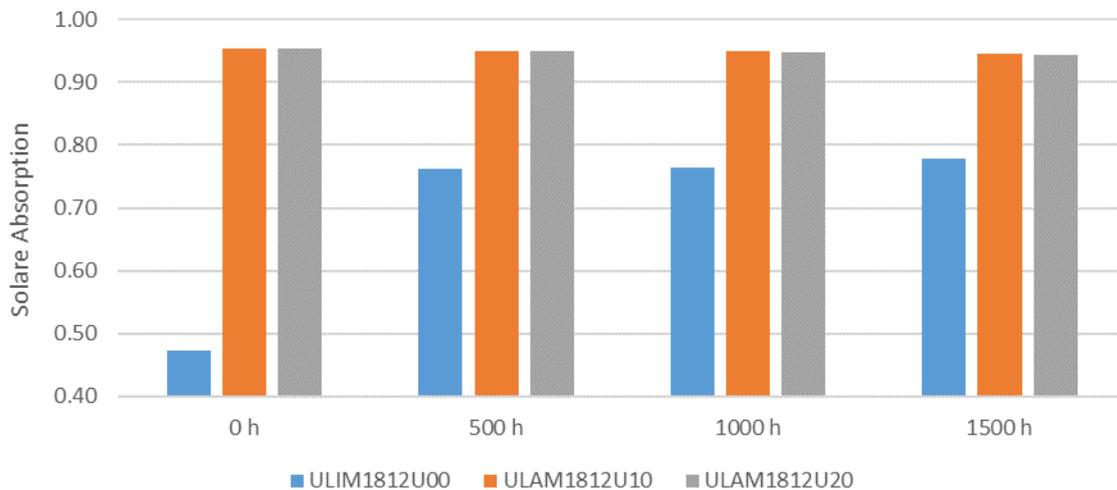


Abbildung 109: Änderung der Solaren Absorption für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812U00) und für Proben mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812U10 und ULAM1812U20), nach Alterung in Luft bei 400 °C.

Die Änderung der thermischen Emission zeigt für das komplette Absorbersystem das gleiche Verhalten wie bei den im Vakuum getesteten Proben. Die thermische Emission bleibt auf einem niedrigen Niveau, was darauf hindeutet, dass Mo sehr stabil ist, zumal wenn es durch die Absorber- und/oder die Antireflexschicht geschützt wird.

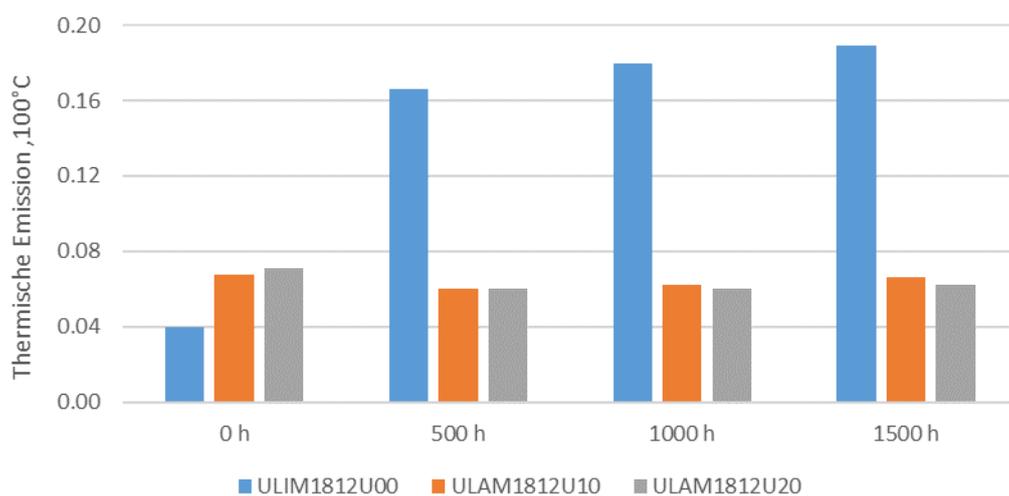


Abbildung 110: Änderung der Emission für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812U00) und für Proben mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812U10 und ULAM1812U20), nach Alterung in Luft bei 400 °C.

Um zu untersuchen, ob Absorberschichtsysteme mit Molybdän als IR-Reflektorschicht für den Einsatz in nicht evakuierten Absorberrohren geeignet sind, wurden die Schichtsysteme Kondensationstests bei 60 °C Proben temperatur in Luft von 65 °C und 95 % r.F. unterzogen. Aufgrund bisheriger Erfahrungen und aus statistischen Gründen wurden von jedem Typ (Typ 1 bis Typ 3) drei Proben für die Prüfung bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation ausgewählt. Die Variation der optischen Eigenschaften ist in Abbildung 111 und Abbildung 112 dargestellt.

Bei allen Typen kommt es zu einer signifikanten initialen Zunahme der thermischen Emission (Abbildung 112), gefolgt von einer Stabilisierung und einer allmählichen Abnahme der Solaren Absorption (Abbildung 111).

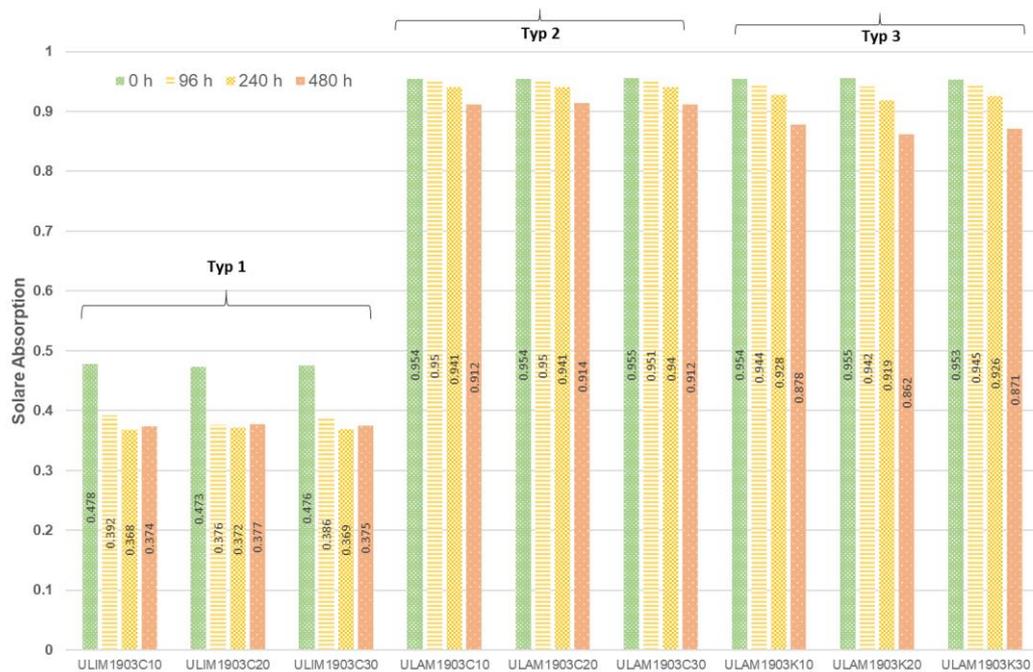


Abbildung 111: Änderung der Solaren Absorption für Proben nur mit Mo-Infrarotreflektor (Proben ULIM1812C10, ULIM1812C20 und ULIM1812C10) und mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812C10, ULAM1812C20 und ULAM1812C30, mit doppelter Dicke für Mo-Schicht: ULAM1812K18K20 und ULAM bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation (60 °C).

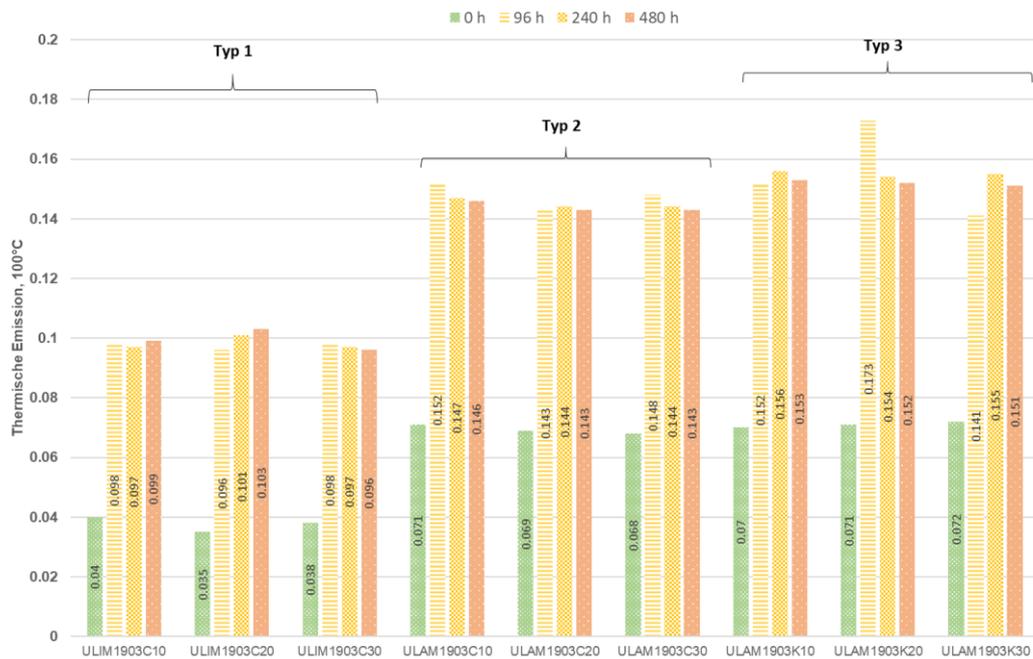


Abbildung 112: Änderung der Emission für Proben nur mit Mo-Infrarotreflektor (Proben ULIM1812C10, ULIM1812C20 und ULIM1812C30) und mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812C10, ULAM1812C20 und ULAM1812C30, mit doppelter Dicke für Mo-Schicht: ULAM1812K18K20 und ULAM bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation (60 °C).

