

*KOMPETENZZENTRUM SOLARTECHNIK
an der Fachhochschule Ingolstadt*

**Optimierter Absorber für thermische Solaranlagen
in Bezug auf Fertigungsprozess, Herstellkosten
und Wirkungsgrad.**

Vorstudie zu Absorberkonzepten

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 21543 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Zörner
und
Dipl.-Ing. (FH) Franz-Dominik Treikauskas

Januar 2005

Impressum

- Titel:** Optimierter Absorber für thermische Solaranlagen in Bezug auf Fertigungsprozess, Herstellkosten und Wirkungsgrad. Vorstudie zu Absorberkonzepten.
- Herausgeber:** Fachhochschule Ingolstadt
Kompetenzzentrum Solartechnik
Esplanade 10
85049 Ingolstadt
Tel. 08 41 / 93 48 – 2 27, Fax 08 41 / 93 48 99 – 2 27
E-Mail: zoerner@fh-ingolstadt.de
- Autoren:** Wilfried Zörner, Franz-Dominik Treikauskas

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	21543	Referat	24/2	Fördersumme	57.679,00 €
Antragstitel		Optimierter Absorber für thermische Solaranlagen in Bezug auf Fertigungsprozess, Herstellkosten und Wirkungsgrad. Erarbeitung einer Vorstudie mit umsetzbaren Absorberkonzepten			
Stichworte		regenerativ, Solarthermie			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
15 Monate		01.08.2003		31.10.2004	
Zwischenbericht		02.08.2004			
Bewilligungsempfänger		Thermo Solar AG		Tel 08 71 / 27 41 03	
				Fax 08 71 / 27 41 04	
		Regierungsplatz 539		Projektleitung	
		84028 Landshut		Johann Kollmannsberger	
				Bearbeiter	
				Barbara Englisch	
Kooperationspartner		<i>KOMPETENZZENTRUM SOLARTECHNIK</i> an der Fachhochschule Ingolstadt Esplanade 10 / 85049 Ingolstadt			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Die hohe Nachfrage im Jahre 2001 führte bei Solarkollektor- als auch Absorberherstellern zu hohen Produktionskapazitäten, wobei sich zeigte, dass weder die aktuellen Absorbertechnologien noch deren Herstellprozesse den hohen Absatzraten bei bestehenden Qualitätsansprüchen gerecht werden können. Im Vergleich zu früheren Jahren hatte dies negative Auswirkungen auf Kosten und Zeiten für Qualitätskontrolle sowie Nacharbeit. Grundsätzlich ist bei bestehenden Systemen in Bezug auf den Absorber folgendes festzustellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Absorber trägt nahezu die Hälfte zu den Herstellkosten des Kollektors bei. • Die bestehenden Absorber-Herstellprozesse sind im Hinblick auf steigende Ausbringung nicht ausgereift. • Die bei Stillstand auftretenden hohen Temperaturen verursachen noch bei der Mehrzahl der Verbindungstechniken Probleme zwischen Absorberblech und Rohrleitungen. <p>Ziel dieses Vorhabens war daher die Entwicklung von neuen Konzepten für den Absorber von Solarkollektoren. Diese sollen jedoch vom momentan verwendeten Standardprinzip Blech/Rohr abweichen und durch andere, stabilere Fertigungsverfahren herstellbar sein. Gleichzeitig dazu sind die Herstellkosten zu reduzieren, um eine stärkere Verbreitung zu ermöglichen. Der Wirkungsgrad ist ebenfalls ein wichtiger Schwerpunkt in der Entwicklung der Absorberkonzepte und soll sich mindestens im Bereich derzeitiger Absorber bewegen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Zu Beginn des Projektes wurde eine Marktanalyse durchgeführt, um die Eigenschaften an einen Solarabsorber neu definieren zu können. Im nächsten Schritt wurde diese Analyse ergänzt durch die Untersuchung von alten Absorberbauformen aus den 70er und 80er Jahren. Dies diente zur Gewinnung von Informationen hinsichtlich Absorberprinzipien und Konstruktionsvarianten sowie des Betriebsverhaltens. Abschließend erfolgten eine Recherche zum aktuellen Forschungsstand im Bereich Kollektor / Absorberkonstruktionen und die Ausarbeitung einer Anforderungsliste an die Absorberentwicklung.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Basierend darauf wurde die Abstraktion des Absorbers durchgeführt, d.h. eine Analyse hinsichtlich Wärmeauskopplung, Wärmetransport, mechanischer Festigkeit sowie optischen Eigenschaften. In der Phase der Ideenfindung wurden Konzepte auf der Grundlage der zuvor erstellten Funktionsstruktur erarbeitet und in der Konzeptskizzierung detailliert erweitert. Parallel dazu erfolgte eine Vorberechnung der Konzepte zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit sowie eine Kostenanalyse. Die abschließende Bewertung der Konzepte ergab eine Vorauswahl von umsetzbaren Absorbern mit Verbesserungen in Bezug auf Fertigungstechnik, Herstellkosten sowie im Wirkungsgradverhalten.

Ergebnisse und Diskussion

Die Recherchen und Untersuchungen zeigen, dass heutige Blech-Rohr-Absorber Schwächen in den Bereichen Fertigungstechnik, Herstellungskosten sowie den strömungstechnischen und thermodynamischen Eigenschaften besitzen.

Fertigungstechnische Verbesserungen der letzten Jahre liegen bei diesen Bauformen vor allem in der Verbindungstechnik zwischen dem Blech und dem Rohr. Die gängigen Verbindungsverfahren sind vor allem das Löten, Ultraschallschweißen sowie Laserschweißen. Eine Untersuchung der Nahtstellen unter dem REM bzw. dem Stereomikroskop zeigte zwar bei einer wellengelöteten Verbindung eine großflächige und nahezu homogene Verbindung. Die Probleme liegen hier allerdings im Ausgasen von Flußmittel und der geringen Beständigkeit bei hohen Stillstandstemperaturen. Ultraschallgeschweißte sowie lasergeschweißte Blech-Rohr-Absorber benötigen einen hohen Aufwand zur Ermittlung stabiler Prozessparameter und besitzen nur eine sehr schmale Nahtstelle jedoch eine stoffschlüssige Verbindung. Die Untersuchung der lasergeschweißten Aluminiumbleche und Kupferrohre zeigt darüber hinaus, dass in den harten intermetallischen Phasen Mikrorisse auftreten, die zu einer Ablösung der Rohrleitungen vom Absorberblech führen können.

Die Analyse der Herstellungskosten heutiger Blech-Rohr-Absorber zeigt, dass die Produktionskosten im Falle der aufwändigen ultraschall- bzw. lasergeschweißten Absorber hoch liegen. Darüber hinaus entstehen hohe Materialkosten durch die Verwendung von Kupfer für die Wärmeträgerrohre und im Falle des Ultraschallschweißens auch der Kupferbleche.

Ein Vergleich alter, teilweise volumetrisch durchströmter Bauformen mit heutigen Bauformen zeigte, dass volumetrische, also vollflächig durchströmte Absorber bei gleichmäßiger Durchströmung die Energie schneller abführen als Blech-Rohr-Bauformen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen führten daher zur Entwicklung und Bewertung verschiedener Konzepte volumetrisch durchströmter Absorber. Diese Konzepte basieren auf unterschiedlichen Werkstoffen, Sammel- und Verteilsystemen sowie verschiedenen Matrixmaterialien zwischen den Deckblechen. Zur Bewertung dieser wurden u. a. Vorberechnungen zu Druckverlust und Absorberwirkungsgrad durchgeführt.

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden bereits im frühen Stadium die Herstellkosten grob ermittelt. Für weitere Untersuchungen ist es nun wichtig, diese Konzepte hinsichtlich ihres Strömungsverhaltens, also der Gleichmäßigkeit über dem Absorbervolumen sowie bezüglich eines geringen Druckverlustes zu optimieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Ergebnisse und Informationen werden im Rahmen von Symposien veröffentlicht, so dass eine Diskussion mit Fachleuten und interessierten Personen stattfinden kann. Darüber hinaus sind Artikel in Fachzeitschriften geplant.

Fazit

Im Rahmen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass bereits früher verschiedenste Absorberbauformen, im Speziellen auch volumetrisch durchströmte Varianten, erfolgreich eingesetzt wurden ohne deren Lebensdauer zu beeinträchtigen.

Darüber hinaus brachten Untersuchungen heutiger Verbindungstechniken zwischen Blech und Rohr diverse Schwächen hervor.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden in der Konzeptphase verschiedene volumetrische Absorberkonzepte entwickelt, wobei auf stabile und günstige Fertigungsprozesse sowie strömungs- und thermodynamische Verbesserungen geachtet wurde.

Die abschließende Bewertung der Konzepte, sowohl in technischer als auch aus wirtschaftlicher Hinsicht, spiegelt die aussichtsreichsten Konzepte wieder, die in einem weiteren Projekt optimiert und in Versuchen getestet werden sollen.

Inhaltsverzeichnis

<i>Projektkennblatt</i>	<i>III</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>V</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>VI</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>VIII</i>
<i>Formeln und Definitionen</i>	<i>IX</i>
<i>Zusammenfassung</i>	<i>X</i>
1 Einleitung	11
2 Umfeld	12
2.1 Anwendungsgebiete von Kollektoren.....	12
2.2 Marktpreise und Kosten von thermischen Solarkollektoren in Deutschland	13
2.3 Technischer Aufbau der Kollektor-Absorber	15
3 Absorberbauformen der Vergangenheit	17
3.1 Übersicht früherer Bauformen.....	17
3.2 Untersuchung von Altkollektoren	20
4 Ist- bzw. Forschungsstand	28
4.1 Entwicklungsstand Absorbertechnik.....	28
4.2 Übersicht marktüblicher Verbindungstechniken	28
4.3 Schwächen der Blech-Rohr-Verbindung	28
4.4 Untersuchung gängiger Verbindungstechniken.....	31
5 Absorber-Konzeptentwicklung	35
5.1 Definition der Anforderungen an den Absorber	35
5.2 Funktionsanalyse.....	35
5.3 Ideenfindung und Lösungssuche.....	36
5.4 Skizzierung von Konzepten	37
5.5 Auslegungsberechnung der Konzepte	43
5.6 Kostenanalyse.....	48
5.7 Bewertung der Konzepte.....	50
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	53
7 Literaturverzeichnis	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendung von thermischen Niedertemperatur-Kollektoren.....	12
Abbildung 2: Niedertemperatur-Kollektortypen	12
Abbildung 3: Netto-Marktpreise thermischer Flachkollektoren je m ² Absorberfläche	13
Abbildung 4: Prozess-orientierte Kollektor-Kostenstruktur.....	14
Abbildung 5: Strukturierung der Kollektor-Selbstkosten.....	14
Abbildung 6: Aufteilung der Kollektor-Herstellkosten	14
Abbildung 7: Kollektorgehäuse mit aluminiumkaschierter Wärmedämmung (<i>BBC Solektor</i>).....	21
Abbildung 8: Vorlaufanschlussbereich eines Roll-Bond Absorbers (<i>BBC Solektor</i>)	21
Abbildung 9: Leistungskurven für den <i>BBC Solektor</i>	22
Abbildung 10: Faserverstärkte transparente Abdeckung nach 23 Betriebsjahren (<i>Bittner-Kollektor</i>).....	23
Abbildung 11: Polyesterfolie als Konvektionsbremse nach 25 Betriebsjahren (<i>Stiebel Eltron-Kollektor</i>)	23
Abbildung 12: Risse und Ablösungen der Maxorb-Folie auf einem <i>ThermoSolar</i> HVL20-Absorber	23
Abbildung 13: Thermisches Verhalten gelöteter Blech-Rohr-Absorber (<i>Selbstbau</i>).....	24
Abbildung 14: Thermisches Verhalten verpresster Blech-Rohr-Absorber (<i>ThermoSolar</i>)	24
Abbildung 15: Thermisches Verhalten gelöteter Blech-Rohr-Absorber (<i>Böhm</i>).....	25
Abbildung 16: Thermisches Verhalten ultraschallgeschweißter Blech-Rohr-Absorber (<i>Wolf</i>)	25
Abbildung 17: Thermisches Verhalten rollnahtgeschweißter Blech-Rohr-Absorber (<i>Bittner</i>)	25
Abbildung 18: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (<i>Walo</i>).....	25
Abbildung 19: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (<i>BBC Solektor</i> , 2 l/min).....	26
Abbildung 20: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (<i>BBC Solektor</i> , 4 l/min).....	26
Abbildung 21: Undicht gewordener punktgeschweißter Stahlblechabsorber (<i>Stiebel Eltron SOL 20</i>)	27
Abbildung 22: Thermisches Ersatzschaltbild Absorber	30
Abbildung 23: Temperaturverteilung Absorber.....	30
Abbildung 24: Schlibbild einer punktgeschweißten Verbindung (<i>Stiebel Eltron</i> ; 30fache Vergrößerung)	32
Abbildung 25: Schlibbild wellengelöteter Absorber (19fache Vergrößerung).....	32
Abbildung 26: Schlibbild ofengelöteter Absorber (39fache Vergrößerung).....	32
Abbildung 27: Schlibbild ultraschallgeschweißte Verbindung (130fache Vergrößerung)	33
Abbildung 28: Schlibbild lasergeschweißte Verbindung (16fache Vergrößerung).....	33
Abbildung 29: Laserschweißpunkt – Schlibbild senkrecht zur Rohrachse (118fache Vergrößerung)	33
Abbildung 30: Laserschweißpunkte – Schlibbild längs zu Rohrachse (127fache Vergrößerung)	34
Abbildung 31: Mikrorisse in Laserschweißpunkt – Schlibbild senkrecht zu Rohrachse (1060fache Vergrößerung)	34
Abbildung 32: Schlibbild plasmageschweißte Verbindung (108fache Vergrößerung)	34
Abbildung 33: Funktionsstruktur thermischer Absorber	35
Abbildung 34: Übersicht prinzipiell einsetzbarer Absorbermaterialien	36
Abbildung 35: Übersicht möglicher prinzipieller Absorberbauformen	37
Abbildung 36: Kunststoffabsorber mit Strömungsleitern	37
Abbildung 37: Kunststoffabsorber mit Gewebeeinlage	37
Abbildung 38: Absorber aus Blechprofilen	38
Abbildung 39: Absorber mit hydrogeformten Drallrohren	38
Abbildung 40: Absorber aufgebaut aus Lamellen mit eingepressten Wellen.....	38

Abbildung 41: Mäanderabsorber mit eingepressten Kanälen	39
Abbildung 42: Absorber mit hydrogeformten Rohrelementen	39
Abbildung 43: Abgesetzter Aluminiumschaumabsorber.....	39
Abbildung 44: Schaumabsorber mit Einströmvorrichtung	39
Abbildung 45: Schaumabsorber mit gesteckter Verteil- bzw. Sammlervorrichtung	40
Abbildung 46: Absorber geclincht.....	40
Abbildung 47: Roll-Bond Absorber	40
Abbildung 48: Noppenblech-Absorber mit Eckeinström- bzw. Ausströmöffnung.....	41
Abbildung 49: Wellblech-Absorber mit vordefinierten Strömungswegen und großflächiger Durchströmung	41
Abbildung 50: Roll-Bond-Absorber mit großflächig durchströmten Wärmeträgerkanälen	42
Abbildung 51: Absorber mit Schaummatrix	42
Abbildung 52: Abhängigkeit des Absorberwirkungsgradfaktors von verschiedenen Parametern	44
Abbildung 53: Übersicht verschiedener Absorbertypen und deren Absorberwirkungsgradfaktoren	45
Abbildung 54: Volumetrischer Rechteckkanalabsorber.....	45
Abbildung 55: Absorberwirkungsgradfaktor für einfache volumetrische Absorber (Rechteckkanal)	46
Abbildung 56: Druckverlustkurve für einen typischen Mäanderabsorber (<i>ThermoSolar 250N</i>).....	47
Abbildung 57: Druckverlust von Harfen-Absorber und konzeptionellem Noppenblech-Absorber.....	47
Abbildung 58: Entwicklung des Börsen-Kupferpreises in den vergangenen Jahren	49
Abbildung 59: Wachstum Kupfer verarbeitender Industrien im Jahresvergleich.....	49
Abbildung 60: Bewertungsmatrix ausgewählter Absorberkonzepte	52
Abbildung 61: Stärkediagramm zu den dargestellten Konzepten	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Absorberwerkstoffe.....	15
Tabelle 2: Übersicht Beschichtungsverfahren	16
Tabelle 3: Eigenschaften Roll-Bond-Absorber	17
Tabelle 4: Eigenschaften Kissen-Absorber	18
Tabelle 5: Eigenschaften Stahlblech-Absorber	18
Tabelle 6: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit eingelegten Rohren.....	19
Tabelle 7: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit eingepressten Rohren.....	19
Tabelle 8: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit stoffschlüssiger Verbindung.....	20
Tabelle 9: Daten untersuchter Altkollektoren	21
Tabelle 10: Übersicht heutiger Verbindungsverfahren	29
Tabelle 11: Fertigungstechniken heutiger Blech-Rohr-Absorber	31
Tabelle 12: Zieldaten im Rahmen der Konzeptphase	43
Tabelle 13: Referenzwerte zur Berechnung des Absorberwirkungsgradfaktors.....	43
Tabelle 14: Vergleich von Absorbern auf dem Stand der Technik mit einer Auswahl von Absorberkonzepten	48
Tabelle 15: Kostenanalyse zu ausgewählten Absorberkonzepten.....	48
Tabelle 16: Erläuterung der vorläufigen Bewertungskriterien	50

Formeln und Definitionen

C_b	Wärmeleitfähigkeit der Verbindung zwischen Blech und Rohr	$W/(m^*K)$
D	Außendurchmesser der Wärmeträgerrohre	m
D_i	Innendurchmesser der Wärmeträgerrohre	m
F	Rippenwirkungsgradfaktor	-
F'	Absorberwirkungsgradfaktor	-
h_{fi}	Wärmeübergangskoeffizient vom Rohr auf Fluid	$W/(m^2*K)$
k	Wärmeleitfähigkeit des Absorberbleches	$W/(m^*K)$
U_L	Gesamtwärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2*K)$
W	Abstand zwischen den Wärmeträgerrohren	m
δ	Stärke des Absorberblechs	m

Zusammenfassung

Die im Laufe des vorliegenden Vorhabens zusammengetragenen Informationen zeigen, dass der Blech-Rohr-Absorber als der momentane Stand der Technik verschiedenste Schwächen im technischen als auch wirtschaftlichen Bereich aufweist. Im technischen Bereich liegen diese sowohl im konstruktiven Aufbau aufgrund seiner vielen thermischen Widerstände, als auch in der momentanen Lösung der Verbindungstechnik.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Altkollektoranalyse zeigt, dass bereits früher verschiedenste Absorberbauformen auf dem Markt verfügbar waren. Diese Bauformen sind in der Fachliteratur teilweise dargestellt, jedoch kaum beschrieben oder näher untersucht. Die Analyse der großteils mehr als 20 Jahre alten Kollektoren ergibt, dass Bauformen und Absorbermaterialien bereits damals eine hohe Lebensdauer erreichen konnten. Defizite können nur bezüglich transparenten Abdeckungen, Zwischenschichten, Wärmedämmungen und bezüglich des hohen Absorber- bzw. Kollektorgewichtes ausgemacht werden. Thermographische Untersuchungen belegen, dass damalige volumetrische beziehungsweise teilvolumetrische Bauformen im Vergleich zu heutigen Konstruktionen gleichmäßigere Temperaturverteilungen aufweisen. Die Verbindungstechniken, speziell im Bereich der Blech-Rohr-Absorber, haben sich allerdings in Qualität und Stabilität im Vergleich zu damals verbessert.

Hohe Stillstandstemperaturen aufgrund neuer Entwicklungen im Bereich Absorberbeschichtungen und optimierter Glas- und Dämmstoffe bringen jedoch auch die verbesserten Verbindungstechniken zwischen Blech und Rohr an ihre Grenzen. Schlifffbilduntersuchungen, durchgeführt an verschiedenen heute im Absorberbau angewendeten Fertigungsverfahren, lassen fertigungs- als auch wärmetechnische Schwächen, wie z. B. inhomogene beziehungsweise spröde Nähte oder kleine Flächen für die Wärmeübertragung, erkennen.

In der Konzeptphase werden nach Ausarbeitung einer Anforderungsliste und Untersuchung des Absorbers durch eine Funktionsanalyse verschiedene Lösungsprinzipien erarbeitet. Aus diesen erfolgt die Entwicklung von Absorberkonzepten in Form von Skizzen, die schwerpunktmäßig auf eine volumetrische Durchströmung des Absorbers abzielen. Im nächsten Schritt werden für die aussichtsreichsten Konzepte eingehende Untersuchungen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht durchgeführt. Eine Berechnung hinsichtlich technischer Eigenschaften, wie Gewicht, Füllvolumen, Wärmekapazität und vor allem des Absorberwirkungsgradfaktors wird unter anderem durchgeführt. Weiterhin wird eine Voranalyse der Absorberkosten hinsichtlich Material- sowie Fertigungskosten erstellt. Basierend auf diesen Informationen können die Absorberkonzepte abschließend in einer Bewertungsmatrix bewertet werden. Es erfolgt dazu die Festlegung mehrerer differenzierbarer Bewertungskriterien, anhand dessen eine objektive und grundlegende Unterscheidung sowie Klassifizierung der Absorberkonzepte sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Sicht möglich ist.

Diese Konzepte sind Ausgangsbasis für ein weiteres, folgendes Projekt, das zuerst auf eine grundlegende Ausarbeitung dieser Konzepte abzielt. Diese werden im nächsten Schritt mit Hilfe einer Simulationssoftware detailliert untersucht und hinsichtlich Wärmeübertragungseigenschaften sowie Druckverlust optimiert. Nach einer erneuten Bewertung ist eine Fertigung der favorisierten Konzepte in Form von Prototypen für praktische Vermessungen und Optimierungen in einem Sonnensimulator vorgesehen sowie die Implementierung in ein neu zu entwickelndes Kollektorgehäuse.

Das vorliegende Vorhaben wurde von der Firma *ThermoSolar AG* in Zusammenarbeit mit dem *KOMPETENZZENTRUM SOLARTECHNIK* an der Fachhochschule Ingolstadt durchgeführt. Die Förderung des Vorhabens erfolgte durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 21543.

1 Einleitung

2001 boomte der deutsche Solarkollektormarkt. Solarkollektor- als auch Absorberhersteller waren mit ihren Produktionskapazitäten übermäßig ausgelastet. Unter diesen Bedingungen zeigte sich, dass weder die aktuellen Absorbertechnologien noch deren Herstellprozesse den hohen Absatzraten bei bestehenden Qualitätsansprüchen gerecht werden können. Im Gegensatz zu früheren Jahren mit geringeren Absatzraten, hatte dies negative Auswirkungen auf Kosten und Zeiten für Qualitätskontrolle sowie Nacharbeit.

Bei den bestehenden Kollektorausführungen ist in Bezug auf den Absorber folgendes festzustellen:

- Der Absorber trägt nahezu die Hälfte zu den Herstellkosten des Kollektors bei [1]. Die Kollektoren wiederum machen 25 ... 30 % der Gesamtkosten einer Solaranlage aus [2].
- Die bestehenden Absorber-Herstellprozesse sind im Hinblick auf steigende Ausbringung nicht ausgereift. Daraus resultieren unwirtschaftlich hohe Ausschuss- bzw. Nacharbeitsraten [3].
- Mit der Steigerung der Kollektor-Wirkungsgrade gerät die Thematik der Temperaturbeständigkeit insbesondere des Absorbers in das Blickfeld [4]. Dabei stehen weder bei den hochselektiven Beschichtungen der Absorberoberfläche noch bei der Mehrzahl der Verbindungstechniken zwischen Absorberblech und Kupferleitungen gesicherte Lösungen zur Verfügung.

Stand der Technik im heutigen Absorberbau sind selektiv beschichtete Kupferbleche, die mit Kupferrohre verbunden werden. Die Verbindung von Absorberblech und Wärmeträgerrohr erfolgt heute meist durch Weichlöten oder spezialisierte Schweißverfahren. Diese, dem klassischen Blech-Rohr-Prinzip folgende Bauform ist auch theoretisch umfangreich untersucht und beschrieben [5, 6].

Die Anstrengungen zur Verbesserung von Kollektoren beschränkten sich in den letzten Jahren hauptsächlich auf wirkungsgradsteigernde Techniken, wie z. B. selektive Absorberbeschichtungen oder Solargläser mit verbesserter Transmission. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird deshalb ein für den Absorber erweiterter Ansatz gewählt. Eine Optimierung erfolgt nicht nur hinsichtlich des Wirkungsgrades, sondern auch hinsichtlich Herstellkosten des Absorbers (Material und dessen Verarbeitung), sowie der Verbesserung/Vereinfachung des Fertigungsprozesses.

Zur Vermeidung der beschriebenen Problemstellungen bei den aktuellen Absorberkonstruktionen wird demgegenüber ein völlig neuer Absorber entwickelt. Wegen der ausgeschöpften Entwicklungspotentiale, wird die gegenwärtige Absorberbauform „Blech-Rohr“ zunächst grundsätzlich in Frage gestellt, d.h. es findet eine Konzentration auf die Funktionen des Absorbers statt, nämlich der Umwandlung des solaren Strahlungsangebotes in Wärme und der Übertragung der Wärme auf einen Wärmeträger.

Eingesetzte Materialien, Fertigungsprozesse und damit erzielbare Qualität bestimmen die Kosten eines Kollektors. Um bei verbesserter Absorberqualität die Herstellungskosten zu verringern, wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der Einsatz kostengünstiger Materialien sowie die Implementierung kostengünstiger, energiearmer und qualitätssicherer Fertigungsprozesse schon in der Konzeptionsphase berücksichtigt.

Zunächst erfolgt eine Untersuchung alter Absorberbauformen aus den 70er und 80er Jahren, um bereits umgesetzte Prinzipien und Konstruktionsvarianten analysieren und daraus Ideen sowie Verbesserungen für die Neuentwicklung generieren zu können. Parallel dazu wird der aktuelle Ist- und Forschungsstandes auf dem Gebiet der Kollektor bzw. Absorberkonstruktionen analysiert.

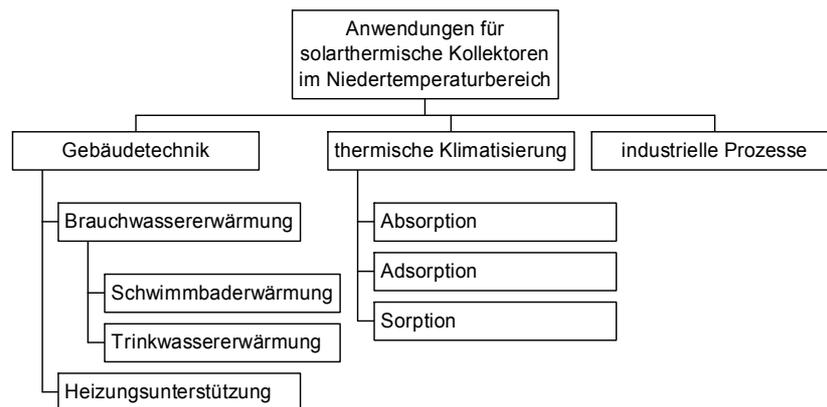
Anschließend werden verschiedene Konzepte entwickelt und unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit vertieft. Dazu dienen eine überschlägige Berechnung zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit sowie die Kostenanalyse. Beides fließt in die Konzeptbewertung ein, so dass Lösungen aus technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht ermittelt werden können.

Die Innovation dieses Vorhabens besteht in der Entwicklung eines von momentan üblichen Absorberbauformen losgelösten, solarthermischen Absorbers. Die Basis dafür liefern die drei Entwicklungsschwerpunkte Absorber-Wirkungsgrad (Thermodynamik/Wärmeübertragung), Fertigungsprozess und Herstellkosten. Neben der eingehenden Untersuchung des Wärmedurchgangs und -abtransports der Absorberkonzepte bezüglich des Wirkungsgrades steht in diesem Projekt die Entwicklung einer technologisch möglichst einfachen Lösung im Vordergrund, die die Basis für eine breite Anwendung in der solarunterstützten Gebäudeheizung oder auch anderen Anwendungen darstellt.

