



Bericht STO2-KGe-130902-E

Projektabschlussbericht „MechTest“

Charakterisierung der mechanischen Lastfälle durch Schnee- und Windlasten an solarthermischen Kollektoren mit ihren Befestigungs- und Montagesystemen

für:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit (BMU)
BERLIN, Bundesrepublik Deutschland

bearbeitet von:

Konstantin Geimer (Projektleitung)
in der Arbeitsgruppe von Korbinian Kramer

10. September 2013

Anschrift:

Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme ISE
Bereich Solarthermie und Optik
Heidenhofstrasse 2
79110 FREIBURG
Deutschland

Inhalt

1	Hintergrund	8
2	Projektziel und Vorgehensweise	10
2.1	Arbeitspakete.....	11
2.1.1	AP 1 Detaillierte Analyse von Schadensfällen und Schadensursachen.....	11
2.1.2	AP 2 Aufbau eines Forschungsteststands für Belastungstests.....	11
2.1.3	AP 3 Vergleichende Messungen am Forschungsteststand und im Freiland	11
2.1.4	AP 4 Ableitung eines Testverfahrens und Erarbeitung einer Rechenmethode	12
2.2	Rückblick Arbeits- und Zeitplanung	12
2.3	Kick-off Workshop	15
2.4	Projektpartner	16
3	Kollektoren, Systeme und deren mechanische Verbindungstechnik	17
3.1.1	Flachkollektor (FK)	18
3.1.2	Vakuumröhrenkollektor (VRK).....	20
3.1.3	Kompaktanlagen mit Speicher	23
3.2	Befestigungs- und Montagesysteme.....	25
3.2.1	Begrifflichkeiten	25
3.2.2	Stand der Technik	27
4	Normen im Zusammenhang mit mechanischen Lasten	29
4.1	EN 12975 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren	29

4.2	EN 12976 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - vorgefertigte Anlagen.....	31
4.3	EN 12179 Widerstand gegen Windlast-Prüfverfahren von Vorhangfassaden	32
4.4	EN 12211 Fenster und Türen Windwiderstandsfähigkeit Prüfverfahren	33
4.5	IEC 61646/61215 Photovoltaik Prüfnormen.....	34
4.6	EN 1991 Einwirkungen auf Tragwerke	35
4.6.1	EN 1991-1-4: Einwirkungen auf Tragwerke, Windlasten	36
4.6.2	EN 1991-1-3 Einwirkungen auf Tragwerke, Schneelasten	38
4.6.3	Arbeitsblatt zur Ermittlung von Schneelasten an ST Anlagen (BDH, BSW).....	41
4.7	ASTM E1830.....	42
4.8	Verfahren in Europa	42
4.9	Vergleich der Normen.....	43
4.10	Weitere Anforderungen und Entwicklungen im Normungskontext	48
4.10.1	CE Kennzeichnung	48
4.10.2	Anforderungen des DiBt in Deutschland.....	49
4.10.3	Normentwurf des CEN Technical Comitee 128 Workgroup 3	49
5	AP 1 Analyse von Schadensfällen und Schadensursachen	51
5.1	Schäden an Kollektoren oder deren Befestigungs- und Montagesystemen.....	51
5.2	Situation Flachkollektoren.....	55
5.3	Besonderheit aufgeständerter Anlagen und Aufdachmontage	58
5.4	Situation VRK.....	60
5.5	Situation Thermosiphonsysteme.....	61