Neben einer Modifikation der IR-Reflektorschicht kann die beobachtete Änderung der optischen Eigenschaften bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation auch durch eine Veränderung der SiO<sub>2</sub>-Anti-Reflektionsschicht erklärt werden, wie in Abbildung 113 zu erkennen ist. Diese Modifikation der SiO<sub>2</sub>-Anti-Reflektionsschicht wurde bereits berichtet [Dud 02] und ist mit der Verringerung der SiO<sub>2</sub>-Schichtdicke ausgelöst durch hohe Luftfeuchtigkeit und Kondensation verbunden.

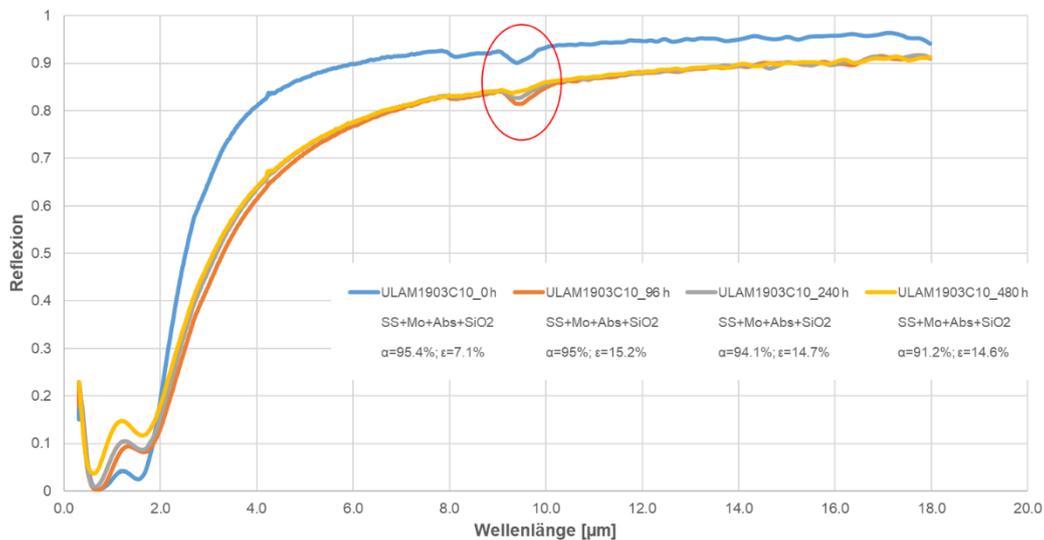


Abbildung 113: Reflexionsspektren der Probe mit gesamtem Absorbersystem (ULAM1903C10) vor und nach unterschiedlichen Prüfzeiten bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation bei 60 °C.

## A7.2 Test des Absorberrohrs (SPF/airwasol)

Teile der Temperaturmessungen wurden wie in A6 erwähnt bzgl. Stillstandstemperatur mit Sensoren in der Röhre bei airwasol durchgeführt. Auch die Wechselbelastungen an der kompletten Röhre und deren einzelnen Bauteile wurden erfolgreich durchgeführt.

Am SPF wurden zwei Kollektoren auf dem Track outdoor vermessen (siehe Abbildung 114). Vorderstes Ziel war hierbei nicht die genaue Bestimmung des thermischen Wirkungsgrads der Kollektoren, sondern vorerst die Untersuchung des Betriebsverhalten. Speziell die Zusammenhänge und Optimierung des Wärmeübergangs in der Absorberröhre an das Wärmeträgermedium Luft waren von Interesse. Die genaue Bestimmung der Wirkungsgradparameter von Luftkollektoren ist sehr aufwändig. Besondere Herausforderungen sind einerseits die Messung des Volumenstromes aber auch die Messung der Lufttemperaturen. Die eingesetzten Geräte sind ausreichend um das Verhalten der Kollektoren ausreichend zu bestimmen, für eine genaue Messung nach ISO 9806 müsste allerdings der Prüfstand erweitert werden. Es wurden über längere Zeit Messungen mit verschiedenen Volumenströmen und mit verschiedenen Kollektorkonfigurationen durchgeführt. Abbildung 114 zeigt als Beispiel das Messprotokoll eines Tests der bei einem Durchfluss von 106 kg/h durchgeführt wurde. Der dabei bestimmte optische Wirkungsgrad liegt jeweils bei etwa  $\eta_{0, \text{hem}} = 0.66$ . Messungen mit kleiner und höheren Durchflüssen haben keine deutlich Veränderungen gezeigt, allerdings konnte mit der vorhandenen Anlage auch nur ein maximaler Durchfluss von 150 kg/h realisiert werden.

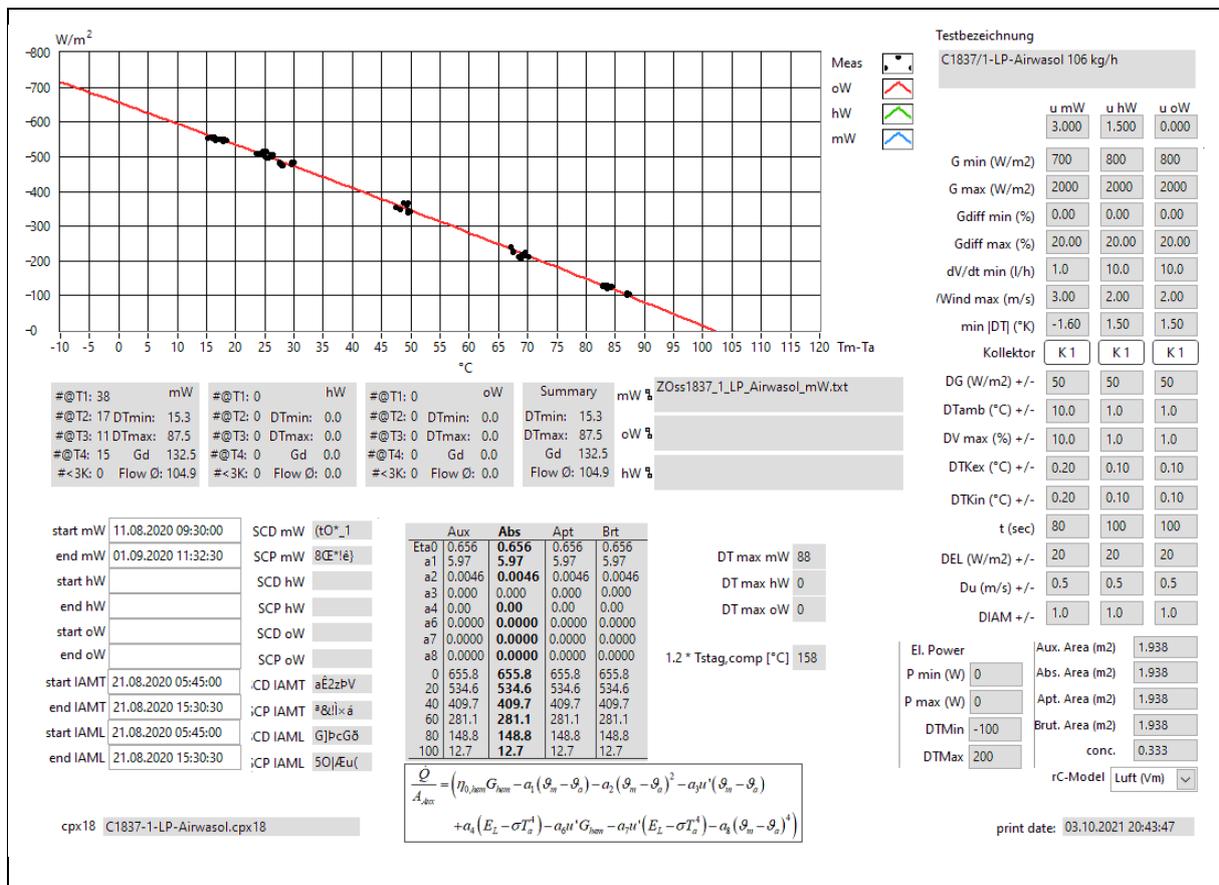


Abbildung 114: Messprotokollbeispiel thermische Leistung Luftkollektor

Mit diesem Kollektor konnte auch der Winkelfaktor (IAM) problemlos nach ISO 9806 mit der steady state methode bestimmt werden. Auch diese Messung entspricht sehr gut den Erwartungen für diesen Kolleortyp. Abbildung 115 zeigt die Messung des transversalen Winkelfaktors.