2 Umfeld

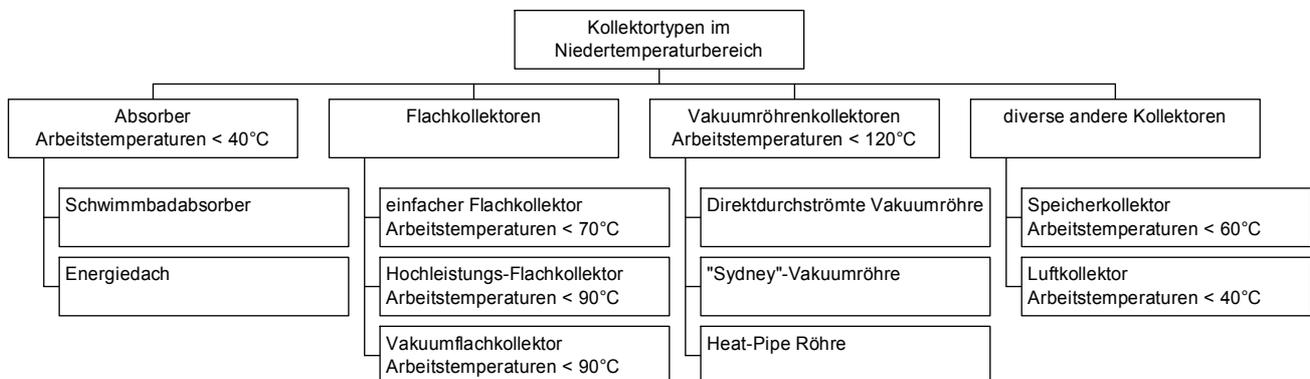
2.1 Anwendungsgebiete von Kollektoren

Kollektoren zur thermischen Energieerzeugung werden, im Gegensatz zu den Anfängen der Solartechnik Ende der siebziger Jahre, nicht nur zur Brauchwassererwärmung eingesetzt, sondern auch verstärkt zur Heizungsunterstützung. Systeme im Bereich der Gebäudetechnik sind mittlerweile Stand der Technik und deutschlandweit auf dem Markt erhältlich. [Abbildung 1](#) zeigt verschiedenen Anwendungsformen solarthermischer Kollektoren im Niedertemperaturbereich. Die Entwicklungen im Bauwesen mit dem verstärkten Einsatz von Glas und Stahl führten in den letzten Jahren zur Entwicklung von thermischen Klimatisierungsprozessen auch für kleinere Kälteleistungen und eröffneten damit den thermischen Kollektoren als Energielieferant eine weitere Möglichkeit. Ein anderer großer Bereich, der aufgrund steigender Energiepreise in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, ist der Einsatz von Kollektoren für industrielle Prozesse.



[Abbildung 1](#): Anwendung von thermischen Niedertemperatur-Kollektoren

Abhängig von der Art des Einsatzes eines Kollektors muss jedoch das durch den Kollektor zur Verfügung gestellte Temperaturniveau berücksichtigt werden. Dafür stehen verschiedene Kollektorsysteme im Niedertemperaturbereich zur Auswahl ([Abbildung 2](#)).



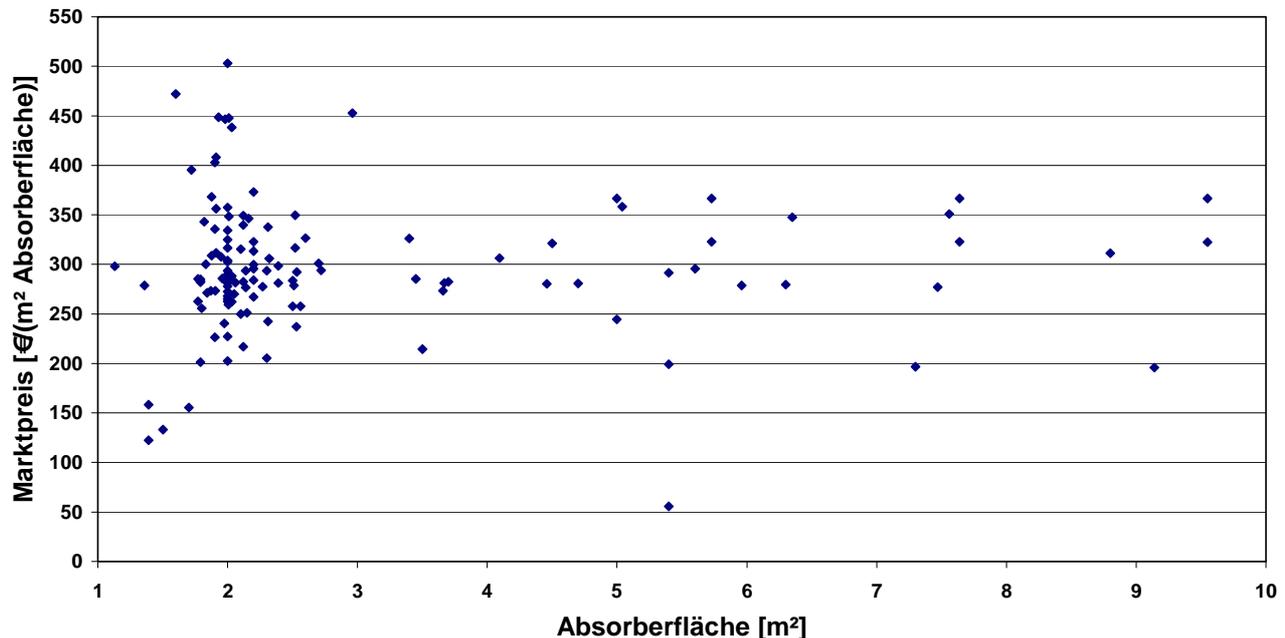
[Abbildung 2](#): Niedertemperatur-Kollektortypen

Sämtliche Kollektortypen, abgesehen von Speicher- sowie Luftkollektoren, nutzen den prinzipiell gleichen Absorber zur Aufnahme der Strahlung und Umwandlung in thermische Energie.

Dieses Projektes beschränkte sich jedoch auf die Entwicklung eines Absorbers speziell für Flachkollektoren. Weitere Entwicklungen können basierend auf den Ergebnissen eine Anpassung für andere Kollektortypen durchführen.

2.2 Marktpreise und Kosten von thermischen Solarkollektoren in Deutschland

Die Untersuchung der Marktpreise thermischer Kollektoren in Deutschlands beschränkt sich dabei auf Flachkollektoren. [Abbildung 3](#) zeigt die anhand von [7] recherchierten Nettolistenpreise.



[Abbildung 3](#): Netto-Marktpreise thermischer Flachkollektoren je m² Absorberfläche (nach [7])

Es zeigt sich zunächst, dass in Deutschland zumeist Kollektoren im Bereich von Absorberflächen um 2 m² montiert werden. Die Marktpreise streuen im Bereich zwischen 1,8 m² und 2,2 m² Absorbergröße allerdings stark zwischen 156 €/m² und 503 €/m² (bezogen auf die Absorberfläche). Das Preismittel für diese „Standard-„Kollektoren liegt bei rund 300 €/m². Im Vergleich dazu kostete vor 15 Jahren ein *Thermo/Solar*-Flachkollektor vom Typ HSL 15 L umgerechnet rund 285 €/m² [8]. Die Preise für Flachkollektoren sind somit, ohne Berücksichtigung von Inflationsraten, über die Jahre nur relativ geringfügig angestiegen. Dies bedeutet wiederum, dass während der vergangenen 15 Jahre zwar Leistungs- und Qualitätssteigerungen erreicht wurden, das Preisniveau jedoch nicht gesenkt, sondern tendenziell sogar erhöht wurde.

Kostenstrukturierung nach Baugruppen

Der im vorigen Kapitel ermittelte durchschnittliche Kollektorpreis muss weiter in die einzelnen Baugruppen aufgeschlüsselt werden. Hierfür sind die Vertriebs- und Einkaufs- sowie Fertigungsdaten verschiedener Hersteller notwendig, die jedoch aufgrund ihrer Sensibilität kaum preisgegeben werden. Daher wurde auf [1] zurückgegriffen. Die Verteilung des Endverbraucherpreises sowie der Selbst- und Herstellkosten ist darin detailliert ermittelt und vorgestellt. Die Übertragbarkeit der 1995 veröffentlichten Untersuchungen auf heutige Kollektoraufbauten und -fertigungen wurde geklärt [9].

[Abbildung 4](#) gibt jedoch zunächst eine prozess-orientierte Kollektor-Kostenstruktur wieder. So zeigt sich, dass, aufgrund des meist 3-stufigen Vertriebsweges, die Rabattmargen einen hohen Teil des Endverbraucherpreises ausmachen. In [Abbildung 5](#) sind die daraus ermittelten Selbstkosten von etwa 160 € wiederum in verschiedene Elemente aufgliedert, woraus sich die Herstellkosten mit einem Anteil von 64 % der Selbstkosten ergeben.

[Abbildung 6](#) zeigt schließlich die Zusammensetzung der Herstellkosten. Es wird ersichtlich, dass der Absorber mit einem Anteil von 46 % einen Großteil der Herstellkosten verursacht. Dabei ist das Fertigungsmaterial mit etwa 25 % der Herstellkosten selbstverständlich bereits berücksichtigt.

Bezogen auf die Selbstkosten wirkt sich der Absorber mit etwas weniger als einem Drittel der Kosten aus. Dies zeigt wiederum, dass der Absorber einen wesentlichen Kostentreiber darstellt, der hinsichtlich wirtschaftlicher Material und Fertigung unbedingt untersucht werden muss.

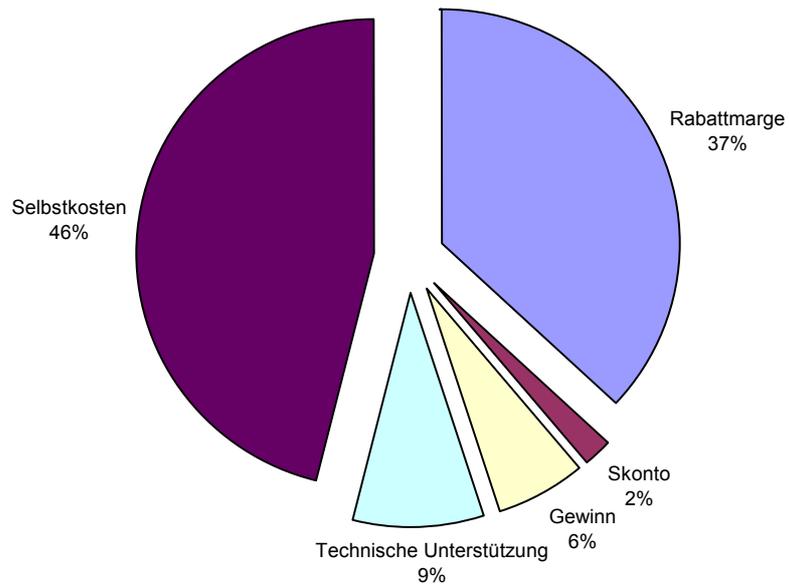


Abbildung 4: Prozess-orientierte Kollektor-Kostenstruktur (nach [1])

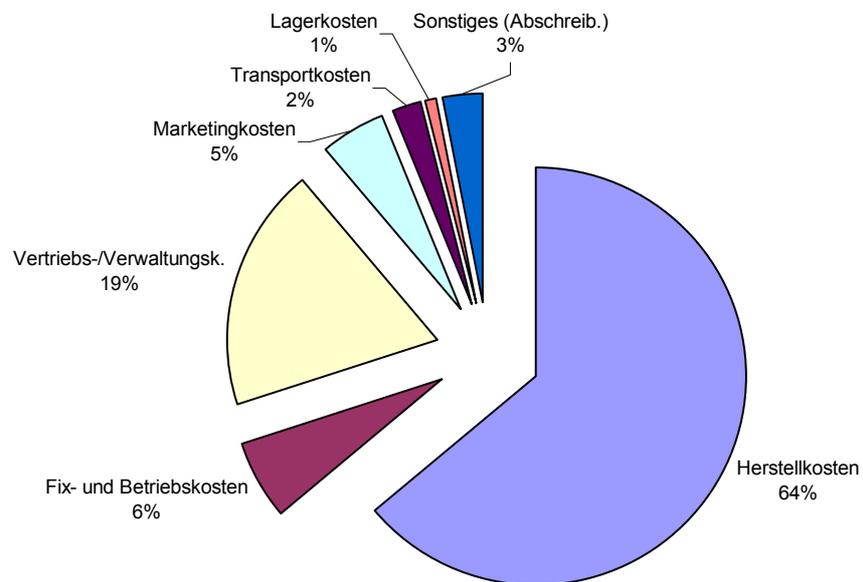


Abbildung 5: Strukturierung der Kollektor-Selbstkosten (nach [1])

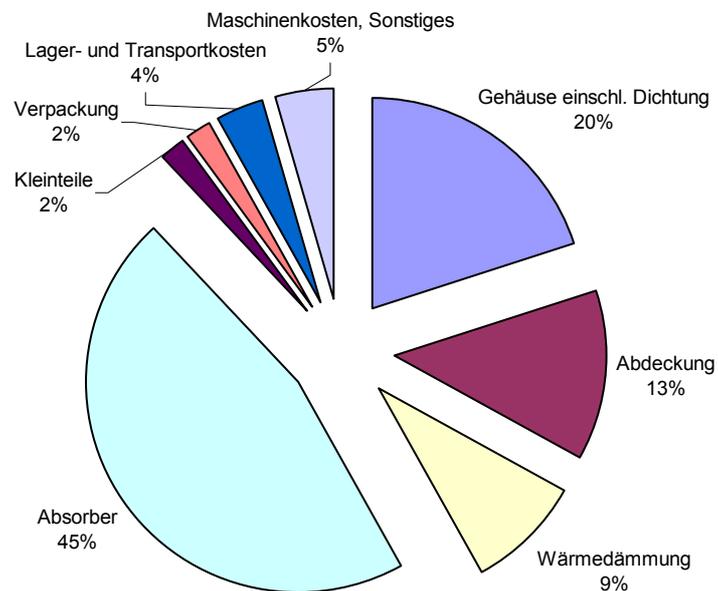


Abbildung 6: Aufteilung der Kollektor-Herstellkosten (nach [1])

2.3 Technischer Aufbau der Kollektor-Absorber

Werkstoffe

Die technischen Anforderungen an das Absorbermaterial liegen vor allem in einer hohen Temperaturstabilität, die durch Stillstand im Kollektor hervorgerufen werden. Des Weiteren ist eine gute Korrosionsbeständigkeit eine wichtige Voraussetzung für eine dauerhafte Funktion und gutem Wärmeübergang. Speziell in den Anfangsjahren der Solartechnik wurden viele verschiedene Metalle für den Absorber verwendet. Diese Vielfalt reduzierte sich bei heutigen Solarabsorbern jedoch aus verschiedenen Gründen, z. B. Gewicht oder Korrosionsbeständigkeit, auf die nun üblichen Werkstoffe Aluminium bzw. Kupfer. Tabelle 1 zeigt einen Überblick der über die Jahre eingesetzten Materialien mit deren Vor- und Nachteilen.

Tabelle 1: Übersicht Absorberwerkstoffe

Material	Vorteile	Nachteile
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> + leicht + gute Wärmeleitfähigkeit + rationelle Fertigung + preiswert 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Korrosionsbeständigkeit - hoher Herstellungsenergieaufwand
Stahl	<ul style="list-style-type: none"> + preiswert + gut zu verarbeiten + geringer Herstellungsenergieaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr geringe Korrosionsbeständigkeit - geringe Wärmeleitfähigkeit - hohe Dichte → hohes Gewicht
Edelstahl	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Korrosionsbeständigkeit + sehr hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Wärmeleitfähigkeit - hohe Dichte → hohes Gewicht - teuer - hoher Herstellungsenergieaufwand
Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Wärmeleitfähigkeit + leicht zu verarbeiten + gute Korrosionsbeständigkeit + hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Dichte → hohes Gewicht - teuer
Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Korrosionsbeständigkeit + geringe Dichte → niedriges Gewicht + geringer Herstellungsenergieaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr geringe Wärmeleitfähigkeit - geringe Temperaturbeständigkeit - teuer
technische Textilien	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Korrosionsbeständigkeit + geringe Dichte → niedriges Gewicht 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr geringe Wärmeleitfähigkeit - geringe Temperaturbeständigkeit
Glas	<ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Korrosionsbeständigkeit + gute Verarbeitbarkeit + hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr geringe Wärmeleitfähigkeit - sehr geringe Duktilität → spröde

Absorberbeschichtung

Absorberbeschichtungen dienen der Leistungssteigerung von Kollektoren. Neben einer Steigerung des Absorptionsgrades senkt die Beschichtung vor allem die Emission von Wärmestrahlung. Daraus ergibt sich für die Beschichtung die Notwendigkeit eines hohen Absorptions- und eines niedrigen Emissionsfaktors. Gleichzeitig sind aufgrund hoher Temperaturen und häufiger Temperaturwechsel hohe Anforderungen an die Belastungsfähigkeit gestellt.

In den Anfangsjahren der Solartechnik wurden zur Erzielung hoher Absorptionswerte schwarze Lackschichten auf den Absorber aufgebracht. Diese besitzen zwar, wie jeder schwarze Körper, eine hohe Absorptionsfähigkeit, jedoch auch eine hohe Emissionsrate. Aus diesem Grund wurden schon früh selektive Beschichtungen, wie Schwarzchrom oder nickelpigmentiertes Aluminium, entwickelt. Diese werden in industrieller Fertigung, als sehr dünne Schichten, galvanisch aufgebracht. Sie sind jedoch gegenüber Feuchtigkeit, Verschmutzung und besonders gegenüber Fett anfällig. Bei Schutz der Beschichtung im Kollektorgehäuse besitzen sie jedoch, ohne signifikante Änderung der Eigenschaften, eine Lebensdauer im Bereich von 20 Jahren und mehr [10].

Stand der Technik sind hochselektive Beschichtungen, die z. B. von Verfahren aus dem Werkzeugbau zum Erzeugen widerstandsfähiger und verschleißfester Schichten bekannt sind. Darüber hinaus existieren vielfältige weitere Methoden zur Bereitstellung der oben genannten Eigenschaften, z. B. mittels Schleifen und Behandeln der Oberfläche mit Säure [11].

Am weitesten verbreitet sind jedoch Beschichtungsverfahren wie Sputtern, PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition) oder PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition). Sie zählen zu den trockenen Beschichtungsverfahren und besitzen gegenüber galvanischen Prozessen eine Reihe von Vorteilen.

Ein Nachteil besteht allerdings in den hohen Investitionskosten für die Fertigungsanlagen. Die folgende Tabelle 2 zeigt derzeit verfügbare selektive Beschichtungen.

Tabelle 2: Übersicht Beschichtungsverfahren (nach [12])

Hersteller	Produkt	α [%]	ϵ [%]	Beschichtung	Verfahren	Absorber
Alanod	Miro-Therm	94 +/- 2	5 +/- 2	Keramik-Metall-Struktur (Cermet)	PVD	Al
European Solar Engineering S.A.	Epsilon	95 +/- 1	4 +/- 1	k. A.	PVD	Cu
Tinox	Tinox classic	95 +/- 2	5 +/- 2	Titan-Nitrit-Oxid	PVD	Cu
	Tinox art-line	91 +/- 2	5 +/- 2			
Ikarus Coatings	Brillanta	92 +/- 1	4 +/- 1	amorphe, chromhaltige Kohlenwasserstoffschicht	Magnetron-Sputter-CVD-Prozess	Cu
Interpane	Sunselect	95 +/- 1	5 +/- 1	Keramik-Metall-Struktur (Cermet)	Magnetron-Sputter-Prozess	Cu
Sunstrip AB	Sunstrip	96 +/- 2	7 +/- 2	Keramik-Metall-Struktur (Cermet)	Magnetron-Sputter-Prozess	Alu
Alternate Energy Technologies LLC	Crystal Clear	94-96	4-9	Nickelschicht in Kristallstruktur	galv. Verfahren	Cu
ChromeCoat A/S	ChromeCoat	95 +/- 1	10 +/- 2	Schwarzchrom auf Nickel	galv. Verfahren	Cu
Energie Solaire SA	AS	95	15	Schwarzchrom mit Cu-Zwischenschicht	galv. Verfahren	Edelstahl
	AS+	95	5			
Fentek Fenis Teknik Ürünler	Solartek	95 +/- 2	15 +/- 2	Nickel pigmentiertes Aluminiumoxid	galv. Verfahren	Al
Materials Technology Inc.	Krosol	96 +/- 2	8 +/- 3	Schwarzchrom auf Ni	galv. Verfahren	Cu
Solchrome Systems India Ltd.	Solchrome	96 +/- 2	12 +/- 2	Schwarzchrom auf Ni	galv. Verfahren	Cu
Target	Nirabo	96 +/- 1	7 +/- 1	Schwarznickel	galv. Verfahren	Al, Cu, Stahl
Thermo Solar	AlOx	95 +/- 1	16 +/- 1	Nickel pigmentiertes Aluminiumoxid	galv. Verfahren	Al
Jacques Giordano Industries	Cumox	95 +/- 1	9 +/- 1	k. A.	k. A.	Cu

3 Absorberbauformen der Vergangenheit

Im Jahre 1993 fand unter dem Programm Solarthermie2000 eine Untersuchung der Solaranlagen aus dem Zukunftsinvestitionsprogramms (ZIP) der damaligen Bundesregierung statt [10]. Ziel war es, die Anlagen nach einer relativ langen Betriebszeit auf das Alterungsverhalten der Systeme sowie seiner Komponenten und ihrer Materialien hin zu untersuchen. Im Bericht dieses Vorhabens sind bereits verschiedene Absorberbauformen dokumentiert, eine Analyse des Absorberaufbaus ist jedoch nicht dokumentiert und daher Gegenstand dieses Abschnitts.

3.1 Übersicht früherer Bauformen

Ähnlich den Absorbermaterialien bestand in den Anfängen der Solartechnik eine größere Vielzahl an Absorberbauformen als heute. Aufgrund größeren Aufwands in der Fertigung, Problemen in der Prozessführung oder geringer Haltbarkeit der verwendeten Werkstoffe über der Lebensdauer reduzierten sich die Absorberkonstruktionen auf die heute üblichen Blech-Rohr-Absorber. Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die in der Vergangenheit bis heute eingesetzten grundsätzlichen Absorberbauformen, von denen bestimmte Varianten bereits volumetrisch aufgebaut waren.

Tabelle 3: Eigenschaften Roll-Bond-Absorber

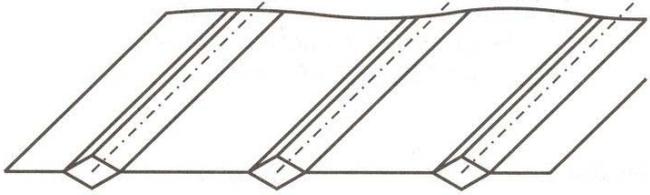
 	
Werkstoff: Aluminium Verfahren: <ul style="list-style-type: none"> ○ Beschichtung mit speziellen Beschichtungsmassen (z. B. auf Graphitbasis) entlang vorgesehener Wärmeträgerkanäle mittels Druckverfahren ○ Verpressung mit hohem Druck → Kaltverschweißung ○ keine Kaltverschweißung entlang der Beschichtungsstrecken ○ Aufblasen durch Druckluft entlang der Beschichtungsstrecken → Kanäle 	
Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> + geringes Gewicht + viele Wärmeträgerkanäle mit geringem Abstand → hoher Absorberwirkungsgradfaktor möglich + guter Wärmedurchgang + nur ein Werkstoff 	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> - keine hohen Betriebsdrücke möglich - Korrosion aufgrund verwendeter Beschichtungsmasse für Wärmeträgerkanäle - Korrosion aufgrund unterschiedlicher Werkstoffe zwischen Absorber und Rohrleitungen

Tabelle 4: Eigenschaften Kissen-Absorber (linkes Bild [13], rechte Bilder [14] [15])

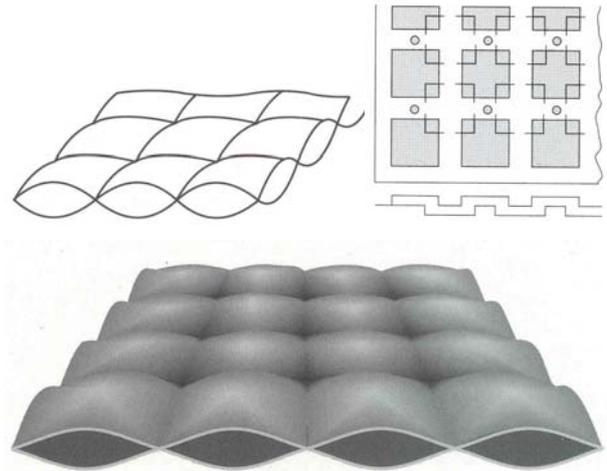
 	
<p>Werkstoff: Stahl oder Edelstahl</p> <p>Verfahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Einpressen von Konturen in Bleche ○ Aufeinanderlegen zweier Bleche ○ Punktschweißung an den Berührungspunkten der Bleche <p>alternativ</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Punktschweißung zweier aufeinandergelegter Bleche in bestimmtem Raster ○ Aufblasen der beiden verschweißten Bleche mit Druckluft oder Fluiden 	
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> + große Wärmeübertragungsflächen + guter Wärmedurchgang + nur ein Werkstoff 	<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine hohen Betriebsdrücke - hohes Gewicht - Korrosion - großer Wärmeträgerinhalt - hohe Wärmekapazität - thermische Trägheit

Tabelle 5: Eigenschaften Stahlblech-Absorber

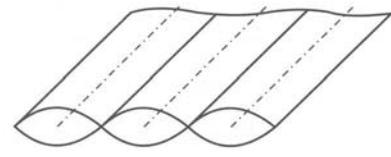
 	
<p>Werkstoff: Stahl</p> <p>Verfahren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Einpressen der Wärmeträgerkanäle in Bleche ○ Widerstandsrollnahtschweißen entlang den Berührungspunkten der Bleche neben den Kanälen 	
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> + relativ große Wärmeübertragungsflächen, da Kanäle aneinander angrenzen + guter Wärmedurchgang + nur ein Werkstoff 	<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hohes Gewicht - Korrosion - relativ großer Wärmeträgerinhalt - relativ hohe Wärmekapazität - thermische Trägheit

Tabelle 6: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit eingelegten Rohren (linkes Bild [13], rechtes Bild [15])

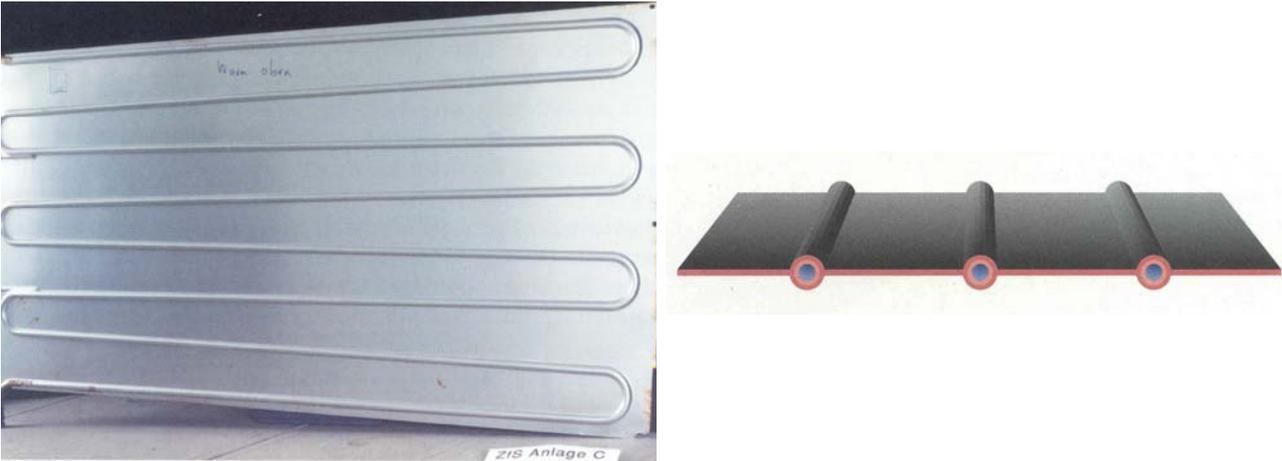
	
Werkstoff: Aluminiumblech / Kupferrohr Aluminiumblech / Edelstahlrohr Kupferblech / Kupferrohr	
Verfahren: <ul style="list-style-type: none"> ○ Einpressen von Vertiefungen in die Bleche ○ Aufbringen einer Klebeschicht in die Vertiefungen bzw. auf das Rohr ○ Einlegen der Rohre in die Vertiefungen ○ Verpressen der beiden Bleche gegeneinander alternativ <ul style="list-style-type: none"> ○ Einpressen von Vertiefungen in die Bleche ○ Einlegen der Rohre in die Vertiefungen ○ Kaltverpressen der beiden Bleche unter hohem Druck 	
Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> + hohe Betriebsdrücke + geringer Wärmeträgerinhalt + geringe thermische Trägheit 	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> - mäßiger Wärmedurchgang aufgrund der Abstände zwischen Wärmeträgerrohren - meist verschiedene Werkstoffkombinationen - hohes Gewicht (je nach verwendeten Werkstoffkombinationen zwischen Blech und Rohr)