5.6	Situation Befestigungs- und Montagesysteme	62
5.7	Rechtliche Bestimmungen und Versicherungsumfang	63
5.8	Zusammenfassung	64
5.9	Ergebnisse des „Expert workshop mechanical loads“ vom 23.11.2012.....	67
6	AP 2 Aufbau eines Forschungsteststands für erweiterte mechanische Belastungstests	71
7	AP 3.2 Charakterisierung realer Lasten an unterschiedlichen Extremstandorten	77
7.1	Feldmessungen auf Gran Canaria	77
7.1.1	Messaufbau	78
7.1.2	Versuchsdurchführung	80
7.1.3	Auswertung und Ergebnisse	80
7.2	Feldmessungen auf der Zugspitze	87
7.2.1	Messaufbau und Versuchsdurchführung	87
7.2.2	Auswertung und Ergebnisse	89
7.3	Betrachtung der Schneeanlagerung an Vakuumröhrenkollektoren (VRK).....	94
8	AP 3.1 Empirische Untersuchungen von Belastungszuständen bei unterschiedlichen Belastungsarten am Prüfstand	97
8.1	Prüfreihe Normenvergleich schwellende Belastung und Schublastprüfung.....	97
8.1.1	Vergleich von ST-Normprüfung und PV-Normprüfung am Referenzkollektor	97
8.1.2	Schwellende Belastung.....	99
8.1.3	Ermittlung der Druckbelastungsgrenze / Variation Kollektorbefestigung	100

8.1.4	Schublastprüfung.....	102
8.2	Prüfreihe Tieftemperaturprüfungen.....	104
8.2.1	Vergleich Zugbelastungsgrenze bei Raumtemperatur und – 30 °C.....	104
8.2.2	Vergleich Druckbelastungsgrenze Dachhaken bei Raumtemperatur und – 30 °C.....	107
8.3	Prüfreihe VRK und Thermosiphon Kompaktsystem	109
8.3.1	Adapterplatten für VRK Prüfung	110
8.3.2	VRK-Prüfung horizontal.....	111
8.3.3	Prüfung VRK Thermosiphon Kompaktsystem.....	113
8.4	Zusammenfassung	115
9	AP 4 Ableitung verbesserter Prüfverfahren.....	117
9.1	Unterschiedliche Lastfälle und deren Bedeutung für die Prüfpraxis.....	117
9.1.1	Senkrechte Lasten – vertikal angeordnete Zylinder.....	117
9.1.2	Senkrechte Lasten – schräg angeordnete Zylinder.....	118
9.1.3	Schublasten – vertikal angeordnete Zylinder.....	120
9.1.4	Schublasten – schräg angeordnete Zylinder.....	121
9.2	Einfluss von Saugerverteilung und Randabstand auf die Homogenität der Flächenlast	122
9.2.1	Modellgrundlage.....	124
9.2.2	Ergebnis und Umsetzung in der Prüfpraxis.....	125
9.3	Untersuchung geeigneter Rechenmethoden.....	128
10	Diskussion der Ergebnisse vor dem Hintergrund der erforderlichen bauaufsichtlichen Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt).....	129
11	Zusammenfassung	130

12	Verwertung der Ergebnisse und Ausblick.....	136
13	Literatur und Referenzen.....	139
13.1	Veröffentlichungen	139
13.2	Presserückmeldungen.....	140
13.3	Literaturangaben.....	141

Dieser Bericht umfasst 143 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder im sinnentstellenden Zusammenhang erfolgen.

Das geförderte Projekt mit der Fördernummer FKZ: 0325968A startete am 01.08.2010 und endete zum 31.01.2013. **Es wurde mit insgesamt 711.353 Euro durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Bereich Solarthermie und Optik

Freiburg, 10. September 2013



Konstantin Geimer



Korbinian Kramer

1 Hintergrund

Die mechanischen Prüfungen hinsichtlich Wind- und Schneelasten der einschlägigen Normen zur Qualitätssicherung von Solarkollektoren und Systemen [Norm DIN EN 12975-2:2006] und [Norm DIN EN 12976-2:2006]] sind in vielerlei Hinsicht unzureichend:

Keine Prüfung von Befestigungs- und Montagesystemen vorgesehen (z.B. Fassadenmontage, Flachdachmontage aufgeständert, Schrägdach, Indach; usw.) Mindestprüfvorgabe lediglich bis +/- 1000 Pa, dies entspricht beispielsweise einem Winddruck von etwa 120 km/h bei einem Druckbeiwert von 1 und einem Sicherheitsfaktor von 1,5.