Fr., 21. Aug. 2020 05:45:00 - 15:30:30

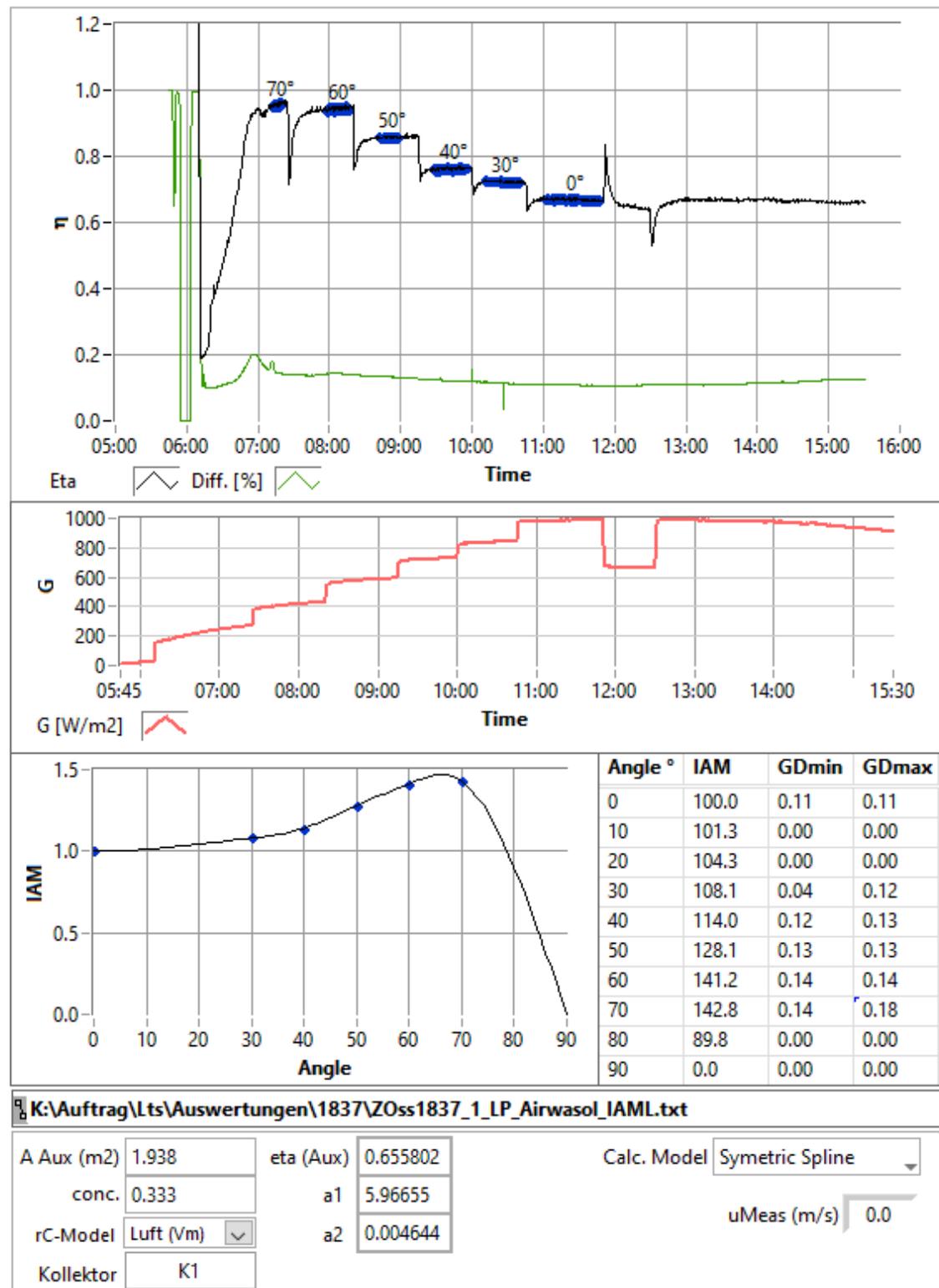


Abbildung 115: Protokoll der Messung des Winkelfaktors des Luftkollektors

Bei allen Messungen ist allerdings auffallend, dass die Stagnationstemperatur die aus den Wirkungsgradkurven ermittelt werden kann (Temperatur bei der  $\eta_{0,hem} = 0$ ) unerwartet tief ist und auch nicht mit den direkt am Absorberrohr gemessenen Temperaturen zusammenpasst. Dazu wurden verschiedene Untersuchungen gemacht. Ein Screenshot der Messsoftware (Abbildung 116) zeigt typische Temperaturmesswerte im Betrieb. Die beiden Stagnationssensoren die direkt an zwei verschiedenen Absorberrohren befestigt wurden (TLuft Stag1 und TLuft Stag2) zeigen sehr ähnliche Temperaturen (151.9°C und 143.5°C). Das ist sehr gut erklärbar durch die etwas unterschiedliche Montage. Die Lufttemperatur am Kollektorausgang wird mit zwei verschiedenen Temperatursensoren bestimmt (T Luft Out und Tex2). Auch diese Temperaturen sind sehr ähnlich mit 67.06°C und 67.48°C. Der Unterschied zwischen Stagnationstemperaturen und der Lufttemperaturen ist aber sehr groß, im theoretischen Idealfall sollten alle diese Temperaturen sehr ähnlich sein.

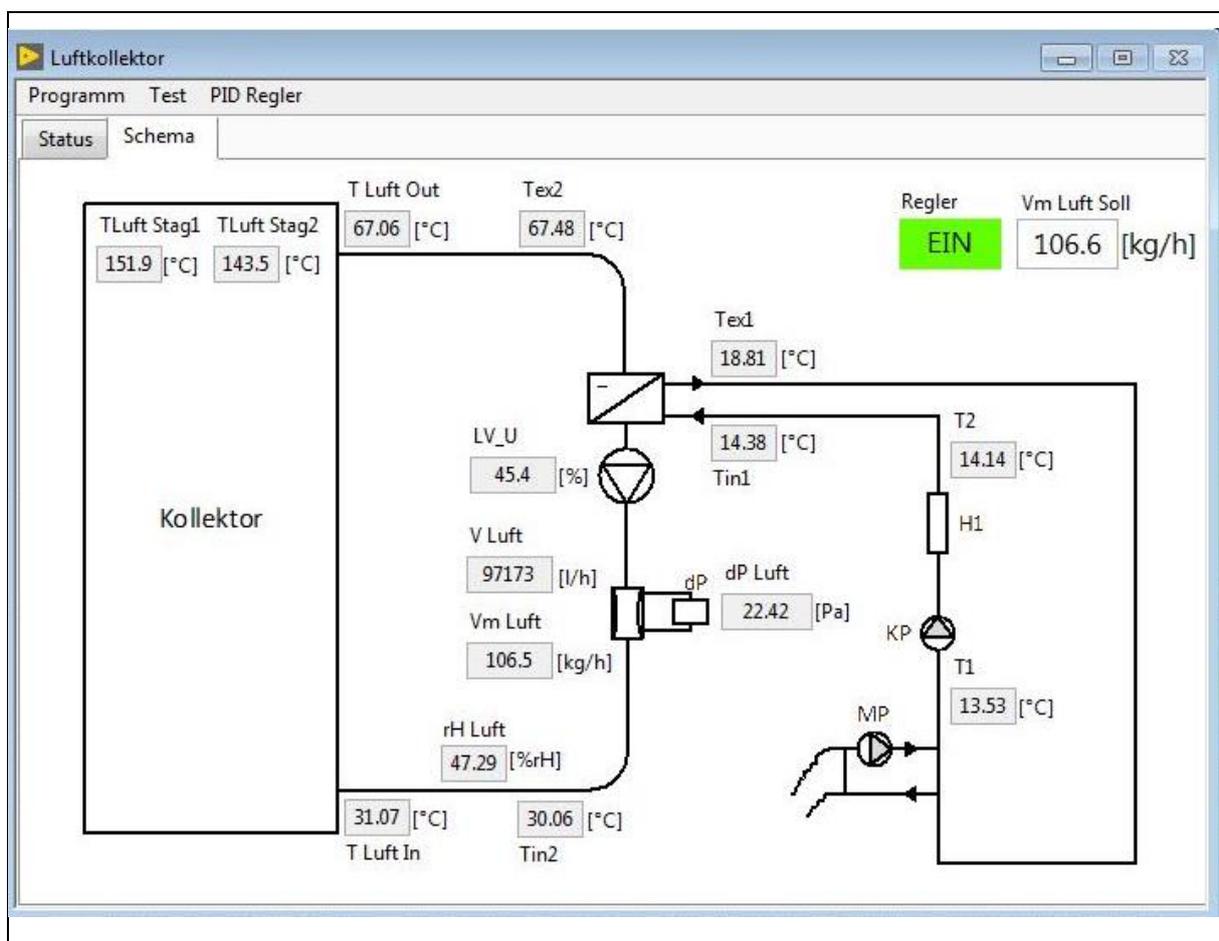


Abbildung 116: Screenshot des Messprogramms mit den gemessenen Temperaturen

Mit verschiedenen Untersuchungen wurde versucht den Grund für die gefundene Diskrepanz der Temperaturen zu finden. Diese weisen am ehesten darauf hin, dass entweder

- große Wärmeverluste am Kollektor vorhanden sind, oder
- nicht alle Röhren richtig durchströmt sind, oder
- die Wärmeübertragung vom Absorberrohr auf den Wärmeträger Luft nicht ausreichend ist.

Um diese Vermutungen zu bestätigen wurde Temperaturmessungen am Kollektorgehäuse und Infrarotbilder gemacht. Ebenso wurden Röhren ersetzt, die Sammler zusätzlich isoliert, und auch der Querschnitt im Sammler reduziert um die Druckverhältnisse zwischen Absorberrohr und Sammler zu verbessern. Dazu wurde ein neuer Kollektor aufgebaut (Abbildung 117). Bei dieser Gelegenheit wurden auch einzelne Röhren ersetzt um fehlerhafte Röhren auszuschließen.



*Abbildung 117: Links Kollektor TSTair-S und rechts TSTair-M auf Tracker am SPF*

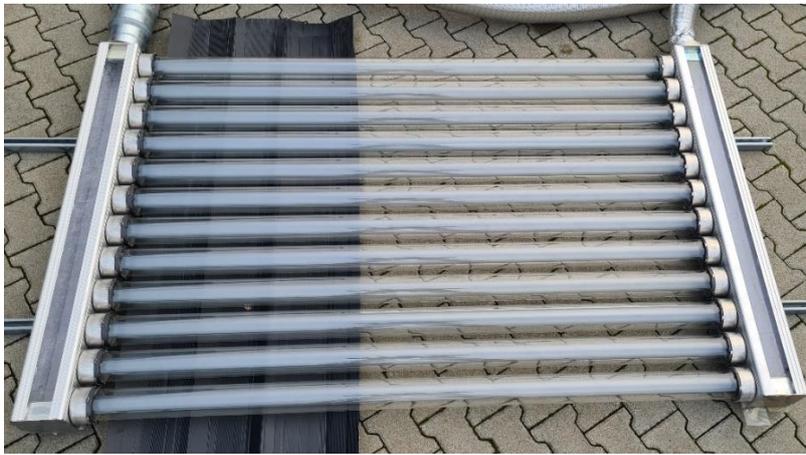
Um die Durchströmung der Kollektoren zu untersuchen und um auszuschließen, dass es im Kollektor nicht oder nur teilweise durchströmte Röhren gibt wurde bei airwasol ein transparenter Kollektor gebaut. Man konnte somit in die Gehäuse und die Röhren schauen.



*Abbildung 118: Transparenter TSTair-S am Nebelteststand*

Der Kollektor wurde mit einem Nebelfluid und verschiedenen Volumenströmen durchströmt. Mit einer Videoanalyse konnten die Eckbereiche beobachtet werden. Im Folgenden wurde die Anzahl der Röhren reduziert, siehe Abbildung 119.

Bei allen Varianten mit verschiedener Anzahl an Absorberröhren und Volumenströmen waren keine Bereiche zu sehen welche nicht oder auch langsamer durchströmt wurden. Soweit man dies mit dem Nebelfluidtest beurteilen kann, liegt hierbei kein Funktionsproblem vor.