Tabelle 7: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit eingepressten Rohren (linkes Bild [13])

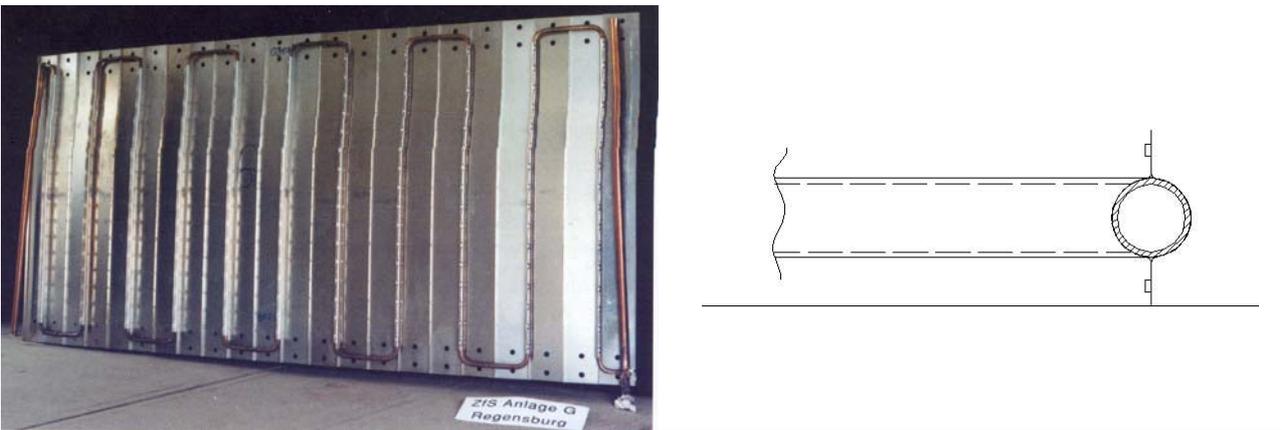
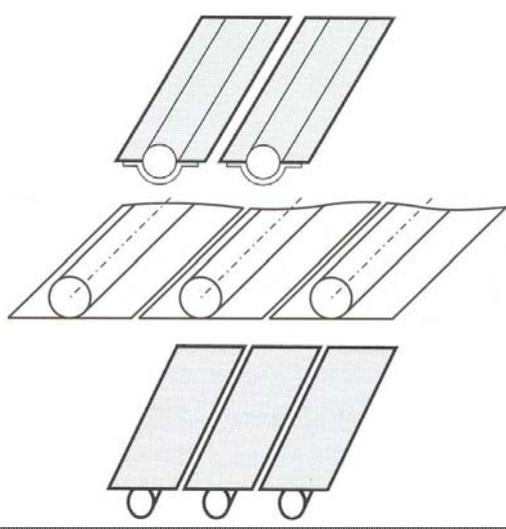
	
Werkstoff: Aluminiumblech / Kupferrohr Kupferblech / Kupferrohr	
Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> + hohe Betriebsdrücke + geringer Wärmeträgerinhalt + geringe thermische Trägheit + mittleres Gewicht 	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> - mäßiger Wärmedurchgang aufgrund der Abstände zwischen Wärmeträgerrohren - meist verschiedene Werkstoffkombinationen

Tabelle 8: Eigenschaften Blech-Rohr-Absorber mit stoffschlüssiger Verbindung (Bilder rechts [14])

	
Werkstoff: Kupferblech / Kupferrohr Aluminiumblech / Aluminiumrohr	
Vorteile: + hohe Betriebsdrücke + geringer Wärmeträgerinhalt + geringe thermische Trägheit + mittleres Gewicht	Nachteile: - mäßiger Wärmeübergang auf die diskret angeordneten Rohre - teilweise Verbindungs- bzw. Festigkeitsprobleme bei erhöhten Temperaturen

3.2 Untersuchung von Altkollektoren

Im Rahmen des Projektes wurden nicht mehr am Markt verfügbare Kollektoren älterer Bauart auf Alterung und Aufbau hin untersucht. Die Beschaffung der meist mehr als 20 Jahre alten Kollektoren erwies sich allerdings als sehr schwierig und zeitaufwändig. Auf neue Kollektoren kann in diesem Zusammenhang nicht zurückgegriffen werden, da heutige Kollektoren wie bereits erwähnt, fast ausschließlich auf der Blech-Rohr Konstruktion beruhen. Zum Vergleich alter Bauformen mit heutigen Absorbertypen wurden dennoch neue Absorber mit einbezogen.

Übersicht demontierter Altkollektoren

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die beschafften und im *LABOR FÜR SOLARTECHNIK* der *Fachhochschule Ingolstadt* untersuchten Kollektoren.

Demontage und Untersuchung der Altkollektoren

Es zeigt sich, dass im Vergleich zu heutigen Produkten der Aufwand im Kollektoraufbau und in den Komponenten deutlich größer war als heute, wie exemplarisch Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen. Trotz dieses Mehraufwandes ist die Leistungsfähigkeit dieses Kollektors aufgrund geringer seitlicher Wärmedämmung und aufgrund einer nicht selektiven Beschichtung verhältnismäßig gering. Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit dieses *BBC-Kollektortyps* im *Solarthermie2000-Programm* bescheinigen diesem daher auch eine schlechte Kollektorleistung (Abbildung 9).

Tabelle 9: Daten untersuchter Altkollektoren

Hersteller	Typ	Bauform	Blech-Werkstoff	Rohr-Werkstoff	Verbindungsart	Beschichtung	Baujahr
ThermoSolar	HVL 20	Blech-Rohr basiert auf Finnen	Aluminium	Kupfer	geklemmt	Maxorb-Folie	~1988
ThermoSolar	HVL 20	Blech-Rohr basiert auf Finnen	Aluminium	Kupfer	verpresst	Alox	~1989
- Selbstbau -	- Selbstbau -	Blech-Rohr vollflächig	Kupfer	Kupfer	gelötet	nicht-selektiver Solarlack	~1980
SOLTEC	F50	Blech-Rohr Einzelfinnen	Aluminium	Kupfer	gerollt	Maxorb-Beschichtung	1980
Bittner	Bitra	Stahlblech-absorber	Stahl	-	rollnahtgeschweißt	nicht-selektiver Solarlack	1973
Stiebel Eltron	SOL 20	Kissen-absorber	Stahl	-	punktgeschweißt	nicht-selektiver Solarlack	1978
BBC	Solektor	Roll-Bond	Aluminium	-	Roll-Bonding	nicht-selektiver Lack	~1980
Walo	WK12	Roll-Bond	Aluminium	-	Roll-Bonding	nicht-selektiver Lack	1978
Wolf	TopSon F3	Blech-Rohr	Kupfer	Kupfer	ultraschallgeschweißt	-	2004
ThermoSolar *)	300N	Blech-Rohr	Aluminium	Kupfer	schwach verpresst	Alox	2004
ThermoSolar *)	250N	Blech-Rohr	Aluminium	Kupfer	stark verpresst	Alox	2004
Nau	Blue Energy	Blech-Rohr	Kupfer	Kupfer	gelötet	-	2004
Böhm	-	Blech-Rohr	Kupfer	Kupfer	gelötet	-	2004

*) Versuchskollektoren



Abbildung 7: Kollektorgehäuse mit aluminiumkaschierter Wärmedämmung (BBC Solektor)



Abbildung 8: Vorlaufanschlussbereich eines Roll-Bond Absorbers (BBC Solektor)

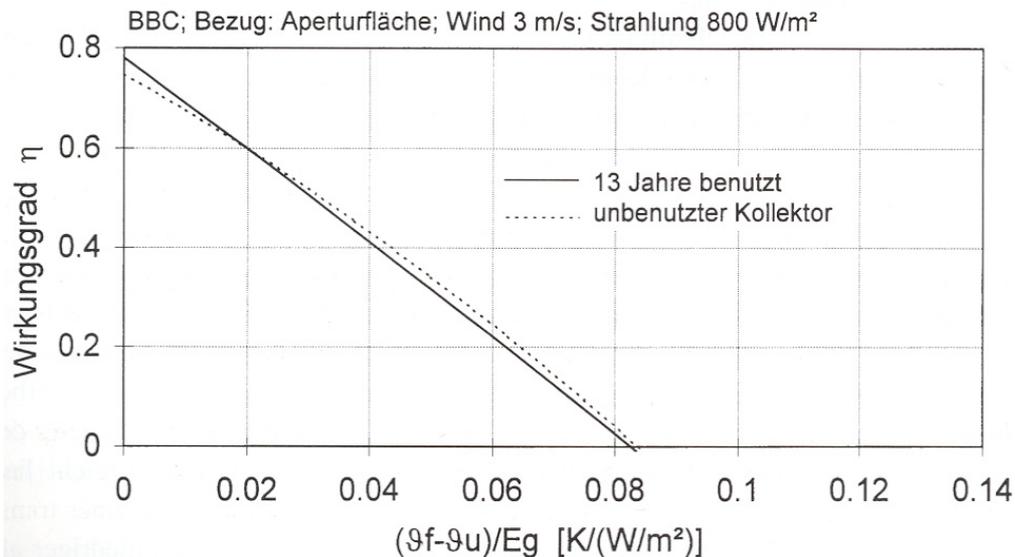


Abbildung 9: Leistungskurven für den BBC Solektor [10]

Ein weiterer Schwachpunkt damaliger Kollektoren ist die Verwendung von Werkstoffen mit unzureichender Qualität. Der Kollektor in [Abbildung 10](#) besitzt beispielsweise als transparente Abdeckung eine faserverstärkte Kunststoffplatte, die mit allergrößter Wahrscheinlichkeit bereits im Originalzustand weitaus schlechtere Transmissionseigenschaften aufwies als eine einfache Sicherheitsglasscheibe. Die in [Abbildung 11](#) eingesetzte, gewölbte Acrylglasscheibe ist seitens der Transparenz und der Elastizität noch in gutem Zustand, allerdings ist die als Konvektionsbremse eingesetzte Polyesterfolie aufgrund der UV-Strahlung und der Wärmeeinwirkungen völlig zerstört und extrem spröde. Risse und Ablösungen zeigt auch die als selektive Schicht im *Thermo/Solar*-Kollektor HVL20 eingesetzte Maxorb-Folie in [Abbildung 12](#), die auf den Absorber aufgeklebt wurde. Ursachen dafür liegen ebenfalls in der sehr hohen Temperaturbelastung, besonders im Stillstandsfall sowie in der UV-Belastung.

Demontage und Untersuchung der Altkollektoren

Die thermischen Untersuchungen zielen darauf ab, die älteren Absorberbauformen hinsichtlich ihres Strömungsverhaltens und der Wärmeverteilung zu erfassen und mit heutigen Absorbertypen zu vergleichen. Die Durchführung der thermischen Versuche erfolgt mittels einer Thermographiekamera, die die Aufwärmung des Absorbers über eine konstante Vorlauftemperatur von 60°C verfolgt. Die Versuche stellen nicht den realen Kollektorbetrieb nach, sondern es wird der Aufheizvorgang aufgrund eines im Absorber strömenden, heißen Wärmeträgers, in diesem Fall Wasser, aufgezeichnet. Ein niedriges Temperaturniveau in den Versuchen bedeutet in den zugehörigen Bereichen eine schlechte Durchströmung bzw. einen schlechten Wärmedurchgang. Im realen Kollektorbetrieb wäre an diesen Stellen jedoch ein hohes Temperaturniveau, da das von der Sonne erwärmte Absorberblech durch das Wärmeträgermedium nur unzureichend gekühlt wird.

Die Ergebnisse der thermographischen Versuche werden, um Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauformen bzw. Fertigungsverfahren zu verdeutlichen, nachfolgend eingeteilt nach der Absorberbauform beschrieben.

Thermisches Verhalten von Blech-Rohr-Absorbern

Die hier untersuchten Blech-Rohr Systeme entsprechen dem noch heute üblichen Standardaufbau aus einem Absorberblech und darunter angeordneten Wärmeträgerrohren. Die gebräuchlichsten Fertigungstechniken zum Verbinden der beiden Komponenten waren damals entweder Klemmen/Pressen oder Löten. Beide Verfahren werden heute noch angewandt, wobei die Klemmtechnik mittlerweile sehr selten geworden ist und auch das Löten, aufgrund der Eigenschaften des Weichlots, tendenziell durch andere Verfahren verdrängt wird.

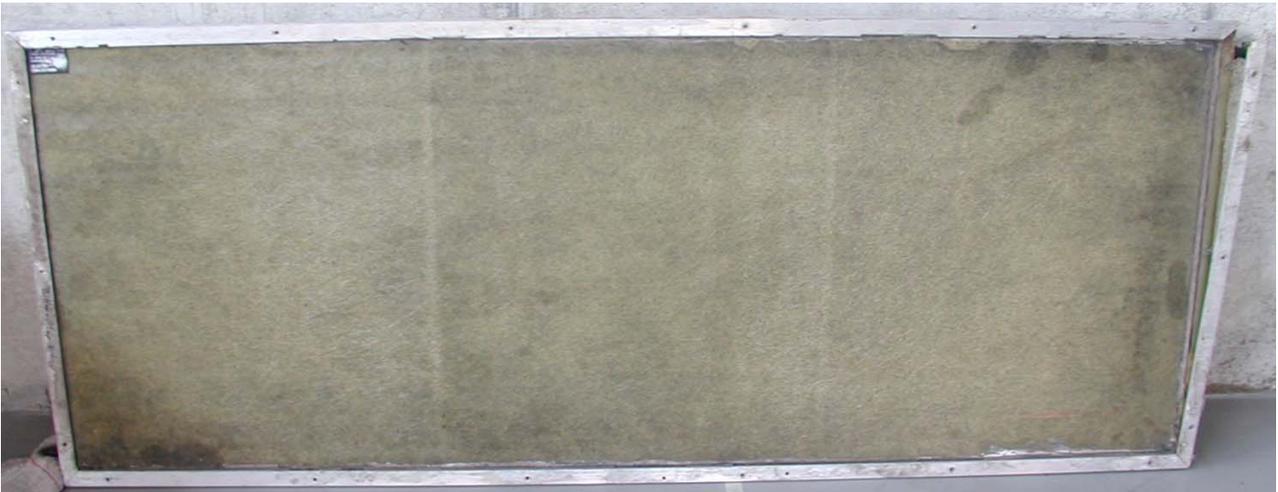


Abbildung 10: Faserverstärkte transparente Abdeckung nach 23 Betriebsjahren (*Bittner*-Kollektor)

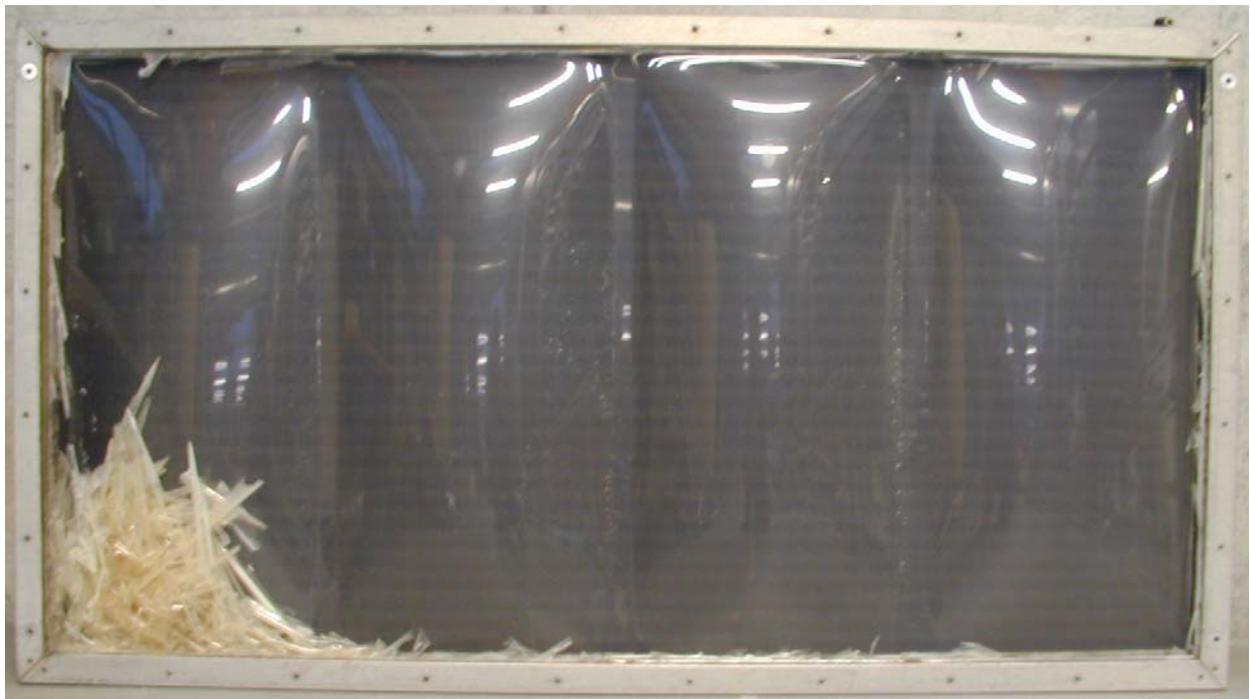


Abbildung 11: Polyesterfolie als Konvektionsbremse nach 25 Betriebsjahren (*Stiebel Eltron*-Kollektor)

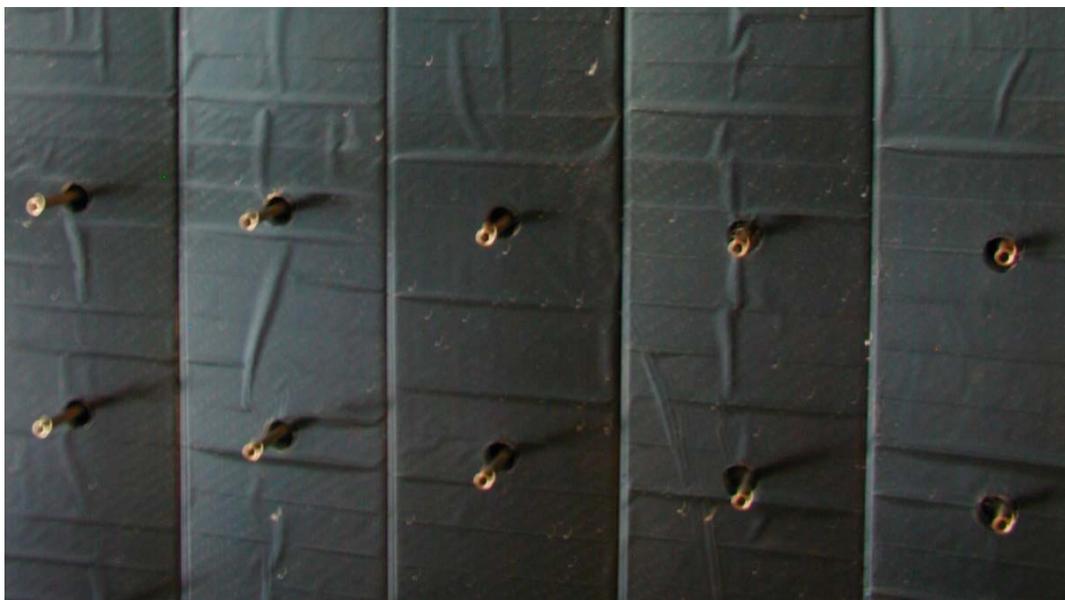


Abbildung 12: Risse und Ablösungen der Maxorb-Folie auf einem *ThermoSolar* HVL20-Absorber

Abbildung 13 zeigt einen Selbstbau-Absorber, dessen Wärmeträgerrohr sich aufgrund hoher Stillstandstemperaturen und den auftretenden mechanischen Belastungen vom Absorberblech gelöst hat. Im realen Kollektorbetrieb bedeutet dies, dass in den abgelösten Bereichen die eingestrahlte Sonnenenergie über die nächstliegende Wärmeträgerschleife aufgenommen werden muss. Dies bedeutet aufgrund des dadurch höheren Wärmeleitanteils einen größeren thermischen Widerstand und damit eine Verschlechterung des Absorberwirkungsgradfaktors F' . Dies kommt einer Vergrößerung der Abstände zwischen den abführenden Wärmeträgerrohren gleich. Der Abstand zwischen den Wärmeträgerrohren ist bei diesem selbstgelöteten Absorbertyp ohnehin sehr groß, so dass von einem relativ schlechten Absorberwirkungsgradfaktor ausgegangen werden kann.

Der in Abbildung 14 dargestellte Absorber besteht aus mehreren Aluminiumstrangpressprofilen, die durch Ineinanderhaken zu einer Fläche verbunden werden. In diesen einzelnen Aluminiumstrangpressprofilen ist jeweils eine Schlaufe des Kupfermäanders verpresst. Diese Presstechnik zeigt jedoch gut und schlecht verpresste Blech-Rohr-Abschnitte, wie anhand der Temperaturverteilung im oberen und mittleren Bereich des Absorbers in Abbildung 14 erkennbar ist.

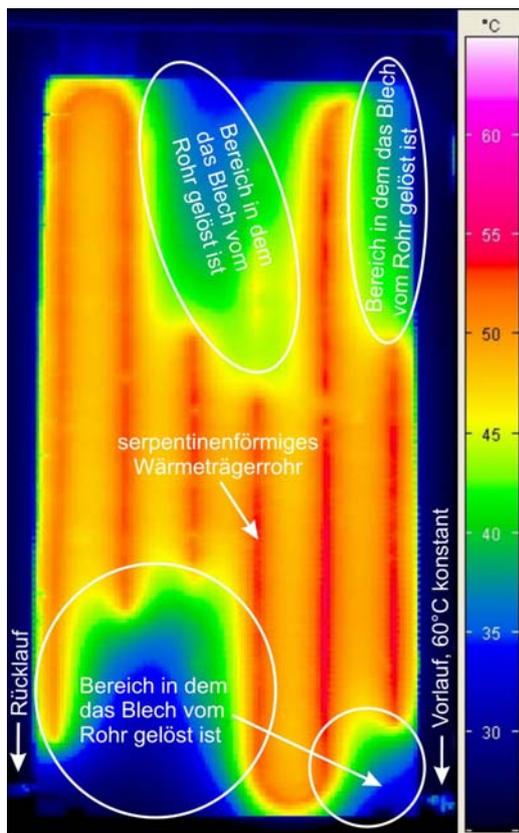


Abbildung 13: Thermisches Verhalten gelöteter Blech-Rohr-Absorber (*Selbstbau*)

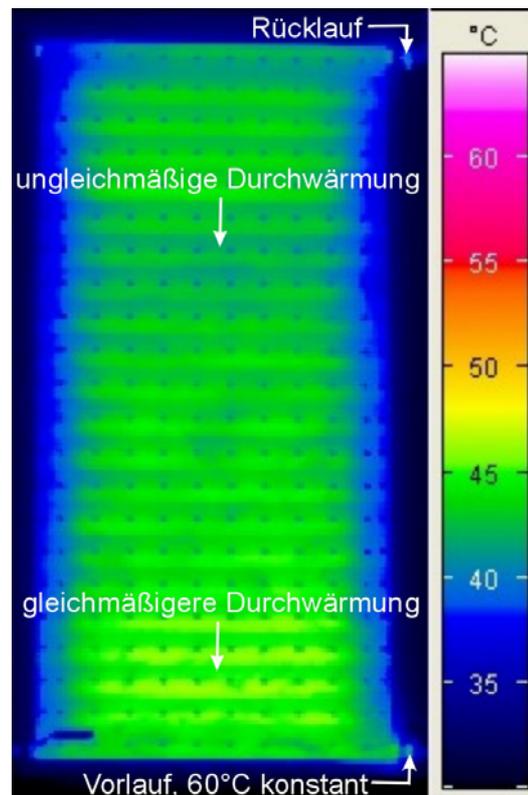


Abbildung 14: Thermisches Verhalten verpresster Blech-Rohr-Absorber (*ThermoSolar*)

In Abbildung 15 beziehungsweise Abbildung 16 sind Blech-Rohr-Absorber abgebildet, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Der Harfenabsorber in Abbildung 15 ist ofengelötet, während in Abbildung 16 ein ultraschallgeschweißter Serpentineabsorber dargestellt ist. Es fällt zunächst auf, dass heute engere Rohrabstände gefertigt werden, die üblicherweise im Bereich von maximal 100 mm liegen. Darüber hinaus ist in den letzten beiden Abbildungen eine gleichmäßigere Temperaturverteilung als in Abbildung 14 erkennbar, was auf eine bessere Verbindungstechnik schließen lässt. Im gelöteten Harfenabsorber sind allerdings ebenfalls leichte Defizite bemerkbar.

Thermisches Verhalten von vollflächig verbundenen, teil-volumetrischen Absorbern

Gegenüber Blech-Rohr-Absorbern bieten Absorberbauformen mit direkt in die Bleche eingearbeiteten Wärmeträgerkanälen, engeren Kanalabständen und größerer benetzter Oberfläche den Vorteil, einer homogenen Temperaturverteilung.

Abbildung 17 zeigt die Untersuchung eines mäanderförmigen Stahlblechabsorbers mit großen Kanälen. Aufgrund der ungünstigen Materialauswahl, mit Stahlblechen (geringe Wärmeleitfähigkeit) und einer Blechdicke von jeweils 1 mm ist die Wärmekapazität des Absorbers relativ hoch. Dar-

über hinaus sind die Kanäle in den Blechen verhältnismäßig groß gestaltet, so dass dadurch zusätzlich die Wärmekapazität und damit die Ansprechzeit erhöht werden. Eine gleichmäßige Erwärmung auf 45 °C im Absorberrücklaufbereich (rechte Absorberseite in [Abbildung 17](#)) stellt sich somit erst nach einer längeren Zeit ein. Die Temperatur ist jedoch, verglichen mit den beiden Blech-Rohr-Absorbern, gleichmäßig von Wärmezufuhranschluss zu Wärmeabfuhranschluss verteilt, d.h. es gibt keine größeren Temperaturgefälle zwischen den Wärmeträgerkanälen wie in [Abbildung 13](#) bis [Abbildung 16](#) gezeigt.