Prüfungen sind nicht auf alle Kollektorgeometrien anwendbar (z.B. Spiegel hinterspiegelter Vakuurröhrenkollektoren (derzeit von der Prüfung ausgenommen))

Zweifel ob Belastungstests die Kräfte in der Realität widerspiegeln (z. B. Tangential wirkende Schublasten durch Schneeanhäufung bei Schrägdachmontage, ungleichmäßige Lastverteilung durch Ice-Damming, etc.)

Keine Unterteilung in unterschiedliche Belastungszonen, die entsprechend der Auslegungsnormen repräsentativ sind.

Diese Probleme führen zu Nachweisforderungen über die normativen Prüfungen hinaus (z. B. CE, DIBT, CSTB, MCS) und es entstehen lokale/regionale/nationale Einzellösungen. Diese Situation erschwert es für die Hersteller kostengünstige und dabei sichere Lösungen am Markt anbieten zu können. Zumeist bilden sich hieraus individuelle Kollektor- und Befestigungslösungen mit hohem Planungs- und Entwicklungsaufwand.

Der fachgerechte Einbau und Betrieb von solarthermischen (ST) Systemen umfasst mehr als Leistungs- und Funktionsprüfungen der Kollektoren. Um die Sicherheit der gesamten Anlage in Verbindung mit dem zugehörigen Tragwerk

nachzuweisen, müssen auch die Befestigungssysteme und insbesondere die unmittelbare Verbindung bzw. Durchführung zwischen Anlage und Dach in die Überlegungen einbezogen werden.

Die relevanten Normen zur Qualifizierung von solarthermischen Kollektoren und Systemen EN 12975 und EN 12976 befinden sich derzeit in einer Überarbeitungsphase um sowohl neue Produkte als auch verbesserte Prüfmethoden abzudecken. Obwohl diese Regelwerke mechanische Belastungsprüfungen vorsehen, reichen die Bedingungen nicht aus, um den Anforderungen der Tragwerksplanung nach den einschlägigen Normen zu genügen. Bezogen auf Kollektoren stellen die Teile des in Europa geltenden Eurocode 1 mit entsprechenden nationalen Anhängen fachfremde Normen dar [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005]. Nach Ansicht der Experten sind dies jedoch die geltenden Regelwerke.

In vielen Gebieten Deutschlands liegt die hiernach zu erwartende Belastung von Anlagen auf Dächern um ein Vielfaches über den Prüfwerten der Kollektorprüfnorm. Dies zwingt Hersteller von solarthermischen Anlagen zu eigenen Berechnungen und Tests, die sich naturgemäß von Anbieter zu Anbieter stark unterscheiden. Daraus resultieren ein erhöhter Planungsaufwand und tendenziell unwirtschaftliche Lösungen durch Überdimensionierung. Darüber hinaus leidet die Vergleichbarkeit der angebotenen Produkte, was grundsätzlich zu einer Verunsicherung des Käufers führt.

Potentielle Preissenkungen durch Skaleneffekte lassen sich durch die stark individuelle Ausführung der Montagesituation nicht heben.

2 Projektziel und Vorgehensweise

Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung mechanischer Belastungstests für Solarkollektoren mit ihren Montagesystemen. Dabei sollen neue Prüf- und Berechnungsverfahren entwickelt werden, um auch Belastungen bei extremen Bedingungen auf möglichst einfache Tests zurückzuführen. Durch die Vertretung des ISE in den einschlägigen Normungskreisen können die Ergebnisse direkt in den Prozess der anstehenden Harmonisierung der Prüfnormen mit einfließen. Die differenzierten Anforderungen führen derzeit zu einem erheblichen, nach momentanem Stand eher ansteigenden Prüfaufwand für die Hersteller. Diesem soll entgegen gearbeitet werden.

Eine Harmonisierung im Bereich der mechanischen Anbindung trägt zu steigender Sicherheit und Verlässlichkeit solarthermischer Anlagen bei. Weil Sie hilft Transparenz und Standardisierung im Bereich von Befestigungs- und Montagesystemen zu erhöhen.

