



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 19.6.2020

ReSoTech 2 – Reduktion der Marktpreise solarthermischer Anlagen durch neue technologische Ansätze



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

Datum: 19. Juni 2020

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solarthermie und Wärmespeicherung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

SPF Institut für Solartechnik
Hochschule für Technik HSR
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autoren:

Daniel Philippen
Daniel Zenhäusern
Alexandre Voirol
Mihaela Dudita
Robert Haberl
Luca Leuenberger
Vanessa Thien Hui Ying
Syed Meera Lebbai Maricar
Michel Haller
Stefan Brunold

Begleitgruppe:

David Ehrat, Ammann + Schmid AG
Bernard Thissen, Energie Solaire S.A.
Andreas Haller, Ernst Schweizer AG, Metallbau
Ralf Eismann, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Jürg Marti, Marti Energietechnik
Ivo Diezinger, Selm Heizsysteme AG
Hansjörg Roth, Solarpartner GmbH
Ueli Frei, SOLTOP Schuppisser AG
Daniel Vögelin, Vögelin GmbH

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/501397-02

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

Zusammenfassung

Es wurden verschiedene technische Massnahmen für Kosteneinsparungen in Solarthermieranlagen analysiert und möglichst mit Prototypen umgesetzt und getestet. Die Arbeiten zeigen, dass die Massnahmen für Kosteneinsparungen grundsätzlich umsetzbar sind. So ist der Einsatz von Kunststoff-Rohrsystemen aus dem Heizungs- bzw. Sanitärbereich möglich, wenn die Solaranlagen über einen Überhitzungsschutz verfügt, und wenn Produkte aus thermisch robusten Kunststoffen eingesetzt werden. Der neu konzipierte Speicher aus glasfaserverstärktem Kunststoff kann zwar voraussichtlich nicht zu geringeren Kosten als herkömmliche Speicher produziert werden, wird aber Kostenvorteile bei der Installation zeigen. Mit einem Überhitzungsschutz innerhalb der Kollektoren kann die Temperatur im Gesamtsystem begrenzt werden. Hier konnte die Funktionalität von zwei Mechanismen demonstriert werden, deren Marktumsetzung schon bald möglich sein könnte. Ein Überhitzungsschutz für die übrigen Komponenten des Solarkreises kann mit Drainback-Anlagen erreicht werden. Mit Einsatz der bekannten, aber noch wenig verbreiteten Drainback-Technologie können mehrere Massnahmen zur Kostensenkung zusammen realisiert werden.

Résumé

Des mesures techniques visant à réduire les coûts des systèmes solaires thermiques ont été analysées et, autant que possible, mises en œuvre et testées à l'aide de prototypes. Les travaux montrent que les mesures de réduction des coûts peuvent en principe être mises en œuvre. Par exemple, l'utilisation de systèmes de tuyauterie en plastique, couramment employés pour les chauffages et les installations sanitaires, est envisageable si les installations solaires sont dotées d'une protection contre la surchauffe et si des produits en plastique thermiquement robuste sont utilisés. Bien que le nouvel accumulateur de chaleur en plastique renforcé aux fibres de verre ne pourra probablement pas être produit à un coût inférieur à celui des accumulateurs classiques, il présentera toutefois des avantages en termes de coûts lors de son installation. Une protection contre la surchauffe à l'intérieur des capteurs solaires thermiques peut limiter la température dans l'ensemble du système. Deux mécanismes de ce type ont été conçus et leur fonctionnalité a pu être démontrée. Les deux mécanismes sont prometteurs en vue d'une future mise en œuvre commerciale. Une protection contre la surchauffe des autres composants du circuit solaire peut être obtenue avec des systèmes d'autovidange («drain back»). Bien que connue, cette technologie est encore peu répandue. En l'utilisant, plusieurs mesures visant à réduire les coûts peuvent être mises en œuvre conjointement.

Abstract

Several technical measures for cost savings in solar thermal systems were analysed and, where possible, implemented and tested with prototypes. The results show that these measures are feasible in principle. For example, the use of plastic piping systems, commonly used for heating and sanitary installations, is possible if the solar installations have overheating protection and if products made of thermally robust polymers are used. Although the newly designed heat storage tank made of fibre-reinforced plastics can probably not be produced at lower costs than conventional storage tanks, it will show cost advantages during installation. An overheating protection mechanism inside the collectors can limit the temperature in the whole system. The functionality of two such mechanisms could be demonstrated. Both mechanisms are close to a possible market implementation. An overheating protection for the components of the solar circuit can be achieved with automatically drainable ("drain back") systems. By using the well-known, but not yet widespread, drain back technology, several measures to reduce costs can be implemented together.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Ziele und Vorgehen	8
2 Einsatz von Kunststoffrohren	9
2.1 Methodik	9
2.2 Literatur	10
2.2.1 Dampf-/Temperaturbelastung	10
2.2.2 Eisbildung in Rohren	10
2.3 Dampfbelastungs-Tests	11
2.3.1 Langzeitbelastungstest mit geraden Rohrstücken	11
2.3.2 Test von Prüflingen mit 90°-Bögen	14
2.3.3 Einfluss der Temperaturbelastung auf die Betriebsdauer von 30 Jahren	16
2.3.4 Fazit zu den Dampfbelastungs-Tests	18
2.4 Vereisung wassergefüllter Rohre	19
2.4.1 Vereisungsversuche mit langen Rohrstücken	19
2.4.2 Vereisungsversuch mit stärker kontrollierten Rahmenbedingungen	22
2.4.3 Fazit zu den Vereisungstests	24
2.5 Fazit zum Einsatz von Kunststoffrohren mit Steckfittings	25
3 Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C	27
3.1 Methodik	27
3.2 Technologiescreening	28
3.3 Höhenverstellbarer Absorber	35
3.4 Elektrophorese – „Elektronische Tinte“	39
3.5 Thermotrope Ionogels	41
3.6 Überhitzungsschutz durch Spiegellamellen	46
3.7 Zusammenarbeit mit externen Partnern	53
3.8 Fazit zu Kollektoren mit Überhitzungsschutz	53
4 Modularer Speicher	55
4.1 Methodik	55
4.2 Anforderungskatalog	55
4.3 Marktüberblick und Kostenstrukturen von Speichern	57
4.4 Grobkonzeption und spezifische Kosten verschiedener Speicher	60
4.4.1 Lösungsansätze	61
4.4.2 Referenz	72
4.4.3 Abschluss des Vergleichs von Speicherkonzepten	74
4.5 Prototyp eines runden GFK-Speichers	80
4.5.1 Designuntersuchungen	80
4.5.2 Labor-Prototyp	81
4.5.3 Test der Prototypen	93
4.5.4 Optimiertes Speicherkonzept	100
4.6 Fazit zum modularen Speicher	102

5 Wasser-Drainback	104
5.1 Methodik	104
5.2 Status quo von Wasser-Drainback Solaranlagen.....	104
5.3 Messungen der Dampfreichweite in einer Kollektorfeldverrohrung.....	112
5.4 Versuchsbetrieb einer Drainback-Anlage	119
5.5 Fazit zu den Wasser-Drainback-Versuchen	122
6 Zusammenfassung und Fazit.....	124
7 Ausblick und zukünftige Umsetzung	127
8 Nationale und internationale Zusammenarbeit	127
9 Referenzen	131
Anhang	137
A.1 - Ergebnisse der beiden Vereisungstests	137

Abkürzungsverzeichnis

CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungssimulationen)
DB	Drainback
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DN	Normdurchmesser
EFH	Einfamilienhaus
EPS	Expandiertes Polystyrol (z.B. Markenname Styropor)
FEM	Finite Elemente Methode (Verformungsuntersuchung von Festkörpern mit geometrisch komplexer Form)
FWS	Frischwassermodule (Plattenwärmetauscher um Trinkwasser aus dem Heizungswarmwasser zu erwärmen)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HDPE	High Density Polyethylen (PE mit erhöhter Zugfestigkeit)
IAM	Incidence Angle Modifier, d.h. Faktor um den sich der thermische Wirkungsgrad eines Kollektors bei einem gewissen Einstrahlungswinkel gegenüber einer Situation mit senkrechter Einstrahlung gleicher Intensität ändert.
IWK	Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung der HSR
MAG	Membranausdehnungsgefäß, auch Druckausgleichsbehälter
MFH	Mehrfamilienhaus
PB	Polybuten
PE-RT	Polyethylen, raised temperature (PE mit erhöhter Temperaturbeständigkeit)
PET	Polyethylenterephthalat (Aus Polykondensation hergestellter thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester.)
PE-X(c)	oder auch PEX: Polyethylen mit vernetzten Molekülketten (c: strahlvernetzt)
PP	Polypropylen (thermoplastischer Kunststoff aus Polymerisation von Propen hergestellt.)
PU	Polyurethane, im Sprachgebrauch auch PUR (Kunststoffe oder Kunstharze aus Polyaddition von Dialkoholen oder Polyolen und Polyisocyanaten hergestellt)
PUR	Siehe PU
RL	Rücklauf
T	Temperatur
T_m^*	Reduzierte mittlere Temperaturdifferenz $T_m^* = \frac{T_m - T_{Umgebung}}{G}$, wo T_m die mittlere Fluidtemperatur im Kollektor, $T_{Umgebung}$ die Umgebungstemperatur und G die Globalstrahlung in Kollektorebene bezeichnen.
U_L	Wärmeverlustkoeffizient zwischen Absorber und Umgebung
VIP	Vakuuminisulationspanel, Wärmedämmplatten mit Vakuumtechnik
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe

Inhalt

WW Warmwasser

Symbole:

α Solarer Absorptionsgrad des Absorbers

τ Solarer Transmissionsgrad der Abdeckscheibe des Kollektors

ε Emissionsgrad des Absorbers

η Eta, thermischer Wirkungsgrad eines Kollektors, definiert als die thermische Nutzleistung geteilt durch die Globalstrahlung G in Kollektorebene

c cover (Abdeckung des Kollektors, i.d.R. Glasscheibe)

1 Ziele und Vorgehen

Mit dem vorliegenden Projekt ReSoTech 2 sollen durch die Entwicklung und Prüfung neuer Technologien und Materialien Wege aufgezeigt werden, wie die Kosten von Solarwärmanlagen und ihrer Einzelkomponenten reduziert werden können. Es wird ein Systemkonzept mit reduzierten Kosten entworfen, welches die neuen Komponenten nutzt und die Fehleranfälligkeit bei Installation und im Betrieb reduzieren soll.

Das Projekt ReSoTech 2 baut auf den Ergebnissen des Projekts ReSoTech 1 auf, welches 2016 abgeschlossen wurde.¹ Gemäss ReSoTech 1 werden die höchsten Kosteneinsparungen mit einem Drainback-System erreicht, in welchem Wasser als Wärmeträgerfluid eingesetzt wird, und in welchem Kunststoffrohrleitungen und ein leichter, modular erweiterbarer Wasserspeicher mit integriertem Drainback-Volumen verwendet wird.

Das Projekt ReSoTech 2 ist in die folgenden Arbeitspakete gegliedert, welche jeweils in einem eigenen Kapitel im vorliegenden Schlussbericht behandelt werden:

- Kapitel 2 – Einsatz von Kunststoffrohren
- Kapitel 3 – Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C
- Kapitel 4 – Modularer Speicher
- Kapitel 5 – Wasser-Drainback

Die Ziele, die Ausgangslage und das Vorgehen sind für jedes der Arbeitspakete im jeweiligen Kapitel wiedergegeben.

Die Arbeiten wurden durch eine Begleitgruppe unterstützt, in welcher Schweizer Hersteller, Installateure und Solarexperten vertreten waren.

Mit der Teilnahme an Task 54 „Price Reduction of Solar Thermal Systems“ des Solar Heating & Cooling (SHC) Programms der Internationalen Energieagentur IEA² erfolgte ein internationaler Austausch mit der Branche zum Thema Kostenreduktion (Kapitel 8).

¹ Schlussbericht siehe: <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=35218>

² <http://task54.iea-shc.org/>

2 Einsatz von Kunststoffrohren

Wie die Kostenerhebung im Projekt ReSoTech 1 (Philippen et al. 2016) zeigte, haben die Hydraulikkomponenten und insbesondere die Arbeitskosten für die Verlegung derselben einen relevanten Anteil an den Gesamtkosten von Solaranlagen. Die mögliche Kostenreduktion liegt gemäss Projekt ReSoTech 1 für eine Referenzanlage bei 9 % bezogen auf die Investitionskosten für eine Anlage zur solaren Warmwasservorwärmung. Im vorliegenden Arbeitspaket werden deshalb günstige Rohrsysteme (bestehend aus Rohr und passenden Fittings), die als Massenprodukte im Heizungs- und Sanitärbereich eingesetzt werden und welche mehrheitlich aus Kunststoff produziert sind, bezüglich ihrer Tauglichkeit für den Einsatz in Solaranlagen getestet. Werden günstige Kunststoffe in der Hydraulik eingesetzt, muss die Temperatur im Hydraulikkreis begrenzt werden, was durch zwei Strategien erreicht werden kann. Diese werden in den Arbeitspaketen zu Kollektoren mit inhärentem Überhitzungsschutz bei 100 °C (Kapitel 3) und zu Wasser-Drainback (Kapitel 5) untersucht.

In Wasser-Drainback-Systemen kann neben der thermischen Belastung der Rohre durch heisses Wasser und Wasserdampf auch die Vereisung des Wassers in den Rohrleitungen problematisch sein, falls die Anlage, etwa durch eine nicht fachgerechte Installation nicht richtig entleeren kann. Grundsätzlich ist eine Sicherheit gegenüber Vereisung in Wasser-Drainback-Anlagen nicht notwendig, sie ist aber vorteilhaft, um Bedenken in der Branche wegen Montagefehlern auszuräumen. Montagefehler ausserhalb des Dämmperimeters des Gebäudes können zu wassergefüllten Leitungssäcken führen und bei Verwendung von Metallrohren Frostschäden an der Leitung verursachen. Durch das Kriterium der Vereisungssicherheit, muss das Rohr aus Kunststoff bestehen, da das Wandmaterial wegen der Volumenausdehnung des Wassers bei Vereisung eine Elastizität aufweisen muss. Diese Elastizität ist bei Rohrwänden, die Metall enthalten, wie in den weit verbreiteten Alu-Kunststoff-Verbundrohren, nicht gegeben (Botpaev, Louvet, and Vajen 2016).

Gemäss Begleitgruppe ist für die Installation der Rohre wünschenswert, dass diese möglichst werkzeuffrei erfolgen kann (kein Einsatz von schweren Pressfitting-Werkzeugen o.ä.). Bei der Auswahl der Rohrsysteme wurde deswegen auf Systeme fokussiert, welche Steck-Fittings enthalten. Diese Art Fitting muss nach dem Entgraten des Rohrendes mit einem Handwerkzeug lediglich auf das Rohr aufgeschoben werden und benötigt keine weiteren Handgriffe für die Installation.

2.1 Methodik

Es wurden Rohrsysteme, welche aus Rohren und passenden Steckfittings bestehen, von drei Schweizer Herstellern ausgesucht und getestet. Von einem weiteren Hersteller wurde jeweils ein Rohrsystem mit Steckfitting und mit Pressfitting getestet.

Die folgenden Untersuchungen wurden mit den ausgesuchten Rohrsystemen im Labor ausgeführt:

- Langzeit-Belastungstest mit zyklischer Durchströmung der Rohre und Fittings mit Wasserdampf bis ca. 135 °C (und niedrigen Drücken)
- Zyklischer Vereisungstest mit wassergefüllten Rohrstücken in einer Klimakammer
- Herstellung und Test von Kunststoffrohren mit ovalem Querschnitt, der die Sicherheit bei Vereisung erhöhen soll

2.2 Literatur

2.2.1 Dampf-/Temperaturbelastung

Die US-amerikanische Solar Rating & Certification Cooperation SRCC empfiehlt für den Einsatz von PEX-Rohren in Drainback-Anlagen (SRCC-Policy 2012), dass zwischen den Kollektoranschlüssen und den PEX-Rohren Kupferrohre von 90 cm (3 feet) Länge und minimal $\frac{3}{4}$ Zoll ohne Wärmedämmung eingesetzt werden sollen. Für Kollektoren mit Stagnationstemperaturen unter 99 °C können die Kupferrohre weggelassen werden. Zusätzlich wird von der SRCC darauf hingewiesen, dass Drainback-Anlagen, welche PEX-Rohre enthalten, drucklos betrieben werden sollen. Die SRCC-Policy enthält keine Details oder Begründungen für die Empfehlungen und auch keine Bezüge zu weiterführender Literatur.

Neben hohen Temperaturen verringert die Anwesenheit von (atmosphärischen) Sauerstoff in der Regel die Lebensdauer von Kunststoffen, da Sauerstoff bei verschiedenen chemischen Reaktionen teilnehmen kann, welche die Polymere mit der Zeit abbauen. Zudem beschleunigt die Anwesenheit von Metallionen die oxidativen Abbauprozesse (Maier and Schiller 2016).

2.2.2 Eisbildung in Rohren

Botpaev et al. (2016) haben verschlossene Metall- und Kunststoffrohre 50 Vereisungszyklen ausgesetzt. Die Metallrohre platzten nach kurzer Zeit unter Einwirkung der Eisbildung. Edelstahl-Wellrohre, die horizontal liegen, sind bis zu einer Befüllung von 75 % vereisungssicher bei den durchgeführten Versuchen. Ein PEX-Rohr, das mit in den Versuchen getestet wurde, blieb intakt.

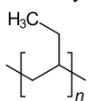
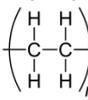
Burch et al. (2006) haben Vereisungsversuche u.a. mit auf dem US-Markt erhältlichen PEX-Rohren durchgeführt. Es wurden dabei PEX-Rohre ausgesucht, die sich im Wandmaterial unterscheiden: PE-Xa (peroxid-vernetzt), PE-Xb (silanvernetzt) und PE-Xc (strahlvernetzt, mit Beta- oder Gamma-Strahlung). Die Autoren haben mit den Materialien Zugversuche bei 0 °C Probertemperatur durchgeführt und konnten zeigen, dass Dehnungen bis rund 4 % mit fast linearer Spannungszunahme erfolgten. Den linearen Charakter der Spannungszunahme in diesem Bereich interpretieren sie als Zeichen, dass die Dehnung eher vollständig reversibel ist. Ein möglicherweise vorhandener irreversibler Dehnungsanteil könnte demgemäss ausreichend klein sein, um sehr viele schadlose Vereisungen während der Nutzungsdauer der Rohre zu ermöglichen. Bei PE-Xc trat dabei eine höhere Variabilität bei den Ergebnissen auf. Mit Berechnungen für einen Zylinder, in dem Druck aufgebaut wird, leiten die Autoren ab, dass der Rohrumfang bei Vereisung um 3.5 % zunimmt (axiale Dehnung 1.75 %), was gut mit durchgeführten Messungen übereinstimmt und innerhalb des Bereichs der linearen Spannungszunahme (s.o.) liegt. Allerdings ist dieser Bereich unklar zu bestimmen, weswegen gemäss Autoren eine Unsicherheit bzgl. der Widerstandsfähigkeit der PEX-Rohre bleibt. Es wurden Vereisungsversuche mit 450 Zyklen ausgewertet, wobei Rohrstücke unterschiedlicher Länge, von ca. 8 cm bis 40 cm Länge eingesetzt wurden. Für jeden PEX-Typ gab es Rohrdurchmesser, bei denen Defekte aufgetreten sind. Auch bei den eingesetzten Kunststoff-Fittings gab es Defekte. Bei den längeren Rohren gab es bei PE-Xa und -Xb keine Defekte. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Vorgänge beim Vereisen wassergefüllter Rohre komplex sind. Bei ungleichmässiger Vereisung – z.B. provoziert durch das Anbringen einer über die Längsachse des Rohres ungleich dicken Isolation – platzen die PEX-Rohre mit hoher Sicherheit, falls Wasser zwischen zwei Eispfropfen im Rohr eingeschlossen wird.

2.3 Dampfbelastungs-Tests

Von fünf ausgewählten Rohrsystemen, welche aus Rohr und dazugehörigen Steckverbindern bestehen, wurden jeweils kurze Rohrstücke zusammen mit den passenden Übergangsstücken und Muffen in Stagnations-Teststände am SPF eingebaut (Tabelle 1). Ziel war zu testen, ob die Rohrsysteme den hohen Temperaturen standhalten können, wie sie in Drainback-Anlagen typisch sind. Dabei wurde angenommen, dass im Kollektorfeld von Drainback-Anlagen ein Überdruck von maximal 1 bar erreicht wird, also ein Vordruck im System so eingestellt wird, dass im Betrieb Temperaturen bis zu 90 °C erreicht werden und dass nach dem Entleeren des Kollektorfelds verdampfendes Restwasser, welches die Absorberrohre benetzt, als überhitzter Dampf bei rund 120 °C in die ersten Meter der Rohrleitungen eintritt.

Im Vergleich zu diesen hohen Temperaturen werden von den Herstellern der Rohr-Fitting-Systeme Einsatzgrenzen ihrer Produkte von 70 - 80 °C für den Dauerbetrieb und 95 - 100 °C für kurzzeitige Temperaturspitzen (ca. 100 h) angegeben. Allerdings für Drücke von 10 bis zu 16 bar. Mit der Verwendung der Rohre in Drainback-Anlagen wird ihre Belastung bezüglich Druck also deutlich reduziert, was es möglich macht, die Temperaturbelastung etwas zu erhöhen. In welchem Umfang dies möglich ist, soll mit den Tests ermittelt werden.

Tabelle 1: Auflistung der ausgewählten Rohre, welche mit den Materialtests untersucht wurden.

Material	Hersteller	Aussen-durchmesser	Wand-stärke	Zulassung (Herstellerangaben)	Stützhülse	Dichtringe
PB, Polybuten 	A	20 mm	2 mm	70 °C, 10 bar	ja	k.A.
	B	20 mm	2.8 mm	70 °C, 10 bar (95 °C max. 100 h pro Jahr)	nein	EPDM
	C	20 mm	2 mm	80 °C, 10 bar (100 °C, total 100 h während der Lebensdauer)	ja	EPDM
PE-Xc, vernetztes Polyethylen 	B	20 mm	2.8 mm	70 °C, 10 bar (95 °C max. 100 h pro Jahr)	nein	EPDM
	D	20 mm	2 mm	70 °C, 10 bar	ja	k.A.

In den Stagnations-Testständen werden die eingebauten Komponenten zyklisch abwechselnd mit Wasserdampf und Wasser durchströmt. Die Zyklenlänge beträgt circa eine Stunde. Die Wasserdampf Temperatur korreliert mit dem Systemdruck in den Testständen, da Satttdampf erzeugt wird. Nachdem etwa während einer halben Stunde Dampf in den zu prüfenden Rohren kondensiert, werden die Rohre mit Wasser gespült, welches Temperaturen von rund 85 °C hat. Die Prüflinge werden also sowohl mit kondensierendem Dampf, hohen Temperaturen und Druck als auch mit Temperaturwechseln belastet.

2.3.1 Langzeitbelastungstest mit geraden Rohrstücken

Es wurden Rohrstücke mit Übergangsstücken und mehreren Muffen in den Dampf teststand eingebaut (Abbildung 1). Die Prüflinge wurden anschliessend während rund 16 Monaten in einem Langzeitbelastungstest mit Dampf-Wasser-Zyklen belastet. Die Rohre blieben während der gesamten Testdauer intakt.

Abbildung 2 zeigt die Belastungsdauern in den verschiedenen Temperaturklassen, mit denen die Prüflinge getestet wurden. Die Rohrsysteme sind demnach gegenüber Temperaturen bis ca. 135 °C über eine lange Belastungsdauer widerstandsfähig. Die Rohrsysteme hielten Temperaturen zwischen 100 °C und 135 °C für rund 10'000 h stand.

Der Überdruck in den Prüflingen gegenüber Atmosphärendruck (Abbildung 3) stellt sich in etwa entsprechend der Sattdampfcurve des Wassers ein. Es wurde ein kurzfristiger Maximaldruck von 1.41 bar gemessen. Der Druck in den Prüflingen lag während des gesamten Langzeittest deutlich über üblichen Systemdrücken in Kollektorfeldern (0.5 bar Überdruck auf Kollektorfeldhöhe für viele Anlagenkonzepte), was darauf schliessen lässt, dass die Druckbelastung in Drainback-Anlagen trotz Überschreitung der von den Herstellern angegebenen Maximaltemperaturen nicht zu einem Bersten der betrachteten Kunststoffrohre führt. Durch passende Wahl des Ansprechdrucks des Sicherheitsventils in der Anlage kann die Einhaltung des gewünschten Maximaldrucks garantiert werden.



Abbildung 1: Stagnationstest mit eingebauten Rohr-Fitting-Systemen. Es wurden jeweils kurze Rohrstücke mit mehreren Muffen verbaut.

Eine qualitative Bewertung der Rohrsysteme nach dem Ausbauen ergab, dass die PE-Xc-Rohre, anders als die PB-Rohre, eine leicht milchige Verfärbung an der Aussenwand aufgewiesen haben. PB- und PEX-Rohre mit Fittings, welche keine Stützhülse enthalten, wodurch der Anpressdruck des Rohres an den Dichtring durch das Rohr selbst erfolgend muss, hatten nach dem Test leichte Einschnürungen an den Stellen, an denen sie mit den EPDM-Dichtringen in Kontakt waren, ohne dass es dadurch aber zu Undichtheiten gekommen ist. Bei einem Teil derjenigen PB-Rohrsysteme, deren Steckfittings Metall enthalten, das mit dem Wasser und mit dem Rohrmaterial in Kontakt kommt, wurde das PB an den Rohrenden spröde. Aus der Literatur ist bekannt, dass Metallionen die Oxidationsgeschwindigkeit von Kunststoffen erhöhen (Maier and Schiller 2016), was die Ursache für die festgestellte Versprödung sein könnte.

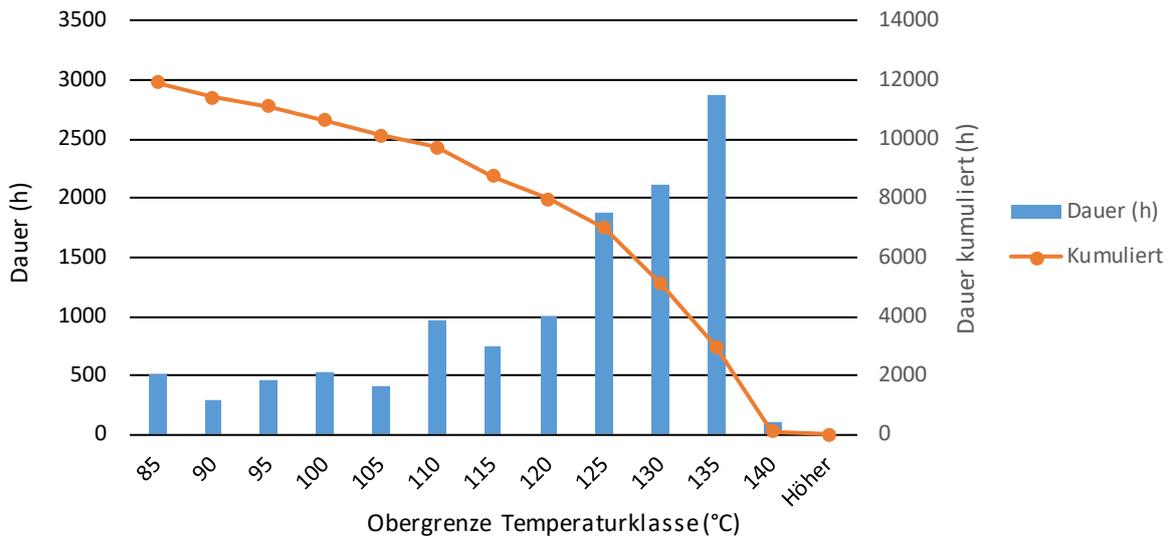


Abbildung 2: Langzeittest ohne Defekte – Dampfbelastung mit Belastungsdauern der Rohrsysteme je Temperaturklasse. Gesamtdauer des Tests 11'900 h.

Mit dem Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung IWK der HSR wurde diskutiert, ob eine chemische oder mechanische Analyse des Wandmaterials der nach den Tests ausgebauten Rohrstücke weitere Erkenntnisse liefern würde. Gemäss Einschätzung der Experten des IWK ist dies nicht der Fall. Mit den durchgeführten Tests wurde einerseits die relevante Funktion der Rohre und der Fittings, nämlich ihre Dichtheit, getestet. Andererseits lassen die geringe Anzahl der Prüflinge und die bezogen auf mögliche Situationen im Feld eingeschränkte Variabilität der getesteten Belastungen keine weiteren Rückschlüsse zu, wenn Messungen mit typischer Analytik aus dem Bereich der Kunststoffalterung (z.B. dynamische differenzielle Kalorimetrie DSC oder Spannungs-Dehnungs-Tests) durchgeführt werden. Solche Tests sind demnach nur aussagekräftig, wenn viele Prüflinge (sowohl gealterte intakte, als auch defekte) vorliegen und sich mit den Analysemethoden systematische Unterschiede feststellen lassen.

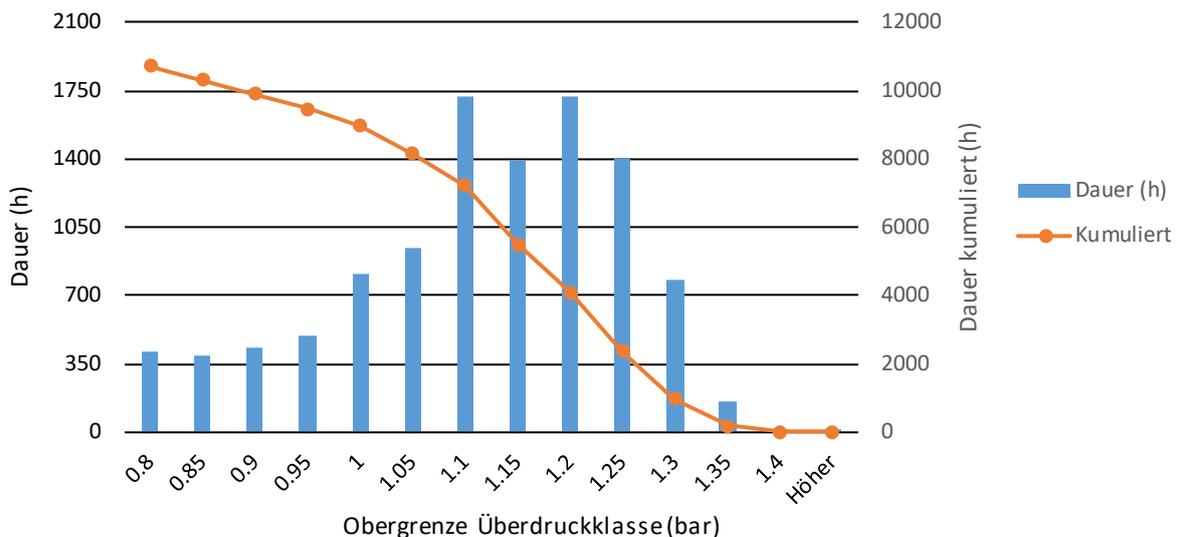


Abbildung 3: Langzeittest ohne Defekte – Druckbelastung mit Belastungsdauern der Rohrsysteme je Überdruckklasse. Gesamtdauer des Tests 11'900 h. Gezeigt ist der gleiche Belastungstest wie in Abbildung 2.

2.3.2 Test von Prüflingen mit 90°-Bögen

Eine wichtige Funktion der Steckfittings ist es, auch bei hohen Temperaturen und vorhandenem Innendruck sicher auf dem Rohr zu verbleiben. Gemäss Hinweisen von Herstellern ist diese mechanische Festigkeit schon bei Temperaturen leicht über der Störfalltemperatur insbesondere bei Mehrschichtrohren deutlich reduziert. Beim oben geschilderten Langzeittest (Kapitel 2.3.1) waren die aus Rohrstück und Fitting bestehende Prüflinge als gerade Prüfstrecke zwischen den Aufnahmen des Prüfstands eingespannt. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Abschieben des Fittings vom Rohr nur aufgrund dieser Einbaulage in den Teststand verhindert wurde. Es wurde daher ein zweiter Test aufgebaut, bei dem die Prüflinge mit 90°-Bögen installiert wurden und somit die aus dem Innendruck resultierende Kraft allein von den Fittings aufgenommen werden muss (Abbildung 4). Neben Rohren aus dem Langzeittest (Hersteller A, B und C aus Tabelle 1) wurden auch Mehrschichtverbundrohre mit Pressfittings eines weiteren Herstellers eingebaut. Es wurde jeweils ein Paar Prüflinge gleicher Bauart getestet.



Abbildung 4: Stagnationstest mit eingebauten Rohrstücken (Bildmitte), welche jeweils vier 90°-Bögen enthalten, damit die Kraftaufnahme der Fittings bei Überdruck getestet werden kann.

Die Dichtungen von zwei Rohrsystemen waren nach ca. 2.5 Monaten defekt. Einer der beiden Prüflinge des einzigen PEX-Rohrsystems mit Fittings ohne Stützhülsen war an einem Dichtring undicht (Hersteller B). Beide Prüflinge des Mehrschicht-Rohrs mit Pressfittings waren nach dieser Zeit an den Fittings undicht. Die weiteren Prüflinge, welche im Test intakt blieben, enthielten PB-Rohre.

Grosse Unterschiede in der Belastung zwischen diesem Test und dem Langzeittest zeigen sich in Abbildung 5 für die Temperatur und Abbildung 6 für den Druck. Der Prüfling aus PE-X Rohr mit einem Fitting ohne Stützhülse war folglich nach einer deutlich geringeren Belastung defekt als im Langzeittest. Die im Test geänderte Kraftaufnahme könnte Ursache für die Unterschiede sein, allerdings ist der Umfang der durchgeführten Tests gering, sodass keine gesicherten Rückschlüsse möglich sind.

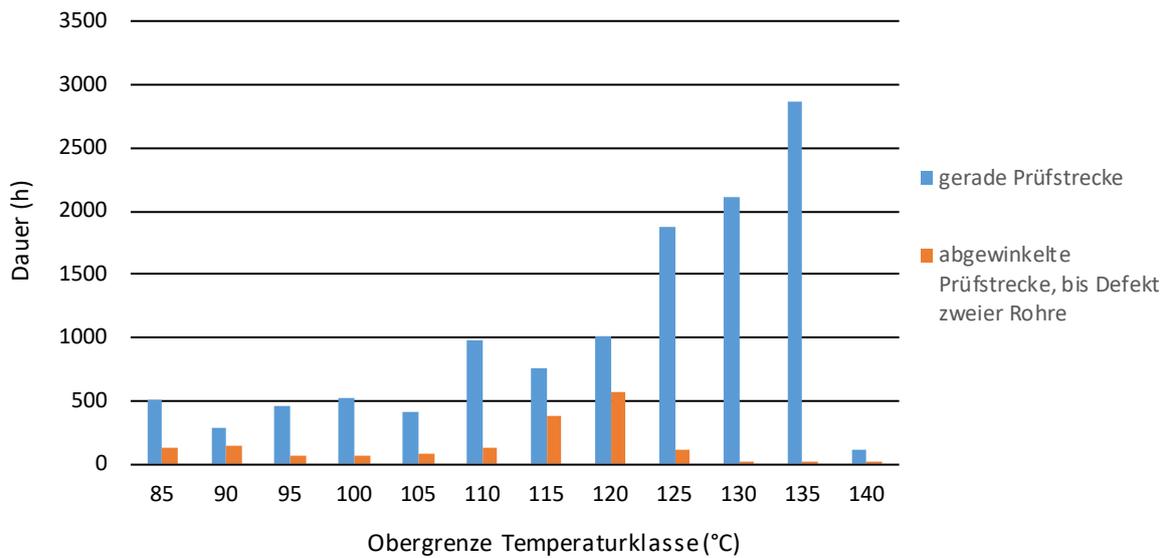


Abbildung 5: Vergleich der Dampfbelastung im Langzeittest (blau) mit der Dampfbelastung im Test, in dem Rohre mit 90°-Bögen verbaut wurden (orange), bezüglich Belastungsdauern je Temperaturklasse. Nur Rohre mit Test mit 90°-Bögen zeigten Defekte.

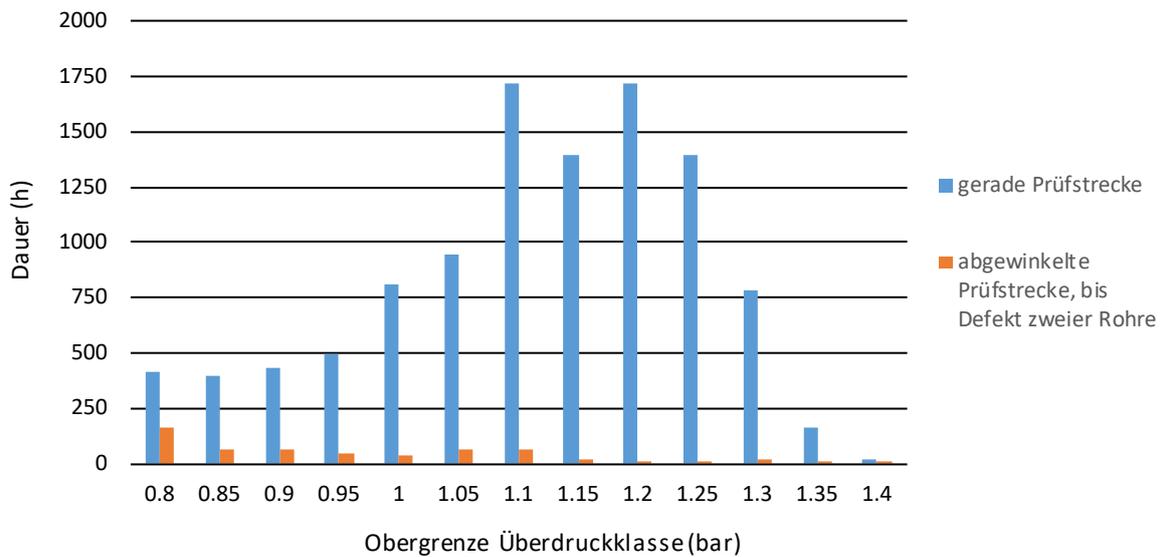


Abbildung 6: Vergleich der Druckbelastungen in den Tests gemäss Abbildung 5.

Beim Rohrsystem mit Fittings ohne Stützhülsen sind wie beim Langzeittest Einschnürungen beim Rohrquerschnitt auf Höhe der Dichtringe aufgetreten. Beim gleichen Rohrsystem trat bei Einsatz von PB-Rohren eine Versprödung des PB an den Rohrenden auf. Bei den anderen Rohrsystemen mit PB konnte solch eine Versprödung nicht festgestellt werden. Ursache für die Versprödung könnte eine Diffusion von Ionen des Metalls, das in den Fittings ohne Stützhülsen eingesetzt wird, in den Kunststoff sein. Metallionen führen in der Regel zu Versprödung von Kunststoffen.

2.3.3 Einfluss der Temperaturbelastung auf die Betriebsdauer von 30 Jahren

Um abschätzen zu können, in wie weit die in den Labortests angewandten Belastungsdauern für Rohre relevant sind, die in Solaranlagen eingesetzt werden, wurden typische Stagnationsdauern von Solaranlagen recherchiert, ein typisches Temperaturprofil für die Vorlaufleitung in einer Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung simuliert und mit Lebensdauerberechnungen verglichen.

Die Zeit, die eine Solaranlage während ihrer Betriebs- bzw. Lebensdauer in Stagnation ist, d.h. die Solarpumpe aus und der Absorber bei hoher Solareinstrahlung sehr heiss ist, wird von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt und kann von Anlage zu Anlage stark variieren. Wichtigste Einflussfaktoren sind dabei das Verhältnis und die zeitliche Übereinstimmung der Leistung der Kollektoren und der Entzugsleistung durch Nutzer und Speicher, was stark system- und standortspezifisch ist. Die jährlichen Stagnationsdauern von nicht-entleerenden³ Solaranlagen typischer Grösse wurden von Brunold und Petrasch (2011) abgeschätzt. Es wurden dort Daten aus der Literatur und von eigenen Simulationen und Versuchen verwendet.⁴ Die durchschnittliche Stagnationsdauer wird mit 117 Stunden pro Jahr angegeben.

Mit einer angenommenen Betriebsdauer einer Solaranlage von 30 Jahren ergibt sich aus diesen 117 h eine gesamthafte Dauer von ca. 3'500 h für nicht-entleerende Anlagen, während derer die Kollektoren in Stagnation sind und Teile der Verrohrung Temperaturen über 100 °C ausgesetzt sind. Da die Absorberrohre von Drainback-Anlagen bei anhaltender solarer Einstrahlung nach der Entleerung austrocknen können (siehe Kapitel 5.3), ist die tatsächliche Belastungsdauer der Kollektorfeldverrohrung in Drainback-Anlagen mit Temperaturen um 100 °C mit hoher Wahrscheinlichkeit geringer. Da die Varianz von Anlagen im Feld aber generell hoch ist, wird in der Folge konservativ von 3'500 h Stagnationsdauer in Drainback-Anlagen typischer Grösse bei einer Betriebsdauer von 30 Jahren ausgegangen.

Auch die Temperaturen im normalen Betrieb haben einen Einfluss auf die Lebensdauer der Kunststoffrohrleitungen. Diese Belastung wurde mit der Simulation einer Solaranlage zur Warmwasserbereitstellung in Mehrfamilienhäusern abgeschätzt.⁵ Die Zeitspannen, während derer die Vorlaufleitung in der Jahressimulation verschiedenen Temperaturklassen ausgesetzt ist, wurden dann auf 30 Betriebsjahre hochgerechnet. Die Temperaturen oberhalb 100 °C wurden manuell auf 105 °C, 115 °C bzw. 120 °C angepasst, um den Einfluss dieser drei Maximaltemperaturen auf die Lebensdauer abschätzen zu können (Profile siehe Abbildung 7 bzw. Tabelle 2). Für die beiden höheren Maximaltemperaturen wurde dabei die oben abgeleitete Stagnationsdauer von 3'500 h in 30 Jahren verwendet und Temperaturen im Bereich der Messergebnisse aus den Drainback-Entleerungsversuchen (Kapitel 5.3).

³ nicht-entleerend, also keine Drainback-Anlagen

⁴ Datengrundlage: 19 Feldanalgen, 17 Simulationen und 11 Versuche

⁵ Als Basis verwendet wurde das System 8p in Polysun und die Umgebung der Vorlaufleitung auf Aussen(temperatur) geändert.

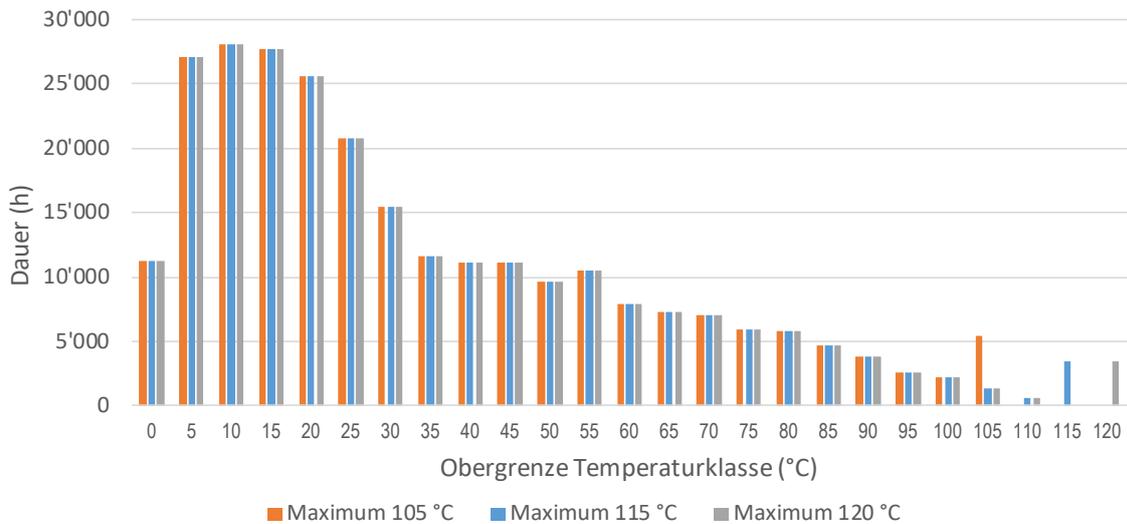


Abbildung 7: Temperaturprofile mit simulierten Rohrtemperaturen während 30 Jahren Betrieb nach Temperaturklassen, mit drei unterschiedlichen Maximaltemperaturen >100 °C bei Anlagenstillstand. Die Maximaltemperaturen wurden nicht simuliert, sondern frei (Max. 105 °C) bzw. basierend auf den Projektergebnissen gewählt.

Tabelle 2: Auszug aus den Temperaturprofilen der Abbildung 7 mit den höchsten Temperaturklassen.

Obergrenze Temperaturklasse (°C)	Belastungsdauer (h) im Profil bis 105 °C	Belastungsdauer (h) im Profil bis 115 °C	Belastungsdauer (h) im Profil bis 120 °C
100	2190	2190	2190
105	5420	1350	1350
110	-	570	570
115	-	3500	-
120	-	-	3500

Mit den Temperaturprofilen gemäss Abbildung 7 wurde die maximal erlaubte Belastung der Rohrmaterialien PE-RT, PE-X und PB in Anlehnung an die ISO 10508 (Miner's Regel) berechnet.⁶ Die Berechnungen basieren auf Standard-Materialwerten gemäss Normen und auch auf den Materialwerten eines spezifischen PE-RT. Die Berechnungen wurden mit Sicherheitsfaktoren gemäss Norm von 1.5 für Betrieb, 1.25 für kalten Zustand und 1.3 für Maximaltemperaturen durchgeführt.⁷

Mit den Standard-Materialwerten für PE-RT, PE-X und PB ergeben sich für die drei betrachteten Temperaturprofile maximale Einsatzdauern von 24 Jahren. Die erlaubten Spannungen variieren dabei zwischen 0.5 MPa und 2.5 MPa, was Innendrücken von 5 - 25 bar entspricht. Bezüglich Druck ist der Einsatz in Solaranlagen also unkritisch, allerdings sind gemäss den Berechnungen die Temperaturen entscheidend für die Lebensdauern der Kunststoffe, weswegen sich durch den geringeren Druck in Solaranlagen (<< 0.5 MPa) keine

⁶ Die Berechnungen wurden von Alex Stolarz von der DOW Europe GmbH in Anlehnung an ISO 10508 – Miner's rule zur Berechnung von Temperatur Profilen – zur Verfügung gestellt. Die Autoren bedanken sich für diese Unterstützung.

⁷ ISO 22391 (2009) für PE-RT, ISO 15875 (2003) PEX, ISO 12230 (2012) für PB-H

Verbesserung der Lebensdauer ergibt. Die 24 Jahre Lebensdauer mit Standard-Materialwerten liegen unter den angestrebten 30 Jahren Betriebsdauer.

Eine höhere Einsatzdauer ergibt sich beim betrachteten spezifischen PE-RT Produkt.⁸ Hier liegt die Einsatzdauer mit den gleichen Temperaturprofilen bei 48 Jahren mit einer erlaubten Spannung von 1 MPa (10 bar) bzw. 2 MPa für das Profil mit 105 °C Maximaltemperatur. Gemäss Aussage von DOW muss für andere Produkte überprüft werden, ob diese über den von der Norm geforderten Mindestwerten liegen und die mit der Anwendung verbundenen höheren Temperatur Beanspruchungen erfüllen können.

2.3.4 Fazit zu den Dampfbelastungs-Tests

Zwei der vier in den Dampftests untersuchten Rohrsysteme zeigten keine Defekte (Hersteller A und C aus Tabelle 1). Getestet wurden gerade Prüflinge und Prüflinge mit 90°-Fitting-Bögen. Die geraden Prüflinge hielten Temperaturen zwischen 100 °C und 135 °C, welche oberhalb der Einsatzgrenze gemäss Angaben der Hersteller liegen, für ca. 10'000 h stand. Diese 10'000 h liegen weit über der geschätzten Stagnationsdauer von Solaranlagen typischer Grösse von 3'500 h während einer Betriebsdauer von 30 Jahren. Beim Test von Prüflingen mit 90°-Bögen, bei denen also die Fittings ihr Abrutschen von den Rohrenden bei vorhandenem Innendruck ausschliesslich selbst verhindern müssen⁹, versagten die Fittings von zwei Herstellern. Ursache waren Undichtheiten bei den Dichtringen. Eines der Produkte, das versagte, war ein Mehrschichtrohr mit Pressfittings, welches in diesem Test zusätzlich zu den anderen Rohren eingebaut wurde. Das andere Produkt war ein Rohrsystem, das im Langzeitversuch intakt blieb. Im Unterschied zu den anderen Rohrsystemen mit Steckfittings aus dem Langzeitversuch, hat dieses Produkt keine Stützhülsen im Fitting integriert. Dies konnte möglicherweise im Aufbau mit den 90°-Bögen zu einem Versagen führen, indem das erwärmte Rohr die Kräfte vom Anpressdruck des Dichtrings und vom Klemmring mit Krallen, die auf das Rohr einwirken, nicht standhalten kann und der Dichtring somit zu viel Spiel erhält. Die Tests lassen aufgrund der geringen Anzahl der Prüflinge aber keine gesicherten Rückschlüsse zu.

Die Tests wurden nicht mit Kollektoren durchgeführt, sondern im Labor mit einem Teststand mit Dampferzeuger. Beim Einsatz der Kunststoffrohre in Kollektorfeldern muss eine Trennung der Rohre/Fittings von den Kollektoranschlüssen erfolgen, da diese deutlich heisser als die hier getesteten 135 °C werden können. Solch eine thermische Entkopplung zwischen Absorber-Sammelrohr und Kunststoff-Fittings und -rohren entspricht auch der Empfehlung von SRCC (2012), welche den Einbau eines rund 90 cm langen Metallrohrs zwischen Kollektoranschluss und Kunststoffkomponenten empfiehlt.

Die aufgetretene Versprödung bei Rohren mit Steckfittings, welche Metall enthalten, geben einen Hinweis, dass in Drainback-Anlagen Fittings verwendet werden sollten, welche rein aus Kunststoff hergestellt sind.

Die Berechnung der Lebensdauern der Rohrmaterialien PE-RT, PE-X und PB mit Temperaturprofilen, wie sie in Drainback-Anlagen während 30 Jahren Betrieb zu erwarten sind, zeigen, dass die Belastungen für Materialeigenschaften, wie von den entsprechenden Normen gefordert, etwas zu hoch sind. Die Produkte auf dem Markt sind üblicherweise aber beständiger gegenüber hohen Temperaturen. Für ein spezifisches PE-RT-Produkt ergeben

⁸ DOWLEX 2388 der Firma DOW

⁹ und folglich keine Kräfte vom eingesetzten Dampfteststand aufgenommen werden konnten

sich erlaubte Belastungsdauern von 48 Jahren, was deutlich über den anvisierten 30 Jahren liegt.

2.4 Vereisung wassergefüllter Rohre

Die Vereisungstests, mit denen untersucht wird, ob Rohrleitungen mit verbleibendem Wasser im Rohr (z.B. aufgrund fehlerhafter Einbaulage) im Winter vereisungssicher sind, wurden in Klimakammern im Labor durchgeführt. Es wurden mit Wasser befüllte Prüflinge zyklisch gefroren und aufgetaut, was dem Fall entsprechend soll, dass das Wasser in den Rohren während ihrer Nutzungsdauer in einer Solaranlage in den Wintern wiederkehrend vereist.

Die Expansion des Wassers kann dabei innerhalb des ursprünglichen Rohrquerschnitts entlang der Rohrachse, also ohne Druckaufbau, erfolgen, oder mit Druckaufbau und Dehnung der Rohrwand. Welche der beiden Arten von Volumenexpansion stattfindet bzw. in welchem Masse, hängt vermutlich davon ab, ob das Wasser im Rohr (zunehmend) (z.B. zwischen zwei Eispfropfen) eingeschlossen wird. Solche Eispfropfen können möglicherweise an Stellen geringerer Rohrwärmedämmung entstehen, bei Rohrschellen, Fittings und anderen Bauteilen.

Zusätzlich zu den marktüblichen Rohren mit rundem Querschnitt wurden auch Rohre mit ovalem Querschnitt getestet. Die Form des Ovals (Länge der Halbachsen) wurde so gewählt, dass durch eine Angleichung der Halbachsen infolge einer Volumenzunahme bei Eisbildung eine Erhöhung des Rohrrinnenquerschnitts von 10 % resultiert. Diese 10 % liegen leicht über der Volumenzunahme von Wasser bei Vereisung von ca. 8 %. Die Idee des Einsatzes ovaler Rohre ist also, dass die Rohrwand hin zu einem runden Querschnitt verbogen wird, wenn Wasser im Rohr friert, ohne dass dadurch die Rohrwand irreversibel gedehnt wird. Es wurden ovale Rohre aus PB und aus PE-X verwendet. Zur Herstellung von ovalen PB-Rohren wurden frisch extrudierte 16 mm PB-Rohre von 4 m Länge vor der Kristallisation zwischen Platten mit definiertem Abstand oval gepresst. Die verwendeten 16 mm PE-RT-Rohre wurden im Anschluss an die Extrusion direkt im Werk zu ovalem Querschnitt kalibriert.

In den ersten Versuchen mit langen Rohrstücken (Kapitel 2.4.1) wurde der mögliche Einschluss von flüssigem Wasser dadurch abgebildet, dass ein Teil der Rohre nach dem Befüllen mit Wasser mit Stopfen (Pressfittings) verschlossen wurden. Ein anderer Teil der Rohre wurde offengelassen. Da die Versuche widersprüchliche Ergebnisse lieferten, wurde ein weiterer Versuch mit stärker kontrollierten Rahmenbedingungen und einer grösseren Anzahl an Vereisungszyklen mit verschlossenen Rohren durchgeführt (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Vereisungsversuche mit langen Rohrstücken

Verschiedene Kunststoffrohre wurden in einer begehbaren Klimakammer in zwei Versuchen 50 bzw. 112 Vereisungszyklen ausgesetzt. Ein Teil der Rohrstücke wurde mit Muffen unterteilt und mit Stopfen verschlossen. Zudem wurden einige Rohre auf einem Teilabschnitt in der Mitte des Rohrs wärmegeädämmt, um eine inhomogene Vereisung, wie sie im Feld auftreten kann, zu erreichen. Es wurden jeweils drei gleiche Prüfmuster getestet, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse überprüfen zu können. Es wurden verschiedene Rohre aus PB und PEX für die Versuche verwendet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Rohrtypen, die in den Tests untersucht wurden.

Material	Querschnitt	Durchmesser (mm)	Wandstärke (mm)	Weiteres
PB	rund	16	2.0	-
	rund	16	2.0	sauerstoffdicht
	rund	25	2.3	-
	oval	16	2.5	-
PEX	rund	16	2.0	5-Schicht
	rund	25	2.3	sauerstoffdicht
	oval	16	2.5	-

Bei den Rohren mit Stopfen und Muffen, wurden jeweils die vom Hersteller vorgesehen Pressfittings eingesetzt.

Zum Befüllen der Rohre wurde entkalktes Wasser verwendet, wie es üblicherweise in Heizkreisen eingesetzt wird. Es wurden 4 m bzw. 1.5 m lange, u-förmige Rohre (vertikale Schenkel, U-Bogen unten) und zusätzlich kürzere Rohrstücke waagrecht getestet. Die befüllten Rohre wurden in einer begehbaren Klimakammer an Gittern befestigt, sodass ein guter Wärmeübergang zur temperierten Luft der Klimakammer bestand (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Aufbau des Vereisungstest in der begehbaren Klimakammer.

Die Lufttemperatur der Klimakammer wurde pro Zyklus jeweils rund 2 Stunden auf -20 °C bzw. $+20\text{ °C}$ gehalten (siehe Abbildung 9). Die blaue Kurve in Abbildung 9 zeigt den Temperaturverlauf in der Klimakammer. Ein Zyklus dauert ca. 6 Stunden. Die orange Kurve zeigt die gemessene Wassertemperatur in einem zusätzlich installierten 25 mm-Rohr. Jeweils beim Durchgang des Gefrierpunkts ist die „Pufferung“ der Wassertemperatur auf 0 °C durch die Abgabe resp. Aufnahme latenter Wärme zu erkennen. Der Temperaturverlauf beim Gefrieren (erst Pufferung bei 0 °C , dann weitere Abkühlung) zeigt, dass das Wasser im Rohr gefroren ist und nicht etwa nur unterkühlt wurde (und unterkühlt in flüssigem Aggregatzustand vorlag). Durch die weitere Abkühlung auf ca. -20 °C während ca. 1 Stunde ist es plausibel, dass das gesamte Wasser im Rohr gefroren ist und das Rohr der im Test gewünschten Volumen- und ggf. Druckzunahme durch die Vereisung des Wassers ausgesetzt war.