*Abbildung 119: Variation der Röhrenanzahl beim Nebeltest*

Eine mögliche Ursache für die gemessenen Temperaturen ist ein ungenügender Wärmeübergang vom Absorberrohr auf die Luft da nur ein kleiner Kollektor mit kleinem Volumenstrom vermessen werden konnte. Dazu wurden einfache Turbulatorbleche eingesetzt die aber keine Wirkung gezeigt haben. In einem letzten Versuch wurden dann alle Röhren bis auf 3 ausgebaut. Damit soll die Durchströmungsgeschwindigkeit erhöht werden was eine höhere Reynoldszahl ergibt und somit einen höheren Turbulenzgrad. Allerdings konnte auch mit dieser Maßnahme keine deutliche Verbesserung erzielt werden. Das kann aber auch damit erklärt werden, dass je kleiner die Anzahl der Absorberröhren wurde, siehe Abbildung 120, um so größer wurde das Verhältnis zwischen Aperturfläche Röhre und Verlustfläche des Kollektorgehäuses. Der Vorteil durch den besseren Wärmeübertrag wurde also vermutlich im Kollektorgehäuse kompensiert.



*Abbildung 120: Messung mit 3 Absorberröhren und hohen spezifischen Volumenströmen*

Aufgrund der Laufzeit des Projektes konnten keine weiteren Untersuchungen durchgeführt werden. Wir gehen weiterhin davon aus, dass die Wärmeübertragung in solch kleinen Kollektoren nicht optimal ist. Dazu müsste der Durchfluss deutlich erhöht werden um den Turbulenzgrad weiter zu erhöhen. Wird das mit einem einzelnen kleinen Kollektor gemacht, wird der Temperaturhub zu klein um noch verlässliche Messungen zu machen, das heißt man müsste Messungen an größeren Modellen oder gar an Kollektorfeldern durchführen. Allerdings wäre das mit der vorhandenen Messanlage gar nicht möglich, da diese dafür zu klein dimensioniert ist. Um das Problem weiter zu untersuchen müssten weitere Temperaturmessungen gemacht werden und deutlich höhere Durchflüsse realisiert werden. Sollte sich zeigen, dass der Wärmeübergang nicht optimal ist, wäre es wichtig weitere Untersuchungen zu machen und zum Beispiel verbesserte Turbulatoren oder Wärmeübertragungsbleche zu entwickeln.

## Hagelschlagtest

Nach den Strömungstests wurden Absorberröhren am SPF mit Eiskugeln beschossen.

Der Hageltest wurde nach ISO 9806 mit Eiskugeln mit Durchmessern von 25mm, 35 mm und 45 mm durchgeführt. Diese werden mit den Normgeschwindigkeiten von 23.0 m/s, 27.2 m/s und 30.7 m/s jeweils am oberen Röhrenende und am unteren Röhrenende beschossen. Dies wird mit vier verschiedenen Röhren gemacht. Üblicherweise haben evakuierte Vakuumröhren eine Hagelbeständigkeit von 25 mm bis 35 mm. Die 35 mm konnten auch bei diesen Röhren bestätigt werden. Es waren aber auch einzelne Beschüsse sogar mit 45 mm erfolgreich (also ohne Schaden). Wichtig ist dabei, dass die Einschlagsenergie mit dem Durchmesser stark zu nimmt: 2J bei 25 mm, 7.7J bei 35 mm und 20.7J bei 45 mm. Es ist also immer bemerkenswert, wenn eine Vakuumröhre Einschläge mit 45 mm Eiskugeln schadlos übersteht.



*Abbildung 121: Hageltest am SPF*



*Abbildung 122: Hagelbeschuss am Röhrenende*

Es gibt keine minimalen Normanforderungen betreffend der Hagelbeständigkeit von thermischen Kollektoren. In Mitteleuropa etabliert sich aber eine typische Hagelbeständigkeit von etwa 30 mm. Mit dem aktuellen Kollektor sind also keine Hagelschäden zu erwarten, bzw. würden diese im Fall eines Schadens in aller Regel als Versicherungsfall angesehen.

### **A7.3 Test der Spiegel durch das SPF**

Die solare hemisphärischen Reflexion und der diffuse Reflexionsgrad des Aluminium basierten Schichtsystems mit solar optimiertem Reflexionsspektrum wurde durch das SPF vermessen. Daraus wurde eine solare Reflexion von 91% bestimmt (siehe Abbildung 123), was nahe dem theoretischen Maximum ist. Daneben wurde eine geringe diffuse solare Reflexion der Spiegeloberfläche von 1,6% gemessen.

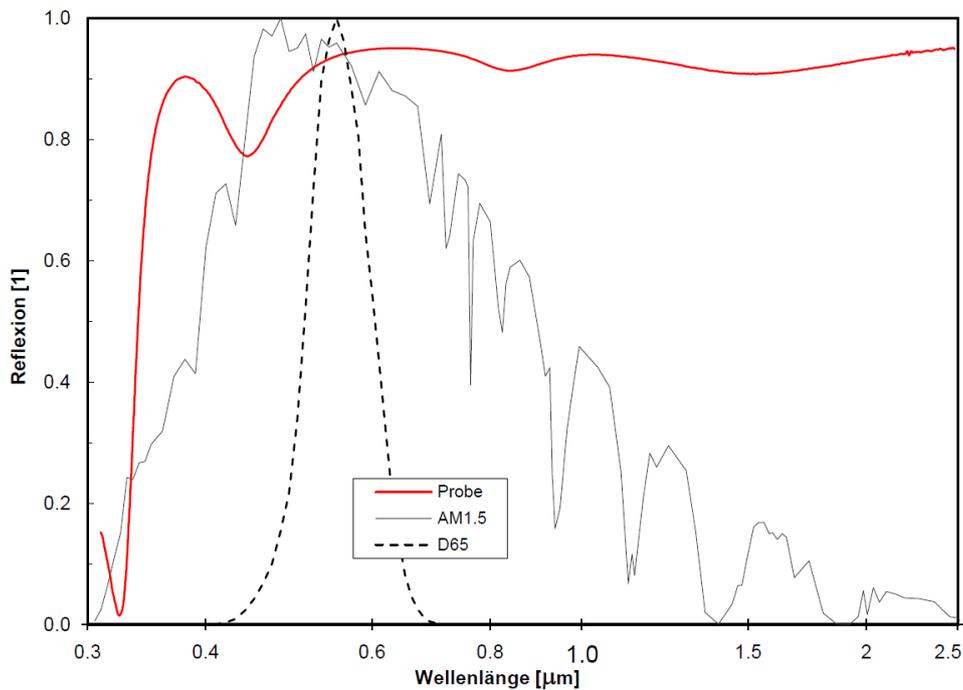


Abbildung 123: Reflexionsspektrum des von Almeco abgeschiedenen Reflexionsschichtsystems auf elektropoliertem Aluminiumband.

### Analyse des Verhaltens der Spiegel in den Absorberrohren

Schon während des Ausheizens der Absorberrohre beim Evakuieren werden die Spiegel einer nicht unbedeutenden thermischen Belastung unterzogen. Um festzustellen, ob sich die optischen Eigenschaften der Spiegel dabei ändern, wurden diese vor dem Evakuierungsprozess und nach dem Evakuierungsprozess vermessen. Dazu wurden die Absorberrohre wieder geöffnet und die Spiegel zum Vermessen entnommen.

In Abbildung 124 sind die Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems und in Abbildung 125 des optimierten Silberspiegelschichtsystems aufgetragen. Die optischen Eigenschaften des Aluminium basierten Schichtsystems haben sich nach dem Evakuierungsprozess nicht signifikant verändert wohingegen die Reflexion des Silber basierten Schichtsystems um etwa 3% abgenommen hat. Damit ist das Aluminium basierte Schichtsystem geeignet, die Herstellung des Absorberrohres ohne signifikante Veränderung zu überstehen. Das Silber basierte Schichtsystem degradiert leicht beim Evakuierungsprozess und sollte daher nur nach Optimierung des Ausheizprozesses eingesetzt werden. Es ist jedoch zu bemerken, dass das Silber basierte Schichtsystem selbst nach der festgestellten Degradation durch den Ausheizvorgang einen höheren Reflexionsgrad aufweist, als das Aluminium basierte Schichtsystem.

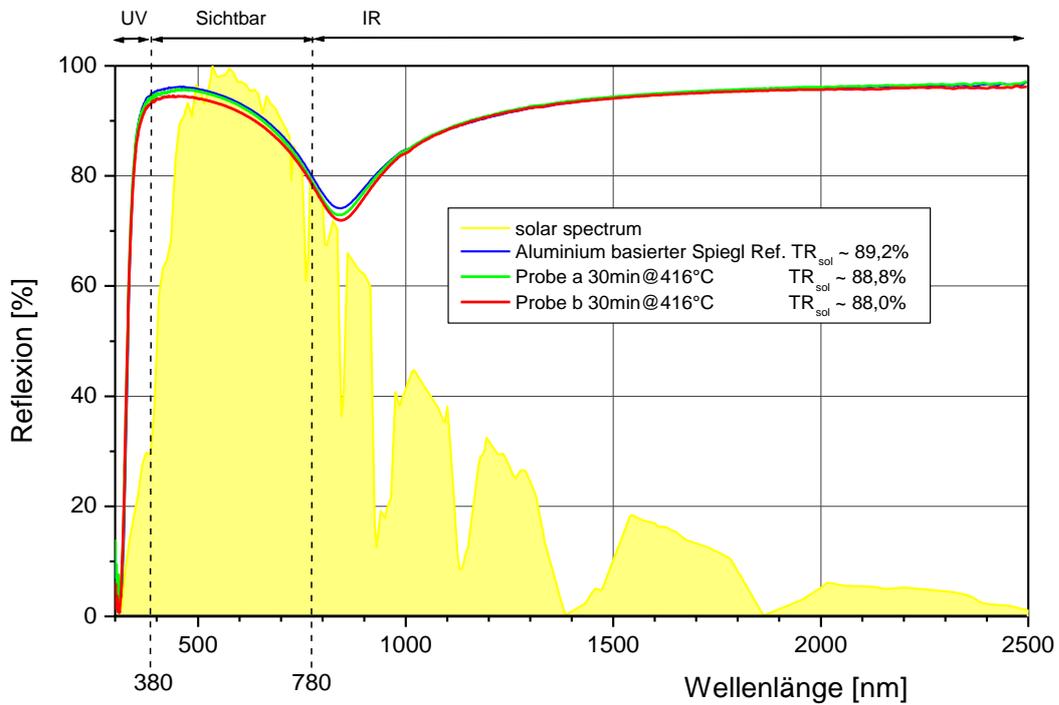


Abbildung 124: Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems vor und nach dem Ausheiz- und Evakuierungsprozess. Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben.