Langfristig soll die Industrie durch eine harmonisierte Standardisierung im Bereich der Montage- und Befestigungssysteme unterstützt werden, um Planungs- und Materialaufwand möglichst gering und die Qualität solarthermischer Produkte möglichst hoch zu halten.

Der Erfolg spiegelt sich dabei in der Präsenz der Thematik wieder, sowie in durchdachten Gesamtsystemen die wirtschaftlich konkurrenzfähig sind und für Anwender und Planer einen klaren Mehrwert gegenüber den bisherigen Lösungen bieten.

2.1 Arbeitspakete

Das Projektvorhaben wurde in fünf Hauptarbeitspakete untergliedert.

2.1.1 AP 1 Detaillierte Analyse von Schadensfällen und Schadensursachen

Beschreibung der Defizite mechanischer Belastungstests durch eine detaillierte Analyse von Schadensfällen und Experteninterviews (Firmen, Institute, Statiker, Versicherungen). Beschreibung und Darstellung der Schwächen der aktuell eingesetzten Testverfahren für mechanische Belastungstests weltweit. Einbeziehung von thematisch verwandten Branchen, wie Dachdecker, Bedachungsfirmen und Fassadenfirmen zur realitätsnahen Definition der Belastungssituationen von Solarkollektoren.

2.1.2 AP 2 Aufbau eines Forschungsteststands für Belastungstests

Konzeption und Aufbau eines Teststands zur Erforschung und dem Vergleich unterschiedlicher möglichst realistischer Belastungssituationen durch Wind- und Schneelasten. Der Teststand soll dabei geeignet sein um verschiedenste Kollektorgeometrien und –befestigungsarten sowie Einsatzbereiche realitätsnah abbilden zu können.

2.1.3 AP 3 Vergleichende Messungen am Forschungsteststand und im Freiland

In dem Arbeitspaket AP 3.1 ist eine systematische Vermessung von verschiedenen Kollektoren und Kollektorgeometrien unter extremen Randbedingungen im Vergleich mit Messungen unter Standardbedingungen nach EN 12975 vorgesehen. Weiterhin werden im Arbeitspaket AP 3.2 Untersuchungen im Freiland an extremen klimatischen Standorten durchgeführt um reale Belastungssituationen zu ermitteln. Die Ergebnisse werden analysiert und verglichen.

2.1.4 AP 4 Ableitung eines Testverfahrens und Erarbeitung einer Rechenmethode

Aus den in AP 3.1 gewonnen empirischen Daten aus den Laborversuchen und der in AP 1 gewonnen Ergebnisse aus der Analyse der realen Schadensfälle gilt es die Verfahren zu vergleichen und eine optimierte Methoden für die mechanische Prüfung von Solarkollektoren mit deren Befestigungs- und Montagesystemen für den speziellen Einsatzort zu erarbeiten. Zusätzlich werden die derzeit zur Verfügung stehenden Rechenmethoden überarbeitet, um den realen Auslegungsfall bereits rechnerisch genauer abschätzen zu können. Dies wird maßgeblich durch die beteiligte Industrie und deren Tragwerksplanung bearbeitet. Hierzu soll ein Zonensystem (Wind- und Schneelastzonen) mit einer stufenweisen Testsequenz definiert werden. Die Einteilung von Wind- und Schneelastzonen legt nahe, Kollektoren auch entlang dieser Zoneneinteilung zu charakterisieren. Hierzu soll die Normen des Eurocode 1 herangezogen werden [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005].

2.2 Rückblick Arbeits- und Zeitplanung

In Abbildung 1 ist der tatsächliche Projektverlauf gegenüber dem geplanten Projektverlauf dargestellt. Es hat sich dabei gezeigt, dass besonders die Entwicklung des neuartigen Belastungsteststands in Arbeitspaket AP 2 länger andauerte als ursprünglich geplant. Dies lag zum Einen an den hohen Anforderungen an die Flexibilität des Belastungsteststands selbst, sowie der Herausforderung diesen in eine Klimakammer zu integrieren.