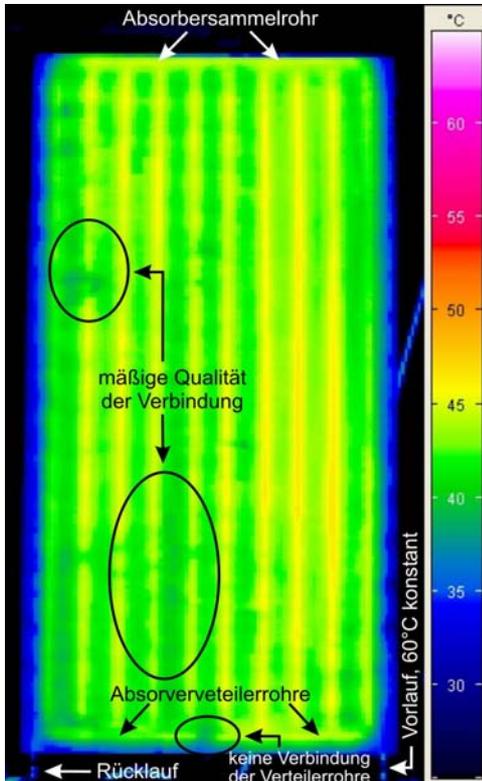


Abbildung 15: Thermisches Verhalten gelöteter Blech-Rohr-Absorber (*Böhm*)

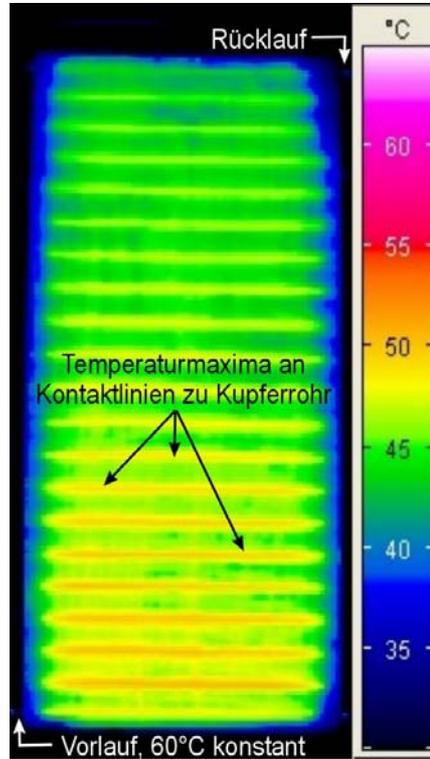


Abbildung 16: Thermisches Verhalten ultraschallgeschweißter Blech-Rohr-Absorber (*Wolf*)

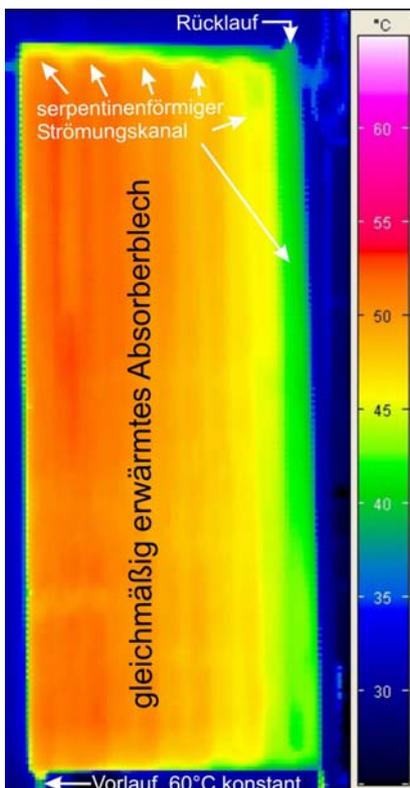


Abbildung 17: Thermisches Verhalten rollnahtgeschweißter Stahlblechabsorber (*Bittner*)

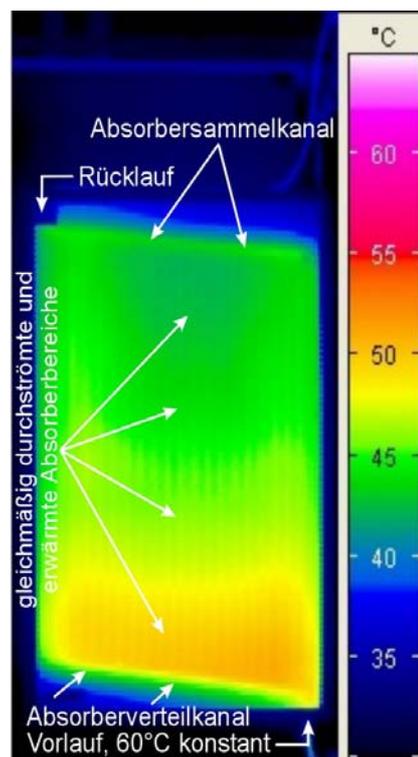


Abbildung 18: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (*Walo*)

Eine Verbesserung des Ansprechverhaltens wird mit der Konstruktion aus Aluminium und dem Rollbondverfahren erreicht. Absorber dieser Bauart kamen bereits vor ca. 26 Jahren zum Einsatz (*BBC*: Solektor, *Walo*: WK12) und zeichneten sich neben einem geringen Gewicht auch durch eine geringe Wärmekapazität bei gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit aus. Abbildung 18 zeigt einen derartigen Absorber nach Erwärmung auf 45 °C im Absorbersammelkanal. Der gesamte obere Teil des Absorbers weist eine gleichmäßige Temperaturverteilung bereits nach sehr kurzer Zeit auf. Des Weiteren erreicht er im unteren Bereich der Wärmezufuhr bereits sehr schnell höhere Temperaturen, so dass eine gute Wärmeabfuhr im realen Kollektorbetrieb erreicht wird.

Im Gegensatz zum Roll-Bond Absorber *Walo* WK12 in Abbildung 18 ist der in den folgenden Abbildungen dargestellte *BBC* Solektor-Absorber in seiner Wärmeträgerkanalstruktur komplizierter aufgebaut. Trotz dieser aufwändigen Kanalstruktur im Verteil- und Sammelbereich des Absorbers zeigt sich eine ungleichmäßige Durchströmung (Abbildung 19). Er war stets im mittleren Bereich schlecht bis kaum durchströmt. Dies kann auf mehrere verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Erstens ist es möglich, dass, trotz aufwändiger und langer Entlüftungsmaßnahmen Luft im Absorber stehen bleibt. Zweitens ist es denkbar, dass der Strömungswiderstand für das Wärmeträgermedium in der Mitte größer ist, als über die linke bzw. rechte Seite des Absorbers. Daher werden weitere Versuche, mit einem Volumenstrom von nicht mehr 2 l/min sondern 4 l/min, durchgeführt. Die Aufnahme in Abbildung 20 zeigt, dass sich die Durchströmung im mittleren Bereich enorm verbessert. Es lässt sich daraus schließen, dass höhere Strömungswiderstände vorhanden sind und der Kollektor daher auch mit einem höheren Durchfluss betrieben werden muss. Bei Erfüllung dieser Voraussetzungen ist ebenfalls eine nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung über der Absorberoberfläche erreichbar, wie Abbildung 20 zeigt.

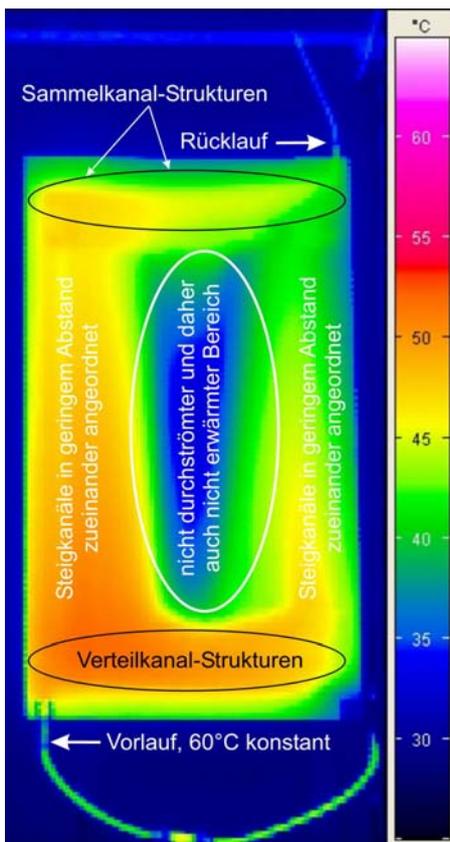


Abbildung 19: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (*BBC* Solektor, 2 l/min)

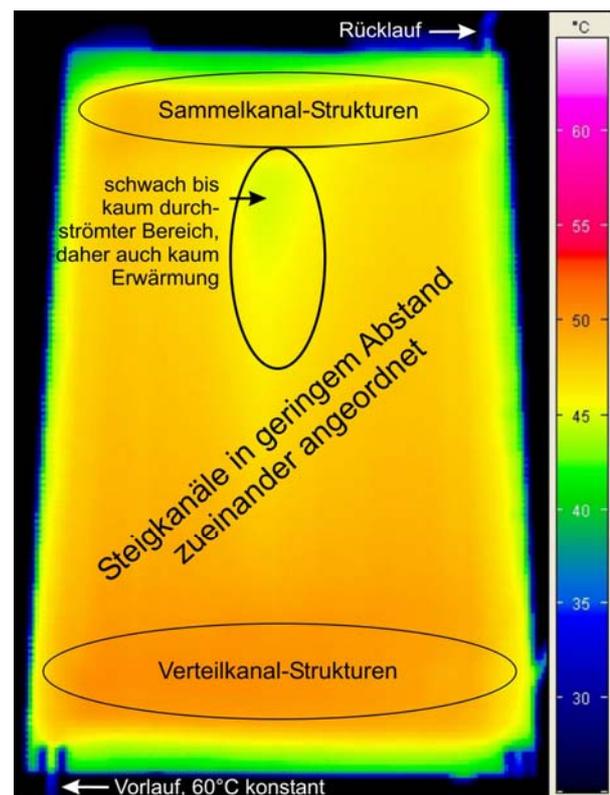


Abbildung 20: Thermisches Verhalten Roll-Bond-Absorber (*BBC* Solektor, 4 l/min)

Thermisches Verhalten volumetrischer Absorber

Eine Untersuchung des im *Stiebel Eltron* SOL 20 eingebauten, punktgeschweißten Stahlblechabsorbers, als einzigem im Projekt vorhandenen volumetrischen Absorber, konnte aufgrund von Leckagen an den Widerstandsschweißpunkten, siehe Abbildung 21, nicht durchgeführt werden. Es sind insgesamt sieben Kollektoren dieses Typs vorhanden, allerdings sind sämtliche Absorber undicht. Es wird davon ausgegangen, dass die kurze Zeit zwischen der Demontage der Kollektoren

und den Untersuchungen zu Korrosionsschäden geführt hat, da kein Wärmeträgermedium und damit auch kein Korrosionsinhibitor mehr die Absorberinnenflächen benetzte und der Luftsauerstoff direkt angreifen konnte. Instandsetzungsversuche mit verschiedenen Schweißverfahren, darunter auch einem sehr schonenden Schweißlötverfahren, führten zu keinem Erfolg.

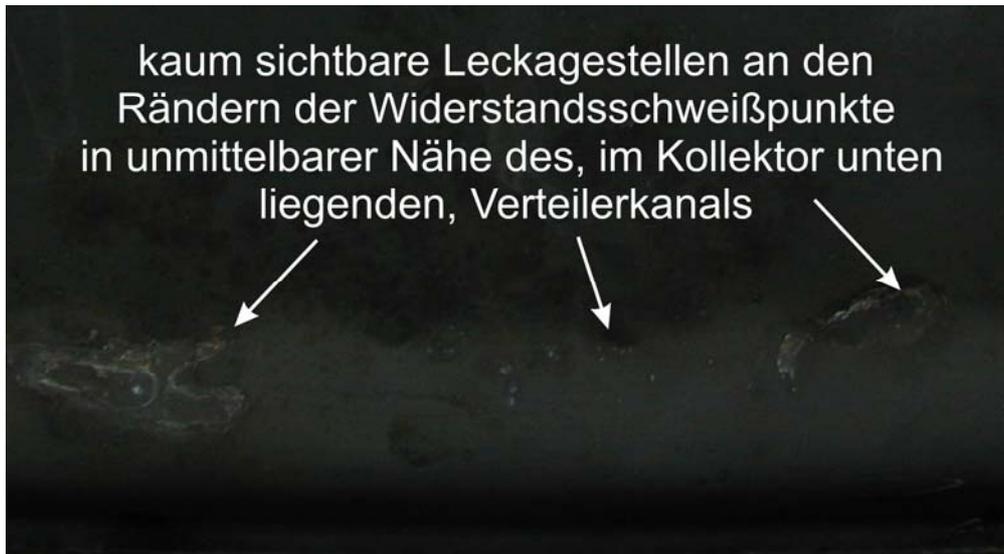


Abbildung 21: Undicht gewordener punktgeschweißter Stahlblechabsorber (Stiebel Eltron SOL 20)

Fazit der thermischen Untersuchungen

Die vorgenommenen Untersuchungen zeigen deutlich, dass teil-volumetrisch durchströmte Absorber, bei richtiger Dimensionierung, ein gutes Ansprechverhalten und eine gleichmäßigere Temperaturverteilung über die strahlungsabsorbierende Fläche aufweisen können als Absorber nach dem Blech-Rohr-Prinzip.

Ein schnellerer Wärmeabtransport in das Wärmeträgermedium und eine geringere Belastung der Verbindungstechnik sind somit die positiven Effekte einer gleichmäßigen Temperaturverteilung dieser volumetrisch durchströmten Absorberbauformen bei realem Kollektorbetrieb.

4 Ist- bzw. Forschungsstand

4.1 Entwicklungsstand Absorbertechnik

Der Stand der Absorbertechnik ist im Grunde genommen seit Mitte der achtziger Jahre unverändert bezüglich des Aufbaus von Absorbern. Blech-Rohr-Systeme unterscheiden sich lediglich in der Art der Verbindungstechnik, wie in [Kapitel 4.2](#) näher dargestellt. Nur sehr wenige Forschungsvorhaben beziehungsweise Entwicklungen beschäftigen sich grundlegend mit dem Absorbereaufbau. Dazu gehört ein Projekt, das strömungsoptimierte Fluidkanäle in Solarabsorber integriert. Die Wärmeträgerkanäle sind dabei Blutbahnen oder Strukturen von Blättern nachempfunden und werden mathematisch über Fraktale beschrieben [16]. Eine Optimierung dieser Strukturen hinsichtlich hoher thermischer Effizienz und geringem Druckverlust wird in diesem Projekt ebenfalls durchgeführt und erfolgt über Evolutionsstrategien.

Ein anderes, praktisch orientiertes Projekt entwickelt einen volumetrisch durchströmten Absorber, aufgebaut aus Stahlblechen mit einer integrierten Einströmvorrichtung [17]. Die Strömungskanäle bilden dabei hexagonale Strukturen, die über Innenhochdruckumformen erzeugt werden. Dieses Projekt befindet sich momentan im Endstadium der Prototypen- hin zur Nullserienfertigung.

Bezüglich neuer Werkstoffe werden auch vereinzelt Entwicklungen durchgeführt, wie am Beispiel eines komplett aus Kunststoff gefertigten Kollektors zu sehen ist [18]. Dabei wurde jedoch nicht nur das Gehäuse aus Kunststoff entworfen, sondern auch der Absorber. Aufgrund der hohen Anforderungen im Stillstandsfall erfordert diese Kunststoffmaterialkombination jedoch spezielle Schutzmaßnahmen.

Neben dem Aufbau von Absorbern ist eine beachtenswerte Entwicklung der selektiven Schichten in den letzten Jahren zu verzeichnen. Neben der Umsetzung hoher Absorptionsfaktoren konnte vor allem der Emissionsfaktor vermindert werden, wodurch sich die Wärmeverluste des Absorbers reduzieren. Eine weitere wichtige Errungenschaft dieser neuen Beschichtungstechnologien ist der geringere Energieaufwand und die umweltschonendere Herstellung dieser trockenen Verfahren im Vergleich zu den früher üblichen nassen Verfahren wie z. B. Schwarzchrom.

4.2 Übersicht marktüblicher Verbindungstechniken

Der Schwerpunkt vieler Kollektor- bzw. Absorberhersteller liegt heute in der Verbesserung bzw. Weiterentwicklung der Verbindungstechnik zwischen Blech und Rohr. Das noch vor mehreren Jahren sehr verbreitete Ofenlöten sowie auch das aus der Elektroindustrie adaptierte Wellenlöten wird zunehmend verdrängt durch Fertigungsverfahren, die sowohl in der Herstellung als auch im Kollektorbetrieb stabilere Ergebnisse liefern.

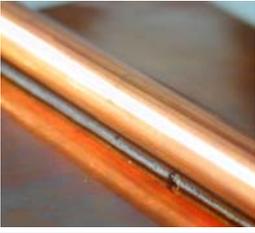
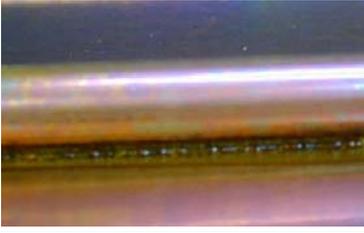
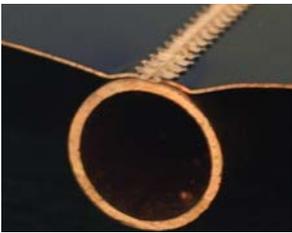
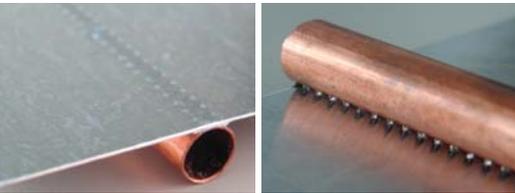
[Tabelle 10](#) gibt einen Überblick über heute übliche Verbindungsverfahren zwischen Absorberblech und den Wärmeträgerrohren.

4.3 Schwächen der Blech-Rohr-Verbindung

Heutige Absorberbauformen stoßen technologisch und wirtschaftlich an ihre Grenze, wie das Jahr 2001 in besonderer Weise durch Produktionsengpässe beziehungsweise instabile Fertigungsqualität und damit verbundenen hohen Nacharbeitungsraten zeigte. Daraus ergeben sich für einen thermischen Flachkollektor hohe Herstellkosten, was sich in langen Amortisationszeiten einer Solaranlage, ausgehend vom momentanen Stand des Ölpreises, widerspiegelt [19].

Bei den gegenwärtigen Absorberbauformen nach dem Blech-Rohr-Prinzip besteht das primäre Problem in der Sicherstellung einer dauerhaft stabilen Verbindung zwischen Absorberblech und Wärmeträgerrohr. Der Großteil der Herstellerindustrie beschäftigt sich also mit der Lösung des Verbindungsproblems ohne alternative Bauformen näher zu untersuchen. Dabei zeigen jedoch die nachfolgenden Punkte die bestehenden Nachteile des Blech-Rohr-Absorbertyps.

Tabelle 10: Übersicht heutiger Verbindungsverfahren

	<p>Roll-, Klemm- bzw. Pressverfahren</p> <p>Die Rohrleitung(en) werden mit dem Absorberblech über Roll-, Klemm- oder Pressverfahren verbunden. Es entsteht keine stoffschlüssige Verbindung.</p> <p>Kaum mehr angewendetes Verfahren.</p>
	<p>Klebeverfahren</p> <p>Die Rohrleitung(en) werden über einen möglichst hochtemperaturbeständigen Klebstoff mit dem Absorberblech verbunden.</p> <p>Sehr selten angewendetes Verfahren.</p>
	<p>Ofenlöten</p> <p>Die Rohrleitung(en) werden im ersten Schritt in einem Ofen aufgeheizt, anschließend wird entlang der Rohrleitungspositionen am Absorberblech eine Masse aus Lot und Flussmittel aufgebracht. Das Absorberblech und die Rohrleitungen werden anschließend zusammen im Ofen miteinander verlötet.</p>
	<p>Wellenlöten</p> <p>Beim Wellenlöten werden in einem Lotbad über Pumpsysteme Wellen erzeugt. Das Absorberblech wird mit der darunter befindlichen Rohrleitung über den Wellenkamm geführt, wodurch im Bereich der Rohrleitung diese mit dem Absorberblech über das Lot verbunden wird.</p> <p>Das Wellenlöten wurde vom Hersteller A/So vor ca. einem ½ Jahr eingestellt.</p>
	<p>Ultraschallschweißen</p> <p>Beim Ultraschallschweißen werden Blech und Rohr über eine Sonotrode und einem Gegenhalter gegeneinander verpresst. Die Sonotrode schwingt dabei zusätzlich mit hoher Frequenz, in einer Ebene senkrecht zum Anpressdruck, wodurch Oxide weggerieben werden und sich die Kontaktflächen vergrößern. Dabei diffundieren Atome/Moleküle beider Werkstoffe ineinander über und ergeben einen gemeinsamen stoffschlüssigen Fügebereich.</p>
	<p>Laserschweißen</p> <p>Beim Laserschweißen wird ein Laserstrahl über eine Optik auf das Werkstück fokussiert und so die für den Aufschmelzvorgang benötigte Energie zugeführt. Um unerwünschte Reaktionen zu verhindern wird die Schweißstelle mit Schutzgas umspült. Laserschweißen hat allerdings eine hohe Energiedichte, weshalb der Laserstrahl gepulst und nicht kontinuierlich auf das Absorberblech trifft. Das Laserschweißen kann sehr genau gesteuert werden, so dass ein geringer Wärmeverzug vorhanden ist.</p>
	<p>Plasmaschweißen</p> <p>Plasmaschweißen ist eine Weiterentwicklung des WIG-Schweißens, bei der durch eine gekühlte Düse der Lichtbogen eingeschnürt wird, um so eine höhere Energiedichte zu erzielen. Dem Schutzgas wird dabei ein Plasmagas zugeführt, welches nochmals die zur Verfügung stehende Energie steigert. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für dünne Bleche (> 0,01 mm). Gegenüber dem Laserschweißen zeichnet es sich durch geringere Anschaffungskosten aus, allerdings ist der Wärmeverzug dieses Verfahrens höher.</p>

1. Schwäche: Hoher thermischer Widerstand

Werden die Hauptfunktionen des Absorbers betrachtet, nämlich die Umwandlung der Strahlungsenergie in thermische Energie und deren Weitertransport an einen Wärmeträger, so ist festzustellen, dass die heutigen Absorberkonstruktionen diese mittels mehrerer einzelner Komponenten umsetzen: Absorberblech, Verbindungselement zwischen Blech und Rohr, Rohr selbst. Der gesamte thermische Widerstand von der einstrahlenden Fläche bis zum Wärmeträgermedium ist damit sehr groß (Abbildung 22).

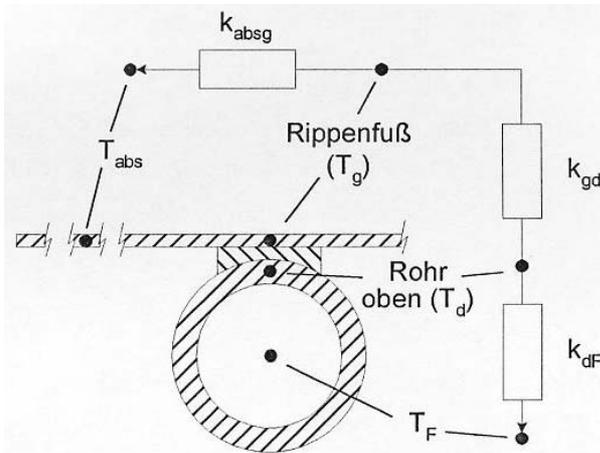


Abbildung 22: Thermisches Ersatzschaltbild Absorber [20]

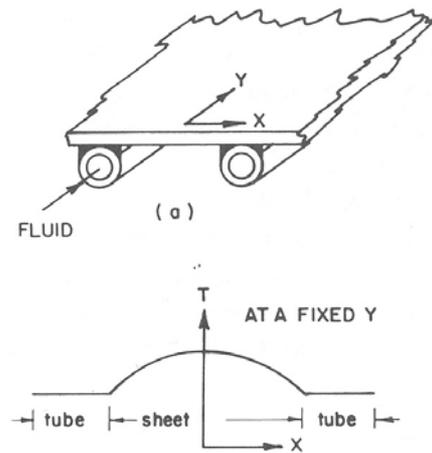


Abbildung 23: Temperaturverteilung Absorber [5]

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, erfolgt die Umwandlung der Strahlungsenergie in thermische Energie am Absorberblech. Anschließend muss diese Energie über Wärmeleitung im Absorberblech zur Verbindungsstelle (Rippenfuß) und über diese Verbindungsstelle (Löt-, Schweißnaht, ...) zum Wärmeträgermedium führenden Rohr geleitet werden. Hier findet dann letztendlich erst der Wärmeübergang auf das Wärmeträgermedium statt. Aufgrund des konstruktiven Aufbaus, d.h. der Anordnung von wärmeabführenden Rohren in bestimmten Abständen unter dem Absorberblech und der vielen thermischen Widerstände, stellt sich auf dem Absorberblech zwischen den Röhren ein Temperaturmaximum ein (Abbildung 23).

2. Schwäche: Fertigungstechnik

Eine weitere, durch die Bauform verursachte Schwäche liegt in der Herstellung der Verbindung zwischen dem selektiv beschichteten Absorberblech und den darunter angebrachten Rohrleitungen. Bei einer Betrachtung des Marktes ist festzustellen, siehe auch Kapitel 4.2, dass fast alle Absorberhersteller derzeit auf der Suche nach einer zuverlässigen Verbindungstechnik sind.

Tabelle 11 gibt eine Übersicht über die momentan am häufigsten angewendeten Verbindungsverfahren und deren spezifische Probleme.

Der Schwerpunkt aller Herstellungsverfahren liegt derzeit noch auf Löten bzw. Ultraschallschweißen. Daneben wird derzeit die Laserschweißverbindung von verschiedenen Herstellern untersucht bzw. eingeführt. Auf die verschiedenen Verbindungsarten wird später näher eingegangen.

3. Schwäche: Kollektorbetrieb (hohe Stillstandstemperaturen, Ablösung Blech/Rohr, Instabilität der selektiven Schichten)

Verschiedene Kollektorkomponenten wurden in den vergangenen Jahren stark verbessert (selektive Beschichtung, Antireflex-Abdeckglas, ...), so dass die Stillstandstemperaturen des Kollektors über 200 °C ansteigen können. Dies wiederum kann bei verschiedenen Verbindungstechniken, insbesondere beim Löten, zu einem Festigkeitsverlust führen.

Ein weiterer Nachteil im Fall von gelöteten Absorbern, sind Flussmittelrückstände im Lot, die bei hohen Temperaturen ausgasen und sich auf der kälteren transparenten Abdeckung niederschlagen können [3]. Die selektiven Schichten selbst können bei hohen Stagnationstemperaturen instabil reagieren, so dass sich deren Absorptions- und Emissionseigenschaft verschlechtert und eine Verfärbung der Beschichtung auftritt.

Tabelle 11: Fertigungstechniken heutiger Blech-Rohr-Absorber

	Fertigungsverfahren	Schwachpunkte
stoffschlüssige Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> Punktschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> nicht bei allen Metallen möglich Korrosionsgefahr hohe Strömungsgeschwindigkeiten in unmittelbarer Schweißpunktnähe im Kollektorbetrieb
	<ul style="list-style-type: none"> Löten 	<ul style="list-style-type: none"> niedrige Verarbeitungstemperaturen → keine hohen Stillstandstemperaturen zulässig → Ablösen Blech-Rohr im Betrieb Ausgasungen von Flussmittelrückständen im Lot → Niederschläge auf Abdeckung bzw. Absorber
	<ul style="list-style-type: none"> Ultraschallschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> keine durchgängige stoffschlüssige Verbindung Parameterermittlung für Schweißprozess aufwändig → Ablösung Blech-Rohr im Betrieb Verletzung der hochselektiven Beschichtung
	<ul style="list-style-type: none"> Laserschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Verarbeitungstemperaturen → Spannungen bzw. Verformungen im Blech Parameterermittlung für Schweißprozess aufwändig → Ablösung Blech-Rohr → hoher Wärmeeintrag (Verzug bzw. Spannungen) Mikrorisse in Schweißpunkten keine durchgängige stoffschlüssige Verbindung
	<ul style="list-style-type: none"> Plasmaschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> hohe Verarbeitungstemperaturen → hohe Spannungen bzw. Verformungen im Blech Parameterermittlung für Schweißprozess aufwändig → Ablösung Blech-Rohr → hoher Wärmeeintrag (Verzug bzw. Spannungen) Verletzung der hochselektiven Beschichtung
Nicht stoffschlüssige Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> Kleben 	<ul style="list-style-type: none"> niedrige Verarbeitungstemperaturen → keine hohen Stillstandstemperaturen zulässig → Ablösen Blech-Rohr im Betrieb schlechte Wärmeleitfähigkeit der Verbindung
	<ul style="list-style-type: none"> Klemmverbindung in verschiedenen Ausführungen 	<ul style="list-style-type: none"> schlechte Wärmeleitfähigkeit der Verbindung (ungleichmäßige Anpressung durch Werkzeug bzw. Rückfederung des Werkstoffes, z. T. Werkstoffe mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten) aufwändige Biege- und Presswerkzeuge

4. Schwäche: Einschränkung auf die teureren Werkstoffe Kupfer und Aluminium

Schwerpunktmäßig werden heute Aluminium und Kupfer als Absorbermaterialien verarbeitet. Diese Werkstoffe sind jedoch sehr teuer im Vergleich zu Stahl. Alternative Materialien sind jedoch ohne eine Änderung des Absorberaufbaus nicht ohne weiteres einsetzbar.