Während der Vereisungstests wurde der Durchmesser der Rohre wiederholt mit einer Schieblehre gemessen. Zudem wurden die Rohre und die Fittings in regelmässigen Zeitabständen auf Beschädigungen oder Veränderungen untersucht.

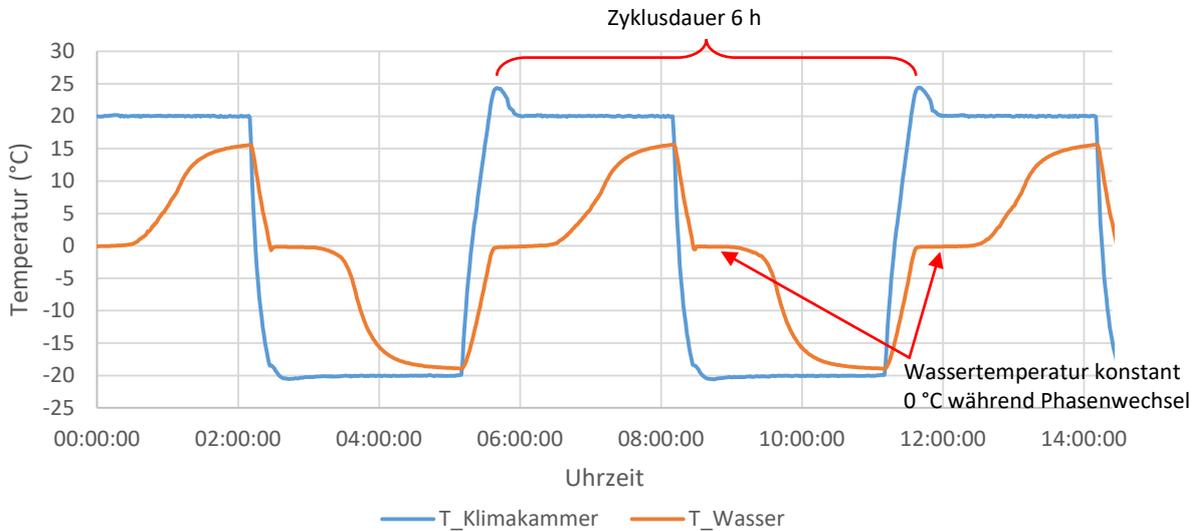


Abbildung 9: Ausschnitt des gemessenen Temperaturverlaufs der Luft in der Klimakammer und des Wassers in einem 25 mm-Rohr (2.5 Zyklen dargestellt).

Ergebnisse der beiden Tests:

- 1) Ungedämmte Rohre mit offenen Rohrenden blieben intakt (N = 9, PB und PE-X, beide Tests).
- 2) Ungedämmte Rohre mit verschlossenen Rohrenden platzten in der Regel (N = 17, PB und PE-X): 5 von 8 PE-X-Rohren defekt, 8 von 9 PB-Rohre defekt.
- 3) Von den mittig gedämmten Rohren mit verschlossenen Rohrenden (N = 6, PB) platzten alle 16 mm-Rohre (Test 1, N = 3) und alle 25 mm-Rohre blieben intakt (Test 2, N = 3).
- 4) Alle mittig gedämmten Rohre mit offenen Rohrenden blieben, bis auf eine Ausnahme, intakt (N = 16, PB und PE-X und PE-RT, beide Tests).
- 5) Bei den verschlossenen PB-Rohren (gedämmt und ungedämmt) gingen fast alle 16 mm-Rohre defekt (11 von 12) und alle 25 mm-Rohre (N = 3) blieben intakt.
- 6) Die beiden Tests geben widersprüchliche Ergebnisse für die Prüflinge aus 16 mm PEX-Rohr, die nicht gedämmt und verschlossen waren, für PB-Rohre, die gedämmt und verschlossen waren, und für 16 mm PB-Rohre, die mittig gedämmt und offen waren.
- 7) Eine irreversible Dehnung der Rohrquerschnitte wurde für die mittig gedämmten Rohre unter der Dämmung festgestellt (ca. 0.2 mm für 16 mm-Rohre bis ca. 1 mm für 25 mm-Rohre). Nicht-gedämmte Rohre haben keine irreversible Dehnung erfahren.
- 8) Keines der Rohre mit ovalem Querschnitt ist geplatzt. Die ovalen Rohre mit Dämmung in der Mitte haben alle eine irreversible Dehnung unter der Dämmung erfahren (0,8 - 1,2 mm entlang der kurzen Halbachse, welche vor dem Versuch 6.45 mm lang war (kurzer Durchmesser des Ovals also 12.9 mm), was einer Dehnung von 7.8 % entspricht).
- 9) Sämtliche Metallrohre (Kupferrohre und Inox-Wellrohre) sind nach wenigen Zyklen geplatzt.

Für Detailauswertungen beider Tests siehe Tabelle 24 im Anhang A.1.

Schlussfolgerungen zu den Vereisungstests mit langen Rohrstücken:

Anders als aufgrund der Ergebnisse des ersten Tests erwartet, sind im zweiten Test die verschlossenen Rohre in der Regel nicht geplatzt (6 von 8 sind intakt geblieben). Ein Verschluss der Rohre führt demnach nicht unbedingt zu einem Platzen. Bei den verschlossenen runden Rohren führen die beiden Tests zu widersprüchlichen Ergebnissen.

Die im zweiten Test eingesetzten ovalen Rohre sind, auch wenn sie verschlossen waren, intakt geblieben. Allerdings ist vor dem Hintergrund, dass, anders als im ersten Test, im zweiten Test kaum verschlossene Rohre geplatzt sind, die Aussagekraft der beiden Tests zu hinterfragen. Runde Rohre sind möglicherweise ausreichend sicher gegenüber Einfrieren von Wasser.

Getestet wurde mit dem Verschluss durch Fitting-Stopfen der Extremfall, dass Wasser in Rohrleitungen eingeschlossen ist. Es ist unklar, inwieweit der Versuchsaufbau mit Stopfen für Feldanlagen repräsentativ ist. Der mit den Stopfen dargestellte Einschluss von Wasser bedingt in Feldanlagen das Vorhandensein gleich zweier Wärmebrücken in einem wassergefüllten Rohrstück, an denen sich stabile Eispfropfen ausbilden, bevor das restliche Wasser friert. Dies könnte an Rohrschellen oder anderen Bauteilen wie Fittings der Fall sein.

Von den offengelassenen Prüflingen sind 27 von 28 intakt geblieben. Das Rohr, das geplatzt ist, war mittig gedämmt. Möglicherweise bildeten sich ausserhalb dieser Wärmedämmung Eispfropfen, was zu einem Einschluss des restlichen Wassers und einem zu grossen Druck beim Durchein dieses Wassers führte. Die 27 intakten, offengelassenen Prüflinge lassen den zu erwartenden Schluss zu, dass Eisbildung innerhalb eines Kunststoffrohrs nicht zu einer Zerstörung des Rohrs führt, wenn die Volumenausdehnung bei Eisbildung innerhalb des Rohrs erfolgen kann.

Alle Rohre mit gedämmter Mitte haben eine Dehnung erfahren, d.h. auch die ovalen. Dies könnte damit erklärt werden, dass in den nicht-gedämmten Rohrschenkeln¹⁰ die Vereisung beginnt und sich somit Eispfropfen bilden, die das Wasser innerhalb des gedämmten Rohrabschnitts einschliessen. Mit fortschreitender Eisbildung im gedämmten Abschnitt, welche von den Eispfropfen ausgehen dürfte, da diese als Kristallisationskeime dienen, kann dort sukzessive der Rohrinneindruck steigen. Durch diesen Vorgang kann die festgestellte plastische Verformung der Rohrwand innerhalb des gedämmten Abschnitts entstehen. Die Dehnung der Rohre wurde im zweiten Test nach 112 Vereisungszyklen gemessen. Es ist vorstellbar, dass die Dehnung mit weiteren Zyklen fortschreitet und schliesslich zu einem Platzen der Rohre führen kann.

2.4.2 Vereisungsversuch mit stärker kontrollierten Rahmenbedingungen

Da die beiden Tests in der grossen Klimakammer zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, wurde ein Versuch in einem kleinen Klimaschrank aufgebaut (Abbildung 10, links), bei dem die Rahmenbedingungen besser kontrolliert wurden. Zudem wurden die Prüflinge 1'200

¹⁰ die im Versuchsaufbau auch nach oben zeigten, womit sich wegen der Dichteanomalie von Wasser bei 4 °C das kälteste Wasser in den Schenkeln durch Konvektion ansammeln kann und dort zur Initiierung der Vereisung führen kann.

Vereisungszyklen ausgesetzt und somit einer deutlich grösseren Anzahl Zyklen als in den Versuchen in der thermisch trägeren Klimakammer.

Es wurden vier runde und vier ovale Rohrstücke aus demselben Werkstoff (PE-RT) verwendet, welche bei einem Rohrhersteller mit demselben Extruder produziert wurden, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass ihr Wandmaterial die gleiche Elastizität aufweist. Die Rohrstücke wurden mit demineralisiertem und entgastem Wasser gefüllt und mit Pressfitting-Stopfen verschlossen. Im Klimaschrank wurden 1'200 Zyklen mit Lufttemperaturen von -30 °C und 30 °C ohne Befeuchtung der Luft gefahren. Die Vereisung des Wassers wurde mit Anlagefühlern an zwei Rohren (einem runden, einem ovalen) überwacht, womit das Erreichen der Vereisung des Wassers bei -30 °C Lufttemperatur kontrolliert werden konnte. Undichtheiten wurden mittels Elektroden detektiert, welche entlang der Rohre angebracht wurden. Um mögliche Ausbuchtungen der Rohre durch die Vereisung feststellen zu können (Beulen, die wasserdicht bleiben), wurden die Rohre regelmässig visuell kontrolliert.



Abbildung 10: Links: Vereisungsversuch mit Rohren im Klimaschrank. Es wurden PE-RT-Rohre mit rundem und ovalem Querschnitt getestet. Rechts: Defektes Rohr mit Ausstülpung, welche geplatzt ist.

Die Auswertung des Versuchs zeigt Abbildung 11. Zwei von vier der Rohre mit ovalem Querschnitt sind intakt geblieben und zeigten keinerlei sichtbare Veränderungen. Bei den runden Rohren blieb ein Rohr intakt. Jeweils ein Rohr bildete durch die Volumenausdehnung des Eises eine Beule aus, die jedoch nicht platzte.

Beide Rohre mit angeklebten Anlagefühlern, siehe Vermerk "Fühler" in Abbildung 11 sind geplatzt, indem sich eine Auswölbung des Wandmaterials gebildet hat (Abbildung 11, rechts). Ob dies ein Zufall war und die Fühler ohne Einfluss waren, kann aufgrund der geringen Fallzahl nicht gesagt werden. Ein Mechanismus, der zu einem Platzen wegen dieser Fühler führte, ist schwer vorstellbar. Die Tatsache, dass diese Rohre mit ihren leichten Änderungen im Aufbau (Anlagefühler) geplatzt sind, stützt die Einschätzung der Autoren, dass die Vereisungsversuche wegen der Anwesenheit unbekannter oder schlecht kontrollierbarer Einflussfaktoren und unklarer Mechanismen zu stark streuenden Ergebnisse führen. Ein wichtiger Einflussfaktor könnte zudem sein, dass die Vereisung von Wasser eine deutlich stochastische Natur hat bezüglich Zeitpunkt und Ort des Vereisungsbeginns und dem Fortschreiten der Vereisung, was bei baugleichen Rohren zu unterschiedlichen Resultaten führt.

Die Ergebnisse dieses dritten Vereisungsversuchs lassen eine Tendenz dafür erkennen, dass die Rohre mit ovalem Querschnitt eher intakt bleiben beziehungsweise Defekte später auftreten und sie somit etwas robuster gegenüber Vereisung sind als Rohre mit rundem Querschnitt. Aufgrund der geringen Anzahl an verwendeten Prüflingen lassen sich aber keine belastbaren Rückschlüsse ziehen.

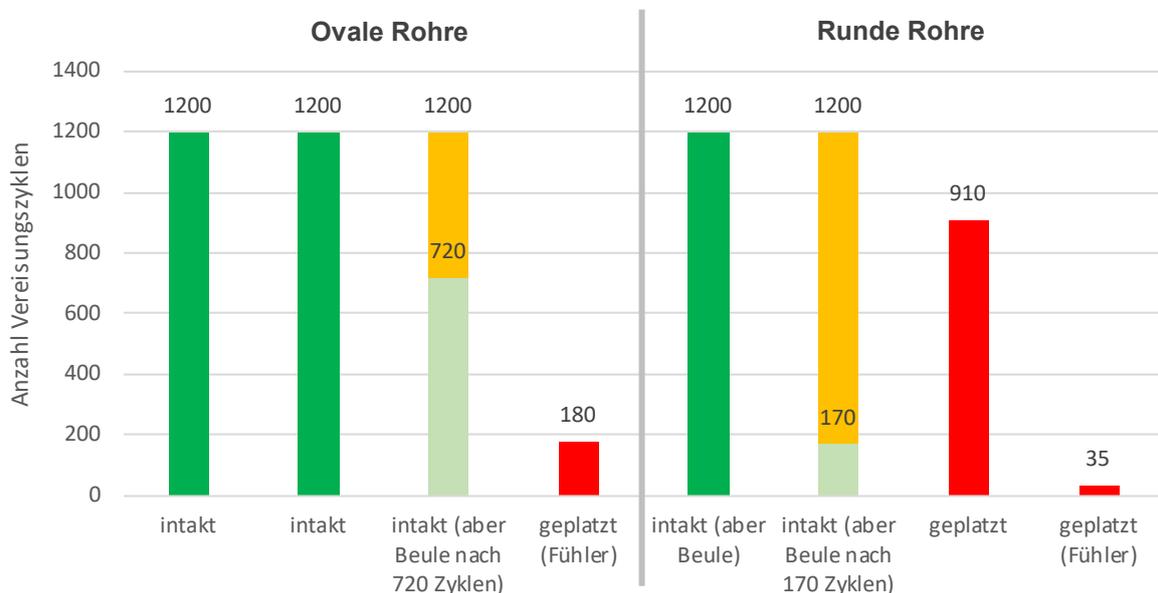
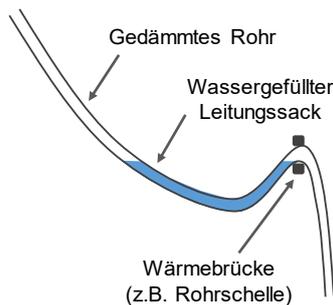


Abbildung 11: Vergleich der Auswirkungen der Vereisungszyklen auf die ovalen und die runden Rohre mit Angabe der Zyklusanzahl bis ein Rohre defekt war (rot), eine Beule zeigte aber dicht blieb (hellgrün) bzw. gesamte Zyklen für intakt gebliebene Rohre bis Abbruch des Tests (grün bzw. orange).

2.4.3 Fazit zu den Vereisungstests

Es wurden drei Vereisungsversuche mit unterschiedlichen Rohrkonfigurationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche widersprechen sich teilweise, was mutmasslich an Einflussfaktoren liegt, welche schwer zu kontrollieren oder unbekannt sind, wie etwa die Konzentration von im Wasser gelösten Gasen, der Einfluss der Materialien der Fittings (Metallionen als Kristallisationskeim) oder Anderes. Mutmasslich kann auch von einer stochastischen Natur von Vereisungsvorgängen ausgegangen werden und somit von einer erschwerten Reproduzierbarkeit und von widersprüchlichen Ergebnissen bei geringer Versuchsanzahl.

a) Schrägdach: eher unproblematisch



b) Flachdach: eher unproblematisch



c) Flachdach: problematisch



Abbildung 12: Beispiele für Situationen mit fehlerhaftem Rohrverlauf im Solarkreis, wodurch Wasser nach der Entleerung der DB-Kollektoren zurückbleibt. Wenn keine Wärmebrücken am Rohr vorhanden sind (a: linker Meniskus) oder an vorhandenen Wärmebrücken kein stehendes Wasser vorkommt (a & b), ist eine Eispropfenbildung unwahrscheinlich. Im Fall c) erfolgt eine Zerstörung des Rohrs durch Einschuss gefrierenden Wassers zwischen Eispropfen mit höherer Wahrscheinlichkeit.

Es lassen sich anhand der Versuche dennoch einige wichtige Aussagen treffen. Wenn die Rohre unverschlossen waren, blieben sie in 96 % der Fälle (27 von 28) intakt. Das Anbringen von Stopfen, die das Wasser in den Rohren einschliesst, erhöht die Wahrscheinlichkeit stark, dass die Rohre platzen. Allerdings gibt es hier deutliche Unterschiede zwischen den Tests und eher widersprüchliche Ergebnisse, da, anders als im ersten Test, im zweiten Test viele der verschlossenen Rohre intakt blieben. Dabei stellt das Verschliessen der Rohre die stärkste Belastungssituation bei Vereisung dar. Die Wahrscheinlichkeit, mit der in einer Feldanlage ein beidseitiger Einschuss von Wasser durch Eispropfen in Feldanlagen erfolgt, bleibt dabei unklar und ist sicherlich stark von den lokalen Gegebenheiten der spezifischen Anlage abhängig. Abbildung 12 zeigt drei mögliche Situationen im Feld, bei denen Wasser im Solarkreis in abgesenkten Rohrabschnitten zurückbleibt. Die Laborergebnisse legen nahe, dass, anders als Fall c, die Fälle a und b unproblematisch sind, da sich an den Wärmebrücken vermutlich keine Eispropfen bilden können.

Rohre mit ovalem Querschnitt wurden im zweiten und dritten Vereisungsversuch getestet. Die Rohre blieben im zweiten Test mit 112 Vereisungszyklen intakt. Im dritten Test traten Defekte auf, allerdings nach wesentlich mehr Vereisungszyklen. Die ovalen Rohre sind gemäss drittem Test etwas robuster als die runden. Aufgrund der geringen Anzahl von Prüflingen sind die Ergebnisse des dritten Tests aber nicht sehr belastbar.

Alle wassergefüllten Metallrohre (verschlossene sowie offen gelassene) platzen nach wenigen Vereisungszyklen. Dies ist auch bekannt aus der Erfahrung und der Literatur.

2.5 Fazit zum Einsatz von Kunststoffrohren mit Steckfittings

In den Belastungstests mit Temperaturen oberhalb der Einsatzgrenzen der Rohrsysteme, welche aus Kunststoffrohr und Steckfittings bestehen, traten bei zwei Rohrsystemen keine Defekte auf. Sie widerstanden Temperaturen bis ca. 135 °C und einem Überdruck bis 1.27 bar. Kumuliert hielten die Rohrsysteme Temperaturen zwischen 100 °C und 135 °C für ca. 10'000 h stand. Die Berechnungen der Lebensdauern von PE-RT, PB und PE-X für Temperaturprofile, wie sie in DB-Anlagen zu erwarten sind, zeigen unter der Annahme von Materialeigenschaften gemäss Normen, dass die anvisierten 30 Jahre knapp nicht erreicht werden können. Für ein spezifisches Produkt (PE-RT) können jedoch 48 Jahre erreicht werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass weitere Produkte auf dem Markt über ähnliche Lebensdauern verfügen, was mit dem jeweiligen Rohrerhersteller abgeklärt werden muss.

Die Versuche geben einen Hinweis darauf, dass die Steckfittings derart produziert werden sollten, dass sie über Stützhülsen verfügen und dass sie rein aus Kunststoff bestehen. Ein Rohrsystem mit Fittings ohne Stützhülsen und mit Rotguss-Teilen in den Fittings hielt den Belastungen im Dampftest nicht stand und wurde an den Dichtringen undicht. Die Rohrenden wurden zudem spröde, was möglicherweise durch eine beschleunigte Oxidation des Kunststoffs wegen der Anwesenheit von Metallionen erklärt werden kann.

Dass die Dampftemperaturen nach der Entleerung eines gut entleerenden Kollektorfeldes unterhalb der hier getesteten Temperaturen bleiben und somit unkritisch für die Rohrkomponenten sind, wird in Kapitel 5.3 gezeigt. Zu beachten ist, dass aufgrund der möglichen hohen Temperaturen in den Kollektoren zwischen Kollektoranschluss und den Kunststoffen eine thermische Entkopplung stattfinden muss, sodass die Wärmeleitung vom Absorber zum Kunststoff via Rohrmaterialien unterbunden ist. Der Einbau eines kurzen Rohrstücks von unter einem Meter Länge ist dafür ausreichend gemäss eigenen Erfahrungen (Kapitel 5.4) und gemäss Literatur (SRCC-Policy 2012). Falls die Kollektoren schlecht entleeren und deswegen eine hohe Dampfleistung nach der Entleerung aufweisen, müssen die Einwirkung von überhitztem Dampf in die Rohrleitungen berücksichtigt und robuste Kondensationsstrecken für den Dampf eingeplant werden.

Die Anwesenheit von Sauerstoff verringert die Lebensdauer von Kunststoffen, da die Polymere oxidativ abgebaut werden. Die Anwesenheit von atmosphärischem Sauerstoff ausserhalb der Rohre von Solaranlagen kann nicht verhindert werden, jedoch kann mit der Befüllung des Gasvolumens der Solaranlage (Rohre, DB-Volumen, etc.) mit Stickstoff die Sauerstoffkonzentration innerhalb der Rohre reduziert werden, also dort, wo auch die höchsten Temperaturen auftreten, wodurch die Abbauprozesse grundsätzlich beschleunigt sind.

Die Vereisungstests haben ergeben, dass die Volumenausdehnung von Wasser beim Vereisen im Rohrinnen dann unproblematisch ist, wenn das Wasser bzw. das Eis nicht wegen eines verblockten Rohrquerschnitts eingeschlossen ist. Bei Einschluss von Wasser innerhalb des Rohrs durch Ausbildung von Eispfropfen ist ein Platzen des Rohrs bei einer Durcheisung möglich. Solch ein Einschluss kann mutmasslich dann erfolgen, wenn innerhalb eines fehlerhaft abgesenkten und wassergefüllten Rohrabschnitts sich Eispfropfen an Stellen mit niedriger Wärmedämmung ausbilden können (bspw. an Rohrschellen oder Fittings). Sollen die Kunststoffrohre eine gewisse "Versicherung" gegenüber vereisendem Wasser in der Kollektorfeldverrohrung geben, müssen solche Wärmebrücken also beachtet und ggf. verhindert werden.

Der Ansatz, Rohre mit ovalem Querschnitt einzusetzen, um die Robustheit gegenüber Eisbildung zu erhöhen, kann aufgrund der geringen Anzahl getesteter Prüflinge nicht abschliessend bewertet werden. Der ausgeführte Versuch zeigt tendenziell eine höhere Robustheit der ovalen Rohre.

3 Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C

Der Grund für den Einsatz hochwertiger und somit teurer Materialien in solarthermischen Anlagen sind in erster Linie die hohen Temperaturen, die in effizienten, verglasten Solarkollektoren auftreten können. Hohe Stagnationstemperaturen stellen auch ein Investitionsrisiko dar. So können Fehler bei der Planung, Installation oder Wartung der Anlage zu Systemausfall und zu Zerstörung von Komponenten (z.B. Dichtungen) führen. Dies zum Beispiel dann, wenn die erwartete Wärmelast nicht vorhanden ist, das Entleerungsverhalten schlecht ist, das falsche Frostschutzmittel verwendet wurde, das Frostschutzmittel über zu lange Zeit nicht kontrolliert wird, falsche oder inkompatible Komponenten verbaut wurden, etc.

Dieses Arbeitspaket war deshalb der Entwicklung von Kollektoren mit einem integrierten, inhärent sicheren Überhitzungsschutz gewidmet. Das Ziel ist, dass ein entsprechender Kollektor bei Betriebstemperaturen bis ca. 80°C eine Effizienz vergleichbar mit der eines guten konventionellen Flachkollektors aufweist. Oberhalb dieser Temperatur soll ein geeigneter Mechanismus die Effizienz reduzieren, so dass die Stagnationstemperatur bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², einer Umgebungstemperatur von 30 °C und bei Windstille 100 °C nicht überschreitet.¹¹ Eine solche Temperaturbegrenzung würde die Verwendung günstiger Materialien im Kollektor und im Kollektorkreislauf ermöglichen.

Wegen des geringen Kostenanteils der Kollektoren an den Gesamtkosten (Philippen et al. 2016), kann der überhitzungssichere Kollektor ggf. auch aufwändiger und somit teurer sein als heutige Standardkollektoren – weil sich durch die Überhitzungssicherheit an anderen Stellen grössere Kosteneinsparungen ergeben. Der Überhitzungsschutz sollte mit Vorteil auf einem passiven Mechanismus basieren, welcher auch ohne Stromzufuhr und Ansteuerung funktioniert. Zudem sollte dieser inhärent sein, d.h. bei einem etwaigen Versagen des Mechanismus sollte sich der Kollektor im "geschützten", ineffizienten Zustand befinden.

3.1 Methodik

Der erste Teil des Arbeitspakets bestand darin, basierend auf einer detaillierten Literaturrecherche und direkter Kontaktaufnahme mit Herstellern bereits kommerziell verfügbarer Produkte und Technologien, eine Übersicht zu verschiedenen Mechanismen zu erarbeiten, mit welchen eine Reduktion der Stagnationstemperatur erreicht werden kann (Abschnitt 3.2). Dabei wurden einerseits Ansätze untersucht und bewertet, welche in der Forschung oder auch in Produktentwicklungen im Zusammenhang mit Solarkollektoren bereits aufgegriffen wurden. Andererseits wurde nach Mechanismen aus anderen Technologiebereichen gesucht, welche sich, gegebenenfalls mit Anpassungen, zur Realisierung eines Überhitzungsschutzes eignen könnten.

Mehrere vielversprechende technische Ansätze wurden anschliessend ausgewählt und genauer analysiert. Die entsprechenden Ergebnisse werden in den Abschnitten 3.3 bis 3.7 präsentiert. Ein Fazit und ein Ausblick auf zukünftig anzustrebende Entwicklungsschritte werden im Abschnitt 3.8 gegeben.

¹¹ In diesem Kapitel ist mit „Stagnationstemperatur“ jeweils die Absorbtemperatur gemeint, in einer Situation, in der dem Kollektor keine Wärme entnommen wird.

3.2 Technologiescreening

Kategorien von Überhitzungsschutzmechanismen und Zielkriterien

Die Begrenzung der Stagnationstemperatur eines Kollektors kann auf verschiedene Arten erfolgen. Mögliche Überhitzungsschutzmechanismen werden hier in vier Kategorien unterteilt, jeweils mit entsprechenden Zielkriterien für eine ausreichende Reduktion der Stagnationstemperatur (Tabelle 3).

Die nötigen Zielwerte der schaltenden Parameter für eine Reduktion der Stagnationstemperatur auf 100 °C wurden mit der Software Kolektor 2.2 (Matuska and Zmrhal 2008) berechnet. Dazu wurde zunächst ein fiktiver guter Flachkollektor definiert, welcher als Referenz dient. Die Designparameter dieses Referenzkollektors sind in Tabelle 4 angegeben. Der Referenzkollektor hat eine Stagnationstemperatur von 200 °C. Stagnationsbedingungen werden hier definiert durch eine Umgebungstemperatur von 30 °C, eine Globalstrahlung von 1000 W/m², Windstille und einen klaren Himmel. Anschliessend wurden verschiedene Parameter variiert zur Bestimmung der in Tabelle 3 angegebenen Zielwerte zur Reduktion der Stagnationstemperatur auf 100 °C.

Während ein Überhitzungsschutzmechanismus eine genügende Reduktion der Stagnationstemperatur ermöglichen muss, ist auch darauf zu achten, dass dadurch die Effizienz im Betriebszustand möglichst wenig beeinträchtigt wird.

Ein weiteres Kriterium ist die Betriebssicherheit und die Langzeitbeständigkeit des Mechanismus. Passive Mechanismen, welche auch ohne Stromzufuhr und Ansteuerung funktionieren, sind aus Gründen der Robustheit zu bevorzugen. Nach Möglichkeit sollte ein Mechanismus auch „selbtsicher“ sein, also so konzipiert, dass sich der Kollektor im Schadensfall automatisch im Überhitzungsschutzzustand befindet.

Tabelle 4: Kategorien von Überhitzungsschutzmechanismen und quantitative Zielkriterien.

Kategorie	Beschreibung	Kriterium	
		Typischer Wert im Betrieb	Wert bei Stagnation
U _L -Switch	Schaltung des Wärmeverlustkoeffizienten U _L zwischen Absorber und Umgebung	U _L = 4.5 W/(m ² K)	U _L ≥ 12.5 W/(m ² K)
α-Switch	Schaltung des optischen Absorptionsgrads α des Absorbers (bzw. des Reflexionsgrads ρ)	α = 0.95	α ≤ 0.35 bzw. ρ ≥ 0.65
τ-Switch	Schaltung des Transmissionsgrads τ _c der Abdeckscheibe, bzw. des Reflexionsgrads ρ _c und/oder des Absorptionsgrads α _c	τ _c = 0.95	τ _c ≤ 0.36-0.28α _c
Andere (X)	Diverse weitere Ansätze		

Schliesslich ist auch die wirtschaftliche Machbarkeit ein wichtiges Kriterium. Die Produktionskosten für effiziente Flachkollektoren liegen aktuell in der Grössenordnung von 100 CHF/m². Die Frage, wie hoch die Zusatzkosten für einen Kollektor mit integriertem Überhitzungsschutz sein dürfen, wurde mit der Begleitgruppe diskutiert. Die Meinung war, dass ein Kollektor durchaus etwas mehr kosten darf, wenn dafür eine erhöhte Systemsicherheit erreicht werden kann, insbesondere aus der Sicht von Systemanbietern. Ein

genaues Kriterium für die akzeptierbaren Mehrkosten für einen Kollektor mit integriertem Überhitzungsschutz kann verständlicherweise nicht definiert werden. Es wird hier jedoch davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Produktionskosten um über 50 % wirtschaftlich nicht akzeptabel ist. Als Obergrenze für die wirtschaftliche Machbarkeit werden also hier Mehrkosten für den Überhitzungsschutz im Bereich von 50 CHF/m² angenommen.

Tabelle 5: Designparameter des Referenzkollektors

Abmessungen	
Aperturhöhe	1.9 m
Aperturbreite	0.9 m
Bruttohöhe	2 m
Bruttobreite	1 m
Absorbermaterial	
Material	Kupfer
Dicke	0.2 mm
Absorptionsgrad (α)	0.95
Emissionsgrad vorne (ε)	0.05
Emissionsgrad hinten	0.5
Absorbertyp	Harfe mit 8 parallelen Röhrrchen
Innendurchmesser der Röhrrchen	8 mm
Wärmeübergang Schweissnaht	300 W/K
Glas	
Dicke	4 mm
Normale solare Transmission (τ)	0.94
Normale solare Reflexion	0.05
Emissionsgrad	0.85
Dämmung	
Dicke	40 mm
Wärmeleitfähigkeit	0.045 W/(mK)
Einbausituation	
Neigungswinkel	45°

Übersicht und Bewertung der verschiedenen technischen Ansätze

Tabelle 5 fasst die verschiedenen ermittelten Ansätze zusammen, jeweils mit einer kurzen Beschreibung, den wichtigsten Literaturreferenzen, einer Einschätzung zur Machbarkeit eines genügenden Überhitzungsschutzes basierend auf dem entsprechenden Ansatz, sowie einem kurzen Fazit.

Mit Mechanismen, bei denen die optischen Eigenschaften eines Materials oder einer Schicht zwischen absorbierend und reflektierend geschaltet werden, kann prinzipiell ein α -Switch realisiert werden. Mit Mechanismen, bei denen ein Material oder eine Schicht von transparent / transluzent zu reflektierend wechselt, kann entweder ein τ -Switch realisiert werden, wenn als Kollektorabdeckung oder Beschichtung der Abdeckung eingesetzt, oder ein α -Switch, wenn als Beschichtung eines Absorbers eingesetzt. Materialien wiederum, welche zwischen absorbierend und transparent schalten, können prinzipiell auf dem Niveau der Abdeckung als τ -Switch eingesetzt werden, oder, in Kombination mit einem weissen oder spiegelnden Material auf der Rückseite, als α -Switch.

Kapitel 3 – Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C

Tabelle 6: Verschiedene technische Ansätze zur Realisierung eines Überhitzungsschutzes. Die fett geschriebenen Mechanismen wurden anschliessend weiterverfolgt (siehe dazu nachfolgende Abschnitte).

Mechanismus	Kat.	Referenzen	Funktionsweise	Temperaturbegrenzung auf 100 °C möglich?	Fazit
Bereits im Zusammenhang mit Kollektor-Überhitzungsschutz untersuchte Ansätze					
Schaltung der spektralen Selektivität des Absorbers	U _L	(Morin 1959; S. Brunold, Vogelsanger, and Marty 2007; Paone et al. 2014; Föste, Pazidis, et al. 2016; Mercs et al. 2016; Granqvist 2016; Krammer and Schüler 2018)	Thermochrome Absorberschicht basierend auf Strukturänderung (Halbleiter/Metall) von Vanadiumoxid	Nein, Schaltung der Emissivität allein ist nicht ausreichend	Bleibt eine Option in Kombination mit einem anderen Mechanismus.
Belüftung des Kollektorinnenraums (über und/oder unter Absorber)	U _L	(Russell and Guven 1982; Roberts et al. 2000; Harrison, Lin, and Mesquita 2004; Kearney, Davidson, and Mantell 2005; Meir et al. 2008; Wenker et al. 2012; Kessentini et al. 2014; Hussain and Harrison 2015; Ramschak and Fink 2016; Lämmle et al. 2017)	Belüftung des Kollektors (vor/hinter Absorber oder beidseitig) durch Öffnen einer Klappe.	Kaum, Allenfalls mit Lamellen auf Absorberrückseite. Stark von Einbausituation abhängig.	Kaum interessant
Schaltbare vorderseitige Vakuumdämmung	U _L	(Wenker et al. 2012; Lämmle et al. 2017; Pailthorpe, Collins, and O'Shea 1987)	Schaltbares Vakuum, aktiv oder mit Hilfe von temperaturabhängiger Ad-/Desorption eines Gases an einem geeigneten Adsorbens	Ja	Passive Variante ist interessant. Hat Chancen, wenn sich Vakuumisolierverglas am Markt etabliert.
Höhenverstellbarer Absorber (bzw. Abdeckscheibe od. Folie)	U _L	(Moore 1983; Toshimoto 1983; Sharpe 1984; Tomohiro 1994)	Variation der Absorberposition (Luftspalt zwischen Absorber und Abdeckung) mit Hilfe eines temperaturabhängigen Aktuators	Ja	Interessant, wenn konstruktiv einfache Lösung gefunden wird..

Kapitel 3 – Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C

Mechanismus	Kat.	Referenzen	Funktionsweise	Temperaturbegrenzung auf 100 °C möglich?	Fazit
Schaltende (austrocknende) Wärmerohre	X	(Rittidech and Wannapakne 2007; S. Brunold 2009; Kargarsharifabad et al. 2013; Jack et al. 2014; Mientkewitz and Hesse 2015; Deng et al. 2015; Föste, Schiebler, et al. 2016)	„Abschalten“ des Wärmerohreffekts oberhalb einer bestimmten Temperatur durch geeignete Auswahl und Dosierung von Arbeitsmedium (sowohl in Gravitationswärmerohren wie in pulsierenden Wärmerohren realisierbar).	(Ja), Überhitzungsschutz für Fluid möglich. Absorber wird nicht vor Überhitzung geschützt.	Interessanter Ansatz, jedoch aufwändig und bereits mehrfach untersucht.
Thermotrope Polymerschicht auf Absorber oder Abdeckscheibe	α / τ	(Wilson 1994; Beck et al. 1995; Arno Seeboth, Schneider, and Patzak 2000; Resch and Wallner 2009; Arno Seeboth, Ruhmann, and Mühling 2010; A. Seeboth and Löttsch 2013; Weber and Resch 2014; Muehling et al. 2014; Lee et al. 2017)	Polymermischungen, welche oberhalb einer bestimmten Temperatur von transparent zu stark rückstreuend (weiss) wechseln, beruhend auf verschiedenen Mechanismen.	Ja, Schalteigenschaften von Hydrogels und Ionogels sind ausreichend. Bei anderen Materialien zu kleine Schalthübe und zu breite Schalttemperaturbereiche.	Insbesondere Ionogels sind vielversprechend, speziell aufgrund des geringen Dampfdrucks.
Thermochrome Polymerschicht auf Absorber oder Abdeckscheibe	α / τ	(Arno Seeboth, Ruhmann, and Mühling 2010; A. Seeboth and Löttsch 2013; Arno Seeboth et al. 2014)	Polymermaterialien mit temperaturabhängigen Absorptionseigenschaften, auf unterschiedlichen Mechanismen beruhend.	(Ja), Leukobasen-Systeme (thermochrome Pigmente in Matrix eingebettet), wie z.B. in Gegenständen wie Tassen mit Farbänderung eingesetzt, können als α -Switch genügend grossen Schalthub erreichen.	Kaum interessant, da sehr schlechte Temperatur- und UV-Stabilität
Integrierter Rückkühler	X	(Bourke and Peck 1980; Thür et al. 2013)	Abführen von Überschusswärme über separaten Heat-Pipe-Kreis oder durch Kurzschluss des Kollektors durch einen Rückkühler (Schaltventil und Thermosiphon-Effekt)	Ja	Zu aufwändig für Standardprodukt. Eher sinnvoll für Hocheffizienz-kollektoren.

Kapitel 3 – Kollektor mit Überhitzungsschutz bei 100 °C

Mechanismus	Kat.	Referenzen	Funktionsweise	Temperaturbegrenzung auf 100 °C möglich?	Fazit
Aktive Verschattung	τ	(Ludwig 1998; ZAE Bayern 2006; North 2009; Beikircher 2010; Mathieu 2012; Schwarz 2013)	Abschattung des Absorbers durch Rollo, Folie, o.ä.	Ja	Interessant weil „low-tech“-Ansatz. Entsprechende Produkte haben sich bisher jedoch kaum durchgesetzt.
Absorbierendes Fluid	α / τ	(Platzer et al. 2005; Oppliger et al. 2012; S. Brunold et al. 2014; Heiz et al. 2018)	Färb- und entfärbbares Fluid oder zwei austauschbare Fluide in Zwischenraum zwischen zwei Abdeckscheiben oder als Absorber	Ja	Interessant, jedoch hohe Systemkomplexität, und, obwohl vielfach untersucht, viele ungelöste technische Hürden
Totalreflexion in Abdeckung oder Absorber	α / τ	(Herbert 1979; Stephens 1981; Whitehead and Mossman 2005; Slaman and Griessen 2009; Griessen and Slaman 2009; Goossen 2014; Broune 2017; Wolfe and Goossen 2018)	Totalreflexion an Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlichen Medien (z.B. Glas/Luft). Schaltung z.B. durch Separierung komplementärer Strukturen oder Befüllung mit Flüssigkeit	(Ja), Bei einfachen Strukturen jedoch stark abhängig von Einfallswinkel	Interessant da „low-tech“-Lösungen möglich, gute zuverlässige Umsetzung aber sicher kritisch
Schaltbare Spiegel	α / τ	(Huiberts et al. 1996; Park et al. 2015)	Schaltbare Spiegel (transparent zu spiegelnd), basierend auf unterschiedlichen Technologien wie polymer stabilized liquid crystals (PSLC), reversibel electrochemical (ähnlich wie EC-Verglasung) oder Variante analog zu gasochromen Fenstern	Ja, Optische Schalteigenschaften genügend für τ - oder α -Switch	Technisch interessant, jedoch hohe Kosten. Gemäss Hersteller von Variante mit PSLC (Kent Optronics) wären Kosten in Idealszenario um 200 \$/m ² . Bei der EC-Variante Kosten wohl ähnlich wie bei EC-Fenstern, also ebenfalls hoch. Gasochrome Variante potenziell etwas günstiger.

Mechanismus	Kat.	Referenzen	Funktionsweise	Temperaturbegrenzung auf 100 °C möglich?	Fazit
Technologien aus dem Fenster-Bereich					
Elektrochrome (EC) Verglasung	α / τ	(Granqvist 2016; Baetens, Jelle, and Gustavsen 2010; Mortimer (Editor), Rosseinsky (Editor), and Monk (Editor) 2015; Kim et al. 2015)	Ähnlich wie Batterie. Elektroden aus Materialien, die bei Oxidation oder Reduktion Farbe ändern (typischerweise V_2O_5 und WO_3). Durch Anlegen einer elektr. Spannung wandern Li-Ionen durch ein Elektrolyt von einer zur anderen Elektrode.	(Nein), Verfügbare Produkte haben zu geringen Transmissionsgrad für genügenden τ - oder α -Switch. Es gibt Forschungsresultate über eine Weiterentwicklung der Technologie mit genügendem Schaltheub.	Technisch interessant. Aktuelle Produkte jedoch technisch nicht genügend und zu teuer (ca. 200 €/m ²). Weiterentwicklung basierend auf Elektrode mit WO_3 Nanokristallen eingebettet in poröser NbO_x Matrix technisch vielversprechend. Deren Kommerzialisierung sowie starke Kostenreduktionen im Vergleich mit Standard-EC-Produkten ist jedoch in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.
Gasochrome Verglasung	α / τ	(Baetens, Jelle, and Gustavsen 2010; Feng et al. 2016; Casini 2018)	WO_3 basierte Schicht an Innenseite von Doppelverglasung ändert von transparent zu absorbierend bei Kontakt mit H_2 . Färbung/Entfärbung durch Flutung des Scheibenzwischenraums mit H_2 bzw. O_2 .	Nein, Bei aktuell verfügbarer Technologie zu geringer Transmissionsgrad für genügenden τ - oder α -Switch.	Aktuell eher nicht interessant.
Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC)	α / τ	(Baetens, Jelle, and Gustavsen 2010; Thakur (Editor) and Kessler (Editor) 2016)	In Polymer eingebettete Flüssigkristalltropfen. Schaltung von transparent (mit angelegter elektr. Spannung, geordnete Kristalle) zu diffus streuend (ohne Spannung, ungeordnete Kristalle)	Nein, Im trüben Zustand vor allem Vorwärtsstreuung. Und Transmissionsgrad im transparenten Zustand zu gering.	Nicht interessant

Mechanismus	Kat.	Referenzen	Funktionsweise	Temperaturbegrenzung auf 100 °C möglich?	Fazit
Suspended Particle Device (SPD)	α / τ	(Baetens, Jelle, and Gustavsen 2010; Vergaz et al. 2008)	Polarisierte Partikel suspendiert in organischem Fluid. Funktionsweise ähnlich wie PDLC.	Nein, Obwohl grösserer Rückstreuanteil im Vergleich mit PDLC, ebenfalls mit zu geringem Transmissionsgrad im transparenten Zustand.	Aktuell kaum interessant
Technologien aus dem Display-Bereich					
Elektrophorese	α	(Comiskey et al. 1998; Whitehead and Mossman 2005; Mukherjee et al. 2015; Amundson 2016)	Verschiebung oder Beimischung/ Abtrennen von dispergierten elektrisch geladenen Pigmenten mit Hilfe eines elektrischen Feldes. Unterschiedliche Varianten. Technologie wird vor allem in E-Readern eingesetzt.	Ja, Technologie kann potenziell einen genügenden Schalhub erreichen für die Realisierung eines α -Switchs.	Interessanter Ansatz, für diese Anwendung noch kaum erforscht. Deswegen auch viele offene Fragen, insbesondere in Zusammenhang mit Beständigkeit.
Rotating ball/ Gyricon	α	(Sheridon et al. 1990; Nisisako et al. 2006)	Rotation von Janus-Mikropartikeln mit Hemisphären mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften (weiss/schwarz) und Ladungsanisotropie durch Anlegen eines elektrischen Feldes. Die Firma Xerox hatte mit diesem Ansatz ein Display („Gyricon“) entwickelt und versucht zu vermarkten.	Ja, Technologie kann potenziell einen genügenden Schalhub erreichen für die Realisierung eines α -Switchs.	Interessanter Ansatz, ähnlich wie Ansatz mit Elektrophorese.

3.3 Höhenverstellbarer Absorber

Hintergrund

Wie in Abbildung 13 dargestellt, ist der Wärmeverlust eines Kollektors über die Abdeckscheibe an die Umgebung stark vom Abstand zwischen Abdeckscheibe und Absorber abhängig. Bei marktüblichen Flachkollektoren liegt dieser Abstand bei etwa 30-40 mm. Ein grösserer Abstand wäre wärmetechnisch vorteilhaft, würde aber zu Kollektoren mit zu grosser Bauhöhe führen. Wie aus Abbildung 13 ersichtlich, ist der frontseitige Wärmeverlust je nach Kollektorneigung bei einem Abstand von 8-12 mm ähnlich gering wie bei den üblichen 30-40 mm. In der Praxis wird dieser kleine Abstand aber nicht realisiert, da dies erhöhte Anforderungen an die Planität und Verwindungssteifigkeit des Absorbers und an dessen Befestigungstechnik stellt. Soll der Wärmeverlust über den Absorber-Scheibenabstand reguliert werden, sind diese Anforderungen ohnehin zu erfüllen, so dass in diesem Fall der Kollektor mit einem Absorber-Scheibenabstand um 10 mm (im normalen Betriebszustand) designt werden kann. Wird nun der Abstand von 10 mm auf etwa 1 mm reduziert, steigt der Wärmeverlust über die Abdeckung stark an. Im Beispiel aus Abbildung 13 bis auf 900 W/m² bei einer Absorbtemperatur von 100°C und einer Umgebungslufttemperatur von 30°C (Kollektor mit selektivem Absorber). Dies bedeutet, dass bei 1000 W/m² Einstrahlung in die Kollektorebene und einem Transmissions-Absorptionsprodukt von 0.9 die Absorbtemperatur bei 100°C liegen würde.

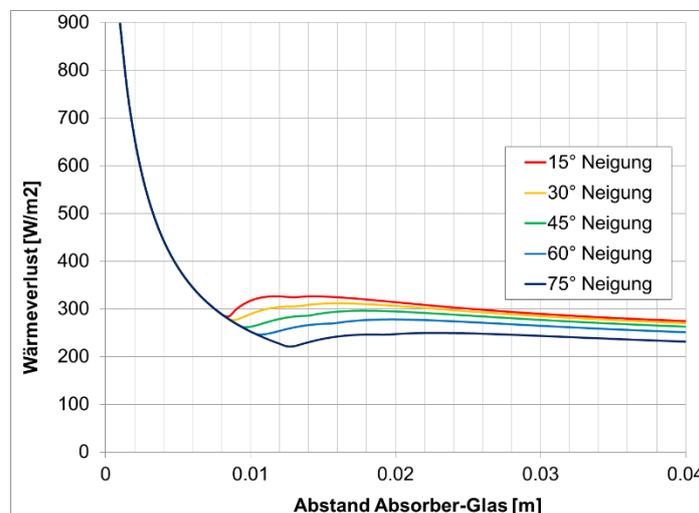


Abbildung 13: Wärmeverlust über die Abdeckscheibe bei einem Kollektor mit selektivem Absorber, bei einer Absorbtemperatur von 100°C und Umgebungstemperatur von 30°.

Konzept und Funktionsmuster

Da der Kollektor bis zu einer Temperatur von 80-90 °C möglichst effizient arbeiten, aber 100 °C nicht überschreiten soll, muss sich der Überhitzungsschutzmechanismus also auf dieses Temperaturintervall einschränken. D.h., der Absorber-Scheibenabstand soll bis zu einer Temperatur um 80-90 °C bei 10 mm verbleiben und bei weiter steigender Temperatur sollte er sich um etwa 1 mm/K reduzieren. Es scheint daher naheliegend, dass für den Bau eines Aktuators, welcher diesen Verschiebeweg realisiert, der Phasenwechsel von Materialien

ausgenutzt wird, welcher mit relativ grossen Volumenänderungen innerhalb eines kleinen Temperaturintervalls verbunden ist.

Um im Falle eines Versagens alle Komponenten des Systems vor zu hohen Temperaturen zu schützen, sollte der Überhitzungsschutzmechanismus weitestgehend selbstsicher sein. Bei dem gewählten Konzept des „Absorber-Shiftings“ bedeutet dies, dass bei einem defekten Aktuator (bzw. bei dessen Abwesenheit) der Absorber-Scheibenabstand minimiert ist. Daraus folgt, dass der Absorber mittels einer aufgeprägten Kraft (z.B. über Federn) an der Scheibe gehalten wird und der Aktuator beim Überschreiten der Grenztemperatur den Absorber von der Scheibe so weit wegzieht, bis der Absorber-Scheibenabstand beim Unterschreiten von etwa 85 °C 10 mm erreicht hat.

Handelsübliche Wachs-Dehnstoffelemente können nur bei Ausdehnung eine Kraft ausüben, nicht jedoch bei der Rückstellung. Daher scheiden diese als Lösung aus und es wurde ein auf der Verdampfung eines Fluides in einem Metall-Faltenbalg basierendes Konzept erarbeitet (der besseren Verständlichkeit wegen ist in der Folge von einem Balg die Rede, obwohl in der Umsetzung, je nach Absorbergrösse, mehrere Balge eingesetzt werden).

Der Absorber ist auf einem hermetisch dicht verschliessbaren Metallfaltenbalg gelagert. Der Balg ist so ausgelegt, dass dieser im unverschlossenen Zustand (oder bei einem Innendruck von 1 bar) den Absorber-Scheibenabstand minimiert. Dadurch ist im Falle einer Undichtigkeit der selbstsichere Überhitzungsschutz gewährleistet. Durch Zusammendrücken des Balges (gegen dessen Federkraft) wird der Absorber-Scheibenabstand auf ca. 10 mm erhöht. In diesem zusammengedrückten Zustand wird der Balg mit einem Fluid gefüllt und hermetisch dicht verschlossen. Aufgrund der Federkraft des komprimierten Balges ist dessen Innendruck < 1 bar. Das Fluid wird nun so ausgewählt, dass dessen Dampfdruck bei etwa 85°C dem o.g. Innendruck < 1 bar entspricht. Der Effekt ist, dass bei niedriger Temperatur der bei weitem grösste Teil des Fluids im Kompensator in flüssiger Form (d.h. mit geringem Volumen) vorliegt. Wird die Siedetemperatur bei 85°C überschritten, entsteht im Balg (voluminöser) Dampf, wodurch sich der Balg ausdehnt und dadurch den Absorber-Scheibenabstand verringert. Der Innendruck im Balg steigt und ein neues Gleichgewicht bei $T > 85$ °C stellt sich ein. Je nach Eigenschaften des Fluides (Dampfdruckkurve) und des Balgs (Federkonstante, hydraulischer Durchmesser) kann die Eigenschaft des Aktuators (Verstellweg als Funktion der Temperatur) eingestellt werden (siehe Abbildung 14).

Bei diesem Konzept bestimmt also die Temperatur des Aktuators (genauer: die Temperatur des Fluides im Metallfaltenbalg) den Abstand des Absorbers zur Abdeckscheibe und damit die Maximaltemperatur des Kollektors. Das Fluid sollte daher thermisch gut an den Absorber gekoppelt sein. Die höchste Temperatur im Kollektor tritt etwa im oberen Drittel der Absorbermitte auf. Da die Aktuatoren auch die Funktion der Befestigung des Absorbers im Kollektor übernehmen, sind diese in der Nähe der Ecken des Absorbers positioniert. Die Temperatur an diesen Stellen kann jedoch deutlich unter der höchsten Absorberrtemperatur liegen. Des Weiteren muss die Wärme vom Absorber über Wärmeleitung in das Fluid im Balg gelangen. Sobald aber neben dem Fluid auch Dampf vorliegt, sammelt sich dieser im oberen Teil des Metallfaltenbalges. Dadurch ist das Fluid thermisch im Extremfall (abhängig vom Neigungswinkel des Kollektors) nur noch über die Wandung des Balges an den Absorber gekoppelt, wodurch die Differenz zwischen der Fluidtemperatur und der höchsten Absorberrtemperatur weiter vergrössert und schlechter definiert wird. Verschärfend führt dies noch dazu, dass die Temperaturen (und damit die momentanen Hübe) der Aktuatoren unterschiedlich sind, was zu einer Verwindung des Absorbers führen kann.

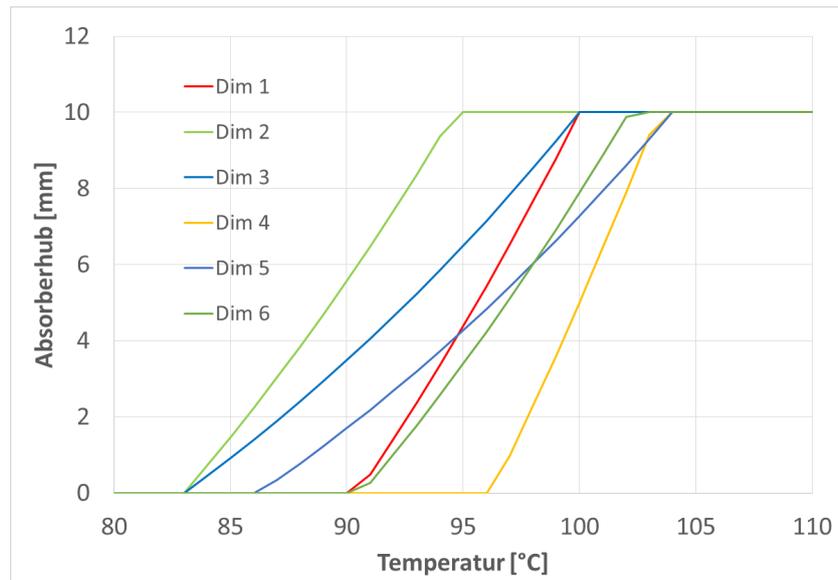


Abbildung 14: Berechneter Hub des Absorbers als Funktion der Temperatur im Aktuator für unterschiedliche Dimensionierungen des Balgs.

Um diese Probleme zu umgehen, werden alle Aktuatoren eines Kollektors hydraulisch mit einem zentralen Gefäß verbunden, welches ebenfalls mit Fluid gefüllt ist. Dieses Gefäß wird thermisch an der potenziell heissesten Stelle des Absorbers angebracht. Dadurch bestimmt die Temperatur im Fluid des zentralen Gefäßes den Druck in allen Bälgen, wodurch diese sich synchron bewegen. Abbildung 15 zeigt die Absorberrückseite des Demonstrationskollektors mit den vier Aktuatoren in der Nähe der Absorberecken, welche über dünne Kapillarrohre mit dem zylindrischen zentralen Gefäß im oberen Drittel in der Absorbermitte verbunden sind.



Abbildung 15: Absorberrückseite mit den vier Aktuatoren, verbunden mit dem zentralen Gefäß.

Leistungsmessungen

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit dieses Überhitzungsschutzmechanismus wurde ein Demonstrationskollektor mit einer Grösse von ca. 1 m x 1.6 m aufgebaut und unter dem Sonnensimulator vermessen (Abbildung 16). Um die Wirkung des Überhitzungsschutzmechanismus besser beurteilen zu können, wurde derselbe Kollektor vor dem Umbau ebenfalls vermessen. Dabei betrug der Absorber-Scheibenabstand ebenfalls 10 mm.



Abbildung 16: Der Demonstrationskollektor bei der Leistungsmessung im Sonnensimulator.