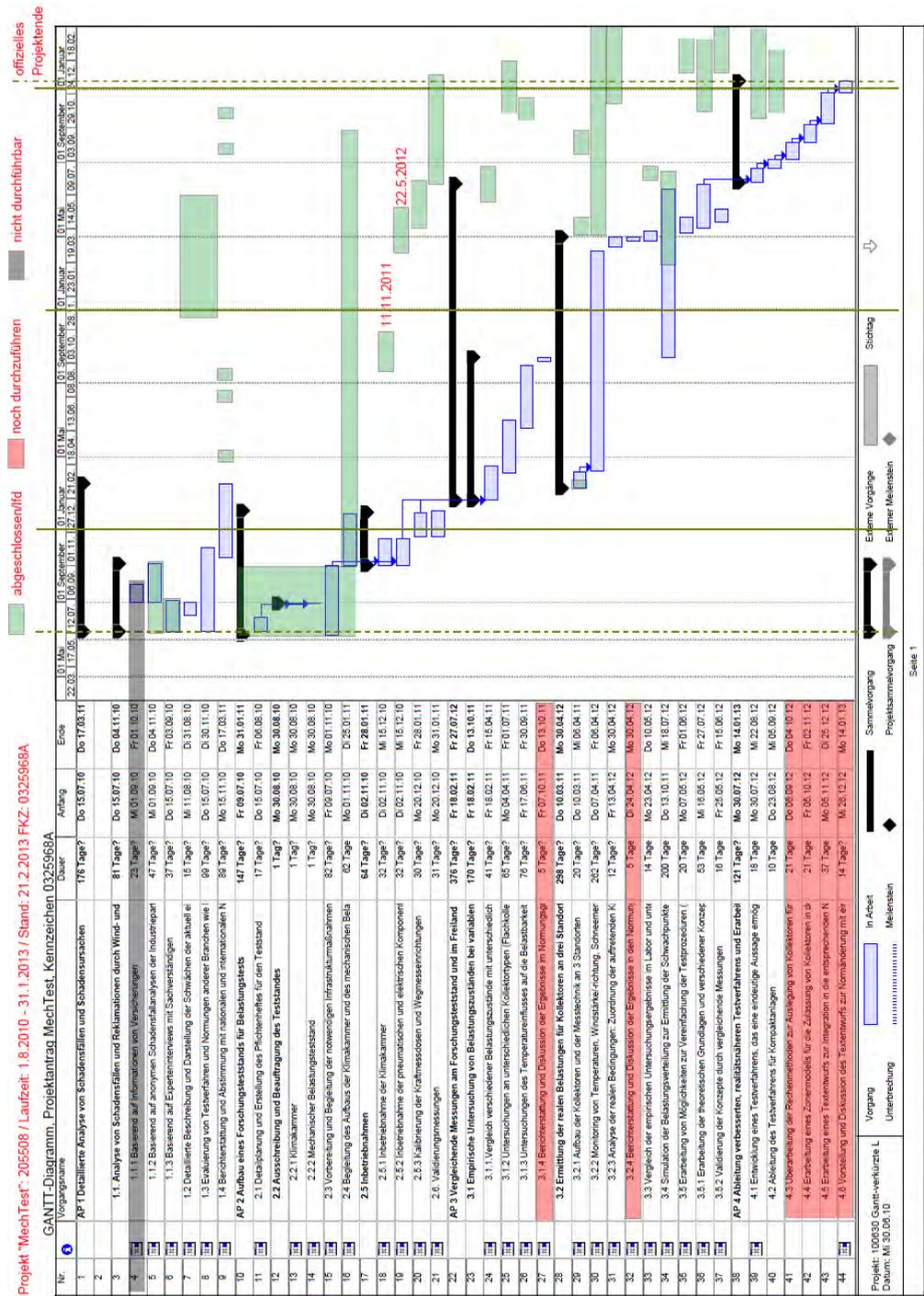


Abbildung 1: Übersicht Arbeits- und Zeitplanung

Beides war jedoch zwingend für die Prüfungen erforderlich. Die Prüfungen für die keine erweiterten Funktionen erforderlich waren wurden teilweise schon während des Inbetriebnahme Zeitraums der neuen Funktionen durchgeführt. So konnte der Teststand nach erfolgreicher Inbetriebnahme aller Funktionen am 23.11. 2012 im Rahmen des „Expert workshop mechanical loads“ eingeweiht werden. Trotz dieser Verzögerung konnten vor Projektende eine ausreichende Anzahl an Versuchen unter Verwendung aller erweiterten Funktionen erfolgreich durchgeführt werden.

Weiterhin gab es im Projektverlauf Verzögerungen im Aufbau der Freilandstandorte auf Gran Canaria und der Zugspitze in Arbeitspaket AP 3.2. Trotzdem konnten ausreichend Daten ermittelt werden um erste Lastfälle zu charakterisieren. Überdies laufen die Datenerfassungssysteme (eine Finanzierung zur Aufrechterhaltung der Datenerfassung wird angestrebt) derzeit über die Projektlaufzeit hinaus um potentielle Extremwetterereignisse aufzuzeichnen.

Die Arbeiten zur Schadensanalyse und Schadensursachen wurden teilweise im Projekt mehrmals aufgegriffen und besonders im „Expert workshop mechanical loads“ erneut thematisiert. Dies hat sich als sehr hilfreich herausgestellt, da das Thema von der Industrie zu Anfang eher zurückhaltend beantwortet wurde und mit fortschreitender Zeit auch neue Erkenntnisse mit einfließen konnten.