5. Schwäche: Hohe Herstellkosten

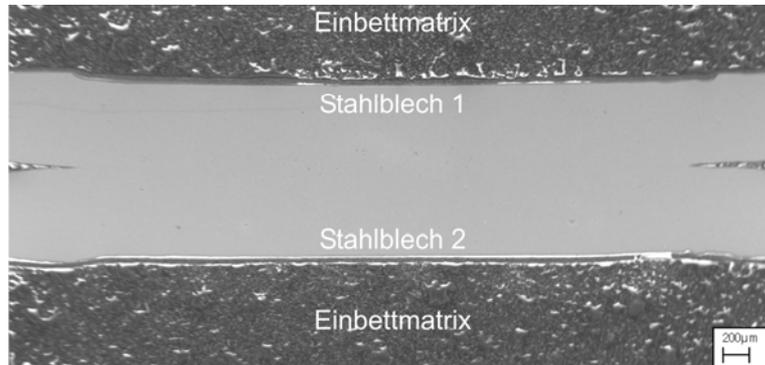
Wie bereits in der Einleitung erwähnt, trägt der Absorber zur Hälfte zu den Herstellkosten eines Kollektors bei [1] bzw. verursachen Kollektoren wiederum nahezu ein Drittel der Gesamtkosten einer Solaranlage [2]. Um die Amortisationszeiten thermischer Solaranlagen zu verkürzen, ist somit die Überarbeitung beziehungsweise Neugestaltung des Absorbers hinsichtlich Fertigungskosten ein viel versprechender Ansatz.

4.4 Untersuchung gängiger Verbindungstechniken

Um eine Ursache für Absorberschäden, durch Ablösen des selektiven Bleches von den Wärmeträgerrohren, in der Verbindungstechnik zu finden, werden marktübliche Absorber unter dem Mikroskop beziehungsweise REM untersucht.

Punktgeschweißte Verbindung

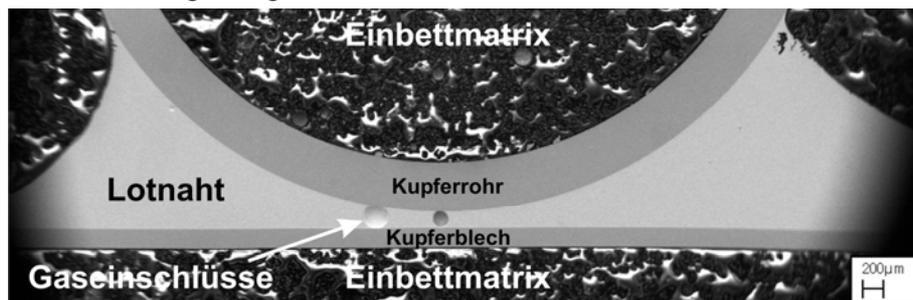
Punktschweißverbindungen spielen heute bei Blech-Rohr Absorbern kaum mehr eine Rolle, da heutige Absorber meist aus Kupfer oder Kupfer-Aluminium bestehen, beide Werkstoffe jedoch sehr schlecht über ein Widerstandsschweißverfahren zu verbinden sind. Hinsichtlich volumetrischer Absorber war und wird dieses Schweißverfahren jedoch genutzt und wurde daher auch untersucht. Die Ergebnisse einer Probe aus einem *Stiebel Eltron*-Kollektor zeigen jedoch eine einwandfreie, stoffschlüssige Verbindung der beiden Stahlbleche, wie aus [Abbildung 24](#) hervorgeht. Dieser Schweißpunkt wurde nicht aus einem nicht-korrosionsgeschädigten Bereich entnommen.



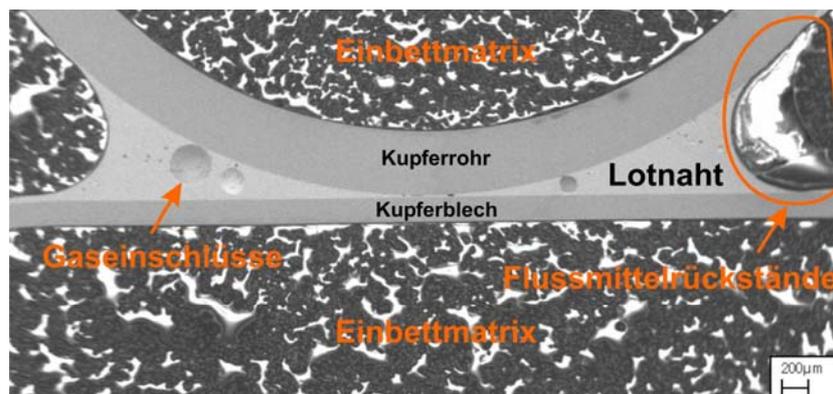
[Abbildung 24](#): Schliffbild einer punktgeschweißten Verbindung (*Stiebel Eltron*; 30fache Vergrößerung)

Gelötete Verbindung

Unter den gelöteten Verbindungen werden Schnittbilder zweier verschiedener Lötverfahren dargestellt, nämlich eine Probe aus einem ofengelöteten Absorber und eine Probe aus einem wellengelöteten Absorber. [Abbildung 25](#) zeigt zunächst den wellengelöteten Absorber in einem Schnitt senkrecht zur Rohrlängsachse. Das Schliffbild zeigt eine nahezu homogene Lotnaht, abgesehen von zwei vernachlässigbaren Gaseinschlüssen, die sich auch großflächig zwischen Wärmeträgerrohr und Absorberblech angesetzt hat und somit eine relativ große Fläche zur Wärmeleitung zur Verfügung stellt. Der ofengelötete Absorber in [Abbildung 26](#) zeigt hingegen eine geringere mit Lot benetzte Oberfläche sowie eine Lotnaht, die mit mehr Gaseinschlüssen durchsetzt ist. Darüber hinaus fällt am rechten Rand der Naht eine Ansammlung von Flussmittel auf, die im Kollektorbetrieb zu unerwünschten Ausgasungen führen kann.



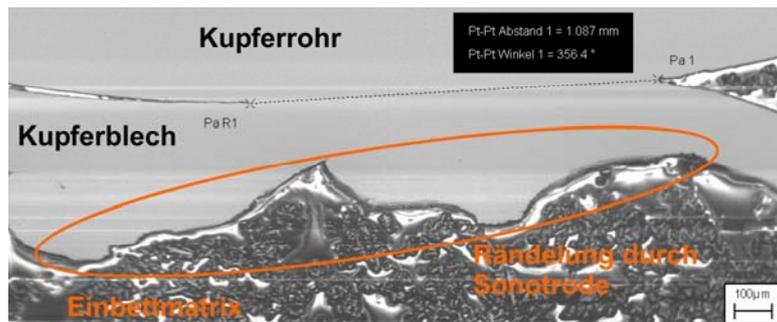
[Abbildung 25](#): Schliffbild wellengelöteter Absorber (19fache Vergrößerung)



[Abbildung 26](#): Schliffbild ofengelöteter Absorber (39fache Vergrößerung)

Ultraschallgeschweißte Verbindung

Die ultraschallgeschweißte Verbindung in [Abbildung 27](#) zeigt eine einwandfreie stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Absorberblech und dem Wärmeträgerrohr aus Kupfer.

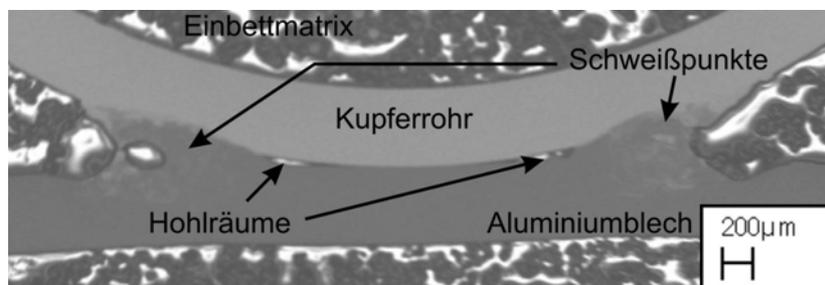


[Abbildung 27](#): Schliffbild ultraschallgeschweißte Verbindung (130fache Vergrößerung)

Nachteilig ist bei dieser Verbindung jedoch die starke Rändelung durch die Sonotrode der Ultraschallschweißmaschine und die damit verbundene Verminderung der Blechstärke in diesem Bereich ([Abbildung 27](#)). Dies führt zu einem erhöhten thermischen Widerstand im Vergleich beispielsweise zum wellengelöteten Absorber. Darüber hinaus werden durch die Ultraschallschweißung das Gefüge sowie die Festigkeit verändert, was zu einer verminderten Wärmeleitfähigkeit in diesen Gebieten führt. Die eigentliche Schweißzone besitzt ebenfalls nur eine sehr geringe Breite von ca. 1 mm für den Energietransport vom Blech zum Rohr.

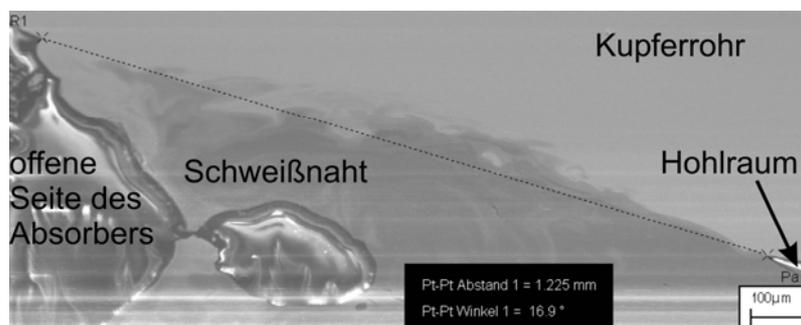
Lasergeschweißte Verbindung

Lasergeschweißte Absorber werden von der Unterseite des Bleches mit dem Rohr verschweißt, d.h. die Schweißpunkte schmelzen nur seitlich die beiden Werkstoffpaarungen auf und dringen nicht bis zum Scheitelpunkt des Rohres durch ([Abbildung 28](#) bzw. [Abbildung 29](#)). [Abbildung 28](#) zeigt, dass das Rohr mit dem Scheitelpunkt am Blech anliegt, jedoch links und rechts Hohlräume vorhanden sind, an denen letztendlich die Schweißpunkte folgen.



[Abbildung 28](#): Schliffbild lasergeschweißte Verbindung (16fache Vergrößerung)

Ein weiterer Schwachpunkt dieser Verbindungsart liegt offensichtlich in der Größe der Schweißpunkte, die, wie in [Abbildung 29](#) dargestellt, nur eine Größe von weniger als 1,5 mm, senkrecht zur Rohrachse, für die Wärmeleitung zur Verfügung stellen (gestrichelte Linie).



[Abbildung 29](#): Laserschweißpunkt – Schliffbild senkrecht zur Rohrachse (118fache Vergrößerung)

Des Weiteren zeigt [Abbildung 30](#), dass der Abstand der Schweißpunkte längs zur Rohrachse mehr als 2,5 mm beträgt (gestrichelte Linie). Bei einer Schweißnahtbreite von ca. 1 mm und einem durchschnittlichen Abstand der Schweißpunkte von 2,5 mm beträgt der nicht verschweißte Bereich

70 mm auf einer Rohrlänge von 100 mm. Das heißt, über 70 % dieser Strecke liegt das Rohr ohne Schweißverbindung nur am Blech an; nur 30 % stehen für den Wärmetransport zur Verfügung.

Ein nicht zu unterschätzender Nachteil, der speziell bei der Verschweißung zweier verschiedener Metalle auftritt, ist die große Härte und damit geringe Duktilität der entstehenden intermetallischen Phasen. So konnten an der lasergeschweißten Verbindung zwischen dem Aluminiumblech und dem Kupferrohr im Bereich der intermetallischen Phasen bereits in ungebrauchtem Zustand Mikrorisse festgestellt werden, wie in Abbildung 31 ersichtlich ist. Ein Lösen der Verbindung im Betrieb ist dadurch nicht zwangsweise die Folge, allerdings können diese feinen Risse Ausgangspunkte für ein Risswachstum aufgrund der Temperaturwechselbeanspruchung der Bauteile sein.

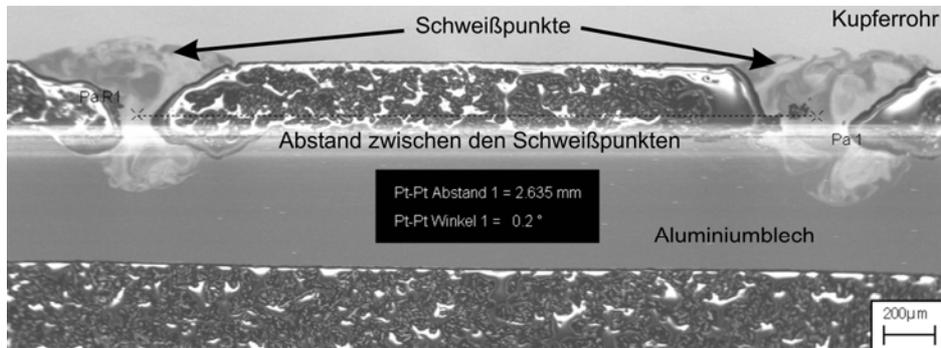


Abbildung 30: Laserschweißpunkte – Schliffbild längs zu Rohrachse (127fache Vergrößerung)

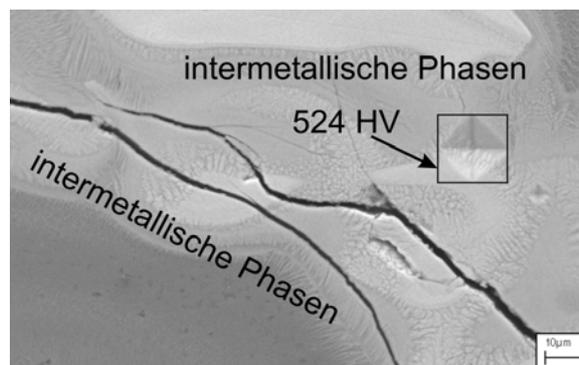


Abbildung 31: Mikrorisse in Laserschweißpunkt – Schliffbild senkrecht zu Rohrachse (1060fache Vergrößerung)

Plasmageschweißte Verbindung

Ebenso wie die ultraschallgeschweißte Verbindung zeigt die plasmageschweißte Verbindung in Abbildung 32 eine homogene stoffschlüssige Verbindung, jedoch mit dem Vorteil, keine Verfestigung und damit Querschnittsverengungen und Änderung der Wärmeleiteigenschaften im Schweißbereich zu hinterlassen. Allerdings ist die geschweißte Anbindung zwischen Kupferrohr und Kupferblech ebenfalls nur etwa 1 mm breit und stellt damit, wie die Ultraschallschweißung, nur eine kleine Wärmebrücke für den Energietransport zum Wärmeträgermedium zur Verfügung.

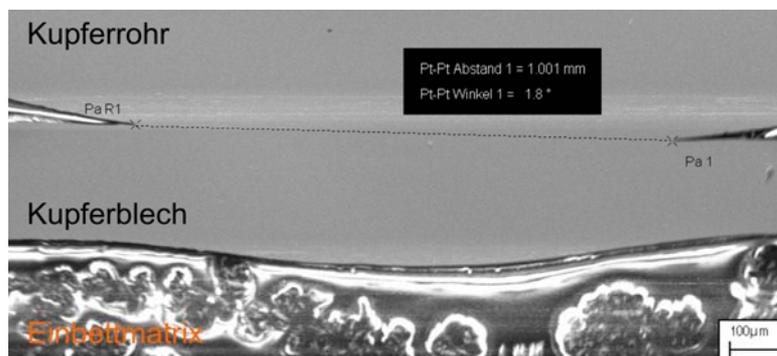


Abbildung 32: Schliffbild plasmageschweißte Verbindung (108fache Vergrößerung)

5 Absorber-Konzeptentwicklung

5.1 Definition der Anforderungen an den Absorber

In der Konzeptphase kommt der Klärung der Aufgabenstellung besondere Bedeutung zu, d.h. sie muss zu Beginn umfassend und vollständig geklärt werden. Für die Entwicklung beginnt hier die Informationsbeschaffung hinsichtlich Umfeld, Kundenwünschen sowie Einarbeitung des Lastenheftes des Auftraggebers. Sämtliche Informationen ergeben schließlich die Anforderungsliste. Die Anforderungsliste stellt somit die Zusammenstellung aller wichtigen Daten und Randbedingungen mit möglichst genauer Beschreibung und Quantifizierung dar. Dabei ist jedoch auf eine lösungsneutrale Darstellung zu achten, um keine denkbaren Varianten im Vorfeld auszuschließen.

Um eine übersichtliche und sinnvolle Ordnung der Anforderungen zu erhalten, werden diese in Teilsysteme, Funktionsgruppen oder Hauptmerkmale gegliedert.

5.2 Funktionsanalyse

Erfahrungen und eingefahrene Lösungen verhindern meist Generierung und Anwendung neuer Ideen, die technisch oder wirtschaftlich besser sein könnten. Um diese Vorfixierungen aufzulösen und damit konventionelle Lösungen abzulegen, dient die Methodik der Abstraktion. Beim Abstrahieren wird das Wesentliche vom Unwesentlichen getrennt, so dass der Kern der Aufgabe sichtbar wird. Bei einer treffenden Formulierung dieser, werden wesentliche Bedingungen erkennbar, ohne Lösungen festzulegen. Als Basis für die Abstraktion dient die Anforderungsliste, die auf geforderte Funktionen und auf wesentliche Bedingungen hin analysiert wird, um den Kern der Aufgabe klar darzustellen. Die Abstraktion wird dann schrittweise durchgeführt und die Problemformulierung so breit als möglich entwickelt. Das Ziel besteht darin, sich von vorgegebenen Lösungen zu befreien und damit andere neue Möglichkeiten zu eröffnen. Das Ergebnis der Abstraktion führt zur Funktionsstruktur in Black-Box-Darstellung. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems in Form von Funktionen veranschaulicht. Energie-, Stoff- und Informations- bzw. Signalumsatz dienen als Ein- bzw. Ausgangsgrößen, mit denen die Teilfunktionen untereinander, ausgehend von einer Gesamtfunktion, verknüpft werden. Die Funktionsstruktur stellt die einzelnen Teilfunktionen in ihrer sinnvollsten, kleinsten Einheit übersichtlich dar.

Abbildung 33 zeigt die Funktionsstruktur für die durchgeführte Konzeptentwicklung thermischer Absorber für Flachkollektoren. Die Funktionsstruktur teilt sich dabei in zwei wesentliche Teile auf, nämlich die Führung des Mediums durch die die Strahlung absorbierende Struktur und die Aufnahme der Energie durch das Medium. Der zweite Teil ist definiert durch die Aufnahme der Strahlung und der Umwandlung dieser in thermische Energie durch die Struktur. Der Anknüpfungspunkt des Stoffstromes (=Medium) und des Energiestromes (=Strahlung) findet am Punkt des Energieaustausches statt. Darüber hinaus entstehen verschiedenen Verlustströme, die dem System Energie entziehen.

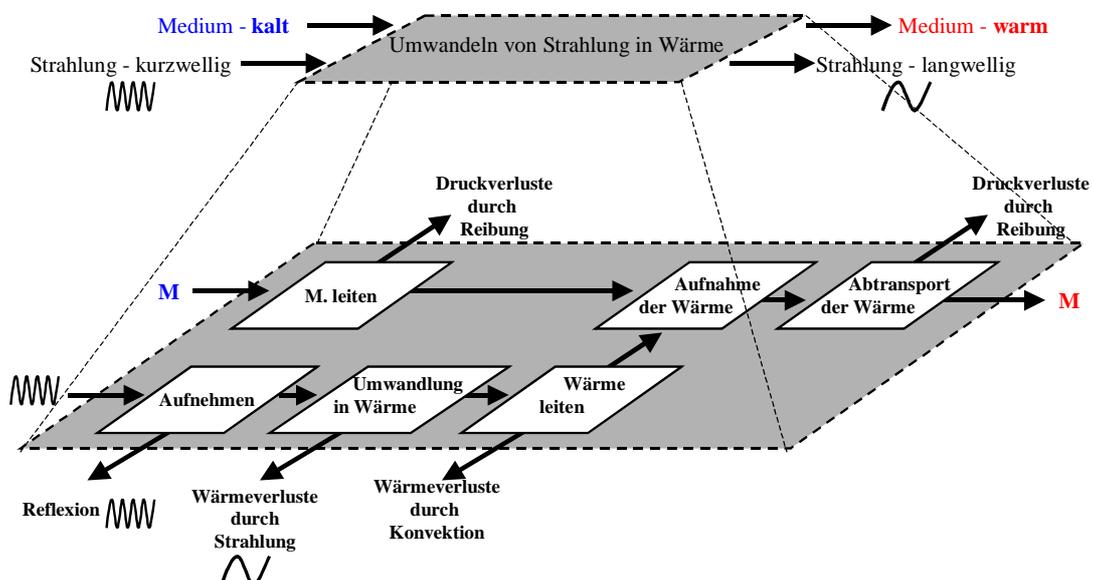


Abbildung 33: Funktionsstruktur thermischer Absorber

5.3 Ideenfindung und Lösungssuche

Die prinzipielle Lösung wird nach dem Festlegen der Teilfunktionen und dem Aufbau der Funktionsstruktur entweder durch die Suche nach physikalischen Effekten oder durch die Suche nach einer geeigneten technischen Ausführung gefunden. Aufgrund des Schwerpunktes in der Konzeptphase, Lösungen zum Leiten des Mediums und zur Aufnahme der thermischen Energie zu finden, werden technische Lösungsmöglichkeiten für diese beiden Funktionen erarbeitet. Die Schwierigkeit besteht jedoch darin, eine turbulente Strömung in der Medium leitenden Struktur zu erreichen um damit den Wärmeübergangskoeffizienten zu erhöhen und gleichzeitig den durch diese Struktur verursachten Druckverlust so gering wie möglich zu halten.

Materialien

Die neuen Absorberkonzepte sind darauf ausgerichtet, heute angewandte Fertigungsverfahren abzulösen beziehungsweise eine höhere Effizienz zu erreichen und geringere Kosten zu verursachen. Dabei stellt sich im ersten Schritt die Frage, welche Werkstoffe sich für eine derartige Umstrukturierung eignen. Neben einem geringen Gewicht bestehen Anforderungen hinsichtlich hoher Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit. Um der wirtschaftlichen Komponente gerecht zu werden, ist eine Berücksichtigung des Rohmaterialpreises ebenfalls notwendig. Abbildung 34 zeigt verschiedene prinzipiell einsetzbare Werkstoffe, die in die nähere Auswahl gezogen wurden.

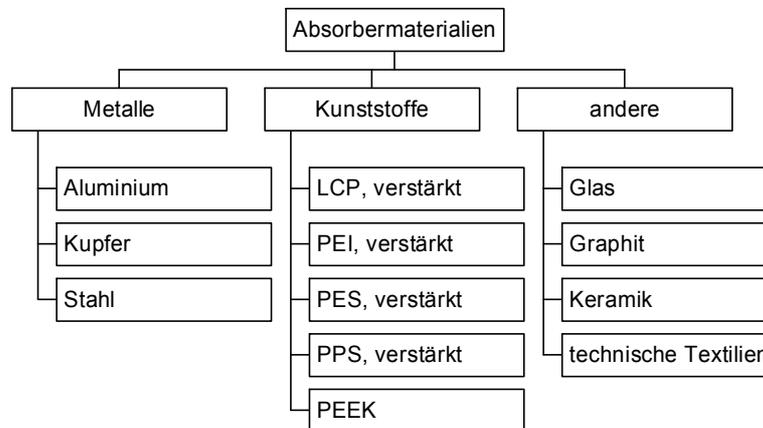


Abbildung 34: Übersicht prinzipiell einsetzbarer Absorbermaterialien

Bei verschiedenen Materialien, wie beispielsweise der Kunststoffgruppe, müssen bei manchen Typen spezielle Vorkehrungen, z. B. zur Sicherstellung der UV-Stabilität, getroffen werden. Ähnliches gilt auch für technische Textilien, die aufbereitet werden müssen, um eine Dichtheit gegenüber Wärmeträgermedien zu erreichen.

Konstruktiver Aufbau des Absorbers

Der Aufbau des Absorbers kann, wie in der Funktionsanalyse dargestellt, in verschiedene Teilaufgaben eingeteilt werden. Dazu gehören im Wesentlichen

- die Leitung des Wärmeträgermediums in der strahlungsabsorbierenden Struktur,
- die Wärmeleitung der strahlungsabsorbierenden Struktur
- und der Wärmeübergang auf das Wärmeträgermedium.

Diese drei Aufgaben greifen jedoch stark ineinander über und können kaum als eigene Lösungsprinzipien dargestellt werden.

Abbildung 35 zeigt die Aufteilung der einzelnen Funktionen mit den jeweiligen Lösungsmöglichkeiten. Integrierbare Strukturen stellen dabei Elemente dar, die in einen vorhandenen Kanal eingebracht werden können, um einerseits eine Führung des Fluids zu ermöglichen und andererseits dessen Strömungsform zu verbessern, um höhere Nußelt-Zahlen für die Wärmeübertragung zu erreichen.

Integrale Strukturen besitzen Geometrien zur Führung beziehungsweise Strömungsoptimierung des Fluids und bilden gleichzeitig die Leitungen aus. Darüber hinaus stellen diese integralen Strukturen gleichzeitig die strahlungsabsorbierende Oberfläche zur Verfügung. Letztere Aufgabe besitzen die ummantelnden Strukturen ebenfalls, wobei ein optimaler Kontakt und damit optimale Wärmeleitung zu den fluidführenden Leitungen über diese Materialien gewährleistet sein muss.

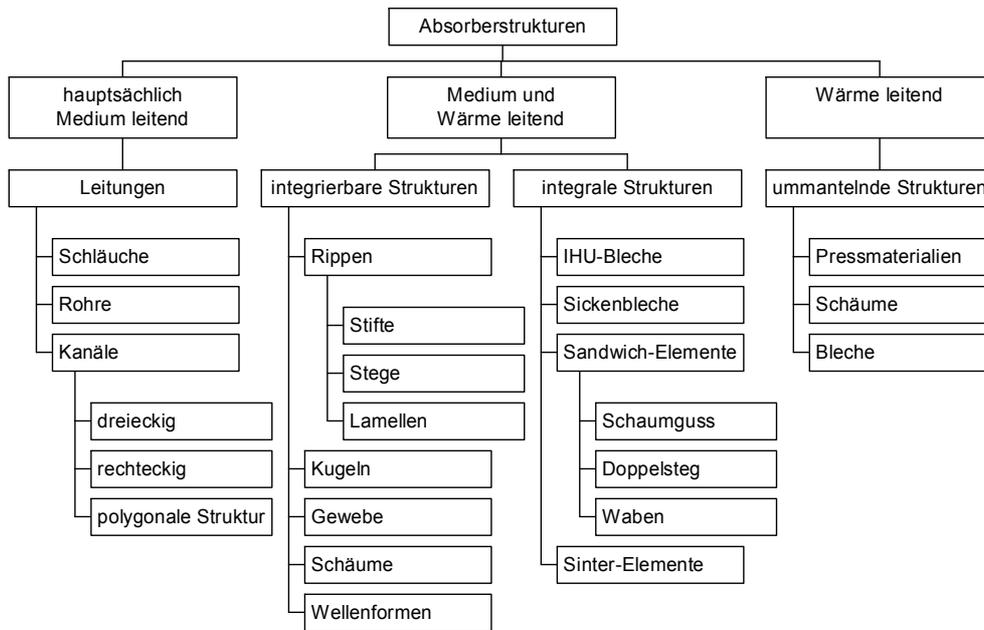


Abbildung 35: Übersicht möglicher prinzipieller Absorberbauformen

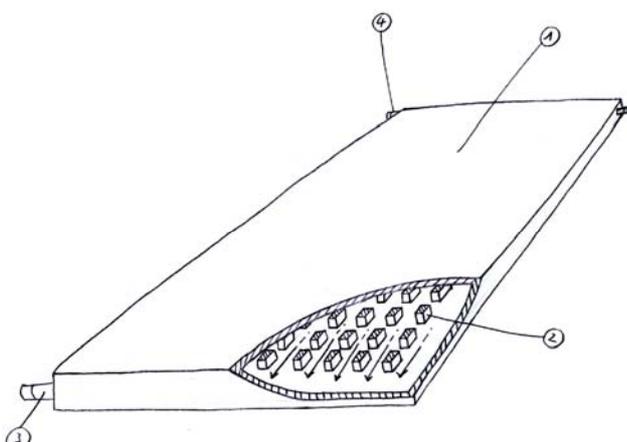
5.4 Skizzierung von Konzepten

Allgemeine Konzeptübersicht

Zur Erarbeitung von Konzepten werden einerseits die während der Ideenfindung mit Hilfe der Funktionsanalyse abgeleiteten, systematisch gefundenen Lösungsprinzipien herangezogen, andererseits erfolgt eine Umsetzung anhand individuell erarbeiteter Lösungsmöglichkeiten.