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich die Spiegelschichten unter Stagnationsbedingungen verhalten. In Abbildung 126 sind die Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems im Neuzustand und nach Stagnation im Vakuum bei durchschnittlich 300°C über 100 Tage aufgetragen. Unter Stagnation hat die solare Reflexion um nur etwa 1% abgenommen. D. h. dieses Spiegelschichtsystem ist für den Einsatz in den ULA-Vakuumabsorberrohren geeignet.

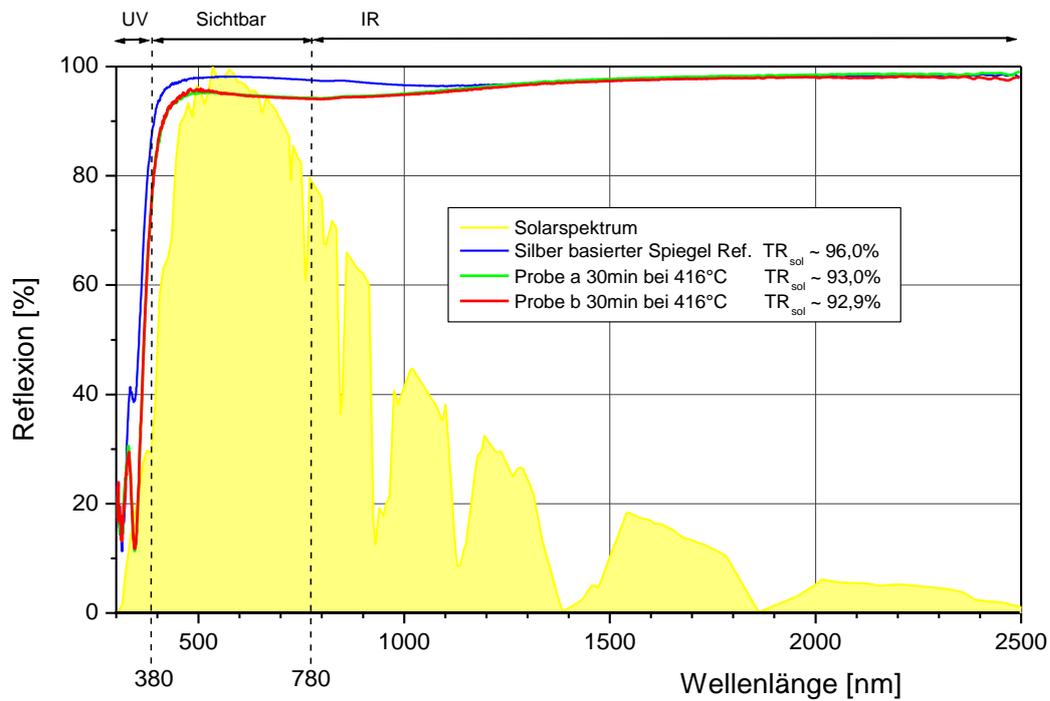


Abbildung 125: Reflexionsspektren des optimierten Silber basierten Spiegelschichtsystems vor und nach dem Ausheiz- und Evakuierungsprozess (30 min bei 416°C). Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben.

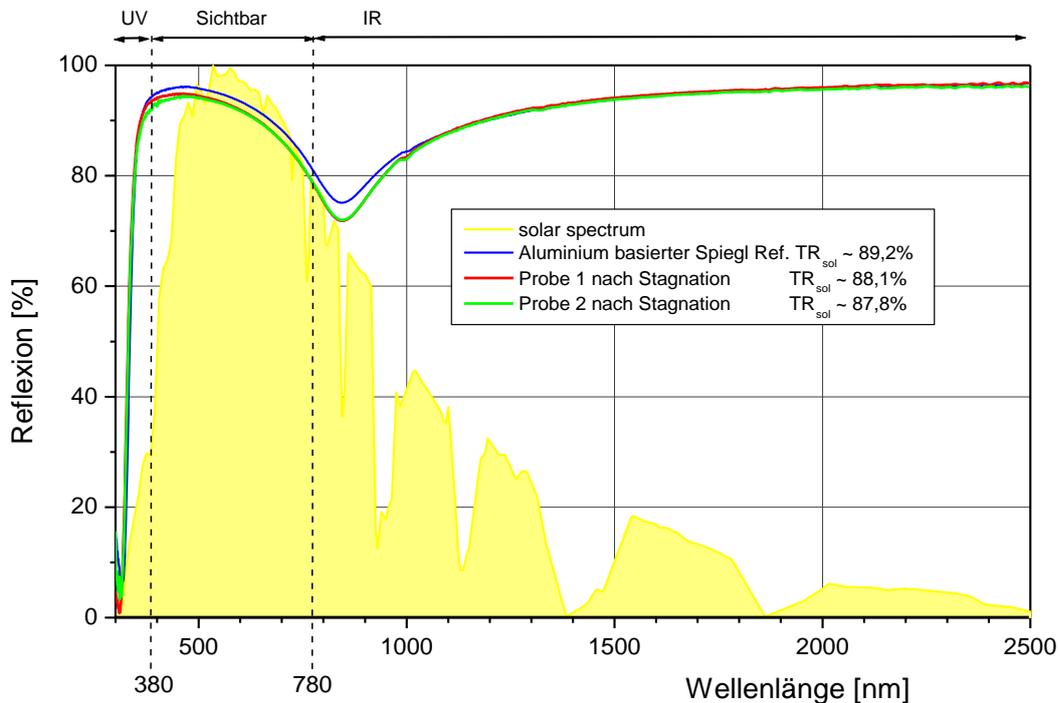


Abbildung 126: Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems im Neuzustand und nach Stagnation im Vakuum. Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben.

## A8 Anlagen-/Kollektorentest (airwasol/SPF)

In der Antragsphase war mit einem anderen Zeitplan der Einsatz fertiger Kollektoren mit den neuesten Vakuumröhren in mehrere größere Feldtestanlagen geplant. Aufgrund des Wegfalls eines Projektpartners und der somit entstandenen zeitlichen Verzögerung mit neuen Zulieferern wurden mehr Tests zur Durchströmung und Kollektoroptimierung am SPF und bei airwasol durchgeführt.

Während der Projektlaufzeit war es aber noch möglich eine geringe Anzahl an kleinen Kollektorfeldern zu fertigen und bei Kunden erfolgreich in Betrieb zu nehmen. Jedoch war leider bauseits nicht genügend Platz vorhanden, um genaue Messtechnik im Luftkreis einzubauen zu können.



*Abbildung 127: Kundenanlage mit TSTair-Kollektoren - Schrägdach*

Bei dieser Anlage (Abbildung 127) wurden drei Kollektorfelder parallel in eine Hybrid-Luftheizung integriert. Die Anlage wird als Umluftanlage betrieben. Es gibt folgende Betriebsmodis:

- Luftheizung direkt in das Haus (Wohnung)
- Warmwasser-Pufferbeladung
- Warmwasser-Pufferbeladung mit Luftheizung

Als Backup wird ein Biomassekessel eingesetzt.

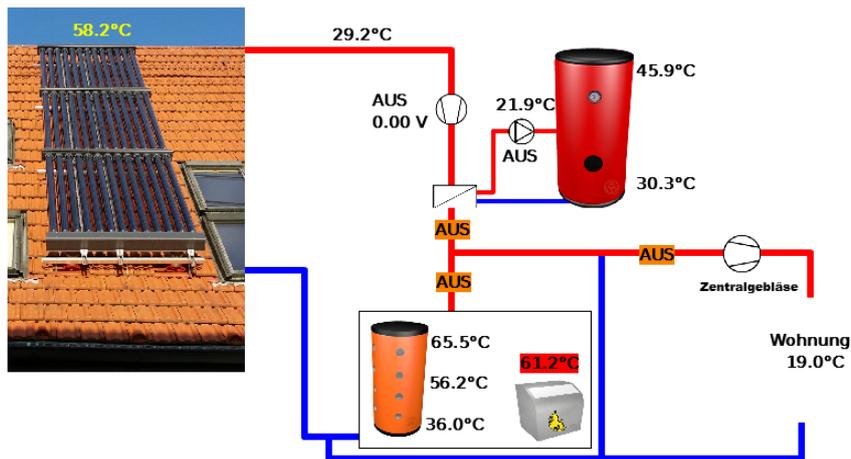


Abbildung 128: Anlagenschema Hybrid-Solarluftheizung

In Abbildung 129 sind die Messdaten an einem Wintertag von T.Kollektor (Absorberrohrtemperatur) und T.Solar VL1 (Gebäudeeintritt direkt im Lüftungsrohr unter den Dachziegeln) interessant. Um 13:00 beträgt die Temperaturdifferenz dieser beiden Sensoren im durchströmten Betrieb (90% Ventilatorleistung) ca. 13K. Während dem Sonnenaufgang und -untergang wird der Ventilator auf die Heizkreisvorlauf-Solltemperatur von 40-50 °C über einen PID-Regler eingeregelt. Durch einen geringeren Volumenstrom erhöht sich dabei die Temperaturdifferenz. Ziel hierbei ist der Betrieb mit einer Nutztemperatur die auch verwendet werden kann. Es ist nicht das Ziel mit einer niedrigen Temperatur ins Gebäude zu fahren um somit den Wirkungsgrad im Kollektorfeld zu erhöhen. Dies wäre im Betrieb mit einer Luft-Wärmepumpe von Interesse.