Ein sehr kleiner Teil der Arbeiten war nicht vollständig durchführbar oder konnte bis zum Projektende noch nicht abschließend geklärt werden. Hierunter fällt die Auswertung von Statistiken/Informationen von Versicherungen, da die Statistiken von den Versicherungen nicht in dem benötigten Detailgrad zur Verfügung gestellt werden konnten (AP 1.1.1). Weiterhin steht eine abschließende Diskussion der Ergebnisse in den Normungsgremien aus (AP 3.1.4, AP 3.2.4). Durch Erkenntnisse basierend auf den theoretischen Modellbetrachtungen wurde auch klar, dass Teile von AP 4 zur Erarbeitung einer Rechenmethode nicht umfassend bearbeitet werden können. Dies lag daran, dass die Modellbetrachtungen / Berechnungen praktisch für jeden

Kollektor neu angefertigt werden müssten, also keine allgemein anwendbare Rechenmethode eingesetzt werden konnte (AP 4.3 – AP 4.6). Dabei konnten grundsätzliche Gemeinsamkeiten identifiziert werden (Siehe Arbeiten in CEN TC 128 WG 3 in Abschnitt 4.10.3).

Insgesamt lässt sich jedoch herausheben, dass trotz vieler Komplikationen und Verzögerungen die wesentlichen Ziele zu Projektende alle erreicht werden konnten.

2.3 Kick-off Workshop

Das Kick-off Meeting fand am 4. November 2011 in Freiburg im Breisgau am Fraunhofer ISE statt. Es diente dem Kennenlernen der Thematik des Projektes und der Vorstellung des Projektumfanges gegenüber möglichen Industriepartnern. Teilnehmer aus Forschung und Industrie waren neben Bosch, PSE AG, Ritter Energie- und Umweltschutztechnik, Schüco, Vaillant, Viessmann, Wagner Solar auch Vertreter des Austrian Institute for Technology (AIT). Abbildung 2 zeigt ein Foto der Teilnehmerrunde. Neben der Vorstellung der Arbeitspakete und der bisherigen Vorarbeiten von Institutsseite konnten die Firmen ihre Erfahrungen im Bereich der mechanischen Belastungstests präsentieren. Präsentationen wurden von W. Breckerfeld (Vaillant Group) und M. Renz (Ritter Energie- und Umwelttechnik) vorgestellt.