In den folgenden Abschnitten sind verschiedene Konzepte, geordnet nach Bauform beziehungsweise Material, in Form von Skizzen dargestellt.

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen Absorber auf Kunststoffbasis, wobei in der linken Abbildung zur Verbesserung der Strömungseigenschaften sowie zur Strömungsleitung Rippen eingebracht sind, während dies im rechts dargestellten Konzept über eine Gewebeeinlage erreicht wird.



- 1 strahlungsabsorbierende Oberfläche
- 2 Rippen zur Verbesserung des Wärmeübergangs
- 3 Sammelrohr mit Vorlaufanschluss
- 4 Verteilerrohr mit Rücklaufanschluss

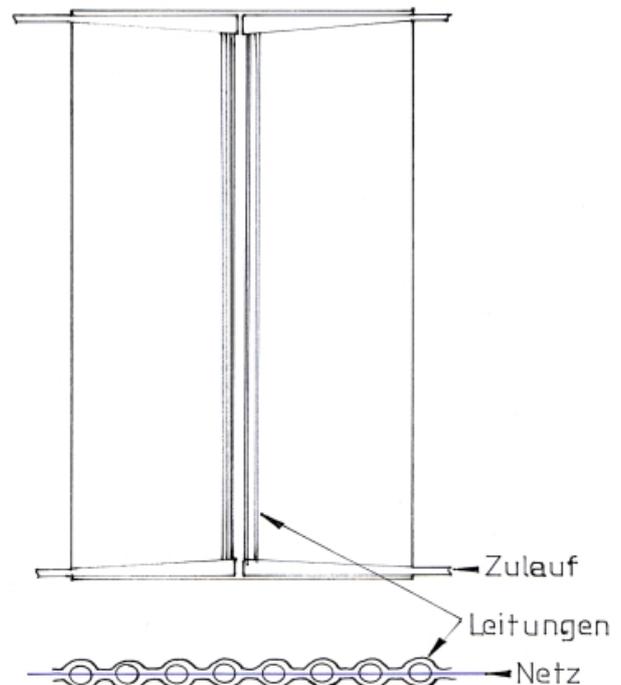


Abbildung 36: Kunststoffabsorber mit Strömungsleitern

Abbildung 37: Kunststoffabsorber mit Gewebeeinlage

Die Absorberkonzepte in [Abbildung 38](#) bis [Abbildung 41](#) bilden eine Gruppe verschiedener Bautypen auf Basis von Metallblechen aus Kupfer, Aluminium oder Stahl.

Der Absorber in Abbildung 38 besteht aus einzelnen Rechteckkanälen mit eingebauten Leitschaukeln beziehungsweise einem großflächig durchströmbarem Rechteckkanal mit einzelnen eingelegten Leitstrukturen. Im Gegensatz dazu besteht der Absorber in Abbildung 39 aus einem Blech mit hydrogeformten Drallkanälen zur Erhöhung der Nußelt-Zahl bei geringem Anstieg des Druckverlustes. Abbildung 40 zeigt einen Absorber mit jeweils entgegengesetzt angeordneten Ausbeulungen, hergestellt beispielsweise durch Tiefzieh- oder ebenfalls Innenhochdruckumformverfahren. In diesem Konzept besteht der Absorber aus einzelnen Finnen, die über Verbindungsrohre verbunden sind und serpentinförmig durchströmt werden. Eine weitere Möglichkeit ist in Abbildung 41 dargestellt, wobei der Absorber in diesem Fall aus zwei verbundenen Blechen mit eingepresstem Serpentin kanal besteht.

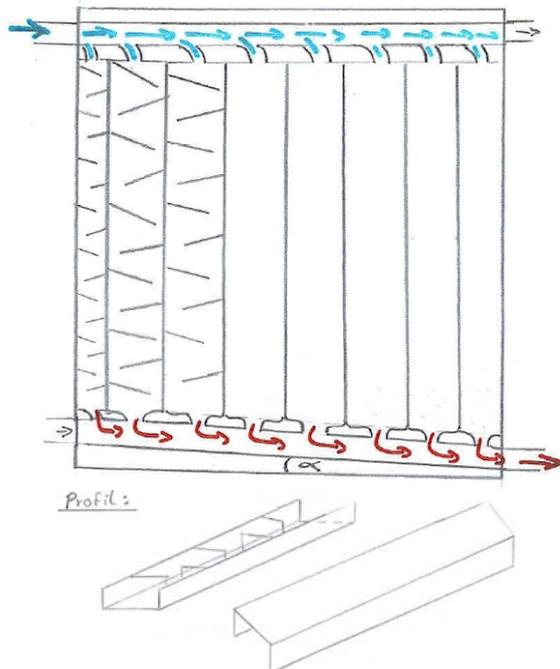


Abbildung 38: Absorber aus Blechprofilen

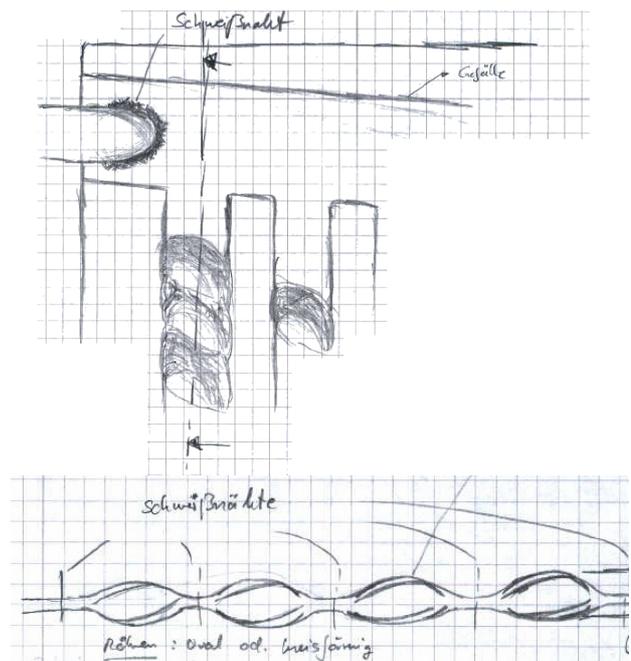


Abbildung 39: Absorber mit hydrogeformten Drallrohren

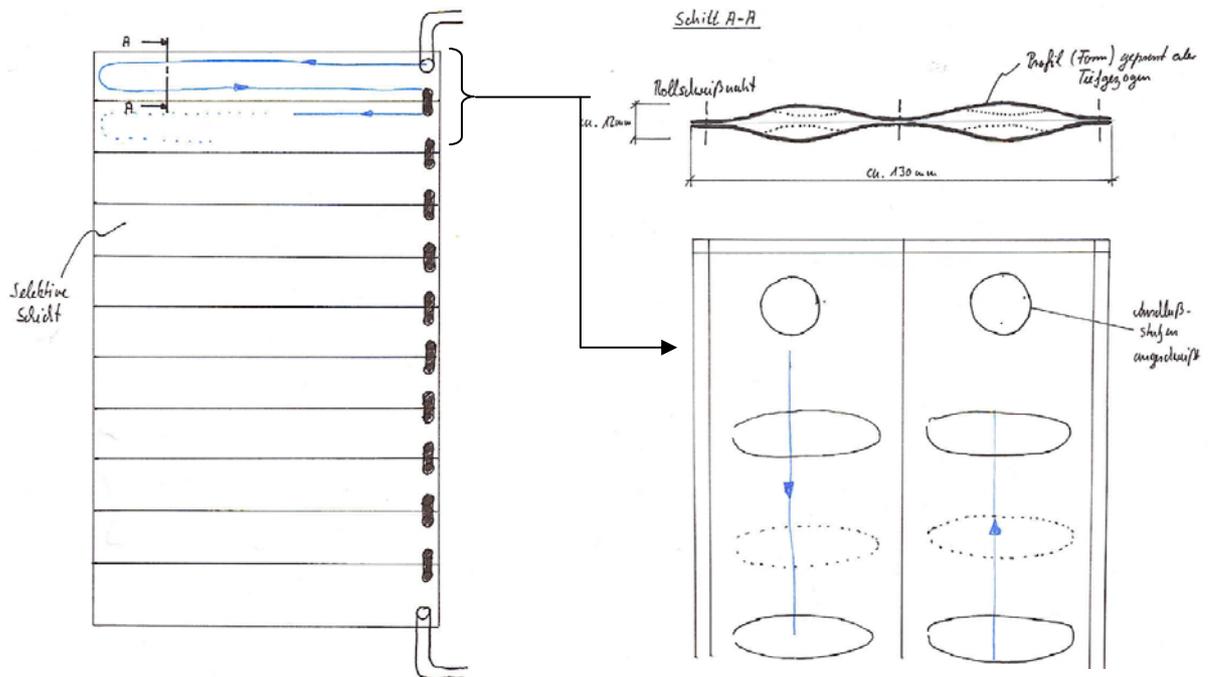


Abbildung 40: Absorber aufgebaut aus Lamellen mit eingepressten Wellen

Abbildung 42 zeigt einen Absorber aus hydrogeformten Rohrstücken, die in bestimmten Bereichen ausgeformt sind um eine größere Strahlungsempfängerfläche zu bieten. Darüber hinaus ist in diesen Bereichen die Kanalhöhe reduziert, um die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Nußelt-Zahl für den Wärmeübergang zu erhöhen.

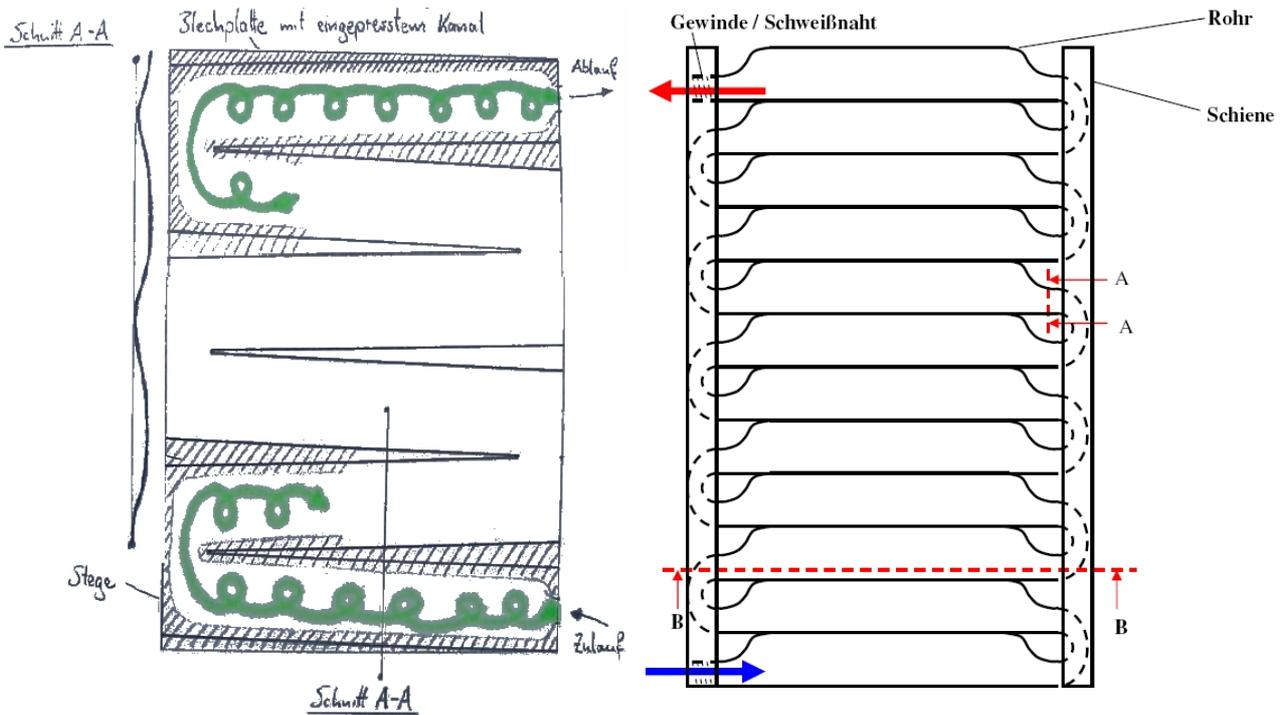


Abbildung 41: Mäander-Absorber mit eingepressten Kanälen Abbildung 42: Absorber mit hydrogeformten Rohrelementen

Abbildung 43 bis Abbildung 45 zeigen Absorber mit eingelegten Strukturen auf Basis metallischer Schäume. In Abbildung 43 ist der Absorber derart gestaltet, dass der Metallschaum zur Verringerung des Druckverlustes nur in bestimmten Bereichen, d.h. Streifen eingebracht ist. Bei den Konzepten in Abbildung 44 und Abbildung 45 besteht der gesamte durchströmbare Bereich aus einer Metallschaumstruktur. Die Konzepte unterscheiden sich lediglich in der Art der Einströmbereiche: einmal über eine geschlitzte Rohreinströmung beziehungsweise in letzterer Abbildung über großvolumige, gesteckte Einströmkanäle.

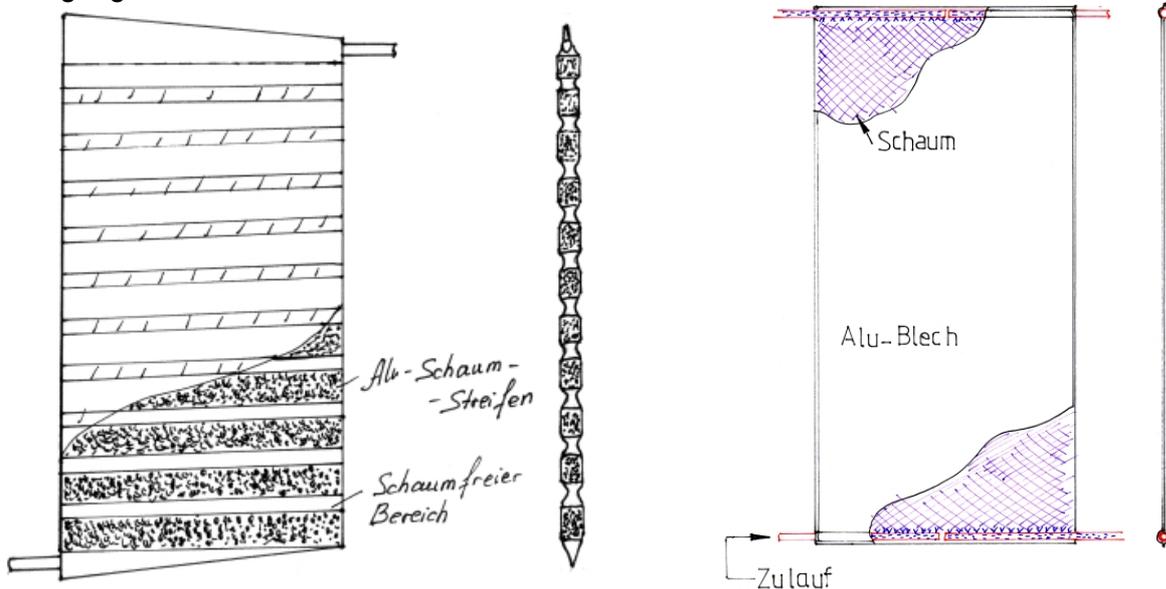


Abbildung 43: Abgesetzter Aluminiumschaum-Absorber Abbildung 44: Schaum-Absorber mit Einströmvorrichtung

Abbildung 46 stellt ein Konzept mit geclinchten Verbindungspunkten zwischen Ober- und Unterblech dar, wobei diese gleichzeitig als Rippen funktionieren und strömungsleitende Aufgaben übernehmen.

Der Absorber in Abbildung 47 wird über ein Roll-Bond-Verfahren hergestellt und besteht aus zwei Blechen die gegeneinander verwalzt sind. Die Strömungskanäle können bei diesem Fertigungsverfahren in relativ geringem Abstand parallel so angeordnet werden, dass eine Erhöhung des Absorberwirkungsgradfaktors einfach möglich ist.

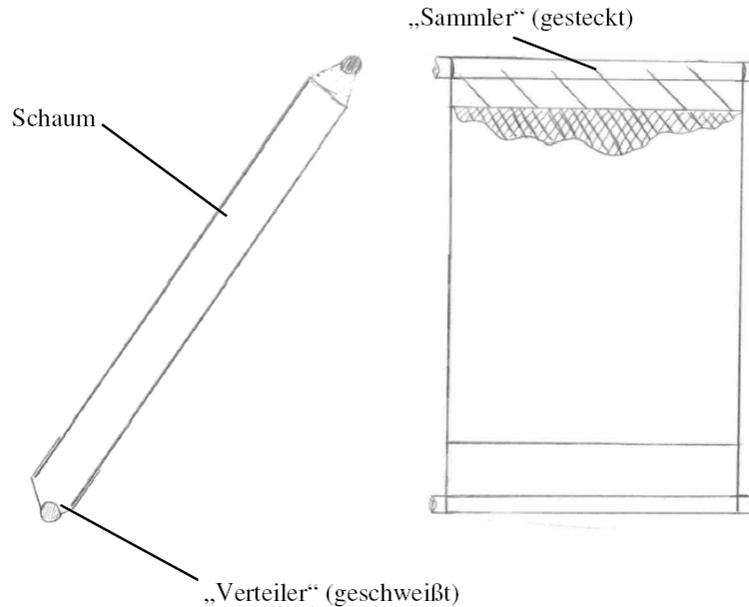


Abbildung 45: Schaum-Absorber mit gesteckter Verteil- bzw. Sammlervorrichtung

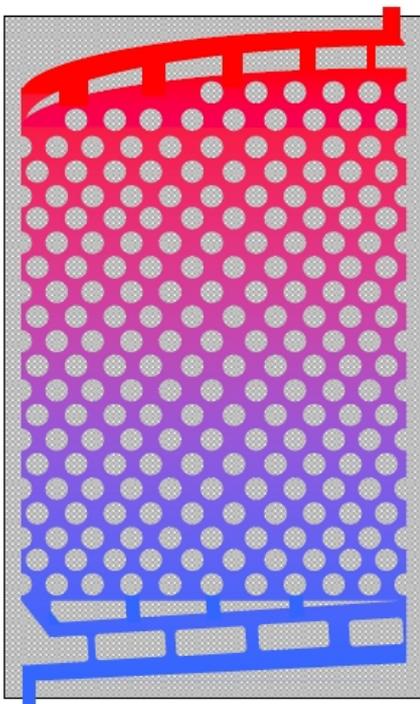


Abbildung 46: Absorber geclincht

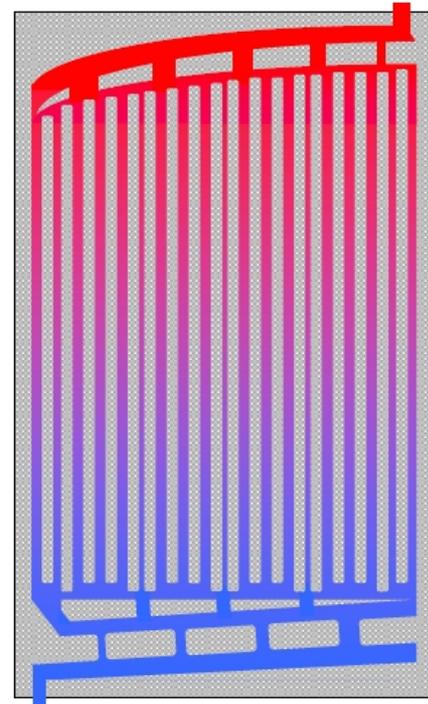


Abbildung 47: Roll-Bond-Absorber

Noppenblech-Absorber

Dieses Konzept basiert auf zwei Blechen, die über ein spezielles Nietverfahren miteinander verbunden werden. Die Nietstellen sind dabei gegenüber dem Wärmeträgermedium dicht und besitzen im Vergleich zu diversen Verbindungsverfahren, wie beispielsweise Schweißen, den Vorteil, dass keine hohe Wärmeeinbringung während der Absorberfertigung stattfindet ([Abbildung 48](#)). Dies reduziert die Korrosionsanfälligkeit in den Verbindungspunkten einerseits und ermöglicht andererseits auch ein Verbinden der Bleche nach einer selektiven Beschichtung. Beschichtungsprozesse müssen daher in diesem Fall nicht auf komplett zu beschichtende Absorber umgestellt werden, so dass eine Weiterverarbeitung in der Absorberfertigung direkt vom Coil entsprechend dem heutigen Stand der Technik möglich ist.

Die Einström- bzw. Ausströmöffnung des Absorbers kann in diesem Fall über ein Verteiler- bzw. Sammelrohr gestaltet werden. Eine weitere Möglichkeit, dargestellt in [Abbildung 48](#), besteht in der Einströmung über das linke Eck des Absorbers und einer speziellen Anordnung der Zylinder zur gleichmäßigen Strömungsverteilung.

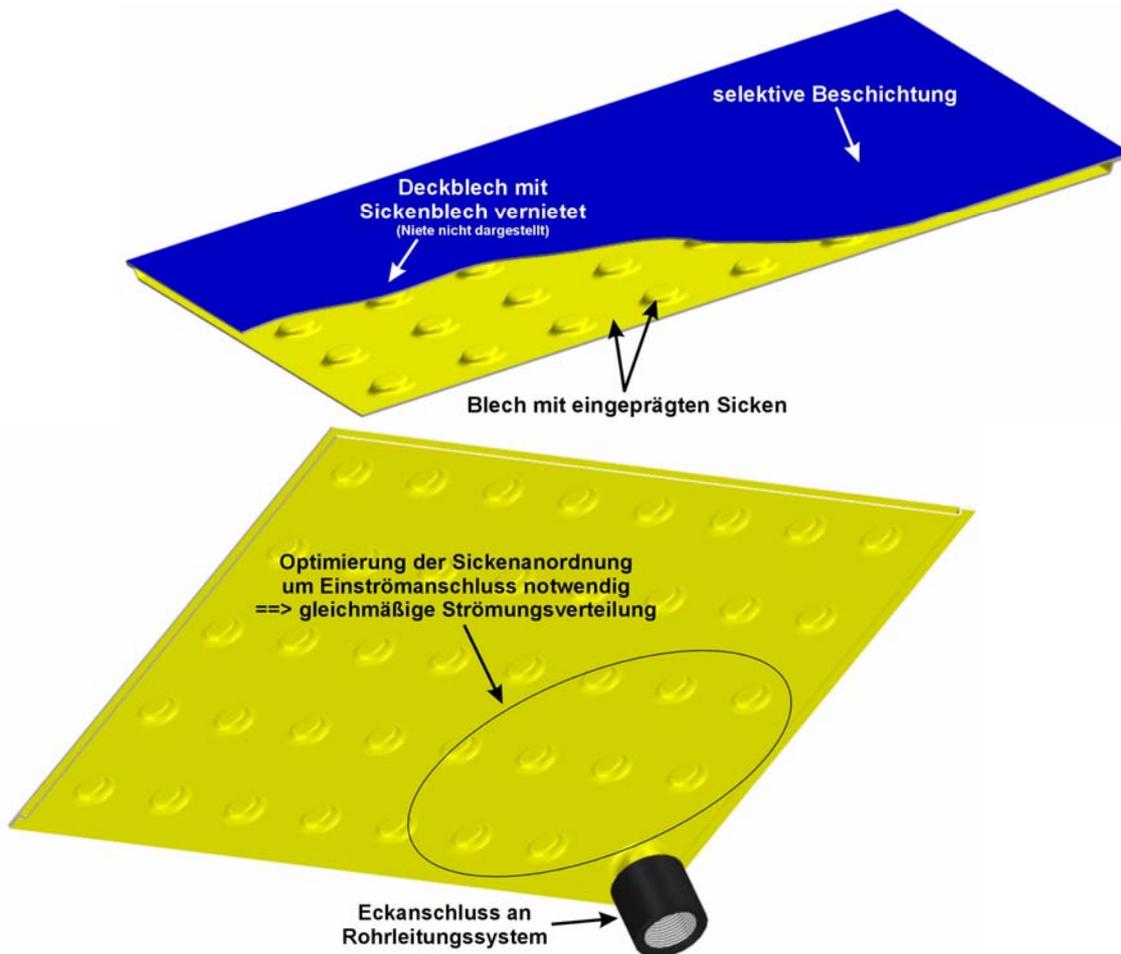


Abbildung 48: Noppenblech-Absorber mit Eckeinström- bzw. Ausströmöffnung

Wellblech-Absorber

Dieses Konzept nutzt ein Leichtbaumaterial, so dass der Absorber prinzipiell aus einer Sandwichplatte besteht. Diese besteht aus zwei Aluminium-Deckblechen, die über ein Wellblech miteinander verbunden sind. Dabei bildet die wellenförmig gestaltete Zwischenlage die Strömungskanäle (Abbildung 49). Der Absorber wird versorgt über ein Verteil- bzw. Sammelrohr, das auf dem Prinzip gleicher Strömungswege basiert und somit eine gleichmäßige Strömungsverteilung garantiert.

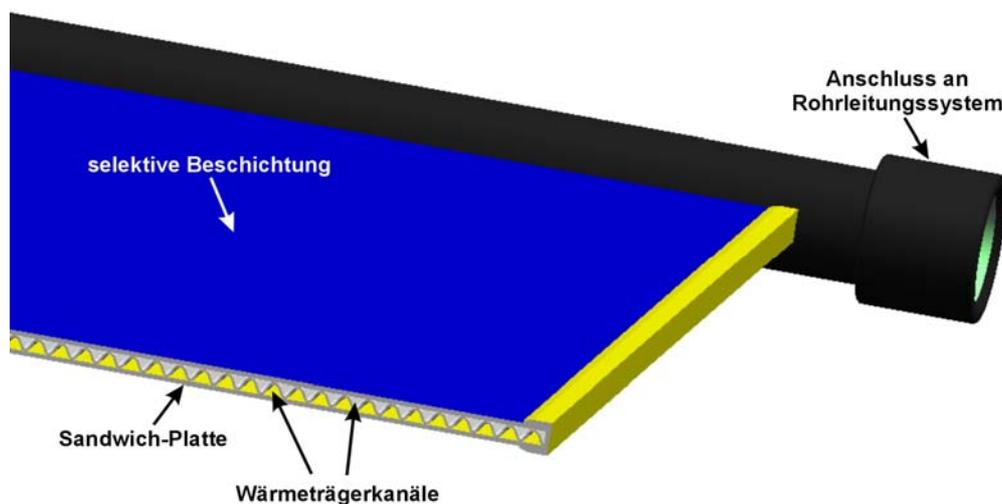


Abbildung 49: Wellblech-Absorber (Sandwich) mit vordefinierten Strömungswegen und großflächiger Durchströmung

Im Gegensatz zum vorigen Konzept ist zum momentanen Zeitpunkt eine genaue Aussage über die Anpassung der für solche Sandwichplatten verwendeten Fertigungsverfahren an die Absorberanforderungen noch nicht möglich. Prinzipiell ist das selektive Beschichten des Absorberbleches mit dem momentanen Fertigungsverfahren jedoch denkbar.

