

airwasol GmbH & Co. KG

# **ULA – Ultra Leicht Absorber**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 32450/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Siems, airwasol GmbH & Co. KG

Dr. Reinhard Dasbach, Almeco GmbH

Prof. Matthias Rommel, Institut für Solartechnik SPF

Dr. Mihaela Dudita, Institut für Solartechnik SPF

2016

## Projektkennblatt

der

## Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>32450/01</b>	Referat	<b>24/2</b>	Fördersumme	<b>86.977,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		ULA – Ultra Leicht Absorber			
<b>Stichworte</b>		Erneuerbare Energien, Materialeinsparung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>5 Monate</b>	<b>11.12.2015</b>	<b>10.05.2016</b>	<b>1</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  Institut für Solartechnik SPF der Hochschule für Technik Rapperswil Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil			
<b><i>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</i></b>					
<p>Für eine umweltfreundliche und Zukunft sichere Energieversorgung können Solarluftkollektoren eingesetzt werden, welche eine effiziente Erzeugung von z.B. industrieller Prozesswärme zur Regenerierung von Sorptionsspeichern, die Trocknung von z.B. Industriebauteilen, Lacken, Agrarprodukten, Lebensmitteln oder Gärresten, die Beheizung von Industriehallen oder die Meerwasserentsalzung ermöglichen.</p> <p>Zurzeit werden hauptsächlich Flach-Solarluftkollektor eingesetzt, welche aufgrund ihres geringen thermischen Wirkungsgrad bei hohen Betriebstemperaturen &gt; 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 stattfindet.</p> <p>Zielsetzung des Projektes ist diese Neuentwicklung einschließlich Produktionstechnik mit folgenden technischen Herausforderungen und Arbeitsschritten:</p>					
<b><i>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</i></b>					
<p>Um kostengünstig einen neuen Kollektor herzustellen, müssen neue und effiziente Produktionstechniken entwickelt und eingesetzt werden. Es soll ein neuer kostengünstiger Glas-Metall-Verbund entwickelt werden. Hierbei werden verschiedene Verbindungstechniken zwischen Glas und Metall untersucht. Des Weiteren soll der Metallbalg zur Längenkompensation zwischen Glas- und Absorberrohr direkt in das Absorberrohr mit eingearbeitet werden. Dies spart aufwendige Fügeverfahren 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.</p>					

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.

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 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 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 eingesetzt 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***

Die hier erfolgten Arbeiten sollten dazu dienen, um ein Folgeprojekt mit mehr Sicherheit beantragen zu können. Vor Projektstart konnte keiner der Projektpartner sicher einschätzen, ob die Verwirklichung der Ideen „eine neue und sehr leichte Vakuumabsorberröhre für Luftkollektoren“ und neue Fertigungsmöglichkeiten für zukünftige Produkte bei den Projektpartnern umsetzbar sind. Nur mit Hilfe des von der DBU geförderten Projektes konnten erste aufschlussreiche Arbeiten durchgeführt werden.

Die hier erreichten Arbeitsergebnisse kann man als einen großen Meilenstein ansehen, welcher erfolgreich erreicht wurde. Durch die Arbeiten gibt es nun eine gewisse Sicherheit, dass die innovativen Entwicklungen auch eine Umsetzung in neue effiziente Produkte ermöglichen.

Folgende Bauteile der Absorberröhre wurden in der 1. Projektphase als Prototypen hergestellt. Die Langzeittests und mögliche Optimierungen dieser Komponenten sollen in einer zweiten Projektphase erfolgen.

- Neue Absorberbeschichtung auf Edelstahlsubstrat
- Beschichtetes Absorberrohr mit eingearbeitetem Metallbalg
- GMV (Glas-Metall-Verbindung) mit verschiedenen Verbindungstechniken
- Spiegel innenliegend: Alu-Blech-Freiformspiegel und halbrunder PVD-Spiegel
- Adapterhülse für die Anbindung an den bestehenden Kollektorheader

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit konnten die Ergebnisse nicht in einer Tagung als Vortrag eingereicht werden. Das Projekt wird desweilen in Fachkreisen oder auf der eigenen Firmenwebseite präsentiert.

### ***Fazit***

Alle Projektziele wurden erfolgreich erreicht.

Durch die gute Projektzusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konnten neue sehr innovative Ideen schnell und effizient verwirklicht werden. Die ersten Kurzzeittests zeigen, dass schon die Prototypen, einzeln betrachtet, einen stabilen und effizienten Einsatz in Zukunft auch in anderen Produkten ermöglichen können.

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

## Inhalt

Projektkennblatt.....	2
Abbildungsverzeichnis .....	5
Zusammenfassung .....	6
Einleitung .....	7
A1 Entwicklung einer hochtemperatur- und korrosionsstabilen Infrarot Reflektorschicht für Edelstahlsubstrat.....	8
A1.1 Auswahl eines geeigneten Edelstahlwerkstoffes und Definition der Oberflächenqualität. ....	8
A1.2 Literatur-/Patentrecherche zur Auswahl geeigneter Materialien für eine Infrarot Reflektorschicht.....	8
A1.3 Abscheidung verschiedener ausgewählter IR-Reflektor Schichtsysteme auf Edelstahlblech. .....	10
A1.4 Charakterisierung der IR-Reflektor Schichtsysteme .....	12
A2 Optimierung des Gesamtschichtsystems .....	12
A2.1 Simulationen zur Abstimmung des Absorberschichtsystems auf das IR-Reflektor- und das Antireflexschichtsystem .....	12
A2.2 Versuche zur Abscheidung des Gesamtschichtsystems.....	14
A2.3 Charakterisierung des Gesamtschichtsystems .....	16
A3 Optimierung des Antireflexschichtsystems .....	17
A3.1 Literatur-/Patentrecherche und Simulationen zur Auswahl eines mechanisch und korrosionsstabilen Antireflex-Schichtsystems .....	17
A3.2 Versuche zur Abscheidung des neuen Antireflex-Schichtsystems.....	19
A3.3 Charakterisierung des neuen Antireflex Schichtsystems.....	20
A4 Verarbeitungstests des neuen Edelstahlabsorbers .....	21
A5 Optimierung des Schichtsystems/Abscheidung.....	21
A6 Konstruktion/Fertigung/Charakterisierung Absorberrohre .....	21
A6.1 Arbeiten beim Rohr-/Balgherstellungsprozess .....	22
A6.2 Konstruktionsarbeiten.....	25
A7 Charakterisierungen am SPF .....	31
Fazit.....	34
Literaturverzeichnis.....	35

## Abbildungsverzeichnis

Grafik 1: Reflexionsspektren der Metalle, die für die Infrarot-Spiegelschicht in Frage kommen. Daneben sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen. ....	9
Grafik 2: Beim SPF gemessene Reflexionsspektren der auf Edelstahlsubstrat aufgesputterten Al und NiAl Schichten. Zum Vergleich sind Literaturwerte von reinem Aluminium und Nickel aufgetragen. Daneben sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen. ....	10
Grafik 3: Reflexionsspektren der verschiedenen auf Edelstahl gesputterten Infrarot-Reflektorschichtsysteme. ....	11
Grafik 4: Aufbau des Absorberschichtsystems .....	12
Grafik 5: Simulierte Reflexionsspektren der Einzelschichten des Absorberschichtsystems. ....	13
Grafik 6: Simulation des Einflusses vom Anteil des metallischen Chroms in der Cermet-Schicht auf das Reflexionsspektrum. ....	13
Grafik 7: Vergleich simuliertes und vom SPF gemessenes Reflexionsspektrum der Absorberbeschichtung auf Edelstahl mit Aluminium Infrarot-Spiegelschicht. ....	15
Grafik 8: Aus dem vom SPF gemessenem Reflexionsspektrum (siehe Grafik 5) berechnete thermische Emission in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur des Absorbers. ....	15
Grafik 9: Reflexionsspektren des Edelstahlsubstrats unbeschichtet, mit Al und mit Absorberschichtsystem beschichtet. ....	16
Grafik 10: Reflexionsspektren des Absorberschichtsystems auf Edelstahl nach Degradationstests ....	17
Grafik 11: Simulationen zur Optimierung des Absorberschichtsystems mit ZrOx Antireflexschicht. .	18
Grafik 12: Vergleich der Reflexionsspektren des Absorberschichtsystems mit SiOx und ZrOx Antireflexschicht. ....	19
Grafik 13: Absorbersystem auf Aluminiumsubstrat mit ZrOx Antireflexschicht. ....	20
Abbildung 1: Materialmix - Absorberkomponenten .....	21
Abbildung 2: WIG- Schweißbrenner. ....	23
Abbildung 3: Schweißfehler am Absorberrohr .....	23
Abbildung 4. Gratausrichtung Absorberblech. ....	24
Abbildung 5: Röhrenverbinder mit neuen Adaptern .....	26
Abbildung 6: GMV mit Glasrohr, Spiegel und Absorberrohr .....	27
Abbildung 7: Drucksimulationen mit dem GMV .....	28
Abbildung 8: Innenliegender Alu-Blechspiegel .....	29
Abbildung 9: Halbspiegel aufgedampft auf Glasinnenrohrseite .....	29
Abbildung 10: PVD-Beschichtungstest an einem kurzen Glasrohr 300 mm .....	30
Abbildung 11: Skizze von Alu-Blech-Spiegel .....	31
Abbildung 12: Veränderung des solaren Absorptionsgrades während des thermischen Belastungstests entsprechend ISO 22975-3, part 1. ....	33
Abbildung 13: Veränderung des Emissionsgrades während des thermischen Belastungstests entsprechend ISO 22975-3, part 1 .....	33

## Zusammenfassung

Folgende Bauteile der Absorberröhre wurden in der 1. Projektphase neu entwickelt, am CAD konstruiert und als Prototypen hergestellt. Langzeittests und noch notwendige Optimierungen dieser Komponenten sollen in einer zweiten Projektphase erfolgen.

- Neue Absorberbeschichtung auf Edelstahlsubstrat
- Beschichtetes Absorberrohr mit eingearbeitetem Metallbalg
- GMV (Glas-Metall-Verbindung) mit verschiedenen Verbindungstechniken
- Vakuumstutzen integriert in GMV mit Abschlusstechnik nach der Vakuumherzeugung
- Spiegel innenliegend: Alu-Blech-Freiformspiegel und halbrunder PVD-Spiegel
- Neuer Vakuumgetter: Position und Größe
- Adapterhülse für die Anbindung an den bestehenden Kollektorheader

Die Absorberschicht wurde bei hohen Temperaturen (298 °C) und in Luft untersucht (Kurzeittests). Nach einer Testzeit von 600 h erweist sich die Schicht sowohl in den Absorptions- als auch in den Emissionswerten als sehr stabil. Die Absorberschicht ist nach den Regeln des Task X für den Einsatz bei diesen hohen Temperaturen qualifiziert.

Die hier erreichten Arbeitsergebnisse kann man als einen großen Meilenstein ansehen, welcher erfolgreich erreicht wurde. Durch die Arbeiten gibt es nun eine gewisse Sicherheit, dass die innovativen Entwicklungen auch eine Umsetzung in neue effiziente Produkte ermöglichen.

### Kooperationspartner

- airwasol GmbH & Co. KG
- Almeco GmbH
- Institut für Solartechnik SPF

Das Entwicklungsprojekt wurde gefördert unter dem Az: 32450/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.



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

## Einleitung

Ziel in diesem Projekt ist 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. Edelstahl wird verwendet, damit der Balg direkt in das Absorberrohr eingearbeitet werden kann.

Durch eine gegen Umwelteinflüsse stabile Edelstahlabsorberschicht soll auch der Markt für kleine CSP-Receiver, 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 die Regenerierung von Sorptionsspeichern, Trocknung von Lacken, Holz-Hackschnitzeln, Lebensmitteln, Klärschlämmen, Beheizung von Industriehallen, Vorheizen von Öfen z.B. in Betonwerken oder für 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 abgeschiedenen selektiven Absorberbeschichtungen.

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

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 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 eingesetzt 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.

## **A1 Entwicklung einer hochtemperatur- und korrosionsstabilen Infrarot Reflektorschicht für Edelstahlsubstrat**

### **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 Wärmeausgleichshalben direkt in das Absorberrohr eingepreßt werden sollen (siehe A6 Balgumformung).

Als Substrat für die ersten Versuche wurde 1.4541 (X6CrNiTi18-10) ausgewählt. Diese Legierung ist Titan stabilisiert und damit auch im geschweißten Zustand sehr korrosionsstabil. Da dieser Stahl kein Molybdän enthält ist er zudem kostengünstiger wie z. B. 1.4404.

Aufgrund der Probleme beim WIG-Schweißen wurde dennoch 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) als zweite Variante ausgewählt. Da diese Legierung weniger Kohlenstoff enthält, ist diese im Allgemeinen besser schweißbar wie 1.4541. Aufgrund des hohen Gehaltes an Molybdän ist dieser Werkstoff aber deutlich teurer wie 1.4541.

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

Selektive Solarabsorberschichten, die nach dem Absorber-Reflektor-Tandemprinzip arbeiten [Gor 01] [Ken 02], müssen auf ein Substrat mit hoher Reflexion im Infraroten aufgebracht werden, um eine hinreichend geringe thermische Emission zu erreichen.

Da Edelstahl im Vergleich zu Aluminium oder Kupfer nur eine geringe Reflexion (ca. 80%) im Infraroten besitzt, muss auf dieses Substrat zunächst eine Reflektorschicht mit hoher Reflexion im Infraroten abgeschieden werden.

Da die Absorberschicht 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 Absorberschicht bzw. in das Substrat hineindiffundieren.