Die beiden gemessenen Wirkungsgradkennlinien sind in Abbildung 17 gegenübergestellt. Die aktuell vorliegende Kollektormitteltemperatur wurde für die Messung des Kollektors mit Überhitzungsschutz als Datenpunktbeschriftung hinzugefügt. Danach erreicht dieser Kollektor, bei einer Einstrahlung von 940 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von 32 °C eine Kollektormitteltemperatur von 101 °C (bei einer RL-VL-Temperaturdifferenz von 0.05 K). Die Temperaturbegrenzung auf ca. 100 °C funktioniert also wunschgemäß. Zusätzlich zur gemessenen Wirkungsgradkennlinie wurde auch eine berechnete Kennlinie eingezeichnet. Danach sollten die Wirkungsgradkennlinien der beiden Kollektoren bis zu einer Temperatur von etwa 85 °C identisch sein und oberhalb davon die des Demo-Kollektors steil bis auf $\eta = 0$ abfallen. Der gemessene Wirkungsgrad ist aber bereits bei Temperaturen unterhalb 85 °C reduziert. Die Hauptursache dafür liegt vermutlich in einem schlecht definierten Absorber-Scheibenabstand. Der Demo-Kollektor basiert auf dem Umbau eines Standard Flachkollektors. Der Absorber dieses Kollektors besteht aus einem nur 0.25 mm dicken Kupferblech, welches durch den Einbau des Überhitzungsschutzes in Mitleidenschaft gezogen wurde. Danach war der Absorber nicht mehr plan, so dass der Absorber-Scheibenabstand im kalten Zustand je nach Position zwischen ca. 7 mm und 13 mm schwankte, was bei einer Kollektorneigung von 45° in jedem Fall zu erhöhten Verlusten führt (s. Abbildung 13). Ein weiterer Grund für die Abweichung von der theoretisch berechneten „Stufenfunktion“ kann auch der Federkonstante des Metallfaltenbalges zuzurechnen sein. Diese wurde in den Berechnungen als konstant betrachtet. Da hier aber die Änderung der Balglänge, im Vergleich zu dessen Gesamtlänge, doch relativ gross ist, ist nicht auszuschliessen, dass der Bereich der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes verlassen wird.

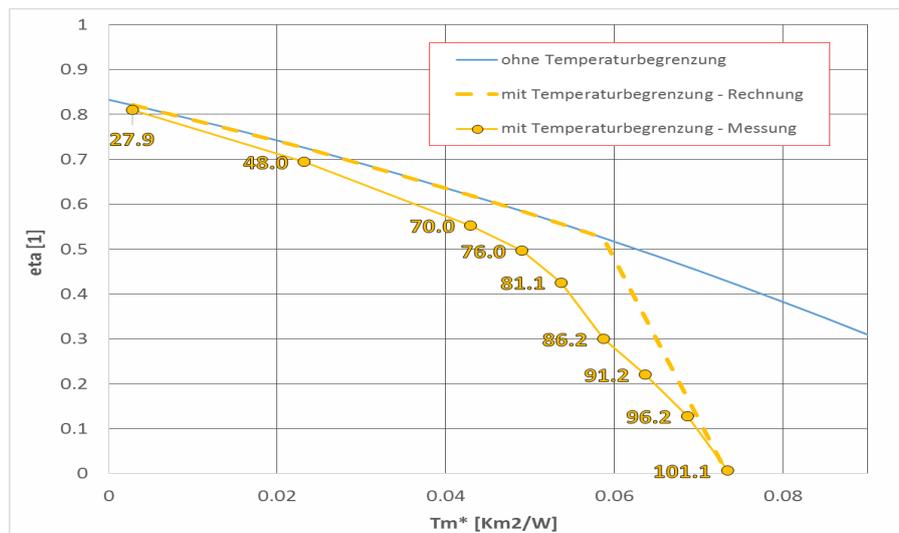


Abbildung 17: Wirkungsgradkennlinie des Demo-Kollektors vor und nach dem Einbau des Überhitzungsschutzmechanismus. Aufgetragen ist der thermische Wirkungsgrad η des Kollektors, definiert als die thermische Nutzleistung geteilt durch die Globalstrahlung in Kollektorebene, als Funktion der reduzierten mittleren Temperaturdifferenz $T_m^* = \frac{T_m - T_{Umgebung}}{G}$, wo T_m die mittlere Fluidtemperatur im Kollektor $T_{Umgebung}$ die Umgebungstemperatur und G die Globalstrahlung in Kollektorebene bezeichnen.

Diskussion und Fazit

Das vorgestellte Konzept für einen Kollektor mit Überhitzungsschutz begrenzt die Maximaltemperatur des Kollektors wunschgemäß. Es ist zudem anzunehmen, dass mit einem planaren Absorber der Wirkungsgrad im ausgelegten Arbeitstemperaturbereich (hier unterhalb 85 °C) durch den Überhitzungsschutzmechanismus nicht eingeschränkt wird.

Hinsichtlich einer langfristigen Dichtigkeit, hoher Temperaturbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und mechanischer Zuverlässigkeit wurden Metallfaltenbälge zum Bau der Aktuatoren eingesetzt. Die Kosten für diese Bälge sind relativ hoch (Größenordnung 10 €/Stück). Weiter macht die Notwendigkeit der hydraulischen Verbindung über ein zentrales Gefäss den Aufbau aufwendig.

Die technische Machbarkeit dieser Lösung ist also gegeben. In der aktuellen Form wären jedoch die Kosten für eine kommerzielle Umsetzung voraussichtlich zu hoch, weswegen eine vereinfachte Lösung ausgearbeitet werden muss (Weiterentwicklung siehe Kapitel 7).

3.4 Elektrophorese – „Elektronische Tinte“

Der Ansatz, einen Überhitzungsschutz basierend auf der Technologie von elektrophoretischen Displays zu realisieren, wurde genauer untersucht. Bei solchen Displays werden Pigmente eingesetzt, die das eintreffende Licht, je nach "Schaltzustand", entweder absorbieren oder reflektieren. Man spricht von reflektiven (passiven) Displays, da keine zusätzliche Lichtquelle nötig ist. Die Pigmente sind in einer Flüssigkeit dispergiert und weisen unterschiedliche elektrische Ladungen auf. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung werden die Pigmente bewegt und die Anzeige gesteuert. Es wurden drei Umsetzungsvarianten dieses Ansatzes ermittelt (Abbildung 18).

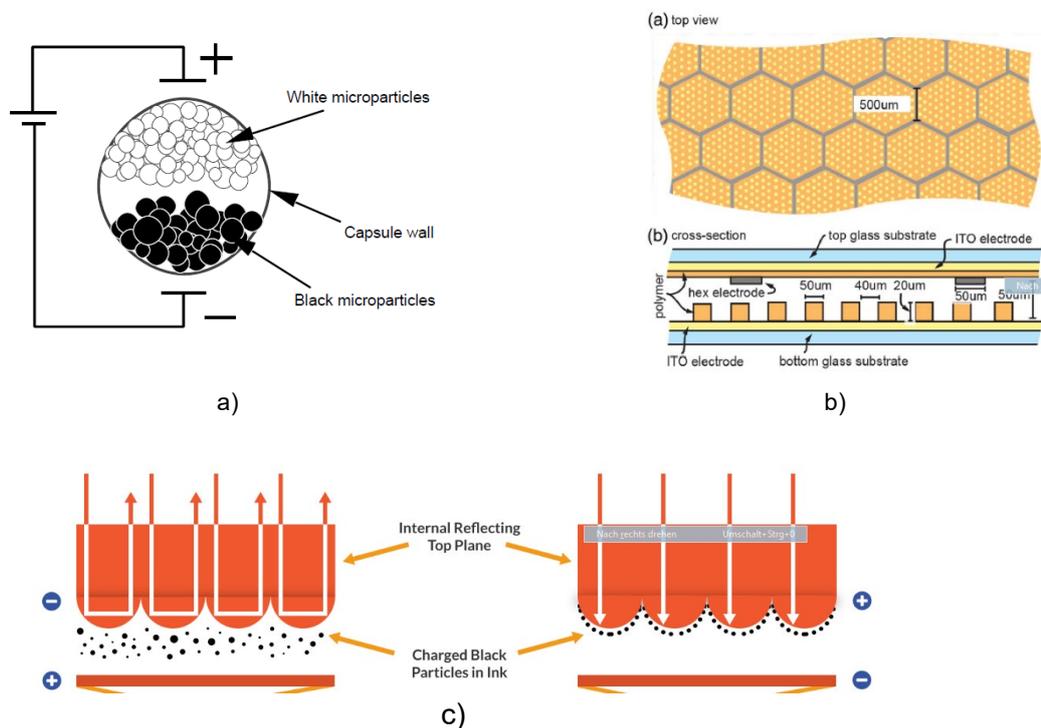


Abbildung 18: Unterschiedliche Umsetzungsvarianten von elektrophoretischen Displays: a) Ansatz der Firma EInk, Mikrokapseln mit dispergierten Pigmenten unterschiedlicher Farbe und elektrischer Ladung (Comiskey et al. 1998); b) Ansatz der Firma Crownek, Pigmente sind entweder homogen dispergiert, dann hat das Display die Farbe der Pigmente, oder sie werden an einer Elektrode mit Bienenwabenstruktur gesammelt, dann ist das Display transparent bzw. zeigt die Hintergrundfarbe (Mukherjee et al. 2015); c) Ansatz der Firma ClearInk, bei gleichmäßig dispergierten Pigmenten wird das einfallende Licht an einer Grenzfläche zwischen Glas und Fluid totalreflektiert, bei Sammlung der Partikel an dieser Grenzfläche erscheint das Display in der Farbe der Pigmente (www.clearinkdisplays.com).

Mit der Technologie elektrophoretischer Displays können potenziell hohe Schalthübe, d.h. Änderungen der optischen Eigenschaften erreicht werden, was diesen Ansatz zu einer interessanten Option für einen Überhitzungsschutz in einem Solarkollektor macht. Die Variante der Firma EInk könnte, auf einen Absorber aufgebracht, als α -Switch dienen. Die Varianten der Firmen Crownek und ClearInk könnten potenziell entweder als τ -Switch, oder, wenn mit einer reflektierenden Schicht auf der Rückseite versehen, ebenfalls als α -Switch dienen.

Es wurden alle drei Firmen kontaktiert. Dabei ging es darum, die Spezifikationen der aktuell angebotenen Produkte zu erhalten, und die Möglichkeit einer Weiterentwicklung, angepasst an die Anforderungen für den Einsatz in einem Kollektor zu eruieren. Zusätzliche Anforderungen, gegenüber den aktuell wichtigsten Anwendungen in E-Readern und für Preisschilder, liegen vor allem in der höheren geforderten Temperaturstabilität, der Stabilität gegenüber UV-Einstrahlung sowie in einer für Solarkollektoren in der Regel hohen geforderten Lebensdauer. Weiter müssen die schaltbaren Schichten für den Einsatz in Kollektoren in grossen Formaten hergestellt werden können. Bezüglich der optischen Qualität, der Umschaltzeit sowie der Zyklenzahl sind die Anforderungen für den Fall eines Kollektors jedoch geringer.

Die Recherche hat gezeigt, dass die aktuell verfügbaren Produkte aufgrund der eingesetzten Materialien nicht für den langfristigen Einsatz bei Temperaturen über ~ 70 °C geeignet sind.

Mehrere der Anbieter planen jedoch, in Zukunft auch Produkte für Aussenanwendungen (z.B. Strassen- oder Werbeschilder) zu entwickeln. Bei solchen Anwendungen sind die Anforderungen an die Beständigkeit ähnlich wie bei einem Solarkollektor. Es sollte also aus technischer Sicht eine gute Chance bestehen, dass ein Produkt, welches beständig gegenüber höheren Temperaturen ist, entwickelt werden kann. Auch das Erreichen eines genügend hohen solaren Reflexionsgrads sollte aus technischer Sicht möglich sein, wobei auch dafür spezifische Anpassungen der Produkte nötig wären. Die aktuellen Produkte sind nämlich aufgrund ihres Anwendungsbereichs nur für den sichtbaren Bereich des Spektrums optimiert.

Was die Kosten angeht, so liegen diese Produkte momentan noch mindestens eine Größenordnung über dem für einen Überhitzungsschutz angestrebten Wert. Durch Skaleneffekte – die produzierten Flächen im Displaybereich sind gegenüber den Flächen im Solarwärmebereich sehr klein – und durch geringere Anforderungen in der visuellen Qualität, wären voraussichtlich deutliche Kostenreduktionen realisierbar. Dennoch ist die wirtschaftliche Machbarkeit als kritisch zu erachten.

Mit der Firma Elnk, deren Produkte für E-Reader bereits gut etabliert sind, wurde ein gegenseitiges Non-Disclosure-Agreement unterzeichnet, im Rahmen dessen weitergehende Untersuchungen durchgeführt wurden. Siehe dazu den vertraulichen Anhang A.2.

3.5 Thermotrope Ionogels

Hintergrund

Eine aktuelle Forschungsarbeit hat eine neue Gruppe von Polyurethan-basierten thermotropen Ionogels hervorgebracht, welche zwischen einem transparenten Zustand unterhalb und einem diffus reflektierenden (weissen) Zustand oberhalb einer gewissen Schalttemperatur wechseln (Lee u. a. 2017). Ionogels sind weiche Gels, bestehend aus einer Polymermatrix, in die eine ionische Flüssigkeit eingebettet ist. Ionische Flüssigkeiten wiederum sind flüssige Salze, in der Regel mit Schmelztemperaturen unter 100 °C. Sie zeichnen sich insbesondere durch eine gute Temperaturstabilität und einen sehr geringen Dampfdruck aus.

Die thermotrope Funktionsweise gewisser Ionogels ist ähnlich wie diejenige von thermotropen Hydrogels (ein entsprechendes Produkt war eine Zeit lang unter dem Namen CloudGel für schaltende Fenster und Dacheindeckungen verfügbar). Der geringe Dampfdruck ionischer Flüssigkeiten gegenüber dem in Hydrogels verwendeten Wasser könnte jedoch für die Langzeitstabilität ein entscheidender Vorteil sein. Die thermotropen Eigenschaften stammen von der Temperaturabhängigkeit der Wechselwirkung zwischen Matrix und ionischer Flüssigkeit (siehe Abbildung 19). Bei niedrigen Temperaturen besteht eine hohe Affinität zwischen Flüssigkeit und Matrix, das Material ist homogen gemischt und erscheint transparent. Oberhalb einer gewissen Temperatur geht diese Affinität verloren, was im Fall der hier untersuchten Ionogels hauptsächlich durch die Auftrennung von Wasserstoffbrücken zwischen Flüssigkeit und Matrix zu erklären ist. Flüssigkeit und Matrix entmischen sich, was zur Bildung von kleinen Flüssigkeitsdomänen (Tröpfchen) innerhalb der Matrix führt. An diesen Domänen wird das einfallende Licht gestreut und das Material erscheint trüb bis weiss.

Solche thermotropen Materialien können prinzipiell sowohl zur Realisierung eines α -Switchs wie auch eines τ -Switchs verwendet werden. Für einen α -Switch wird das Material als Beschichtung eines schwarzen Absorbers eingesetzt. Die optischen Eigenschaften des

Absorbers sind somit direkt von dessen Temperatur abhängig, was für einen Überhitzungsschutzmechanismus ideal ist. Für einen τ -Switch würde das Material als Beschichtung der transparenten Kollektorabdeckung oder, je nach Festigkeit, selbst als Kollektorabdeckung eingesetzt. Bei diesem Ansatz ist jedoch die Temperatur der thermotropen Schicht nur schlecht an die Absorbtemperatur gekoppelt - sie ist auch stark von Aussentemperatur und Wind abhängig. Aus diesem Grund wurde hier nur die Variante des α -Switchs weiterverfolgt.

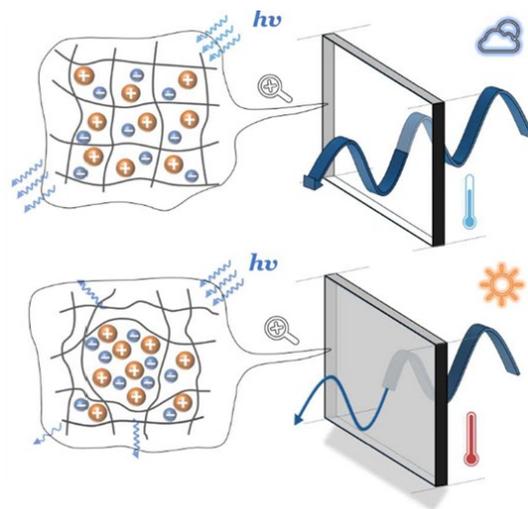


Abbildung 19: Illustration des temperaturabhängigen Schaltmechanismus in einem thermotropen Ionogel. Quelle: (Lee et al. 2017)

Entscheidend für den Einsatz als α -Switch ist ein möglichst hoher solarer Reflexionsgrad im Überhitzungsschutzzustand zusammen mit einem möglichst geringen solareren Reflexionsgrad im Betriebszustand, also ein grosser „Schalthub“. Zudem sollte der Übergang in einem schmalen Temperaturbereich um ~ 80 °C herum stattfinden.

Gemäss Ref. (Lee et al. 2017) erreichen thermotrope Ionogels hohe Schalthübe im solareren Transmissionsgrad. Beispielsweise berichten die Autoren von einer Änderung der solareren Transmission (Messung normal zu normal) bei einer Schichtdicke von ca. 1.7 mm von rund 80 % auf rund 10 %. Gemäss den Autoren haben diese Materialien zudem eine sehr gute Temperaturbeständigkeit (bis 250 °C) und weisen eine gute Zyklenstabilität ($> 5'000$) auf. Der Schaltbereich, obwohl deutlich breiter als bei Hydrogels, ist mit rund 20 K nicht übermässig gross. Zudem kann die Schalttemperatur durch die Komposition der ionischen Flüssigkeit zwischen unter 0 °C und über 100 °C gezielt eingestellt werden. Von ähnlichen Resultaten berichtet auch Ref. (Sato et al. 2018).

Da es sich hier um einen neuen, noch wenig erforschten Ansatz handelt, welcher in technischer Hinsicht vielversprechend scheint, wurde beschlossen, seine Machbarkeit weiter zu untersuchen, insbesondere hinsichtlich des Potenzials für die Schaltung des solareren Reflexionsgrads (normal-zu-hemisphärisch), was bisher noch nicht untersucht wurde, und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit. Es fand ein Austausch mit den Autoren von (Lee et al. 2017) der Nanyang Technical University Singapur (NTU) statt. Zudem wurden die Arbeiten zur Materialsynthese und Charakterisierung zu einem wesentlichen Teil von zwei Austauschstudenten der NTU an der HSR durchgeführt.

Materialsynthese

In einem ersten Schritt wurden Ionogels des in Ref. (Lee et al. 2017) präsentierten Typs synthetisiert, mit einer Prozedur die an diejenige der genannten Referenz angelehnt war. Die Matrix dieser Ionogels besteht aus vernetztem Polyurethan. Darin eingebettet wurden verschiedene ionische Flüssigkeiten basierend auf Imidazol-Kationen.

Folgende Reaktanden, alle von Sigma-Aldrich bezogen, wurden für die Synthese verwendet, mit jeweils in Klammer der im weiteren Verlauf des Berichts verwendeten Abkürzung der Substanz sowie weiteren Spezifikationen: (Poly)Hexamethylendiisocyanat (HDT)¹², (Poly)Propylenoxid (PPO, Diol-Typ, Mn = 4000 Da), Dibutylindilaureat (DBTDL, 95 %), Methylethylketon (MEK), 1-butyl-3-methylimidazolium-bis(trifluoromethylsulfonyl)imid ([C4-mim][NTf2]), 1-hexyl-3-methylimidazolium-bis(trifluoromethylsulfonyl)imid ([C6mim][NTf2]).

Die Syntheseprozedur bestand typischerweise aus folgenden Schritten:

- 1) PPO, HDT und MEK wurden gemischt um eine transparente und geruchlose Lösung zu erhalten.
- 2) Die ionische Flüssigkeit wurde beigemischt, gefolgt vom Katalysator (DBTDL).
- 3) Die Lösung wurde manuell und im Ultraschallbad homogenisiert.
- 4) Die Vernetzung des Polyurethans und die teilweise Entfernung des Lösungsmittels erfolgte während 24 Stunden bei Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C.
- 5) Zur vollständigen Entfernung des Lösungsmittels wurde das Gel während 24 Stunden bei 40 °C im Vakuum (36 cmHg) getrocknet.

Im Verlauf der Experimente wurden verschiedene Parameter variiert und optimiert. Dazu gehörten insbesondere: Vernetzungszeit, Temperatur und Druck; Isocyanatindex, d.h. das Verhältnis zwischen HDT und PPO; Typ und Menge der ionischen Flüssigkeit; verwendete Menge an Lösungsmittel MEK; verwendete Menge an Katalysator DBTDL. Es wurden insgesamt über 30 Ionogel-Samples hergestellt und analysiert.

Charakterisierung

Zur Untersuchung der Zusammensetzung und der thermotropen Eigenschaften der Ionogels wurde ein Fouriertransformationsspektrometer (FTIR, Bruker VERTEX 80) eingesetzt. Mit der Methode der ATR-Spektroskopie wurde untersucht, ob die Vernetzungsreaktion vollständig erfolgt, und ob das Lösungsmittel vollständig verdampft ist, indem die Absorptionsbanden der Ionogels mit denjenigen der Reaktanden verglichen wurden. Zur Bestimmung der thermotropen Eigenschaften des Materials wurde mit Hilfe einer integrierenden Kugel die normal-zu-hemisphärische Reflexion der Ionogels im sichtbaren und im nah-infraroten Spektralbereich bei verschiedenen Temperaturen gemessen. Dazu wurden die Ionogels auf ein schwarz beschichtetes Blech (Absorberblech) befestigt, welches wiederum an einem Heizblock befestigt wurde, dessen Temperatur durch ein Thermostatbad geregelt wurde (Abbildung 20).

¹² In Ref. (Lee et al. 2017) wurde an dieser Stelle ein leicht unterschiedliches Produkt (Tolonate HDT-90 der Firma Vencorex) verwendet.

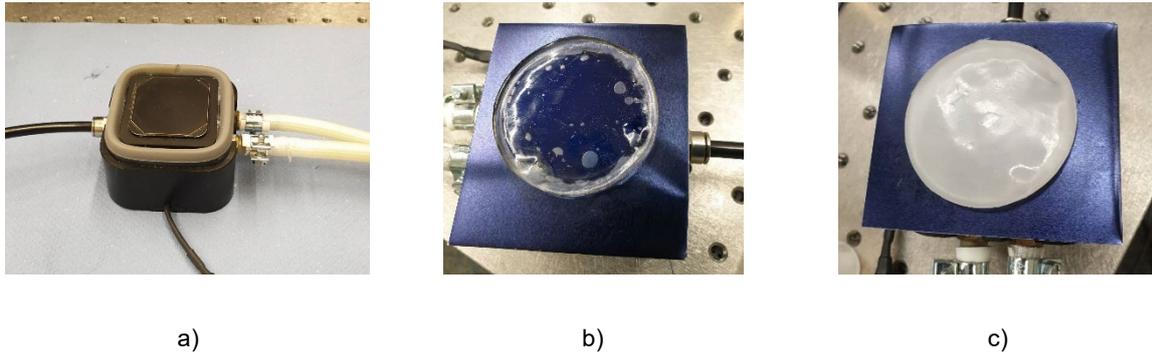


Abbildung 20: Heizblock zur Temperierung der Samples (a), Heizblock mit aufgelegtem Absorberblech und Ionogelsample bei Raumtemperatur (b) und bei 90 °C (c).

Resultate

Die Syntheseparameter haben einen grossen Einfluss auf die Konsistenz (von "zu flüssig" über "Gel-artig" bis hin zu "spröde") und die thermotropen Eigenschaften der Ionogels. Es konnten Parameter ermittelt werden, mit denen die hergestellten Ionogels gute mechanische und optische Eigenschaften aufweisen.

Wichtige Kennzeichen der Gels, wie Vernetzung und Absenz von MEK, konnten mit ATR überprüft werden. Ein entsprechendes Resultatbeispiel ist in Abbildung 21 dargestellt.

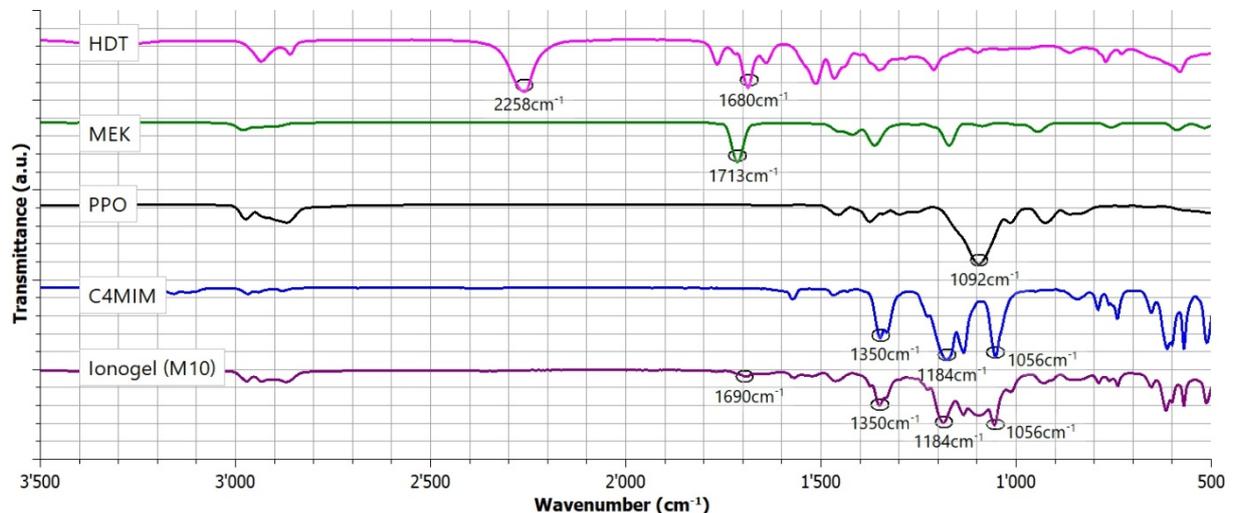


Abbildung 21: ATR-Transmissionsspektren der verschiedenen Reaktanten, sowie des fertigen Ionogels (Muster M10) mit jeweils einigen charakteristischen Absorptionspeaks. Die Absenz des Absorptionspeaks 2258 cm^{-1} , charakteristisch für die NCO-Gruppe im HDT, im fertigen Ionogel, zeigt, dass die Vernetzung des Polyurethans abgeschlossen ist. Die Absenz des für MEK charakteristischen Absorptionspeaks bei 1713 cm^{-1} zeigt, dass im Ionogel kein MEK mehr vorhanden ist.

Die temperaturabhängige Reflexion (direkt-zu-hemisphärisch) eines sehr guten Ionogels (Muster M10) mit Sampledicke von 2.3 mm ist in Abbildung 22 dargestellt, spektral aufgelöst (a) und gewichtet mit dem Solarspektrum AM1.5 (b). Der thermotrope Schaltbereich des Ionogels liegt zirka zwischen 65 °C und 85 °C. Dabei steigt der solare Reflexionsgrad von 4.7 % auf 28.8 %. Der Schaltheub beträgt also rund 25 %.

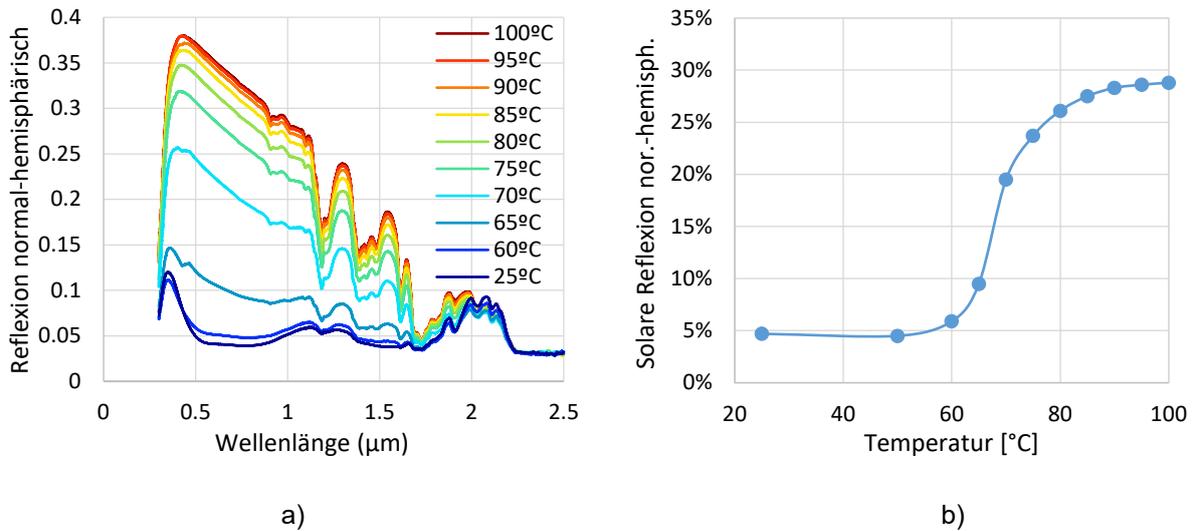


Abbildung 22: Reflexion normal-zu-hemisphärisch eines sehr guten Ionogel-Musters (M10) in Abhängigkeit der Temperatur, (a) spektral aufgelöst und (b) gewichtet mit dem solare Einstrahlungsspektrum AM1.5.

Diskussion und Fazit

Es konnten reproduzierbar Ionogels mit guten mechanischen und optischen Eigenschaften synthetisiert werden. Der Schalthub des solaren Reflexionsgrads der hergestellten Ionogels liegt mit rund 25 % im Bereich der Werte von thermotropen Polymer-Blends. Dieser Wert ist strikt genommen zu gering für einen ausreichenden Überhitzungsschutz, kann jedoch sicher durch Erhöhung der Schichtdicke und voraussichtlich auch durch weitere Optimierung der Materialkomposition erhöht werden. Zusammen mit der guten Beständigkeit der Gels ist dieser Ansatz also technisch weiterhin vielversprechend.

Die Kosten der Ionogels sind dominiert von den Kosten der ionischen Flüssigkeit. Es wurden bei rund 10 Herstellern solcher Produkte die Preise für ionische Flüssigkeiten abgefragt. Für das in den Experimenten verwendete $[\text{C4mim}][\text{NTf2}]$ lag das tiefste Angebot bei 650 CHF/kg. Für eine 2 mm dicke Ionogel-Schicht werden pro m^2 Absorberfläche zirka 1.4 kg der Flüssigkeit benötigt, was Kosten von rund 900 CHF/ m^2 bedeuten würde. Dieser Wert ist fast um einen Faktor 20 höher als die akzeptierbaren Mehrkosten. Beim Angebot des Herstellers handelt es sich zwar um den Preis für eine relativ kleine Menge. Es ist jedoch, ebenfalls nach Abklärung mit den Herstellern, davon auszugehen, dass der Preis fluorierter ionischer Flüssigkeiten auch bei Grossmengen nicht in den Bereich des geforderten Werts gelangen wird.

Ein möglicher nächster Schritt, um den Ansatz weiter zu verfolgen, bestünde in der Suche nach alternativen, kostengünstigeren ionischen Flüssigkeiten, mit denen ein ähnlicher Effekt erzielt werden kann. Erste Versuche in diese Richtung wurden bereits unternommen, indem mit ansonsten unveränderter Syntheseprozedur Ionogels mit folgenden Flüssigkeiten hergestellt wurden: 1-Ethyl-3-Methylimidazol-Ethylsulfat, 1-Butyl-3-Methylimidazol-Bromid und 1-Dodekyl-3-Methylimidazol-Bromid. Der Preis dieser Flüssigkeiten könnte in der Grossproduktion, gemäss Angaben der Firma IOLITEC, im knapp akzeptablen Bereich von 50 €/kg zu liegen kommen. Während bei den ersten beiden kein thermotroper Effekt festgestellt werden konnte, zeigte das Gel mit dem dritten Fluid einen inversen thermotropen Effekt, d.h. es wechselte bei Temperaturerhöhung von reflektierend zu transparent, wodurch das Material

allenfalls für eine andere Anwendung interessant sein könnte. Es handelte sich aber hier lediglich um erste Vorversuche. Für eine abschliessende Beurteilung der Eignung dieser und weiterer ionischer Flüssigkeiten wären systematische Versuchsreihen nötig.

3.6 Überhitzungsschutz durch Spiegellamellen

Hintergrund

Aktive Verschattungsmechanismen wurden bereits vielfach untersucht und es existieren vereinzelt auch Produkte, die diesen Ansatz für den Überhitzungsschutz von Kollektoren verwenden, z.B. eine Art Rollos im Zwischenraum einer doppelten Abdeckscheibe (Modell „HFC-2-S“ der Firma Vacano) oder Rollos/Lamellenstoren, welche ausserhalb des Kollektors angebracht werden (Produkt der Firma Kubertor) und in der Regel mit Hilfe eines Elektromotors betätigt werden.

Neben den Kosten ist bei mechanischen Lösungen insbesondere auch die Realisierung einer wartungsfreien Mechanik ein kritischer Punkt. Gegenüber einigen anderen untersuchten Ansätzen, bei denen bis zur Umsetzung teilweise noch viel Forschung nötig ist, haben aktive Verschattungsmechanismen jedoch den Vorteil, dass sie mit relativ einfachen Mitteln realisiert werden können.

Es wurde deshalb beschlossen, nach einer technisch einfachen und günstigen Lösung zu suchen. Untersucht wurde ein Kollektorkonzept, welches sich für den senkrechten Einbau (z.B. in der Fassade) eignen würde, bei dem zwischen Absorber und Abdeckscheibe spiegelnde drehbare Lamellen hängend eingebaut sind. Im Betriebszustand sind die Lamellen so ausgerichtet, dass das einfallende Licht entweder direkt auf den Absorber trifft, oder via die Spiegeloberfläche der Lamellen auf diesen gelenkt wird (Abbildung 26, links). Im Überhitzungsschutzzustand liegen die Lamellen in einer Ebene parallel zum Absorber, so dass der Grossteil der einfallenden Strahlung in die Umgebung zurückreflektiert wird (Abbildung 26, rechts). Durch den hängenden Einbau der Lamellen sollte ein wartungsfreier Mechanismus mit langer Nutzungsdauer möglich sein. Zudem sollte es der gewählte Aufbau ermöglichen, dass die Lamellenposition durch einen temperaturabhängigen Aktuator ohne Elektromotor gesteuert werden kann. Zur Untersuchung des Konzepts wurde ein Demonstrationskollektor gebaut.

Aufbau Demonstrator

Um einen guten Kompromiss zwischen kleiner Lamellenanzahl, was einen geringeren Produktionsaufwand und geringere Kosten bedeutet, und geringer Bauhöhe zu erreichen, wurde eine Lamellenbreite von 5 cm gewählt. Die Struktur des Kollektors bildeten zwei Aluminiumrahmen von der Grösse 1 m * 1.65 m mit je 5 cm Bauhöhe.

In den unteren Rahmen wurde ein Kupfer-Absorber mit einer spektral selektiven Schwarzchrombeschichtung eingebaut (Abbildung 23). Unter den Absorber wurde als Rückseitendämmung eine 2 cm dicke Schicht Steinwolle gelegt. Die Rückwand des Kollektors bildete ein 2 mm dickes Aluminiumblech.



Abbildung 23: Unterer Teil des Kollektors, sichtbar ist der Kollektorrahmen mit eingelegtem Absorber.

In den oberen Rahmen wurden 22 Spiegellamellen eingebaut. Um das Gewicht der Lamellen gering zu halten, wurden diese aus 0.5 mm dickem Aluminiumblech gefertigt. So betrug das Gesamtgewicht der Lamellen 1.3 kg. Um zu erreichen, dass die Lamellen trotz der geringen Blechstärke möglichst formstabil sind, wurde in Erwägung gezogen, das Blech in Längsrichtung mit einer Sicke zu versteifen. Nach einigen Preisanfragen bei Blechbearbeitungsfirmen wurde jedoch darauf verzichtet, da dies mit zu hohen Kosten verbunden wäre. Die Lamellen wurden beidseitig mit einer spiegelnden Klebefolie versehen.

Mit dem Ziel einer günstigen Herstellung wurden die einzelnen Lamellen so konstruiert, dass eine Lamelle nur aus einem Stück Blech besteht, welches am einen Ende ein Loch hat und am anderen Ende einen Haken, welcher in ein Lager im Kollektorrahmen eingehakt werden kann (Abbildung 24).

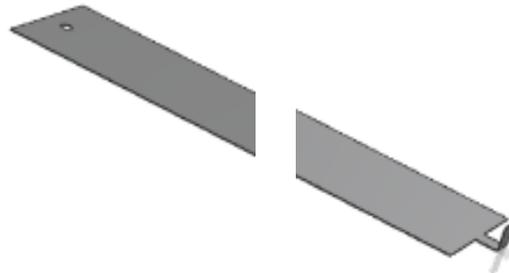


Abbildung 24: Design einer Lamelle (Endabschnitte dargestellt).

Die gewählte Lösung für die Befestigung und Betätigung der Lamellen ist in Abbildung 25 dargestellt. An den Innenseiten des Kollektorrahmens (lange Seiten) wurden Alubleche angebracht. Das untere (hängende) Ende der Lamellen wurde in ein Loch im Alublech eingehängt. Das obere Ende der Lamellen wurde mit drehbaren Kunststoffbolzen, welche im oberen Alublech eingehängt wurden, befestigt. Damit die Lamellen gedreht werden können, ist jeder Kunststoffbolzen mit einem Exzenter verbunden. Alle Exzenter wiederum sind mit einem Blechstreifen verbunden, durch dessen Translation alle Lamellen gleichzeitig gedreht werden können.

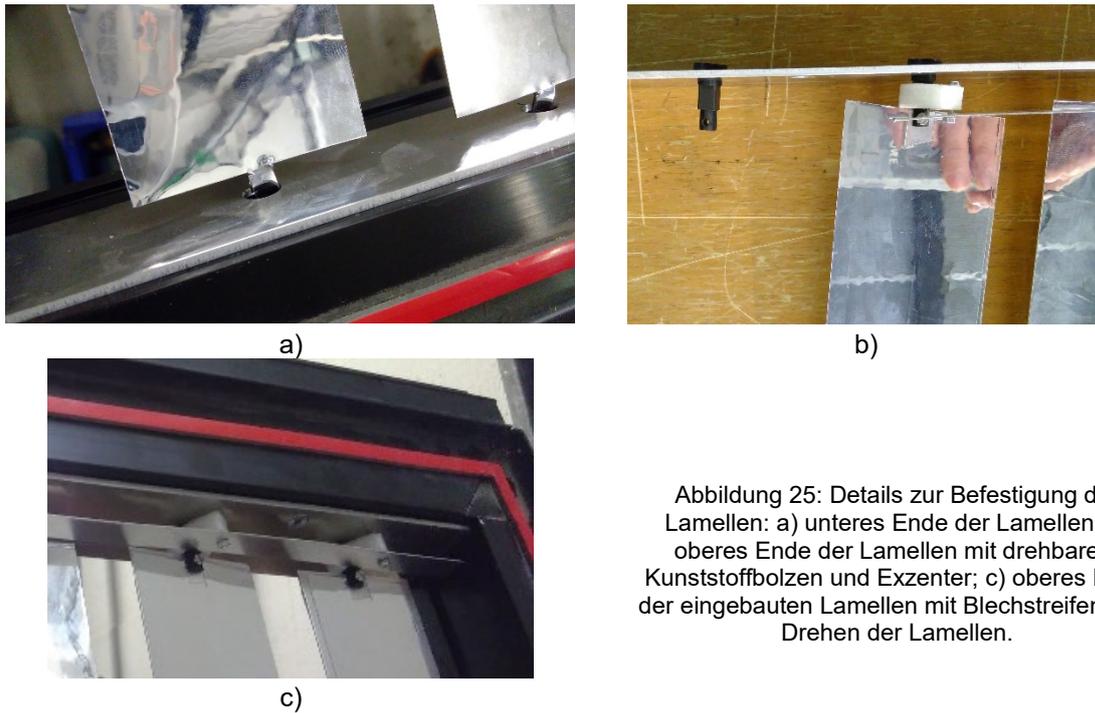


Abbildung 25: Details zur Befestigung der Lamellen: a) unteres Ende der Lamellen; b) oberes Ende der Lamellen mit drehbarem Kunststoffbolzen und Exzenter; c) oberes Ende der eingebauten Lamellen mit Blechstreifen zum Drehen der Lamellen.

Der Blechstreifen zur Betätigung der Lamellen wurde durch ein Loch im Rahmen nach aussen durchgeführt, so dass deren Position von aussen geregelt werden kann. Beim Demonstrationskollektor wurde der Einfachheit halber auf einen automatischen temperaturabhängigen Aktuator verzichtet. Die Lagerung der Lamellen hat sich zudem als nicht optimal herausgestellt, so dass die für die Betätigung der Lamellen benötigte Kraft relativ hoch war. Vor dem Einbau eines Aktuators müsste deshalb die Lagerung optimiert werden. Die beiden Kollektorrahmen mit Einbauten wurden anschliessend zusammengefügt. Zuletzt wurde auf dem oberen Rahmen die Abdeckung aus eisenarmem Solarglas befestigt. Der fertige Kollektor mit offenen und geschlossenen Lamellen ist in Abbildung 26 zu sehen.

Leistungsmessungen

Am Kollektor wurden Outdoor-Messungen der thermischen Leistung sowie des Incidence Angle Modifier (IAM), also der Winkelabhängigkeit der Leistung, durchgeführt (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Lamellenkollektor auf dem Outdoor-Prüfstand, links mit offenen Lamellen (Absorber ist gut sichtbar) und rechts mit geschlossenen Lamellen (ein grosser Teil des einfallenden Lichts wird von den Lamellen reflektiert).

Die Messung der thermischen Leistung erfolgte nach dem Steady-State-Verfahren gemäss ISO 9806. Der Kollektor wurde jeweils der Sonne nachgeführt. Aus diesem Grund waren der Kollektor und somit die Lamellen nicht wie in der Anwendung vorgesehen senkrecht (vollständig hängend) gelagert, weswegen sich die Lamellen sich durch ihr Eigengewicht etwas durchbogen.

Die thermischen Wirkungsgradkennlinien des Kollektors mit offenen und geschlossenen Lamellen, sowie ohne Lamellen (Lamellen wurden ausgebaut), sind in Abbildung 27 dargestellt.

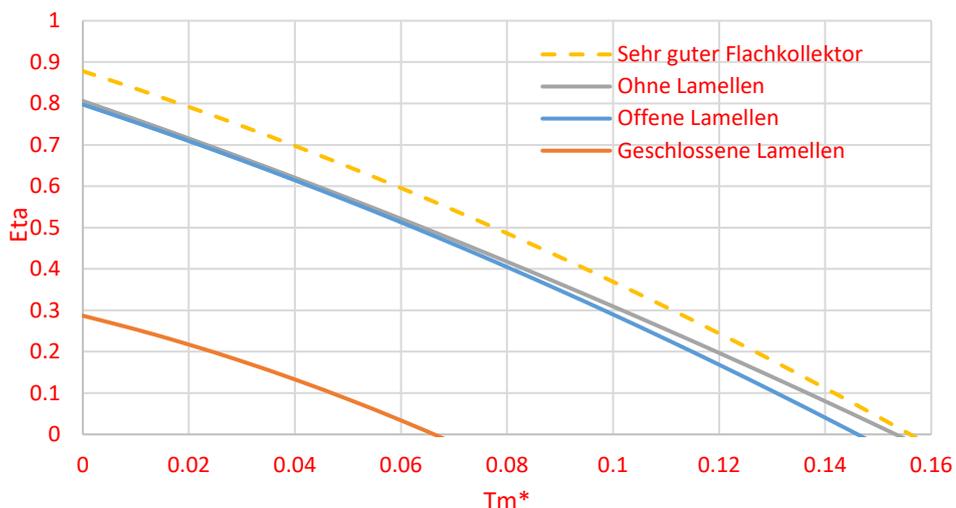


Abbildung 27: Thermische Wirkungsgradkennlinien des Lamellenkollektors in verschiedenen Konfigurationen, sowie zum Vergleich eine Kennlinie eines sehr guten kommerziell erhältlichen Flachkollektors. Definitionen von η_g und T_m^* gleich wie in Abbildung 16

Die Kennlinien zeigen, dass das Vorhandensein der Lamellen bei senkrechtem Lichteinfall kaum einen Einfluss auf die Kollektorleistung hat. Während dieses Resultat für perfekt ausgerichtete Lamellen so zu erwarten ist, zeigt sich hier auch, dass die nicht perfekte Positionierung der Lamellen, wie sie im Test vorherrschte, keine nennenswerte Auswirkung hatte.

Die entsprechenden Stagnationstemperaturen, welche aus den Messwerten extrapoliert werden für eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 und eine Umgebungstemperatur von 30 °C , sind in der folgenden Tabelle angegeben. Während die Stagnationstemperatur des Kollektors mit offenen bzw. ohne Lamellen im Bereich des Wertes eines sehr guten Flachkollektors liegt, liegt der Wert für den Kollektor mit geschlossenen Lamellen wie vorgesehen unter 100 °C .

Tabelle 7: Stagnationstemperaturen für die verschiedenen Kollektorvarianten.

	Stagnationstemperatur bei 1000 W/m^2 und 30 °C
Offene Lamellen	176 °C
Geschlossene Lamellen	96 °C
Ohne Lamellen	183 °C
Soltop COBRA Evo X 2.8H	187 °C

Eine wichtige Frage, welche sich beim gewählten Aufbau stellt, ist diejenige nach dem Einfluss der Lamellen auf die Winkelabhängigkeit der Leistung in transversaler Richtung, d.h. wenn die Lichteinfallrichtung um die Achse in Kollektorebene, welche parallel zu den Lamellen verläuft variiert wird. So werden beispielsweise Lamellen mit schlechten Reflexionseigenschaften einen Teil der einfallenden Strahlung absorbieren oder zurückstreuen, anstatt die Strahlung komplett auf den Absorber zu lenken. Die Resultate der IAM-Messungen sind in Abbildung 28 dargestellt. Die nicht perfekte Konstruktion des Lamellenschaltmechanismus erlaubte es nicht, die Lamellen genau senkrecht (offen) zu positionieren. Als Konsequenz zeigt der IAM eine Asymmetrie. Mit einer verbesserten Konstruktion würde sich ein symmetrischer IAM ergeben. Es ist davon auszugehen, dass dieser IAM mindestens den symmetrisierten Messwerten entsprechen würde. Für den Vergleich mit anderen Werten, sowie für die im nächsten Abschnitt beschriebenen Ertragssimulationen wird also ein IAM entsprechend den symmetrisierten Messwerten verwendet. Der IAM für den Kollektor ohne Lamellen entspricht praktisch demjenigen eines sehr guten markterhältlichen Flachkollektors. Der IAM des Kollektors mit Lamellen liegt etwas tiefer.

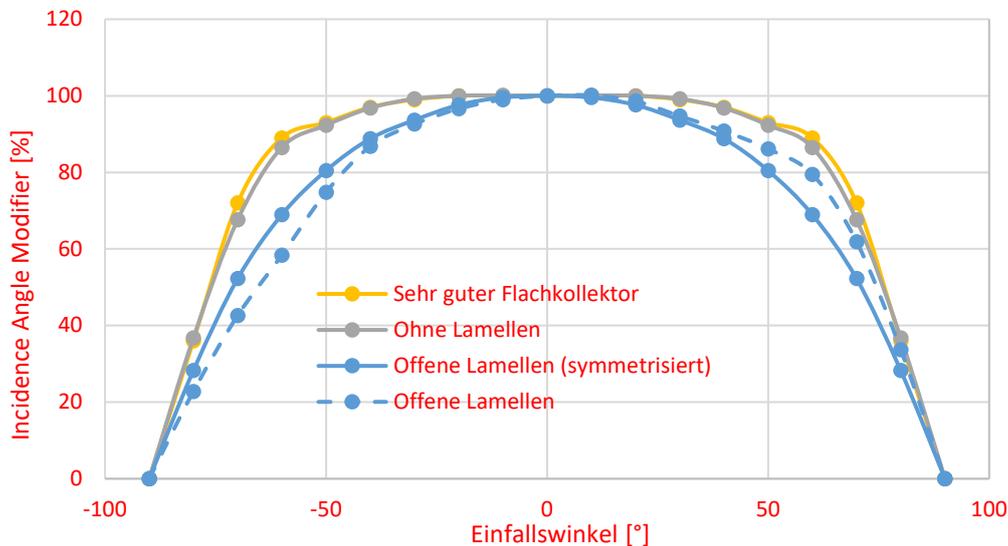


Abbildung 28: Incidence Angle Modifier (IAM) in transversaler Richtung, d.h. um die Achse in Kollektorebene, welche parallel zu den Lamellen verläuft. Lamellenkollektor mit offenen Lamellen, ohne Lamellen, sowie zum Vergleich der IAM eines sehr guten kommerziell erhältlichen Flachkollektors.

Simulationen

Es stellt sich die Frage nach dem Einfluss des durch die Lamellen verschlechterten Winkelverhaltens auf den Ertrag des Kollektors, wenn dieser in ein System eingebunden ist. Mit der Software Polysun wurden deshalb zwei typische Systemkonfigurationen simuliert, jeweils mit den Kennwerten des Kollektors ohne Lamellen und denjenigen des Kollektors mit Lamellen. Beim Kollektor mit Lamellen wurden für den IAM in Longitudinalrichtung die gemessenen Werte des Kollektors ohne Lamellen angenommen.

- Warmwassersystem Einfamilienhaus: Warmwasserverbrauch 200 Liter/Tag bei 50 °C, Speichervolumen 300 Liter, Kollektorfeld nach Süden ausgerichtet mit entweder 4 m² Bruttofläche und 45° Anstellwinkel oder 6 m² Bruttofläche und 90° Anstellwinkel (Fassade).

- Warmwasser und Heizungsunterstützung Einfamilienhaus: Warmwasserverbrauch 200 Liter/Tag bei 50 °C, Heizwärmebedarf 8.2 MWh/a, Kombispeichervolumen 800 Liter, Kollektorfeld nach Süden ausgerichtet mit entweder 16 m² Bruttofläche und 45° Anstellwinkel oder 26 m² Bruttofläche und 90 ° Anstellwinkel (Fassade).

Für die Varianten mit Kollektoren in der Fassade wurden die Kollektorfeldgrößen gegenüber den Varianten mit 45° Anstellwinkel so erhöht, dass sich zirka der gleiche solare Deckungsgrad ergibt. Als Standort wurde Rapperswil gewählt.

Als Referenz wurden die Simulationen mit den Kennwerten des Kollektors ohne Lamellen durchgeführt. Die Warmwasseranlage erreicht einen spezifischen Kollektorfeldertrag von 613 (355) kWh/m²a und einen solaren Deckungsgrad von 59 (52) %, wobei jeweils die Werte für die Variante mit 45° Anstellwinkel und die Werte für die Fassadenvariante (in Klammer) angegeben sind. Die Anlage mit Heizungsunterstützung erreicht einen spezifischen Kollektorfeldertrag von 309 (181) kWh/m²a und einen solaren Deckungsgrad von 37 (36) %. Die Reduktion der Kollektorfelderträge, welche sich beim Einsatz des Lamellenkollektors ergeben, sind in Tabelle 7 angegeben. Es zeigt sich, dass der negative Einfluss der Lamellen, insbesondere durch den reduzierten IAM, relativ gering ist. Bei den Anlagen mit 45° Anstellwinkel ist die Reduktion der Kollektorfelderträge von der Grössenordnung 5 %, während sie bei Fassadenanlagen praktisch vernachlässigbar ist.

Tabelle 8: Reduktion des jährlichen Kollektorfeldertrags beim Einsatz des Lamellenkollektors gegenüber dem gleichen Kollektor ohne Lamellen.

	45° Anstellwinkel	90° Anstellwinkel (Fassade)
Brauchwarmwasser	- 6.0 %	- 0.4 %
Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung	- 3.7 %	- 0.6 %

Kostenabschätzung

Um diese Lösung bezüglich der wirtschaftlichen Machbarkeit einordnen zu können, wurden die Kosten der verwendeten Materialien untersucht. Hierbei wurde versucht abzuschätzen, was eine solche Lösung in einer Serienproduktion kosten würde.

Bei einer Serienproduktion sind die Kosten stark abhängig von der produzierten Menge. Es wurde für die Abschätzung der Kosten von einer jährlichen Produktionsmenge von 10'000 Kollektoren ausgegangen. Dies entspräche etwa dem Produktionsvolumen eines grossen Schweizer Herstellers.

Nachfolgend ist die Anzahl zusätzlicher Teile aufgeführt, welche für eine Produktion von 10'000 Kollektoren benötigt würde, sowie der geschätzte Preis für eine Serienfertigung für die genannte Anzahl.

Teil	Anzahl pro Kollektor	Anzahl für 10'000 Kollektoren	Geschätzter Preis pro Teil [CHF]
Rahmen	1	10'000	10
Lamellen ¹³	22	222'000	1.7
Rahmenbefestigung	1	10'000	5
Aktuator ¹⁴	2	20'000	3
Drehmechanik ¹⁵	44	444'000	0.2
Montage	1	10'000	15
Total pro Kollektor			66

Die Kosten belaufen sich somit auf ca. 66 CHF pro Kollektor. Die Berechnung wurde anhand des im Prototypen verbauten Materials gemacht. Aus dieser konservativen Schätzung ergeben sich also Kosten pro Quadratmeter von rund 40 CHF, was im akzeptablen Bereich liegt.¹⁶

Diskussion und Fazit

Die Messungen am Demonstrationskollektor und die darauf gestützten Berechnungen haben gezeigt, dass mit dem vorgeschlagenen Konzept die Stagnationstemperatur wie erwartet unter 100 °C gesenkt werden kann. Gleichzeitig ist der Einfluss der Lamellen auf die Effizienz im Betrieb gering, und könnte durch den Einsatz von besseren Spiegelschichten sogar noch reduziert werden.

Die Motivation für den hängenden Einbau der Lamellen, was dessen Einsatzbereich auf sehr steile Einbausituationen limitiert, war, dass auf diese Weise die Ausrichtung, Lagerung und Drehung der Lamellen einfacher sein sollte. Die Formstabilität der Lamellen scheint bei dieser Lösung in der Tat unkritisch zu sein, was etwa den Einsatz von geringen Materialstärken erlaubt. Die Lagerung über die Kunststoffbolzen und die Lösung für die Betätigung der Lamellen hat sich als nicht ideal herausgestellt. Dies beruht in erster Linie auf der relativ geringen Präzision der Fertigung. Hier müsste nach präziseren und robusteren Lösungen gesucht werden. Es hat sich also gezeigt, dass die mechanische Lösung, obwohl hier relativ einfach gehalten, der kritische Punkt für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Überhitzungsschutzansatzes sein wird. Aufgrund von Untersuchungen im BFE Projekt "HiPer-PVT" kann davon ausgegangen werden, dass die Lösungsfindung für einen thermischen Aktuator für hängende, mit wenig Kraftaufwand drehbare Lamellen als weniger kritisch einzustufen ist.

Die technische Machbarkeit dieser Lösung kann also positiv bewertet werden, jedoch mit dem Nachteil, dass die Anwendung in der hier untersuchten Umsetzung auf steile Einbausituationen beschränkt ist. Die Kostenabschätzung wiederum hat gezeigt, dass dieser Ansatz voraussichtlich innerhalb des gesetzten Kostenrahmens realisierbar wäre.

¹³ Die Kosten für das Material belaufen sich auf 0.6 CHF pro Lamelle und zwischen 0.96-1.1 CHF pro Lamelle für die Bearbeitung. Berechnung einmal mit 110 CHF pro Maschinenstunde und einmal mit Maschinen, Personal, und Gebäudekosten von 205'000 CHF/a. Dies bedingt eine Produktionszeit von 30 s pro Lamelle.

¹⁴ Preise für ein geeignetes Dehnstoffelement gemäss TU-Poly Co LTD bei einer Abnahmemenge von > 5000 Stück pro Jahr

¹⁵ Preise für Spritzguss; Preise für Kleinteile mit der Möglichkeit eine Form zu fertigen mit 6 oder mehr Teilen pro Zyklus.

¹⁶ Die Berechnung bezieht sich auf eine Fertigung in der Schweiz. In der Berechnung sind lediglich die Kosten für die Fertigung und Montage enthalten, jedoch keine Entwicklungs- und Managementkosten oder ähnliche Kosten.