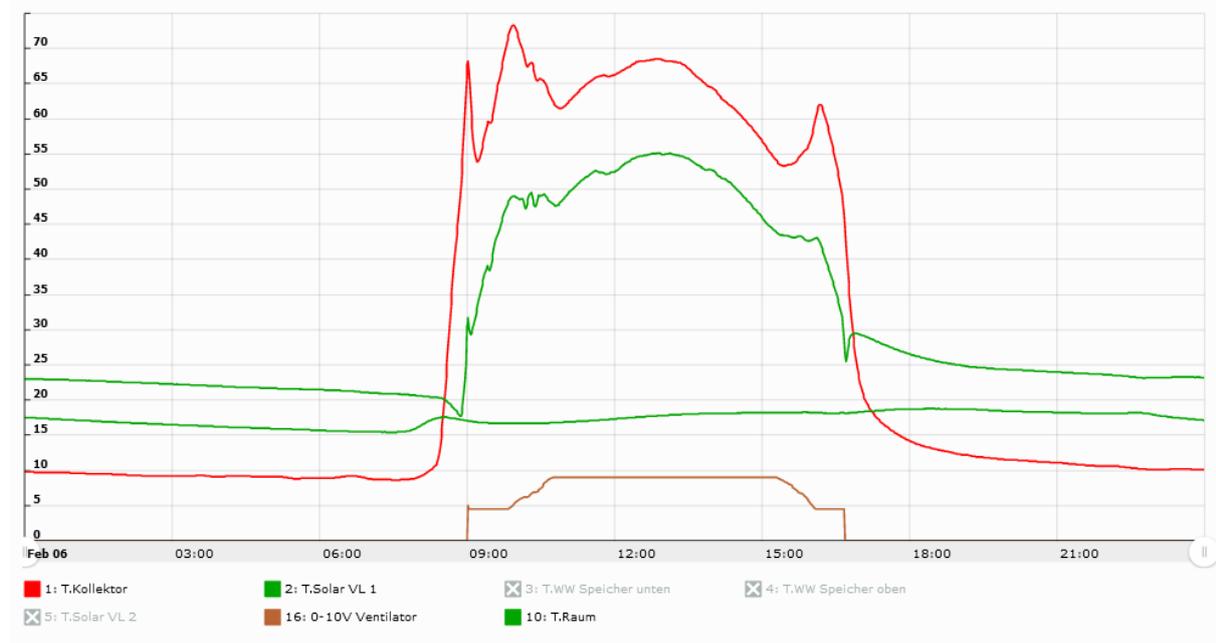


Abbildung 129: Messdaten 6. Februar, stabile Sonneneinstrahlung (blauer Himmel)

In Abbildung 130 ist ein Wintertag mit wechselnder Sonneneinstrahlung dargestellt. Morgens sieht man an den vier Temperaturpeaks wie schnell der Kollektor sich erwärmt. Jedoch kann er die Solltemperatur nicht halten, da die Sonneneinstrahlung zu gering war und der Volumenstrom zu hoch. Dies wurde durch eine Optimierung der Parameter im Solarregler verbessert und ein „Softstart“ des Ventilators programmiert.



Abbildung 130: Messdaten 5. Februar, wechselnde Sonneneinstrahlung (bewölkter Himmel)

In Abbildung 129, Abbildung 130 und Abbildung 131 sind verschiedene Betriebspunkte bei unterschiedlichen Wetterlagen abgebildet. Bei allen konstanten Betriebszuständen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen T.Kollektor (Absorberrohrtemperatur) und T.Solar VL1 (Gebäudeeintritt direkt im Lüftungsrohr unter den Dachziegeln) weniger als 20 K.

Solch eine kleine Differenz konnte auf dem Teststand am SPF nicht beobachtet werden. Wie schon vorher vermutet liegt es wohl an der Durchströmungsgeschwindigkeit in einem Röhrenstrang. Bei dieser Solaranlage sind 3 Röhren hintereinander in Reihe verschaltet und jede Röhre wird mit einem dreifach höheren Volumenstrom durchströmt.

Dieser Effekt konnte auch mit einem größeren Ventilator am Teststand bei airwasol zu Projektende beobachtet werden. Ziel ist nun diese Erfahrungen in eine optimierte Kollektordurchströmung mit angepassten Ventilatoren umzusetzen.

## **Sicherer Anlagenstillstand**

In Abbildung 131 wird bis kurz vor 15:00 der Warmwasser-Pufferspeicher beladen. Danach werden die Solarkreispumpe, der Ventilator und die Lüftungsklappen ausgeschaltet => sog. Solaranlagen-Stillstand.

Der Kollektor wird dabei nicht weiter durchströmt und es erfolgt nur eine geringe Wärmeausstrahlung durch freie Konvektion in den Absorberröhren. Diese ist jedoch so gering, dass keine Überhitzung in den Anschlussrohren und Solarkreis Komponenten stattfindet. Dies ist einer der wichtigsten Vorteile von Solarluftkollektoren => „eigensichere Solaranlage“.

Würde nun eine Anforderung von einem Verbraucher erfolgen, könnte trotz der 160°C im Kollektor das System gefahrlos anfahren. Dies ist mit flüssigkeitsdurchströmten Kollektoren in deren Dampfphase nicht möglich => Überdruck+Dampfschlag-Problem.

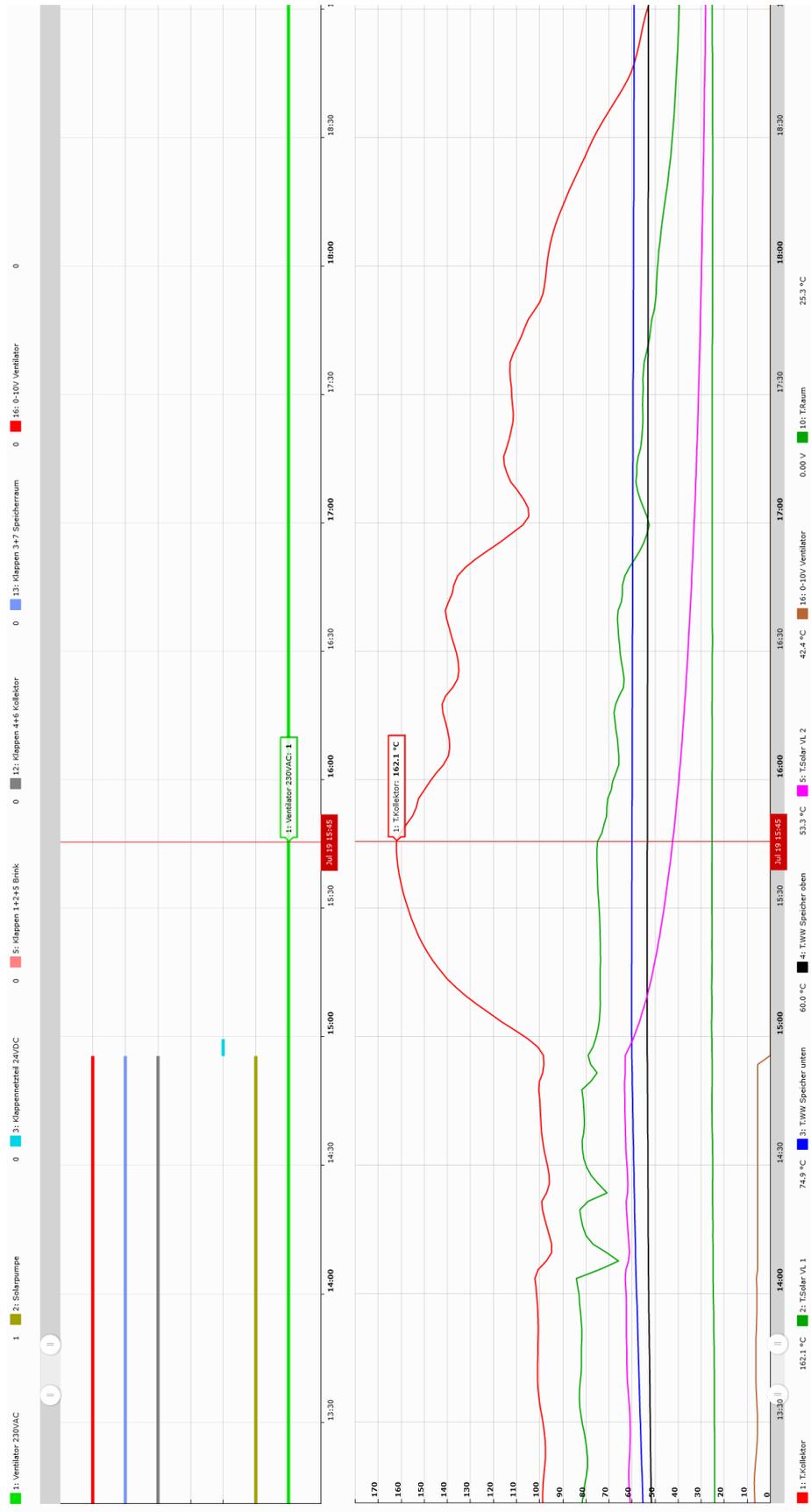


Abbildung 131: Sicherer Anlagenstillstand



*Abbildung 132: Kundenanlage mit TSTair-Kollektoren - Flachdach*

### **Langzeittest 5 Jahre - outdoor**

In der Projektphase 1 wurden im Sommer 2016 erste Absorberröhren auf den Outdoor-Teststand bei airwasol gestellt.



*Abbildung 133: Outdoor Langzeittest seit 2016*

Die Glasröhren, Enddeckel, Absorber (VA-Al) und innenliegender Alu-Spiegel sehen optisch noch genauso aus wie am Anfang des Tests. Selbst eine teils offene Röhre, welche der Außenfeuchtigkeit immer wieder ausgesetzt war, wurde auf dem Teststand belassen. Auch bei

dieser Absorberröhre sind keine Ablösungen oder sonstige Schädigungen sichtbar. Genaue Messungen der Materialien im Labor beim SPF nach dem DBU Projekt sind geplant.



*Abbildung 134: Links Spiegelniederhalter und rechts Absorberbereich im Jahr 2021*

In Abbildung 134 links ist auf dem Spiegel ein weißer Abrieb zu sehen. Für den Test wurde in 2016 die Spiegel eingeschnitten und hochgebogen. Dies sollte als Spiegelniederhalter und Fixierung dienen. In der Standardröhre ist dies nicht so ausgeführt und es gibt dieses Problem nicht. Durch die vielen thermisch bedingten Längenänderungen des Absorbers hat sich der Spiegel an genau dieser Position ganz fein abgerieben.

## 7. Fazit/Ausblick

Nur durch die gute Zusammenarbeit mit der DBU, aller Projektpartner sowie zahlreichen Zulieferern konnten viele innovative Ideen für einen neuen und effizienten Vakuumröhren-Solarluftkollektor für hohe Betriebstemperaturen entwickelt, getestet und soweit umgesetzt werden, dass eine Kleinserienfertigung möglich ist.