Für Vakuumabsorberrohre in Solarthermischen Kraftwerken mit Arbeitstemperaturen über 400°C wurden schon verschiedene und teilweise komplexe IR-Reflektor-Schichtsysteme auf Edelstahlrohren untersucht und eingesetzt. Unter anderem wurden Silber und Molybdänschichten eingesetzt, um auch bei den hohen Arbeitstemperaturen noch eine geringe thermische Emission zu erreichen. Diese Schichten sind teilweise noch mit zusätzlichen Diffusionsbarriereschichten geschützt [Hil09].

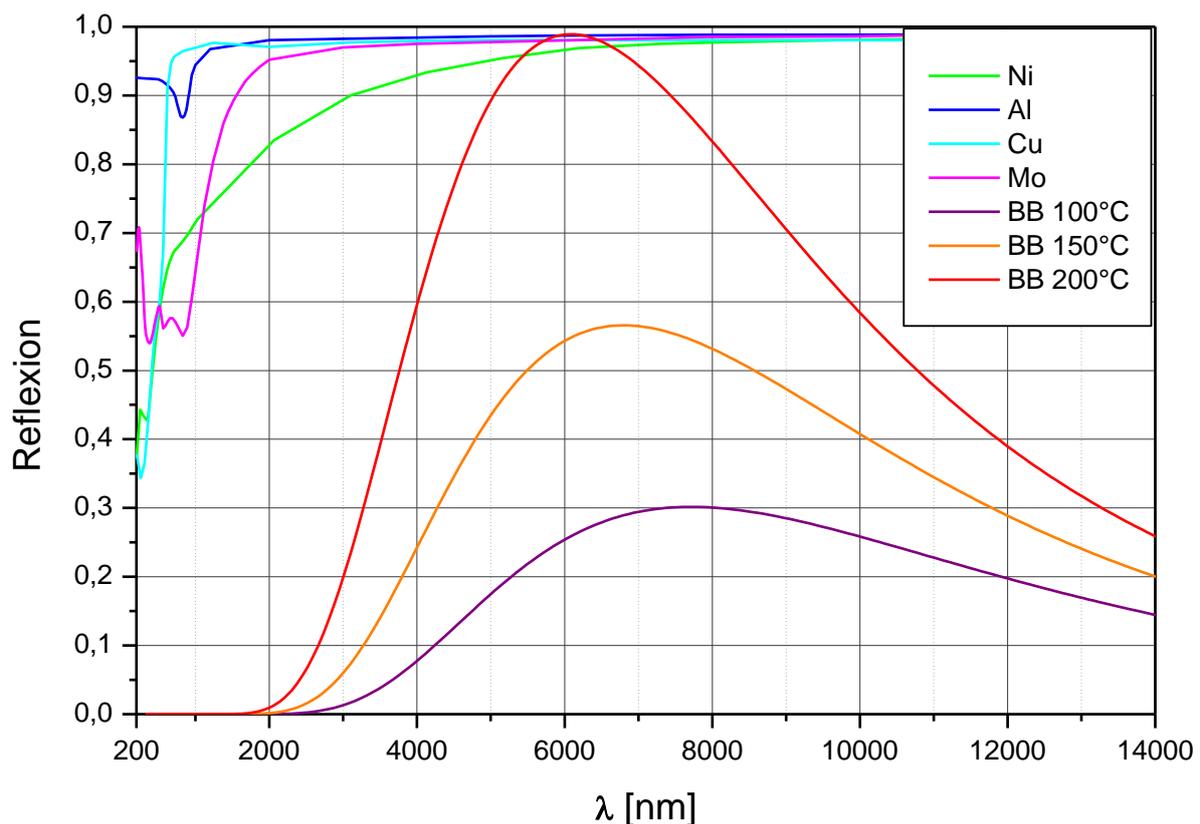
Diese Schichtsysteme sind aufgrund der eingesetzten Materialien (Ag, Mo) relativ teuer.

Da das neue IR-Reflektor Schichtsystem auf einer industriellen PVD-Bandbeschichtungsanlage aufgebracht werden soll, muss ein Schichtsystem aus Materialien ausgewählt werden, 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 scheidet damit für die geplante Anwendung aus. Ag, Mo, Pt und Re kommen aus Kostengründen nicht in Frage. Daher wurde Al und Ni als Material für die IR-Reflektorschicht ausgewählt. Aluminium besitzt eine hohe Reflexion und bildet eine selbstpassivierende Oxidschicht von etwa 10nm aus, so dass die Schicht relativ stabil gegenüber oxidativem Angriff ist. Die Sputterrate von Al beträgt zwar nur etwa 1/3 von Cu. Al ist aber ein kostengünstiges Material und ist daher für die Massenfertigung interessant.

Nickel ist ebenfalls ein sehr temperatur- und vor allem korrosionsstabiles Material. Wie in der Grafik 1 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.



**Grafik 1: Reflexionsspektren der Metalle, die für die Infrarot-Spiegelschicht in Frage kommen. Daneben sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen.**

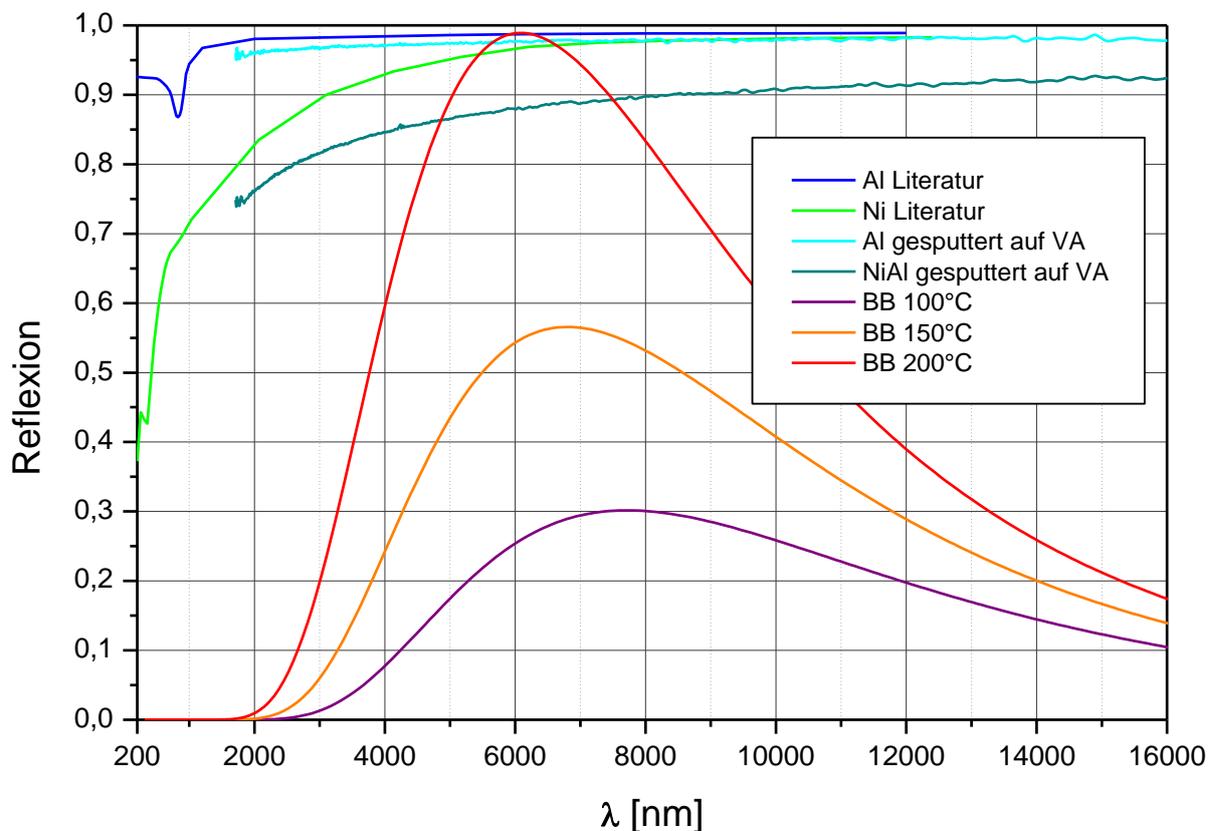
Da Nickel ferromagnetisch ist, stört es die Magnetfelder von Magnetron Sputteranlagen, was zu einer signifikanten Reduktion der Sputterrate führt. Daher wird Nickel mit anderen Elementen legiert, um den Ferromagnetismus zu unterdrücken. Standardmäßig werden folgende Legierungen zum Sputtern von Nickel 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. Gegenüber reinem Nickel, das eine thermische Emission (100°C) von 4% aufweist, wurde für gesputterte NiV und NiCr Schichten abhängig von der Konzentration des Legierungselementes ein Anstieg der thermischen Emission (100°C) auf über 10% gefunden [Gel 04]. Daher wurde für die Versuche im Rahmen der Projektes NiAl als Targetmaterial ausgewählt.

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

Zunächst wurde Al von Aluminiumtargets und NiAl von NiAl-Targets auf der industriellen PVD Beschichtungsanlage auf Edelstahlsubstrat aufgesputtert. Nach Optimierung der Plasmareinigungsparameter wurde eine gute Schichthaftung sowohl der Aluminiumschicht wie auch der NiAl-Schicht auf Edelstahlsubstrat (1.4541 und 1.4404) erreicht, die die Kriterien für beschichtete Bleche der ISO CD 12592.2 erfüllt.

Die Reflexion der Aluminiumschicht auf Edelstahl war etwas geringer als für reines Aluminium in der Literatur angegeben wird (siehe Grafik 2), jedoch wurden gute Emissionswerte für das Absorber-Gesamtschichtsystem erreicht (siehe A2.2). Bei den NiAl-Schichten war die erreichte Reflexion signifikant geringer als für reines Nickel in der Literatur angegeben wird. Das war aufgrund der in [Gel 04] gefundenen Ergebnisse zu erwarten, allerdings konnte durch die Verwendung von Al als Legierungsbestandteil erreicht werden, dass die thermische Emission (100°C) mit 9,3% noch unter 10% liegt.



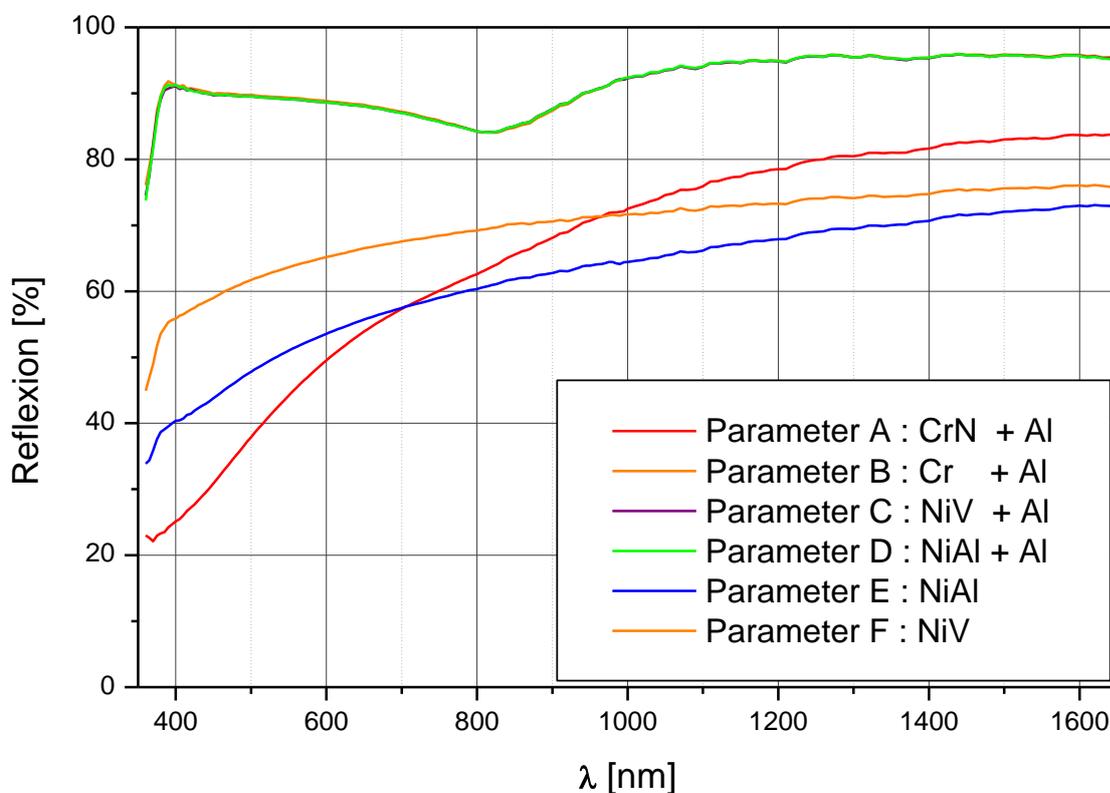
Grafik 2: Beim SPF gemessene Reflexionsspektren der auf Edelstahlsubstrat aufgesputterten Al und NiAl Schichten. Zum Vergleich sind Literaturwerte von reinem Aluminium und Nickel aufgetragen. Daneben sind die Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Oberflächentemperaturen aufgetragen.