Roll-Bond-Absorber

Das Fertigungsverfahren dieses Absorberkonzeptes wurde bereits vor mehr als 20 Jahren eingesetzt und besteht aus einem Beschichtungs- und einem Warmwalzprozess sowie einem abschließenden Aufblasen entlang der Beschichtungslinien zum Formen der Wärmeträgerkanäle. Aufgrund der großen Flexibilität im Beschichtungsprozess, also dem Formen der Wärmeträgerkanäle, bietet dieses Verfahren einen großen Gestaltungsfreiraum in einem kompakten Gesamtprozess. Abbildung 50 zeigt eine Konzeptvariante mit möglichst großflächigen Wärmeträgerkanälen und gleichzeitig integrierten Verteil- und Sammelkanälen im Absorber. Die Verwendung eines selektiv beschichteten Bleches als Deckblech ist aufgrund des Fertigungsprozesses nicht möglich, so dass die empfangende Fläche, entsprechend den momentanen Erkenntnissen, nachträglich mit einer selektiven Beschichtung versehen werden muss.

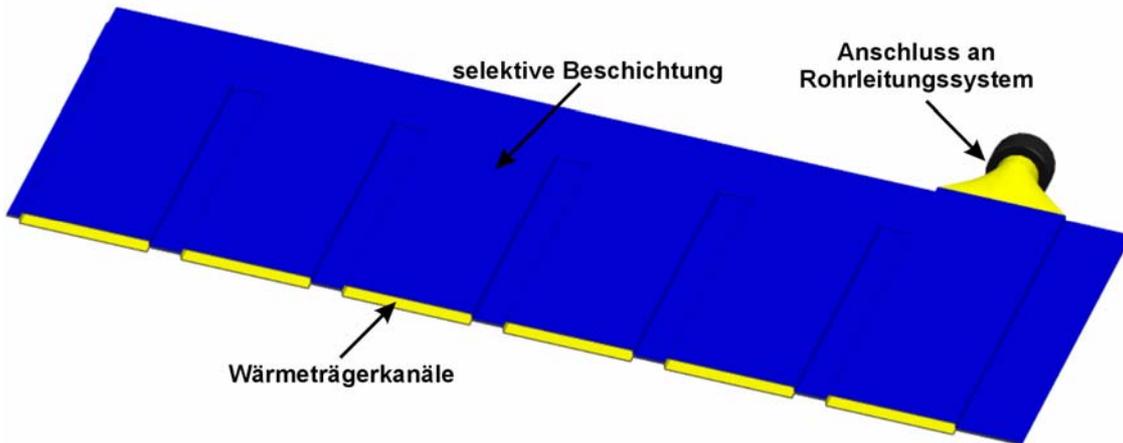


Abbildung 50: Roll-Bond-Absorber mit großflächig durchströmten Wärmeträgerkanälen

Schaummatrix-Absorber

Dieses Konzept basiert zunächst auf einem Blechgehäuse, ähnlich eines sehr breiten und sehr niedrigen Rechteckkanals. In diesen Kanal wird zur Verbesserung der turbulenten Strömung ein offenporiges Metall-Schaummaterial eingebracht, das gleichzeitig vom Deckblech Wärme in die „unteren“ Strömungsschichten leiten kann (Abbildung 51).

Bei Fertigung des Gehäuses für die Schaummatrix aus mehreren Blechstücken, kann als oberes Blech ein bereits selektiv beschichtetes Blech verwendet und mit dem unteren Teil des Gehäuses verbunden werden.

Ähnlich dem zuvor beschriebenen Konzept kommt ein Verteil- bzw. Sammelrohr zum Versorgen des Gehäuses mit innenliegender Schaummatrix zum Einsatz. Allerdings sind hier weitere Vorkehrungen zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Durchströmung des Absorbers, z. B. Leitstrukturen im Verteilerrohr, notwendig.

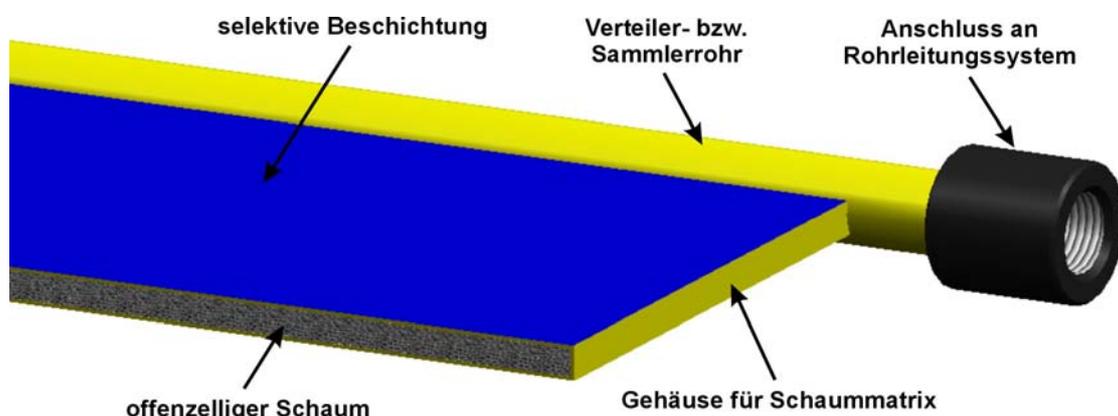


Abbildung 51: Absorber mit Schaummatrix

5.5 Auslegungsberechnung der Konzepte

Die Auslegungsberechnung dient zur Analyse der Konzepte aus technischer Sicht zur Erarbeitung von Eigenschaften für die Konzeptbewertung. Der Schwerpunkt liegt dabei in der vorläufigen quantitativen Beurteilung folgender Aspekte:

- konstruktive Eigenschaften der Absorbergeometrie
 - Menge des Wärmeträgermediums
 - Gewicht
- grundlegende thermodynamische Eigenschaften
- grundlegende strömungstechnische Eigenschaften
 - Anordnung strömungsbeeinflussender Elemente bzw. Matrixmaterialien
 - Druckverlust im Absorber

Die Zielwerte bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Absorbereigenschaften orientieren sich notwendigerweise am heutigen Stand der Technik, also den Blech-Rohr-Absorbern. Ziel ist es, im Großteil der zu betrachtenden Aspekte den Stand der Technik aus technischer (Absorberwirkungsgradfaktor, Druckverlust, ...) und wirtschaftlicher Sicht (Material- und Fertigungskosten) zu übertreffen. Tabelle 12 zeigt die angestrebten Zieldaten.

Tabelle 12: Zieldaten im Rahmen der Konzeptphase

	Wärmeträgerinhalt [l]	Absorbergewicht leer [kg]	Wärmekapazität [kJ/K]	Absorberwirkungsgradfaktor [-]	Druckverlust bei 2 l/min [mbar]	Herstellkosten [€]
Zielwerte	< 3	< 8	< 40	> 0,92	< 60	< 65

Konstruktive Eigenschaften der Absorbergeometrie

Die konstruktiven Eigenschaften des Absorbers spielen zur Festlegung der Größenverhältnisse des Absorberaufbaus eine wichtige Rolle. Darüber hinaus stellen sie eine wichtige Größe für das Absorbergesamtwicht und vor allem für das Ansprechverhalten des Absorbers dar. Die dafür maßgebende Größe ist die Wärmekapazität des Absorbersystems inkl. Wärmeträgerinhalt. Die Berechnung erfolgt anhand der DIN EN 12975-2.

Thermodynamische Eigenschaften

Hinsichtlich der thermodynamischen Eigenschaften werden die unterschiedlichen Konzepte über den Absorberwirkungsgradfaktor F' bewertet. Zum Vergleich dienen ein dem Stand der Technik entsprechender Blech-Rohr-Absorber sowie ein Absorber des Kooperationspartners.

Die Berechnung von Blech-Rohr Absorbern ist ausführlich in [5] dargestellt. Zur Veranschaulichung derjenigen Parameter, die den Absorberwirkungsgradfaktor F' beeinflussen, werden im Folgenden die mathematischen Beziehungen dargestellt und besprochen. So ist F' definiert als

$$F' = \frac{1}{U_L \cdot W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} \right]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}}$$

$$\text{mit } F = \frac{\tanh \left[\frac{m(W - D)}{2} \right]}{m(W - D)} \quad \text{und } m = \sqrt{\frac{U_L}{k \cdot \delta}}$$

Als Basis zur Berechnung dienen die in Tabelle 13 zusammengefassten Annahmen, die heutigen Standardabsorbern entsprechen.

Tabelle 13: Referenzwerte zur Berechnung des Absorberwirkungsgradfaktors

D [mm]	D _i [mm]	W [mm]	δ [mm]	U _L [W/(m ² *K)]	C _b [W/(m ³ *K)]	h _{fi} [W/(m ² *K)]
8	6,8	63 – 100	0,2	4,0	∞	250

Die Diagramme in der folgenden Abbildung 52 zeigen den Einfluss verschiedener Parameter auf den Absorberwirkungsgradfaktor. In den oberen beiden Diagrammen sind Parameter mit geringem Einfluss dargestellt, während in den unteren Diagrammen signifikante Parameter aufgetragen sind. Darüber hinaus sind in den einzelnen Graphen die Werte für heute übliche Kollektoren als strichlierte Linie eingetragen.

Aus der linken oberen Abbildung ist ersichtlich, dass die Wärmeleitfähigkeit des Absorberblechs einen großen Einfluss auf den Absorberwirkungsgradfaktor im Bereich $< 100 \text{ W/(m}^*\text{K)}$ besitzt, dieser jedoch im Bereich über $100 \text{ W/(m}^*\text{K)}$ stark abnimmt. Dies zeigt starke Auswirkungen für Blech-Rohr basierende Kunststoffabsorber, spielt jedoch bei den heutigen qualitativ hochwertigen Kupfersorten keine gravierende Rolle. Auch hinsichtlich volumetrisch durchströmter Kunststoffabsorberarten spielt die Wärmeleitfähigkeit bei sorgfältigem konstruktivem Aufbau eine untergeordnete Rolle, wie Abbildung 55 später zeigen wird.

Das rechte obere Diagramm in Abbildung 52 zeigt, dass die Blechstärke eine mittlere Bedeutung auf den Absorberwirkungsgradfaktor hat. Allerdings steigt die Bedeutung der Blechstärke stark an, wenn der Abstand der Wärmeträgerrohre vergrößert wird. Gleiches gilt auch für den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit, speziell auch bei gut wärmeleitenden Materialien.

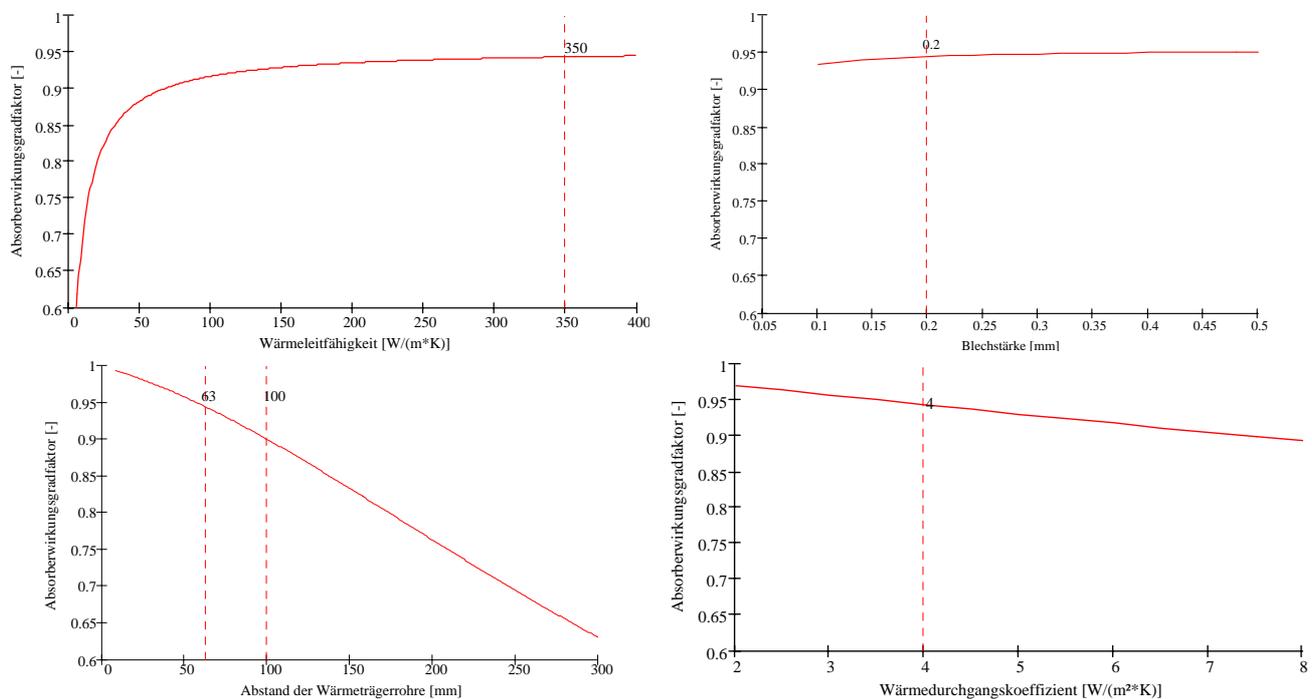


Abbildung 52: Abhängigkeit des Absorberwirkungsgradfaktors von verschiedenen Parametern

Einen über den gesamten Bereich hohen Einfluss besitzt der Abstand der Wärmeträgerrohre, wie im unteren linken Diagramm dargestellt. Darüber hinaus zeigt das Diagramm rechts davon die ebenfalls hohe Bedeutung des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten beziehungsweise der Isolierung des Absorbers.

Eine Weiterentwicklung der heutigen Absorber zielt somit nicht primär auf eine Verbesserung des Wirkungsgrades ab, sondern auf eine Verringerung der Herstellkosten bei mindestens gleich bleibendem Wirkungsgrad. Eine Erhöhung der Absorberblechstärke oder eine Verringerung des Rohrabstandes zur Wirkungsgraderhöhung führt demgegenüber zwangsweise zu steigenden Material- und Fertigungskosten sowie zu einer Erhöhung des Absorbergewichtes [21].

Tabelle 10 in Kapitel 4.2 zeigt die Verbindungstechniken heute üblicher Blech-Rohr Absorber. Die zugehörigen Absorberwirkungsgradfaktoren dieser Technologie zeigt Abbildung 53. Sie bewegen sich im Bereich zwischen 0,88 und 0,975. Ein direkter Vergleich dieser Werte untereinander beziehungsweise mit Absorbern auf dem Stand der Technik ist jedoch nicht möglich, da die Annahmen für die Rippe(=Blech)-Rohr-Geometrien nur teilweise dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Beispielsweise wird in Zeile 5 der Abbildung 53 der Wirkungsgrad eines gelöteten Absorbers mit 0,975 angegeben. Dieser hohe Wert resultiert jedoch aus, wegen der damit verbundenen hohen Kosten unrealistisch großen Blechstärke von 0,5 mm beziehungsweise aus einem Außenrohrdurchmesser von 10 mm sowie einem sehr gering angenommenen Wärmeverlustkoeffizienten von

3,8 W/(m²*K), der wiederum zu einer sehr aufwändigen Kollektorgestaltung, d.h. Isolation führt. Gegenwärtige Harfen-Absorberbauformen bestehen jedoch meist aus Kupferblechen mit einer Stärke von 0,2 mm und Steigrohren mit einem Außendurchmesser von 8 mm. Der Wirkungsgrad erniedrigt sich, insbesondere aufgrund der verringerten Blechstärke, in diesem Fall in einem bereits sehr spürbaren Bereich (vgl. Diagramm rechts oben in Abbildung 52).

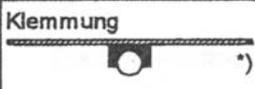
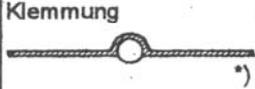
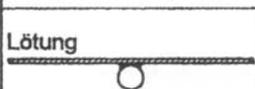
Nr.	Konstruktion	Rippe			Rohr			Volumenstrom pro Rippe [l/h]	k _{int} [W/m ² k]	F' mit k _{v1} = 3,8W/m ² K [-]
		Breite [mm]	Stärke [mm]	Material [-]	Außen ϕ [mm]	Wandstärke [mm]	Material [-]			
1.	Klemmung 	137	1,5	Alu	12	1	Cu	14	28	0,881
2.	Klemmung 	137	0,3	Cu	8	0,6	Cu	20	40	0,913
3.	Klemmung 	86	0,1	Cu	10	1	Cu	80	47	0,925
4.	Falzung 	132	0,3	Cu	10	0,5	Cu	25 60 110 200	46 56 67 71	0,924 0,936 0,946 0,949
5.	Lötung 	98	0,5	Cu	10	0,5	Cu	60 110	122 148	0,970 0,975
6.	Ultraschallverschweißung 	113	0,3	Cu	10	0,75	Cu	22	50	0,929

Abbildung 53: Übersicht verschiedener Absorbertypen und deren Absorberwirkungsgradfaktoren [22]

Der Absorberwirkungsgradfaktor, basierend auf heute üblichen Absorbergeometriedaten (vgl. Tabelle 13), beträgt maximal 0,96 bzw. 96%. Eine Reduzierung der Materialstärken bzw. Durchmesser ist jedoch aufgrund der hohen Materialkosten, speziell für Kupfer, ein wichtiger Kostensparfaktor für die Hersteller (siehe auch nachfolgenden Abschnitt „Kostenanalyse“), einhergehend mit einer bewussten Einbuße im Wirkungsgrad. Um die Wettbewerbsfähigkeit heutiger Absorber zu gewährleisten ist nach [21] mindestens ein Absorberwirkungsgradfaktor F' von 0,9 notwendig.

Eine Alternative zur Verbesserung des Absorberwirkungsgrades bei gleichzeitiger Kostenoptimierung bieten volumetrisch durchströmte Absorber. Aufgrund des konstruktiven Aufbaus können verschiedene thermische Widerstände von Blech-Rohr Absorberrn (siehe Abbildung 22), wie die Wärmeleitung im Blech, die Verbindung zwischen Blech und Rohr sowie im Rohrwerkstoff, vermieden werden. Eine für volumetrische Konzepte angepasste Ermittlung des Absorberwirkungsgradfaktors bietet die folgende Beziehung [23]:

$$F' = \frac{h_{fi}}{h_{fi} + U_L}$$

Diese Formel bezieht sich auf einen volumetrischen Absorber ähnlich einem sehr breiten und niedrigen Rechteckkanal ohne Zergliederung in kleinere Kanäle beziehungsweise eingelegte Strukturen zur Strömungsleitung beziehungsweise -beeinflussung (Abbildung 54). Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Absorbermaterials senkrecht zur Einstrahlungsfläche ist in dieser Beziehung

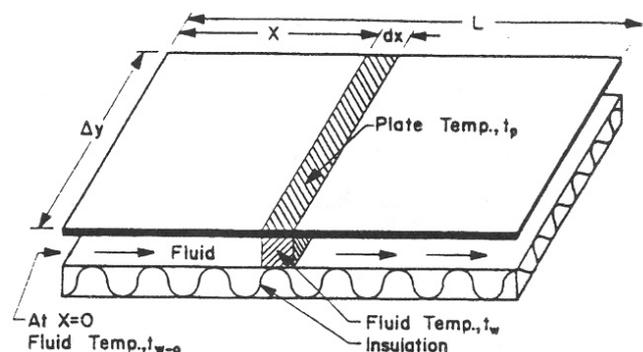


Abbildung 54: Volumetrischer Rechteckkanalabsorber [23]

aufgrund der geringen Stärke des Materials vernachlässigt. Die größte Beeinflussung erfolgt daher durch den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen strahlungsabsorbierender Deckplatte und Wärmeträgermedium.

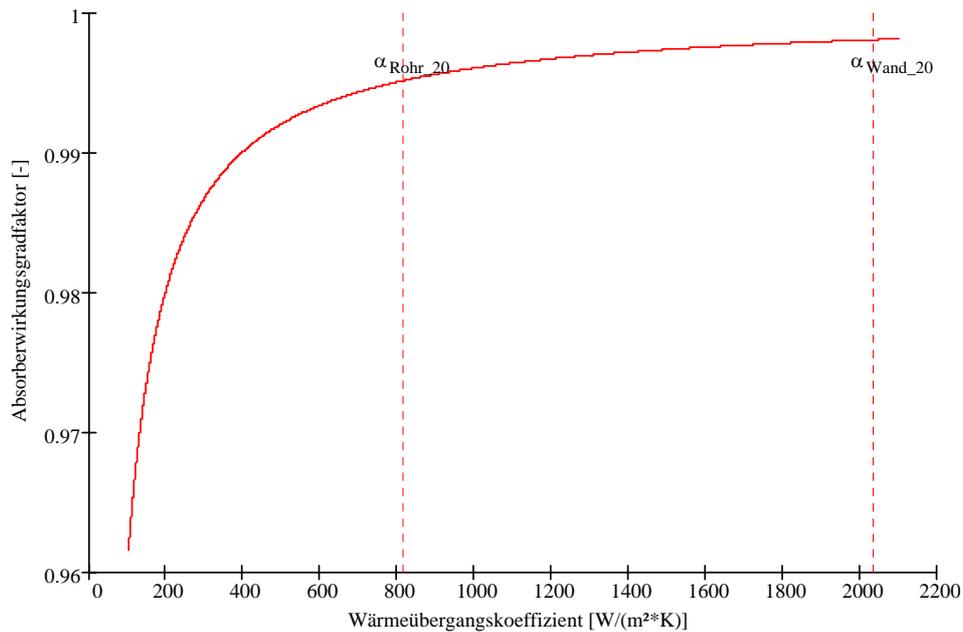


Abbildung 55: Absorberwirkungsgradfaktor für einfache volumetrische Absorber (Rechteckkanal)

Abbildung 55 zeigt den volumetrischen Absorberwirkungsgradfaktor F' aufgetragen über dem Wärmeübergangskoeffizienten. Die eingezeichneten Bereiche basieren auf strömungstechnischen Werten für die Geometrie bei Bedingungen für Kollektorstart am Morgen beziehungsweise Betriebstemperatur am Nachmittag und markieren somit erreichbare Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten bei laminarer Strömung. Die Werte werden auf Basis von Annahmen beziehungsweise Formeln und Tabellen aus [24] errechnet.

Unberücksichtigt bleiben bei diesen Auslegungsberechnungen jedoch die Einflüsse der Sicken z. B. im Falle des Noppenblech-Absorbers (Abbildung 48), die strömungsbeeinflussenden Elemente im Falle des Sandwich-Absorbers (Abbildung 49) oder des Metallschaumabsorbers (Abbildung 51), wobei beim letzteren aufgrund der Erhöhung der Reynolds-Zahl auch höhere Nußelt-Zahlen und damit auch höhere Wärmeübergangskoeffizienten zu erwarten sind, so dass sich der Absorberwirkungsgradfaktor dadurch tendenziell eher erhöht als verringert.

Somit lässt sich feststellen, dass mit den oben vorgestellten volumetrisch durchströmten Absorbern bei entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten prinzipiell Absorberwirkungsgradfaktoren von größer 0,99 erreicht werden können.

Strömungstechnische Eigenschaften

Den wichtigsten Faktor zur strömungstechnischen Beurteilung der Absorberkonzepte stellt der Druckverlust dar. Die berechneten Druckverluste der Konzepte werden daher mit den Blech-Rohr-Absorberbauformen verglichen. Die folgenden Abbildungen zeigen den Druckverlust der am häufigsten verwendeten Absorberbauformen, nämlich Mäander-Absorber (Abbildung 56) und Harfen-Absorber (Abbildung 57, rote Linie).

Die Druckverlustberechnung der Konzepte erfolgt durch Anwendung bekannter Problemstellungen, dargestellt im VDI-Wärmeatlas [24] sowie einschlägiger Literatur. Abbildung 57 zeigt beispielsweise den Druckverlauf für einen Noppenblech-Absorber (punktierte blaue Linie) entsprechend Abbildung 48.

Eine Berechnung zur Festlegung der Positionen strömungsbeeinflussender Elemente ist analytisch kaum durchzuführen, da dies hauptsächlich die gleichmäßige Einströmung beziehungsweise Sammlung des Wärmeträgermediums im Ein- beziehungsweise Ausströmbereich betrifft. Auf diese Problematik wird in Kapitel 6 kurz eingegangen.

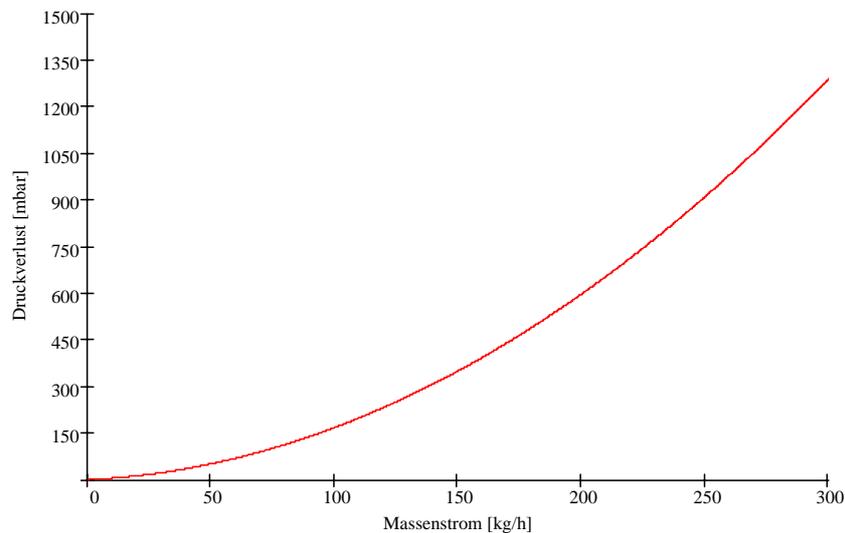


Abbildung 56: Druckverlustkurve für einen typischen Mäander-Absorber (*Thermo/Solar 250N*, nach [25])

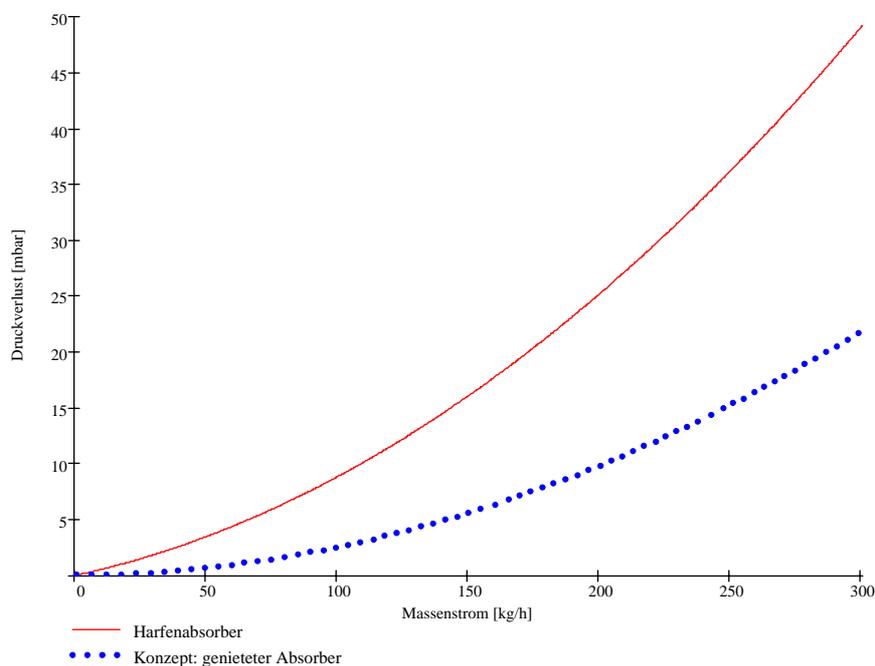


Abbildung 57: Druckverlust von Harfen-Absorber (nach [26]) und konzeptionellem Noppenblech-Absorber

Zusammenfassung Auslegungsberechnungen

Die Berechnung der Druckverluste in den konzeptionellen Absorbern zeigt, dass diese, abhängig vom Massenstrom durch den Absorber, zwischen den dargestellten, experimentell ermittelten Werten von heute üblichen harfen- und mäanderförmigen Absorberbauformen liegen.