- Aktuell werden in der Kleinserienfertigung noch viele Bauteile manuell in die Maschinen eingelegt und einige Schritte sind noch nicht automatisiert. Ziel ist hier ein weiterer Ausbau zur Kostensenkung.
- Für den o.g. Schritt sind aber noch Anpassungen z.B. bei den Schweißverfahren notwendig. Ziel hier ein geringerer Ausschuss und schnellere Taktraten.
- Optimierung der Schweißnahterhöhung = > Balgumformung
- Optimierung und somit ein Neubau des Ausheizofens sind erfolgt. Ein Betrieb mit 4 parallelen Vakuumpumpen ist nun möglich.
- Eine Wärmerückgewinnung für den Ausheizprozess wurde konstruiert und in die Produktion bei airwasol integriert.
- Optimierung der Evakuierungsvorgänge mit reduzierter Spiegeltemperatur werden untersucht.

Durch das Projekt konnten bei airwasol 7 neue Stellen geschaffen werden und weitere befinden sich in Planung für 2021 und 2022.

Viele neue Anwendungsbereiche und Kunden sind national und international hinzugekommen. Diese wachsende Nachfrage zeigt deutlich den Erfolg dieses DBU-Projektes.

Vielen Dank nochmals an alle Beteiligte!

## 8. Literaturverzeichnis

- [Bru01] Brunold, S., Dudita, M., „Ultra Leicht Absorber“ ULA Projekt, Performance and durability investigations of new reflector materials for vacuum tube collectors for air applications, SPF reports 2017, 2018 and 2019
- [Dud01] Dudita, M., Rommel, M., ColourAge - Accelerated ageing test procedures for coloured selective absorbers of solar collectors; Final report, Project Sciex-NMS<sup>ch</sup>.13.273 (2015)
- [Dud02] Dudita, M., Omlin, L., Ruesch, F., Gantenbein, P., Brunold, S., and Duta, A. (2015). Durability of aluminium based solar selective absorbers under condensed water. In Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale, (EPFL, Lausanne, Switzerland: Solar Energy and Building Physics LaboratoryLESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)), pp. 45–50 (2015).
- [Gor01] Gordon, J., „Solar Energy: The state of the art“, James and James London, (2001 ISES)
- [Hil09] Christina Hildebrandt, „Hochtemperaturstabile Absorberschichten für linear konzentrierende solarthermische Kraftwerke“ Dissertation Universität Stuttgart (2009)
- [Ken02] Kenney, C. E., „Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials“, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, (2002)
- [The05] Theis W., CODE: Dünnschichtsimulationsprogramm, Hard- und Software for Optical Spectroscopy, Aachen 2005
- [Gel 04] Kristina Gelin, „Preparation and Charakterization of Sputter Deposited Spectrally Selective Solar Absorber“ Dissertation Universität Uppsala 2004
- [Rei 10] S. Reiner und K-U van Osten „Keramische Beschichtungsmaterialien für optische Anwendungen“ LASER MAGAZIN 3/September 2010
- [Spe 15] „Speedcoll“ (Fkz.:0325969A) gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und durch die Unterstützung der beteiligten Industriepartner.

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: TSTair-S (Draufsicht) .....	7
Abbildung 2: Kollektorarten .....	13
Abbildung 3: Durchströmung des TSTair-Kollektors.....	13
Abbildung 4: TST-Absorberröhren .....	14
Abbildung 5: Modulare Bauweise Header+Röhren .....	15
Abbildung 6: Kollektorgößen S, M und L .....	15
Abbildung 7: Reflexionsspektren der Metalle, die für die Infrarot-Spiegelschicht in Frage kommen. Zusätzlich sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen.....	22
Abbildung 8: Industrielle air to air PVD Bandbeschichtungsanlage der Almeco GmbH in Bernburg .....	23
Abbildung 9: Reflexionsspektren der verschiedenen hergestellten IR-Reflektorschichtsysteme auf Edelstahlsubstrat mit den daraus berechneten thermischen Emissionswerten für 100°C Oberflächentemperatur.....	24
Abbildung 10: Vergleich des Reflexionsspektrums des simulierten Absorberschichtsystems mit ZrO <sub>2</sub> Antireflexschicht mit dem Reflexionsspektrum des real abgeschiedenen Absorberschichtsystems auf Edelstahlsubstrat. Zum Vergleich ist noch das Reflexionsspektrum des Absorbermaterials auf Edelstahl mit Antireflexschicht aus SiO <sub>2</sub> aufgetragen.....	26
Abbildung 11: Schematischer Schichtaufbau des Absorberschichtsystems mit ZrO <sub>2</sub> Antireflexschicht .....	27
Abbildung 12: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium, Absorberschichten und ZrO <sub>2</sub> Antireflexschicht vor und nach der Alterung bei 298°C an Luft. ....	28
Abbildung 13: Reflexionsspektren der Absorberschicht mit Aluminium-IR-Reflektorschicht und ZrOx-Antireflexschicht nach verschiedenen Feuchtetests. ....	28

Abbildung 14: Optische Werte der Proben mit Aluminium IR-Reflektorschicht auf Edelstahlsubstrat als Funktion der Zeit nach Feuchtetests mit Kondensation bei 40°C/95% r.H./45°C und 60°C/95% r.H./65°C vom SPF. ....	29
Abbildung 15: Optische Werte der Proben ohne IR-Reflektorschicht auf Edelstahlsubstrat als Funktion der Zeit nach Feuchtetests mit Kondensation bei 60°C/95% r.H./65°C vom SPF. ...	30
Abbildung 16: Schematische Darstellung der einzelnen Schichten des IR-Reflektorsystems und des Absorberschichtsystems mit SiO <sub>2</sub> Antireflexschicht. ....	31
Abbildung 17: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit verschiedenen IR-Reflektorschichtsystemen.....	32
Abbildung 18: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit IR-Reflektorschicht aus Molybdän und zum Vergleich mit einer IR-Reflektorschicht aus Aluminium auf Edelstahl. ....	33
Abbildung 19: Abhängigkeit der thermischen Emission von der Absorbtemperatur des Absorberschichtsystems mit Al und Mo IR-Spiegelschicht.....	34
Abbildung 20: Reflexionsspektren von dem Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Spiegelschicht auf Edelstahl im Neuzustand, nach einem Temperaturtest bei 291°C und nach einem Kondensationstest bei 40°C/95% r.H./45°C über je 100h.....	35
Abbildung 21: Reflexionsspektrum des Absorbermaterials vor und nach dem Ausheizprozess im Absorberrohr.....	36
Abbildung 22: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium ohne und mit Absorberschicht vor und nach der Alterung bei 400°C an Luft und im Vakuum.....	38
Abbildung 23: Reflexionsspektren von Edelstahlsubstrat mit IR-Reflektorschicht aus gesputtertem Aluminium im Neuzustand und nach Stagnation im Vakuum.....	39
Abbildung 24: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems A aus CrN und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.....	40
Abbildung 25: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems B aus Chrom und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden. ....	40

Abbildung 26: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems C aus NiV und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.....	41
Abbildung 27: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems D aus NiAl und Aluminium ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.....	41
Abbildung 28: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems E aus NiAl ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.....	42
Abbildung 29: Reflexionsspektren des IR-Reflektorschichtsystems F aus NiV ohne Absorberschichten und das komplette Schichtsystem mit Absorberschichten vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden.....	42
Abbildung 30: Reflexionsspektren des kompletten Absorberschichtsystems auf Edelstahlsubstrat ohne IR-Reflexionschichtsystem vor und nach der Degradation an Luft und im Vakuum bei 400°C nach 864 Stunden. ....	43
Abbildung 31: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Molybdän im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 291°C und Kondensationstest 40°C/95% r.H./45°C für 100 Stunden. Zum Vergleich ist das Reflexionsspektrum der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Aluminium aufgetragen.....	45
Abbildung 32: Reflexionsspektren der selektiven Absorberschicht mit einer IR-Reflektorschicht aus Molybdän im Neuzustand und nach Kondensationstest 60°C/95% r.H./65°C.....	46
Abbildung 33: Reflexionsspektrum des Absorbermaterials mit Molybdän Reflektorschicht vor und nach dem Ausheizprozess im Absorberrohr.....	47
Abbildung 34: Spektren der Molybdän IR-Reflektorschicht auf Edelstahl und des kompletten Absorberschichtsystems jeweils im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 400°C an Luft. Daneben sind die aus den Spektren berechneten optischen Kennwerte aufgelistet. ....	48
Abbildung 35: Spektren der Molybdän IR-Reflektorschicht auf Edelstahl und des kompletten Absorberschichtsystems jeweils im Neuzustand und nach Temperaturtest bei 400°C im Vakuum. Daneben sind die aus den Spektren berechneten optischen Kennwerte aufgelistet. ....	49

Abbildung 36: Absorberschichtsystem mit Aluminium (H, links) und Molybdän-IR-Reflektorschicht (M, rechts) nach einem Tag Korrosionstest in Salzlösung mit 5% NaCl. ....	50
Abbildung 37: Absorbermaterial mit Aluminium IR – Reflektorschicht und Antireflexschicht aus SiO <sub>2</sub> nach dem Verschweißen und der Balgformung. ....	51
Abbildung 38: Schweißnaht des Absorbermaterials mit ZrOx Antireflexschicht. ....	52
Abbildung 39: Mikroskopische Untersuchung der Schweißnaht von Edelstahlabsorbermaterial mit Aluminium IR Reflexionsschicht.....	52
Abbildung 40: Mikroskopische Untersuchung der Schweißnaht von Edelstahlabsorbermaterial mit Molybdän IR Reflexionsschicht.....	53
Abbildung 41: Absorbermaterial mit Molybdän IR – Reflektorschicht und Antireflexschicht aus SiO <sub>2</sub> nach dem Verschweißen und der Balgformung. ....	53
Abbildung 42: Simulierte Ratenverteilung in der Elektronenstrahlverdampfungskammer.....	55
Abbildung 43: Reflexionsspektren der Absorberschicht mit ZrOx-Antireflexschicht von verschiedenen Positionen über die Bandbreite nach Einbau der Homogenisierungsmaske. ....	55
Abbildung 44: Längskratzer auf Absorberrohr nach Umformung.....	56
Abbildung 45: Bandeinlauf in Rohrfertigung mit Abstreifer .....	57
Abbildung 46: Links Aluminium IR – Reflektorschicht, rechts ZrOx Antireflexschicht .....	57
Abbildung 47: Schweißfehlerreihe - Längsnaht .....	58
Abbildung 48: WIG-Schema [ <a href="http://www.handschweissen.eu">www.handschweissen.eu</a> ].....	59
Abbildung 49: Schweißfehler mit WIG an der Längsnaht.....	59
Abbildung 50: Microplasma-schweißen [ <a href="http://www.dsl-schweisstechnik.de">www.dsl-schweisstechnik.de</a> ].....	60
Abbildung 51: Verschiedene Schablonenstufen zum Rohrformen - Rohrblume .....	61
Abbildung 52: Zusammenhang Geschwindigkeit/Schweißfehler.....	62
Abbildung 53: Zusammenhang Gasqualität//Schweißfehler.....	63