Da die thermische Emission der NiAl Schicht auf Edelstahl noch nicht befriedigend ist, wurden Abscheidungsversuche mit verschiedenen anderen IR-Reflektorschichtsystemen durchgeführt. Dabei wurden Schichtsysteme aus zwei Schichten, einer Diffusionsbarriere Schicht aus Cr, CrN, NiV oder NiAl und einer Reflektorschicht aus Aluminium auf Edelstahl (1.4404) abgeschieden (siehe Tabelle 1). Damit solle erreicht werden, dass eine gute Diffusionsbarriereschicht, die in der Regel eine zu geringe Reflexion im Infraroten aufweist, mit einer Schicht mit guter Infrarotreflexion kombiniert wird. Zur Referenz wurden jeweils noch reine NiAl und NiV Schichten auf Edelstahl aufgesputtert:

Parameter	Schichtsystem
A	CrN + Al
B	Cr + Al
C	NiV + Al
D	NiAl + Al
E	NiAl
F	NiV

Tabelle 1: Auf Edelstahl abgeschiedene IR-Reflektorschichtsysteme

In Grafik 3 sind die Reflexionsspektren der verschiedenen auf Edelstahl gesputterten Infrarot Reflektorschichtsysteme, die von Almeco vermessen wurden (Almeco besitzt kein Spektrometer zur Reflexionsmessung im fernen Infrarot), aufgetragen. Man erkennt, dass die Diffusionsbarriereschichten Cr, NiV und NiAl optisch dicht von der Aluminiumschicht gedeckt werden. Somit wird die gewünschte hohe Reflexion erreicht. Einzig bei der CrN Diffusionsbarriereschicht konnte keine optisch dichte Deckung erreicht werden. Wahrscheinlich müssen die Abscheidungsparameter noch optimiert werden. Die NiAl und NiV Einzelschichten weisen eine deutlich geringere Reflexion auf.



Grafik 3: Reflexionsspektren der verschiedenen auf Edelstahl gesputterten Infrarot-Reflektorschichtsysteme.

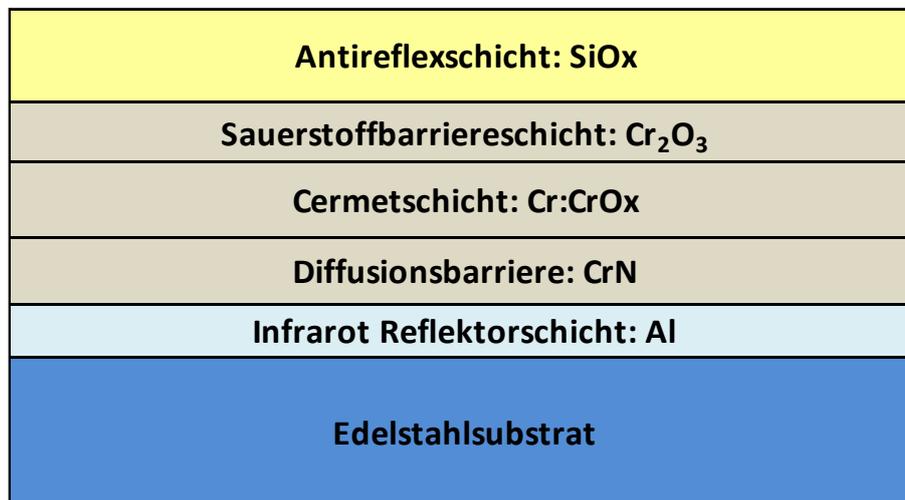
## A1.4 Charakterisierung der IR-Reflektor Schichtsysteme

Aufgrund der oben begründeten Verzögerungen, konnten beim SPF bisher nur die mit Aluminium und NiAl beschichteten Edelstahlproben vermessen werden (siehe Grafik 2). Die Proben mit den anderen Schichtsystemen auf Edelstahl (1.4404) wurden zur Charakterisierung an das SPF versandt.

## A2 Optimierung des Gesamtschichtsystems

### A2.1 Simulationen zur Abstimmung des Absorberschichtsystems auf das IR-Reflektor- und das Antireflexschichtsystem

Als Absorberschichtsystem wird das Schichtsystem verwendet, was sich schon auf Aluminium- und Kupfersubstrat bewährt hat. Es besteht aus dem eigentlichen Absorberschichtsystem und einer Antireflexschicht aus Siliziumdioxid (siehe Grafik 4). Das Absorberschichtsystem besteht aus einer CrN Schicht, die als Diffusionsbarriere dient, einer Cr:CrOx Cermet Schicht und einer stöchiometrischen Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schicht, die als Sauerstoffbarriereschicht die Cr:CrOx Cermet Schicht vor weiterer Oxidation unter Temperatureinwirkung schützt.

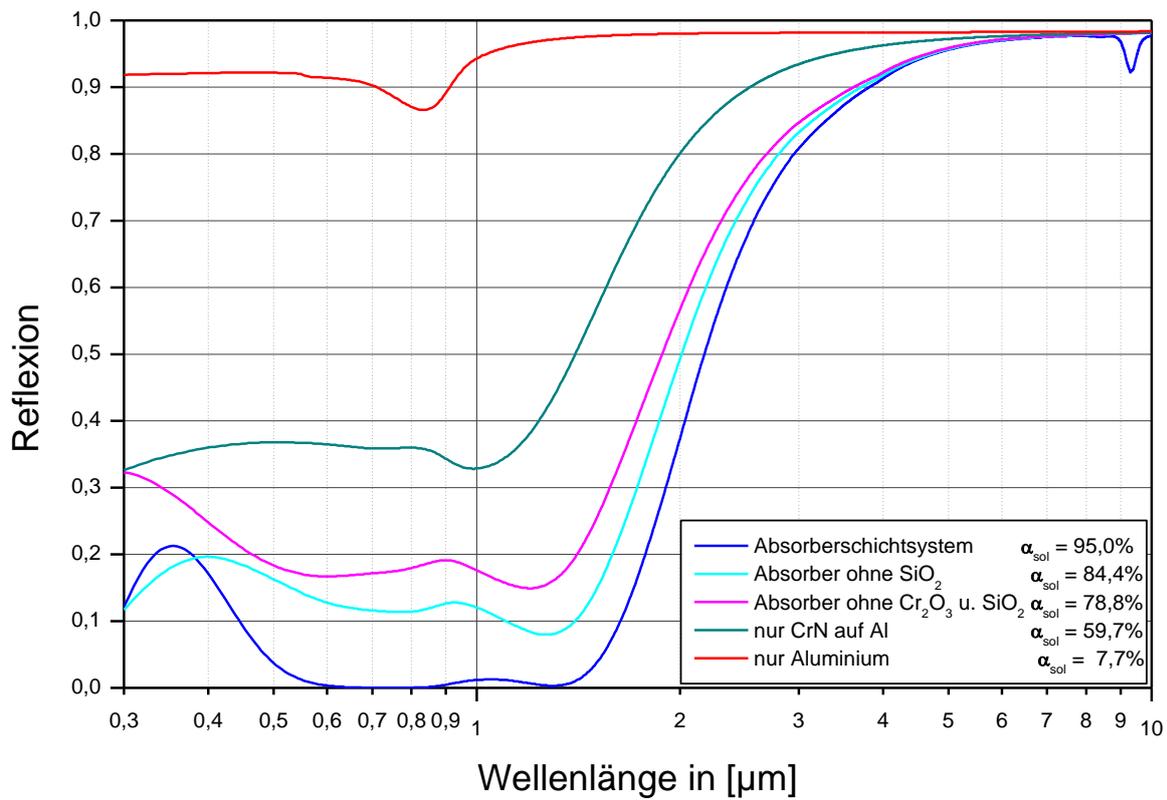


Grafik 4: Aufbau des Absorberschichtsystems

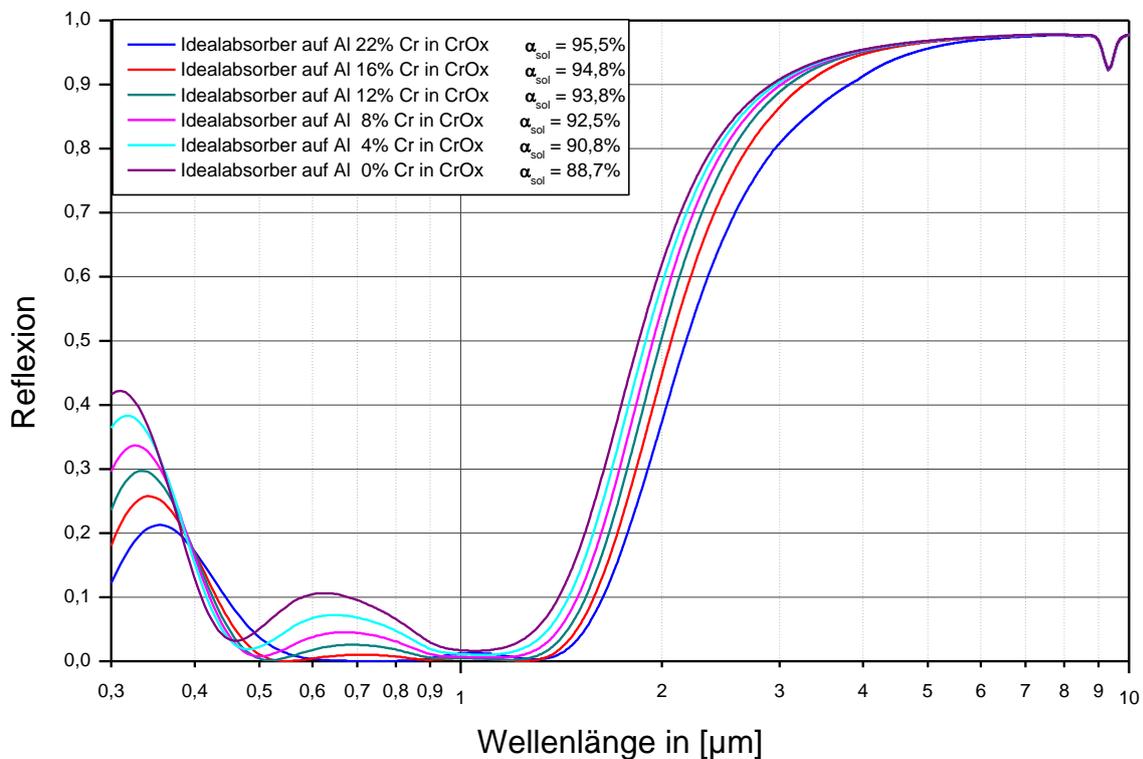
Die optischen Eigenschaften des Schichtsystems mit Infrarot Reflektorschicht aus Aluminium wurden mittels des optischen Simulationsprogramms „CODE“ [The05] simuliert und optimiert. In Grafik 5 ist der Einfluss der einzelnen Schichten auf das simulierte Reflexionsspektrum zu erkennen.

Aus diesen Simulationen wurden die optimalen Schichtdicken und die optimale Zusammensetzung der Cermet-Schicht bestimmt. Es wurde ermittelt, dass eine Aluminiumschicht von mindestens 40nm erforderlich ist, um eine optisch dichte Reflektorschicht zu erhalten.

Daneben wurde der Einfluss vom Anteil von Cr in der Cermet-Schicht auf die Absorptionseigenschaften simuliert (siehe Grafik 6). Dazu wurde "Effektiv-Medien-Theorie" verwendet, u. a. das Bruggeman Modell, um die Zusammensetzung der reaktiv gesputterten Schicht simulieren zu können. Man erkennt, dass die Reflexion signifikant abnimmt, wenn die metallischen Chrompartikel in der Cermetschicht oxidieren. Daher ist die Sauerstoffbarriereschicht aus Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> für die Temperaturstabilität des Absorberschichtsystems entscheidend.



Grafik 5: Simulierte Reflexionsspektren der Einzelschichten des Absorberschichtsystems.



Grafik 6: Simulation des Einflusses vom Anteil des metallischen Chroms in der Cermet-Schicht auf das Reflexionsspektrum.

## A2.2 Versuche zur Abscheidung des Gesamtschichtsystems

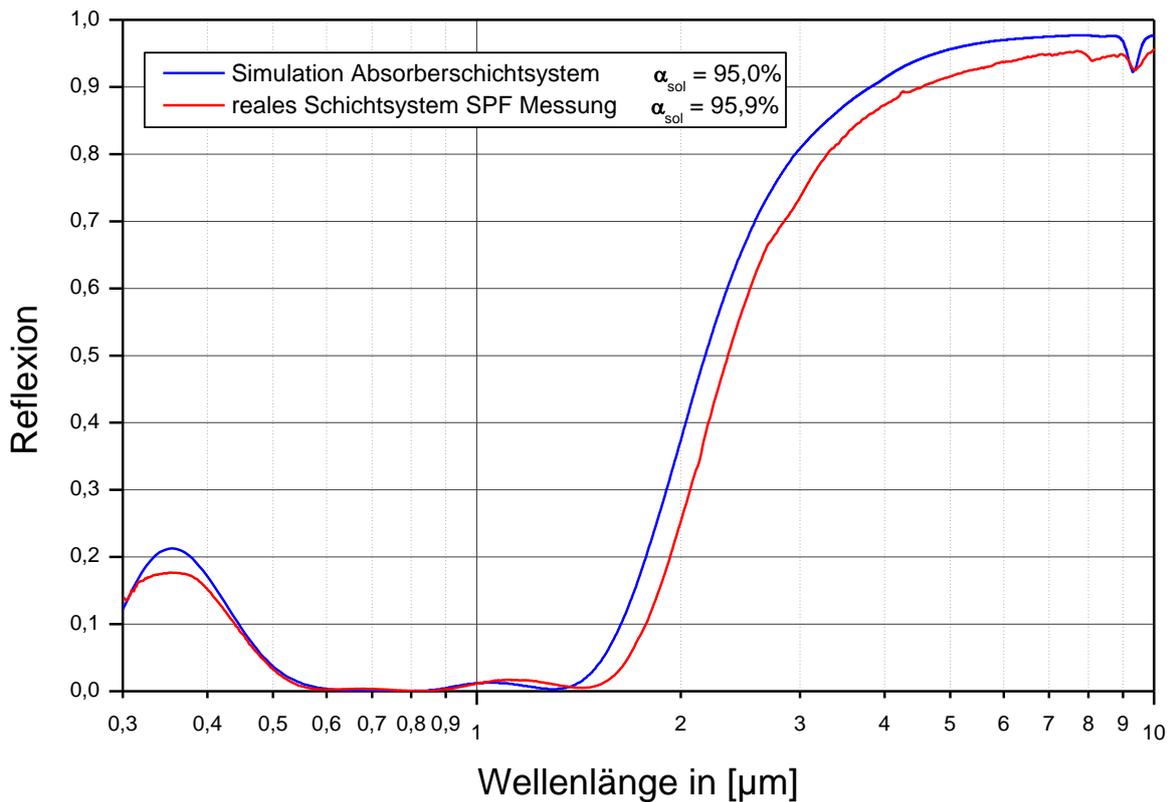
Auf der industriellen PVD-Bandbeschichtungsanlage der Firma Almeco wurde zunächst das Absorberschichtsystem mit Aluminium IR-Reflektorschicht abgeschieden. Dazu wurde die erste Sputterstation mit Aluminium Targets ausgerüstet.