Tabelle 14 zeigt schließlich eine Gegenüberstellung wichtiger technischer Daten von Absorbern auf dem Stand der Technik beziehungsweise von Absorbern entwickelt im Konzeptstadium. Daraus sind folgende Aspekte ersichtlich:

- Der Wärmeträgerinhalt der volumetrisch durchströmten Absorber bewegt sich über dem von Harfen- bzw. Mäander-Absorbern aufgrund der großen gewünschten Kontaktfläche. Durch eine gezielte Vergrößerung und Anordnung von Matrixmaterialien (z. B. im Falle des Noppenblech-Absorbers) kann eine Reduzierung des Wärmeträgerinhalts erreicht werden.

Diese Optimierung lässt sich mit einer CFD-Simulation durchführen.

- Das Gewicht der Konzeptabsorber bewegt sich durchgehend unter dem von Blech-Rohr-Absorbern, da nicht mehr auf den Werkstoff Kupfer zurückgegriffen wird. Dies bringt neben der Gewichtseinsparung auch eine Kosteneinsparung. Darüber hinaus sind auch Kunststoffe denkbar, wie z. B. der PPS GF40, der eine dauernde Anwendungstemperatur von 220°C besitzt und noch in der Preisklasse unter 10 €/kg liegt.

- Die Wärmekapazität liegt aufgrund des höheren Wärmeträgerinhaltes über den üblichen Absorberbauformen und kann ebenfalls erst mit einer CFD-Simulation optimiert werden. Wenn Flüssigkeitsinhalte im Bereich von Harfen- bzw. Mäander-Absorbern erreicht werden, wie z. B. im Fall des Roll-Bond-Absorbers durch eine Verringerung der Kanalhöhe, dann kann die Wärmekapazität, aufgrund des günstigen Absorbergewichtes, auch unter dem Stand der Technik liegen.
- Der Absorberwirkungsgradfaktor befindet sich bei Harfen- bzw. Mäander-Absorbern im Bereich zwischen 0,88 – 0,95, abhängig von der Verbindungsform (von Pressverbindung bis zu Laserschweißter oder gelöteter Verbindung). Bei einem F'-Wert von 0,95 ist der Abstand der Rohre jedoch bereits auf unter 70 mm festgelegt, bei einer gängigen Blechstärke von 0,2 mm, was zwangsweise zu hohen Kosten für die Kupferrohre führt. Volumetrische Absorber besitzen jedoch, basierend auf der Berechnung von Bliss [23], einen Absorberwirkungsgradfaktor zwischen 0,98 und über 0,99 je nach Qualität der Strömung beziehungsweise den geometrischen Bedingungen zum Erreichen hoher Nußelt-Zahlen.
- Die Gewährleistung niedriger Druckverluste und damit geringer Energiekosten für Pumpen wird durch die volumetrischen Absorberkonzepte gut erfüllt. Diese liegen bei sämtlichen Konzepten im Bereich der Harfenabsorber und damit deutlich unter den mit hohen Druckverlusten behafteten Mäanderkonstruktionen. Beispielhaft dargestellt sind die berechneten Werte für einen Volumenstrom von 2 l/min, was ein Standarddurchfluss heute üblicher Absorber ist.

Tabelle 14: Vergleich von Absorbern auf dem Stand der Technik mit einer Auswahl von Absorberkonzepten

	Stand der Technik Harfen- bzw. Mäander-Absorber	Noppen- blech- Absorber	Sandwich- Absorber	Schaum- matrix- Absorber	Roll- Bond- Absorber
konstruktive Eigenschaften					
Wärmeträgerinhalt [l]	1,0 ... 1,5	4,8	6,3	4,1	2,1
Absorbergewicht, leer [kg]	6,8	4,7	4,0	7,8	4,7
Wärmekapazität [kJ/K]	8,8	23,7	22,0	23,9	10,7
thermodynamische Eigenschaften					
Absorberwirkungsgradfaktor [-]	0,88 ... 0,95	0,98 ... 0,99	0,98 ... 0,99	0,98 ... 0,99	0,97
strömungstechnische Eigenschaften					
Druckverlust [mbar] bei 2 l/min (~120 [kg/h])	10 ... 200	3,5	24,6	---	53,0

^{*)} Datenangaben basierend auf Mäander-Absorber *ThermoSolar 300N* bzw. Harfen-Absorber *Conergy F4000*

5.6 Kostenanalyse

Neben der Auslegungsberechnung wird auch eine wirtschaftliche Betrachtung der Konzepte durchgeführt, d.h. es werden bereits im frühen Entwicklungsstadium Angebote zu Material- sowie Fertigungskosten eingeholt. Aufgrund des Konzeptstadiums stellt die in Tabelle 15 dargestellte Kostenanalyse jedoch nur eine erste Wirtschaftlichkeitsbewertung dar und kann ohne eine exakte Analyse und einen Vergleich möglicher anwendbarer Fertigungsverfahren auf der einen Seite und ohne einer Berücksichtigung von Optimierungsmaßnahmen und Einsparungen über Jahresstückzahlen auf der anderen Seite, nur eine grobe Kosteneinschätzung bieten.

Die Kostenanalyse ist unterteilt in zwei Kostenarten:

- Materialkosten – abhängig von Art und Menge des Werkstoffes im jeweiligen Konzept
- Fertigungskosten – abhängig von Anzahl und Art der verschiedenen Fertigungsverfahren im jeweiligen Konzept

Auf eine Ermittlung der Maschinenkosten wird verzichtet, weil in dieser Phase keine aussagekräftigen Daten verfügbar sind, da:

- fertigungstechnische Optimierungsmaßnahmen erst bei exakter Bauteildefinition sinnvoll sind,

- Stückzahlen einen großen Einfluss auf die Maschinenkosten besitzen
- große Unterschiede bei den Maschinenkosten aufgrund der Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad bestehen.

Tabelle 15: Kostenanalyse zu ausgewählten Absorberkonzepten

	Stand der Technik Harfen- bzw. Mäanderabsorber	Noppenblech- Absorber	Sandwich- Absorber	Schaum- matrix- Absorber	Roll-Bond- Absorber
Materialkosten [€]	41	30	50	60	25
Fertigungskosten [€]	34	20	5	5	20
Gesamtkosten [€]	^{*)} 75	50	55	65	45

^{*)} aktuelle Absorber-Herstellkosten

Ein Umstieg auf volumetrische Absorber bietet neben einer Steigerung im Wirkungsgrad – momentan arbeitet die einschlägige Industrie für Blech-Rohr-Absorber an Steigerungen im 0,1%-Punktebereich – auch die Möglichkeit auf komplett andere Werkstoffe umzusteigen und somit Kosten zu sparen. Abbildung 58 zeigt beispielsweise die Preisentwicklung von Kupfer in den letzten Jahren, wobei eine Senkung des Kupferpreises zukünftig nicht zu erwarten ist, wie die Wachstumsrate, dargestellt in Abbildung 59, belegt. Eine Verwendung von z. B. Aluminium bietet hier große Einsparpotentiale neben anderen Vorteilen wie beispielsweise dem Gewicht. Darüber hinaus ist der Energieaufwand bei Verwendung von Aluminium aus einem recyceltem Stoffkreislauf weitaus geringer als bei der Neugewinnung aus Rohstoffen.

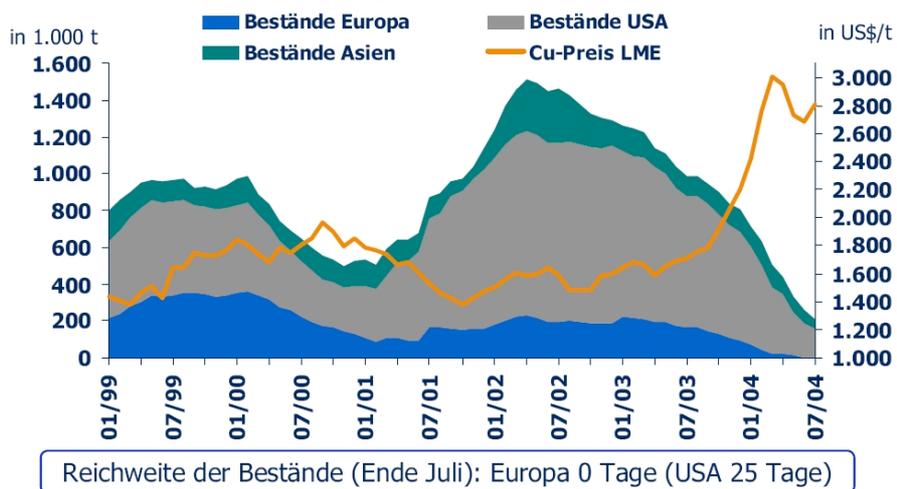


Abbildung 58: Entwicklung des Börsen-Kupferpreises in den vergangenen Jahren [27]

Wachstum kupferverarbeitender Industrien

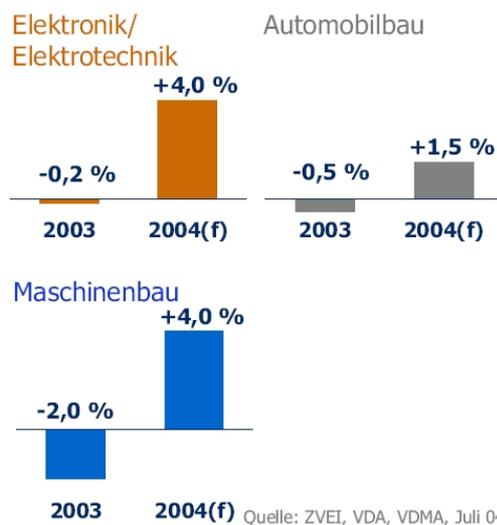


Abbildung 59: Wachstum Kupfer verarbeitender Industrien im Jahresvergleich [28]

5.7 Bewertung der Konzepte

Vorgehensweise

Um eine sowohl technische als auch wirtschaftliche Bewertung der verschiedenen Konzepte durchführen zu können, werden zur endgültigen Auswahl verschiedener, ausbaufähiger Konzepte zunächst die Bewertungskriterien festgelegt.

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Einteilung der Bewertungskriterien sowie deren Bedeutung und Aufgabe im Rahmen dieser Konzeptbeurteilung.

Nach Abschluss der Auslegungsberechnung sowie der Kostenanalyse, die als Grundlage für eine zuverlässige Bewertung dienen, werden die einzelnen Konzepte hinsichtlich dieser Kriterien in einer Bewertungsmatrix beurteilt (siehe dazu auch Abbildung 60).

Um im letzten Schritt ausgewogene und viel versprechende Konzepte nicht nur aus technischer oder wirtschaftlicher Sicht zu erhalten, sondern ein Optimum dieser beiden zu erreichen, werden der technische und wirtschaftliche Wert eines jeden Konzeptes im sogenannten Stärkediagramm aufgetragen (Abbildung 61).

Tabelle 16: Erläuterung der vorläufigen Bewertungskriterien

Technische Bewertungskriterien	
Strömungs- und thermodynamische Kriterien	
geringer Druckverlust	Beeinflussung der Gesamtenergieeffizienz der Solaranlage, Auslegungsparameter für Pumpenleistung, Beeinflussung der Verschaltungsspielräume von Kollektoren
wenige thermische Widerstände	Beeinflussung des Wärmedurchgangs von der Strahlungsempfängerfläche auf das Wärmeträgermedium → höhere „Wärmetauscherleistung“
geringe Wärmekapazität	Parameter zur Beeinflussung der Aufheizzeit des Absorbers und damit des Ansprechverhaltens
Betriebstechnische Kriterien	
hohe Betriebsdrücke	Verwendung des Absorbers in verschiedenen Anlagensystemen hohe / niedrige Systemdrücke häufige / seltene Dampfbildung im Stillstandsfall
hohe Temperaturbeständigkeit des Absorbers	Beständigkeit von Absorberwerkstoff und Fertigungstechniken gegenüber Stillstandstemperaturen bei gleich bleibender Leistungsfähigkeit
hohe Korrosionsbeständigkeit	Beständigkeit von Absorberwerkstoff und weiteren, in der Fertigung notwendigen Materialien gegen Korrosion
geringes Gewicht	Erleichterung der Montage in Kollektor, Vereinfachung der Endmontage auf Dächern, Gewährleistung der Akzeptanz bei Heizungsbauern
Fertigungstechnische Kriterien	
geringe Komponentenvielfalt	geringer Logistikaufwand, Verringerung der Fehleranfälligkeit / Wartung
geringe Anzahl Fertigungsschritte	Bewertung der Fertigungsschnittstellen, Bewertung der Automatisierungsmöglichkeiten
hohe Prozesssicherheit	Verringerung der Ausschussraten, Reduzierung der Nacharbeitsraten
Betriebswirtschaftliche Bewertungskriterien	
geringe Materialkosten	Bewertung der Werkstoffkosten des Absorbers → Art und Menge des Werkstoffes
geringe Fertigungskosten	Bewertung der Kosten für maschinelle Fertigungsschritte bzw. des Montageaufwands

Konzeptbewertung

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten und anschließend in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht näher analysierten Konzepte stellen die derzeit erfolgversprechendsten und ausbaufähigsten Konzepte dar. Im weiteren Verlauf der Entwicklung werden diese vier Konzepte erweitert und detailliert untersucht, so dass ein qualitativ hochwertiger Prototypenabsorber das endgültige Ergebnis darstellt.

Im Folgenden werden die Vorteile der einzelnen Konzepte zusammenfassend erläutert.

Ausgangssituation: Blech-Rohr-Absorber

Die Betrachtung dieses Absorbertyps wird mit in die Konzeptbewertung aufgenommen, um einen Vergleich mit dem momentanen Stand der Technik durchführen zu können.

Darüber hinaus ist dadurch die Leistungsfähigkeit und das Kostenpotenzial volumetrischer Absorber ersichtlich.

Noppenblech-Absorber

Dieses Absorber-Konzept bietet aufgrund seiner kompakten und ineinander kombinierbaren Fertigungsmöglichkeiten große Einsparpotentiale in den Fertigungs- wie den Materialkosten. Die in der Kostenanalyse ermittelten Herstellkosten können durch eine Fertigungsoptimierung weiter reduziert werden.

Darüber hinaus stellt dieser Absorber in technischer Hinsicht, aufgrund seines sehr geringen Druckverlustes und der wenigen thermischen Widerstände, eine sehr gute Lösung dar. Die hohe Temperaturbeständigkeit bietet Sicherheit auch in extremen Betriebssituationen und ein geringes Gewicht trägt zu einer weiteren Reduzierung des Kollektorgesamtgewichtes bei.

Eine geringe Komponentenvielfalt bei hoher Prozesssicherheit durch ausgereifte Standardfertungsverfahren vereinfacht die Produktion und senkt damit wiederum die Kosten.

Sandwich-Absorber

Der Sandwich-Absorber bietet Vorteile aufgrund seines geringen Druckverlustes und Gewichtes.

Auch die niedrige Anzahl verschiedener Komponenten spricht für dieses Konzept und reduziert damit die Fertigungskosten.

Die Temperaturbeständigkeit dieses Konzepts ist ebenfalls hoch und kann abhängig vom verwendeten Plattentyp bzw. der Verbindung zwischen Kernmaterial und Deckblechen gesteigert werden. Eine Erhöhung der Betriebsdrücke, die ohnehin schon in einem ausreichenden Bereich liegen, ist damit ebenfalls möglich.

Schaummatrix-Absorber

Dieses Konzept bietet aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung zwischen Deckblechen und Schaummaterial eine hohe Temperaturbeständigkeit. Gleichzeitig wird durch den Metallschaum im Kern der Platte ein sehr hoher Wärmeübergangskoeffizient und damit ein hoher Absorberwirkungsgradfaktor erreicht.

Die momentan noch relativ hohen Materialkosten, verursacht durch den Schaum, verringern sich durch hohe Abnahmemengen und werden weiterhin durch niedrige Fertigungskosten kompensiert.

Roll-Bond-Absorber

Aufgrund des sehr variablen und einfachen Fertigungsverfahrens bietet dieses Absorberkonzept eine sehr gute Möglichkeit ohne großen Materialaufwand eine Vielzahl von Absorberkanälen in die Absorbergeometrie einzubringen und damit den Absorberwirkungsgradfaktor zu erhöhen.

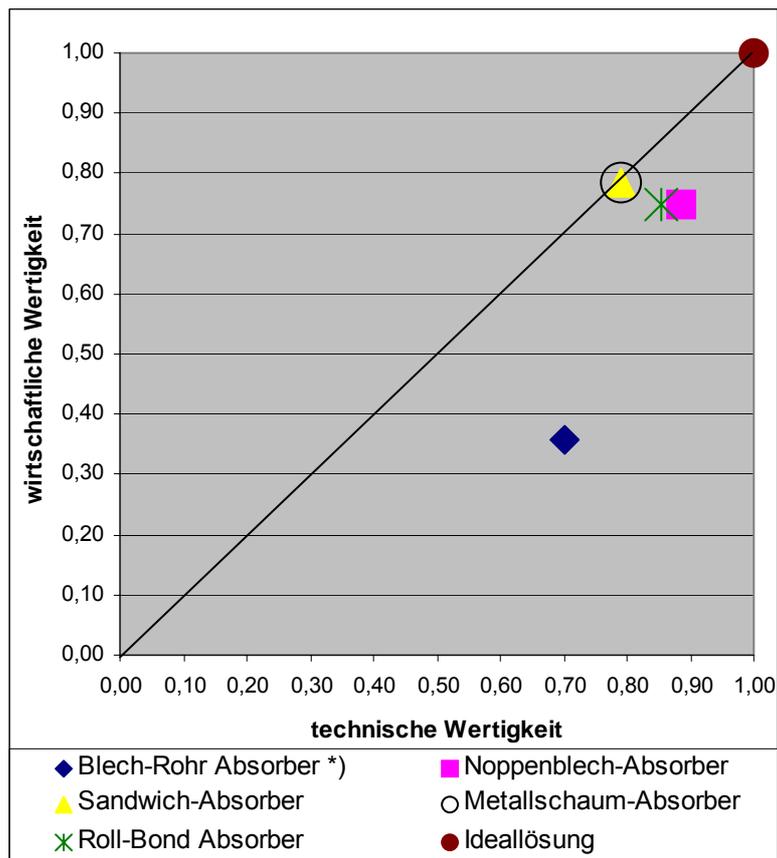
Neben geringen Material- und Fertigungskosten läuft dieser Prozess, bei einer geringen Zahl an Komponenten und Fertigungsschritten, sehr stabil ab.

Weitere Vorteile liegen im niedrigen Gewicht, trotz hoher Druck- und Temperaturbelastbarkeit im Kollektorbetrieb.

		Blech-Rohr-Absorber *)		Noppenblech-Absorber		Sandwich-A. (Wellenkanäle)		Metallschaum-Absorber		Roll-Bond Absorber		Ideallösung		
		Konzept 1		Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3		Konzept 4		Ideallösung		
Technische Bewertungskriterien		Faktor	Punkte	xFaktor	Punkte	xFaktor	Punkte	xFaktor	Punkte	xFaktor	Punkte	xFaktor	Punkte	xFaktor
strömungs- und thermodynamische Kriterien														
geringer Druckverlust	4	4	16	4	16	3	12	4	16	3	12	4	16	
wenig thermische Widerstände	4	1	4	4	16	3	12	3	12	2	8	4	16	
geringe Wärmekapazität	2	4	8	2	4	2	4	2	4	3	6	4	8	
betriebstechnische Kriterien														
hohe Betriebsdrücke	2	4	8	2	4	3	6	3	6	4	8	4	8	
hohe Temperaturbeständigkeit d. Absorbers	3	3	9	4	12	3	9	4	12	4	12	4	12	
hohe Korrosionsbeständigkeit	4	4	16	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16	
geringes Gewicht	4	3	12	4	16	4	16	3	12	4	16	4	16	
fertigungstechnische Kriterien														
geringe Komponentenvielfalt	3	3	9	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	
geringe Anzahl Fertigungsschritte	2	1	2	3	6	3	6	3	6	4	8	4	8	
hohe Prozesssicherheit	3	1	3	4	12	3	9	2	6	4	12	4	12	
Summe			87		110		98		98		106		124	
Technischer Wert X			0,70		0,89		0,79		0,79		0,85		1,00	
Wirtschaftliche Bewertungskriterien														
geringe Materialkosten	3	2	6	3	9	2	6	2	6	3	9	4	12	
geringe Fertigungskosten	4	1	4	3	12	4	16	4	16	3	12	4	16	
Summe			10		21		22		22		21		28	
wirtschaftlicher Wert Y			0,36		0,75		0,79		0,79		0,75		1,00	

*) Blech-Rohr Absorber basierend auf Harfenform

Abbildung 60: Bewertungsmatrix ausgewählter Absorberkonzepte



*) technische Bewertung basierend auf Harfenbauform

Abbildung 61: Stärkediagramm zu den dargestellten Konzepten

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen klar die verschiedenen Schwächen heutiger Blech-Rohr-Absorber in den gegenwärtigen Verbindungsverfahren auf. Diese reichen von Problemen zur Sicherstellung einer qualitativ stabilen Fertigung, über hohe Herstellkosten, bis zu Schwächen im Kollektorbetrieb. Schlifffbilduntersuchungen lassen dies bei diversen Fertigungsverfahren erkennen und sind in diesem Bericht dargestellt. Es zeigt sich auch, dass Absorber- bzw. Kollektorhersteller nicht mit den momentan üblichen Verfahren zufrieden sind und auf neue Möglichkeiten wie z. B. das Laserschweißen umzusteigen versuchen. Dies führt jedoch zu keiner zufriedenstellenden Lösung des Problems, da Schwächen nicht nur in der Fertigung, sondern auch im Aufbau aus Sicht der Wärmeübertragung, vorhanden sind.

Eine Untersuchung alter Kollektor- bzw. Absorberbauarten zeigt, dass bereits früher erfolgreich andere Absorbersysteme eingesetzt wurden. Thermographische Aufnahmen von Durchströmungsversuchen zeigen deren besseres Wärmeübertragungsverhalten. Schwächen dieser Bauformen lagen mehr im Bereich der Fertigung und des Gewichtes, wobei auch damals schon die Lebensdauer mehr als 20 Jahre betragen sollte, so dass hier kein Unterschied zu heutigen Absorbern beziehungsweise Kollektoren festzustellen ist.

Diese Zwischenergebnisse führten in der Konzeptphase zur Entwicklung neuer Absorberbauformen, die schwerpunktmäßig auf volumetrisch durchströmte Konstruktionen abzielte. Verschiedene Konzepte wurden erarbeitet und hinsichtlich technischer Eigenschaften (Druckverlust, Absorberwirkungsfaktor, Gewicht, ...) sowie wirtschaftlicher Faktoren (Material- und Fertigungskosten) berechnet beziehungsweise untersucht. Auf Basis dieser Informationen konnte eine objektive Bewertung und Differenzierung der Konzepte mittels Bewertungskriterien durchgeführt werden.

Die aus der Bewertung hervorgehenden, aussichtsreichen Konzepte müssen nun in einem weiteren Schritt detailliert und verbessert werden. Dies betrifft speziell die Optimierung hinsichtlich des Aufbaus, um möglichst hohe Nußelt-Zahlen und damit einen hohen Wärmeübergang zu erreichen, sowie den Druckverlust gleichzeitig so gering wie möglich zu gestalten.

Es ist daher sinnvoll für die nächsten Schritte eine Detaillierung der favorisierten Konzepte durchzuführen und diese dann über Simulationsprogramme zu optimieren. Im Folgenden können dann Prototypen gefertigt werden, die bereits über ausreichendes Potential verfügen, um in praktischen Versuchen getestet und weiter optimiert zu werden. Am Ende steht der optimale Absorber, der als Prototyp in ein Kollektorgehäuse integriert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Mangold D.: *Kostenanalyse der Herstellung von Solarkollektoren und mögliche Kostenreduktionen durch Massenfertigung*, 11. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2001.
- [2] Remmers K.-H.: *Ermittlung von Richtpreisdigrammen zur rationellen Kostenschätzung und wirtschaftlichen Planung von Solaranlagen*, 9. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 1999.
- [3] Epp B.: *Löter-Treffen unter Ausschluss der Öffentlichkeit* in: Sonne Wind & Wärme, Band 26, Heft 6, 2002.
- [4] Dosa L., Remmers K.-H.: *Spitzentemperaturen und Temperaturverlauf im Kollektorkreis II – Auswirkungen auf Material und Sicherheitstechnik*, 9. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 1999.
- [5] Duffie J. A., Beckman W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2. Auflage, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [6] Maierhofer S., Fechner H.: *Berechnungen des Kollektorwirkungsgradfaktors F' bei Variation der Einflussfaktoren und Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung*, 12. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2002.
- [7] N. N.: CD: *Marktübersicht 2003*, Solarpraxis, Berlin 2003.
- [8] N. N.: thermo|solar Prospekt / Preisblatt für Kollektoren, thermo|solar Energietechnik GmbH, Regensburg, 1/89.
- [9] Mangold D.: *persönliche Kommunikation*, 19.02.2004.
- [10] Peuser, F.A.; et. a.: *Langzeiterfahrungen mit thermischen Solaranlagen*, ZfS-Rationelle Energietechnik, Hilden, 1997.
- [11] Konttinen, P.; et. a.: *Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces*, Solar Energy Materials & Solar Cells, Band 79, Seite 273-283, 2003.
- [12] Berner J.: *Große Hersteller von dünnen Schichten* in: Sonne Wind & Wärme, Band 28, Heft 12, 2004.
- [13] Peuser F. A. et. al.: *Langzeiterfahrung Solarthermie*, Solarpraxis, Berlin, 2001.
- [14] Ladener H., Späte F.: *Solaranlagen*, 7. Auflage, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2001.
- [15] Kasper B.-R. et. al.: *Solarthermische Anlagen*, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 6. Auflage, Berlin, 2000.
- [16] Hermann, M.: *FracTherm – Fraktale Hydraulikstrukturen für Solarabsorber und andere Wärmetauscher*, 13. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2003.
- [17] Sandler M.: *Vollflächig durchströmter Solarabsorber mit Schlitzeströmung und integrierten Sammelleitungen*, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2004.
- [18] Meir M., Rekstad J.: *Der Solarnor Kunststoffkollektor – The Development of a Polymer Collector with Glazing*, 1. Leobener Symposium Polymeric Solar Materials, Leoben (A), 2003.
- [19] N. N.: *Sonne tanken*, in: Test – Stiftung Warentest, Berlin, Heft 4, 2003.
- [20] Eisenmann W.: *Untersuchungen zu Leistungsfähigkeit und Materialaufwand von Sonnenkollektoren mit serpentinen- und harfenartiger Rohrverlegung*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [21] Eisenmann W. et. al.: *On the correlations between collector efficiency factor and material content of parallel flow flat-plate solar collectors*, Solar Energy 76 (4), 2004.
- [22] Rockendorf G. et. al.: *Bedeutung und Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors bei Sonnenkollektoren*, 6. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 1996.
- [23] Bliss R. W.: *The Derivations of Several „Plate-Efficiency Factors“ Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors*, SolarEnergy 3 (4), 1959.

-
- [24] N. N.: *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [25] Schäfer A.: *Prüfung eines Sonnenkollektors nach EN 12975-1,2, Prüfbericht: KTB Nr. 2003-18*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, September 2003.
- [26] N. N.: *Datenblatt Conergy Flachkollektor F6000*, Februar 2004.
- [27] N. N.: Norddeutsch Affinerie AG: Pressekonferenz 10. August 2004, Hamburg, 2004.
- [28] ZVEI, VDA, VDMA, Juli 2004.