Abbildung 54: Massenanbindung über gefederte Kohlen.....	64
Abbildung 55: Massenanbindung über Schleifbuchse .....	65
Abbildung 56: Leistungstests in der ALSA für Absorberschichtentfernung .....	66
Abbildung 57: Laserkopf.....	67
Abbildung 58: Montageposition Laser in Rohrschweißanlage.....	67
Abbildung 59: Verstellmöglichkeit der Abzugsvorrichtung .....	68
Abbildung 60: Richtrolle mit Verschleißerscheinungen mittig .....	68
Abbildung 61: Schutzfolienreste nach Rohrabtrennung .....	69
Abbildung 62: Erste Versuchs-Schervorrichtung.....	70
Abbildung 63: Rohrende abgeschert. ....	71
Abbildung 64: Pneumatikzylinder mit Rundmesser.....	71
Abbildung 65: Konstruktion des Hydroformers - Seitenansicht .....	72
Abbildung 66: Konstruktion des Hydroformers - Frontansicht .....	72
Abbildung 67: Hydro-Werkzeugbacken .....	73
Abbildung 68: Nahterhöhung trotz Richtrollen .....	73
Abbildung 69: Vorgeformte Einzelwelle mit Hydroumformung.....	74
Abbildung 70: Schema von einem Druckübersetzer .....	75
Abbildung 71: Balgformen während der Umformung .....	76
Abbildung 72: Blasenformung mit separatem Elastomerkörper .....	77
Abbildung 73: Röhrentransporteinheit – stehend während dem Transport.....	78
Abbildung 74: Röhrenhalterung - Schraubvariante .....	79
Abbildung 75: Röhrenhalterung – Bajonettverschluss mit verschiebbarer Innenhülse .....	79

Abbildung 76: 70er Glasröhren mit Spiegel .....	80
Abbildung 77: Konstruktion Absorberröhre mit 90mm Glas.....	80
Abbildung 78: Glasröhre mit W-Spiegel und Absorberrohr.....	81
Abbildung 79: W-Spiegel im Kleinserientest .....	81
Abbildung 80: Glasröhre, V-Spiegel, Absorberrohr .....	82
Abbildung 81: V-Spiegel nach Ausheizofen .....	82
Abbildung 82: WIG-Rundschweißanlage mit eingespannter 30cm Musterröhre .....	83
Abbildung 83: WIG-Schweißung - Stoßnaht .....	84
Abbildung 84: Absorber-Laser-Schweißanlage (ALSA) .....	84
Abbildung 85: Laser-Überlappnaht .....	85
Abbildung 86: Vakuumpump-Einzelröhren-Teststand .....	86
Abbildung 87: Erweiterungstests am Vakuumpumpstand .....	86
Abbildung 88: Heliumleckagetest an einer Absorberröhre .....	87
Abbildung 89: Temperaturwechseltests .....	87
Abbildung 90: Temperaturmessungen an den Endkappen und am Spiegel .....	88
Abbildung 91: Vakuumdurchführung von Temperatursensoren .....	88
Abbildung 92: Helle sichtbare Spannungen in einem Glasrohr (Rohzustand).....	89
Abbildung 93: Schema des grundsätzlichen Schichtaufbaus von hochreflektierenden Reflektorschichtsystemen.....	89
Abbildung 94: Reflexionsspektren von Aluminium basierten Schichtsystemen optimiert für Beleuchtungsanwendungen und für solare Reflexion. Zum Vergleich ist das Reflexionsspektrum eines Silber basierten Reflektorschichtsystems aufgetragen. ....	90
Abbildung 95: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Aluminiumspiegelschicht nach Test bei verschiedenen Temperaturen an Luft. ....	91

Abbildung 96: Schema des Schichtaufbaus des optimierten Silber basierten Reflektorschichtsystems.....	92
Abbildung 97: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Standardversion für die Beleuchtungsindustrie und der neuen Version des Silber basierten Schichtsystems im 150°C Temperaturtest an Luft.....	93
Abbildung 98: Zeitlicher Verlauf der Totalreflexion der Standardversion für die Beleuchtungsindustrie und der neuen Version des Silber basierten Schichtsystems im 250°C Temperaturtest an Luft.....	94
Abbildung 99: Reflexionsspektren des optimierten Schichtsystems mit Spiegelschicht aus Silber nach Ofentests an Luft bei verschiedenen Temperaturen. ....	94
Abbildung 100: Absorberrohr mit Aluminiumreflektor. ....	95
Abbildung 101: Integrierende Kugeln für Messungen im solaren Spektralbereich (links) und im Infrarotspektrum (rechts) zur optischen Charakterisierung von selektiven Absorberschichten. ....	97
Abbildung 102: Snijstaal P2000 Ofen für Temperaturstabilitätstest an Luft. ....	97
Abbildung 103: SPF-Ofen für Temperaturstabilitätstests im Vakuum. ....	97
Abbildung 104: CTS-Klimakammer für die Korrosionstests. ....	97
Abbildung 105: Thermische Emission (100 °C) der IR-Reflektorschichtsysteme nach Temperaturtest bei 400 °C in Vakuum. ....	98
Abbildung 106: Thermische Emission (100 °C) der IR-Reflektorschichtsysteme nach Temperaturtest bei 400 °C in Luft. ....	99
Abbildung 107: Änderung der Solaren Absorption für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812V00) und für Proben mit gesamt Absorbersystem (Proben ULAM1812V10 und ULAM1812V20), nach Alterung im Vakuum bei 400 °C. ....	106
Abbildung 108: Änderung der Emission für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812V00) und für Proben mit gesamt Absorbersystem (Proben ULAM1812V10 und ULAM1812V20), nach Alterung im Vakuum bei 400°C. ....	106

Abbildung 109: Änderung der Solaren Absorption für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812U00) und für Proben mit gesamten Absorbersystem (Proben ULAM1812U10 und ULAM1812U20), nach Alterung in Luft bei 400 °C. ....	107
Abbildung 110: Änderung der Emission für Probe nur mit Mo-Infrarotreflektor (Probe ULIM1812U00) und für Proben mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812U10 und ULAM1812U20), nach Alterung in Luft bei 400 °C. ....	107
Abbildung 111: Änderung der Solaren Absorption für Proben nur mit Mo-Infrarotreflektor (Proben ULIM1812C10, ULIM1812C20 und ULIM1812C10) und mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812C10, ULAM1812C20 und ULAM1812C30, mit doppelter Dicke für Mo-Schicht: ULAM1812K18K20 und ULAM bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation (60 °C). ....	108
Abbildung 112: Änderung der Emission für Proben nur mit Mo-Infrarotreflektor (Proben ULIM1812C10, ULIM1812C20 und ULIM1812C10) und mit gesamtem Absorbersystem (Proben ULAM1812C10, ULAM1812C20 und ULAM1812C30, mit doppelter Dicke für Mo-Schicht: ULAM1812K18K20 und ULAM bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation (60 °C). ....	109
Abbildung 113: Reflexionsspektren der Probe mit gesamtem Absorbersystem (ULAM1903C10) vor und nach unterschiedlichen Prüfzeiten bei hoher Luftfeuchtigkeit und Kondensation bei 60 °C. ....	110
Abbildung 114: Messprotokollbeispiel thermische Leistung Luftkollektor .....	111
Abbildung 115: Protokoll der Messung des Winkelfaktors des Luftkollektors .....	112
Abbildung 116: Screenshot des Messprogramms mit den gemessenen Temperaturen .....	113
Abbildung 117: Links Kollektor TSTair-S und rechts TSTair-M auf Tracker am SPF .....	114
Abbildung 118: Transparenter TSTair-S am Nebelteststand.....	115
Abbildung 119: Variation der Röhrenanzahl beim Nebeltest .....	116
Abbildung 120: Messung mit 3 Absorberröhren und hohen spezifischen Volumenströmen. ....	117
Abbildung 121: Hageltest am SPF.....	118
Abbildung 122: Hagelbeschuss am Röhrenende.....	119

Abbildung 123: Reflexionsspektrum des von Almecco abgeschiedenen Reflexionsschichtsystems auf elektropoliertem Aluminiumband. ....	120
Abbildung 124: Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems vor und nach dem Ausheiz- und Evakuierungsprozess. Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben. ....	121
Abbildung 125: Reflexionsspektren des optimierten Silber basierten Spiegelschichtsystems vor und nach dem Ausheiz- und Evakuierungsprozess (30 min bei 416°C). Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben. ....	122
Abbildung 126: Reflexionsspektren des Aluminium basierten Spiegelschichtsystems im Neuzustand und nach Stagnation im Vakuum. Daneben ist die daraus berechnete hemisphärische solare Reflexion angegeben. ....	122
Abbildung 127: Kundenanlage mit TSTair-Kollektoren - Schrägdach .....	123
Abbildung 128: Anlagenschema Hybrid-Solarluftheizung.....	124
Abbildung 129: Messdaten 6. Februar, stabile Sonneneinstrahlung (blauer Himmel) .....	124
Abbildung 130: Messdaten 5. Februar, wechselnde Sonneneinstrahlung (bewölkter Himmel) .....	125
Abbildung 131: Sicherer Anlagenstillstand.....	127
Abbildung 132: Kundenanlage mit TSTair-Kollektoren - Flachdach.....	128
Abbildung 133: Outdoor Langzeittest seit 2016 .....	128
Abbildung 134: Links Spiegelniederhalter und rechts Absorberbereich im Jahr 2021 .....	129