Um die Reflexionseigenschaften der IR-Reflektorschicht aus Aluminium beurteilen zu können, wurde zunächst nur eine Schicht aus Aluminium auf das Edelstahlsubstrat aufgesputtert. In Grafik 9 ist das Reflexionsspektrum des mit Aluminium beschichteten Edelstahls aufgetragen. Zum Vergleich sind auch die Reflexionsspektren von Aluminium, das auf eine Glasscheibe aufgedampft wurde und das Reflexionsspektrum des unbeschichteten Edelstahls eingezeichnet. Man erkennt, dass die Reflexion der Edelstahloberfläche durch die Aluminiumbeschichtung signifikant erhöht werden konnte. Allerdings erreicht die Reflexion nicht dasselbe Niveau wie bei Aluminium, das auf eine Glasscheibe abgeschieden wurde. Das kann an der Rauigkeit des verwendeten Edelstahlsubstrates liegen, das Walzriefen vom Walzprozess aufweist. Infolgedessen war der Emissionsgrad der Aluminiumschicht mit einem Wert von 3,2% etwas höher wie bei einer auf Glas abgeschiedenen Aluminiumschicht, wo ein Wert von 2,8% erreicht wird. Eventuell muss die Schichtdicke des aufgesputterten Aluminiums noch erhöht werden.

Obwohl die Emission der Aluminiumschicht auf Edelstahl nicht optimal war, konnten mit dem Absorber Gesamtschichtsystem gute thermische Emissionswerte bei 100°C von unter 5% erreicht werden (siehe Grafik 8). Diese Werte sind somit vergleichbar mit Emissionswerten, die auf Kupfer- oder Aluminiumsubstrat erreicht werden.

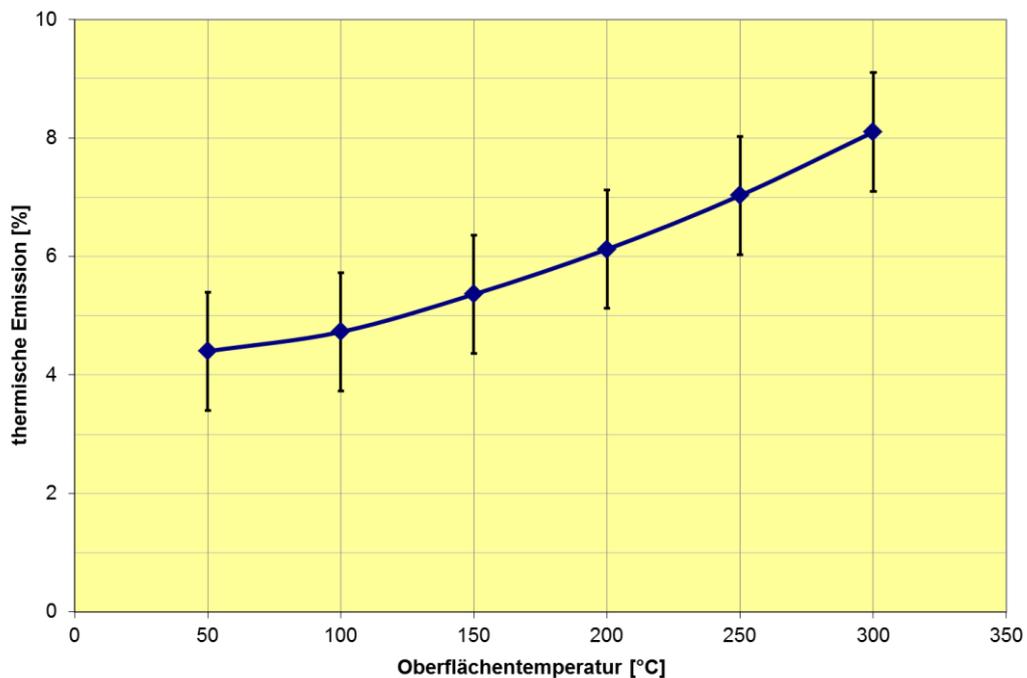
Für die Abscheidung des Absorberschichtsystems wurden die übrigen Sputterstationen mit Cr-Targets ausgerüstet und die verschiedenen Chromschichtsysteme durch reaktives Sputtern abgeschieden. Die Antireflexschicht aus Siliziumoxid wurde mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden. Die Dicken und die Zusammensetzung der Einzelschichten wurden mittels Ellipsometrie gemessen und auf die Vorgaben aus der Simulation eingeregelt. Um das durch die Simulation vorgegebene Sollspektrum zu erhalten, mussten nur leichte Korrekturen an den realen Schichtdicken vorgenommen werden. Durch Optimierung der Plasmareinigungsparameter konnte die Haftung der Schicht so optimiert werden, dass sich diese sogar im Balg-Formungsprozess nicht ablöst (siehe A6 Balgumformung)!

In der Grafik 7 ist das vom SPF gemessene Reflexionsspektrum des abgeschiedenen Absorberschichtsystems auf Edelstahlblech und das simulierte Reflexionsspektrum aufgetragen. Man erkennt, dass das reale Spektrum mit dem simulierten Spektrum fast identisch ist. Somit war es möglich, das simulierte Schichtsystem mittels industrieller PVD Bandbeschichtungsanlage herzustellen.



Grafik 7: Vergleich simuliertes und vom SPF gemessenes Reflexionsspektrum der Absorberbeschichtung auf Edelstahl mit Aluminium Infrarot-Spiegelschicht.

Aus den Reflexionsdaten im Infraroten konnte die thermische Emission für verschiedene Absorbertemperaturen berechnet werden (siehe Grafik 8), die in die Berechnung der theoretisch erreichbaren Stillstandtemperatur des Vakuumabsorberrohrs vom SPF eingegangen ist (siehe A7).



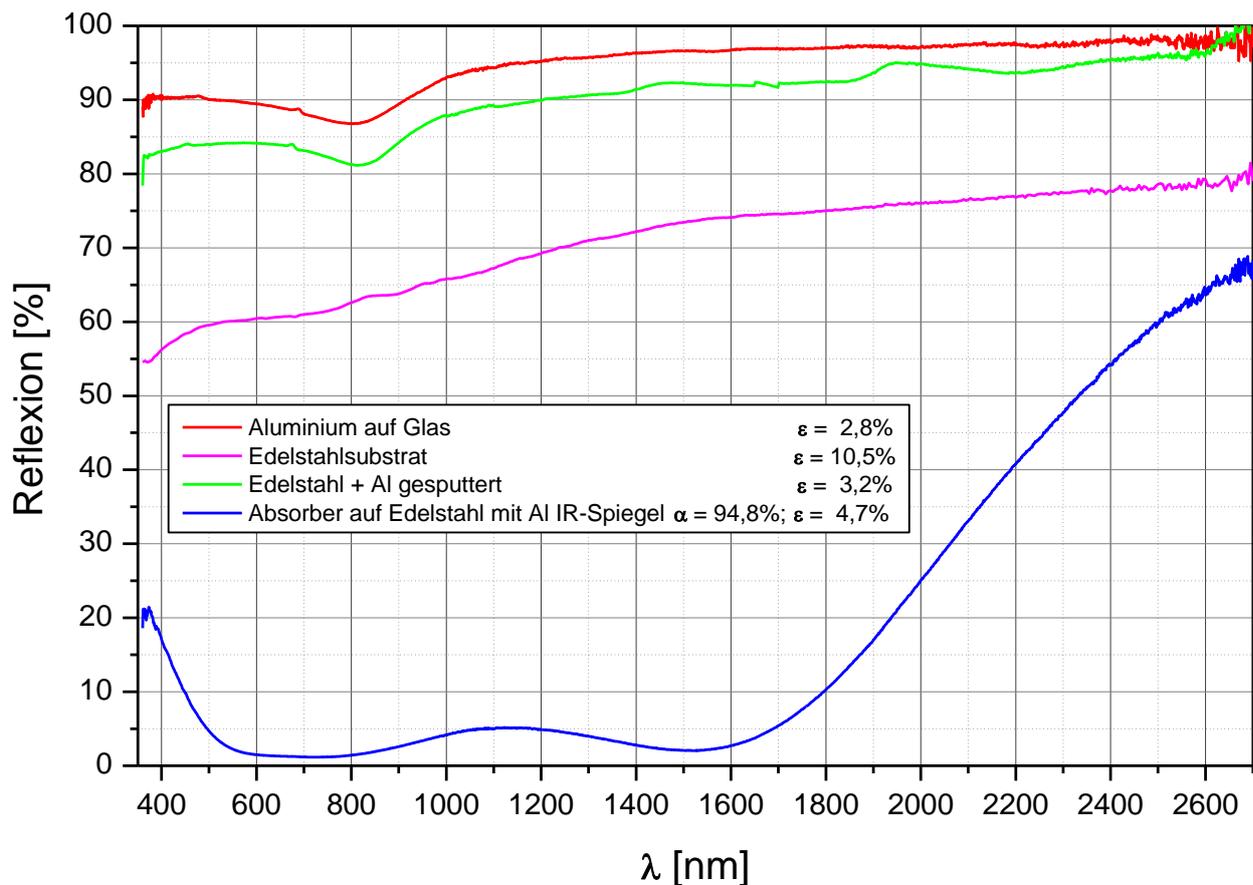
Grafik 8: Aus dem vom SPF gemessenem Reflexionsspektrum (siehe Grafik 5) berechnete thermische Emission in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur des Absorbers.

### A2.3 Charakterisierung des Gesamtschichtsystems

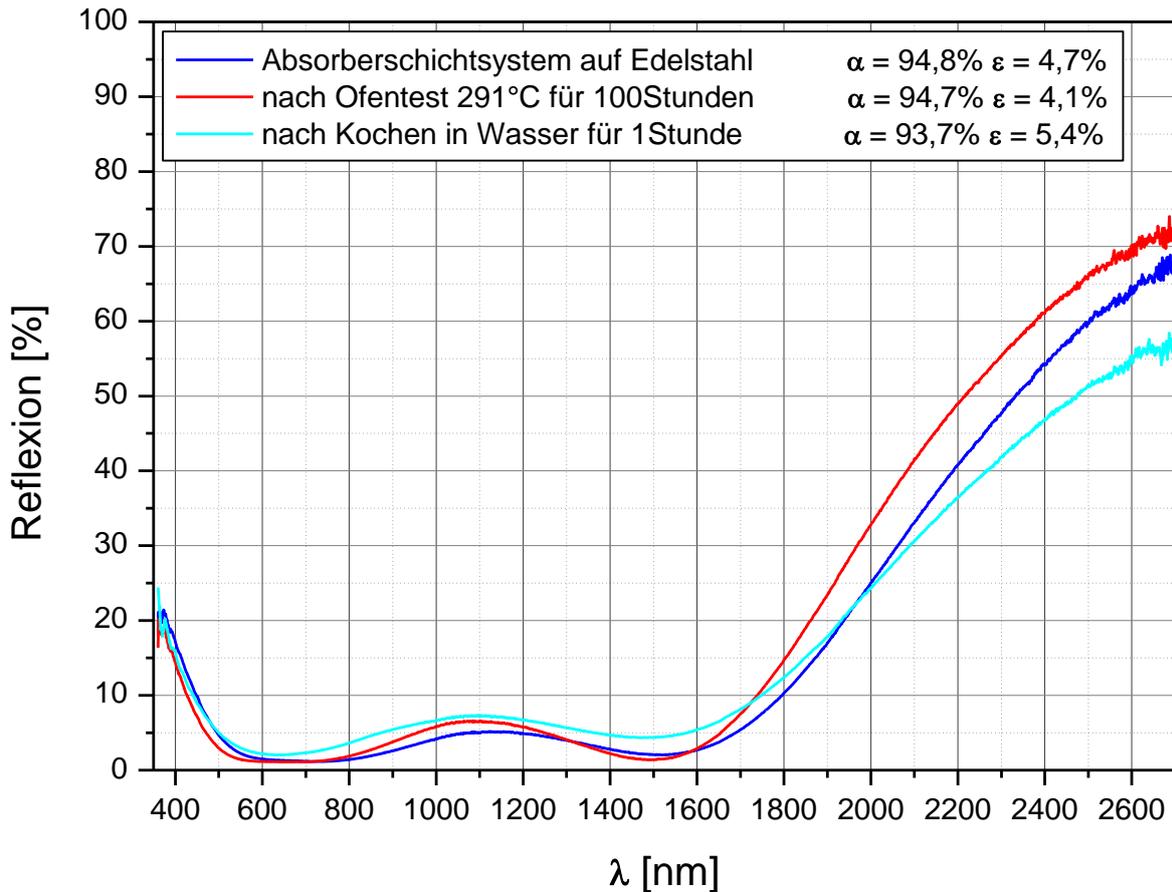
Das Reflexionsspektrum des Absorberschichtsystems auf Edelstahlblech wurde mittels VIS-NIR Spektrometer (Omega 20 der Firma Bruins), das mit einer Ulbrichtkugel ausgestattet ist vermessen. Die thermische Emission bei 100°C wurde mittels Emissionmeter TIR 100-2 der Firma INGLAS vermessen. Die erhaltenen Werte für die Absorption und Emission stimmen gut mit den vom SPF gemessenen Werten überein. Daneben wurden die Reflexionsspektren des unbeschichteten und mit Aluminium beschichteten Edelstahlblechs aufgetragen. Durch das aufgesputterte Aluminium konnte die Reflexion des Edelstahls signifikant erhöht werden, was zu guten Emissionswerten des Gesamtschichtsystems führte.