3.7 Zusammenarbeit mit externen Partnern

- Der **Rotating Ball/Gyricon**-Ansatz wurde ebenfalls als interessanter Ansatz identifiziert. Wie weiter oben erwähnt, war durch die Firma Xerox ein Display basierend auf diesem Ansatz entwickelt worden, das sich jedoch als Produkt nicht durchgesetzt hat. Gründe dafür könnten bei den zu langen Schaltzeiten und der zu geringen optischen Qualität liegen. Für den Einsatz als schaltbare Absorberschicht in einem Solarkollektor sind die Anforderungen diesbezüglich viel geringer, was einen Vorteil darstellt. Um die Machbarkeit dieses Ansatzes weiter zu untersuchen, wurde mit der Complex Materials-Gruppe der ETHZ Kontakt aufgenommen. Zwischen Herbst 2018 und Frühling 2019 hat sich dann eine Studentin im Rahmen einer Masterarbeit ausgehend von der Gyricon-Idee mit dem Thema „Switchable Solar Absorbers“ befasst (Ganzeboom 2019), unter Anleitung von Dr. Ahmet Demirörs. Die Synthese von elektrisch neutralen Mikropartikeln mit anisotroper Ladungsverteilung hat sich in der zur Verfügung stehenden Zeit als nicht machbar erwiesen, weshalb auch andere Ideen für schaltbare Oberflächen untersucht wurden. Ein interessanter Ansatz wurde schliesslich mit magnetischen Janus-Mikrosäulen entwickelt. Dazu wird mit einem weichen Silikon, in welches magnetische Partikel eingebettet sind, eine Schicht mit aus kleinen Säulen (zwischen 0.1 und 2 mm) bestehender Oberfläche hergestellt. Diese Säulen, welche ein magnetisches Dipolmoment aufweisen, können mit Hilfe eines externen magnetischen Feldes auf die eine oder andere Seite gekippt werden. Die Säulen wurden auf der einen Seite schwarz, und auf der anderen Seite metallisch beschichtet, wodurch eine Oberfläche geschaffen wurde, deren optische Eigenschaften durch ein magnetisches Feld geschaltet werden können. Es konnte ein Schalthub im Reflexionsgrad im Bereich von 20 % erreicht werden. Es handelt sich also um einen interessanten Ansatz, der jedoch noch im Bereich der Grundlagenforschung liegt.
- Über den Kontakt zum Materialwissenschaftsdepartement der ETHZ konnte eine interessante, noch wenig untersuchte Materialgruppe mit thermotropen Eigenschaften identifiziert werden. Siehe dazu den vertraulichen Anhang A.3.

3.8 Fazit zu Kollektoren mit Überhitzungsschutz

In Forschung und Entwicklung wurden bereits viele Ansätze für einen Überhitzungsschutz für Solarkollektoren untersucht und teilweise realisiert. Aus verschiedenen Gründen haben sich diese bisher nicht durchgesetzt. Mit den hier durchgeführten Arbeiten wurden mehrere neue Ansätze identifiziert und untersucht, die sich im Technologie-Screening als interessant darstellten:

- Die Lösung mit einem höhenverstellbaren Absorber ist technisch vielversprechend, muss jedoch noch vereinfacht werden. An einfacheren und kostengünstigeren Umsetzungsvarianten dieses Konzepts wird von den Autoren im Projekt HiPerPVT gearbeitet.¹⁷
- Die Variante mit Spiegellamellen scheint sowohl in technischer wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht realisierbar zu sein. Ein Innosuisse-Projekt zur Weiterverfolgung dieses Ansatzes wurde bewilligt und wird 2020 starten.

¹⁷ <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=40732>

- Ein schaltbarer Absorber basierend auf einer elektrophoretischen Schicht ist mit den aktuell kommerziell verfügbaren Produkten technisch nicht machbar und auch nicht wirtschaftlich. Da jedoch mehrere Hersteller zum Ziel haben, „Displays“ für Aussenanwendungen zu entwickeln, was aus technologischer Sicht auch machbar sein sollte, könnte dieser Ansatz in Zukunft eine Lösung für einen Überhitzungsschutz liefern.
- Thermotrope Ionogels sind eine sehr interessante und relativ neue Klasse von Materialien. Die aktuell bekannten Materialkombinationen sind technisch noch nicht ausreichend bezüglich des benötigten Schalthebs. Ausserdem sind Ihre Kosten weit ausserhalb des akzeptablen Rahmens. Es findet jedoch noch viel Materialforschung in diesem Bereich statt, und es ist durchaus vorstellbar, dass daraus Materialien mit noch besseren optischen Eigenschaften und auch deutlich geringeren Kosten hervorgehen werden. Entsprechende Forschungsprojekte könnten gemeinsam mit Spezialisten aus diesem Fachbereich angestrebt werden.

4 Modularer Speicher

Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit der Entwicklung eines modular einsetzbaren Speichers. Die Begleitgruppe hatte das Fehlen von kostengünstigen, leichten und einfach zu installierenden Speicherkonzepten mit Volumen über 1 m³ als Hindernis für die Verbreitung der Solarwärme in Mehrfamilienhäusern angeführt. Das Ziel der nachfolgend beschriebenen Entwicklung bestand folglich darin, einen Warmwasserspeicher zu entwickeln, welcher leicht, turgänglich und einfach zu installieren ist. Zudem soll dieser mit möglichst geringen Aufwand zu einem grösseren Speicherverbund (Cluster) erweitert werden können.

Der Einsatz von drucklosen Kunststoff- oder Stahlbehältern und von Standardelementen für Speichereinbauten und Wärmedämmung standen für das modulare Speicherkonzept im Vordergrund. Durch ein entsprechendes Produktionsverfahren sollte ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht werden, um die Arbeitsschritte bei Nachbearbeitung und Installation zu verringern.

4.1 Methodik

Der erste Teil des Arbeitspakets bestand darin, einen Anforderungskatalog für entsprechende Speicher zu definieren und eine Preisanalyse marktüblicher Speicher durchzuführen.

In einem weiteren Schritt wurden anschliessend verschiedene Lösungsvarianten ausgearbeitet. Anhand der Kriterien des Anforderungskatalogs und mittels eingeholter Offerten wurde die Umsetzbarkeit der Lösungen bewertet. Zusammen mit dem IWK¹⁸ wurde die zu erwartende Langzeitstabilität der Lösungen evaluiert. Aus diesen Überprüfungen wurde ein Speicherkonzept ausgewählt und ein darauf aufbauender Prototyp entworfen. Dieser wurde anhand von FEM-Berechnungen auf seine Druckstabilität validiert.

Der letzte Teil dieses Arbeitspakets bestand darin, den Prototypen zu fertigen und mit zwei verschiedenen Beladungssystemen im "Hardware in the Loop Test" des SPF (Haberl, Reber, and Haller 2017) auf Schichtungseffizienz zu untersuchen.

4.2 Anforderungskatalog

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten wurde folgender Anforderungskatalog für den modularen Warmwasserspeicher aufgestellt.

Tabelle 9: Musskriterien und Optimierungskriterien für den Speicher

	Musskriterien
M1	Kostengünstiger als herkömmliche Speicherlösung mit gleichem Volumen bei erschwerten Installationsbedingungen. Speicher allein und auch unter Berücksichtigung der Installationskosten

¹⁸ Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung; Ein Institut der Hochschule für Technik Rapperswil

M2	Einfache Montage und kurze Inbetriebnahmezeit
M3	Optimale Raumausnutzung
M4	Langlebigkeit ähnlich wie herkömmliche Speicher (>30 Jahre)
M5	Modularität mit geringerem Installationsaufwand erreichbar als bei herkömmlichen Speichern
M6	Türgängig (80 cm Türbreite)
M7	Einhalten eines Kippmasses des Speichers für Kellerräumlichkeiten von max. 220 cm Raumhöhe ¹⁹
M8	Stand-alone Module ²⁰
M9	Langzeit-Temperaturbeständig bis 95 °C
	Optimierungskriterien
O1	Soll für alle Nachwärmesysteme geeignet sein
O2	Standardgrösse(n) der Speicher wie herkömmliche
O3	Gute thermische Schichtung im Speicher bei Beladung mit hohen Volumenströmen
O4	Thermische Verluste und Schichtungsverluste kleiner oder gleich wie bei herkömmlichen Speichern, revidierte Dämmvorschriften beachten (erhöhte Anforderungen an die Wärmedämmung von Speichern durch EN 12897),
O5	Einfache Montage der Dämmung
O6	Dämmung ohne Glaswolle
O7	Ohne Schulung montierbar
O8	Mit Transporthilfen (Tragehilfen) direkt am Speicher
O9	Türgängigkeit mit Marge (einige Türen können kleinere Öffnungen aufweisen, <80cm)
O10	Geringes Leergewicht
O11	Einfache Verrohrung bei Cluster (Gruppierung mehrerer Speicher)
O12	Allfälliges Drainback-Volumen separat und nicht im Speicher integriert

Die Optimierungskriterien sollen vor allem sicherstellen, dass der Speicher Akzeptanz am Markt erfährt. Wichtig ist hierfür die Möglichkeit der Anbindung des Speichers an verschiedene Heizsysteme. Zudem soll der Speicher auch bei Anbindung an Wärmepumpen und einhergehenden hohen Belade-Volumenströmen eine gute thermische Schichtung erreichen. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Türgängigkeit. Die Türbreite ist durch DIN 18100 genormt. Es wird dort eine minimale Breite von 819 mm gefordert. Das Mass wurde um einen zusätzlichen Wert verringert, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass gerade in Altbauten die Türbreite oft kleiner sein kann. Dadurch kann der Speicher mit höherer Wahrscheinlichkeit in Altbauten verwendet werden. Der Speicher wurde so entwickelt, dass eine Implementierung eines Drainback-Volumens im Speicher möglich ist. Dieses konnte in den umgesetzten Speicherdesigns aber nicht getestet werden.

¹⁹ Quelle: Aussagen Begleitgruppe zu typischer Raumhöhe in Altbauten

²⁰ Jedes einzelne Modul ist in sich dicht. Modularität wird nicht durch Plattenbauweise vor Ort erreicht.

4.3 Marktüberblick und Kostenstrukturen von Speichern

Aus den durchschnittlichen Endkundenpreisen von Speichern, welche im Vorprojekt²¹ analysiert wurden, geht hervor, dass für einen 1000 Liter-Speicher mit integriertem Solarwärmetauscher und Wärmedämmung, aber ohne Heizungsanbindung, mit Materialkosten von rund 3'220 CHF²² gerechnet werden muss. Zu den Materialkosten kommen Speicherinstallationskosten von ca. 600 CHF hinzu.

Ergänzend zur Analyse aus dem Vorprojekt ReSoTech 1 werden nachfolgend die Preise weiterer Speichergrössen und -ausführungen analysiert. Tabelle 9 zeigt die Preisspanne dieser herkömmlichen Speicher in Abhängigkeit ihres Volumens und ihrer Ausführung. Die Preise beziehen sich auf Speicher inklusive Wärmedämmung aber ohne Installationskosten. Es sind keine platzgeschweissten Speicher aufgeführt (Platzschweissen würde den Preis eines Speichers um ca. 2'000 CHF erhöhen).

Tabelle 10: Preisspanne herkömmlicher emaillierter Stahlspeicher.²³

Nr.	Nutzzinhalt (Liter)	Beschreibung	Preis in CHF	Spez. Kosten CHF / 1'000 L
1	1'000	Heizung direkt, keine Solaranbindung	1'000 bis 2'000	1'000 bis 2'000
2	1'000	Heizungs- & Solaranbindung durch externe Wärmetauscher	3'500 bis 4'500	3'500 bis 4'500
3	1'000	Heizungs- & Solaranbindung durch interne Wärmetauscher	3'500 bis 5000	3'500 bis 5000
4	1'000	Tank-in-Tank-System, zwei Solar- & eine Heizungsanbindung mit Schichtlanze	ab 5'000	ab 5'000
5	2'000	Tank- in Tank-System gleich wie Nr. 4, doppelt so gross	ca. 8'000	ca. 4'000
6	5'000	gleiches System wie Nr. 4 & 5, mehr Speichervolumen	ca.12'000	ca. 2'400

Kunststoffspeicher

Im Bereich der Kunststoffbehälter gibt es Speicher für die Regenwasserspeicherung oder die Heizöllagerung. Diese Speicher sind in der Regel türgängig, jedoch nur begrenzt für den Einsatz als Wärmespeicher gedacht (Temperaturbeständigkeit, Anschlüsse, usw.).

Abbildung 29 gibt eine Übersicht über die Anschaffungskosten von Kunststofftanks verschiedener Hersteller in diversen Grössenausführungen. Für spezifische Kosten pro Kubikmeter Speichervolumen siehe Abbildung 30.

²¹ ReSoTech Teil 1: Potenzialanalyse und Lösungsansätze (Philippen et al. 2016), Abschnitt 3.3.1 (Investitionskosten)

²² Alle genannten Preise im Bericht sind exkl. MwSt. und wurden bei Bedarf mit 7.7% angepasst.

²³ Preislisten: Eitherm, Stiebel Eltron, Jenni Energietechnik, Alpha Innotec

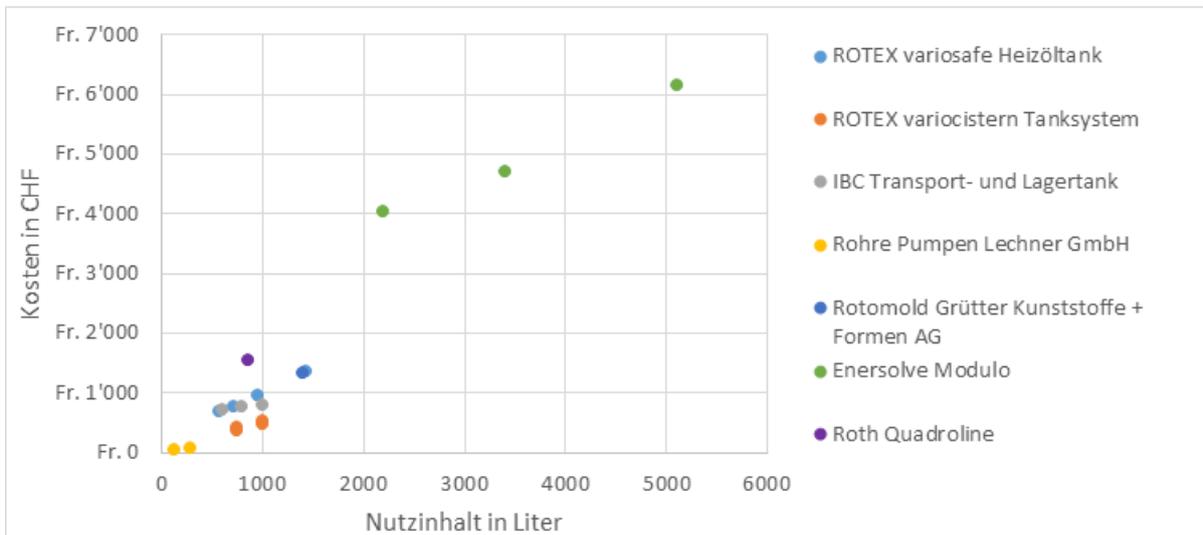


Abbildung 29: Preise diverser Kunststofftanks in Abhängigkeit des Speichervolumens.

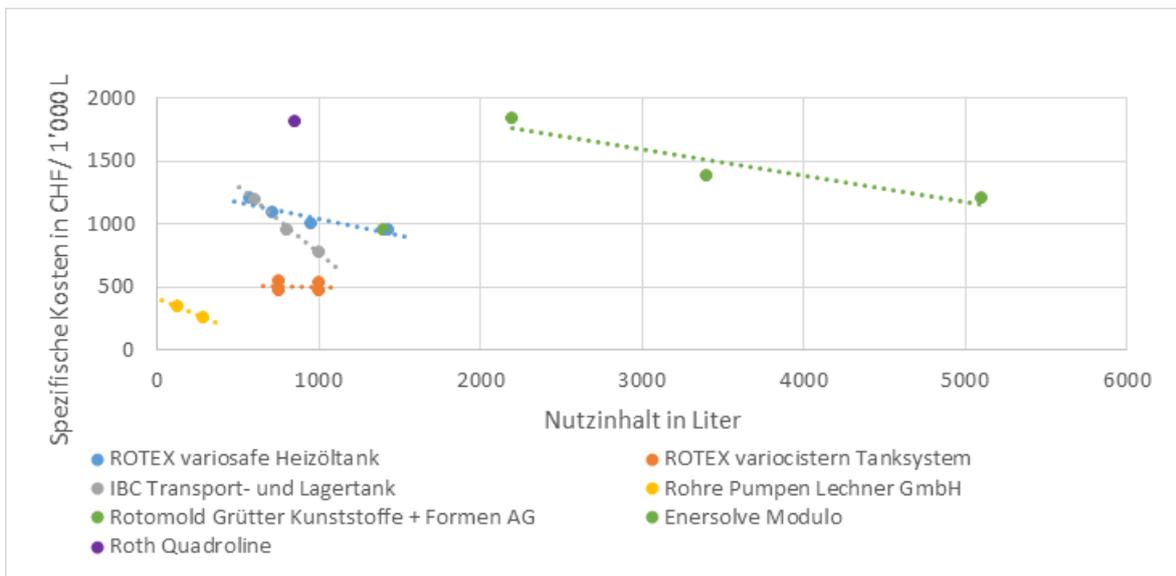


Abbildung 30: Spezifische Preise der Kunststofftanks verschiedener Hersteller pro m³ Speichervolumen.

Modulare Speicher gibt es am Markt nicht viele. Zwei Beispiele modularer Speicherkonzepte werden nachfolgend bezüglich ihrer Kosten angeschaut:

Der Speicher „Modulo“ der Firma Enersolve (DE) hat einen modularen Aufbau und individuelle Grössen. Der Speicher besteht aus Polypropylen(PP)-Platten, welche in der Produktion zu Modulen zusammengeschweisst werden. Die einzelnen Module werden dann vor Ort aufeinander montiert. Alle Module sind durch gelochte Platten voneinander getrennt. Durch den modularen Aufbau ist er türgängig. Wegen der verwendeten PP-Platten, die keine hohe Festigkeit haben, kann er jedoch nicht mit Druck beaufschlagt werden. Den Speicher gibt es in drei Ausführungen, als Quader, als Zylinder oder eingebaut in einen See-Container für Grossanwendungen.

Tabelle 11: Preisliste Enersolve Thermaltank "Modulo". Den Speicher gibt es jeweils auch in quadratischer Form. Die Preise hierfür sind jeweils höher als die zylindrische Form gleicher Grösse und werden zur Übersichtlichkeit nur einmal aufgezeigt.

Nr.	Nutzzinhalt in L	Form	Masse (LxBxH, ØxH) in mm	Preis in CHF ²⁴	spez. Kosten (CHF/ 1'000 L)
1	2'200	Quader	1'820 x 1'320 x 1'990	5'360	2'440
2	2'200	Zylinder	1'574 x 1'990	4'040	1'840
3	3'400	Zylinder	1'824 x 1'990	4'700	1'380
4	5'100	Zylinder	2'324 x 1'990	6'160	1'210

Die Firma Roth (DE) bietet einen Kunststofftank ("Thermotank Quadroline") bis 850 Liter Speichervolumen an. Dieser kann auch als Cluster mit mehreren Tanks zusammengeschaltet werden. Der Tank kann in unterschiedlichen Varianten (Solar, Kombi, Puffer etc.) bestellt und mit Druck bis 3 bar beaufschlagt werden. Der Speicher besteht aus einem Inliner welcher diffusionsdicht ist und im Blasverfahren hergestellt wird. Danach wird der Speicher mit in Harz getränkten Glasfasern umwickelt. Dies gibt dem Speicher die benötigte Stabilität. Der Speicher ist turgänglich und kann in den leichteren Varianten ohne Hilfsmittel durch angefügte Handgriffe von zwei Personen getragen werden. Das Leergewicht beträgt je nach Ausführung zwischen 40 kg und 110 kg. Roth gibt die Energieeffizienzklasse B²⁵ für den Speicher an. Der Preis, linear hochgerechnet für einen 1000 Liter Trennspeicher, beträgt 2'130 CHF²⁶.

Stahlspeicher

Theoretisch kann jeder Stahlspeicher-Typ zu einem Cluster mit mehreren Speichern erweitert werden. Es gibt jedoch wenige, die explizit dafür vorgesehen sind. Ein Speichercluster würde ein Konzept verlangen, wie mehrere Speicher miteinander verschaltet werden. Anforderung dabei ist, dass die Speicher möglichst wenig Platz brauchen und eine kurze Montagezeit aufweisen bei möglichst effizienter Dämmung des gesamten Clusters. Ein gewöhnlicher Stahlspeicher (roh) kostet bei 1'000 Liter Inhalt ohne Einbauten und mit Wärmedämmung ca. 1'750 CHF. In Abschnitt 4.4.2 wird ein Stahlspeicher genauer untersucht und als Referenz verwendet.

Am Markt gibt es fast keine Hersteller, welche modulare Speicher (>1500 L) anbieten, die ohne Platzschweissung installiert werden können. Bei 1000 L Speicherinhalt muss bei Stahlspeichern mit einem Gewicht von mindestens 150 kg gerechnet werden. Bei Speichern mit internen Wärmetauschern und Strömungsberuhigungen ist das Gewicht deutlich grösser.

Die Firma Consolar (DE) bietet einen modular aufgebauten Speicher aus Stahl an. Dieser besteht aus zwei verschiedenen Modultypen. Einem Endmodul und einem Zwischenmodul. Ein Speicher besteht immer mindestens aus zwei Endmodulen und kann mit den Zwischenmodulen erweitert werden. Die einzelnen Module sind turgänglich und werden vor Ort montiert. Ein Rahmen positioniert die Module und hält sie zusammen. Alle Varianten des Speichers können bis 3 bar bedruckt werden. Die Wärmedämmung des Speichers wird

²⁴ die Preise verstehen sich ohne Transport.

²⁵ Für Varianten bis 500 L

²⁶ Quelle: Roth Preisliste 2019; Die Trennspeicher verfügen über ein Schichtladesystem für optimale Temperaturschichtung; Mit Thermocoat Isolation (1720 CHF ohne Isolation)

vorfabriziert und ist wahlweise auch in VIP-Ausführung²⁷ erhältlich. In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Varianten mit dem Nutzinhalt und dem Preis aufgeführt.

Tabelle 12: Preise modularer Pufferspeicher von Consolar.

Nr.	Nutzinhalt in L	Beschreibung	Preis in CHF ²⁸	Spez. Kosten CHF / 1000 L
1	2'800	2-Endmodule Varical	7'150	2'550
2	4'100	2-Endmodule + 1 Zwischenmodul Varical	9'220	2'250
3	5'500	2-Endmodule + 2 Zwischenmodul Varical	11'020	2'000
4	6'800	2-Endmodule + 3 Zwischenmodul Varical	12'520	1'840

In Kapitel 4.4 (Grobkonzeption) wird mit Variante 4 ein leichter, türgängiger Stahlspeicher entworfen und basierend auf verschiedenen Offerten eine Kostenabschätzung gemacht.

4.4 Grobkonzeption und spezifische Kosten verschiedener Speicher

In der Grobkonzeption werden verschiedene Lösungsansätze miteinander verglichen. Es werden Lösungen aus anderen Technologiebereichen und verschiedene Herstellungsverfahren untersucht. Nachfolgend werden vielversprechende Varianten sowie ein Standard-Stahlspeicher bezüglich Umsetzung, Installationsfreundlichkeit, Preis und Raumausnutzung²⁹ miteinander verglichen. Die Kosten sowie die technische Machbarkeit der verschiedenen Varianten wurden mit Experten vom IWK abgeschätzt, oder bei Herstellern nachgefragt.

²⁷ Vakuumisulationspanel, Wärmedämmplatten mit Vakuum

²⁸ Preise Brutto, exklusiv MwSt. und nur für Tank mit Wärmedämmung, ohne Installation o.Ä.

²⁹ Verhältnis zwischen effektivem Nutzvolumen und dem eingenommenen Raumvolumen (inkl. Siphonierung & Wärmedämmung) im Heizungskeller

4.4.1 Lösungsansätze

Variante 1: Extrudierter quaderförmiger Kunststoffspeicher mit wandintegrierten Wärmetauschern, drucklos

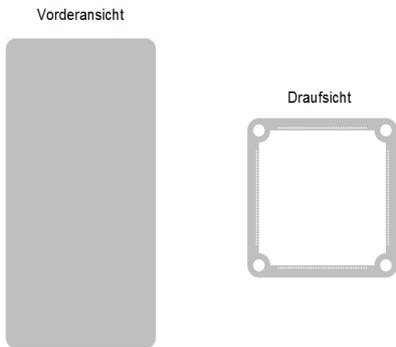


Abbildung 31: Prinzip der Lösungsvariante 1, Speicher mit wandintegrierten Wärmetauschern

Variante 1 ist ein Kunststoffspeicher, welcher wandintegrierte, vertikal verlaufende Kanäle hat. Diese Kanäle dienen dem Wärmeaustausch und werden direkt bei der Herstellung des Speichers mitextrudiert. Die Wärmetauscher werden durch die hohlen Rohre in den Ecken angeschlossen. Der Deckel und Boden beinhalten die Verbindung der Rohre und der Wärmetauscher.

Alle Anschlüsse befinden sich oben auf dem Speicher, was die Problematik möglicher Leckagen auf ein Minimum reduzieren soll. Durch das Extrudieren können diverse

Speicherhöhen realisiert werden, was die Anwendungsvielfalt hochhält. Metallbänder dienen als Verstärkung und mindern so das Kriechen des Kunststoffes.

Vorteile	Nachteile				
<ul style="list-style-type: none"> • All-in-One-Lösung , inkl. WT • Hohe Raumausnutzung • Dichtigkeit der Anschlüsse ist einfacher, da diese über dem Wasserspiegel liegen • Speicherinhalt je nach Wunsch anpassbar (variable Speicherhöhe) • Einfache Wärmedämmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Herstellung ungewiss • Langzeitstabilität eher schlecht (Kriechen, Verengung der WT-Känale) • Raumhöhe nicht vollständig ausnutzbar wegen den Anschlüssen auf dem Speicher • Stabilisierung nötig mit externen Metallrahmen 				
Speicherdetails	Raumausnutzung				
<ul style="list-style-type: none"> • Masse [m]: 0.75 x 0.75 x 2.0 • Speichervolumen [L]: 1'000 • Dämmdicke [mm]: 100 • Gewicht [kg]: 120 • Anschlüsse oben 	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">Einzelspeicher</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">Speicher-Cluster</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"> <p>53 %</p> </td> <td style="text-align: center;"> <p>61 %</p> </td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Abbildung 32: Raumausnutzung des Speichers³⁰ Blau = Nutzvolumen; Grün = Wärmedämmung</p>	Einzelspeicher	Speicher-Cluster	<p>53 %</p>	<p>61 %</p>
Einzelspeicher	Speicher-Cluster				
<p>53 %</p>	<p>61 %</p>				

³⁰ Darstellung des Horizontalschnitts eines einzelnen Speichers und eines Speicher-Clusters

Fertigung & Installation

Um den Speicher mit wandintegrierten Wärmetauschern realisieren zu können, bedarf es einer Extrusionsanlage mit entsprechender Düse, Kalibrierung und Kühlstrecke. Durch die Abkühlung des Kunststoffes nach der Extrusion und der nachgeschalteten Kalibrierung entstehen mit hoher Wahrscheinlichkeit Verzug und Spannungen sowie Schwundstellen im Bauteil. Die Wärmetauscherkanäle könnten aus diesem Grund zusammenfallen. Um in der Produktion eine genügend hohe Qualität zu erreichen und halten zu können, braucht es viel Einsatz von qualifizierten Mitarbeitern, was den Prozess schnell verteuert. Zudem muss berücksichtigt werden, dass für die Verbindung der Wärmetauscher ein komplizierter Anschluss angefertigt werden muss.

Eine einfache Installation ist möglich. Die einzelnen Elemente können von zwei Personen getragen und am Ort zusammengebaut werden. Dies erlaubt es, den Speicher als Cluster zusammenzubauen. Für die Installation nachteilig ist, dass die Anschlüsse alle von oben angeschlossen werden müssen. Die Wärmedämmung kann sehr einfach mit vorfabrizierten Modulen angebracht werden. Die Lebensdauer dieser Lösung ist als kritisch zu betrachten. Durch die Temperaturschwankungen können die Anschlüsse an die Wärmetauscherkanäle undicht werden.

Kosten

Es sind sehr hohe Kosten für die Extrusionsform und für einen stabilen Produktionsprozess zu erwarten. Falls der Prozess gut automatisiert werden kann, sind ab einer hohen Stückzahl günstige Preise zu erwarten. Den ganzen Prozess vollständig zu automatisieren wird schwierig und kostenintensiv sein.³¹

Fazit

Die Fertigung durch Extrusion wurde von Fachexperten des IWK als schwierig eingeschätzt. Zudem sind bei solch grossen Durchmesser des Extrusionsprofils (750 x 750 mm) hohe Maschinen- und Personalkosten zu erwarten. Nicht abgeschätzt wurde in dieser Grobkonzeption, ob die wandintegrierten Wärmetauscher die Wärme effizient in den Speicher bringen und ob sie eine gute Schichtung im Speicher ermöglichen.

Eine Umsetzung im Projekt wurde verworfen, da für einen Prototyp bereits sehr hohe Kosten getragen werden müssen und eine erfolgreiche technische Umsetzung unwahrscheinlich erscheint.

³¹ Einschätzungen der Experten des IWK.

Variante 2: Quaderförmiger Kunststoffspeicher mit seitlichen Anschlüssen und Verstärkungssicken, drucklos



Abbildung 33: Visualisierung der Speichervariante aus Kunststoff mit seitlichen Anschlüssen. Die Anschlüsse werden in die Sicken integriert.

Bei dieser Variante handelt es sich ebenfalls um einen Kunststoffspeicher. Alle Anschlüsse sind seitlich leicht rückversetzt, damit alle Verrohrungen unter der Wärmedämmung Platz finden. Die Wärmedämmung wird dann als vorfabrizierte Einheit um das Cluster montiert. Dies gewährleistet eine einfache und kostengünstige Montage. Die Sicken, in denen die Anschlussrohre platziert sind, werden auf der optimalen Anschlusshöhe angefertigt, damit im Speicher mit Strömungsberuhigungen und ohne Schichtladelanzen gearbeitet werden kann.

Vorteile		Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> • Rohre unter der Wärmedämmung • Kostengünstige Materialwahl und Herstellung (bei hohen Stückzahlen) • Einfache Modularität (Anschlüsse immer auf derselben Höhe) • Bauweise mit geringem Leergewicht erleichtert Handling 		<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturbeständigkeit ungewiss (Kriechen des Materials mit der Zeit) • Volumenverlust durch die Sicken • Stabilisierung nötig mit externen Metallrahmen 	
Speicherdetails		Raumausnutzung	
<ul style="list-style-type: none"> • Masse [m]: 0.78 x 0.78 x 2.0 • Speichervolumen [l]: 874 • Dämmdicke [mm]: 100 • Gewicht [kg] 100 • Rohrführung: in Speicherwand vorne 		<p>Einzelspeicher</p> <p>42 %</p>	<p>Speicher-Cluster</p> <p>49 %</p>

Abbildung 34: Raumausnutzung des Speichers ³²
 Blau = Nutzvolumen;
 Gelb = Anschlüsse und Siphonierung;
 Grün = Wärmedämmung

³² Darstellung des Horizontalschnitts eines einzelnen Speichers und eines Speicher-Clusters

Herstellung & Installation

Diese Variante kann je nach Komplexität der Form mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden. Bei einer simplen Form ist das Wickelverfahren wohl die einfachste Lösung. Hierbei wird eine in Harz getränkte Trägermatrix auf einen Dorn aufgewickelt. Die Lösung ermöglicht auch Sandwich-Bauweisen mit integrierter Wärmedämmung³³. Die Herstellung mittels Laminatwickelverfahren kann mit geringem Aufwand automatisiert werden, hat jedoch den Nachteil, dass alle nicht rotationssymmetrischen Formen nachträglich eingebaut werden müssen. Zudem muss die Geometrie des Speichers so aufgebaut sein, dass der fertige Speicher vom formgebenden Dorn gezogen werden kann.³⁴ Ein Vorteil dieser Herstellung ist, dass eine Trägermatrix verwendet werden kann, welche dem Speicher eine hohe Festigkeit verleiht.

Bei wesentlich komplexeren Formen würde eine Herstellung mittels Rotational Molding in Frage kommen. Bei dieser Herstellung wird eine Positivform des Speichers mit Kunststoffgranulat befüllt und erhitzt. Sobald der Kunststoff zu schmelzen beginnt wird die Form um alle Raumachsen gedreht. Dies ermöglicht dem Kunststoff, sich überall abzulagern. Bei mehrschichtigen Laminaten kann dieser Vorgang wiederholt werden. Das Rotational Molding ist auch für komplexe Formen nicht sehr teuer und wird in der Industrie häufig angewendet um Wasser-Erdspeicher oder andere grosse Kunststoffformen herzustellen. Die Produktion wird jedoch bei einer hohen Stückzahl nicht viel günstiger³⁵. Der eingesetzte Kunststoff hat keine hohe Festigkeit.

Eine weitere untersuchte Möglichkeit der Herstellung war das Blasformen. Hier wird ein vorgefertigter Rohling in einer Form erwärmt und danach durch Druck an diese gepresst.³⁶ Dieses Verfahren ist jedoch mit hohen Investitionen verbunden³⁷ und bedingt eine sorgfältige Planung des Herstellprozesses. Das Blasformen gibt dem Speicher noch keine hohe Stabilität, da in der Regel Thermoplaste eingesetzt werden. Bei druckbeaufschlagten Bauteilen wird daher das Bauteil oft noch in einem Wickelverfahren mechanisch verstärkt.³⁸

Die Installation des Speichers ist mit allen drei Fertigungsverfahren relativ einfach, da der Speicher bereits bis zu einem hohen Grad fertigmontiert geliefert werden kann. Durch die Bauweise aus Kunststoff ist der Speicher leicht und kann auch einfach als Cluster aufgestellt werden. Die Wärmedämmung kann aus vorgefertigten Elementen an den Speicher montiert werden.

Die Lebensdauer von Kunststoffspeichern ist im Allgemeinen gut. Bei Einsatz eines geeigneten Kunststoffes ist mit einer hohen Lebensdauer zu rechnen. Das wesentliche Problem der Kunststoffe ist ihre Wärmebeständigkeit. Normale Thermoplaste ohne Zusätze von verstärkenden Elementen fangen ab ca. 60 °C an, weich zu werden bzw. zu kriechen.

³³ Die Sandwichbauweise ermöglicht das Einfügen einer Wärmedämmung in der Mitte von zwei Lagen. Die eingefügte Wärmedämmung hat zusätzlich stabilisierende Effekte auf den Verbund.

³⁴ Dorn mit ausfahrbaren Elementen für die Sicken.

³⁵ Gemäss Rotomold-Hersteller 1 (CH) bei 10 Stk.: 1'550 CHF/Stk.; 100 Stk.: 1'340 CHF/Stk., zusätzlich Kosten der Form einmalig 70'000 CHF

³⁶ Das bekannteste Produkt welches in Blasformen hergestellt wird sind PET-Flaschen.

³⁷ Nach Speicherhersteller 1 (DE) kostet eine Blasform für unser Projekt geschätzt ca. 200'000 CHF.

³⁸ Kosten für Blasform und Filament Winding nach Speicherhersteller 1 (DE) zusammen für Druckspeicher ca. 350'000 CHF.

Kosten

Die Kosten sind je nach Herstellungsverfahren sehr unterschiedlich und ändern sich zudem bei einer Serienfertigung stark. Das Laminatwickelverfahren (GFK) ist bei geringen Stückzahlen voraussichtlich das günstigste.

Table 13: Preise ausgewählter Kunststoff Speicher aus GFK³⁹ und aus Rotomold Produktion.

Hersteller	Ausführung	Form [-]	max. Innendruck [bar]	Volumen [L]	Preis ⁴⁰ [CHF]	Preis [CHF/ 1'000 L]
Hersteller A 100 Stk.	Kunststoff, unverstärkt "Rotomold"	□	0	1'400	1'340	960
Hersteller B 4000 Stk.	GFK, zylindrisch Sandwich	○	0	1'900	1'960 ⁴¹	1'030
Hersteller C 4000 Stk.	GFK, quaderförmig Sandwich,	○	4	950	830 ⁴²	870
Hersteller D 4000 Stk.	GFK, zylindrisch Sandwich,	○	4.5	950	2'280	2'400
	GFK, quaderförmig	○	4.5	970	3'350	3'460

Bei höheren Stückzahlen könnte eine Herstellung mittels Blasformen die Prozesszeit stark verringern, was den Speicherpreis dementsprechend auch sinken lassen würde. Da die Prozesszeit bei der thermischen Formgebung insbesondere durch die Auskühlzeit bestimmt wird, ist dies ebenfalls ein wesentlicher Kostentreiber.

Ein Blasformprozess mit Inliner und nachgeschaltetem Wickelverfahren zu automatisieren, ist schwierig und bedingt viel Erfahrung. Die Kosten für die Automatisierung eines solchen Prozesses sind sehr hoch. Wenn der Prozess gut läuft, kann bei entsprechendem Design mit kurzen Zykluszeiten gerechnet werden und folglich mit günstigen Preisen.

Fazit zu Kunststoffspeichern mit Verstärkungssicken

Für alle beschriebenen Herstellungsverfahren ist für eckige Speicher mit integrierten Sicken mit erhöhten Investitionskosten zu rechnen. Für eine Umsetzung in diesem Projekt könnte höchstens das GFK-Wickelverfahren in Betracht gezogen werden, da sich damit relativ einfach und kostengünstig ein Prototyp herstellen lässt.

³⁹ Glasfaserverstärkter Kunststoff

⁴⁰ Falls nicht anders gekennzeichnet: Offerten/Richtpreise der einzelnen Hersteller ohne Dämmung

⁴¹ Inkl. Chemieschutz, Laminat, Wärmedämmung 20 mm, Mantel mit Coating, Flachdeckel, Schrauben, Stützen, Schichtladelanze

⁴² Inkl. Armaturen, PU-Schaum-Dämmung, „Verschließung/Verpackung“ des PU-Schaumes (ggf. durch zwei Halbschalen, ggf. thermoplastisch, ggf. durch Stoff mit "Reisverschluss")

Die quadratische Grundform hat ohne Rahmen und Sicken gegenüber runden drucklosen Speichern eine höhere Raumausnutzung. Die Sicken oder bereits ein verstärkender Rahmen machen diesen Vorteil grösstenteils zunichte.

Variante 3: Rohrspeicher liegend

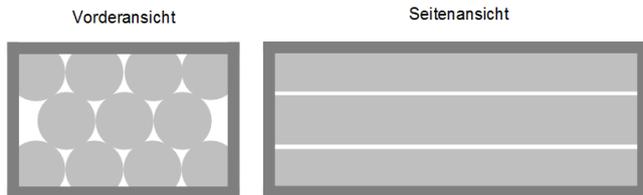


Abbildung 35: Rohrspeicher liegend. Speichervariante bestehend aus liegenden Rohren.

Die Lösung sieht extrudierte Kunststoffrohre vor, welche horizontal gestapelt zu einer Speicher-Batterie zusammengeslossen werden können. Auch diese Variante kann durch die diversen Längen der Rohre eine adaptive Bauweise garantieren und somit viele Bedürfnisse decken. Da Rohre im Allgemeinen druckstabil sind, kann das System druckbeaufschlagt ausgeführt werden.

Bei diesem Speichertyp befinden sich alle Anschlüsse auf derselben Seite um die Montage und Wartung einfach zu halten.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Drucksicherheit einfach realisierbar • Länge, Höhe und somit Volumen des Speichers einfach variierbar • Einfacher Bezug von Material (Produktion wird ausgelagert) • günstige Massenware 	<ul style="list-style-type: none"> • Freiraum zwischen Rohren (keine optimale Platzausnutzung) • Schichtung innerhalb eines Speicherrohres nahezu unmöglich (dafür Schichtung zwischen den Rohren) • Viele Anschlüsse und Verschaltungen nötig (von Rohr zu Rohr) • Externe Fixierung zur Stabilisierung • Hoher Installationsaufwand • Hohes Wand-zu-Volumen-Verhältnis (Wärmeverluste eher hoch)

Raumausnutzung

Die Raumausnutzung dieser Variante ist immer kleiner im Vergleich zu einem einzelnen Rohr.⁴³

Herstellung & Installation

Die Variante hat den Vorteil, dass auf Massenware zurückgegriffen werden kann. Ein Nachteil ist, dass die Rohre mit vielen Fittings und Rohrbögen verbunden werden müssen. Qualitativ hochwertige Fittings sind dabei teuer. Die Skalierbarkeit und die einfache Montage machen das System wiederum sehr interessant.

⁴³ Dies liegt zum einen an der Verteilung sowie am hohen Wand-zu Volumen-Verhältnis. E. Specht; Uni Magdeburg; www.packomania.com

Für diese Variante ist eine hohe Lebensdauer zu erwarten. Die Kunststoffe haben keine Anfälligkeit gegen Rost, und es gibt bereits Rohre welche erfolgreich bei diesen Temperaturen eingesetzt werden.

Kosten

Die Kosten für die Rohre selbst sind tatsächlich gering. Ein HDPE Rohr mit 800 mm Durchmesser kostet lediglich 120 CHF/m. Die wesentlichen Kosten für die Variante entstehen durch die Rohrabschlüsse welche mit 1'500 CHF pro Stück zu Buche schlagen. Dies liegt daran, dass dies im Allgemeinen teure Spezialteile sind. Eine Endkappe für ein HDPE Rohr mit 400 mm Durchmesser kostet immer noch 420 CHF pro Endkappe⁴⁴. Zudem erhöhen Rohrbögen und Fittings den Gesamtpreis des Speichers zusätzlich.

Fazit

Diese Variante basiert zum grossen Teil auf sehr günstigen Rohren. Die teuren Anschlusssteile müssten durch günstig herzustellende Teile ersetzt werden (z.B. Spritzguss und dann verschweissen), damit sich diese Variante preislich lohnen würde. Falls preislich eine günstige Lösung möglich wäre, könnten individuell an den Aufstellort anpassbare Speicher gebaut werden. Die Rohre könnten vor Ort (z.B. mit Spanngurten) zu einem Speichercluster montiert und mit steckbaren Fittings verbunden werden. Es müsste dann aber noch aufgezeigt werden, dass eine ausreichend gute thermische Schichtung des Speicherwassers erreicht werden kann. Um diese Variante umzusetzen, bräuchte es viel Entwicklungsarbeit. Zudem ist nicht sicher, ob die Akzeptanz am Markt gegeben wäre. Die spezielle Montage und Form der Lösung braucht wahrscheinlich eine Schulung der Monteure, was die Akzeptanz am Markt möglicherweise verringert.

Variante 4: Quaderförmiger Edelstahl-speicher mit seitlichen Anschlüssen, drucklos

Variante 4 beschreibt einen quaderförmigen Edelstahlspeicher mit Sicken oder Rahmen als Verstärkung. Edelstahl ist ein am Markt bekanntes und bewährtes Material. Es besitzt eine hohe Festigkeit, was wiederum eine Konstruktion mit dünnem Blech ermöglichen kann. Um eine genügend hohe Stabilität bei quadratischer Bauweise zu erreichen, muss der Speicher entweder mit Sicken oder durch einen externen Rahmen zusätzlich versteift werden.



Abbildung 36: Edelstahlspeicher mit seitlichen Anschlüssen, ähnlich wie Variante 2.

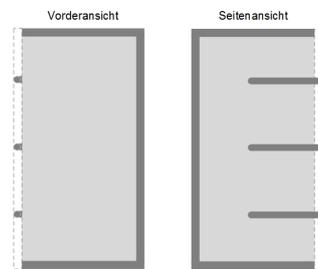


Abbildung 37: Edelstahlspeicher mit seitlichen Anschlüssen, mit Stützrahmen, ohne Sicken.

⁴⁴ Offerte von Pumpen Lechner vom 02.05.2017

Vorteile	Nachteile				
<ul style="list-style-type: none"> • Ein dünnwandiger Edelstahlbehälter ist leichter als ein Schwarzstahlbehälter gleicher Grösse • Temperaturbeständigkeit ist gewährleistet • Kaum Korrosionsgefahr (Vertrauen in der Branche in das Material)⁴⁵ • Anschlüsse, Fittings & Einsätze anschweisbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Stabilität bei dünnen Wänden • Stützrahmen oder Vorbeulen notwendig • Materialkosten eher hoch • Eher hohes Gewicht (Transport durch mehreren Personen notwendig) • Verarbeitung (Schweissen) dünnwandiger Bleche ist teuer 				
Speicherdetails	Raumausnutzung ⁴⁶				
<ul style="list-style-type: none"> • Masse [m]: 0.756x0.756x2.0 • Speichervolumen [l]: 1000 • Dämmdicke [mm]: 100 • Gewicht [kg] 120 • Rohrführung: vorne 	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">Einzelspeicher</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">Speicher-Cluster</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"> <p>44 %</p>  </td> <td style="text-align: center;"> <p>56 %</p>  </td> </tr> </tbody> </table> <p>Abbildung 38: Raumausnutzung des Speichers:⁴⁷ Blau = Nutzvolumen; Gelb = Anschlüsse; Rahmen und Siphonierung; Grün = Wärmedämmung</p>	Einzelspeicher	Speicher-Cluster	<p>44 %</p> 	<p>56 %</p> 
Einzelspeicher	Speicher-Cluster				
<p>44 %</p> 	<p>56 %</p> 				

Herstellung & Installation

Die Herstellung eines quaderförmigen Speichers aus Edelstahl ist relativ einfach und kann mit modernen Methoden bei genügend hohen Stückzahlen auch vollautomatisiert erfolgen. Die Installation des Speichers ist, ähnlich wie bei den normalen Speichern, eher aufwendig. Die Speicher sind schwer, wenn das Edelstahlblech der Speicherwände den hydrostatischen Druck des Speicherwassers aufnehmen soll und dann mit entsprechender Wandstärke ausgeführt werden muss. Wird dünnes, leichteres Blech verwendet, muss der Speicher aus statischen Gründen einen zusätzlichen Rahmen haben. Dieser benötigt zusätzliche Zeit zur Installation. Der Vorteil daran ist, dass die Verrohrungen, welche oft an einem zusätzlichen Rahmen angemacht werden, gleich an diesem befestigt werden können. Eine korrekte Installation des Edelstahlspeichers ist sehr wichtig für seine Lebensdauer. Es muss auf die Wasserhärte, die verwendeten Materialien der Armaturen und auf die galvanische Trennung der Einbauten geachtet werden.

⁴⁵ Bei normalen Wasserhärten und der korrekten Umsetzung von Anschlüssen und Einbauten. Es ist empfehlenswert eine Fremdstromanode anzuschliessen.

⁴⁶ Folgend wird nur die Raumausnutzung des Speichers mit Stützrahmen beschrieben. Die Raumausnutzung des Speichers mit Sicken ist gleich wie bei Variante 2

⁴⁷ Darstellung des Horizontalschnitts eines einzelnen Speichers und eines Speicher-Clusters

Kosten

Damit die Vorteile von Edelstahl voll zum Tragen kommen, muss der Speicher mit sehr dünnen Edelstahlblechen produziert werden. Das Dichtschweissen von dünnen Edelstahlblechen ist wiederum schwierig umzusetzen. Dies verteuert den Edelstahlspeicher gegenüber den normalen Stahlspeichern deutlich. Um einen günstigen Edelstahlspeicher zu fertigen, müssen die Sicken weggelassen werden und ein externer Rahmen verwendet werden. Dies bedeutet dann aber bei der Montage wiederum mehr Aufwand.

Tabelle 14: Preise von Edelstahlspeichern, mit und ohne Sicken. Alle Preisfragen basieren auf einer Stückzahl von 4'000 Speichern, ohne Wärmedämmung.

Hersteller/Produzent	Ausführung	Form [-]	Druck [bar]	Volumen [L]	Preis ⁴⁸ [CHF]	Spez. Preis [CHF/m ³]
Offerte Anlagenbauer 1 (CH) Edelstahl, 2mm mit Sicken und Rahmen	Edelstahlbehälter	□	0	1200	2'700 ⁴⁹	2'250
Offerte Anlagenbauer 2, (CH) Edelstahl, 1mm, ohne Sicken, zusätzlicher Rahmen notwendig	Edelstahlbehälter	□	0	1090	1'360	1'250
Offerte Anlagenbauer 2, (CH) Edelstahl, 2mm, vorgebeult, oder mit Stabilisierung	Edelstahlbehälter	□	0	1000	2'050	2'050

Durch die eingeholten Offerten wird ersichtlich, dass der Speicher mit Sicken oder vorgebeultem Edelstahl wesentlich teurer ist als ein üblicher Schwarzstahlspeicher. Preislich interessanter ist der Edelstahlspeicher mit 1 mm Edelstahlblech. Dieser braucht jedoch einen zusätzlichen Rahmen. Im Vergleich mit Variante 6 (Standardspeicher) ist schnell ersichtlich, dass der Preisunterschied zu gross ist, als dass die höhere Raumausnutzung und die Montage diese Differenz wieder ausgleichen könnten.

Fazit

Diese Variante wird durch die Komplexität in der Herstellung teurer sein als ein Standardstahlspeicher. Die Vorteile des Speichers rechtfertigen den Preisunterschied nicht. Deshalb wird diese Variante nicht weiterverfolgt.

⁴⁸ Falls nicht anders gekennzeichnet: Offerten/Richtpreise der einzelnen Hersteller ohne Wärmedämmung

⁴⁹ Mündliche Offerte für Speicher inkl. Stützrahmen im unteren Drittel

Variante 5: Zylindrischer GFK-Speicher



Abbildung 39: GFK-Speicher zylindrisch

Variante 5 beschreibt einen Speicher aus glasfaser-verstärktem Kunststoff (GFK), welcher im Wickelverfahren hergestellt wird. Dieser ist zylindrisch und kann je nach Ausführung der Wandstärke mit Innendruck beaufschlagt werden. Die Druckbeständigkeit kann aber Restriktionen bei den Anschlüssen sowie eine wesentliche Zunahme der Komplexität in der Fertigung bedeuten.

Der Speicher wird optimal als gesamtes Bauteil gewickelt (inkl. Boden und Deckel). Dies ermöglicht dann einen einfachen Zusammenbau.

Vorteile		Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturbeständiger als Thermoplast • Geringes Gewicht • Keine Korrosion • Lebensmittelechtheit kann erreicht werden • Günstige Herstellung 		<ul style="list-style-type: none"> • Anschlüsse und Einbauten müssen bereits bei der Produktion beachtet werden • Materialmischungen sind technisch herausfordernd: Anschlüsse aus Stahl, Speicherhülle aus Kunststoff 	
Speicherdetails		Raumausnutzung	
<ul style="list-style-type: none"> • Masse [m]: • Speichervolumen [l]: • Dämmdicke [mm]: • Gewicht [kg] • Rohrführung 	<p>Ø 0.78 x 2.1</p> <p>1050</p> <p>100</p> <p>80</p> <p>vorne</p>	<p>Einzelspeicher</p> <p>48 %</p>	<p>Speicher-Cluster</p> <p>56 %</p>
		<p>Abbildung 40: Raumausnutzung des Speichers ⁵⁰ Blau = Nutzvolumen; Gelb = Anschlüsse und Siphonierung; Grün = Wärmedämmung</p>	

Herstellung & Installation

Die Herstellung wird im Wickelverfahren gemacht. Es gibt bereits einige Firmen, welche sich auf das Wickeln solcher Speicher spezialisiert haben. Diese sind aber meistens für kaltes Wasser in verschiedener Qualität ausgelegt. Die Tanks werden dann im Erdboden vergraben. Das Material ist in dieser Anwendung sehr dauerhaft, da es nicht mit dem Boden chemisch

⁵⁰ Darstellung des Horizontalschnitts eines einzelnen Speichers und eines Speicher-Clusters

interagiert und auch nicht rostet. Es gibt auch Spezialobjekte, bei denen die Speicher als Warmwasserspeicher genutzt werden. Die Speicher sind meistens wesentlich grösser als 1 m³ und werden dann vor Ort zusammgebaut. Die einzelnen Speichersegmente sind turgänglich und relativ leicht zu transportieren, was die Installation vereinfacht.

Kosten

Die Kosten für einen im Wickelverfahren hergestellten Speicher sind sehr unterschiedlich. Sie sind im allgemeinen jedoch günstiger als die anderen untersuchten Varianten. In der Tabelle unten sind Preise für GFK-Speicher aus unterschiedlichen Offerten aufgeführt.

Tabelle 15: Preise von GFK-Speichern bei einer Stückzahl von 4'000 Einheiten.

Hersteller	Ausführung	Form [-]	Druck [bar]	Volumen [l]	Preis ⁵¹ [CHF]	Spez. Preis [CHF/m ³]
Hersteller E	GFK,	○	4.5	960	1'020	1'060
Hersteller F	GFK, rund	○	4	950	830 ⁵²	870
Hersteller G	GFK, rund	○	-	1'900	1'960 ⁵³	1'030
Hersteller H	GFK, rund	○	4.5	970	3'350	3'450

Die Übersicht in Tabelle 14 für glasfaserverstärkte Kunststoffspeicher zeigt eine grosse Preisspanne. Einige Hersteller bieten vergleichsweise günstige GFK-Speicher an, sowohl für die Serienfertigung als auch für einzelne Prototypen. Die günstigsten Offerten orientieren sich zwischen 800 und 1'200 CHF für einen kompletten Tank mit einer Zwischenlage aus PU-Schaum und allen benötigten Anschlüssen.

Fazit

Wenn die Speicher nicht druckbeaufschlagt werden, können sie mit flachem Deckel und Boden produziert werden. Dies bringt eine etwas verbesserte Volumenausnutzung mit sich im Vergleich zu runden Abschlüssen. Jedoch muss dann beachtet werden, dass externe Kosten anfallen für Wärmetauscher, um druckbeaufschlagte Systeme (z.B. die Solaranlage) in den Speicher einbinden zu können.

Interessanterweise lassen sich Speicher mit runden Abschlüssen zu ähnlichen Kosten herstellen wie solche mit flachen Abschlüssen. Die runden Speicher haben dann durch die geänderte Form etwas weniger Speichervolumen.

⁵¹ Falls nicht anders gekennzeichnet: Offerten/Richtpreise der einzelnen Hersteller ohne Wärmedämmung

⁵² Inkl. Armaturen, PU-Schaum-Dämmung, „Verschliessung/Verpackung“ des PU-Schaumes (ggf. durch zwei Halbschalen, ggf. thermoplastisch, ggf. durch Stoff mit Reissverschluss)

⁵³ Inkl. 3x Festflansch DN50, 6 Muffen ½ " für Temperaturfühler und 2 cm PUR-Isolation, 1x Schichtladelanze, Mannloch mit Dichtung und Schrauben.

4.4.2 Referenz

Vergleichsspeicher: Stahlspeicher rund, bedruckt



Abbildung 41: herkömmlicher Stahlspeicher zylindrisch

Als Vergleich dient ein handelsüblicher Speicher aus Stahl, welcher mit Druck beaufschlagt werden kann.⁵⁴ Bestehend aus Stahl S235JR, innen roh⁵⁵, auf einem Standring stehend und mit einem Betriebsdruck von 3 bar (Prüfdruck 4.5 bar).

Vorteile		Nachteile	
<ul style="list-style-type: none"> • System bedruckt (direkte Anschlüsse an Speicher möglich) • Temperaturbeständigkeit ist gewährleistet • Akzeptanz am Markt • Anschlüsse, Fittings & Einsätze in der Produktion anschweisbar 		<ul style="list-style-type: none"> • Installationsaufwand relativ hoch. • Hohes Gewicht (Transport durch mehreren Personen notwendig) • Raumausnutzung vergleichsweise niedrig • Korrosion kann auftreten 	
Speicherdetails		Raumausnutzung	
<ul style="list-style-type: none"> • Masse [m]: • Speichervolumen [l]: • Dämmdicke [mm]: • Gewicht [kg]: • Rohrführung • Höhe Klöpperboden [mm]: 	<p>Ø 0.78 x 2.1</p> <p>953</p> <p>100</p> <p>160</p> <p>vorne</p> <p>150</p>	<p>44 %</p> <p>49 %</p>	<p>Abbildung 42: Raumausnutzung des Speichers⁵⁶</p> <p>Blau = Nutzvolumen</p> <p>Gelb = Anschlüsse und Siphonierung</p> <p>Grün = Wärmedämmung</p>

⁵⁴ Es wird hier beispielhaft der Standard-Speicher UES21079 von Jenni Energietechnik als Referenz verwendet.

⁵⁵ Nicht emaillierte Stahlspeicher (Roh) brauchen ein Frischwassermodul um als Trinkwasserspeicher verwendet werden zu können.

⁵⁶ Darstellung des Horizontalschnitts eines einzelnen Speichers und eines Speicher-Clusters

Herstellung & Installation

Die herkömmlichen Stahlspeicher sind marktüblich und werden in diversen Ausführungen bzgl. Grösse und Einbauten hergestellt. Die Herstellung ist relativ einfach, da die Umform- und Fügetechnik gut etabliert ist. Die Materialbeschaffung ist sehr simpel und das Material kann einfach an Sonderwünsche etc. angepasst werden, ist aber trotzdem günstig. Zudem hat es eine hohe Festigkeit, kann also auch in druckbeaufschlagten Systemen eingesetzt werden. Ein Nachteil ist die mögliche Rostbildung der Speicherinnenwand, welche bei sauerstoffreichem Wasser zu Verschlammung und Korrosionsschäden führen kann. Zudem ist die Installation von grösseren Speichern ein Problem, da das Gewicht sehr hoch ist und je nach Türbreite die Speicher vor Ort geschweisst werden müssen.