Das Schichtsystem wurde Temperatur- und Feuchtigkeitstests unterzogen. In Grafik 10 sind die Reflexionsspektren nach den Degradationstests aufgetragen. Nach dem Test im Ofen bei 291°C für 100 Stunden ist die Emission sogar etwas gesunken. Das stimmt ebenfalls mit den Ofentests, die beim SPF durchgeführt wurden, überein (siehe A7). D.h. Aluminium als IR-Spiegelmaterial scheint gegenüber Oxidation durch Temperaturbelastung sehr stabil zu sein.

Dagegen ist die Emission nach Kochen in Wasser für eine Stunde etwas angestiegen und die Absorption ist etwas kleiner geworden. D. h. hier hat eine leichte Degradation stattgefunden.



Grafik 9: Reflexionsspektren des Edelstahlsubstrats unbeschichtet, mit Al und mit Absorberschichtsystem beschichtet.



Grafik 10: Reflexionsspektren des Absorberschichtsystems auf Edelstahl nach Degradationstests

### A3 Optimierung des Antireflexschichtsystems

#### A3.1 Literatur-/Patentrecherche und Simulationen zur Auswahl eines mechanisch und korrosionsstabilen Antireflex-Schichtsystems

Das bisher verwendete Absorberschichtsystem besitzt eine Antireflexschicht aus Siliziumdioxid. Beim Einsatz in verglasten Flachkollektoren schützt dieses Schichtsystem die Absorberbeschichtung ausreichend vor korrosivem Angriff. Beim Einsatz der Kollektoren in Meeresnähe oder in Gebieten mit starker Luftverschmutzung wurde aber schon eine Schädigung der Antireflexschicht aus Siliziumdioxid beobachtet (siehe „Speedcoll“-Projekt [Spe 15]). Siliziumdioxid (Quarzglas) ist normalerweise ein chemisch sehr inerte Werkstoff, doch weisen mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschiedene SiO<sub>x</sub> Schichten Pinholes auf, die einen Angriffspunkt für Korrosion bieten.

Theoretisch ist es auch möglich, mittels Sputtern wesentlich dichtere SiO<sub>x</sub> Schichten abzuscheiden, allerdings sind die Abscheideraten sehr niedrig, so dass diese Option aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage kommt.

Da die Absorberschicht auf Edelstahlsubstrat teilweise auch in nicht evakuierten Kollektorsystemen an Standorten mit korrosiver Atmosphäre (Meeresnähe, Landwirtschaft etc.) eingesetzt werden soll, wird ein Material für die Antireflexschicht gesucht, das einen besseren Korrosionsschutz bietet.

Daher wurde eine Literaturrecherche nach alternativen Materialien für die Antireflexschicht durchgeführt. Folgende Auswahlkriterien wurden angewandt.

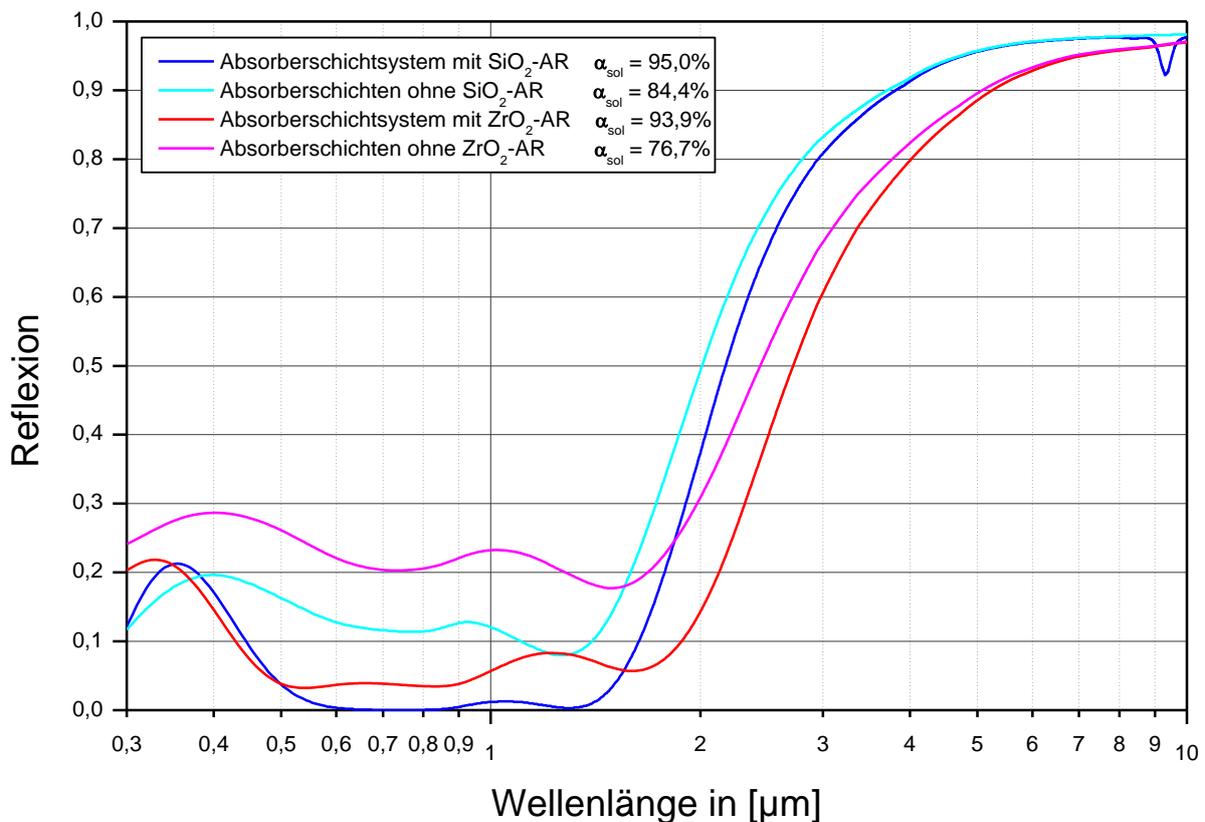
- Um eine hohe Absorption des Gesamtschichtsystems zu erreichen, sollte der Brechungsindex des neuen Materials nahe dem Brechungsindex 1,45 von Siliziumdioxid liegen.
- Daneben sollte das Material gut mittels Elektronenstrahlverdampfung abscheidbar sein und einen guten Korrosionsschutz bieten.

Das erste Kriterium erfüllt nur Aluminiumoxid mit einem Brechungsindex von etwa 1,63 und  $Y_2O_3$  mit einem Brechungsindex von 1,85. Aluminiumoxid ist nicht feuchtestabil und  $Y_2O_3$  kommt aus Kostengründen nicht in Frage.

Bei anderen Materialien mit einem Brechungsindex um die 1,5 handelt es sich hauptsächlich um Fluoride wie z. B. AlF oder MgF, deren technische Nutzung aufgrund des Fluorgehalts problematisch ist.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Zirkonoxid sehr dichte Schichten bildet, die schon ab 20nm Dicke einen guten Korrosionsschutz bieten. Daneben wird Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid schon erfolgreich für optische Beschichtungen verwendet, da es hart und abriebfest ist und eine gute Oxidationsresistenz aufweist [Rei 10]. Das Problem von Zirkonoxid ist nur, dass der Brechungsindex mit einem Wert von etwa 2,05 schon recht hoch ist, so dass in Kombination mit dem auf eine Siliziumoxid Antireflexschicht optimierte Absorberschicht, keine optimale Absorption erreicht wird.

Daher wurden Simulationen durchgeführt, um das Gesamtschichtsystem zu optimieren.

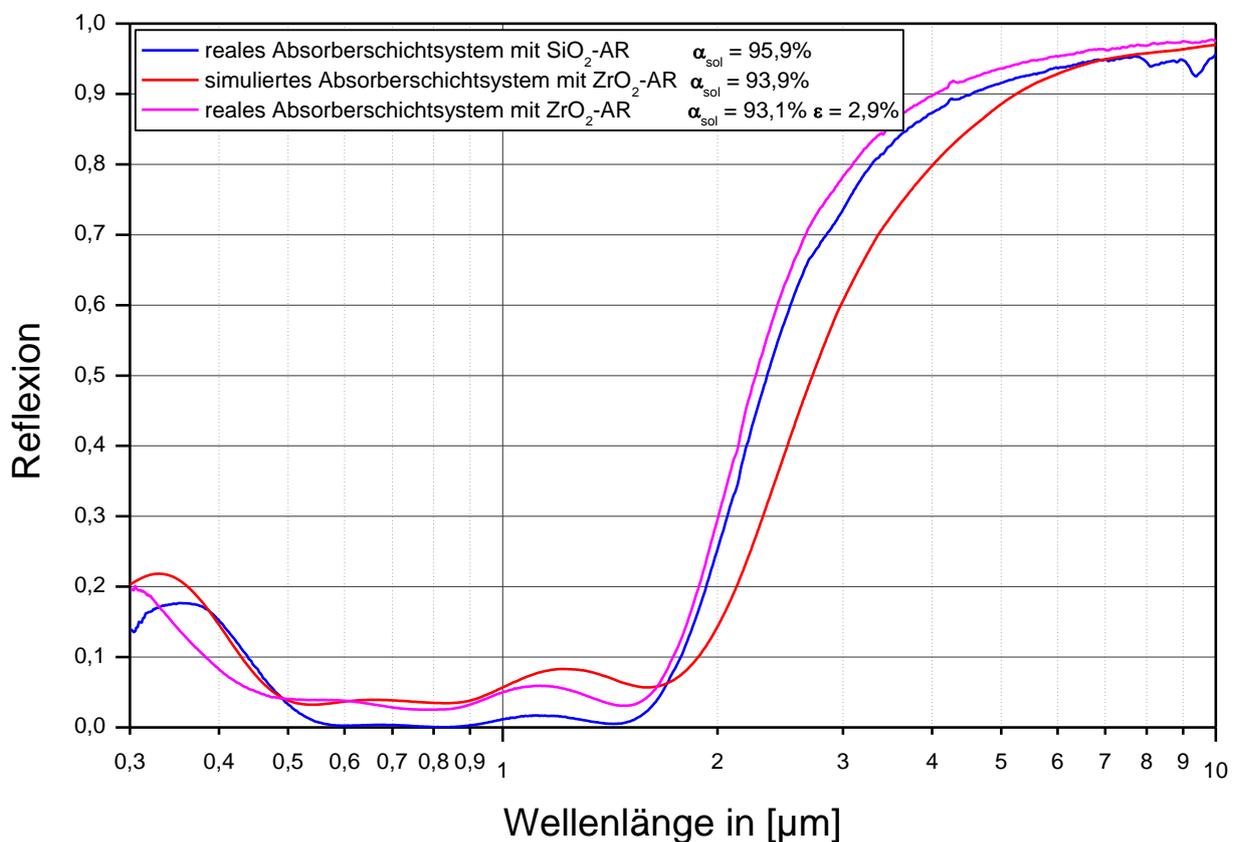


Grafik 11: Simulationen zur Optimierung des Absorberschichtsystems mit ZrOx Antireflexschicht.

Durch Anpassen der Schichtdicken der einzelnen Schichten und durch Optimierung des metallischen Chromgehalts in der Cermet Schicht konnte ein Absorberschichtsystem mit ZrOx-Antireflexschicht so optimiert werden, dass eine Absorption von maximal 94% erreicht (siehe Grafik 11) wird. Somit ist der theoretisch erreichbare Absorptionsgrad mit einer ZrOx-Antireflexschicht etwa 1% geringer als bei dem Absorberschichtsystem mit SiOx-Antireflexschicht. Falls sich dieses Schichtsystem aber als wesentlich korrosionsstabiler erweisen sollte, ist dieser etwas geringe Absorptionsgrad hinnehmbar. Man erkennt aus dem Reflexionsspektrum ohne Antireflexschicht, dass die reinen Absorberschichten dazu signifikant andere optische Eigenschaften aufweisen müssen.

### A3.2 Versuche zur Abscheidung des neuen Antireflex-Schichtsystems

Da aufgrund der Lieferschwierigkeiten kein Edelstahlblech für die Versuche bereitstand, wurden erste Vorversuche auf Aluminiumblech durchgeführt. Das ZrOx wurde dazu mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden. In der Grafik 12 ist das Reflexionsspektrum der so hergestellten Absorberschicht dargestellt. Man erkennt, dass nur eine Absorption von 93,1% erreicht wurde, was daran liegt, dass das Spektrum noch nicht ganz dem idealen Spektrum aus der Simulation entspricht.



Grafik 12: Vergleich der Reflexionsspektren des Absorberschichtsystems mit SiOx und ZrOx Antireflexschicht.

Daneben wurden Versuche zur Optimierung der Verdampfung des ZrOx mittels Elektronenstrahlverdampfung durchgeführt. Da ZrOx einen Schmelzpunkt von 2700°C besitzt, muss bei sehr hohen Elektronenstrahlleistungen gearbeitet werden, um das Material zu verdampfen. Das hat aber wiederum zur Folge, dass die Abscheiderate nicht einfach zu regeln ist.

Daher wurden Versuche mit verschiedenen Elektronenstrahlfiguren (Sweep-Figuren) und verschiedenen Tiegelgeschwindigkeiten durchgeführt, um die Stabilität der Abscheidereate zu optimieren. Letztendlich konnte eine Figur gefunden werden, bei der die Rate auf  $\pm 5\text{nm}$  stabil gehalten werden konnte. Allerdings ist die Homogenität über die gesamte Bandbreite noch nicht zufriedenstellend, so dass noch weitere Versuche durchgeführt werden müssen.

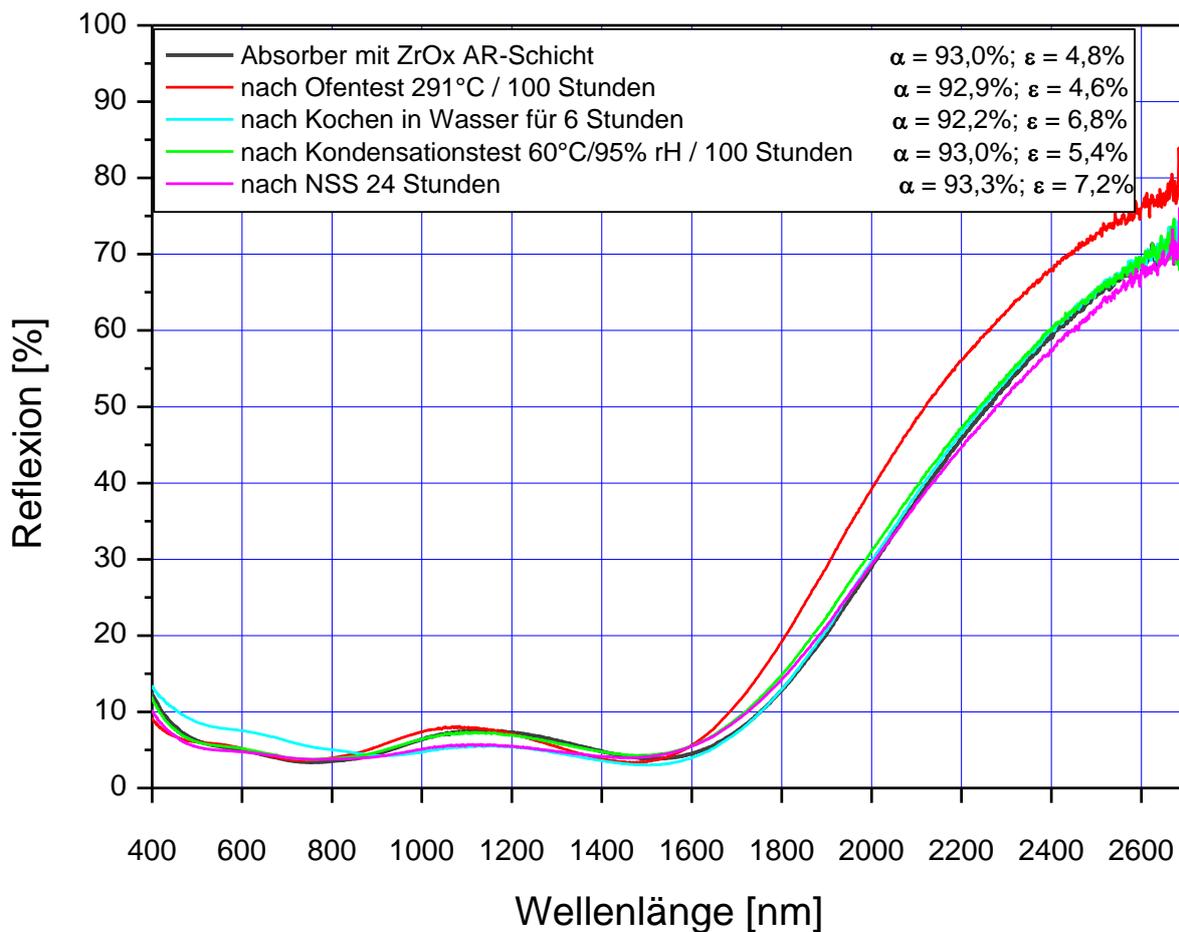
### A3.3 Charakterisierung des neuen Antireflex Schichtsystems

Mit dem Absorberschichtsystem mit ZrOx-Antireflexschicht wurden verschiedene Degradationstest durchgeführt:

- Ofentest bei 291°C für 100 Stunden
- Kochen in Wasser für 6 Stunden
- Kondensationstest bei 60°C/95% r.H. für 100 Stunden
- Salzspraytest (NSS) für 24 Stunden

Aus Grafik 13 erkennt man, dass sich das Reflexionsspektrum nach all diesen Degradationstests nicht signifikant ändert. D. h. das Schichtsystem ist schon auf Aluminiumsubstrat sehr stabil.

Wenn das bestellte Edelstahlblech eingetroffen ist, soll dieses Schichtsystem auch auf Edelstahl abgeschieden werden.



Grafik 13: Absorbersystem auf Aluminiumsubstrat mit ZrOx Antireflexschicht.

## A4 Verarbeitungstests des neuen Edelstahlabsorbers

Erste Verarbeitungstests wie Schweißen und Umformen wurden erfolgreich durchgeführt, siehe dazu Ergebnisse unter A6.1.

Durch Optimierung der Plasmareinigungsparameter konnte die Haftung der Schicht so optimiert werden, dass sich diese sogar im Balg-Formungsprozess nicht ablöst.

## A5 Optimierung des Schichtsystems/Abscheidung

Es wurden Versuche zur Optimierung der Verdampfung des ZrOx mittels Elektronenstrahlverdampfung auf der industriellen Bandbeschichtungsanlage durchgeführt. Dazu wurde ZrOx auf Aluminiumband abgeschieden und die Schichtdicke mittels Ellipsometrie bestimmt. Da ZrOx einen Schmelzpunkt von 2700°C besitzt, muss bei sehr hohen Elektronenstrahlleistungen gearbeitet werden, um das Material zu verdampfen. Das hat aber wiederum zur Folge, dass die Abscheiderate nicht einfach zu regeln ist.

Daher wurden Versuche mit verschiedenen Elektronenstrahlfiguren („Sweep-Figuren“) und verschiedenen Tiegelgeschwindigkeiten durchgeführt, um die Stabilität der Abscheiderate zu optimieren. Letztendlich konnte eine Figur gefunden werden, bei der die Abscheiderate auf  $\pm 5\text{nm}$  stabil gehalten werden konnte. Allerdings ist die Homogenität über die gesamte Bandbreite noch nicht zufriedenstellend, so dass noch weitere Versuche im Anschlussprojekt durchgeführt werden müssen.

## A6 Konstruktion/Fertigung/Charakterisierung Absorberrohre

Aufgrund der auf dem Markt verfügbaren Bauteile konnte vor dem Projekt nur auf Aluminium-Absorberbleche für die Rohrfertigung, Edelstahlmetallbälge und Aluminiumendkappen zurückgegriffen werden. Das Projektziel war alle Bauteile aus Edelstahl zu fertigen. Edelstahl muss verwendet werden, da durch die Bewegungen im Balg anderes Material brüchig werden würde.



Abbildung 1: Materialmix - Absorberkomponenten

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

### ***Aufbau der Schweißanlage***

Zum Projektstart wurde eine Schweißanlage zur Verarbeitung von dünnwandigem Edelstahlblech mit hochselektiver Beschichtung entwickelt.

Die Schweißanlage gliedert sich in der Verarbeitungsrichtung in folgende Teilbereiche:

**Bandeinlauf:**

Hier wird das Band vom Coil in die Schweißanlage eingeführt, gebremst und gereinigt.

**Formstrecke:**

In der Formstrecke wird das Band aus der geraden Blechform schrittweise zur runden Rohrform umgewandelt.

**Schweißeinrichtung:**

In der Schweißeinrichtung wird das zum Rohr geformte Blech verschweißt. Zur besseren Prozesskontrolle ist hier eine Kameraüberwachung angebracht.

**Raupenabzug:**

Zum Antrieb des Prozesses ist nach der Schweißbuchse ein Raupenabzug eingebaut. Dieser zieht das geschweißte Rohr aus der Schweißanlage und führt das Rohr der Sägeeinrichtung zu.

**Sägeeinrichtung:**

Die aus dem Raupenabzug zugeführten Rohre werden im Anschluss durch eine automatische Säge auf ihre spezifische Länge gebracht. Die Säge fährt hier mit dem Rohr mit und trennt es mitlaufend ab.

### ***Versuche mit diversen Einformstrategien***

Zu Anfang zeigten sich große Probleme in der Einformeinrichtung der Schweißanlage. Bedingt durch die auf dem Blech zum Schutz aufgebrachte Folierung kam es immer wieder zu statischen Aufladungen welche den Schweißprozess negativ beeinflussten. Hier wurde als Ergebnis verschiedener Tests und Untersuchungen mit diversen Erdungseinrichtungen Abhilfe geschaffen.

### ***Schweißversuche mit WIG***

Als erstes Schweißverfahren wurde Wolfram-Inertgasschweißen eingesetzt. Hier stellten sich aber nach kurzer Zeit die ersten Probleme ein. Bedingt durch die hochselektive Beschichtung kommt es während des Schweißprozesses zu Verdampfungen bzw. Verbrennungen dieser Schicht. Die gasförmigen Bestandteile der Schicht schlagen sich dann auf der Wolframelektrode nieder.



Abbildung 2: WIG- Schweißbrenner

Dieser Niederschlag führt zu Schweißfehlern - wie auf dem folgenden Bild (Abbildung 3) zu sehen. Es lassen sich hier Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht erkennen.



Abbildung 3: Schweißfehler am Absorberrohr

### ***Versuche mit verschiedenen Bandkonfigurationen***

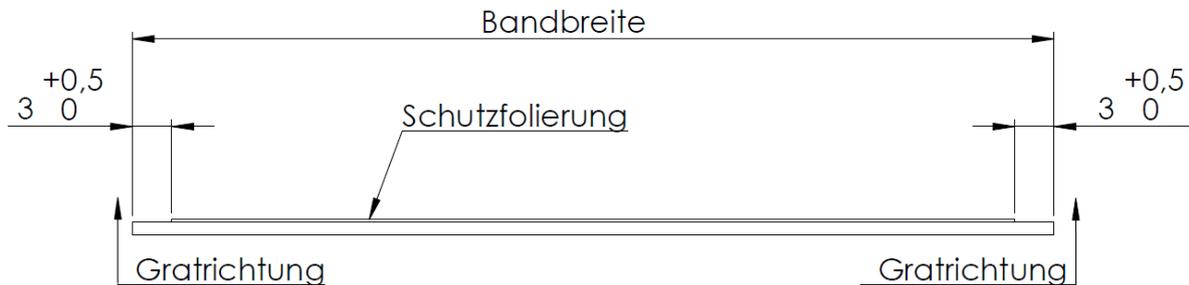
#### **Einfluss des Schneidgrads auf die Schweißergebnisse**

Bedingt durch den Spaltprozess des beschichteten Coils kam es zu verschiedenen Konfigurationen der Schnittkanten.

- Beidseitig von der Beschichtung zum Blech
- Beidseitig vom Blech zur Beschichtung
- Einseitig vom Blech zur Beschichtung, andersseitig von der Beschichtung zum Blech

Nach diversen Tests dieser Konfigurationen stellte sich die Variante mit beidseitigen Schichtkanten vom Blech zur Beschichtung als störunanfälligste heraus.

Auf nachfolgendem Bild (Abbildung 4) ist die Gratausrichtung schematisch dargestellt.



**Abbildung 4. Gratausrichtung Absorberblech**

## **Balgumformung**

### **Umformtests**

Um die Umformtests durchzuführen wurde ein mechanisches Expanderwerkzeug entwickelt, konstruiert und gefertigt. Mit diesem Werkzeug konnte schnell und zeitnah die Umformbarkeit des Metallrohrs mit Beschichtung verifiziert werden.

Die Umformversuche wurden mit diversen Rohren durchgeführt und die Dichtheit mit einem Heliumlecktestgerät überprüft. Hier wurden keine Unregelmäßigkeiten festgestellt.

Die mechanische Belastbarkeit ist noch durch Bewegungssimulationen zu testen.

### **Zusammenfassung und Ausblick A6.1**

Zusammenfassend ist zu sagen dass die Schweißergebnisse, der richtigen Eiformgeometrie und dem richtigen Schneidgradverlauf zufriedenstellend ausfallen. Der Produktionsausschuss konnte unter 10% reduziert werden. Die Vakuumdichtigkeit wurde an diversen Proben mittels eines Heliumleckagetesters bestätigt.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten bestehen in folgenden Punkten:

- Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit
- Verbesserung der Rohrgeradheit durch optimierte Richtrollensätze
- Verminderung der Schweißnahtüberhöhung
- Implementierung der fliegenden Säge zur weiteren Senkung der Prozesskosten

## **A6.2 Konstruktionsarbeiten**

Durch den Einsatz der neuen Materialien müssen Bauteile umkonstruiert werden und die Fertigungsschritte für eine hochskalierbare Fertigung angepasst und getestet werden.