Kosten

Die Kosten für einen simplen Pufferspeicher belaufen sich auf 1'750 CHF für 1'000 Liter mit Wärmedämmung.⁵⁷

Typ	Inhalt [l]	Inhalt [kWh]	Ø [mm]	Höhe [mm]	Kippmass [mm]	Gewicht [kg]	Dimension VL/RL	Elektro-einsatz bis max. kW	Preis	Isolation mit Kunststoffmantel 130 mm < 2000 l > 160 mm	
										Glaswolle Material lose	Schaumstoff Material lose
UES21079	970	68	790	2100	2200	160	5/4"	max. 6	860.-	640.-	890.-

Abbildung 43: Auszug aus dem Preiskatalog von Jenni Energietechnik.⁵⁸ Universal Energiespeicher ohne Wärmetauscher / Boiler

Fazit

Stahlspeicher, die im Projekt als Referenz betrachtet werden, sind seit langen weit verbreitet und akzeptiert. Diese sind günstig und können mit einfachen Mitteln hergestellt und an Sonderwünsche angepasst werden. Nachteile haben die Stahlspeicher vor allem bei unzugänglichen Orten. Durch das erhöhte Gewicht können sie nicht einfach in den Keller getragen werden. Zudem sind bei Altbauten die Türen oft schmaler als die Norm heutzutage vorschreibt. Hier werden die Speicher schnell deutlich teurer, da eine Platzschweissung nötig ist oder die Türen verbreitert werden müssen.

⁵⁷ Die Preise variieren je nach Hersteller zwischen 1'750 und 2'100 CHF (Preislisten von drei verschiedenen Herstellern)

⁵⁸ Heruntergeladen am 14.11.2019 von http://jenni.ch/files/jenni/inhalte/pdf/Produkte/Preise_SpeicherUES.pdf

4.4.3 Abschluss des Vergleichs von Speicherkonzepten

Die nachstehende Tabelle zeigt eine Übersicht der im Kapitel 4.4.1 vorgestellten Varianten und des Referenzspeichers aus Kapitel 4.4.2.

Um die verschiedenen Varianten genauer auf ihre Stabilität zu überprüfen, wurden sie auf ihre Druckstabilität und der Kunststoffspeicher mit rückversetzten Sicken auf Kriechen im Material bei erhöhten Temperaturen untersucht.

Tabelle 16: Vergleich der verschiedenen Varianten.

Variante	Material der Speicherwand	Herstellungsverfahren	Produktion	Stabilität	Gewicht kg	Lebensdauer	Preis pro 1000 L ⁵⁹
Var. 1: Extrudierter Kunststoffspeicher	Thermoplast	Extrusion	Handling der Kühlstrecke und Kalibrierung sehr schwierig	Temperaturstabilität gering (Thermoplast)	50 ⁶⁰	Chemische Stabilität ++ Festigkeit - Transportfestigkeit +	>2'000
Var. 2: Kunststoffspeicher mit Sicken	Thermoplast	Extrusions-Blasformen	Investitionskosten hoch, komplexe Fertigung	Temperaturstabilität gering (Thermoplast)	80	Chemische Stabilität ++ Festigkeit - Transportfestigkeit +	ca. 2'000
	Thermoplast, HDPE	RotoMolding	Einfache Produktion, komplexe Formen möglich, lange Zykluszeiten		100	Chemische Stabilität ++ Festigkeit - Transportfestigkeit -	< 1'000
	GFK Mantel mit Schaumkern	Wickelfverfahren	Bei komplexen Formen schwierig wegen des Dorns und dem Abziehen von diesem	Gut, abhängig von der Laminatfaser und des Laminataufbau	80	Chemische Stabilität ++ Festigkeit ++ Transportfestigkeit +	ca. 1'000

⁵⁹ exkl. Wärmedämmung

⁶⁰ Das hier aufgeführte Gewicht ist lediglich das Gewicht des schwersten Stück des Speichers beim Transport.

Kapitel 4 – Modularer Speicher

Var. 3: Rohrspeicher liegend	Thermoplast ⁶¹	Rohrextrusion	Rohrextrusionen ist Standard, viele Fittings benötigt	Gut, je nach Rohrmaterial unterschiedlich	39 ⁶⁰	Chemische Stabilität ++ Festigkeit - Transportfestigkeit ++	>> 2'000
Var. 4: Edelstahlspeicher	Edelstahl	Schweissen	Machbar jedoch teuer (Dichtschweissen bei dünnwandigem Material sehr kritisch)	Gut, Materialstärke und Verstärkungen haben einen grossen Einfluss	120	Chemische Stabilität + Festigkeit - Transportfestigkeit +	ca. 2'000
Var. 5 Runder GFK-Speicher	GFK	Wickeln	Etablierter, gut automatisierbarer Prozess, günstig	Gut, abhängig von der Laminatfaser und des Laminataufbau	80	Chemische Stabilität ++ Festigkeit ++ Transportfestigkeit -	< 1'000
Referenz: Zylindrischer Stahlspeicher	Stahl roh	Schweissen	Etabliert, einfach, günstig	Sehr gut bei runden Formen	>150	Chemische Stabilität - Festigkeit ++ Transportfestigkeit ++	<1'000

⁶¹ Meistens wird den Kunststoffrohren welche in Warmwassersystemen zum Einsatz kommen eine Lage verstärkendes Gewebe eingesetzt (ähnlich Glasfaser).

Kostenvergleich

Die Kosten der Varianten werden in einem ersten Schritt mit den Kosten für den Referenzspeicher verglichen werden. Da der Referenzspeicher ein Pufferspeicher ist, wird bei allen Systemen die Speicherhülle⁶² inklusive Wärmedämmung miteinander verglichen. Der Preis für den Referenzspeicher mit Wärmedämmung beträgt 1'750 CHF. Wenn man diesem Betrag 375 CHF für die Wärmedämmung⁶³ abzieht, sollte die Speicherhülle alleine einen Preis von 1'375 CHF nicht überschreiten. Optimal wäre es, den gleichen Preis wie der Stahlspeicher (860 CHF) zu erreichen. Wie in Tabelle 15 zu sehen ist, schränkt bereits ein Preis von 1'375 CHF die Auswahl der Fertigungsvarianten stark ein. Lediglich die GFK-Varianten, rund sowie monolithisch (Var. 5), und der HDPE-Rotomold-Speicher mit Sicken (Var. 2) würden noch in Frage kommen.

Bei Verwendung eines leichten, türgängigen 1000 L-Speicher, ergeben sich bei der Installation Kosteneinsparungen. Der Speicher soll durch eine einfache Herstellung und durch simple Schichtungseinrichtungen für möglichst viele Speicheranwendungen verwendet werden können. Anspruch soll dabei sein, dass der Speicher als Pufferspeicher sowie als Kombispeicher nicht wesentlich teurer ist als ein vergleichbarer Stahlspeicher. Durch das geringe Gewicht kann er jedoch schneller installiert werden.

Raumausnutzung

Die Raumausnutzung der Speichervarianten ist in der folgenden Tabelle verglichen.

Tabelle 17: Übersicht über die Raumausnutzung der verschiedenen Lösungsansätze.

Variante	Raumausnutzung Einzelspeicher	Raumausnutzung Speicher-Cluster
	%	%
Variante1 Quaderförmig, ohne Rahmen	53	61
Variante2 Quaderförmig, mit Sicken	42	49
Variante3 Rohrspeicher liegend	44	49
Variante4 Quaderförmig mit Rahmen	48	56
Variante5 Zylindrisch, drucklos	48	56
Referenz Zylindrisch, druckbeaufschlagt	44	49

Aus den jeweiligen Berechnungen zur Raumausnutzung der verschiedenen Varianten inklusive Dämmung und Rohrführung/Siphonierung, kann folgendes geschlossen werden:

⁶² Speicher ohne Einbauten

⁶³ Preis plus zusätzlich 50 % Marge, Offerte vom 6. September 2016 von Wärmedämmhersteller (CH), 120 mm Dicke für 1000 L Speicher

- Zylindrische Speicher mit gewölbtem Deckel können durch das kleinere Kippmass, dass sich durch die Wölbung ergibt, höher konstruiert werden. Dies verringert den Unterschied in der Raumausnutzung gegenüber quaderförmigen Speichern um 2%.
- Quaderförmige Bauformen mit Sicken ergeben keine verbesserte Raumausnutzung gegenüber runden Ausführungen.
- Nachträgliche Isolierung (Speicher-Cluster) ermöglicht eine bessere Raumausnutzung gegenüber der Isolierung jedes einzelnen Speichers.
- Der Unterschied zwischen druckbeaufschlagten und drucklosen Systemen (rund) liegt bei ca. 6 % Raumausnutzungsverlust (Cluster) mit Vorteil bei den drucklosen Systemen. Dies ist eine Folge der Form der Speicher. Drucklose Speicher können mit flachem Boden und Deckel ausgeführt werden. Druckbeaufschlagte Systeme brauchen einen dem Druck angepassten gewölbten Boden/Deckel (Klöpferboden).
- Die Verbesserung der Raumausnutzung von quaderförmigen Speichern gegenüber den runden beläuft sich auf lediglich 2-3 % (bei drucklosen Systemen). Auf Grund der zusätzlich benötigten Verstärkungssicken fällt der Unterschied nicht höher aus.

Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich die Konsequenz, dass rein aus Sicht der Raumausnutzung die Bauformen GFK-Sandwich quaderförmig und zylindrische druckbeaufschlagte sowie drucklose Ausführungen weiter betrachtet werden sollten.

Festigkeit

Mit Hilfe des IWK wurden die verschiedenen Varianten mit Festigkeitssimulationen auf ihre Druckfestigkeit untersucht. Zudem wurde der quaderförmige Kunststoffspeicher mit Verstärkungssicken mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) auf Kriechen bei erhöhter Temperatur untersucht.

Bei der Speichergeometrie mit rückversetzten Anschlüssen und Sicken horizontal wie auch vertikal, ergaben CFD-Simulationen, dass bei einer thermischen Belastung bei 80°C über 10'000 h die maximale Deformation 115 mm (Abbildung 44) und die grösste positive Dehnung 9 % (Abbildung 45) beträgt. Letzteres überschreitet den maximal zulässigen Materialwert des Herstellers um 150 %.

Um die Formstabilität der anderen Geometrien abschätzen zu können, wurden diese ebenfalls simuliert. In Tabelle 17 sind die unterschiedlichen Speichervarianten unter hydrostatischen Belastung zu sehen. Anhand der maximalen Deformation an den Speicherhüllen kann eine Abschätzung gemacht werden, welche Kombination aus Material und Form am besten geeignet ist. In der Tabelle ist ersichtlich, dass bei quaderförmigen Speicherhüllen eine genügende Stabilität nur über verstärkende Massnahmen erreicht werden kann. Zudem zeigt die Simulation auf, dass die übliche zylindrische Form des Speichers wesentliche Vorteile in der Stabilität bringt. Die zylindrische GFK-Form hat bei den gleichen Druckbedingungen und einer halb so dicken Laminatschicht eine Deformation von lediglich 0.03 mm. Dies hat grosse Einflüsse auf das Gewicht des Speichers. Bei einer Laminatdicke von 3 mm hat das Speicherrohr lediglich ein Gewicht von 30 kg. Die quaderförmige GFK-Form weist eine Verformung von 10.5 mm auf und hat durch das dickere Laminat ein wesentlich höheres Gewicht.

Zudem ist auch ersichtlich, dass die GFK-Sandwich-Variante mit einer eingebetteten Isolationsschicht stabilisierend wirkt.

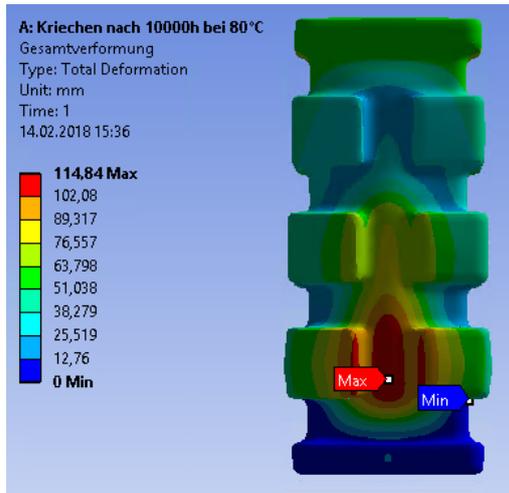


Abbildung 44: Ergebnisse der CFD-Simulation des quaderförmigen Kunststoffspeichers: Maximale Deformation in mm nach 10'000h bei 80°C

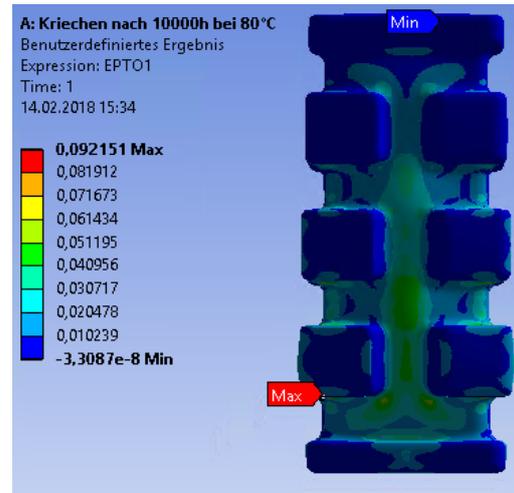
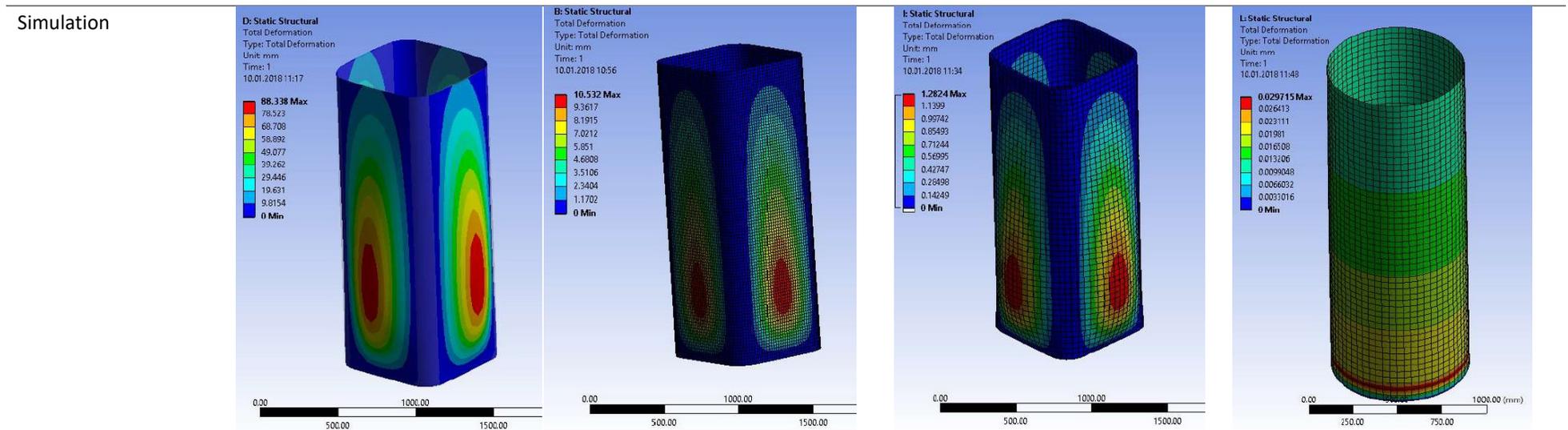


Abbildung 45: Ergebnisse der CFD-Simulation des quaderförmigen Kunststoffspeichers: Maximale relative Dehnung in mm/mm nach 10'000h bei 80°C.

Kapitel 4 – Modularer Speicher

Tabelle 18: Simulationsergebnisse für verschiedene Speichergeometrien. Maximale Deformation bei hydrostatischer Last.



Aufbau	Stahl, Quader	GFK, Quader	GFK-Sandwich, Quader	GFK, rund
max. Deformation (rote Bereiche in jeweiliger Abbildung) [mm]	88.4	10.5	1.3	0.03
Wandstärke [mm]	1.5	6	2+20+2	3
Volumen [L]	1220	1220	1100	960
Gewicht [kg]	68	68	52	30

Fazit

Quaderförmige Speicher führen nur zu einer marginal grösseren Raumausnutzung gegenüber zylindrischen und weisen deutliche materialtechnische Nachteile auf, wie die oben dargestellte Deformation und Dehnung. Deshalb wurden, anders als zu Beginn des Projekts vorgesehen, die Varianten der quaderförmigen Speicher nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurde die Variante eines GFK-Rundspeichers weiter ausgearbeitet.

Wegen des Vorteils, auf Wärmetauscher verzichten zu können (Ausnahme: Brauchwarmwasser), und der Problematik, dass bei Pumpen, welche an einen drucklosen Speicher gekoppelt sind, Kavitation entstehen kann, wurde entschieden, einen druckbeaufschlagten Speicher zu entwickeln.

Die Version des GFK-Rundspeichers bietet zudem die Chance eines günstigen und technisch einfachen Herstellungsprozesses. Die Möglichkeit, Prototypen zu günstigen Preisen zu realisieren, spielte bei der Auswahl ebenfalls eine Rolle, da das Speicherkonzept auch im Labor getestet werden sollte.

Um die Gewichtsvorteile des Speichers bei der Einbringung in den Heizungsraum beibehalten zu können, soll der Speicher ohne interne Wärmetauscher auskommen. Die runde Form des Speichers führt bei einer Clusterung zu ungenutzten Hohlräumen unterhalb der quaderförmig ausgelegten Isolation. Diese Hohlräume können genutzt werden, um bei gleichem Platzbedarf ein Frischwassermodul und allenfalls weitere externe Wärmetauscher installieren zu können. Die Verwendung eines Frischwassermoduls entschärft die Thematik der Lebensmittelechtheit des Kunststoffes bei hohen Temperaturen und bietet Vorteile bezüglich Legionellenprävention.

4.5 Prototyp eines runden GFK-Speichers

Es wurde entschieden, die Variante eines runden, aus GFK-Laminat gewickelten Speichers zu untersuchen. Bei ersten Abklärungen zur Produktion des Prototyps konnte kein Hersteller eine Variante anbieten, bei denen die Anschlüsse direkt auf entsprechenden Höhe angebracht waren. Deshalb wurde entschieden, eine Variante zu entwickeln, bei der ein Metallflansch in den Speicher geklebt wird, welcher die Anschlüsse beinhaltet. Dies hat den Vorteil, die Aussenhülle des Speichers als einfaches Massenteil herstellen zu können.

Damit eine Bauform vielfältige Einsatzmöglichkeiten haben kann und eine gute Marktakzeptanz erreicht werden kann (siehe auch die Optimierungskriterien in Tabelle 8), wurde der Speicher nicht allein als Warmwasserspeicher konzipiert, sondern als Kombispeicher.

4.5.1 Designuntersuchungen

Geschlossenes Wickeln mit nachträglichem Auftrennen

Der Speicher wird vollständig geodätisch gewickelt und danach aufgetrennt, um den Wickeldorn zu entfernen. Die Deckel werden so direkt mit dem Speicher gefertigt. Der abgetrennte Deckel wird dann mit einem Klebeflansch, welcher integrierte Speicheranschlüsse hat, mit dem Speicher verklebt.

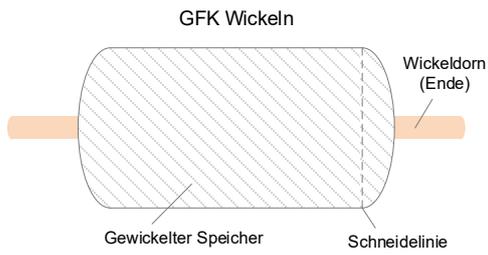


Abbildung 46: Geodätisches Wickeln auf Dorn

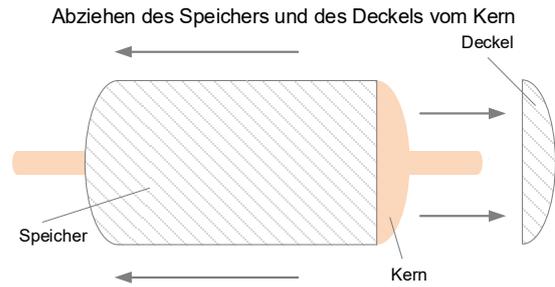


Abbildung 47: Abziehen des Speichers vom Dorn

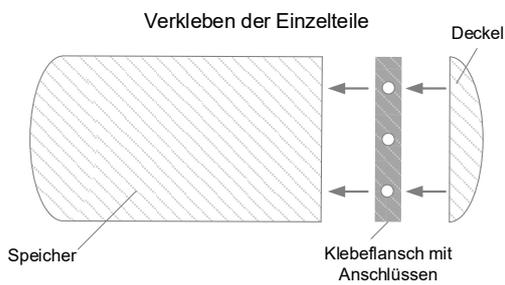


Abbildung 48: Verkleben der Einzelteile

Fertiger Speicher

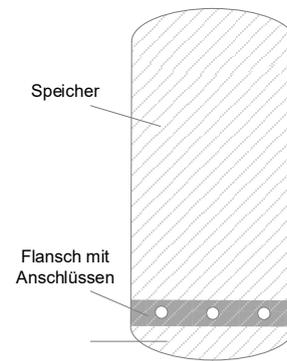


Abbildung 49: Fertiger Speicher

4.5.2 Labor-Prototyp

Da der erste Prototyp in Laborumgebung getestet und weiterentwickelt werden soll, wurde die Ausführung etwas modifiziert, um die Zugänglichkeit und somit die Adaption der Einbauten gewährleisten zu können. Es wurde entschieden, die Anschlüsse in den Deckel und den Boden einzufügen und diese Bauteile aus Edelstahl produzieren zu lassen. Im GFK-Rohr werden zwei Edelstahl-Flansche verklebt, welche mit Dichtungen versehen und mit dem Klöpperboden und -deckel verschraubt werden können.

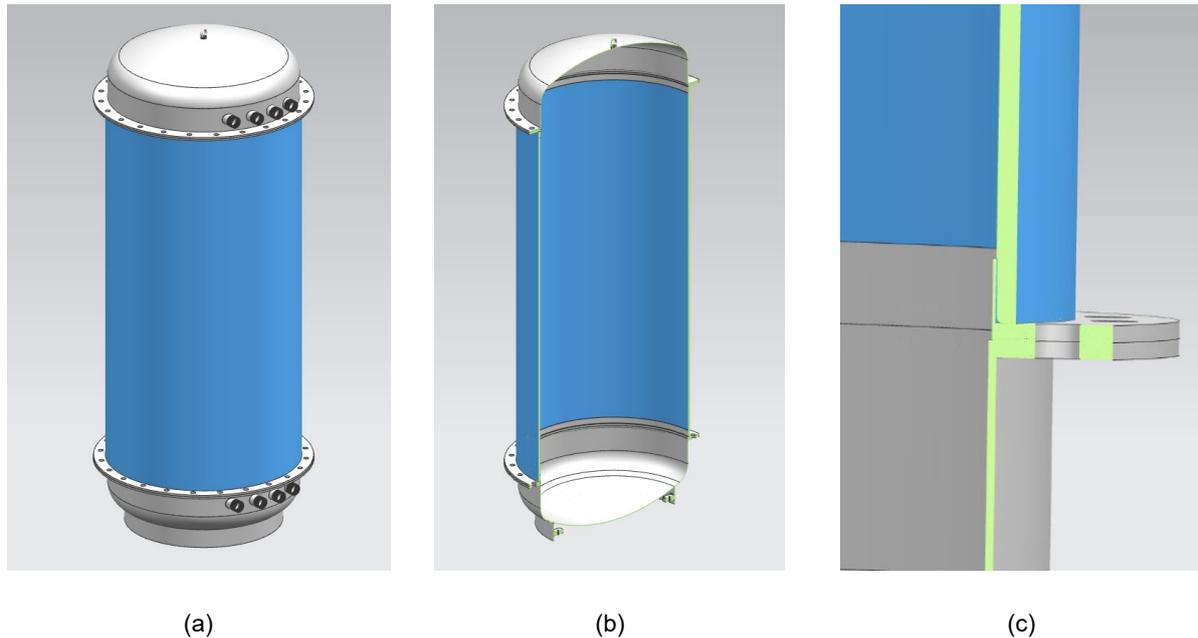


Abbildung 50: Zeichnungen des Prototyp-Speichers für den Laborversuch mit GFK-Mantel und Boden und Deckel aus Metall. (a) kompletter Speicher, (b) Schnitt, (c) Schnitt mit Klebefuge und Flansch. Darstellung ohne Schrauben in den Flanschen.

Technische Merkmale

In folgender Tabelle sind die Kenngrößen des Speichers zu sehen. Der Speicher hat ein Volumen von knapp 1'000 Litern und hält alle Kriterien aus dem Anforderungskatalog in Abschnitt 4.2 ein.

Tabelle 19: Technische Merkmale des Prototypen.

Höhe	[mm]	2160
Durchmesser	[mm]	790
Volumen	[L]	980
Oberfläche	[m ²]	5.92
Kippmass	[mm]	2200
Drainbackvolumen⁶⁴	[L]	0
MAG-Volumen	[L]	0-150
Gewicht	[kg]	100

⁶⁴ Es besteht die Möglichkeit, ein Drainbackvolumen direkt im Speicher zu integrieren. Die Speicherkapazität nimmt dann um das Drainbackvolumen ab.

Warmhalteverluste und Wärmedämmung

Bei einer Serienproduktion würde sich eine EPS-Dämmung⁶⁵ für den Speicher anbieten. Diese werden in Halbschalen vorgefertigt und können dann einfach an den Speicher geschoben und fixiert werden. Dies reduziert die Montagezeit des Speichers und hilft somit die Kosten zu senken. Da die Kosten für eine EPS-Form nicht unbedeutend sind⁶⁶, wurde eine konventionelle Wärmedämmung aus Melaminharzschäum vorgezogen. Mit entsprechender Dicke können gleich gute Dämmwerte erzielt werden.

Die Verordnung EN 12897 beschreibt die Energieeffizienzklassen A-D der Warmwasserspeicher.⁶⁷ Die maximal zulässigen Verluste S in Watt (W) eines Wärmespeichers mit Energieeffizienzklasse B (mit Volumen V in Litern) wird mit folgender Formel berechnet:

$$8.5 + 4.25 \cdot V^{0.4} \leq S < 12 + 5.93 \cdot V^{0.4} \text{ [W]}$$

Somit darf der Labor-Prototyp mit 980 Litern Volumen einen Warmhalteverlust zwischen 75 W und 105 W aufweisen. Mit einer Wärmedämmung aus Melaminharzschäum und einer Wärmeleitfähigkeit von 0.035 W/(m*K), bedeutet dies einen UA-Wert kleiner 2 W/K zu erreichen. Dies erfordert eine minimale Dicke von 120 mm für den Mantel und 150 mm für den Deckel.

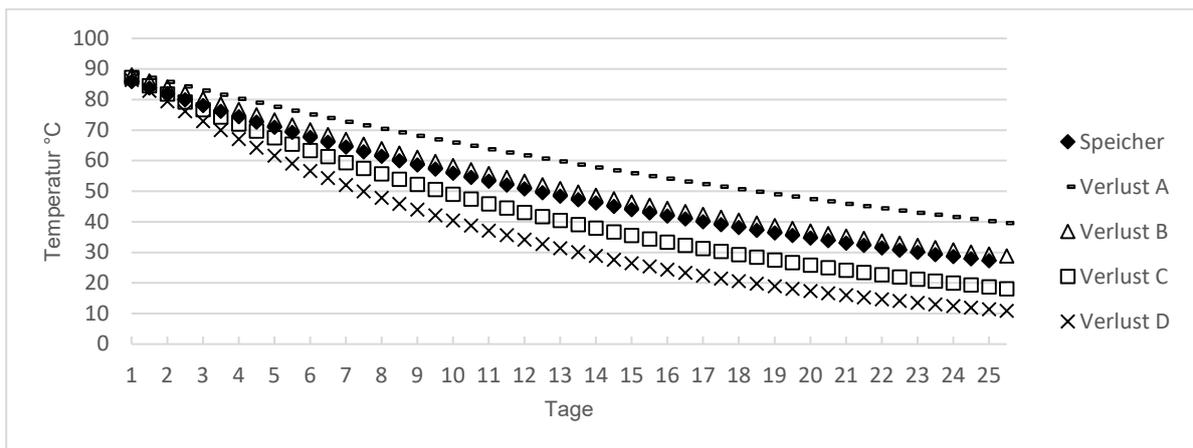


Abbildung 51: Speicherauskuhlkurve des Speichers und der Energieeffizienzklassen A-D. Formel nach (Quaschnig 2013)

In der oberen Abbildung ist die Speicherauskuhlkurve unseres Speichers dargestellt, wenn dieser mit 90 °C warmen Wasser voll beladen wäre. Dazu sind die Mittelwerte der Energieeffizienzklassen A bis D aufgetragen. Dass die Wärmedämmung viel ausmachen kann, zeigt ein Vergleich der Verluste des Speichers über ein gesamtes Jahr.

Hier ist der Unterschied der Verluste bei einem auf 60 °C geheizten Speicher bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C zwischen der Kategorie A und D mit Faktor 2.5 gross.

⁶⁵ EPS ist expandiertes Polystyrol, oder auch besser bekannt unter dem Namen Styropor.

⁶⁶ Laut Hersteller kostet eine EPS Produktionsanlage ca. 90'000 CHF.

⁶⁷ Seit Sept. 2017 Energieeffizienzklasse E-G nicht mehr zulässig.

Nach Türk et al. (2016) muss bei den Gesamtverlusten beachtet werden, dass diese bei einem Kombispeicher selten so hoch sind, da der Speicher lediglich im oberen Drittel um 60 °C warm ist. Ein reales Temperaturprofil im Winter, Herbst und Frühling weist durchschnittlich ca. 20 K Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Aufstellungsort aus. Im Sommer spielen die Wärmeverluste bei einer thermischen Solaranlage für Warmwasser und Raumheizung weniger eine Rolle, da genügend Solarwärme vorhanden ist um allfällige Verluste zu decken.

Festigkeitsuntersuchungen

Damit der Speicher den Testbedingungen standhält, wurde mittels FEM-Analyse die Sicherheit gegen Versagen im Laminat untersucht. Diese wurden bis zu einem Prüfdruck von 4.5 bar ausgeführt. Zudem wurde das Rohr vom Hersteller einer Druckprüfung von 4.5 bar unterzogen bevor es ausgeliefert wurde.

In Abbildung 52 ist der Aufbau des FEM-Modells zu sehen, welches genutzt wurde um die Festigkeitsanalysen durchzuführen. Das Modell besteht aus dem GFK-Rohr ((a) grau), den zwei Klöpperböden bzw. Deckel (b) und der Klebung (c).

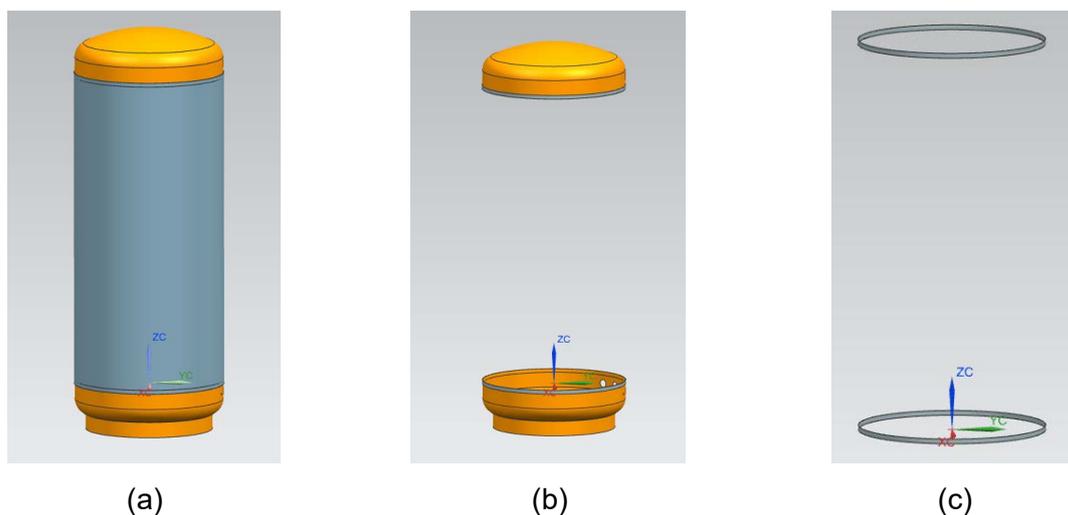


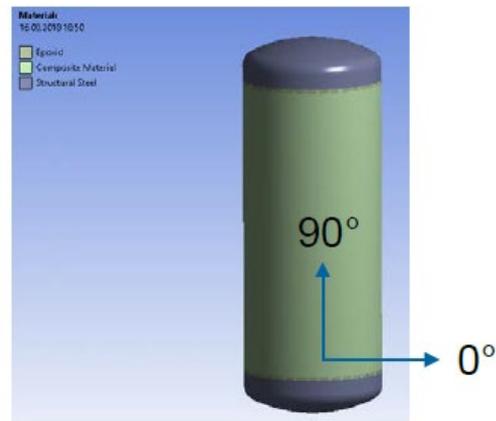
Abbildung 52: Aufbau des Modells: (a) Gesamtes Modell mit dem Rohr aus GFK-Laminat, (b) Klöpperboden und Deckel aus Stahl, sowie (c) Klebefuge auf Epoxid-Basis

Um das GFK-Laminat genau abbilden zu können, ist der genaue Schichtaufbau der einzelnen Lagen von Bedeutung. Das Laminat besitzt bei Belastung in verschiedene Raumebenen, bedingt durch die verschiedenen Ausrichtungen der Glasfasern, andere Eigenschaften. Diese werden, genauso wie der Laminataufbau, im Berechnungsprogramm hinterlegt und vom Programm bei der Auswertung berücksichtigt.

Lagenaufbau (13 Lagen à 0.55 mm):

- 2 x $\pm 45^\circ$ (Innen)
- 1 x 90°
- 1 x 4°
- 1 x 90°
- 3 x $\pm 4^\circ$
- 1 x 90°
- 1 x 4°
- 1 x 90°
- 2 x $\pm 45^\circ$ (Aussen)

(a)



(b)

Abbildung 53: Lagenaufbau des Laminats: (a) Übersicht über die einzelnen Lagen des GFK-Laminates und (b) Koordinatensystem für die Ausrichtung der Lagen

Das GFK-Laminat besteht aus einer inneren Chemieschutzschicht und dem äusseren Traglaminat. Das Traglaminat besteht aus Derakane 411-350 und hat eine Stärke von ca. 8 mm. In Abbildung 53 sind die einzelnen Lagen und ihre Ausrichtung zu sehen.

In einem ersten Schritt wurde die Deformation am Gesamtobjekt ausgewertet. Diese wird benötigt, um daraus die Spannungen und Dehnungen in den einzelnen Materialien abzuleiten.

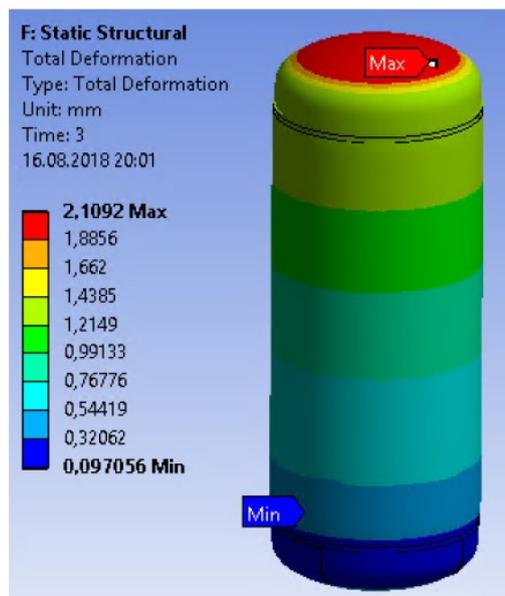


Abbildung 54: Deformationen bei 4.5 bar Prüfdruck und zusätzlichem hydrostatischem Druck.

Die totale Deformation des Speichers liegt bei 2.1 mm bei 4.5 bar Prüfdruck und zusätzlichem hydrostatischen Druck des Wassers. Die Verschiebung lediglich durch den hydrostatischen Druck ist mit 0.05 mm nur marginal gegenüber dem zusätzlich beaufschlagten Druck.

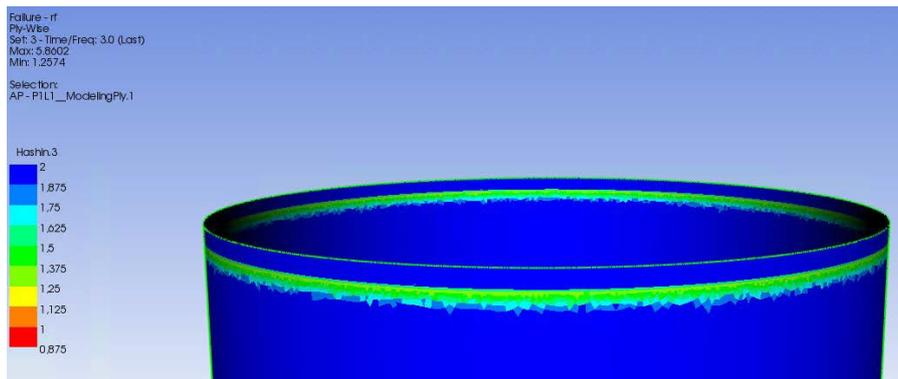


Abbildung 55: Kritischer Versagensfaktor im Laminat bei 4.5 bar. Zu sehen ist, dass das Laminat an der Position der Klebung am wenigsten sicher ist gegen Versagen. Mit einem Minimum bei 1.25 ist es jedoch genügend stabil.

In Abbildung 55 ist der Reservefaktor im Laminat zu sehen. Es ist zu sehen, dass am Ort der Klebung das Laminat am stärksten beansprucht wird. Mit einem Reservefaktor von 1.25 bei einem Prüfdruck von 4.5 bar und zusätzlichem hydrostatischen Druck ist das Laminat genügend fest für diese Anwendung.

Da die Klebestelle am stärksten beansprucht wird, wurde diese genauer untersucht. Das IWK hat Untersuchungen zum Klebstoff gemacht mit Proben, welche die eingesetzten Materialien durch den Klebstoff verbunden. Diese wurden in Wasser eingelagert und dann im Zugversuch analysiert.⁶⁸ Die Versuche haben für die Klebeverbindung eine maximale Zugfestigkeit von 10 N/mm² ergeben.

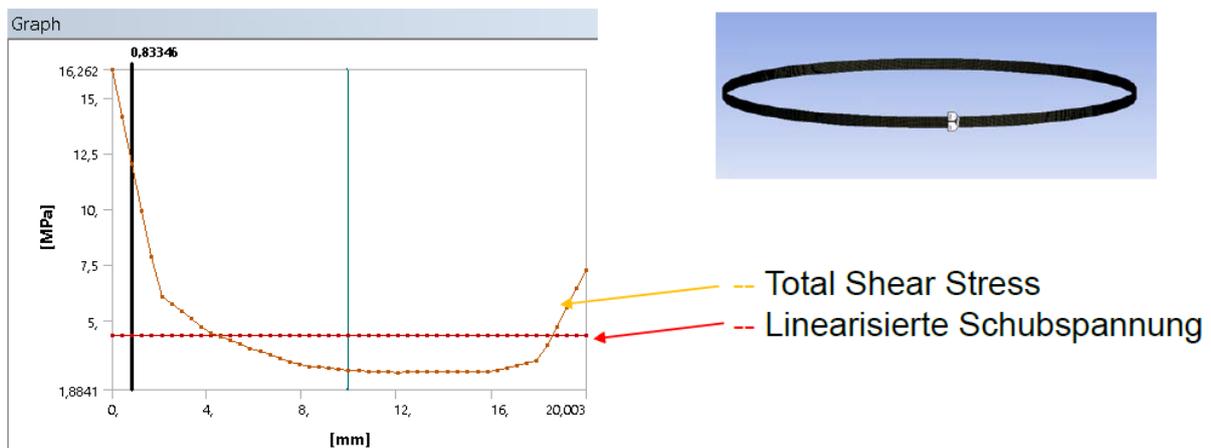


Abbildung 56: Schubspannung über die Breite der Klebung (Total Shear Stress) sowie linearisierte Schubspannung in der Mitte der Klebefuge bei 4.5 bar Prüfdruck. Das Ergebnis für die linearisierte Schubspannung beträgt 4.32 MPa.

Die Simulationen, welche am Modell gemacht wurden, haben eine linearisierte Schubspannung in der Klebestelle von 4.32 MPa ergeben. Dies bedeutet, dass die Klebestelle einen Sicherheitsfaktor von 2.3 aufweist.

⁶⁸ Die Proben wurden vor dem Zugversuch jeweils 30 Tage bei 80 °C in Wasser gelagert.

Die Auslegung des GFK-Rohrs mittels FEM mit 13 Lagen à je 0.55 mm, 20 mm Klebefuge und den Edelstahl-Klöpferböden erwies sich als genügend stabil für einen ersten Prototyp. Zur Sicherheit wurde die Klebefuge auf 30 mm erhöht (da die genauen Einflüsse von Wasser und Temperatur nicht bekannt sind). Die Festigkeit der Klebefuge ist jedoch bis 4.5 bar Prüfdruck gegeben.

Prototyp Nr.1

Im ersten Versuch wurde die Beladung des Speichers durch Schichtladelanzen untersucht. Besonders die Beladung der Wärmepumpe in die zwei unterschiedlichen Speicherzonen war von Interesse, da wegen der hohen Belade-Volumenströme von Wärmepumpen eine gute Temperaturschichtung kritisch ist. Hierfür wurde eine kommerzielle Schichtladelanze mit einem Durchmesser von 93 mm in den Speicher verbaut. Diese sollte den Anschluss von Wärmepumpen mit maximaler Leistung von 12 kW ermöglichen.

In Abbildung 57 sind die Einbauten und die entsprechenden Dimensionen im Speicher zu sehen.

Höhen der Anschlüsse:

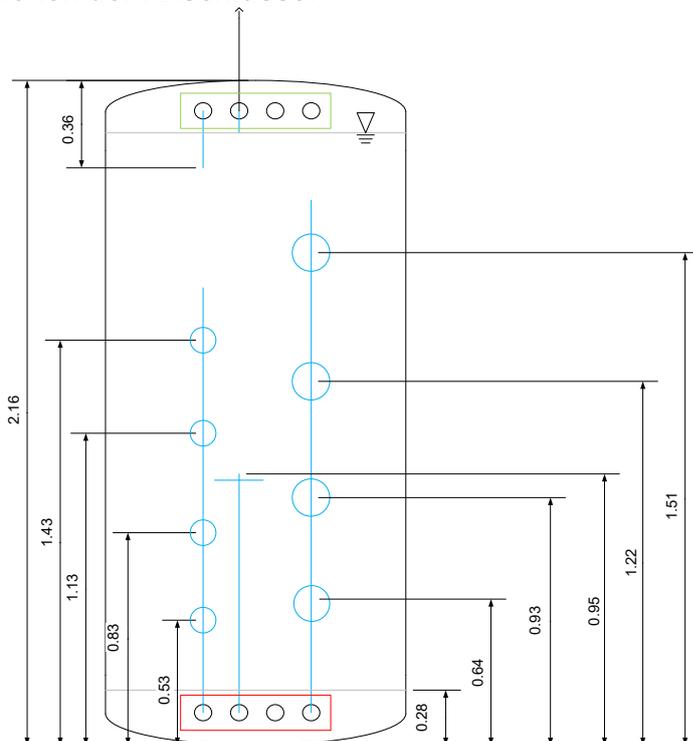


Abbildung 57: Positionen der Einbauten im Speicher. Die blauen Kreise stellen symbolisch die Ausgänge der Schichtladeeinrichtung dar.

Untere Anschlüsse (rotes Rechteck vlnr.): Schichtladelanze \varnothing 63 mm; Ansaugstutzen (T-Stück); Anschluss Kaltwasser; Schichtladelanze \varnothing 94mm.

Obere Anschlüsse (grünes Rechteck vlnr.): Heisswasserentnahme; MAG-Anschluss, freier Anschluss, Druckanzeige und Sicherheitsventil.



Abbildung 58: Foto des ausgebauten unteren Teils des Speichers mit den Schichtladeeinrichtungen (weisse Rohre) und dem Ansaugstutzen (blau-grünes T-Stück).

Schichtladelanzen

Die Schichtladelanzen arbeiten mit der Dichte des Wassers. Heisses Wasser hat eine kleinere Dichte als kaltes Wasser und will somit aufsteigen. Die Lanze soll dies ermöglichen und leitet das Wasser an die Stelle, an der der Dichteunterschied zwischen dem eingelagerten und dem eintretenden Wasser am kleinsten ist. Dort kann das Wasser aus einer Öffnung der Schichtladelanze in den Speicher austreten. Damit das durch die Lanze strömende Wasser kein stehendes Wasser an den verschiedenen Öffnungen ansaugt (Bernoulli-Effekt), hat die Lanze an den Öffnungen jeweils Klappen, welche ein Rückfliessen des Wassers verhindern. Die Schichtladelanze kann in der Höhe durch Hinzufügen zusätzlicher Elemente erweitert werden. Jedes Element hat in seiner Mitte einen Auslass.

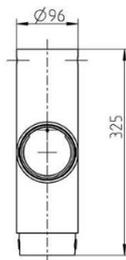


Abbildung 59: Schichtenlader \varnothing 96 mit Klappe

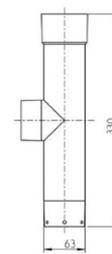


Abbildung 60: Schichtenlader \varnothing 63 mit Klappe

Die kleine Schichtladelanze (\varnothing 63) ist laut Hersteller für einen maximalen Volumenstrom von 1'000 L/h ausgelegt. Wir verwenden diese in unserem Versuch für den Rücklauf der Fussbodenheizung (Volumenstrom von 250 L/h), für den Rücklauf der Solaranlage (Volumenstrom von 200 L/h) und den Rücklauf des Frischwassermoduls (Volumenstrom von 300 L/h). Die grosse Schichtladeeinrichtung ist laut Hersteller für einen maximalen Volumenstrom von 2000 L/h ausgelegt. Dies bedeutet, dass mit einer maximalen Wärmepumpenleistung von ca. 12 kW beladen werden kann.⁶⁹

Ansaugstutzen

Der Ansaugstutzen besteht aus einem Heizungsrohr aus Kunststoff mit Innendurchmesser 63 mm und Wandstärke von 5 mm. Der Ansaugstutzen ist oben auf die Seiten per T-Stück abgewinkelt, damit das Wasser von der Seite angesaugt wird. Dies soll verhindern, dass die Schichtung zerstört wird durch ein Nachströmen von Wasser aus der Vertikalen. In Abbildung 58 ist der Ansaugstutzen auf dem dritten Anschluss von Links zu sehen.

System

Die Wärmepumpe ist über ein Stellventil mit dem Speicher verbunden, damit diese für die Erwärmung der Brauchwarmwasserzone solar vorgewärmtes Wasser aus einem Ansaugstutzen aus der Mitte des Speichers nehmen kann. Die zweite Einstellung erlaubt es der Wärmepumpe, kaltes Wasser für die Beladung der Raumwärme aus dem Speicher zu entnehmen. Die solare Wärme und der Rücklauf der Raumwärme sowie des Frischwassermoduls werden separat über eine weitere Schichtladelanze in den Speicher eingebracht. Das heisse Wasser für den primären Vorlauf des Frischwassermoduls (FWS)

⁶⁹ siehe typische Angaben in Datenblättern für Wärmepumpen

wird von oben mit einem siphonierten Rohr entnommen. Am zweiten oberen Anschluss des Speichers kann eingestellt werden, wie hoch der Wasserspiegel sein soll. Dies erlaubt es, ein integriertes Druckausgleichsgefäß zu realisieren.

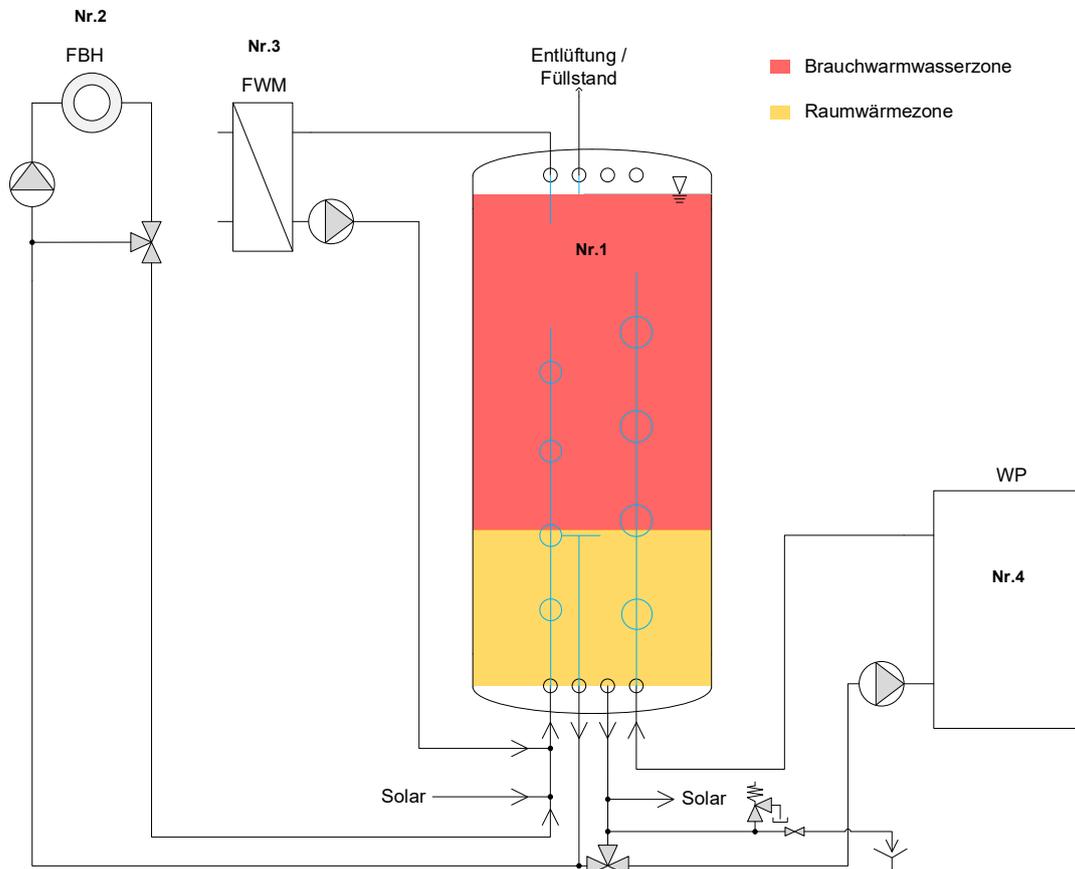


Abbildung 61: Systemskizze Prototyp Nr.1: Kombispeicher (Nr.1) mit Schichtladelanzeln für die Beladung und Ansaugstützen für die Wärmepumpe (Nr.4) und die Fussbodenheizung (Nr.2). Das Brauchwarmwasser wird über ein Frischwassermodul (Nr.3) entnommen. Im Speicher sind die zwei Speicherzonen eingezeichnet: die Raumwärme- und Solarzone gelb und die Brauchwarmwasserzone rot. Durch die Kombination von Raumwärme- und Solarzone ist der Speicher nur für Niedertemperaturheizsysteme geeignet.

Prototyp Nr.2

Im zweiten Versuch wurden die Anschlüsse wie bei "handelsüblichen" Speichern auf fix definierten Höhen eingebaut. Hierfür wurden die Anschlüsse intern mit Rohren hochgeführt. Es wurde untersucht, wie die Eintritte der Wärmepumpen in den Speicher geführt werden müssen, damit keine Verwirbelungen durch die hohen Eintrittsgeschwindigkeiten entstehen. Hierfür wurden den Anschlüssen Prallelemente mit einer Beruhigungsstrecke angebaut. Diese wurden so ausgelegt, dass die Austrittsgeschwindigkeit kleiner 0.1 m/s ist (Haller et al. 2015). In Abbildung 62 sind die Einbauten und die entsprechenden Dimensionen im Speicher zu sehen.

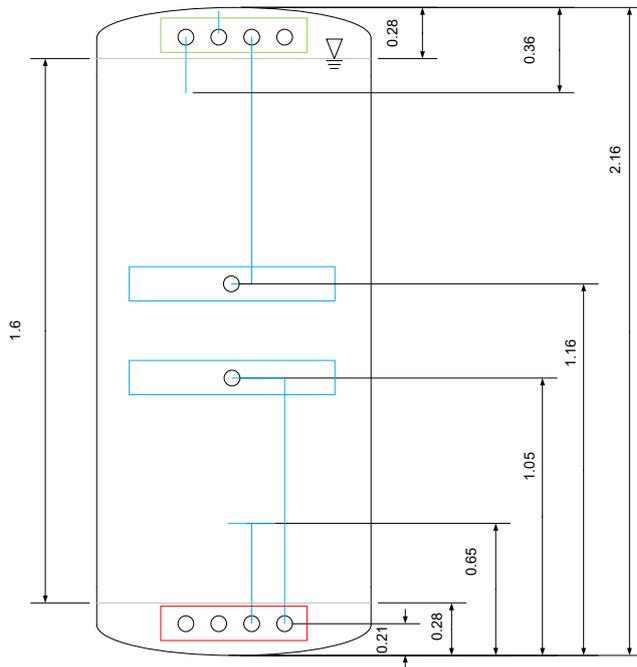


Abbildung 62: Positionen der Einbauten im Speicher:
Untere Anschlüsse (rotes Rechteck vlnr.): Rücklauf Frischwassermodul; Anschluss Speicherbefüllung Ansaugstutzen; Anschluss Beladung Raumwärme.
Obere Anschlüsse (grünes Rechteck vlnr.): Heisswasserentnahme; Befüllstutzen für internes Druckausgleichsvolumen Anschluss Beladung Brauchwarmwasserzone, Druckanzeige und Sicherheitsventil.

Abbildung 63: Klörperboden mit T-Stück für die Beladung mit Raumwärme (hinten), Entnahme für Raumwärme und WP-Brauchwasserzonen-Erwärmung (Mitte), und zwei freie Anschlüsse für Beladung Kaltwasser und Vorlauf Solar (vorne) sowie Rücklauf Frischwassermodul



Abbildung 64: Deckel mit Beladung Brauchwarmwasserzone (rechts), Entnahme Brauchwasserzone (links), Entlüftung MAG Anschluss (Mitte)



Abbildung 65: Speicher mit den unteren (links) und den oberen Einbauten (rechts).

Strömungsberuhigung

Um eine möglichst tiefe Eintrittsgeschwindigkeit zu erreichen, wurden an beiden Anschlüssen, welche von der Wärmepumpe beladen werden, Strömungsberuhigungen eingebaut.

Für die beiden Wärmepumpeneintritte in den Speicher wurde einmal ein Rohr vom unteren und vom oberen Anschluss zur Mitte geführt. Dies wurde mit einem Kunststoffheizungsrohr mit Innendurchmesser 65 mm und Wandstärke 5 mm ausgeführt. Am Ende dieser Rohre wurde ein T-Stück angeschweisst und an diesen mit einem Übergangsstück ein Kunststoffwellrohr befestigt.



Abbildung 66: Strömungsberuhigung aus einem T-Stück (grün) und Kunststoff-Wellrohren.

Das von der Wärmepumpe kommende Wasser soll bei einem Massenstrom von 3'430 kg/h beim Eintritt in den Speicher nicht schneller als 0.1 m/s sein. Die Strömungsberuhigung muss bei einem Durchmesser von 70 mm eine Länge von sechs Mal den hydraulischen Durchmesser haben (Haller et al. 2015). Dies entspricht somit einer Länge von 840 mm oder einen Kreiswinkel von 122° des Speichers.

System

Ein Kombispeicher stellt Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus zur Verfügung (Abbildung 67). In vorliegendem Fall soll der Kombispeicher drei verschiedene Temperaturniveaus bereitstellen. Im obersten Bereich wird das Brauchwarmwasser gespeichert. Die Wärmepumpe entnimmt hierfür bereits vorgewärmtes Wasser aus der Raumheizzone und erwärmt dieses in mehreren Durchläufen, mit einem Temperaturhub von ca. 5 K auf Brauchwarmwassertemperatur.

Im mittleren Bereich wird die Raumwärme gespeichert. Durch das Umschalten der Ventile (V1 und V2) kann die Wärmepumpe solar vorgewärmtes Wasser aus dem Speicher entnehmen, auf das gewünschte Temperaturniveau erwärmen, und in die Raumheizungszone einspeichern.

Der unterste Bereich des Speichers ist für die solare Beladung reserviert. Hier wird nur der Rücklauf des Frischwassermoduls eingeleitet. Dies sorgt dafür, dass die Solaranlage immer möglichst effizient arbeiten kann.⁷⁰

Der Anspruch eines Kombispeichers ist, die verschiedenen Zonen möglichst optimal zu bewirtschaften. Dies kann nur durch eine optimale Schichtung im Speicher geschehen. Bei ungeeignetem Speicherdesign wird die Schichtung durch das Beladen des Speichers mit hohen Eintrittsgeschwindigkeiten zerstört.

Da der Speicher für Wärmepumpen mit einer Leistung bis zu 25 kW Leistung ausgelegt werden soll, sind die Volumenströme bei Speichereintritt relativ hoch⁷¹ und müssen durch geeignete Massnahmen beruhigt werden.

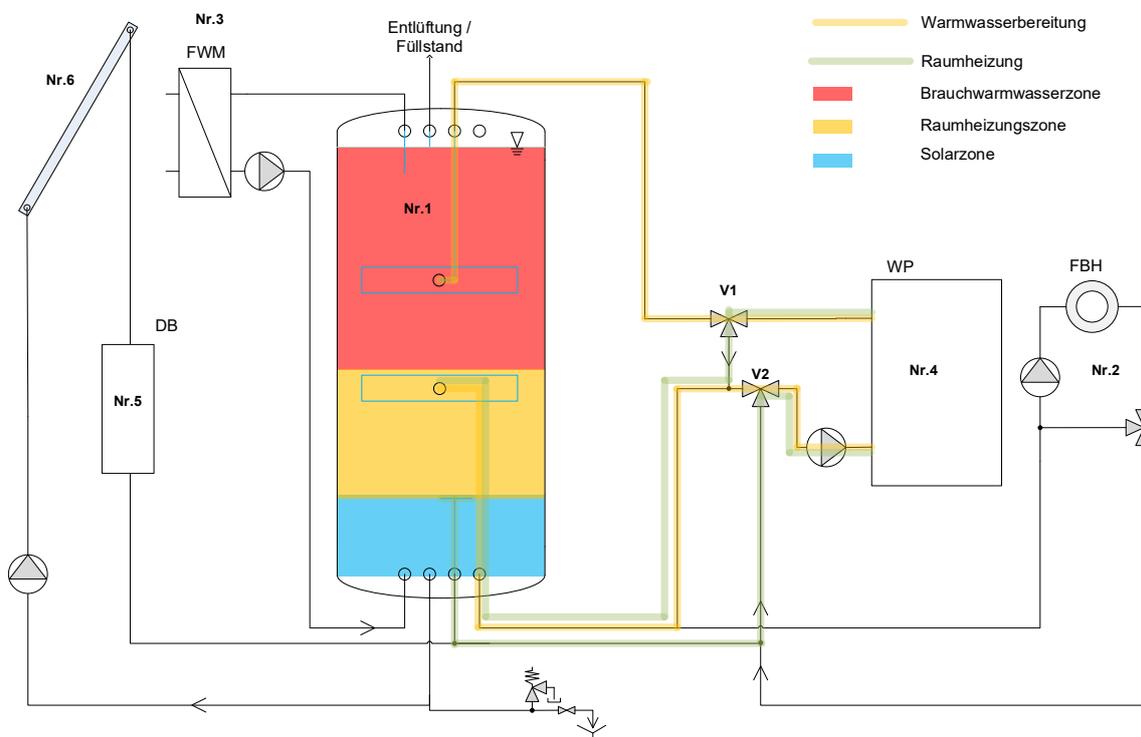


Abbildung 67: Systemskizze Prototyp Nr.2: Kombispeicher mit Wärmepumpen-Anschlüssen in der Speichermitte, ausgeführt mit Strömungsberuhigung. Die blauen Quadrate in der Speichermitte zeigen die Strömungsberuhigungen der Wärmepumpenanschlüsse. Im unteren Teil des Speichers ist ein Entnahme- sowie Beladestutzen eingebaut. Der Kombispeicher (Nr.1) stellt aus der Raumheizungszone Warmwasser für die Fussbodenheizung (Nr.2) zur Verfügung. Das Frischwassermodul (Nr.3) entnimmt Brauchwarmwasser aus der entsprechenden Speicherzone und führt es dann wieder in die Solarzone zurück. Über die Wärmepumpe (Nr.4) kann die Brauchwarmwasser- oder Raumheizungszone beladen werden. Die Solaranlage (Nr.6) wird hier mit Speicherwasser über ein externes Drainbackgefäß (Nr.5) betrieben.

⁷⁰ Die Wärmepumpe belädt den Speicher nur bis zum unteren Stutzen mit Raumwärme. Der unterste Teil bleibt immer reserviert für die Solaranlage. Somit kann die Solaranlage das Wasser um einen grösseren Temperaturhub erwärmen. Zudem kann auch noch Wärme in den Speicher eingebracht werden bei nicht optimalen Einstrahlungs- oder Wetterverhältnissen.

⁷¹ Bis zu einem Liter pro Sekunde (3'600 kg/h)

4.5.3 Test der Prototypen

Um die Funktionalität der Prototypen zu demonstrieren und zu testen, wie eine Beladung durch hohe Volumenströme am effizientesten und kostengünstigsten ausgeführt werden kann, wurden die Prototypen mit den unterschiedlichen Einbauten am Prüfstand des SPF im dynamischen Betrieb getestet. Dazu wurde eine am SPF entwickelte Methode zur Messung der Schichtungseffizienz angewendet (Haberl, Reber, and Haller 2017).

In dieser Prüfung nach dem Hardware-in-the-Loop-Prinzip emuliert der Prüfstand sowohl die Wärmesenken (Raumheizung und WW) als auch die Wärmequellen (Wärmepumpe und optional solarthermische Kollektoren) während einem 24-stündigen Prüfzyklus (Testtag), der mehrmals hintereinander wiederholt wird. Anwendung findet die Methode für Kombispeicher zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, auch bezeichnet als Zweizonen-Speicher. Somit stellt sich im Speicher eine Temperaturverteilung für Betriebsweisen ein, wie sie unter realen Bedingungen auftreten.

Die Rahmenbedingungen der Messung sind wie folgt: Die Raumheizungslast des Testtages beträgt bei einer als konstant angenommenen Außentemperatur von 2.5 °C 42.5 kWh, der tägliche Warmwasserbedarf beträgt 9.45 kWh (dies entspricht einem Verbrauch von 232 L bei einer Kaltwassertemperatur von 10 °C und einer Warmwassertemperatur von 45 °C nach dem Passiv-Mischer). Eine Wärmepumpe zur Beladung des Speichers kann mit einer thermischen Leistung zwischen 8 kW und 16 kW und entsprechenden Massenströmen von 1'370 bzw. 2'740 kg/h gewählt werden.

Resultate Prototyp Nr.1

Ein erster Test wurde mit Beladung durch eine 12 kW-Wärmepumpe durchgeführt (analog zu Abbildung 61). Die Wärmepumpe wurde entsprechend der Speichertemperatur gesteuert, wobei die Warmwasserbereitung nur während zweier Zeitfenster freigegeben war (von 2:00 bis 4:00 Uhr sowie von 16:00 bis 18:00 Uhr). Vor Beginn der Messung wurde der Speicher konditioniert (Speichertemperatur > 45 °C in der Warmwasserzone und Speichertemperatur < 40 °C im Raumheizungsteil).

Eine quantitative Auswertung der Messung bzw. eine Bestimmung der Schichtungseffizienz war nicht möglich, da die Komfortanforderungen für die Warmwasserbereitung nicht erfüllt wurden.⁷² Deshalb kann lediglich eine qualitative Bewertung aufgrund des Verlaufs der Messung durchgeführt werden. In Abbildung 68 ist der Verlauf der ersten 24 h des Tests dargestellt. Gezeigt werden die Speichertemperaturen (mit Pt100-Anlegefühlern gemessen, die äquidistant über die Speicherhöhe an der Speicherwand verteilt waren) sowie die Massenströme der Be- und Entladekreise.

Der Temperaturverlauf im Speicher legt mehrere Probleme offen. Zur Veranschaulichung wurden verschiedene Bereiche im Speicher farbig hinterlegt:

⁷² Der Test verlangt, dass während des gesamten Prüfzyklus immer Warmwasser mit einer Temperatur von mind. 45°C vorhanden ist.

- A: Erste Beladung des Speichers
- B: Entladung
- C: Beladung der Raumheizungszone

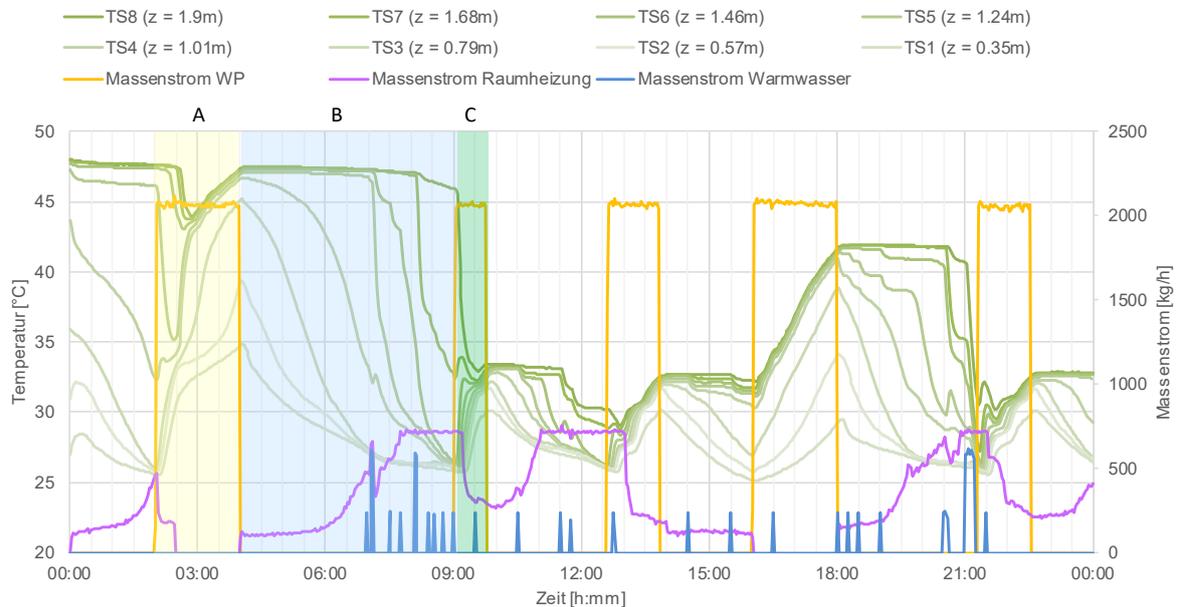


Abbildung 68: Verlauf der ersten Messung des Prototyps mit Speicherdesign Nr.1. Gezeigt werden die Speichertemperaturen (gemessen über Anlegefühler an der Speicherwand) sowie die Massenströme der Be- und Entladekreise während dem dynamischen Test. Nach der ungewollten Speicherdurchmischung ab 9 Uhr bleibt die WW-Zone kalt, da im verwendeten Test-Profil die WW-Beladung gesperrt bleibt.

A: Beladung des Speichers

Der gelb hinterlegte Bereich in der Abbildung 68 zeigt scheinbar eine Beladung der Warmwasserzone im Speicher. Auch und vor allem durch den Start um 2:00 Uhr mit Beginn des ersten Warmwasserzeitfensters wird dieser Eindruck erweckt. In Abbildung 69 ist der Bereich in höherer Auflösung zu sehen. Hier wird deutlich, dass um 2:00 Uhr in Wirklichkeit eine Beladung der Raumheizungszone gestartet wird, in deren Anschluss dann eine Warmwasserbereitung folgt. Während der Beladung der Raumheizungszone bleibt die Temperatur im Speicher oben (TS8 und TS7) auf hohem Niveau. Allerdings ist hier bereits ein leichtes Absinken der Temperatur an der Position TS6 zu sehen und ein deutliches Absinken der Temperatur an TS5.

Während der anschliessenden Warmwasserladung ist ein Ansteigen der Temperatur an der Position TS3 (unterhalb der Rücklaufposition der Wärmepumpe) zu sehen, bei einem gleichzeitigen Einbruch der Temperaturen im Speicher oben. Dies zeigt, dass während der Warmwasserladung die Schichtlanze im Speicher nicht gut funktioniert.

B: Entladung des Speichers

Die blau hinterlegte Zone in Abbildung 68 zeigt die Entladung des Speichers. In der Zeit von 4:00 Uhr bis 7:00 Uhr wird die Wärme aus dem Speicher nur für die Raumheizung entnommen. Dabei wird der Vorlauf über die seitlich abgewinkelte Entladelanze entnommen und der

Rücklauf über die Schichtlanze mit kleinerem Durchmesser zurück in den Speicher geführt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Temperatur im Speicher oben bis zur Position TS5 davon völlig ungerührt bleibt. Erst mit den ersten Warmwasserbezügen (zu sehen am Massenstrom der WW-Zapfungen) sinkt die Temperatur im Speicher oben deutlich ab.

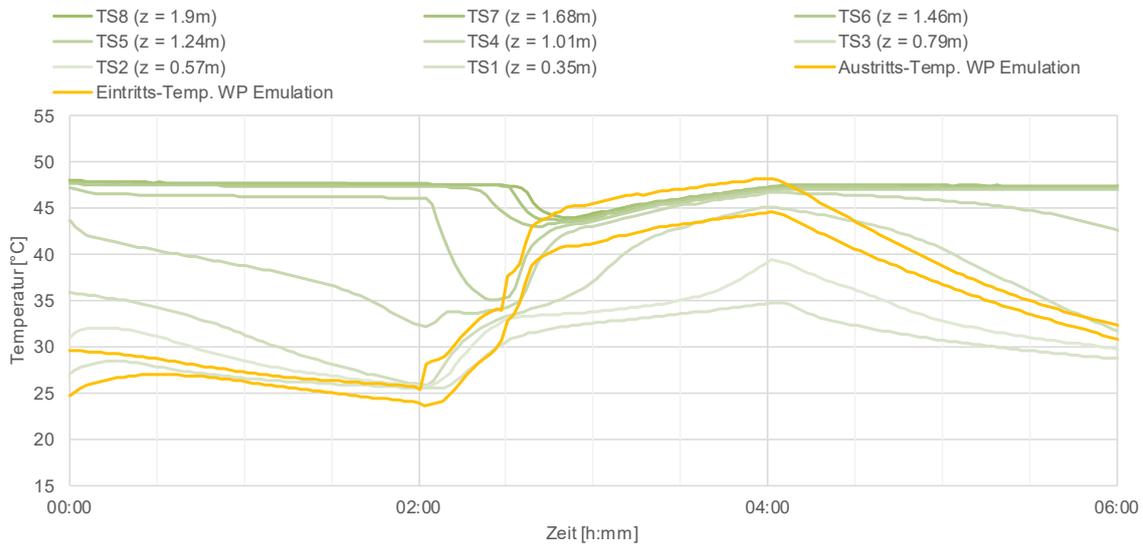


Abbildung 69: Ausschnitt aus dem ersten Schichtungstest des Prototyps mit Speicherdesign Nr.1: Beladung des Speichers.

Dieses Absinken ist allerdings deutlicher, als durch die Warmwasserbezüge erklärt werden kann. Es sind zwei Erklärungen für dieses Verhalten denkbar: Zum einen besteht die Möglichkeit, dass das Frischwassermodul mit zu hohem Volumenstrom auf der Primärseite (speicherseitig) arbeitet und somit zu einer Durchmischung im Speicher führt. Die andere Möglichkeit betrifft die Schichtlanze zur Einbringung von sowohl dem Rücklauf der Fussbodenheizung als auch dem Frischwassermodul. Evtl. arbeitet diese mit ändernden Umgebungstemperaturen (und damit änderndem Dichteunterschied) nicht mehr optimal, so dass der kalte Rücklauf nicht in die korrekte Position im Speicher geführt wird.

C: Beladung der Raumheizungszone

Die grün hinterlegte Zone in Abbildung 68 zeigt die Beladung der Raumheizungszone. Während diesem Prozess wird der oberste, noch heisse Teil des Speichers über den Speichereintritt der Schichtlanze komplett durchmischt.

Um die Ursache der Durchmischung des Speichers während der Entladung genauer zu untersuchen, wurde ein zweiter Test des Speichers Nr.1 durchgeführt. Dieser Test wurde ohne Warmwasserbezug durchgeführt. Dazu wurden zum einen die Zapfungen aus dem Testprofil des Prüfstandes entfernt, zum andern wurden Kugelhähne auf der Primärseite des Frischwassermoduls geschlossen um eine mögliche Zirkulation über den externen Wärmeübertrager zu verhindern. In Abbildung 70 ist ein 12-Stunden Ausschnitt aus dieser Messung dargestellt. Darin ist zu sehen, dass es im Vergleich zum ersten Test eine ähnlich starke Auskühlung des oberen Teils des Speichers während der Entladung für die

Raumheizung zwischen 4:00 Uhr und 9:00 Uhr gibt. Für ca. 90 min bleibt die Temperatur im oberen Teil des Speichers konstant. Sie beginnt zu sinken, wenn die Eintrittstemperatur in den Speicher in etwa identisch zur Temperatur an der Position TS3 ist. Ab diesem Zeitpunkt tritt das Wasser nicht mehr über die unteren Öffnungen der Schichtlanze aus, sondern wird weiter in den oberen Bereich des Speichers geführt.

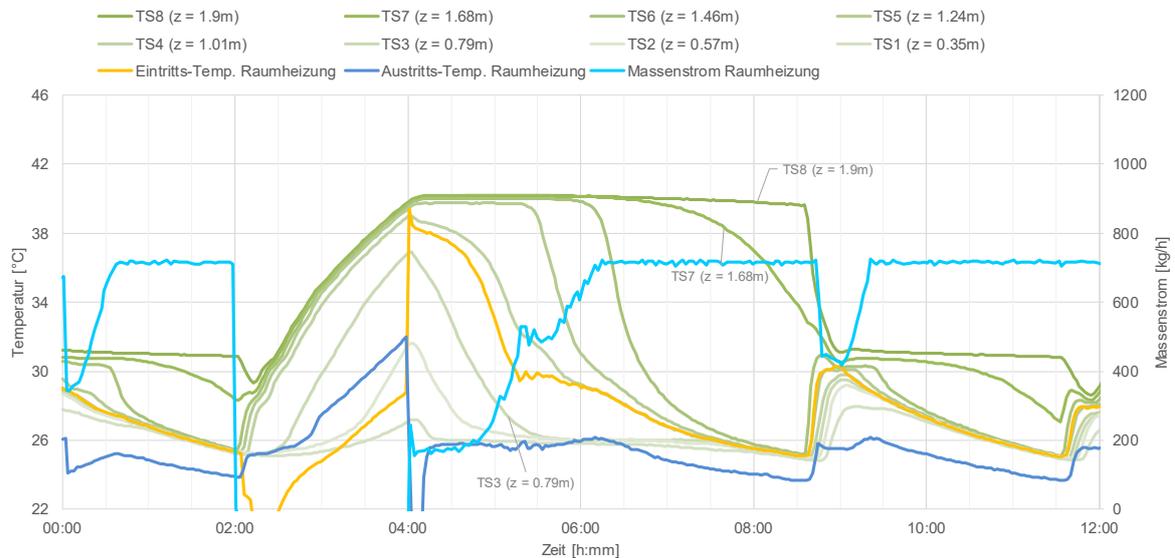


Abbildung 70: Verlauf der zweiten Messung des Prototyps mit Speicherdesign Nr.1. Die Messung wurde ohne Warmwasserbezug durchgeführt. Gezeigt wird ein Ausschnitt der Messungen mit den Speichertemperaturen, der Ein- und Austrittstemperatur der Raumheizung sowie dem speicherseitigen Massenstrom der Raumheizung.

Resultate Prototyp Nr.2

Während des Abbaus des Speichers mit Speicherdesign Nr.1 löste sich die Klebeverbindung zwischen dem Flansch, mit welchem die Klöpperböden angeschraubt werden, und dem GFK-Rohr. Aus diesem Grund musste auf ein zweites Rohr gewechselt werden, um dort den Aufbau für den Speicherprototypen Nr.2 zu machen. Leider traten auch bei diesem Prototyp Probleme mit der Dichtigkeit auf. Die Klebestelle am Flansch hielt den thermischen Lasten während eines Vortests zur Überprüfung der hydraulischen Verbindungen und Reglereinstellungen nicht stand. Die Gründe sind zum einen, dass der untere und obere Flansch auch nach Nachbesserung durch den Hersteller immer noch leicht verzogen⁷³ war, was beim Befestigen Spannungen in der Klebestelle verursachte. Zum anderen wurde der Speicher jeweils zwischen den Flanschen aus Sicherheitsgründen mit Gewindestangen verbunden. Da die Stangen im Lochkreis der Dichtung befestigt wurden, mussten die Stangen fest angezogen werden. Die Gewindestangen waren thermisch nicht mit dem Speicher gekoppelt. Durch die Wärmeausdehnung wurde dann möglicherweise die Klebestelle zu stark beansprucht, was zwischen dem im GFK-Rohr eingeklebten Flansch und dem Rohr eine Leckage verursachte.

⁷³ Die Flansche der Klöpperböden waren durch das Einschweißen der Rohranschlüsse bis zu 18 mm verzogen. Nach der Nachbesserung durch den Hersteller waren sie immer noch um mehrere Millimeter verzogen.

Ein weiteres Problem waren die GFK-Rohre, welche durch den liegenden Transport im LKW, um mehrere Millimeter unrund waren. Dies hatte bei der Klebung des Flansches in das Rohr den Effekt, dass nicht überall gleichmässig viel Klebstoff vorhanden war. Bei einem komplett geodätisch gewickelten Speicher würden diese Probleme nicht auftreten, da die Ausdehnungskoeffizienten der Materialien gleich sind. Gleichwohl sollten weitere Tests durchgeführt werden, um den besten Klebstoff und die beste Verbindungsart auch für die Anschlussstutzen zu finden, welche vermutlich aus Metall gefertigt werden. Es sollte auch abgeklärt werden, ob das Rohr mit dem Deckel nach Einfügen der Einbauten nochmals gewickelt werden kann. Dies würde eine Verbindung mit gleichen Materialien schaffen. In diesem Schritt könnten dann auch Transporthilfen an den Speicher angefügt werden.

Im Folgenden kann deswegen nur der Verlauf dieses Vortests zur Bewertung des Speicherdesigns verwendet werden (analog zu Abbildung 67). In Abbildung 71 ist der Verlauf dieser Messung dargestellt. Gezeigt werden die an der Speicherwand gemessenen Speichertemperaturen sowie die Ein- und Austrittstemperatur der Wärmepumpenemulation. In der Abbildung ist der Betriebszustand "Beladung der Raumwärmezone" in gelb hinterlegt ("A") und "Beladung der Warmwasserzone" in grün ("B"). Während der Beladung der Raumwärmezone bleibt der Bereich bis zum Sensor TS3, also rund ein Viertel des Volumens, bei einer Temperatur von unter 25 °C. Dieser Bereich ist für die Einbringung von Solarwärme reserviert und kann über die Nachheizung nicht bewirtschaftet werden. Beim Wechsel von "Raumheizung" zu "Warmwasserbereitung" um 2:00 Uhr Testzeit ist zu erkennen, dass die Eintrittstemperatur der WP-Emulation während der Warmwasserbereitung höher ist als im Raumheizungsbetrieb (Eintrittstemperatur WP-Emulation > Speichertemperatur TS3). Entsprechend arbeitete das Umschaltventil im WP Rücklauf korrekt.⁷⁴

Die Beladung während des zweiten Zeitfensters um 16:00 Uhr startet mit einer noch sehr hohen Temperatur im Speicher oben. Diese wird durch die Warmwasserladung nur geringfügig und kurzzeitig abgesenkt.

Während der Raumheizungsbeladung um ca. 22:00 Uhr Testzeit bis zum Ende des Testtages steigt die Temperatur bis zum Sensor TS6 an. Dieser befindet sich oberhalb der Eintrittsposition zur Beladung der Raumwärmezone. Da der Verlauf der Temperatur im oberen Teil des Speichers während der Raumwärmeladung identisch mit dem Verlauf während der Warmwasserladung ist, muss davon ausgegangen werden, dass das Umschaltventil im Vorlauf nicht gearbeitet hat bzw. fehlerhaft installiert war. Ein zweiter Test mit korrigierter Hydraulik konnte wegen den auftretenden Leckagen nicht mehr durchgeführt werden.

⁷⁴ Somit konnte ausgeschlossen werden, dass der Fehler auf Seite des Prüfstandes lag.

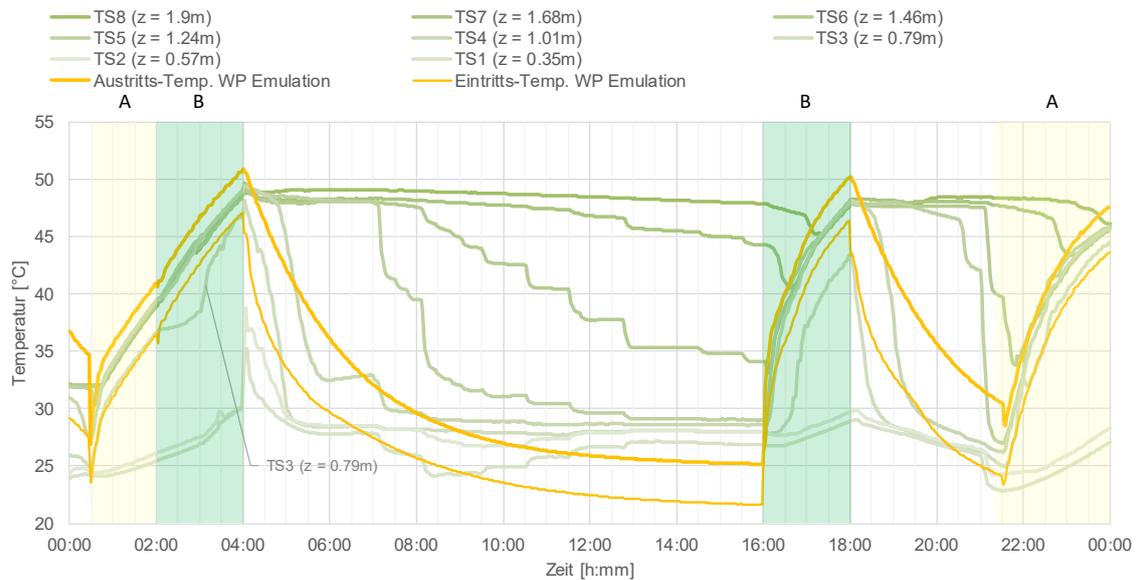


Abbildung 71: Verlauf der Messung des Speicherprototyp Nr.2. Gezeigt werden die Speichertemperaturen (gemessen mit Anlegefühlern an der Speicherwand) sowie die Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpenemulation.

Im zweiten Speicherprototyp wurde zudem getestet, ob das Druckausgleichsvolumen für das Speicherwasser mittels Luftvolumen im Speicher selbst realisiert werden kann. Hierfür wurde ein entsprechendes Volumen im obersten Teil des Speichers integriert. Das Warmwasser wurde mit einem Rohrbogen entnommen. Mit einem leicht höher platzierten Entlüftungsrohr wurde das Luftvolumen für den Druckausgleich definiert (Abbildung 67, Anschlüsse links oben). Das Druckausgleichsvolumen wurde gemäss gängiger Formeln für Membrandruckausgleichsgefässe berechnet. In den Tests konnte das Volumen problemlos eingestellt werden bei der Speicherbefüllung. Die Volumenausdehnung des Speicherwassers konnte ohne grosse Druckänderungen mit dem Gasvolumen ausgeglichen werden.

Diskussion und Vergleich der Resultate

Schichtlanze für den Rücklauf Raumheizung und Frischwassermodul:

Die in den Tests zum Einbringen des kalten Rücklaufes aus der Raumheizung verwendete Schichtlanze war nach oben offen. Die Öffnung gegen das Speichervolumen ist zur Funktionalität der Lanze nötig. Um den beobachteten Effekt der Auskühlung des oberen Bereiches im Speicher zu verhindern, wäre die Einbindung eines Prallbleches oder einer Strömungsumlenkung mittels eines Bogens oberhalb der Lanze nötig (Abbildung 72, rechtes Bild). Bei annähernd gleicher Temperatur des eintretenden Wassers und dem Speicherwasser kann das eintretende Wasser sonst durch die Lanze bis zu den obersten Speicherschichten geführt werden. Um ein "Überschiessen" zu verhindern muss die Strömung am Austritt der Lanze von der vertikalen in eine horizontale Strömung umgelenkt werden.

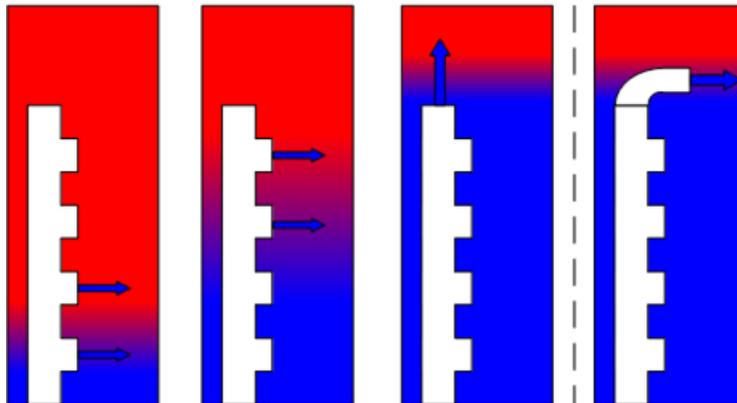


Abbildung 72: Schematische Darstellung des Speichereintrittes eines kalten Rücklaufs über eine Schichtlanze. Die Pfeile zeigen die Position, aus der das Fluid bei sich ändernden Speichertemperaturen während der Entladung in den Speicher austritt. Um die Strömung nach oben in den noch warmen Teil des Speichers zu verhindern, sollte am oberen Austritt der Schichtlanze entweder ein Prallblech oder eine Strömungsumlenkung mittels eines Bogens platziert werden.

Schichtlanze für den Vorlauf der Speicherbeladung:

Die Beladung des oberen Teils des Speichers mittels einer Schichtlanze (Vorlauf der Wärmepumpe) ist grundsätzlich möglich. Es besteht zwar der Nachteil einer Wärmeleitung über das Material der Lanze im unteren Teil und damit einer Erwärmung des Raumheizungsteils. Dieser Effekt könnte aber durch eine andere Materialwahl verringert werden. Allerdings erwies sich die Beladung des unteren Teils des Speichers (Raumwärmezone) als sehr problematisch. Der Austritt aus der Lanze in den Speicher fand in einer zu hohen Position statt. Dadurch wurde die Thermokline im Speicher nach oben verschoben, bis das gesamte Speichervolumen durchmischt war. Eine Warmwasserbereitung über das Frischwassermodul war damit nicht mehr möglich.

Strömungsberuhigung bei fixer Eintrittsposition:

Die Messung mit Strömungsberuhigung im Speichereintritt, um eine Geschwindigkeit < 0.1 m/s und eine genügend lange Beruhigungsstrecke zu erreichen, zeigen, dass dieses Konzept grundsätzlich funktioniert.

Ein Verzicht auf das Umschaltventil zur gezielten Beladung von bestimmten Speicherbereichen ist auch mit Schichteinrichtungen im Speicher nicht zu empfehlen. Somit müssen lediglich die Investitionskosten für die Speichereinbauten miteinander verglichen werden. Ein Speichereintritt mit genügend langer Beruhigungsstrecke nach der letzten Strömungsumlenkung und genügend grossem Querschnitt ist in der Regel günstiger in der Umsetzung als eine Schichteinrichtung.⁷⁵ Zusätzlich muss eine Schichteinrichtung auf den eintretenden Volumenstrom angepasst sein und verringert somit die Flexibilität des Systems⁷⁶.

⁷⁵ Die verwendete Schichteinrichtung von Prototyp 1 kostete 110 CHF (Ø63mm) respektive 190 CHF (Ø94mm), die Strömungsberuhigungen von Prototyp 2 mit der Zuleitung dagegen 115 CHF.

⁷⁶ Es sei denn die Schichteinrichtung kann im fertigen Speicher von aussen installiert werden, wofür es ein Produkt auf dem europäischen Markt gibt.

4.5.4 Optimiertes Speicherkonzept

Bauliche Anpassungen

Es hat sich in der Diskussion mit dem Hersteller der Rohre der Prototypen herausgestellt, dass es – entgegen den ursprünglichen Angaben – auch möglich wäre, Anschlüsse auf der benötigten Höhe in einen Speicher zu integrieren, welcher zudem mit Druck beaufschlagt werden kann. Wo angezeigt, könnten die Anschlüsse mit inwendig einlamierten, aus GFK hergestellten, Strömungsberuhigungen versehen werden. Basierend auf diesen Angaben und den Versuchsergebnissen wurde ein optimiertes Speicherkonzept definiert.

Das optimierte Speicherkonzept zeigen Abbildung 73 für die Verwendung des Speichers zur Warmwassererzeugung z.B. in einem Mehrfamilienhaus und Abbildung 74 für die Verwendung als Kombispeicher in einem Einfamilienhaus. Die Anschlüsse und Einbauten sind jeweils gleich, werden in den Abbildungen aber teilweise verschieden eingesetzt.

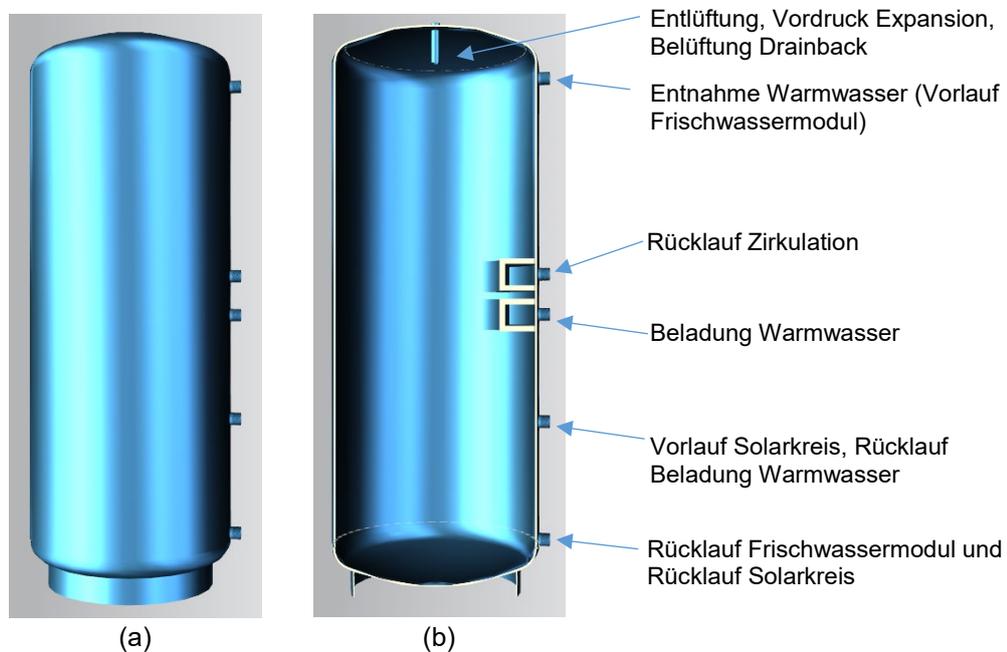


Abbildung 73: Modell des optimierten Speicherkonzepts für den Einsatz als Warmwasserspeicher im MFH, (a) Aussenansicht (b) Schnitt. An den Anschlüssen mit zwei Funktionen wird extern jeweils ein T-Stück und ggf. Ventile montiert.

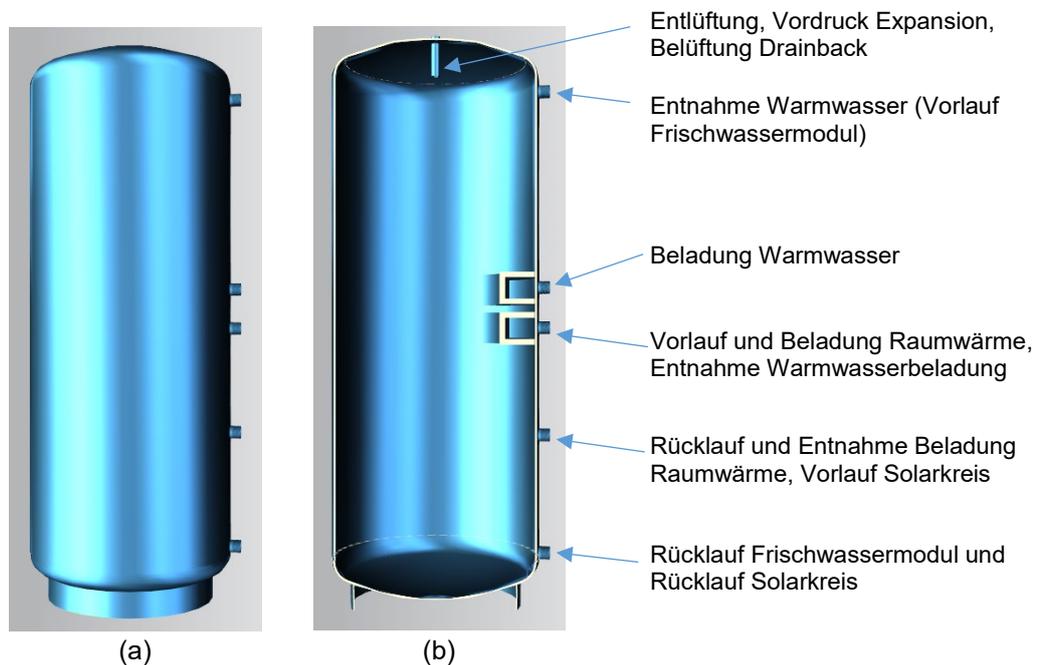


Abbildung 74: Modell des optimierten Speicherkonzepts für den Einsatz als Kombi-Speicher in einem EFH, (a) Aussenansicht (b) Schnitt. Die Anschlüsse sind analog zum Speicherprototyp 2 (Abbildung 67). An den Anschlüssen mit zwei Funktionen wird extern jeweils ein T-Stück und ggf. Ventile montiert.

Preisanalyse

Nachstehend wird abgeschätzt, zu welchem Preis ein Speicher in der Bauweise des optimierten Prototyps tatsächlich in einer Serienfertigung angeboten werden könnte. Basis für die Abschätzung sind die Materialkosten des Prototyps, bzw. einzelner Komponenten, sowie Offerten von Speicherproduzenten. Analysiert wird das Speicherdesign mit Strömungsberuhigungen gemäss Abbildung 74.

Tabelle 20: Zusammenstellung der Kosten des optimierten Speicherkonzepts bei geringer produzierter Stückzahl.

Speicherhülle	Anz.	Preise in CHF
Speicher ⁷⁷	1	2'000
Wärmedämmung	1	375
Total Speicherhülle		2'375
Ein- bzw. Anbauten		
Strömungsberuhigung	2	115
Anschlüsse	1	250
Total Einbauten		480
Gesamt		2'855

⁷⁷ Preisangabe VKA (DE) für Speicherhülle gemäss optimierten Prototyp wie in Abbildung 72, bei Abnahmemenge von 25 Speichern.

In Tabelle 19 ist zu sehen, dass für den optimierten Prototyp mit Kosten für die Speicherhülle exkl. Isolation von 2000 CHF/m³ zu rechnen ist. Diese Kosten basieren auf einer Offerte für eine Kleinserie von 25 Speichern. Gemäss offerierendem Hersteller kann nicht von einem Skaleneffekt ausgegangen werden. Im Widerspruch dazu geben andere Speicherhersteller an, dass die Preise bei grösseren Abnahmemengen sinken werden. Abbildung 75 zeigt den Preisverlauf eines GFK-Speichers gemäss entsprechender Offerten. Der Speicher hat ähnlich wie der optimierte Prototyp bereits eingewickelte Anschlüsse. Der Preis reduziert sich dabei vom Einzelspeicher bis zu einer Serie von 4'000 Stück um circa 75 %.

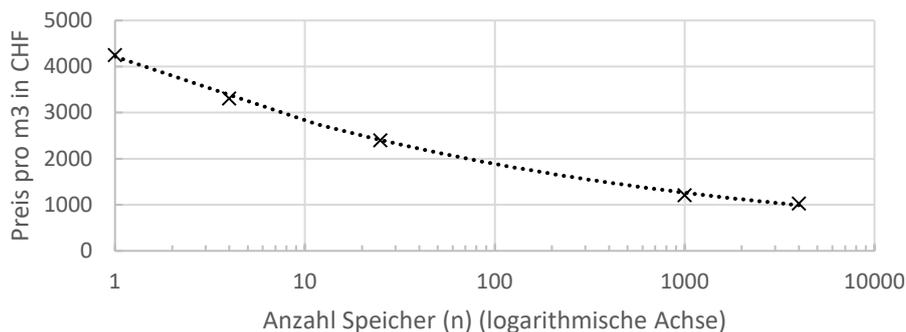


Abbildung 75: Preisverlauf von GFK-Kunststoffspeichern bei verschiedenen Abnahmemengen. Die Preise beziehen sich auf den Speicher von Hersteller B (Tabelle 12) inkl. 3x Festflansch DN50, 6 Muffen ½ " für Temperaturfühler und 2 cm PUR-Isolation, 1x Schichtladelanze, Mannloch mit Dichtung und Schrauben

Wird von einem mittleren Skaleneffekt von 50 % bezogen auf den Preis des Speichers ausgegangen, ergeben sich mit den weiteren Preisen der Komponenten gemäss Tabelle 19 Gesamtkosten von 1'855 CHF. Dies liegt leicht über den Kosten des Referenzspeichers mit Isolation von 1'750 CHF für 1'000 Liter gemäss Kapitel 4.4.2. Wird das optimierte Speicherkonzept mit einem Frischwassermodul zu Kosten von 2'600 CHF gemäss ReSoTech 1 (Philippen et al., 2016) kombiniert, ergeben sich Kosten für einen Warmwasserspeicher inkl. Frischwassermodul von 4'455 CHF.

4.6 Fazit zum modularen Speicher

Es konnte gezeigt werden, dass quaderförmige Bauformen nur theoretisch bessere Raumausnutzungen aufweisen. Die Form bedingt, dass sie nur schon den statischen Druck des Speicherwassers schlecht aufnehmen können. Deshalb müssen bei quaderförmigen Speichern entweder grosse Wandstärken oder ein externer Rahmen eingesetzt werden. Dies wiederum verschlechtert die Raumausnutzung dieser Bauform so weit, dass zylindrische, drucklose Speicher die gleiche Raumausnutzung erreichen. Weiter konnte aufgezeigt werden, dass es sich aus monetären und fertigungstechnischen Gründen nicht lohnt, von der bewährten zylindrischen Form abzuweichen. Das Design des Speichers ist somit vor allem von der Materialwahl, der Produktionsweise und der verwendeten Einbauten abhängig. Das ursprüngliche Entwicklungsziel, einen quaderförmigen Speicher zu entwickeln, wurde deswegen zugunsten eines zylindrischen geändert.

Es wurde beim Prototypen mit einem externen Frischwassermodul gearbeitet, da diese dem Kunststoffspeicher wesentliche Vorteile bringen. Es kann auf schwere Wärmetauscher-

Einbauten verzichtet werden, das eingesetzte Kunststoffharz muss nicht lebensmittelecht sein und es hat Vorteile bezüglich Schutz vor Legionellenvermehrung. Der Anschluss des Speichers an das System mit externen Wärmetauschern kann helfen, den Speicher für verschiedene Anwendungen verwenden zu können, während immer die gleiche Speicherhülle produziert und eingesetzt werden kann. Der Planer wählt für jedes System die passenden externen Wärmetauscher.

Weiter wurde aufgezeigt, dass es möglich ist, mit Kunststoff einen Speicher zu designen, welcher zu ähnlichen Preisen angeboten werden kann, aber wesentlich leichter als herkömmliche Speicher ist. Dies reduziert den Aufwand beim Transport und bei der Installation. Bei der Kostenabschätzung wurde von Skaleneffekten ausgegangen, die auf Angaben von Speicherherstellern basieren.

Das Gewicht des optimierten Speichers/Prototyps fällt gemäss einer Offerte des Herstellers rund zwei Mal so hoch aus, wie in den FEM-Berechnungen zu den Wandstärken ermittelt. Mit dem Speicherhersteller muss geklärt werden, in wie weit im Produktionsprozess die Materialstärken reduziert werden können, ohne die Stabilität des Speichers und die Herstellung zu beeinträchtigen.

Mit der Verwendung der Speicher in Systemen mit Wärmepumpen ist es sehr wichtig, dass die Speicher für die bei Wärmepumpen auftretenden hohen Volumenströme ausgelegt sind und dass sie über eine funktionierende Strömungsberuhigung verfügen. Die Verwendung von Schichtladelanzen zur Beladung der Speicher mit Wärmepumpen hat sich als schwierig erwiesen. Die getestete Strömungsberuhigung ist wesentlich einfacher an die Fließgeschwindigkeiten grosser Wärmepumpen anzupassen.

In den Versuchen konnte die Temperatur der verschiedenen Zonen im Speicher durch Anlegefühler aussen auf der Hülle der Speicher ermittelt werden. Der Verzicht auf Tauchfühler macht die Durchdringungen der Speicherhaut für die Temperaturfühler überflüssig, was wiederum den Speicher nochmals ein wenig preiswerter machen wird. Zu empfehlen ist, dass die Klemmleisten für Temperaturfühler so optimiert sind, dass die Position der Fühler definiert ist und eine integrierte Kabelführung angebracht wird. Dies verhindert, dass bei der Montage der Isolation Fühler abgerissen werden können.

Die Clusterung/Modularität des Speichers konnte nicht überprüft werden, da durch die Dichtigkeitsprobleme und die Verzögerung bei der Herstellung der Klöpperböden die Zeit nicht mehr gereicht hat um einen Test der Clusterung durch horizontale Verbindungen zu testen. Um die Modularität mit geringem Installationsaufwand zu erreichen, könnte der Speicher mit Kunststoffrohren miteinander verbunden werden. Diese sind sehr günstig und halten den thermischen Lasten des Systems stand. Um ein möglichst installationsfreundliches System zu haben sollten die Rohre mit einem Stecksystem ausgestattet sein.

Ebenfalls aus Zeitgründen konnte die Integration des Drainback-Volumens in den Speicher nicht mehr getestet werden. Allerdings kann dieses auf gleiche Art wie das getestete speicherintegrierte Druckausgleichs-Volumen realisiert werden. Beim Test des Druckausgleichsvolumens im Labor zeigten sich keine Probleme.

5 Wasser-Drainback

Mit den Arbeiten zu Drainback sollen verfügbare Entwicklungen und Erkenntnisse aus den vorangehenden Kapiteln in einer Drainback-Anlage kombiniert werden, in der Wasser als Wärmeträgerfluid eingesetzt wird. Aus zeitlichen Gründen standen hierfür keine Kollektoren mit Überhitzungsschutz zur Verfügung und auch kein im Projekt entwickelter Speicher. Es wurde stattdessen eine kleine drucklos betriebene Drainback-Anlage mit marktverfügbaren Kollektoren erstellt. Die Kollektorverrohrung wurde mit werkzeugfrei montierbarer Kollektorverrohrung ausgeführt. Ziel war es, das Verhalten der Rohre und der Drainback-Anlage zu prüfen und zu demonstrieren. Vorgängig wurden zudem marktverfügbare Kollektoren bezüglich ihrer Entleerbarkeit und somit ihrer Eignung für Drainback untersucht und die Ausbreitung von hohen Fluidtemperaturen in der Kollektorfeldverrohrung nach Entleerung von Kollektoren analysiert.

5.1 Methodik

Da besonders im deutschsprachigen Raum nur wenige Literaturquellen zu solarthermischen Drainback-Anlagen vorhanden sind und insbesondere keine umfassende Technologiebeschreibung gefunden werden konnte, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um den Stand des Wissens zu dokumentieren. Hierfür wurde stark auf ein englischsprachiges Review der Universität Kassel zu Drainback zurückgegriffen (Botpaev et al. 2016) und mit weiteren Informationsquellen ergänzt.

Mit Versuchen auf dem Testdach des SPF wurde die Restwassermenge in einzelnen Kollektoren und in Kollektorreihen gemessen, um die Entleerbarkeit der Komponenten zu ermitteln und Rückschlüsse auf die Dampfproduktion nach Entleerung der Kollektoren durch das Verdampfen des verbleibenden Restwassers bei hoher Einstrahlung ziehen zu können.

Zusätzlich wurden die Entleerungstests auf einem Tracker mit angehängter Vor- und Rücklaufleitung durchgeführt. Damit wurde ermittelt, welchen Temperaturen die Verrohrung ausgesetzt ist, um Rückschlüsse auf die Aussagekraft der Dampftests (Kapitel 2.3) ziehen zu können.

Es wurde eine drucklos betriebene Drainback-Anlage mit vier Harfenkollektoren (8.5 m² Absorberfläche) auf dem Testdach installiert und betrieben. Die Temperaturen der Komponenten wurden mit zahlreichen Temperaturfühlern aufgezeichnet. Für die Verrohrung wurde ein Rohrsystem aus Kunststoff mit Steckfittings verwendet, dessen Tauglichkeit zuvor in den Dampftests (Kapitel 2.3) bestätigt wurde.

5.2 Status quo von Wasser-Drainback Solaranlagen

Einen sehr guten Überblick über den aktuellen Wissensstand bei solarthermischen Drainback-Anlagen gibt die englischsprachige Review-Studie von Botpaev et al. (2016), welche hier in Teilen wiedergegeben wird und mit weiteren Informationsquellen ergänzt wird.

In der Studie Botpaev et al. (2016) werden Drainback-Systeme (DBS) definiert als selbst-entleerend im Sinne, dass die Wärmeträgerflüssigkeit bei Stillstand der Umwälzpumpe im

Solarkreis schwerkraftgetrieben von alleine in einen Auffangbehälter fliesst und die Kollektoren und ein Teil der Hydraulik somit von Gas, meistens Luft, gefüllt sind. Beim erneuten Start der Umwälzpumpe wird der Solarkreis wieder vollständig von der Wärmeträgerflüssigkeit gefüllt und das Gasvolumen wird in den Auffangbehälter verdrängt. Davon unterschieden werden sogenannte "Steam-back-" und "Draindown"-Systeme. Steam-back-Systeme entleeren die Kollektoren im Falle der Stagnation durch Verdampfen der Wärmeträgerflüssigkeit. Die Volumenzunahme wird in Expansionsgefässen aufgenommen. Bei Draindown-Systemen wird die Wärmeträgerflüssigkeit, falls das System entleert werden muss, in einem Ablauf entleert worauf die Anlage beim erneuten Betrieb (ggf. automatisch) wieder befüllt werden muss.

Diverse Literaturquellen nennen die in Tabelle 20 und Tabelle 21 aufgeführten Vorteile bzw. Risiken, welche sich durch die Drainback-Technologie bei Solarthermieanlagen ergeben.

Tabelle 21: Vorteile von Drainback-Systemen (DBS) gemäss dem Review von Botpaev et al. (2016). Die Sammlung bezieht sich auf diverse Literaturquellen, siehe Review.

Potentielle Vorteile von Drainback-Systemen	Begründung / Erläuterung
Kosteneinsparungen	Grundsätzlich sind Einsparungen wegen vielen der in der Tabelle aufgeführten Vorteile zu erwarten. Das Erreichen der Einsparungen ist jedoch abhängig von der erfolgreichen Umsetzung der möglichen Vorteile.
Reduktion der Anzahl Komponenten	Je nach DBS-Typ in erster Linie Verkleinerung/Wegfall von Expansionsgefäss, Sicherheitsventil, Schwerkraftbremse, bei System mit Pufferspeicher und Wasser im Solarkreis kann evtl. auch der Wärmetauscher Solar/Speicher eingespart werden.
Verringerter Wartungsaufwand	Glykol als Wärmeträgerfluid: Wegen Überhitzungsschutz kaum bzw. keine Alterung des Glykols (kein Ersatz notwendig, keine Probleme durch Verblocken bei Glykol-Cracken). Wartung vereinfacht, da das System im Ruhezustand teilweise entleert ist.
Kein Überdruck	Gilt für nicht-druckbeaufschlagte DBS. Dadurch höhere Betriebssicherheit
Kein Ausfall durch Luft im System	DBS müssen derart gebaut sein, dass sie den Luftein- und -austrag im Kollektorkreis problemlos bewältigen. Bei Standard-Systemen ist Luft im System ein bekanntes Problem das zum Systemausfall führen kann.
Verbesserter Ertrag	Beim Einsatz von Wasser als Wärmeträgerfluid ist die Leistung der Wärmetauscher erhöht (geringere Viskosität und erhöhte Wärmekapazität von Wasser). Wird der Solar-Wärmetauscher weggelassen (Direktbeladung des Speichers), erhöht sich die Kollektoreffizienz wegen tieferer Durchschnittstemperaturen
Einsatz (günstiger) Kunststoffkomponenten möglich	Da der Systemdruck niedrig und die Temperaturen unter 100 °C gehalten werden können – je nach verwendetem Kollektortyp auch in den Kollektoren selber oder aber in den restlichen Systemabschnitten – können günstige Kunststoffe einfacher eingesetzt werden.
Schutz gegen Vereisung	Durch das Ablassen des Wärmeträgerfluids aus Kollektor und aussenliegenden Solarleitungen, sind DBS grundsätzlich gegen Schäden durch Vereisung des Wärmeträgerfluid geschützt
Schutz gegen Überhitzung	Durch das Ablassen des Wärmeträgerfluids aus den Kollektoren sind DBS gegen hohe Temperaturen in den Rohrleitungen und in anderen Komponenten geschützt

Potentielle Vorteile von Drainback-Systemen	Begründung / Erläuterung
Eignung für unregelmässigen Wärmebedarf	Da lange Stagnationsphasen nicht zu Problemen führen, können DBS gut bei stark schwankendem Wärmebedarf eingesetzt werden, wie z.B. in Schulen, Sportanlagen, Hotels, in der Industrie etc.
Einsatz von Wasser als Wärmeträgerfluid	<ul style="list-style-type: none"> - keine chemische Degradation, welche bei Glykol teils einen korrosiven Angriff auf Systemkomponenten zur Folge hat - die Wärmeübertragungseigenschaften von Wasser sind besser als die von Wasser-Glykol-Gemischen (bzgl. Wärmeleitung und -kapazität und Viskosität) - Wasser ist günstig, einfach erhältlich und ungiftig

Tabelle 22: Nachteile von Drainback-Systemen (DBS) gemäss dem Review von Botpaev et al. (2016). Die Sammlung bezieht sich auf diverse Literaturquellen, siehe Review.

Potentielle Nachteile von Drainback-Systemen	Begründung / Erläuterung
Anfälligkeit für Fehler bei der Installation	Die Kollektoren und die dem Frost ausgesetzten Abschnitte der Verrohrung müssen erfolgreich entleeren beim Pumpenstopp. Dies setzt eine sorgfältige Installation der Anlage voraus. Wird zur Sicherheit Frostschutz eingesetzt, fallen einige der in Tabelle 20 aufgeführten Vorteile von DBS weg.
Kavitation in drucklosen DBS	Verfügt ein DBS über keinen Vordruck im Solarkreis, ergeben sich in der Regel niedrige Drücke im Ansaugstutzen der Solarpumpe, was zu Kavitation in der Pumpe führen kann. Probleme mit Lärm und eine Zerstörung des Pumpenkopfs können die Folge sein.
Beschränktes Angebot geeigneter Komponenten	Insbesondere bei Kollektoren und Solarpumpen besteht ein beschränktes Angebot wegen der geforderten Entleerbarkeit.
Korrosion	Offene DBS, welche im Austausch mit der Atmosphäre sind, müssen mit korrosionsbeständigen Komponenten erstellt werden. In geschlossenen DBS können auch andere Komponenten eingesetzt werden – allerdings ist die Sicherstellung der Gasdichtheit nicht einfach, wenn im Kollektorfeld ein Unterdruck entstehen kann, da gewöhnliche Dichtungen in Fittings bei Unterdruck nicht gut abdichten und dadurch Luft ins System eindringen kann (relevant für nicht druckbeaufschlagte DBS).
Hydraulischer Abgleich	Der Abgleich der Durchflüsse parallel verschalteter Kollektorreihen kann insbesondere wegen der Anwesenheit von Luft (wegen der DB-Funktion) erschwert sein.
Geräuschentwicklung	Wenn das Fluid im Vorlauf in das Drainbackgefäss fliesst, können je nach Bauform des Gefässes unerwünschte Geräusche entstehen (Plätschern o.ä.)
Biofilmbildung	In offenen DBS können sich Mikroorganismen ansiedeln, deren Ablagerungen stören können.
Niedriger Siedepunkt	Falls das DBS derart konzipiert ist, dass in den Kollektoren ein Unterdruck entsteht, muss der dadurch erniedrigte Siedepunkt des Fluids berücksichtigt werden.