### ***Glasrohr***

Das Glasrohr besteht weiterhin aus Borosilikatglas 3.3. Diese Glassorte ist besonders witterungsbeständig und besitzt einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizient. Der Außendurchmesser der Glasrohr wurde von  $AD = 70$  mm auf  $AD = 90$  mm erhöht. Die Wandstärke wurde im gleichen Schritt von 2,2 mm auf 2,5 mm erhöht. Dies ermöglicht eine höhere Hagelschlagsicherheit.

Für die thermische Weiterverarbeitung der Glasrohre hinsichtlich der Herstellung des Glasmittelverbundes (GMV, Verbindungselement zwischen Glas- und Absorberrohr) wurden verschiedene Glasrohrendbearbeitungen getestet. Hier lag das Ziel auf die Reduzierung der inneren Glasspannungen, welche in der Herstellung und Weiterverarbeitung der rohen Glasrohre entstehen.

### ***Absorberrohranbindung an Kollektorgehäuse***

Beim Kunden erfolgt vorort die Endmontage des Kollektorfeldes. Zuerst werden die Kollektorgehäuse und Röhrenverbinder mit dem Kollektoruntergestell verschraubt. Danach werden die einzelnen Röhren mit Hilfe der Röhrenadapter installiert, siehe Abbildung 5. Durch den größeren Glasrohrdurchmesser musste die Anbindung an das Kollektorgehäuse-Aluprofil komplett überarbeitet werden. Ein wichtiges Ziel war auch hier eine kostengünstige Lösung zu finden, damit eine sichere und einfache hochskalierbare Produktion in Zukunft möglich ist.

### **Konstruktive Punkte**

- Witterungsbeständige Abdichtung zwischen Kollektorgehäuseprofil und Absorberröhre
- Lasteintragung von Schneelasten
- Einfach und schnelle Montage auch durch ungeschulte Personen
- Wechselmöglichkeit von einzelnen Röhren im Inneren des Kollektorfeldes
- Ein- und Ausbau von beiden Seiten der Absorberröhre
- Dämpfung von Hagelschlägen
- Individuelle Farbgebung
- Freie Drehbarkeit der Röhre auch nach der Montage, damit der Spiegel optimal zur Sonne hin ausgerichtet werden kann. Diese Freiheit in der Ausrichtung ermöglicht auch eine ideale Einstellung der Kollektoren in einer Gebäudefassade.
- Vertikale und waagerechte Anordnung der Absorberröhren
- Freier Montagewinkel der Kollektoren: Flachdach, Fassade, Schrägdach
- Keine Verwendung von Silikon in der Herstellung und als Bauteil

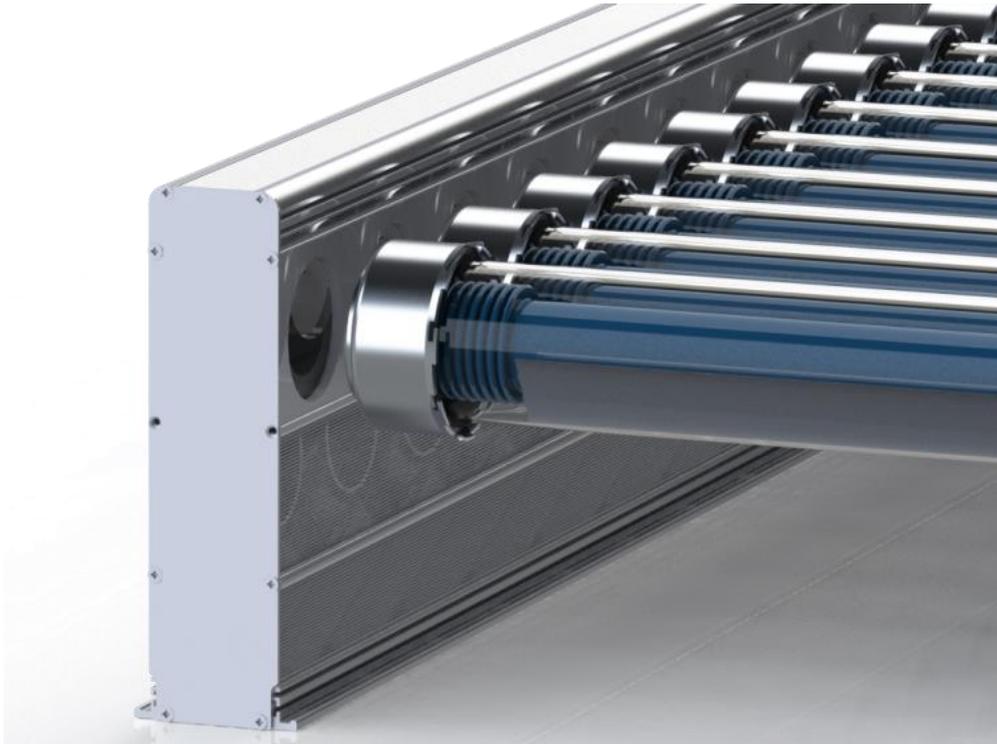


Abbildung 5: Röhrenverbinder mit neuen Adaptern

### ***Unterschiede zwischen evakuierter und offener Absorberröhrenkonstruktion***

Der konstruktive Hauptunterschied besteht in der Ausführung der Glas-Metall-Verbindung. Der Vakuumgetter wird auch nicht benötigt. Der innere Spiegel kann entfallen. In wie weit eine Füllung mit einem Trocknungsmittel notwendig und sinnvoll ist, ist in weiteren Tests zu überprüfen. Der Einfluss von Kondensatbildung im Röhreninneren durch hohe Luftfeuchten ist zu untersuchen.

### ***GMV (Glas-Metall-Verbund)***

Der GMV ist ein filigranes Tiefziehbauteil. Das ehemals verwendete Fräsbauteil war bezüglich Herstellungskosten und Langlebigkeit für eine Großserie nicht geeignet. Auch konnten damit nicht die notwendigen komplexen und feinen Formen erstellt werden. In diesem Projekt fand eine komplette Neuentwicklung des GMV-Bauteils statt.

### **Konstruktive Punkte**

- Anpassung und Festlegung von neuen Herstellungstoleranzen bezgl. Tiefziehtaughkeit
- Berechnungen der maximalen Umformungsmöglichkeiten
- Gegenseitige Toleranzanpassung zum Glasrohr und den Enden des Absorberröhres
- Maximale thermische Entkopplung
- Flexibilität durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten
- Optimale Vorbereitung für eine metallische und vakuumdichte Verbindung zwischen Absorberröhrenden und Glasrohr

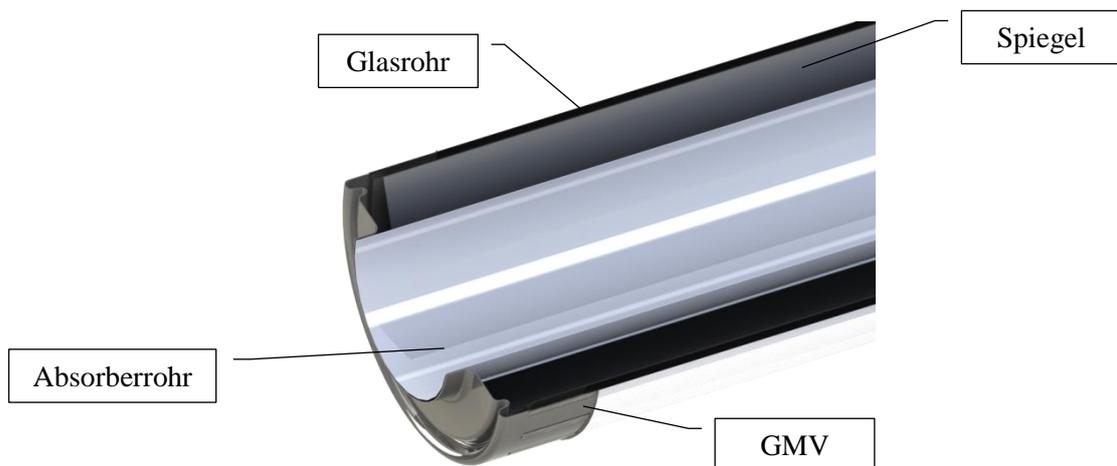


Abbildung 6: GMV mit Glasrohr, Spiegel und Absorberrohr

### Verschiedene konstruktive Lösungsansätze

Es wurden verschiedene Geometrien mit unterschiedlichen Verbindungstechniken konstruktiv im Detail untersucht und simuliert. Für eine Entscheidung wurden Bauteilmerkmale wie z.B. Herstellkosten, Bauteilstabilität betrachtet.

Die Position des Vakuumpumpstutzen wurde fixiert und in die Tiefziehfertigung mit integriert. Der Stutzen wird auch metallisch und vakuumdicht mit dem GMV verbunden.

Eine Optimierung der verschiedenen Bauformen wurde mit Hilfe von Simulationen auf Festigkeit, Verformung, Kräfteinwirkungen etc. hin realisiert, siehe Abbildung 7. Durch Simulationen konnten verschiedene Materialien vorausgewählt werden.

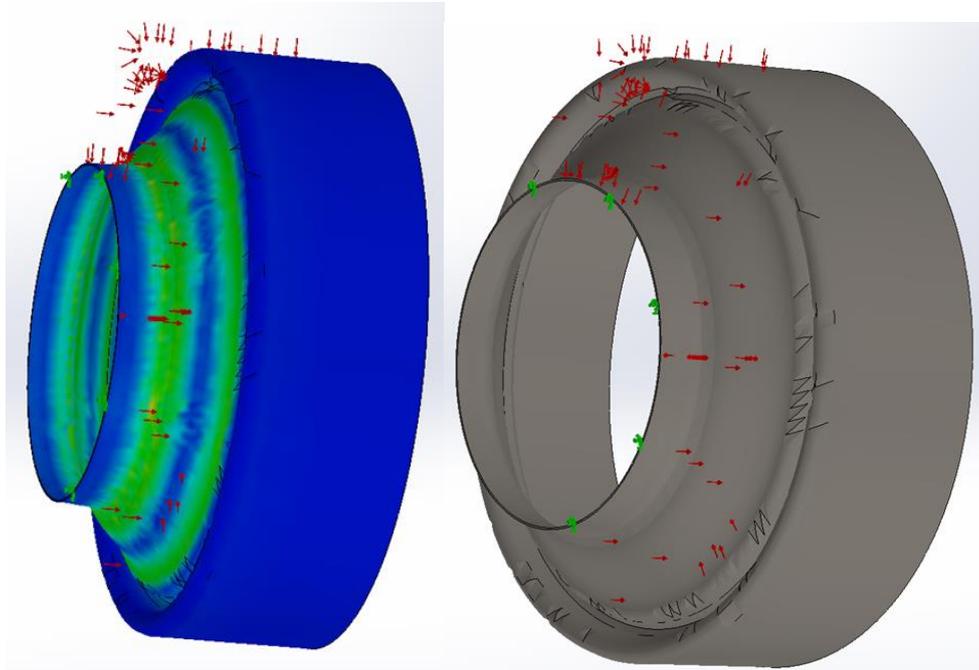
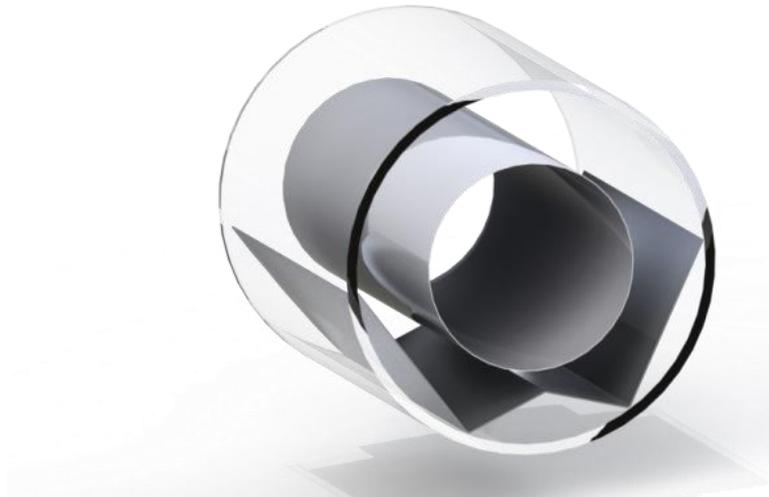


Abbildung 7: Drucksimulationen mit dem GMV

#### Offene Punkte für einen weiteren Projektverlauf

- Materialauswahl verschiedener Edelstähle und Ausdehnungslegierungen
- Beauftragung von Werkzeugen für Tiefziehprototypen
- Einfluss der Materialarten im Tiefziehprozess => Prozesskosten?
- Aufbau eines Glas-Metall-Verbindungsteststand zum Testen verschiedener Verbindungstechniken. Es sollen verschiedene energiesparende Lösungen verglichen werden, z.B. mit Induktionsheizer.
- Aufbau einer Schweißtestapparatur und Kalibriereinrichtung für die Glas-Metallverbinder und der Absorberrohrenden-Schweißungen

## ***Innenliegender Spiegel***



**Abbildung 8: Innenliegender Alu-Blechspiegel**



**Abbildung 9: Halbspiegel aufgedampft auf Glasinnenrohrseite**

Für den inneren Spiegel gibt es 2 Lösungsansätze. Es gibt die Möglichkeit einen umgeformten Alu-Reflektorspiegel einzusetzen oder einen aufgedampften Aluminiumspiegel zu realisieren. Erste Verarbeitungsergebnisse zeigten, dass beide Varianten herstellbar sind, jedoch konnten aus Zeitgründen noch keine weiteren und auch sehr notwendigen Tests damit durchgeführt werden.