Typische Konfigurationen von Drainback-Systemen (DBS)

DBS können darin unterschieden werden, ob sie im Austausch mit der Atmosphäre sind (offene Systeme) oder nicht (geschlossene Systeme). Offene Systeme sind nur dem hydrostatischen Druck und dem Druckaufbau der Pumpe ausgesetzt. Als übliche Drücke in geschlossenen Systemen werden 1.1 bis 3 bar angegeben.

Gemäss Botpaev et al. (2016) sind weltweit aktuell rund 50 DBS auf dem Markt verfügbar, wobei keine dieser Systeme identisch sind bzgl. Hydraulik und Betrieb. Abbildung 76 zeigt einige Beispiele für hydraulische Konfigurationen von DBS, wobei gemäss Einschätzung der vorliegenden Studie die Konfigurationen e), f) und g) am gängigsten sind. Die Lage des Drainback-Volumens relativ zum Kollektorfeld ist eine wichtige Grösse, da sie bestimmt, welchen hydrostatischen Druck die Umwälzpumpe beim Befüllen des Solarkreises überwinden muss. Das DB-Volumen kann auf verschiedene Höhen im System eingebaut werden – direkt beim Kollektorfeld, vor dem Speicher (Abbildung 76 e), oder auch innerhalb des Speichers (Abbildung 76 a, b, f, g).

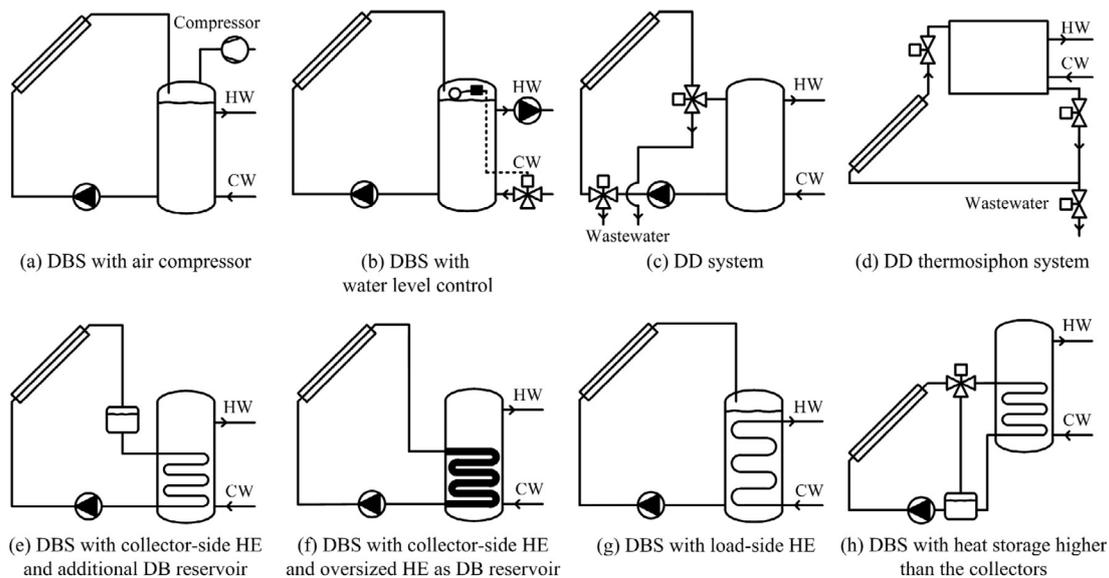


Abbildung 76: Typische hydraulische Konfigurationen von Drainback-Systemen bzw. Draindown-Systemen (c, d), entnommen aus Botpaev et al. (2016) (HW: Warmwasser, CW: Frischwasser).

Gemäss Literatur-Review haben DB-Systeme mit niedrigen Durchflussraten ("low-flow-Systeme") einen um 10 - 20 % höheren Solarertrag als solche mit hohen Durchflussraten ("high-flow-Systeme"). Als Durchflussrate für ein untersuchtes Low-Flow-System werden 9 Liter pro Quadratmeter Kollektorfläche und Stunde angegeben.

Die Betriebsmodi von Drainback-Anlagen: Befüllen – Betrieb – Entleerung

Im Literatur-Review von Botpaev et al. (2016) werden wichtige Erfahrungen zu den drei Betriebsmodi von Drainback-Anlagen zusammengefasst.

a) Befüllvorgang

- Der Durchfluss in der Vorlaufleitung des Kollektorfeldes muss gross genug sein, dass das Gasvolumen in der Leitung während des Befüllvorgangs vom Wärmeträgerfluid verdrängt werden kann. Eine zu schwache Pumpe oder ein zu gross gewählter Rohrquerschnitt können hier zu Problemen führen.
- Der Gegendruck, den die Pumpe beim Befüllen überwinden muss, ist am höchsten, wenn das Wärmeträgerfluid den höchsten Punkt (Kollektor-Auslass) erreicht hat. Mit Erreichen des "siphonischen Regimes", also einem vollständig fluid-gefüllten Vorlaufrohr, nimmt der Gegendruck wieder etwas ab. Danach ist das Abschalten einer der Pumpen möglich, falls zwei Pumpen in Serie eingesetzt werden, bzw. kann die Leistung reduziert werden, falls eine regelbare Pumpe eingesetzt wird. Der Befüllvorgang dauert üblicherweise mehrere Minuten.
- Der Zusammenhang von minimal erforderlichen Durchflussgeschwindigkeiten zur erfolgreichen Entlüftung und dem inneren Rohrquerschnitt der Vorlaufleitung wurde von verschiedenen Autoren für unterschiedliche Rahmenbedingungen mit teils widersprechenden Ergebnissen untersucht. Für Rohre mit Durchmessern zwischen 10 mm und 40 mm liegen diese Geschwindigkeiten zwischen ca. 0.15 und 0.7 m/s, wobei keine lineare Korrelation festgestellt werden kann (Abbildung 77). Anhand der Literatur lässt sich demnach ein naheliegender Einfluss des Innendurchmessers auf die minimale Fluidgeschwindigkeit beim Befüllen nicht ableiten.
- In Botpaev et al. (2017) präsentieren die Autoren experimentelle Untersuchungen zur Befüllung von DB-Anlagen. Hier wird erwähnt, dass bei drei Szenarien ein Zuschlagen (siphonisches Regime) erreicht wird: a) in vertikalen Abschnitten des Vorlaufrohrs b) bei Einschnürungen und c) bei Wechselsprung an horizontalem Rohr (geht bei kleinerem Volumenstrom, kann aber länger dauern). Der minimale Zuschlagvolumenstrom ist abhängig von Rohrdurchmesser, Wassertemperatur, Länge des vertikalen Vorlaufs < 1 m, von den Biegeradien der Rohre. Die Autoren geben auch empirisch ermittelte Berechnungsformeln für den minimalen Befüllvolumenstrom an.
- Bei Einsatz eines Glykol-Wasser-Gemisches als Wärmeträgerfluid können die Befüllgeschwindigkeiten aufgrund der höheren Viskosität geringer sein.
- Parallel verschaltete Kollektorreihen können mitunter nur schlecht entlüftet werden beim Befüllen, insbesondere, wenn sie auf verschiedenen Höhen liegen. Die unteren Reihen werden meist als erstes entlüftet, was die Entlüftung der darüber liegenden Reihen stört. Für grosse Kollektorfelder wurde als Lösung dieses Problems der Einsatz von je einem Ventil pro Kollektorreihen-Anschluss vorgeschlagen. Während des Befüllvorgangs kann so jede Reihe einzeln befüllt resp. entlüftet werden.
- Gemäss Einschätzung von Botpaev et al. (2016) sollte das Themengebiet des Verhaltens von Luft in Rohrleitungen (bzgl. Eintrag, Entfernung, Umgang) weitergehend untersucht werden.

b) Betrieb

- Gemäss Review unterscheidet sich der Betrieb von Drainback-Systemen nicht grundlegend vom Betrieb nicht-entleerer Systeme.
- Für nicht druckbeaufschlagte DBS ergibt sich jedoch die Besonderheit, dass sich das Wärmeträgerfluid im Kollektor im Betrieb in der Regel im Unterdruck (< 1 bar Absolutdruck) befindet. Grund dafür ist der hydrostatische Druck, der sich durch die Anwesenheit von Luft im DB-Volumen und durch die Schwerkrafteinwirkung auf das

Fluid in den Anschlussleitungen ergibt. Stellt sich Unterdruck im oberen Bereich der DBS ein, resultieren v.a. zwei potenzielle Probleme. Einerseits ist es möglich, dass via Dichtungen der Rohranschlüsse Luft in das hydraulische System gelangt, da marktübliche Anschlüsse in der Regel nur dichten, wenn der Innendruck grösser ist als der Atmosphärendruck. Andererseits sinkt wegen dem Unterdruck der Siedepunkt des Wärmeträgerfluids, was zu negativen Folgen führen kann, wie Teilstagnation in parallelen Rohrleitungen der Absorber. Zusätzlich kann bei offenen Systemen der Atmosphärendruck einen direkten Einfluss auf die Verdampfungstemperatur haben, was bei in grosser Höhe über dem Meer installierten Anlagen berücksichtigt werden muss.

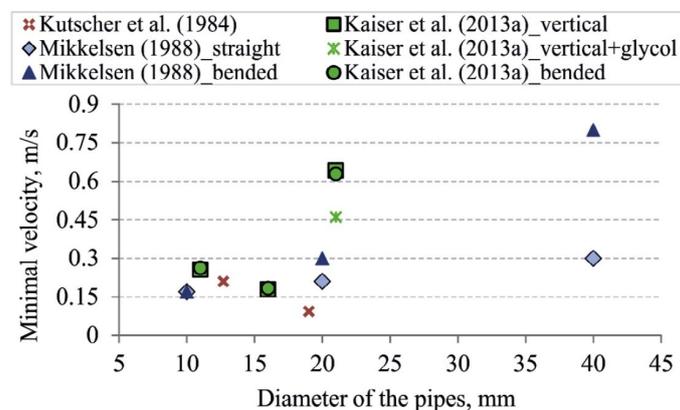


Abbildung 77: Die minimal erforderlichen Durchflussgeschwindigkeiten zur erfolgreichen Entlüftung der Vorlaufleitung von DBS bei der Befüllung aus der Literatur zeigen keine zu erwartende Korrelation mit dem Innendurchmesser der Vorlaufleitung. Aus Botpaev et al. (2016).

Reduziert oder verhindert werden kann der Unterdruck z.B. durch die Platzierung des DB-Volumens unmittelbar unterhalb oder in der Nähe der Kollektoren oder durch den Einbau einer starken Querschnittsverjüngung ("Blende") in der Vorlaufleitung. Die Pumpe baut wegen der Düse mehr Druck auf, allerdings mit der Folge eines dauerhaft höheren Elektrizitätsverbrauchs der Pumpe.

Weitere relevante Themen im Betrieb von DBS sind gemäss Botpaev et al. (2016):

- Luftansaugen durch die Pumpe im DB-Volumen. Hier müssen die Geometrie /Positionierung von Gefäss, Vorlaufeinlass und Auslass entsprechend ausgeführt werden und auch der Füllstand im Betrieb passend eingestellt werden, damit ein Ansaugen von Luft verhindert wird.
- Korrosion kann bei Systemen entstehen, die mit der Atmosphäre im Austausch stehen oder bei denen im Kollektorfeld Unterdruck entsteht (Luftansaugen via Dichtungen). Bei Einsatz von Kunststoffkomponenten, wie zum Beispiel einem Drainback-Gefäss aus GFK, kann Sauerstoff durch die Kunststoffwände in das Fluid diffundieren, was zu Korrosionsschäden führen kann.⁷⁸
- Falls Wasser als Wärmeträgerfluid eingesetzt wird: Vereisung der Rohrleitungen, was zur Zerstörung der Leitung führen kann. Neben dem Fall, dass Rohrleitungen nicht vollständig entleeren, wird auch der Fall aufgeführt, dass Rohre beim Befüllen durch

⁷⁸ Persönl. Kommunikation Salerno Engeler GmbH, 2019

Eisbildung verschliessen, falls die Wandtemperatur der Rohre unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Es wird eine Untersuchung zitiert, bei der ein 32 Meter langes Kupferrohr (28/25.6 mm) bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur von Wasser (Einlass $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) bei einer Durchflussrate von 300 L/h zueiste.

c) Entleerung

Die Entleerung des oberen Anlagenteils eines DBS findet immer statt, wenn die Umwälzpumpe im Solarkreis ausgeschaltet wird.

- Rohrdurchmesser: es sollte ein minimaler innerer Durchmesser von 14 mm nicht unterschritten werden. Bei kleineren Querschnitten können die Kapillarkräfte beim Fluid-Meniskus im Rohr eine Entleerung verhindern.
- Das Rohrende im DB-Volumen sollte im Fall von Rohren mit geringem Durchmesser schräg angeschnitten sein oder es sollte ein kleines Luftloch knapp über dem Rohrende vorhanden sein, damit die Entleerung erfolgreich starten kann, indem Luft ins Rohr einströmen kann und nicht von der Oberflächenspannung des Wassers daran gehindert wird.
- Grundlegende Varianten für entleerbare Systeme zeigt Abbildung 78:
 - Bei Variante a) werden als potenzielle Probleme genannt, dass im DB-Volumen wegen dem fallendem Fluid Geräusche entstehen oder Luftblasen von der Pumpe angesaugt werden können.
 - Bei den Varianten b) und c) ist dies dadurch gelöst, dass die Vorlaufleitung im DB-Volumen bis in das stehende Fluid im Tank reichen. Die Entleerbarkeit wird erreicht durch eine Bohrung in der Vorlaufleitung (b) bzw. einem Belüftungsventil (c).
 - Eine weitere Variante ist der Einbau eines Belüftungsventils am Hochpunkt der Anlage, wobei meist Luft aus dem DB-Volumen via eine Luftleitung durch dieses Ventil eingelassen wird.
- Für den Bau der Vorlaufleitung im DB-Volumen und der Platzierung von Öffnungen zur Belüftung gibt es unterschiedliche Konzepte, von denen einige in Botpaev et al. (2016) aufgeführt werden. Gemäss Autoren fehlen Untersuchungen, mit denen die verschiedenen Konzepte bezüglich ihrer Eignung verglichen werden.

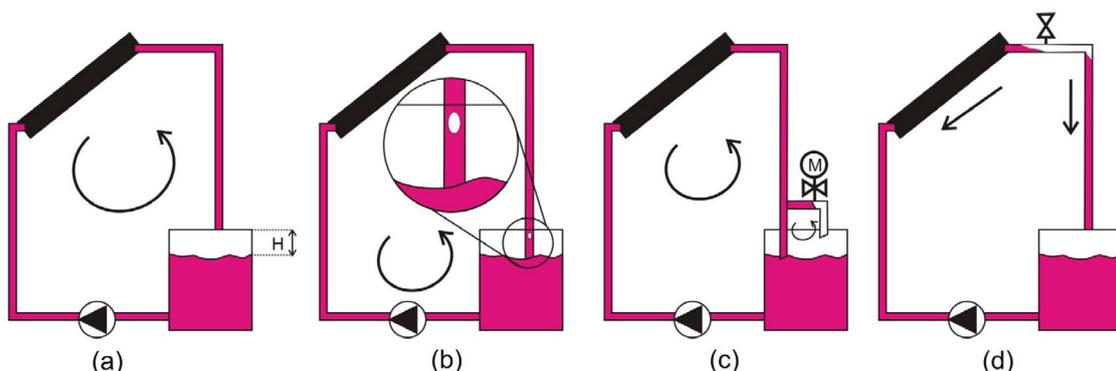


Abbildung 78: Grundsätzliche Konzepte für entleerbare Systeme – vereinfacht dargestellt mit dem Speicher als Drainback-Volumen. Die Pfeile geben die Richtung an, in die das Wärmeträgerfluid bei der Entleerung fließt. Aus Botpaev et al. (2016).

Komponenten von Drainback-Systemen

- **Kollektoren:** es müssen Kollektortypen eingesetzt werden, welche entleerbar sind, d.h. das Wasser muss bei der Entleerung vollständig aus dem Kollektor fließen können. Bei Flachkollektoren müssen die Absorberrohre vertikale Harfen sein oder Mäander mit leichter Neigung aus der Horizontalen. Die Kollektoren müssen mit passenden Neigungen montiert werden, damit die Sammelleitungen entleerbar sind.
- **Speicher:** es können gewöhnliche Speicher eingesetzt werden. Hier ist zu bemerken, dass der mögliche korrosive Angriff von Stahl durch den Sauerstoff im Gasvolumen berücksichtigt werden muss. Ein Spülen der Anlage mit Stickstoff bei der Installation kann dieses Risiko eingrenzen.
- **Drainback-Gefäss:** auf dem Markt gibt es eine Vielzahl an Konzepten von Drainback-Gefässen, welche im Solarkreis integriert werden. Meist bestehen die Gefässe aus rostfreiem Stahl oder Kunststoff. Daneben gibt es DB-Konzepte, bei denen das DB-Volumen im Speicher integriert ist (als Teil vom Speichervolumen oder in einem Wärmetauscher mit vergrössertem Querschnitt). Bei Stillstand sollte das DB-Gefäss zu circa 75 % - 90 % gefüllt sein und im Betrieb zu 15 % - 50 %. Der Füllstand im Gefäss sollte regelmässig kontrolliert werden, weswegen oft ein Schauglas integriert ist. Dies führt gemäss Hersteller in der Regel aber zu einer relevanten Erhöhung der Systemkosten.
- **Umwälzpumpe:** als Besonderheit von DBS muss der sich bei der Befüllung einstellende hydrostatische Druck vom DB-Volumen bis zum Hochpunkt der Anlage von der Pumpe überwunden werden können. Die Umwälzpumpe muss entsprechend grösser dimensioniert sein und für den anschliessenden Betrieb herunterregelbar sein, damit der Elektrizitätsbedarf der Pumpe klein bleibt. Alternativ können zwei Pumpen eingebaut und nur eine der beiden Pumpen nach dem Befüllvorgang betrieben werden. Hier kann sich das Mitdrehen der ausgeschalteten Pumpe negativ auf die Nutzungsdauer auswirken. Bei nicht druckbeaufschlagten DBS muss saugseitig Kavitation vermieden werden, weswegen die Haltedruckhöhe der spezifischen Pumpe eingehalten werden muss (Mugnier et al. 2011).
- **Systemsteuerung:** als Besonderheit der DBS muss in der Startphase das System mit maximaler Pumpenleistung befüllt werden. Die Dauer dieser Entlüftung variiert mit den Anlagen und kann in der Grössenordnung von einer halben bis hin zu drei Minuten dauern.
- **Wärmeträgerfluid:** durch das Entleeren der Kollektoren während der Stagnation der Anlage wird das Fluid vor Temperaturen über 100 °C geschützt, was bei Einsatz von Glykol die Lebensdauer des Fluids erhöht. Wird Wasser als Wärmeträgerfluid eingesetzt, muss neben der Vereisungsthematik auch Korrosion beachtet werden. Verstärkt wird die Korrosionsproblematik durch die Anwesenheit von Sauerstoff im Gasvolumen der Anlage. Das Risiko von Korrosionsschäden kann durch das Spülen des Gasvolumens mit Stickstoff bei der Installation der Anlage reduziert werden.
- **Verrohrung:** die Mehrheit der DBS wird mit Kupferrohren erstellt. Einige zitierte Autoren haben in DBS aber auch Leitungsrohre aus PB, chloriertem Polyvinylchlorid (CPVC) und PE-X eingesetzt. Neben der verringerten Temperaturbeständigkeit dieser organischen Materialien werden als weitere kritische Punkte eine geringe UV-Beständigkeit, das Risiko von Absenken der flexiblen Leitungen und die Haltbarkeit aufgeführt. Für den Kollektoranschluss wird zum Schutz der Kunststoffleitungen vor zu hohen Temperaturen empfohlen, entweder nicht isolierte Kupferleitungen von je nach

zitiertem Autor 0.33 m bzw. 0.9 m Länge oder ein isoliertes Kupferrohr von min. 0.78 m Länge als ersten Leitungsabschnitt im Vorlauf einzusetzen.

- **Neigung der Rohrleitungen:** alle entleerbaren Rohrabschnitte sollten eine stetige Neigung aufweisen. Die empfohlene minimale Steigung liegt gemäss Literatur bei 1 cm/m. Horizontale Abschnitte ohne Steigung stören die Entleerung nicht (sind mutmasslich aber risikoreich, da sich Rohrbrieden bzw. das Dach mit der Zeit setzen können etc.).
- **Durchmesser der Rohrleitungen:** in der Literatur wird eine grosse Bandbreite für die Wahl des Rohrdurchmessers für DBS angegeben. Insbesondere die Vorlaufleitung muss richtig dimensioniert werden. Hier kann als Regel genommen werden, dass die VL-Leitung eine Grösse kleiner als für konventionelle Solaranlagen üblich (i.d.R. auch kleiner als die RL-Leitung) ausgelegt wird. Für grosse Anlagen mit vielen parallelen Kollektorreihen wird erwähnt, dass zum Erreichen einer genügend schnellen Entleerung ggf. eine gross ausgelegte VL-Leitung gewählt werden muss unter Inkaufnahme einer Zweiphasenströmung in der Leitung.

5.3 Messungen der Dampfreichweite in einer Kollektorfeldverrohrung

Der im Projekt geplante Einsatz handelsüblicher Kunststoffleitungen aus dem Heizungsbau als Solarleitungen in Wasser-Drainback-Anlagen setzt voraus, dass nach der Entleerung des Kollektorfeldes keine zu hohen Temperaturen durch Verdampfung des Restwassers der Kollektoren entstehen, da hohe Temperaturen die Kunststoffleitungen thermisch zu stark beanspruchen könnten. Dabei verbleibt nach der Entleerung je nach Kollektortyp unterschiedlich viel Restwasser zurück. Dieses benetzt die innere Oberfläche der Absorberrohre und verbleibt in den Sammelleitungen der Kollektoren, wobei es diese je nach Gefälle der Leitungen und in Abhängigkeit möglicher Querschnittsreduktionen verschieden weit ausfüllen wird. Bei Sonneneinstrahlung verdampft das Restwasser, worauf der Wasserdampf aufgrund der Volumenzunahme während des Phasenwechsels in die Rohrleitungen gelangt.

Die Widerstandsfähigkeit von Kunststoffrohren gegenüber Temperaturen und Überdruck wird in Kapitel 2.3 untersucht. Parallel dazu wurden mit der nachstehenden Untersuchung die Maximaltemperaturen in den Hydraulikleitungen nach der Entleerung für eine spezifische Drainback-Installation analysiert. Dazu wurde die Reichweite hoher Temperaturen durch Wasser- oder Wasserdampfeintrag in die Kollektorfeldverrohrung nach der Entleerung eines Kollektorfeldes für Harfen- und für Mäanderkollektoren gemessen. Ausserdem wurde die Restwassermenge in einzelnen Kollektoren und im Kollektorfeld bestimmt.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wurden je vier Kollektoren mit ihren innenliegenden Sammelleitungen parallel verschaltet auf einem Tracker installiert (Schema siehe Abbildung 79). Als Vor- und Rücklaufverrohrung wurden jeweils 15 Meter lange handelsübliche Vollkunststoffrohre aus PE-Xc mit 16 mm Aussendurchmesser und 2 mm Wandstärke verwendet. Die Rohre wurden mit EPDM-Elastomerschaum mit 13 mm Dämmstärke wärmegeklämmt und, aufgewickelt auf Trommeln mit stetiger abfallender Neigung, an den Tracker montiert (Abbildung 80 a/b).

Die Enden der Rohre wurden nach der Entleerung mit Handhähnen verschlossen. An einem Ende wurde ein analoges Manometer montiert, mit dem der Überdruck im System gemessen wurde. Die Fluidtemperaturen wurden ca. 20 cm nach Vor- und Rücklaufanschluss mit Eintauch-Temperaturfühlern und danach in 1-Meter-Schritten mit Anlegefühlern unter der Wärmedämmung gemessen. Zudem wurde in einem Kollektor des Feldes ein Temperaturfühler zwischen den Absorberrohren in einer angelöteten Fühlerhülse montiert (im oberen Drittel des Absorbers). Die Globalstrahlung wurde in der Kollektorebene gemessen. Durch das Nachführen mittels Tracker kann die Einstrahlungsstärke für längere Zeit auf einem hohen Niveau bleiben als bei üblichen, nicht-nachgeführten Installationen. Die Belastung durch hohe Temperaturen in den durchgeführten Versuchen war entsprechend etwas höher.

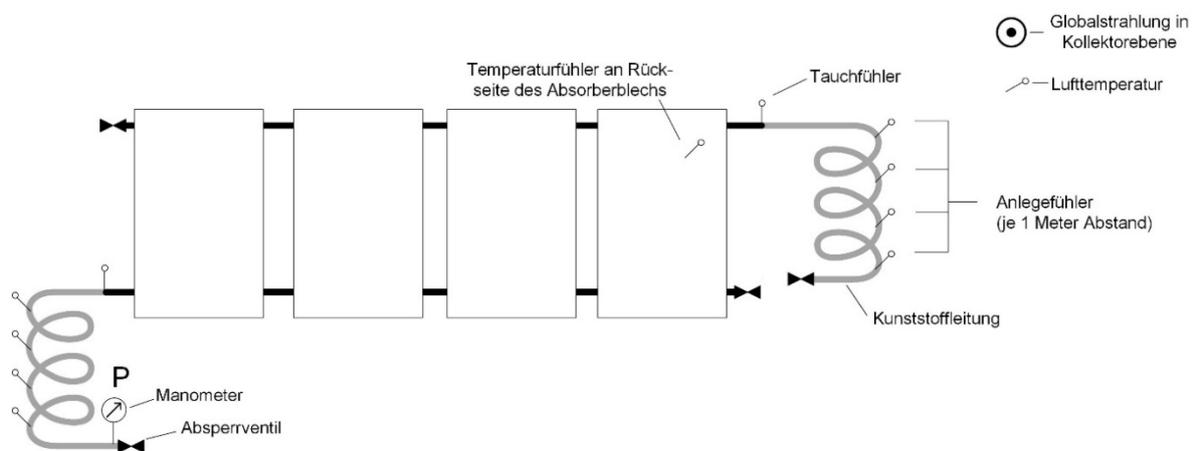


Abbildung 79: Schema des Versuchsaufbaus zu Drainback-Entleerung mit vier parallel verschalteten Kollektoren und mit Anschlussleitungen mit stetigem Gefälle. Es wurden Harfenabsorber und Mäanderabsorber getestet.

Der Anschluss der Kollektorfelddämmung erfolgte über Messing-Fittings. Im Anschluss an die rund 15 cm langen Messing-Armaturen wurden Übergänge montiert und auf das Kunststoff-Rohrsystem gewechselt (Abbildung 80: c & d). Neben Harfenkollektoren, die in Drainback-Anlagen üblicherweise eingesetzt werden, wurden auch Mäanderkollektoren getestet (Spezifikationen siehe Tabelle 22). Das Kollektorfeld mit Harfenkollektoren wurde mit drei unterschiedlichen Sammelrohr-Neigungswinkeln in Bezug auf die Horizontale installiert: neben den üblichen 0° (waagrecht) wurde auch mit Neigungswinkeln von $+2^\circ$ und -2° getestet, um den Fall von (richtig oder falsch) geneigt montierten Sammelrohren untersuchen zu können. Ist die Neigung derart, dass Wasser im unteren Sammelrohr verbleibt, muss mit einer höheren Dampfbelastung der Hydraulik gerechnet werden.⁷⁹

⁷⁹ Dieser Fall ist nur für Drainback-Anlagen mit Frostschutz im Wärmeübertragungsfluid relevant, da ohne Frostschutz das im Sammelrohr verbleibende Wasser im Winter gefrieren und den Kollektor zerstören würde. Bei Wasser-DB-Anlagen darf die Sammelleitung wegen Vereisung im Winter also ohnehin nicht falsch geneigt sein.

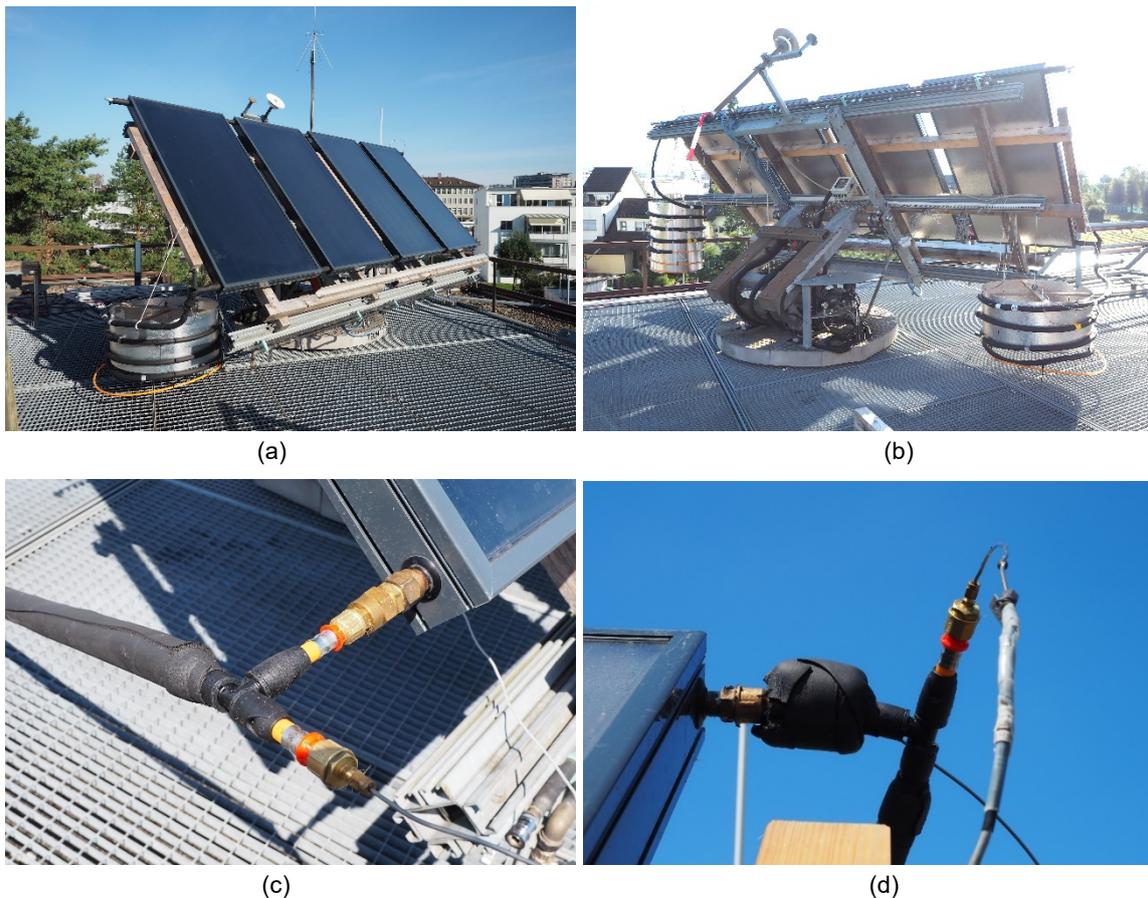


Abbildung 80: Aufbau des Drainback-Entleerungsversuchs auf dem Tracker. Vier Kollektoren wurden parallel verschaltet und der Sonne mit fixem Neigungswinkel von 45° nachgeführt. (a) & (b): Vorder- und Rückansicht mit stetig fallend aufgewickelter Vor- und Rücklaufverrohrung aus Kunststoff. (c) & (d): Anschlüsse des Kollektorfeldrücklaufs und -vorlaufs mit Temperatursensoren vor dem Anbringen der Wärmedämmung.

Tabelle 23: Spezifikationen der verwendeten Kollektoren (Datenquelle Harfe: SPF Online-Kollektorkatalog, SPF-Nr. C1098, Datenquelle Mäander: Hersteller STI GmbH)

Kollektortyp	Hersteller	Modell	Aperturfläche	Stagnations-temperatur	Füllvolumen	Nennweite Sammelrohr
Harfe (vertikal)	Sigurd technologie	Helioselec-234	2.14 m ²	199 °C	1.6 L	22 mm
Mäander (horizontal)	STI GmbH	FKF 200 V	1.82 m ²	210 °C	1.82 L	22 mm

Messung des Restwassers und Berechnung des Dampfvolumens

Die Reichweite hoher Temperaturen in der Verrohrung einer Solaranlage hängt neben ortsspezifischen Rahmenbedingungen, wie der Wärmeverluste der Verrohrung und der Leitungsführung, stark von der Restwassermenge in den Kollektoren nach der Entleerung und von der Verdampfungsleistung ab.

Die Restwassermenge (Tabelle 23) wurde für die untersuchten Harfen- und Mäanderkollektoren gemessen. Die Kollektoren bzw. die Kollektorreihen wurden hierfür erst zur

vollständigen Entlüftung mit Wasser gespült. Im Anschluss wurde das Wasser abgelassen, wobei keine Verrohrung an den Kollektoranschlüssen montiert war. Nachdem kein Wasser mehr aus den Anschlüssen getropft ist, wurde das verbliebene Wasser mit Druckluft ausgeblasen und in einem Gefäss gesammelt, welches anschliessend gewogen wurde.

Tabelle 24: Durchschnitt der gemessene Restwassermengen für verschiedene Sammelrohrneigungen in Millilitern (Neigung in Bezug auf die Horizontale; N: Anzahl Messungen).

	Restwasser bei Sammelrohrneigung		
	0°	+2°	-2°
1 Harfenkollektor	22 mL (N = 10)	14 mL (N = 10)	294 mL (N = 10)
Reihe aus 4 Harfenkollektoren	147 mL (N = 5)	140 mL (N = 5)	[1500 mL] ^{*)}
Reihe aus 4 Mäanderkollektoren	1900 mL (N = 2)	-	-

*) keine Messung vorgenommen – Berechnung anhand Geometrie

Bei genügend hoher Sonneneinstrahlung kann davon ausgegangen werden, dass nach einiger Zeit sämtliches Restwasser verdampft und mehrheitlich vom Kollektorfeld in die Rohrleitungen gelangt ist. Tabelle 24 gibt die berechneten Wasserdampfvolumina bei vollständiger Verdampfung der gemessenen Restwassermengen bei 100 °C und einem Atmosphärendruck von 1 bar an. Je nach Verdampfungsleistung im Kollektor und Kondensationsleistung in den Rohrleitungen ergeben sich unterschiedliche Dampfreichweiten. Der aus dem Kollektor austretende Dampf kann überhitzt sein, da der Absorber während der Austrocknung bei hoher Einstrahlung schnell sehr heiss wird und sich seiner Stagnationstemperatur von ca. 200 °C annähert.

Tabelle 25: Berechnetes Wasserdampfvolumen für die Restwassermengen aus Tabelle 23 für 100 °C und 1 bar (gemäss thermischer Zustandsgleichung idealer Gase, Neigung in Bezug auf die Horizontale).

	Dampfvolumen bei Sammelrohrneigung		
	0°	+2°	-2°
1 Harfenkollektor	38 L	24 L	507 L
Reihe aus 4 Harfenkollektoren	253 L	241 L	[2584 L] ^{*)}
Reihe aus 4 Mäanderkollektoren	3274 L	-	-

*) basiert auf geschätzter Restwassermenge

Dampfreichweite in einem Harfenkollektorfeld

Den Temperaturverlauf im Versuchsaufbau (Abbildung 80) über einen ganzen Tag nach einer Entleerung zeigt Abbildung 81. Die höchsten Temperaturen in den Rohrleitungen wurden durchgängig am Anschluss des Kollektorvorlaufs (T-VL) gemessen mit einem Maximalwert von 113 °C. Während ca. 5.8 Stunden treten am Vorlaufanschluss Temperaturen von 100 °C und darüber auf⁸⁰. Die Reichweite hoher Temperaturen in die Verrohrung liegt zwischen einem und zwei Metern: am Fühler T-VL-1m werden 95 °C gemessen – am Anlegefühler „T-VL-2m“

⁸⁰ Hier ist zu berücksichtigen, dass die Kollektoren auf dem Tracker der Sonne nachgeführt werden. Ohne Nachführung wäre die Verweildauer bei 100 °C vermutlich geringer.

mit 2 Metern Abstand zum Kollektoranschluss nur noch Temperaturen unter 50 °C. Die Temperatur am Anschluss der Rücklaufleitung steigt im Verlauf von rund 4 Stunden von niedrigen Werten bis auf 88 °C an und fällt dann wieder ab. Ein Meter nach dem Rücklaufanschluss werden an der Leitung nur noch Temperaturen unter 60 °C gemessen (siehe T-RL-1m).

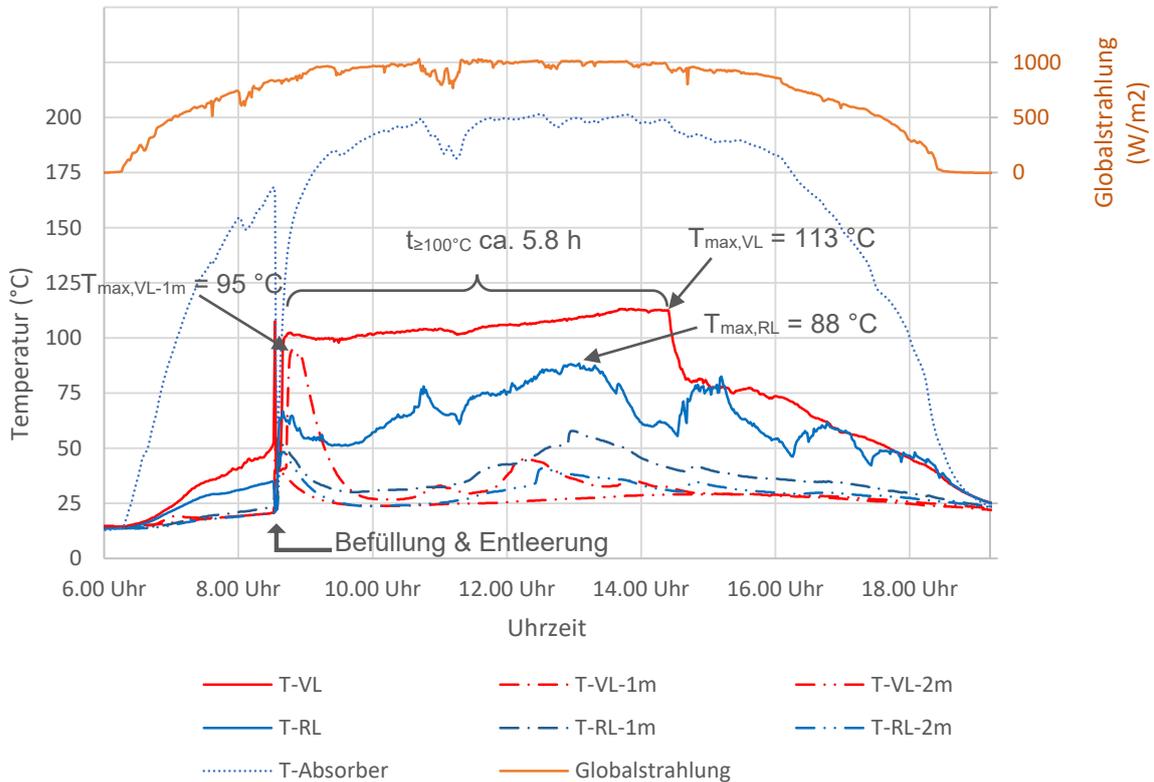


Abbildung 81: Befüllung und Entleerung des Harfenkollektorfeldes um 8.30 Uhr (11. Sept. 2018) mit Maximaltemperaturen am Kollektorfeldanschluss des Vorlaufs ($T_{\max,VL}$) von 113 °C nach rund 5.8 Stunden. (T: Temperatur, VL: Vorlauf, RL: Rücklauf, 1 m bzw. 2 m: Abstand Kollektorfeldanschluss bis Messstelle auf Rohr).

Einen Tag mit dreimaliger Befüllung und Entleerung des Kollektorfeldes zeigt Abbildung 82. Interessanterweise fällt die Temperatur am Kollektoranschluss des Vorlaufs im Vergleich zur Messung am 11. September (Abbildung 81) mit 65 bzw. 45 Minuten statt 5.8 Stunden deutlich schneller wieder unter 100 °C. Und dies obwohl die Einstrahlung und auch die Absorbertemperatur zumindest bei den ersten beiden Messungen am 12. September bei sehr ähnlichen Werten wie am 11. September lagen. Bei beiden Entleerungen nach 12 Uhr (Abbildung 82) steigt auch die Temperatur am Rücklaufanschluss (T-RL) auf 100 °C an, was auf einen kurzzeitigen Dampfeintrag in die Rücklaufleitung hindeutet. Auch bei der Messung vom 12. September werden hohe Temperaturen um 100 °C nur am Fühlern bis einen Meter nach dem Kollektoranschluss gemessen und an der nächsten Messstelle bei zwei Metern nicht. Die Reichweite der hohen Temperaturen liegt auch an diesem Messtag folglich zwischen 1 und 2 Metern.

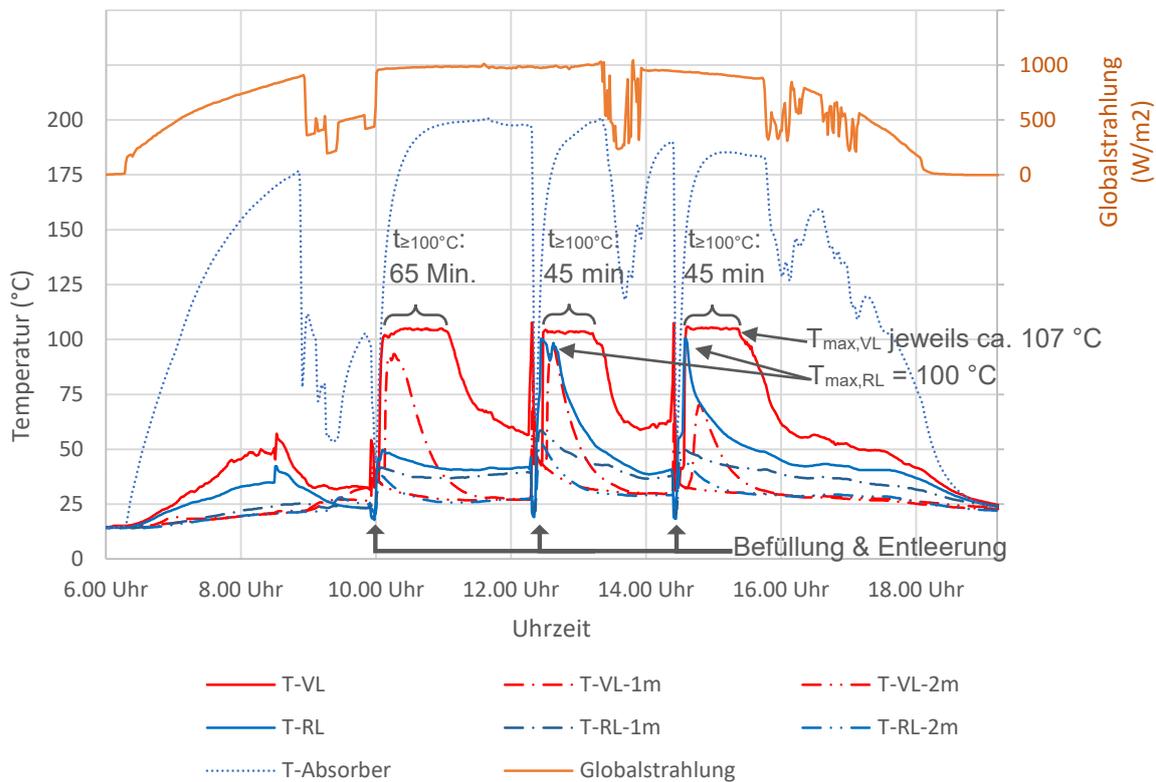


Abbildung 82: Dreimalige Befüllung und Entleerung des Harfenkollektorfeldes (12. Sept. 2018) mit Maximaltemperaturen am Kollektorfeldanschluss des Vorlaufs ($T_{\max,VL}$) von 107 °C mit Dauern von 45 bis 65 Minuten. (T: Temperatur, VL: Vorlauf, RL: Rücklauf, 1 m bzw. 2 m: Abstand Kollektorfeldanschluss bis Messstelle auf Rohr)

Den Vorgang der Austrocknung der Absorber- und Sammelrohre des Kollektorfeldes gibt Abbildung 83 wieder. Die Entleerung des Feldes hatte bereits drei Tage vorher stattgefunden (dazwischen Schlechtwetter). Bis zur Austrocknung am 8. September gegen 12 Uhr lag die Temperatur am Vorlauf (T-VL) insgesamt ca. 6 Stunden über 100 °C. Nach der Austrocknung bleibt die Temperatur trotz 200 °C am Absorberblech in den Rohrleitungen unter 75 °C (siehe 9. Sept.). Die Wassermenge in den Absorbern war also gering genug, sodass kein Wärmeeintrag von den Kollektoren in die Anschlussleitungen durch Verdampfung und Kondensation erfolgte. Die Rohrleitungen sind bei längeren Stillstandzeiten offensichtlich keinem bleibenden Wärmeeintrag durch die Kollektoren ausgesetzt, was sich positiv auf ihre, gemäss Kapitel 2.3 ohnehin ausreichende, Lebensdauer in Drainback-Anlagen auswirkt.

Die Messungen mit um +2° leicht aus der Waagerechten gedrehten Sammelrohrleitungen der Harfenkollektorfelder⁸¹ und -2° (verschlossenes unteres Sammelrohrende am Tiefpunkt) haben sehr ähnliche Ergebnisse wie die Messung mit waagerechten Sammelleitungen ergeben. Hervorzuheben ist, dass auch bei weitgehend mit Restwasser gefüllter unterer Sammelleitung (-2° Neigung) lediglich der Rücklaufanschluss für eine etwas längere Dauer bei ca. 100 °C liegt, obwohl deutlich mehr Wasser verdampfen kann (potentiell ca. 2.5 m³ Dampf, siehe Tabelle 24). Der Grund muss an einer geringen Verdampfungsleistung liegen, die trotz 1'000 W/m² Einstrahlung damit erklärt werden kann, dass das Sammelrohr in der Produktion so platziert wird, dass es von einem Luftspalt getrennt hinter dem Absorberblech liegt. Die Wärmeleitung vom Absorberblech zur Sammelleitung erfolgt somit hauptsächlich

⁸¹ RL am Tiefpunkt, d.h. das Wasser in der unteren Sammelleitung kann in die RL-Leitung abfließen.

über die Rohre der Harfe und bleibt dadurch gering. Mit einem Tauch-Temperaturfühler wurde im unteren Sammelrohr eine Kontrollmessung bei ca. $1'000 \text{ W/m}^2$ Einstrahlung vorgenommen und eine Wassertemperatur von deutlich unter $100 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Der Dampfaustrag aus dem Kollektorfeld scheint vor diesem Hintergrund in erster Linie durch die Verdampfung des Restwassers zu erfolgen, welches die Rohre der Harfe benetzt.

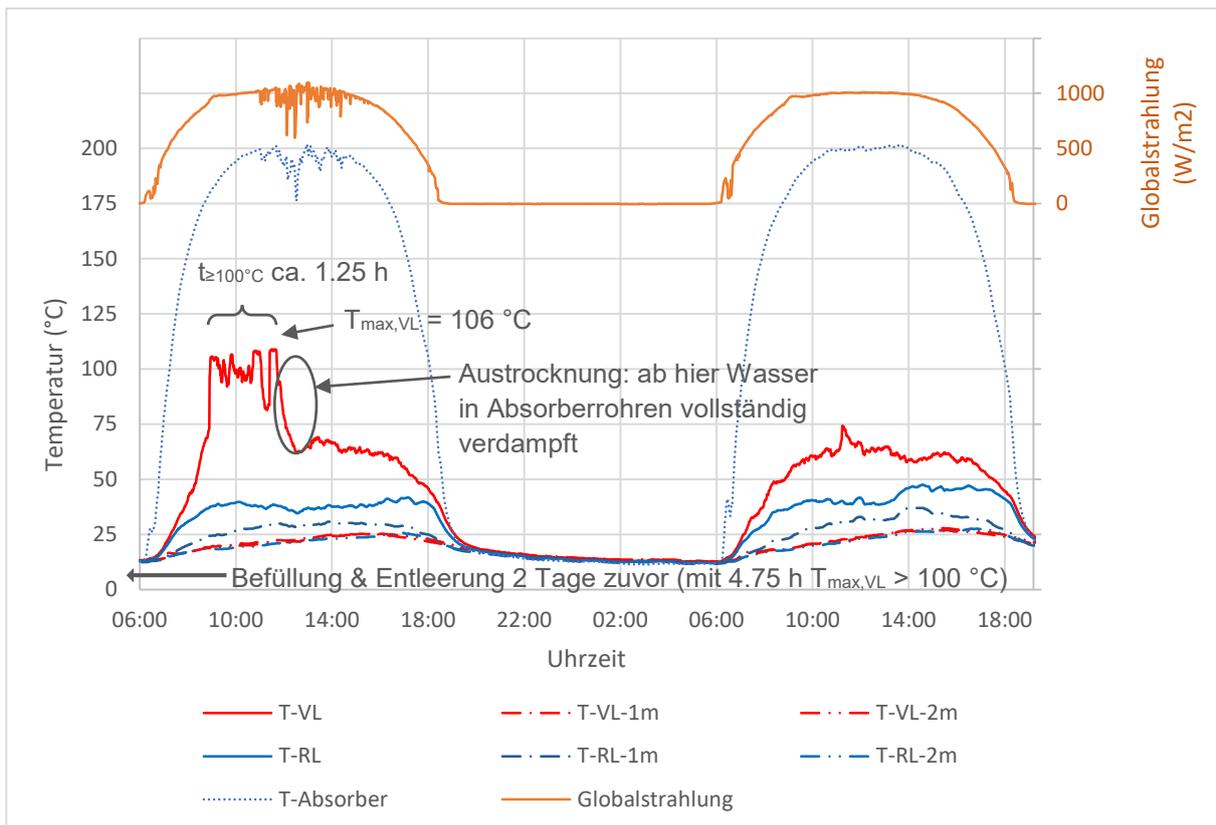


Abbildung 83: Austrocknung des Kollektorfeldes am 8. & 9. September 2018. Entleerung zwei Tage zuvor am 6.9. Absorber trocken am 8.9. ab 12 Uhr: $G = 1'000 \text{ W/m}^2$ und $T_{\text{max,VL}} \ll 100 \text{ }^\circ\text{C}$, d.h. kein Dampf mehr produziert. (T: Temperatur, VL: Vorlauf, RL: Rücklauf, 1 m bzw. 2 m: Abstand Kollektorfeldanschluss bis Messstelle auf Rohr).

Dampfreichweite in einem Mäanderkollektorfeld mit waagerechten Mäanderrohren

Es wurden auch Messungen mit einem Kollektorfeld durchgeführt, das aus vier Mäanderkollektoren mit waagerechten Mäanderleitungen besteht (Aufbau siehe Abbildung 79). Die Messungen (Abbildung 84) wurden mit waagerechten Sammelleitungen und somit mit waagerechtem Mäander durchgeführt. Die Vorlaufleitung ist bei den durchgeführten Versuchen jeweils nach kurzer Zeit ca. 1 Meter nach dem Kollektoranschluss geplatzt, da sowohl Temperatur als auch Druck zu hohe Werte angenommen hatten. Im Unterschied zum Harfenkollektorfeld halten die verwendeten Mäanderkollektoren mit horizontalen Rohrabschnitten im Absorber mehr Restwasser nach der Entleerung zurück (Tabelle 23), und zudem ist die Verdampfungsleistung offensichtlich wesentlich höher. Die Ursache dafür ist naheliegender Weise, dass viel Wasser im Mäander selbst zurückbleibt, welcher im Gegensatz zur Sammelleitung thermisch sehr gut an den Absorber gekoppelt ist. Da die Verwendung von Kollektoren mit horizontalem Mäandern aufgrund der unvollständigen Entleerung der Mäanderleitungen nur unter Verwendung von Frostschutzmittel im

Wärmeträgerfluid sinnvoll ist, im Projekt aber Wasser-Drainback untersucht werden, wurden keine weiteren Versuche mit Mäanderkollektoren durchgeführt.

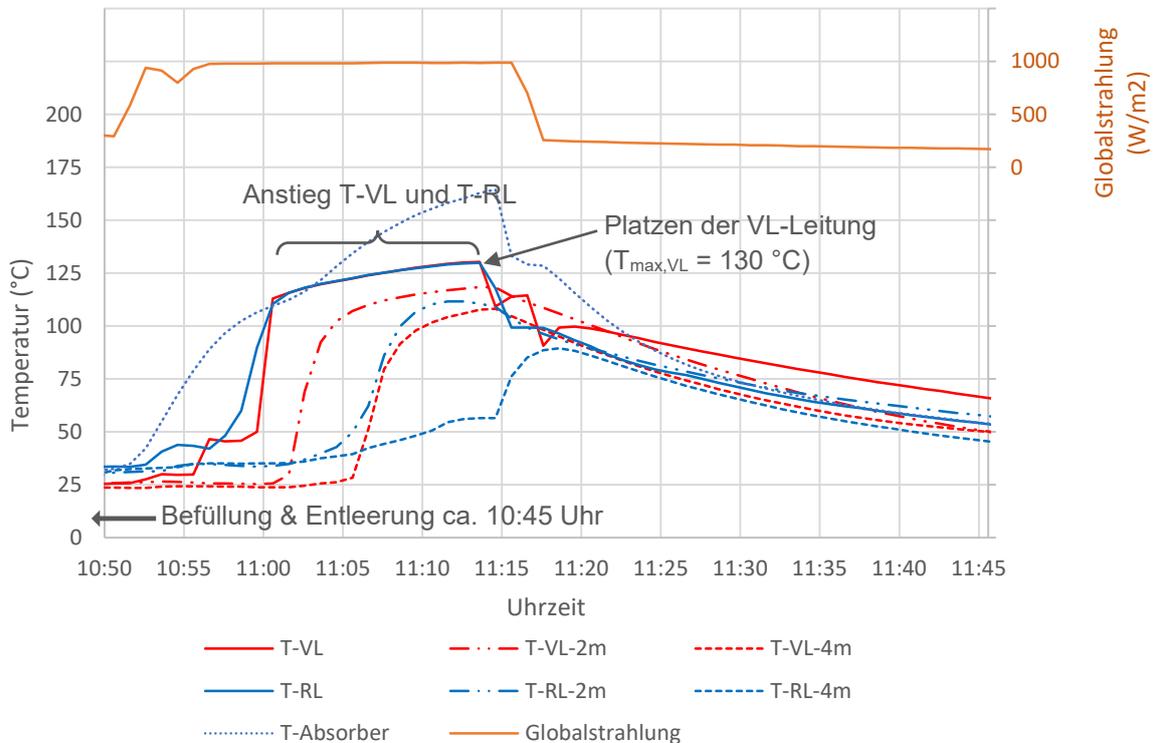


Abbildung 84: Verdampfung des Restwassers im Mäanderkollektorfeld und Platzen der Vorlaufleitung (Messung am 28. Sept. 2018) (T: Temperatur, VL: Vorlauf, RL: Rücklauf, 2m bzw. 4m: Abstand Kollektorfeldanschluss bis Messstelle auf Rohr).