Folgende Unterschiede müssen in einem weiteren Projektverlauf detailliert betrachtet werden:

- Herstellungskosten: Blech-Umformspiegel vs. PVD-Spiegel
- Fixierung des Blechspiegels
- Temperaturstabilität für Produktionsschritte und im Betrieb
- Optische Werte
- Optisches Aussehen für Fassadenanwendung von der Rückseite

- Raytracing und Optimierung der Spiegelform für verschiedene Einsatzgebiete wie z.B. Receiver für kleine konzentrierende Parabolrinnen-Kollektorsysteme
- Einfluss der Spiegel auf den Produktionsprozess z.B. der Vakuumherstellung mit Röhrenausheizen über 300 °C
- Mögliche thermische Verluste über den umgeformten Spiegel, da hier der Abstand im unteren Bereich geringer ist als bei anderen Bauteile.

### Spiegel-Prototypen

Erste Alu-Blechspiegel wurden hergestellt. Die Umformung des Spiegelbleches ist ohne erkennbare Kratzer oder anderen Beschädigungen möglich. Hierfür wird die angebrachte Schutzfolie verwendet. Die Geometrie ist frei wählbar und nur vom eingesetzten Maschinenpark abhängig. Reflektionen, welche um den Absorber herum (zwischen Absorber und Spiegel) wieder nach Außen verlaufen, können zum Großteil vermieden werden.

In Abbildung 10 ist ein erstes Muster von einem PVD-Spiegel dargestellt. Ein Glasrohr mit  $AD = 90$  mm wurde am Ende mit einer halbrunden Schablone versehen und ein Alu-Spiegel aufgedampft.

Das Verfahren zeigt, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Röhre halbrund zu beschichten. Optische oder mechanische Tests wurden an der Schicht in diesem Projektabschnitt nicht durchgeführt.

Eine genaue Beurteilung ist erst nach Bau einer Prototypen-Beschichtungsanlage möglich. Die saubere Trennung zwischen Spiegel und nicht beschichteter Glasröhre könnte auch im Bereich Fassaden akzeptiert werden.



Abbildung 10: PVD-Beschichtungstest an einem kurzen Glasrohr 300 mm

## A7 Charakterisierungen am SPF

### **Berechnung der Stillstandstemperatur des Solarluftkollektors mit und ohne Luft im Ringspalt**

Die Berechnungen erfolgten mit einem Code des SPF, der für verschiedene Berechnungen zu Parabolrinnenkollektoren entwickelt wurde. Die Geometrie wurde durch die nachfolgende Grafik vorgegeben. Die tatsächliche Wandstärke des Absorberrohres wird nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Temperatur überall auf dem Umfang des Absorberrohres gleich ist (was bei dickwandigen und durchströmten Rohren ausreichend gut erfüllt ist).

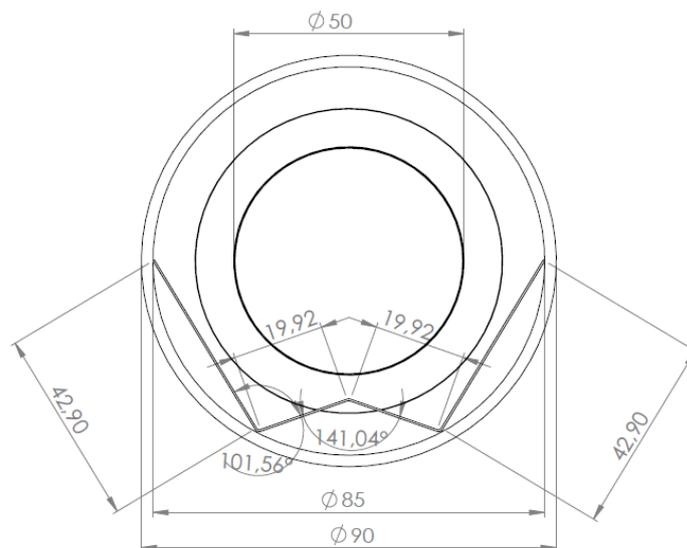


Abbildung 11: Skizze von Alu-Blech-Spiegel

### Verwendete Daten

Aussendurchmesser Absorberrohr	50	mm
Innendurchmesser Receiverglasrohr	85	mm
epsilon_Absorber	0.07	
alpha_Absorber	0.95	
Transmissionsgrad Receiverglasrohr	0.966	
Absorptionsgrad Receiverglasrohr	0.0152	
IR-Emissionsgrad Receiverglasrohr	0.88	
Globalstrahlung	1000	W m <sup>-2</sup>
T_amb	30	°C

## Ergebnisse

Stillstandstemperatur nicht evakuiert (NREL)	206	°C
Stillstandstemperatur nicht evakuiert (Tabor)	199	°C
Stillstandstemperatur nicht evakuiert (Müller)	213	°C
Stillstandstemperatur evakuiert	392	°C

Anmerkungen zu den Ergebnissen:

1. Die berechneten Stillstandstemperaturen mit nicht-evakuiertem Ringspalt sind plausibel: Die Stillstandstemperaturen sind etwas niedriger als für einen selektiven Flachkollektor. Die Rückseite eines Flachkollektors ist durch die Wärmedämmung etwas besser gedämmt als der Röhrenkollektor mit Luft im Ringspalt. Daher die etwas niedrigeren Stillstandstemperaturen für den nicht evakuierten Röhrenkollektor.
2. Die berechneten Stillstandstemperaturen mit evakuiertem Ringspalt sind ebenfalls plausibel. Sie sind für einen guten Vakuumröhrenkollektor zu erwarten und von guten Flüssigkeits-führenden Vakuumröhrenkollektoren bekannt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass dabei von homogener Temperaturverteilung über den Umfang des Absorberrohres ausgegangen wird. Wegen der sehr geringen Wandstärke des Absorberrohres ist zu vermuten, dass auf der oberen Absorberseite, die der Sonne zugewandt ist, lokal etwas höhere Temperaturen auftreten werden, wodurch etwas höhere Wärmeverluste erwartet werden müssen.

### ***Ergebnisse der vom SPF in Phase 1 durchgeführten Alterungsuntersuchungen an der Absorberschicht entsprechend der Task X Testprozedur***

Die Beständigkeit der Schicht wurde nach ISO 22975-3, part 1 auf deren Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen in Luft untersucht, also nicht unter Vakuumbedingungen. Nach einer Testzeit von 600h bei 298°C erweist sich die Schicht sowohl in den Absorptions- als auch in den Emissionswerten als sehr stabil. Die Absorberschicht ist nach den Regeln des ISO 22975-3 bezüglich ihrer thermischen Beständigkeit für den Einsatz in Flachkollektoren qualifiziert.

Veränderung der optischen Eigenschaften aufgrund thermischer Belastung bei 298°C nach unterschiedlichen Zeiten:

	$\alpha_{as\ received}$	$\alpha_{tempered}$	$\alpha_{18h}$	$\alpha_{36h}$	$\alpha_{75h}$	$\alpha_{150h}$	$\alpha_{300h}$	$\alpha_{600h}$
<b>Sample 1</b>	0.959	0.96	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957
<b>Sample 2</b>	0.96	0.959	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957
<b>Sample 3</b>	0.96	0.96	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957	0.957
	$\epsilon_{as\ received}$	$\epsilon_{tempered}$	$\epsilon_{18h}$	$\epsilon_{36h}$	$\epsilon_{75h}$	$\epsilon_{150h}$	$\epsilon_{300h}$	$\epsilon_{600h}$
<b>Sample 1</b>	0.044	0.048	0.041	0.035	0.043	0.04	0.041	0.039
<b>Sample 2</b>	0.046	0.038	0.04	0.043	0.041	0.04	0.039	0.041
<b>Sample 3</b>	0.043	0.046	0.04	0.04	0.043	0.039	0.04	0.04

Diese Ergebnisse sind nachfolgend auch graphisch dargestellt:

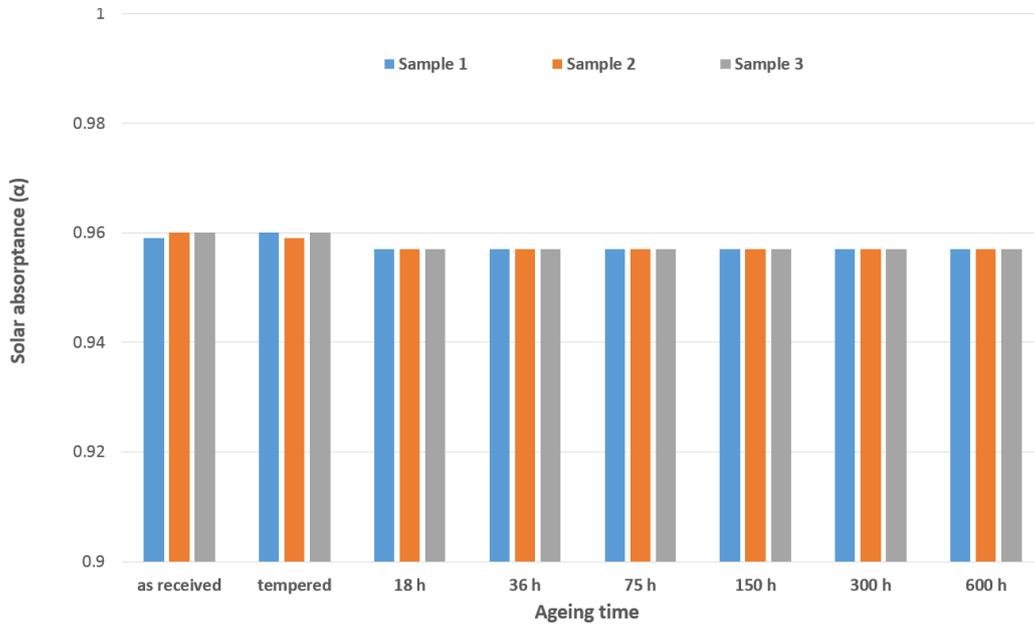


Abbildung 12: Veränderung des solaren Absorptionsgrades während des thermischen Belastungstests entsprechend ISO 22975-3, part 1.

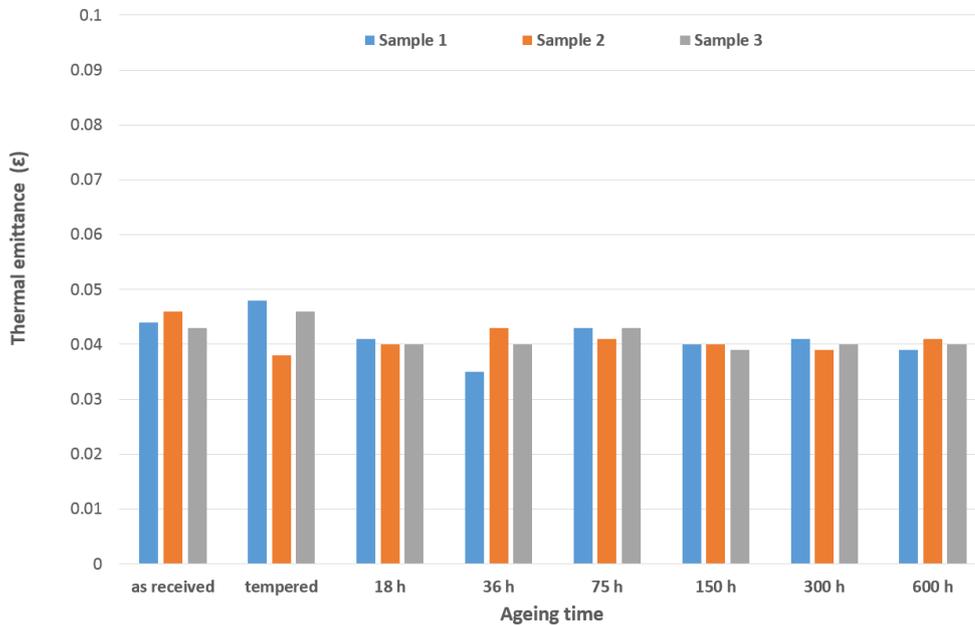


Abbildung 13: Veränderung des Emissionsgrades während des thermischen Belastungstests entsprechend ISO 22975-3, part 1

## Fazit

Die erreichten Projektziele zeigen generell, dass der Ansatz für eine neue Absorberröhre mit einem dünnwandigen Edelstahlabsorberrohr technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist.

Durch die gute Projektzusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konnten neue sehr innovative Ideen schnell und effizient verwirklicht werden. Die ersten Kurzzeittests zeigen, dass schon die Prototypen, einzeln betrachtet, einen stabilen und effizienten Einsatz in Zukunft auch in anderen Produkten ermöglichen können.

Mit den hier erreichten Erfahrungen ist noch kein fertiges Produkt entstanden. Weitere folgende Arbeitsschritte sind dafür notwendig:

- Optimierung der optischen Eigenschaften der Absorberschicht
- Kostenreduzierung der Absorberschicht
- Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit => Kostenreduzierung
- Reduzierung von Schweißfehlern bei der Rohrherstellung
- Kratzerfreie Herstellung der Absorberrohre
- Optimierung der Balgumformung => Kostenreduzierung
- Aufbau einer Testanlage für PVD-Spiegel Innenbeschichtung
- Formauslegung der Alu-Blechspiegel abgestimmt auf die Einsatzgebiete
- Antireflexbeschichtung der Glasrohre innen und außen zur Leistungssteigerung
- Glas-Metallverbindung: Tests von Materialkombinationen, Erprobung neuer Fügetechniken

An den einzelnen Bauteilen und dem Kollektorverbund müssen Langzeitmaterial- und Leistungstests durchgeführt werden.

Mit diesen innovativen Merkmalen können verschiedene Kollektorarten wie Luftkollektoren aber auch kleine Parabolrinnenkollektoren in Zukunft optimal für eine solare Energieerzeugung in vielen Marktsegmenten eingesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- [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.