Bewertung der Versuche

Die Messung der Dampfreichweiten beim entleerten Harfenkollektorfeld hat gezeigt, dass der Vorlaufanschluss am stärksten belastet wird. Es wurden Maximaltemperaturen bis 113 °C gemessen (1'000 W/m² Einstrahlung, Absorbertemperatur ca. 200 °C). Die Reichweite von Temperaturen über 100 °C in die Verrohrung lag unter 2 Metern. Die thermische Belastung der Anschlussrohre ist also insgesamt gering im Vergleich zur Stagnationstemperatur des Absorbers. Die thermische Belastung ist zudem kurz (gemessene Maximaldauer ca. 6 h), da die Absorber austrocknen bei Sonneneinstrahlung. Vor dem Hintergrund, dass die eingesetzten Rohrtypen bei den in Kapitel 2.5 beschriebenen Versuchen Temperaturen bis 135 °C und einem Überdruck bis zu 1.4 bar standhalten, scheint der Einsatz von Kunststoffrohren gut möglich. Die direkte Wärmeleitung von den Absorberrohren zu Kunststoff durch das Wandmaterial der Rohre muss aber verhindert werden.

5.4 Versuchsbetrieb einer Drainback-Anlage

Mit den vier Hafenkollektoren aus den Entleerungsversuchen wurde eine Drainback-Anlage auf dem Labordach aufgebaut. Dem innen aufgestellten Speicher wurde keine Wärme entzogen, da die Anlage häufig in Stagnation gehen sollte und die Komponenten somit oft

hohen Temperaturen und Dampf ausgesetzt werden sollten. Das Drainback-Volumen war im Luftvolumen des Speichers integriert. Die Anlage wurde ohne Vordruck betrieben.

Die Montage der Kollektoren erfolgte mit gegenüber der Horizontalen um 0.5 % geneigten Sammelrohren mit Tiefpunkt beim Rücklaufanschluss. Die Kollektoren wurden parallel durchströmt. Die Vor- und Rücklaufleitungen wurden mit PB-Rohren und Schnellkupplungen aus Kunststoff realisiert. Ein Schauglas beim Vorlaufeintritt in den Speicher ermöglichte einen Einblick in die Prozesse bei Be- und Entlüftung. Die Temperaturen wurden analog dem Aufbau in Abbildung 79 gemessen. An den oberen drei Kollektorverbindern, welche mit Kupferrohren ausgeführt wurden, wurden zusätzliche Temperatursensoren montiert.

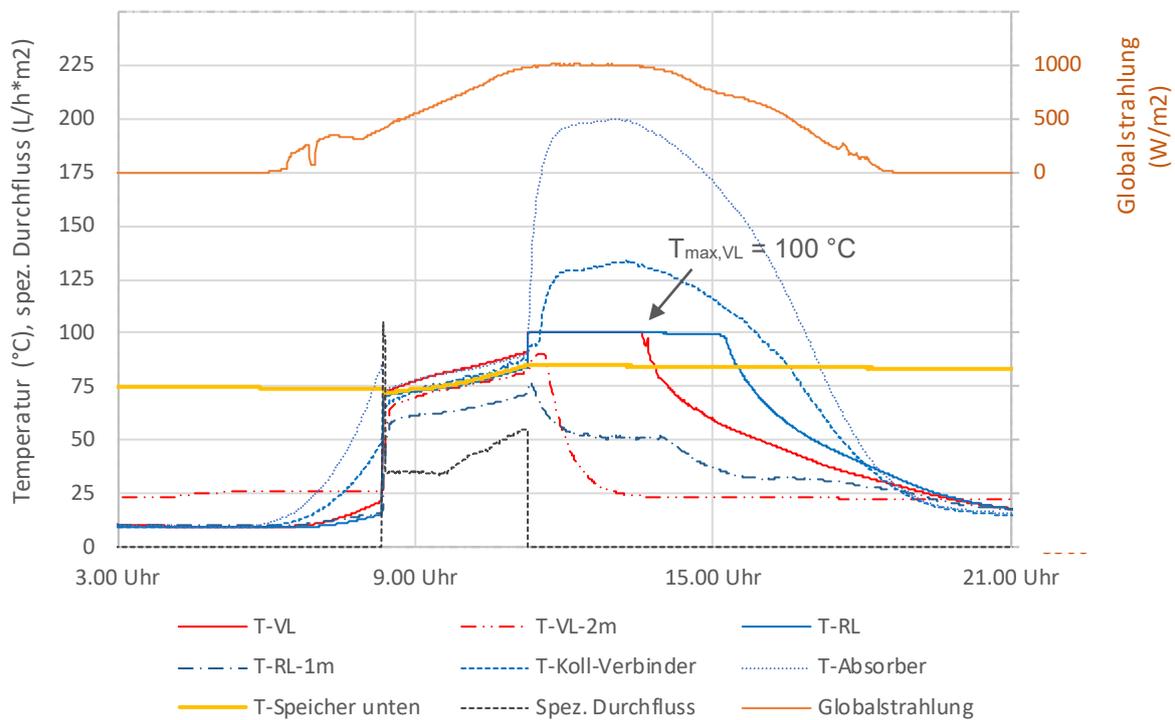


Abbildung 85: Typischer Temperaturverlauf in der Drainback-Anlage, die auf dem Versuchsdach des SPF installiert wurde, für einen Tag mit hoher Einstrahlung (3.9.2019, Betrieb ca. 8 - 11 Uhr). Dem Speicher wurde keine Wärme entnommen, um viele Stagnationsvorgänge beobachten zu können.

Einen typischen Verlauf der Messgrößen an einem Tag mit hoher Einstrahlung zeigt Abbildung 85. Nach dem Betrieb von ca. 8 - 11 Uhr entleert die Anlage. Die Temperaturen am Absorber und an den oberen Kollektorverbindern (also den für Messungen zugänglichen Teilen der Sammelleitung) steigen danach rasch auf hohe Werte um 200 °C bzw. 135 °C. Die Temperaturen an den Kollektoranschlüssen bleiben länger bei 100 °C, was darauf schließen lässt, dass Dampf bei Atmosphärendruck von den Kollektoren in die Leitungen gelangt. Die Dampfreichweite liegt unter 2 Metern.

Die Temperaturmessung an den Kollektoranschlüssen erfolgt mit Tauchfühlern, die nur mit dem Fluid (Wasser/Dampf) in Kontakt kamen und nicht mit der Rohrwand. Die äussere Oberflächentemperatur von Kunststoffrohr und Fitting am Vorlaufanschluss wurde deswegen

stichprobenartig unter Dämmung gemessen⁸². An einem wolkenlosen Tag, an dem die Anlage ausser Betrieb war, wurde um 14 Uhr bei 850 W/m^2 Einstrahlung und einer Umgebungstemperatur auf dem Schrägdach von $42 \text{ }^\circ\text{C}$ folgende Temperaturen gemessen:

- Kollektorsammelleitung (Kupferrohr) am Übergang zum Plastikfitting: $118 \text{ }^\circ\text{C}$
- Plastikfitting (Übergangsstück) aussen: $98 \text{ }^\circ\text{C}$
- Kunststoffrohr nach Fitting aussen: $80 \text{ }^\circ\text{C}$
- VL-Tauchfühler: $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Temperaturen, denen der Kunststoff ausgesetzt sind, sind am Vorlauf also deutlich höher, als mit dem Tauchfühler gemessen. Einige Wochen später wurde festgestellt, dass das PB-Rohr leicht geschmolzen und verformt war. Bei höherer Einstrahlung wurde also der Schmelzpunkt des PB ($135 \text{ }^\circ\text{C}$) erreicht. Zwischen Sammelrohr des Kollektors und den Anschlüssen aus Kunststoff muss folglich eine Rohrstrecke z.B. aus schlecht wärmeleitendem Metall eingefügt werden, welche den Kunststoff schützt. In der Versuchsanlage wurde zur Nachbesserung ein rund 40 cm langes Wellrohr eingebaut.

Die durchgeführten Versuche zur Entlüftung im Betrieb haben gezeigt, dass bei hohen Vorlauftemperaturen ab ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem initialen spezifischen Volumenstrom von $35 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2$ der Volumenstrom während des Betriebs absinkt und zum Erliegen kommt, falls die Förderleistung der Pumpe konstant bleibt. Die Abnahme des Volumenstroms erfolgt dabei mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Abnahme betrug in der Testanlage in der ersten Stunde rund 10% , um weitere 10% sinkt der Volumenstrom in weniger als einer halben Stunde, danach bricht er innerhalb weniger Minuten zusammen. Der Zusammenbruch des Volumenstroms muss an einem zunehmenden Druckverlust der Kollektorreihe liegen. Folgende Ursachen für den steigenden Druckverlust werden vermutet:

- Beim Erreichen des Siedepunkts des Wassers könnte sich zunehmend partielle Stagnation in den einzelnen Röhrcen der Harfenabsorber ausbilden. Dabei füllt Wasserdampf jeweils den gesamten Querschnitt der Röhrcen aus, was zu einem Anstieg des Druckverlusts und Verblocken des jeweiligen Röhrcens führt. Wegen der unterschiedlichen Durchströmung der Harfenabsorber erfolgt die partielle Stagnation zu unterschiedlichen Zeitpunkten.
- Ein weiterer möglicher Prozess ist das Ausgasen von im Wasser gelösten Gasen durch Überschreiten der maximalen Löslichkeit bei hohen Wassertemperaturen. Wenn diese Gase im oberen Sammelrohr akkumulieren und aufgrund eines zu geringen Volumenstroms des Fluids nicht via Vorlaufleitung aus der Sammelleitung gespült werden, kann es auch hier zu einem Verblocken des Leitungsquerschnitts und einem Zusammenbrechen des Volumenstroms kommen.

Im manuellen Betrieb der Anlage mit konstant niedriger Förderleistung der Pumpe und ausgesetzten Schutz gegen hohe Kollektortemperaturen, wie er in Solarsteuerungen sonst üblich ist, führte der Zusammenbruch des Volumenstroms zu einem Defekt der Vorlaufleitung. Da der Durchfluss durch die Kollektoren zum Erliegen kam und die laufende Pumpe die Entleerung der Anlage verhinderte, entstand viel Dampf in den wassergefüllten Kollektoren.

⁸² mit einem Anlegefühler und mit einem IR-Messgerät, wobei der maximale Unterschied zwischen den Geräten bei den durchgeführten Messungen maximal 5 Kelvin betrug.

Die Temperatur am Vorlauf ist dadurch auf 140 °C gestiegen. Es kann davon ausgegangen werden, dass wegen der laufenden Pumpe im Rücklauf und wegen der bis in den Speicher gefüllten Vorlaufleitung durch die Dampfbildung auch der Systemdruck gestiegen ist. Die hohen Temperaturen und der Druck führten zum Platzen des Kunststoffrohres direkt am Vorlaufanschluss.

Da die Pumpenleistung im automatischen Betrieb der Versuchsanlage geregelt wurde, war der Volumenstrom bei hoher Einstrahlung ausreichend hoch, um ein Verblocken wie oben beschrieben zu verhindern. Ist die Leistung der Solarkreispumpe bei geringer Einstrahlung jedoch reduziert, ist ein Verblocken auch im normalen Betrieb vorstellbar, weswegen die Steuerung entsprechend mit dieser Situation umgehen können muss.⁸³ Hierfür könnte eine Überwachung des Volumenstroms und ein kurzzeitiges Spülen der Kollektoren mit Erhöhung der Pumpenleistung sinnvoll sein. Eine andere Option wäre ein minimaler Volumenstrom, der eine erfolgreiche Durchströmung der Absorber auch bei hohen Fluidtemperaturen sicherstellt, der jedoch anlagenspezifisch gewählt werden muss, was die Auslegung fehleranfällig macht.

5.5 Fazit zu den Wasser-Drainback-Versuchen

Die durchgeführten Entleerungsversuche mit vier parallel verschalteten Harfenkollektoren (Apertur gesamt 8.6 m²) auf einem Tracker haben gezeigt, dass nach der Entleerung bei rund 1'000 W/m² Einstrahlung eine geringe Dampfreichweite in die Vor- und Rücklaufleitung von unter 2 Metern und nur moderate Temperaturen bis 113 °C entstehen. Die Dampfproduktion von Mäanderkollektoren mit horizontalem Mäander ist nach der Entleerung wiederum sehr gross, weswegen hier grosse Dampfmenen in der Solaranlage kondensieren können müssten. Die Tests der Kunststoffrohre aus Kapitel 2.3 zeigen, dass die gemessene Temperatur von 113 °C keine zu starke Belastung für die Rohrleitungen und Fittings darstellen. Die getesteten Kunststoffrohre und Fittings sind folglich für den Einsatz in Wasser-Drainback geeignet. Beim Einsatz der Leitungen zusammen mit üblichen verglasten Kollektoren muss aber die Wärmeleitung von Kollektoranschluss zu den Kunststoffen reduziert werden. Dies kann mit der Verwendung von Metallrohren von einer Länge um 0.5 m erreicht werden, welche zwischen Kollektoranschluss und dem Rohrsystem aus Kunststoff positioniert werden muss.

Die geringe Dampfreichweite von unter 2 Metern wurde mit Betrieb der Drainback-Versuchsanlage bestätigt. Die Anlage wurde drucklos betrieben und der Dampf trat entsprechend des Siedepunkts des Wassers mit 100 °C in die Rohrleitungen ein. Ein Überhitzen des Dampfes am heissen Absorber auf Temperaturen über dem Siedepunkt konnte nicht festgestellt werden. Mit der Versuchsanlage wurden kritische Betriebszustände bezüglich hohen Temperaturen und niedrigen Volumenströmen stichprobenhaft untersucht. In der Versuchsanlage ist bei einem spezifischen (initialen) Volumenstrom um 35 L/h*m² der Durchfluss durch die Kollektoren innerhalb rund einer Stunde zusammengebrochen, wenn die Temperaturen am Kollektorvorlauf 80 °C überschritten. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in

⁸³ Mit der in Solarsteuerungen üblichen Logik, dass ein Betrieb der Anlage oberhalb einer bestimmten maximalen Absorber- bzw. Vorlaufftemperatur unterbunden ist, können die Rohrleitungen gegen zu hohe Fluidtemperaturen geschützt werden. Die Anlage würde dann aber bei partieller Stagnation früh entleeren, was den Ertrag der Anlage reduzieren würde. Ausserdem muss die Maximaltemperatur auch entsprechend um 100 °C eingestellt werden – ein fälschlich zu hoch eingestellter Wert kann zu Leitungsschäden führen.

der Ausbildung von Gasvolumen bei hohen Temperaturen (durch Wasserdampf oder ursprünglich gelösten Gasen), was zu ungewollter Stagnation führt, wenn der Volumenstrom zu niedrig ist, um die Gase aus den Kollektoren zu transportieren. Zur Vermeidung solch einer ungewollten Stagnation muss eine Drainback-Anlage entsprechende minimale Volumenströme aufweisen oder die Steuerung der Anlage muss auf abnehmenden Volumenstrom entsprechend reagieren können und die Anlage z.B. durch kurzzeitige Erhöhung der Pumpenleistung spülen.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Projekt ReSoTech 2 wurden Massnahmen zur Kosteneinsparungen in Solarthermieanlagen in praktischen Arbeiten analysiert und möglichst mit Prototypen umgesetzt und getestet. Die Massnahmen wurden im Vorprojekt ReSoTech 1 (Philippen et al. 2016) anhand ihrer Kostenreduktionspotenziale ausgewählt. Gemäss Vorprojekt können relevante Kosteneinsparungen in Solaranlagen realisiert werden, welche über einen Schutz vor (starker) Dampfbildung verfügen und welche mit Kunststoffrohren und mit leichten und einfach zu installierenden Speichern erstellt werden. Der Schutz vor Dampf bzw. hohen Temperaturen kann dabei mit einer Drainback-Funktion oder mit Kollektoren, die über einen Mechanismus gegen Überhitzung verfügen, umgesetzt werden. Die Umsetzung der genannten Massnahmen im Labor und in Funktionstests wurden im Projekt ReSoTech 2 betrachtet.

Die Tests der **Kunststoffrohre und Steckfittings** haben gezeigt, dass die in der aufgebauten Wasser-Drainback-Anlage gemessene maximale Vorlauftemperatur von 113 °C keine zu starke Momentanbelastung für einige der getesteten Rohrleitungen und Fittings darstellen. Die Abschätzung der Temperaturbelastung in DB-Anlagen während 30 Betriebsjahren zeigt aber, dass Rohrmaterial mit genügender Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen eingesetzt werden muss. Die Beständigkeit muss dabei nur leicht über der Norm liegen. Kann dies, wie in der Regel zu erwarten ist, vom jeweiligen Rohrhersteller gewährleistet werden, sind die Rohrsysteme grundsätzlich für den Einsatz in Wasser-Drainback Systemen geeignet. Eine weitere nötige Voraussetzung für eine Eignung scheint zu sein, dass die Fittings über eine Stützhülse verfügen, die das Rohr an den Dichtring presst, und dass keine Metallteile im Fitting enthalten sind, da diese bei Kontakt mit Wasser Metallionen absondern, welche einen beschleunigten oxidativen Abbau des Rohrs verursachen. Eine Befüllung des Gasvolumens der Solaranlage mit Stickstoff bei der Inbetriebnahme senkt das Oxidationsrisiko zusätzlich, ist voraussichtlich aber nicht zwingend nötig. Beim Einsatz der Leitungen zusammen mit abgedeckten Kollektoren muss die Wärmeleitung von den Kollektoranschlüssen zu den Kunststoffen verhindert werden. Dies kann mit der Verwendung von Metallrohren mit einer Länge um 0.5 m erreicht werden, welche zwischen Kollektoranschluss und Rohrsystem aus Kunststoff positioniert werden müssen. Bei Wasser-DB-Anlagen ist eine "Versicherung" gegenüber Vereisen von Wasser im Rohrrinnern bei Absenken von Rohrleitungsbögen wünschenswert. Die durchgeführten Vereisungstests haben gezeigt, dass die Kunststoffrohre nicht platzen, wenn die Volumenausdehnung des vereisenden Wassers längs der Rohrachse erfolgen kann. Wird Wasser zwischen Eispfropfen eingeschlossen, können die Rohre platzen. Bei der Wärmedämmung der Rohre sollten folglich Abschnitte mit geringem Wärmedämmkoeffizienten, z.B. an Rohrschellen und Fittings vermieden werden, damit sich hier auch im Falle schlecht installierter Leitungen keine Eispfropfen bilden können, welche Wasser einschliessen könnten. Rohre mit ovalem Querschnitt zeigen eine tendenziell höhere Robustheit gegen Vereisung; hier lässt die geringe Anzahl an Tests aber keine abschliessende Beurteilung zu.

Um geeignete **Überhitzungsschutzmechanismen für Kollektoren** zu finden, wurde eine umfassende Technologieübersicht erstellt. Es wurden dabei bereits bekannte Ansätze aus dem Bereich der Solarthermie berücksichtigt. Zusätzlich wurde jedoch auch nach neuartigen Ansätzen aus anderen Technologiefeldern gesucht. Vier ausgewählte Mechanismen wurden weitergehend untersucht, und es wurden mehrere Funktionsmuster gebaut und getestet. Einige davon erwiesen sich als besonders vielversprechend. So konnte ein Prototyp eines

Kollektors mit passiv höhenverstellbarem Absorber erfolgreich getestet werden. Der Mechanismus muss jedoch noch einfacher und kostengünstiger umgesetzt werden. Die Variante mit Spiegellamellen wiederum scheint sowohl in technischer wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht realisierbar zu sein. Die anderen beiden untersuchten Mechanismen, elektrophoretische Schichten und thermotrope Ionogels, sind zwar technisch vielversprechend, benötigen jedoch noch viel Materialforschung. Sie könnten in Zukunft jedoch ebenfalls zu Lösungen für den Überhitzungsschutz von Kollektoren führen.

Bei der **Speicherentwicklung** ergaben die Analysen von Werkstofffestigkeiten, Kosten und Platzausnutzung, dass die ursprünglich geplante quaderförmige Bauform keine Vorteile mit sich bringt. Es wurde deshalb ein GFK-Speicher mit zylindrischer Bauform entwickelt, welcher in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden kann. Der Speicher wurde mit Strömungsberuhigungen konzipiert, die auch beim Einsatz von Wärmepumpen das Heizungswasser optimal schichten. Die untersuchten Schichtladelanzen konnten die hohen Massenströme von Wärmepumpen nicht bewältigen. Erfolgreicher waren Tests mit simplen Strömungsberuhigungen am Ort des Eintritts von Fluid in den Speicher. Der Speicher hat nur eine geringe Anzahl an Einbauten nötig, was die Produktionskosten des Speichers selbst geringhält. Die Be- und Entladung des Speichers mit Fluidkreisen, welche vom Speicherwasser getrennt werden müssen (z.B. Trinkwarmwasser), erfolgt mit externen Plattenwärmetauschern. Der Speicher verfügt über ein Luftvolumen, welches als Druckausdehnungsvolumen dient und so auch getestet wurde. Die Integration eines Drainback-Volumens wurde nicht getestet, kann aber voraussichtlich analog realisiert bzw. ergänzt werden. Die Kostenschätzung für eine mögliche Serienproduktion, welche auf Preisangaben und Angaben zu Skaleneffekten von GFK-Speicherproduzenten beruht, zeigt, dass das entwickelte Speicherkonzept zu ähnlichen Preisen angeboten werden kann wie marktübliche Stahlspeicher. Die Kostenschätzung ist mit hoher Unsicherheit behaftet. Das Ziel, einen Speicher herzustellen, welcher geringere Investitionskosten mit sich bringt als marktübliche Speicher, kann aber voraussichtlich nicht erreicht werden. Durch das geringe Gewicht des neu konzipierten GFK-Speichers – und der damit einhergehenden vereinfachten Installation – und durch die Integration von Ausdehnungs- und Drainback-Volumen im Speicher, ergeben sich mit dem neuen Konzept aber Vorteile gegenüber den marktüblichen Speichern.

Für eine rasche Umsetzung von Überhitzungsschutz-Massnahmen in Solarwärmeanlagen auf dem Markt bietet sich die **Drainback**-Technologie an. Diese ist seit einigen Jahrzehnten bekannt, konnte sich bisher aber nicht breit durchsetzen. Mit den Arbeiten zu Wasser-Drainback konnte für Harfen- und Mäanderkollektoren der wahrscheinliche Temperaturbereich ermittelt werden, mit dem in Drainback-Anlagen nach der Entleerung Dampf in die Kollektorfeldverrohrung gelangen wird. Zudem wurde die zu erwartende Dampfmenge untersucht. Die Versuche mit einer Drainback-Anlage ohne Vordruck zeigen für den Betrieb, dass bei hohen Temperaturen mit Dampf bzw. Gasen im Kollektorfeld gerechnet werden muss, was unter Umständen zu einem Zusammenbruch des Durchflusses und zu Stillstand der Anlage führen kann. Dies muss durch passende Anlagenauslegung und eine geeignete Anlagensteuerung verhindert werden. Die durchgeführten Versuche lassen aufgrund der relativ geringen Anzahl und wegen der geringen Variation der Parameter nur bedingt eine Generalisierung für andere Drainback-Anlagen zu.

Die Untersuchungen im Projekt ReSoTech 2 haben gezeigt, dass die betrachteten technischen Massnahmen zur Kostenreduktion grundsätzlich umsetzbar sind. So ist der Einsatz von Kunststoff-Rohrsystemen aus dem Heizungs- bzw. Sanitärbereich möglich, wenn die

Solaranlage über einen Überhitzungsschutz verfügt, und wenn Produkte aus thermisch robusten Kunststoffen eingesetzt werden. Der neu konzipierte Speicher aus GFK kann zwar voraussichtlich nicht zu geringeren Kosten als herkömmliche Speicher produziert werden, wird aber Kostenvorteile bei der Installation zeigen. Mit dem Überhitzungsschutz innerhalb der Kollektoren kann die Temperatur im Gesamtsystem begrenzt werden. Hier konnte die Funktionalität von zwei Techniken demonstriert werden, deren Marktumsetzung schon bald möglich sein könnte. Ein Überhitzungsschutz für die Komponenten des Solarkreises kann mit Drainback erreicht werden. Mit Einsatz der bekannten, aber wenig verbreiteten Drainback-Technologie können mehrere Massnahmen zu Kostensenkung zusammen realisiert werden. Die Arbeiten zum Überhitzungsschutz (höhenverstellbare Absorber und Spiegellamellen), zum Speicher und zu Drainback werden von den Autoren weitergeführt werden (Kapitel 7).

Tabelle 26: Gesamtkosten und Energieträgervermeidungskosten der konventionellen Referenz-Solaranlage zur Warmwasservorwärmung in einem Mehrfamilienhaus gemäss Vorprojekt ReSoTech 1, Kostenreduktion gemäss ReSoTech 1 (für eine Wasser-Drainback-Anlage mit Kunststoffrohren und -speicher) und angepasste Kostenreduktionen, welche die Ergebnisse aus ReSoTech 2 berücksichtigen.

	Konventionelle Solaranlage gemäss ReSoTech 1 (Fr.)	Kostenreduktion (Fr.)		Gründe für Änderung der Kostenreduktionen in ReSoTech 2
		ReSoTech 1	ReSoTech 2	
Planung	650	-	-	-
Kollektorfeld	6'727	-	-	-
Speicher	3'291	-1'039	661	- Speicherkosten höher (bei hoher Unsicherheit der Kostenschätzung) - Kleineres Speichervolumen, deswegen zwei Speicher statt einem inkl. Mehrarbeit für Installation
Solarkreis Dach	3'871	-1'025	-1'025	-
Solarkreis Gebäude	4'868	-2'361	-2'161	Da zwei Speicher: Zirkulationsrücklauf inkl. Umschaltventil
Weiteres	5'207	-414	-414	-
Wartung und Unterhalt (30 a)	3'654	-2'359	-2'359	-
Summe der Kostenreduktionen	-	-7'198	-5'298	
Gesamtkosten (Investition + Wartung und Unterhalt)	28'267	21'069	22'970	
Energieträgervermeidungskosten (Fr./kWh)	0.13	0.09	0.10	

Der Vergleich der Kostenreduktionen bezogen auf die konventionelle Referenz-Solaranlage, die im Projekt ReSoTech 1 analysiert wurde, zeigt, dass die Kostenreduktionen etwas geringer ausfallen werden, als im Projekt ReSoTech 1 abgeschätzt (Tabelle 26). Ursache für die geringere Kostenreduktion gemäss ReSoTech 2 ist zum einen, dass zum Erreichen der Türgängigkeit bei rundem Speicherquerschnitt ein Speicherkonzept mit kleinerem Volumen konzipiert wurde als ursprünglich geplant. Entsprechend müssen zwei Speicher mit Mehrarbeit aufgestellt werden. Zum anderen sind die geschätzten Produktionskosten der Speicher etwas

höher, da eine andere Bauart gewählt wurde (runder GFK-Speicher statt eckiger Rotomold-Speicher). Die abgeschätzten Produktionskosten sind dabei mit hoher Unsicherheit behaftet und die Kosten können bei stärkeren Skaleneffekten bei grösserem Produktionsvolumen auch geringer ausfallen.

7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Arbeiten werden in mehreren Projekten fortgesetzt.

Mit einem Innosuisse-Projekt wird die Weiterentwicklung des Kollektor-Überhitzungsschutzes mit Spiegellamellen fortgeführt. Das Projekt startet 2020.

Der Überhitzungsschutz mit höhenverstellbarem Absorber ist technisch vielversprechend, muss jedoch noch vereinfacht werden. Daran wird im BFE-Projekt HiPerPVT gearbeitet, welches die Entwicklung eines PVT-Kollektors mit Überhitzungsschutz zum Ziel hat.⁸⁴ Es ist zu erwarten, dass die Erkenntnisse auf rein thermische Kollektoren übertragbar sein werden.

Der Systemansatz mit Wasser-Drainback wird im Forschungsprojekt SimplyDrain weiterverfolgt werden.⁸⁵ Im Projekt werden kostengünstige Drainback-Anlagen für die Warmwasser-Bereitstellung in Mehrfamilienhäusern entwickelt. Das Verhalten von Wasser und Gasphase im System während der verschiedenen Betriebsmodi wird mittels thermohydraulischer Simulationen untersucht. Zudem wird ein Demonstrator der Drainback-Anlage erstellt werden, welcher einen weiterentwickelten Prototyp des GFK-Speichers enthalten wird.

8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

SHC-Task 54 Teilnahme

Im Rahmen des SHC-Task 54 wurde vom SPF eine Excel-basiertes Berechnungswerkzeugs für Wärmegestehungskosten (Levelized Cost of Heat, LCoH) erstellt. Das Tool basiert auf der gemeinsam im Task erarbeiteten Methodik zu LCoH und beinhaltet als Voreinstellung Energie- und Kostenkenndaten von Referenz-Solarthermiesystemen, die von einigen der Task-Teilnehmern für ihr jeweiliges Land erstellt wurden. Das LCoH-Tool (screen shot siehe Abbildung 86) kann via Homepage des SHC-Task 54 herunter geladen werden.⁸⁶ Das SPF hat im Rahmen des SHC-Task 54 ausserdem Fact-Sheets erstellt und ist Ko-Autor eines Review-Papers zu Kostenberechnung von (Solar-)Wärme (Louvet et al. 2019).

⁸⁴ <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=40732>

⁸⁵ <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=45281>

⁸⁶ <http://task54.iea-shc.org/lcoh-tool>

Einschätzung aus der Branche zu Kostentreibern

Das SPF hat im Rahmen des Projekts ReSoTech am Symposium Solarthermie 2018 im Koster Banz (DE) teilgenommen. Neben einem Vortrag in der Session "Kostenreduktion von Solarthermiesystemen" wurde durch das SPF auch ein „Thementisch“ zur Diskussion von Massnahmen zur Kostenreduktion entlang der Wertschöpfungskette der Solarthermie geleitet.

Die zwölf Teilnehmer des Thementisches aus den Ländern Deutschland, Schweiz und Österreich hatten die klare Einschätzung, dass bei den Installateuren ein wichtiger „Flaschenhals“ in der Prozesskette besteht, bei welchem hohe Kosten verursacht werden. Hier besteht wohl in Deutschland je nach Region das Problem, dass keine Handwerker vorhanden sind, die Arbeiten auf dem Dach ausführen können oder wollen (gleiches gilt wohl auch für die PV, bei der aber überregional agierende Installationsteams (Firmen) vorhanden sind, die die Dachmontage übernehmen). Ein weiterer Punkt, der Planer und Unternehmer wohl davon abbringt, Solarthermie zu empfehlen, ist, dass die Margen bei anderen Gewerken wie z.B. Sanitär (Bäder etc.) höher sind und sie deswegen aktuell kein grosses Interesse am Verkauf von Thermie haben.

Als Lösung für die Überwindung der Probleme mit der Dachmontage wurde vorgeschlagen, den Handwerkern als Dienstleistung bereitzustellen, dass ein externes Montageteam die Dachmontage übernimmt (Installation z.B. bis Traufe oder aussen bis Erdgeschoss). Der Handwerker soll also die Freiheit haben, bei Bedarf (= Zeitmangel, fehlende Kompetenzen für Dachmontage, Angst/Bedenken vor Dacharbeiten, etc.) die Montage in Auftrag geben zu können. Dieses Montageteam könnte dabei entweder vom Kollektorhersteller gestellt werden, von mehreren Kollektorherstellern oder auch unabhängig agieren. In Deutschland bieten einige wenige Unternehmen (CitrinSolar, Solvis) den Einsatz solcher Montageteams bereits dem Handwerk an.

Von den Teilnehmern des Thementisches wurde ausserdem geäussert, dass Kostenreduktionen in gewissen Produktsegmenten der Solarthermie nötig sind, um andere Käufergruppen (aus dem Massenmarkt) zu erreichen. Zudem müssen die Anlagen technisch einfach und auch sehr einfach zu installieren sein.

Im Nachgang zur Konferenz wurde mit einigen Teilnehmern der ReSoTech-Begleitgruppe gesprochen und die folgenden Einschätzungen erhalten:

- Das Thema „Montage-Teams“ ist für die Schweizer Branche kein neues und wird grundsätzlich als hilfreich für kleinere Installationsbetriebe angesehen
- Falls die Teams lokale Installateure konkurrenzieren, kann das heikel sein. Evtl. aber nötig, um in Zukunft neue Marktstrukturen zu erreichen
- Die Teams sollten am besten externe sein, da bei fehlender Auftragslage bei der Solarthermie kostengünstig.

9 Referenzen

- Amundson, Karl. 2016. 'Electrophoretic Displays'. In *Handbook of Visual Display Technology*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Baetens, Ruben, Bjørn Petter Jelle, and Arild Gustavsen. 2010. 'Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-Art Review'. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2): 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>.
- Beck, A., W. Körner, H. Scheller, J. Fricke, W.J. Platzer, and V. Wittwer. 1995. 'Control of Solar Insolation via Thermochromic Light-Switching Gels'. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 36 (4): 339–47. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)00171-N](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)00171-N).
- Beikircher, T. 2010. 'Hocheffizienter Flachkollektor Mit Foliendämmung Und Überhitzungsschutz Für Betriebstemperaturen von 70-100 °C'. Abschlussbericht von Projekt 0329280A des PTJ des BMU. Garching, Hannover: ZAE Bayern.
- Botpaev, R., Y. Louvet, B. Perers, S. Furbo, and K. Vajen. 2016. 'Drainback Solar Thermal Systems: A Review'. *Special Issue: Progress in Solar Energy* 128 (April): 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.050>.
- Botpaev, R., Y. Louvet, and K. Vajen. 2016. 'Impact of Freezing on the Piping of Water Operated Drainback Systems'. In *26. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein, Germany: OTTI e.V., Regensburg.
- Botpaev, R., et al., 2017. 'Befüllung Wasserbetriebener Drainback-Anlagen'. In *27. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein, Germany: OTTI e.V., Regensburg.
- Bourke, E.R., and D.J. Peck. 1980. *Sonnenkollektor Mit Ueberhitzungsschutz*. Google Patents. <https://www.google.com/patents/DE3015061A1?cl=de>.
- Broune, M. 2017. *Passive Stagnation Control for Solar Collectors*. Google Patents. <http://google.com/patents/EP3120088A1?cl=ru>.
- Brunold, S. 2009. *Solarabsorber Und Verfahren Zum Herstellen Eines Solarabsorbers*. Google Patents. <https://encrypted.google.com/patents/EP2065658A1?cl=tr>.
- Brunold, S., P. Vogelsanger, and H. Marty. 2007. 'Beurteilung Der Möglichkeiten von Thermochromen Schichten Als Potenzielle Überhitzungsschutzmassnahme Für Solarthermische Kollektoren'. BFE Schlussbericht 43729. Rapperswil.
- Brunold, S., D. Zenhäusern, A. Capelli, L. Omlin, G. Bahr, and F. Flückiger. 2014. 'GlaSolo - Vorentwicklung von Ganzglaskollektoren - Schlussbericht'. Schlussbericht an BFE SI/500315-02. Rapperswil.
- Brunold, Stefan, and Sebastian Petrasch. 2011. 'Prüfung Der Langzeitbeständigkeit von Rohrverbindungen Gegenüber Dem Auftreten von Dampf Und Kondensation in Einem Solarthermischen Kollektorkreis'. SPF Institut für Solartechnik, im Auftrag BFE.
- Burch, Jay, Morgan Bazillian, Mike Brandemuhl, and Moncef Krarti. 2006. 'Northward Market Extension For Passive Solar Water Heaters by Using Pipe Freeze Protection with Freeze-Tolerant Piping'. In . Denver, Colorado.
- Casini, Marco. 2018. 'Active Dynamic Windows for Buildings: A Review'. *Renewable Energy* 119 (April): 923–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>.

- Comiskey, Barrett, J. D. Albert, Hidekazu Yoshizawa, and Joseph Jacobson. 1998. 'An Electrophoretic Ink for All-Printed Reflective Electronic Displays'. *Nature* 394 (July): 253.
- Deng, Yuechao, Yaohua Zhao, Zhenhua Quan, and Tingting Zhu. 2015. 'Experimental Study of the Thermal Performance for the Novel Flat Plate Solar Water Heater with Micro Heat Pipe Array Absorber'. *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, SHC 2014* 70: 41–48.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.095>.
- Feng, Wei, Liping Zou, Guohua Gao, Guangming Wu, Jun Shen, and Wen Li. 2016. 'Gasochromic Smart Window: Optical and Thermal Properties, Energy Simulation and Feasibility Analysis'. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 144 (January): 316–23. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>.
- Föste, Sebastian, Alexandra Pazidis, Rolf Reineke-Koch, Bernd Hafner, David Mercs, and Christine Delord. 2016. 'Flat Plate Collectors with Thermochromic Absorber Coatings to Reduce Loads During Stagnation'. *Energy Procedia* 91: 42–48.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.169>.
- Föste, Sebastian, Bert Schiebler, Federico Giovannetti, Gunter Rockendorf, and Steffen Jack. 2016. 'Butane Heat Pipes for Stagnation Temperature Reduction of Solar Thermal Collectors'. *Energy Procedia* 91 (Supplement C): 35–41.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.168>.
- Ganzeboom, Sophia. 2019. 'Switchable Solar Absorbers'. Master Thesis, Zürich: ETH Zürich.
- Goossen, K. 2014. *Reflective Roof*. Google Patents.
<http://www.google.com.pg/patents/US20140083020>.
- Granqvist, Claes G. 2016. 'Recent Progress in Thermochromics and Electrochromics: A Brief Survey'. *9th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO9)* 614 (September): 90–96.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.02.029>.
- Griessen, R.P., and M.J. Slaman. 2009. *Reflecting Device, Solar Collector, Pitched Roof Provided with a Solar Collector of This Type, and Greenhouse*. Google Patents.
<https://www.google.ch/patents/WO2009099331A2?cl=en>.
- Haberl, R., A. Reber, and M. Y. Haller. 2017. 'Schichtungseffizienz - SPF – Prüfvorschrift Nr. 86'. 2017.
https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/Testing/Speicherschichtung/SPF-PV86-SE-Ver2.2.pdf.
- Haller, Michel Y., Robert Haberl, Patrick Persdorf, and Andreas Reber. 2015. 'StorEx - Theoretische Und Experimentelle Untersuchungen Zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern'. Schlussbericht. Forschungsprogramm Solarwärme. Bundesamt für Energie BFE. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=61162>.
- Harrison, S. J., Q. Lin, and L. C. S. Mesquita. 2004. 'Integral Stagnation Temperatur Control for Solar Collectors'. In . Waterloo, Canada.
- Heiz, Benjamin P. V., Zhiwen Pan, Lingqi Su, Si Thien Le, and Lothar Wondraczek. 2018. 'Smart Facades: A Large-Area Smart Window with Tunable Shading and Solar-Thermal Harvesting Ability Based on Remote Switching of a Magneto-Active Liquid (Adv. Sustainable Syst. 1/2018)'. *Advanced Sustainable Systems* 2 (1): 1870001–n/a.
<https://doi.org/10.1002/adsu.201870001>.
- Herbert, E. 1979. *Transparent or Reflective Panel*. Google Patents.
<http://google.com/patents/US4148563>.

- Huiberts, J. N., R. Griessen, J. H. Rector, R. J. Wijngaarden, J. P. Dekker, D. G. de Groot, and N. J. Koeman. 1996. ‘Yttrium and Lanthanum Hydride Films with Switchable Optical Properties’. *Nature* 380: 231.
- Hussain, Shafqat, and Stephen J. Harrison. 2015. ‘Experimental and Numerical Investigations of Passive Air Cooling of a Residential Flat-Plate Solar Collector under Stagnation Conditions’. *Solar Energy* 122 (Supplement C): 1023–36. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.029>.
- Jack, Steffen, Johannes Parzefall, Thomas Luttmann, Philipp Janßen, and Federico Giovannetti. 2014. ‘Flat Plate Aluminum Heat Pipe Collector with Inherently Limited Stagnation Temperature’. *Energy Procedia* 48 (Supplement C): 105–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.013>.
- Kargarsharifabad, H., S. Jahangiri Mamouri, M. B. Shafii, and M. Taeibi Rahni. 2013. ‘Experimental Investigation of the Effect of Using Closed-Loop Pulsating Heat Pipe on the Performance of a Flat Plate Solar Collector’. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5 (1): 013106. <https://doi.org/10.1063/1.4780996>.
- Kearney, Meghan, Jane H. Davidson, and Susan Mantell. 2005. ‘Polymeric Absorbers for Flat Plate Collectors: Can Venting Provide Adequate Overheat Protection?’, no. 47373: 253–57. <https://doi.org/10.1115/ISEC2005-76005>.
- Kessentini, Hamdi, Jesus Castro, Roser Capdevila, and Assensi Oliva. 2014. ‘Development of Flat Plate Collector with Plastic Transparent Insulation and Low-Cost Overheating Protection System’. *Applied Energy* 133 (Supplement C): 206–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.093>.
- Kim, Jongwook, Gary K. Ong, Yang Wang, Gabriel LeBlanc, Teresa E. Williams, Tracy M. Mattox, Brett A. Helms, and Delia J. Milliron. 2015. ‘Nanocomposite Architecture for Rapid, Spectrally-Selective Electrochromic Modulation of Solar Transmittance’. *Nano Letters* 15 (8): 5574–79. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02197>.
- Krammer, Anna, and Andreas Schüler. 2018. ‘Thermochromic Coatings for Overheating Protection of Solar Thermal Collectors – Novel Type of Doping - Target 95’. BFE Schlussbericht. Lausanne.
- Lämmle, M., H. Jäger, M. Hermann, T. Kroyer, G. Mülhofer, A. Oliva, C. Thoma, and M. Wiese. 2017. ‘PVTgen2 Entwicklung Und Pilotfertigung Eines Abgedeckten Photovoltaisch - Thermischen Hybrid-Kollektors Der Zweiten Generation Mit Verbesselter Thermischer Leistungsfähigkeit’. Freiburg und Braunschweig.
- Lee, Heng Yeong, Yufeng Cai, Sadiye Velioglu, Chengzhong Mu, Chen Jian Chang, Yi Ling Chen, Yujie Song, Jia Wei Chew, and Xiao Matthew Hu. 2017. ‘Thermochromic Ionogel: A New Class of Stimuli Responsive Materials with Super Cyclic Stability for Solar Modulation’. *Chemistry of Materials* 29 (16): 6947–55. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02402>.
- Louvet, Y., S. Fischer, S. Furbo, F. Giovannetti, S. Helbig, M. Köhl, D. Mugnier, D. Philippen, F. Veynandt, and K. Vajen. 2019. ‘Economic Comparison of Reference Solar Thermal Systems for Households in Five European Countries’. *Solar Energy* 193 (November): 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.019>.
- Ludwig, Daniela. 1998. *Liquidverschattung Für Gebäudefassaden Mit Der Möglichkeit Der Aktiven Solarenergienutzung*. Google Patents. <https://www.google.ch/patents/DE19705079A1?cl=de>.
- Maier, Ralph D., and Michael Schiller. 2016. ‘Handbuch Kunststoff-Additive, 4. Auflage’. Hanser, München.

- Mathieu, Hans. 2012. *Solaranlage*. Google Patents.
<https://www.google.ch/patents/DE102005006329B4?cl=de>.
- Matuska, Thomas, and Vladimir Zmrhal. 2008. *Design Tool KOLEKTOR 2.2 for a Detailed Solar Thermal Flat-Plate Collector Modelling*.
http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=194.
- Meir, M., J. Gjessing, J. Rekstad, and R. Rumler. 2008. ‘Overheating Protection Of Polymeric Solar Collectors By Triggered Ventilation’. In *Proceedings of Eurosun*. Lisbon.
- Mercs, David, Aurélien Didelot, Fabien Capon, Jean-François Pierson, Bernd Hafner, Alexandra Pazidis, Sebastian Föste, and Rolf Reineke-Koch. 2016. ‘Innovative Smart Selective Coating to Avoid Overheating in Highly Efficient Thermal Solar Collectors’. *Energy Procedia* 91: 84–93.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.177>.
- Mientkewitz, G., and S. Hesse. 2015. ‘Qualität Und Einsatz Temperaturbegrenzender Heatpipe-Kollektoren’. In . Bad Staffelstein.
- Moore, S. W. 1983. Solar collector apparatus having increased energy rejection during stagnation. US4392481, filed 1981, and issued 1983.
- Morin, F. J. 1959. ‘Oxides Which Show a Metal-to-Insulator Transition at the Neel Temperature’. *Physical Review Letters* 3 (1): 34–36.
- Mortimer (Editor), R. J., D. R. Rosseinsky (Editor), and M. S. Monk (Editor). 2015. *Electrochromic Materials and Devices*. Wiley-VCH.
- Muehling, Olaf, Arno Seeboth, Ralf Ruhmann, Volker Eberhardt, Harlan Byker, Christopher D. Anderson, and Samuel De Jong. 2014. ‘Solar Collector Cover with Temperature-Controlled Solar Light Transmittance’. *Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013)* 48 (January): 163–71. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.021>.
- Mugnier, Daniel, Louis Casals, Romain Siré, and Amandine Le Denn. 2011. ‘Drainback Systems as an Efficient and Safe Solution for Solar DHW Installations: Practical Experience’. In . Kassel, Germany.
- Mukherjee, S., W. L. Hsieh, N. Smith, M. Goulding, and J. Heikenfeld. 2015. ‘Electrokinetic Pixels with Biprimary Inks for Color Displays and Color-Temperature-Tunable Smart Windows’. *Appl. Opt.* 54 (17): 5603–5609. <https://doi.org/10.1364/AO.54.005603>.
- Nisisako, T., T. Torii, T. Takahashi, and Y. Takizawa. 2006. ‘Synthesis of Monodisperse Bicolored Janus Particles with Electrical Anisotropy Using a Microfluidic Co-Flow System’. *Advanced Materials* 18 (9): 1152–56.
<https://doi.org/10.1002/adma.200502431>.
- North, R.F. 2009. *Cover for Solar Panel*. Google Patents.
<https://www.google.com/patents/WO2009140234A2?cl=de>.
- Oppliger, D., T. Menzi, S. Bertsch, and D. Gstöhl. 2012. ‘Fluidglas: Flüssigkeitsdurchströmte Glasfassade Zur Aktiven Kontrolle Der Energieflüsse in Der Fassade’. In . Zürich.
- Pailthorpe, B. A., R. E. Collins, and S. O’Shea. 1987. ‘Temperature Limitation in Evacuated Solar Collector Tubes’. *Solar Energy* 39 (1): 73–75. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80053-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80053-1).
- Paone, Antonio, Anna Krammer, Raman Kukreja, Olivia Bouvard, Mario Geiger, and Andreas Schüler. 2014. ‘Thermochromic Coatings for Overheating Protection of Solar Collectors – Temperature Matching and Triggering (Thermochromie III)’. BFE Schlussbericht. Lausanne.

- Park, Chihyun, Seogjae Seo, Haijin Shin, Bhimrao D. Sarwade, Jongbeom Na, and Eunkyong Kim. 2015. ‘Switchable Silver Mirrors with Long Memory Effects’. *Chemical Science* 6 (1): 596–602. <https://doi.org/10.1039/C4SC01912A>.
- Philippen, Daniel, Marco Caflisch, Stefan Brunold, and Michel Haller. 2016. ‘ReSoTech – Reduktion der Marktpreise solarthermischer Anlagen durch neue technologische Ansätze – Teil 1: Potenzialanalyse und Lösungsansätze’. Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE. Bern: SPF Institut für Solartechnik. <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=35218>.
- Platzer, W, W Hube, W Adelman, M Crisinel, and T Vollmar. 2005. ‘Development of a Glass Facade with Internal Fluid Flow’. In , 303–7.
- Quaschnig, Volker. 2013. ‘Nicht konzentrierende Solarthermie’, 50.
- Ramschak, T., and C. Fink. 2016. ‘Temperaturbegrenzung Für Kunststoffkollekt-Oren Durch Durchlüftung’. In *Tagungsband*. Bad Staffelstein.
- Resch, Katharina, and Gernot M. Wallner. 2009. ‘Thermotropic Layers for Flat-Plate Collectors—A Review of Various Concepts for Overheating Protection with Polymeric Materials’. *Selected Papers from the Photovoltaics, Solar Energy Materials & Thin Films Symposium, Cancun, Mexico, 19 - 23 August 2007* 93 (1): 119–28. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.09.004>.
- Rittidech, S., and S. Wannapakne. 2007. ‘Experimental Study of the Performance of a Solar Collector by Closed-End Oscillating Heat Pipe (CEOHP)’. *Applied Thermal Engineering* 27 (11): 1978–85. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.005>.
- Roberts, J. P., M. J. Brandemuehl, J. D. Burch, and K. M. Gawlik. 2000. ‘Overheat Protection for Passive Solar Heating Systems Using Natural Convection Loops’. In *Proceedings of ASES Annual Conference*. Madison, USA.
- Russell, L. D., and H. M. Guven. 1982. ‘Modeling and Analysis of an All-Plastic Flat-Plate Solar Collector’. *Journal of Solar Energy Engineering* 104 (4): 333–39. <https://doi.org/10.1115/1.3266326>.
- Sato, Tomoya, Matt W England, Liming Wang, Chihiro Urata, Hiroshi Kakiuchida, and Atsushi Hozumi. 2018. ‘Polyurethane-Based Ionogels Exhibiting Durable Thermoresponsive Optical Behavior Under High-Temperature Conditions’. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 18 (1): 195–201. <https://doi.org/doi:10.1166/jnn.2018.14609>.
- Schwarz, Fritz. 2013. *Thermischer Solarkollektor Mit Temperaturbegrenzung. Durch Abdeckung Des Kollektors Mit Einer Doppelglasscheibe, Die Ein Elektrisch Beriebenes Rollo Enthält, Wird Erhitzung Des Kollektors Über Die Siedetemperatur Des Wärmeübertragenden Mediums Vermieden*. Google Patents. <https://www.google.com/patents/DE102012008877A1?cl=de>.
- Seeboth, A., and D. Löttsch. 2013. *Thermochromic and Thermotropic Materials*. Pan Stanford. <https://books.google.ch/books?id=XIViAgAAQBAJ>.
- Seeboth, Arno, Detlef Löttsch, Ralf Ruhmann, and Olaf Muehling. 2014. ‘Thermochromic Polymers—Function by Design’. *Chemical Reviews* 114 (5): 3037–68. <https://doi.org/10.1021/cr400462e>.
- Seeboth, Arno, Ralf Ruhmann, and Olaf Mühling. 2010. ‘Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control’. *Materials* 3 (12): 5143–5168. <https://doi.org/10.3390/ma3125143>.
- Seeboth, Arno, Johannes Schneider, and André Patzak. 2000. ‘Materials for Intelligent Sun Protecting Glazing’. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 60 (3): 263–77. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00087-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00087-2).

- Sharpe, T.E. 1984. *Solar Heat Collector System*. Google Patents.
<http://google.com/patents/US4483321>.
- Sheridon, N. K., E. A. Richley, J. C. Mikkelsen, D. Tsuda, J. M. Crowley, K. A. Oraha, M. E. Howard, M. A. Rodkin, R. Swidler, and R. Sprague. 1990. ‘The Gyricon Rotating Ball Display’. *Journal of the Society for Information Display* 7 (2): 141–44.
<https://doi.org/10.1889/1.1985284>.
- Slaman, M., and R. Griessen. 2009. ‘Solar Collector Overheating Protection’. *Solar Energy* 83 (7): 982–87. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.001>.
- SRCC-Policy. 2012. ‘On the Use of PEX In Drainback Systems’.
- Stephens, R.B. 1981. *Fluid Optical Switch for a Solar Collector*. Google Patents.
<http://www.google.com.pg/patents/US4270517>.
- Thakur (Editor), V. K., and M. R. Kessler (Editor). 2016. *Liquid Crystalline Polymers*. Springer.
- Thür, A., C. Hintringer, A. Richtfeld, W. Streicher, A. Kaiser, R. Hausner, C. Fink, W. Koller, and R. Riepl. 2013. ‘Status Quo Der Entwicklungen Eines Überhitzungsgeschützten Kunststoffkollektors’. *Erneuerbare Energie* 01.
- Tomohiro, Mizuno. 1994. Solar Collector. JPH0632968 (U), filed 1994, and issued 1994.
- Toshimoto, Kajitani. 1983. Solar heat collecting device. JPS58115258 (A), filed 1983, and issued 1983.
- Türk, Ozan, Alfred Brunner, Andreas Bohren, and Michel Y. Haller. 2016. ‘Vergleich der Testmethoden für Wärmespeicher’. In 26. OTTI Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany: OTTI e.V., Regensburg. p:\SPF-Publikationen\2016\OTTI TSE\Ozan Türk_Speichertestvergleich\Paper\160407_Paper_Speichertestvergleich_final.pdf.
- Vergaz, Ricardo, José-Manuel Sánchez-Pena, David Barrios, Carmen Vázquez, and Pedro Contreras-Lallana. 2008. ‘Modelling and Electro-Optical Testing of Suspended Particle Devices’. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92 (11): 1483–87.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.018>.
- Weber, Andreas, and Katharina Resch. 2014. ‘Thermotropic Glazings for Overheating Protection. I. Material Preselection, Formulation, and Light-Shielding Efficiency’. *Journal of Applied Polymer Science* 131 (4): n/a-n/a.
<https://doi.org/10.1002/app.39950>.
- Wenker, K., H. Jäger, A. Dolezal, G. Stryi-Hipp, S. Fortuin, I. Hädrich, M. Wiese, J. Greulich, W. Graf, and T. Kroyer. 2012. ‘PVTmax Photovoltaisch-Thermische Kollektorsysteme Mit Maximiertem Gesamtertrag’. Braunschweig und Freiburg.
- Whitehead, L.A., and M.A. Mossman. 2005. *Self-Stabilized Electrophoretically Frustrated Total Internal Reflection Display*. Google Patents.
<http://google.com/patents/US6865011>.
- Wilson, H. R. 1994. ‘Potential of Thermotropic Layers to Prevent Overheating: A Review’. In , 2255:2255–12. <http://dx.doi.org/10.1117/12.185372>.
- Wolfe, Daniel, and K. W. Goossen. 2018. ‘Evaluation of 3D Printed Optofluidic Smart Glass Prototypes’. *Optics Express* 26 (2): A85–98. <https://doi.org/10.1364/OE.26.000A85>.
- ZAE Bayern. 2006. *Sonnenkollektor*. Google Patents.
<https://www.google.com/patents/DE202005005631U1?cl=de>.

Anhang

A.1 - Ergebnisse der beiden Vereisungstests

Tabelle 27: Ergebnisse der beiden Vereisungstests mit Kunststoffrohren in der Klimakammer des SPF.

Rohrmaterial	Bezeichnung	Aussendurchmesser (mm)	Länge (m)	Anzahl Rohre gleichen Typs	Dämmung in Rohrmittle	Rohrenden verschlossen	In Test 1 zerstört ^{*)} (50 Zyklen)	In Test 2 zerstört ^{*)} (112 Zyklen)
PB	Leitungsrohr	16	4	3			nein	-
							nein	-
							nein	-
	Leitungsrohr	16	4	3		ja	ja	-
							ja	-
							ja	-
	Leitungsrohr	16	4	Test 1: 1 Test 2: 3	ja		ja	nein
							-	nein
	Leitungsrohr	16	1.5	3	ja	ja	ja	-
							ja	-
							ja	-
	Leitungsrohr	16	1.5	3		ja	ja	-
							ja	-
							nein	-
	Heizrohr, sauerstoffdicht	16	4	3		ja	ja	-
							ja	-
							ja	-
	Leitungsrohr	25	4	3			nein	-
nein							-	
nein							-	
Leitungsrohr	25	4	3	ja		-	nein	
						-	nein	
						-	nein	
Leitungsrohr	25	4	3	ja	ja	-	nein	
						-	nein	
						-	nein	
PE-X	Heizrohr, sauerstoffdicht	25	4	3			nein	-
							nein	-
							nein	-
	Heizrohr, sauerstoffdicht	25	4	3	ja		nein	nein
							nein	nein
							nein	nein
	PE-X, sauerstoffdicht	16	4	3		ja	ja	-
							ja	-
							ja	-
	PE-X, sauerstoffdicht	16	4	3	ja		-	nein
							-	nein
							-	nein
PE-X, sauerstoffdicht	16	4	3		ja	-	nein	
						-	nein	
						-	nein	

Anhang

Rohr- material	Bezeichnung	Aussen- durchmesser (mm)	Länge (m)	Anzahl Rohre gleichen Typs	Dämmung in Rohrmitte	Rohrenden verschlossen	In Test 1 zerstört *) (50 Zyklen)	In Test 2 zerstört *) (112 Zyklen)
	PE-Xc	25	4	2		ja	-	ja
							-	ja
PE-RT	x	16	4	3	ja		-	nein
							-	nein
							-	nein
Ovale Rohre	PB und PE-RT	16	4	15 ovale Rohre	N = 10	N = 5	-	nein

*) Strich (-), falls im jeweiligen Test nicht untersucht