Abbildung 2: Teilnehmer Kick-off Meeting Freiburg 04.11.2010

Anschließend wurde die Relevanz unterschiedlicher Ausführungsdetails des geplanten Prüfstands diskutiert, die zu diesem Zeitpunkt noch offen waren und direkt mit der beauftragten Firma (PSE) besprochen werden konnten.

2.4 Projektpartner

Leider haben sich die ursprünglich interessierten und zugesagten Projektpartner gegen eine Industriebeteiligung entschieden. Aus Sicht des Fraunhofer ISE stellte sich dies als Fehleinschätzung dar, die leider auch durch mehrere Gespräche nicht ausgeräumt werden konnte. Es konnten dennoch zwei große Unternehmen für eine Projektbeteiligung gewonnen werden. Diese konnten dabei besonders von den Untersuchungen im Projekt profitieren.

3 Kollektoren, Systeme und deren mechanische Verbindungstechnik

Solarthermische Kollektoren absorbieren Sonnenstrahlung und wandeln diese in Nutzwärme um. Zum Wärmetransport dient entweder ein flüssiges oder ein gasförmiges Medium. Einsatz finden Kollektoren sowohl im Wohnungsgebäudebereich als auch in der Industrie. Um die Wärmeverluste durch Abstrahlung und Konvektion möglichst gering zu halten und so einen hohen Temperaturhub zu realisieren sind die Kollektoren mit einer transparenten Abdeckung versehen. Diese ist zumeist in Glas oder alternativ aus polymerbasierten Materialien ausgeführt. Je nach Anforderung kommen unterschiedliche Kollektorarten zum Einsatz. Es wird zwischen Flachkollektoren (FK), Vakuumröhrenkollektoren (VRK) und Kompaktanlagen mit Speicher unterschieden.

Für die mechanische Belastbarkeit von Kollektoren ist insbesondere die Art der Verbindung zwischen transparenter Abdeckung und Kollektorgehäuse entscheidend. Un-abgedeckte Kollektoren ohne transparente Abdeckung spielen in diesem Rahmen eine untergeordnete Rolle, da sie zumeist als leichte Kunststoffkonstruktionen ausgeführt sind und im Allgemeinen keine Gefahr durch Ablösen einer Glasscheibe oder schwerer Gehäuseteile besteht.

In Europa beherrschen Flachkollektoren den Markt mit einem Anteil von etwa 90 % gegenüber einem Anteil von etwa 10 % an Vakuumröhrenkollektoren [Mauthner and Weiss 2013].

Thermosiphonsystemen bzw. Kompaktsystemen mit Speicher sind sowohl mit Flachkollektor als auch Vakuumröhrenkollektoren erhältlich. Die Systeme sind zumeist aufgeständert wobei sich der Speichertank oberhalb des Kollektors befindet. Hierbei ist die mechanische Verbindung der gesamten Aufständigung mit Kollektor von Bedeutung, da sie die Gewichtskraft des schweren erhöhten Speichertanks sicher stützen muss. Kompaktsysteme mit Speicher kommen hauptsächlich im Süden Europas und weltweit in wärmeren Regionen zum Einsatz. Thermosiphonanlagen mit Vakuumröhrenkollektoren und elektrischer

Zusatzheizung sind besonders in China sehr verbreitet. Auch viele deutsche bzw. europäische Hersteller bedienen dieses Marktsegment und müssen sich dementsprechend der Konkurrenzsituation stellen (Griechenland, Italien, Brasilien, Südafrika). Das Qualitätsniveau, auch der statischen Ausführung ist dabei von großer Bedeutung.

Im Folgenden werden die häufigsten Kollektorbauarten kurz erläutert und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften grob eingeordnet.

3.1.1 Flachkollektor (FK)

In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau eines FK mit schwimmender Lagerung der transparenten Abdeckung dargestellt.

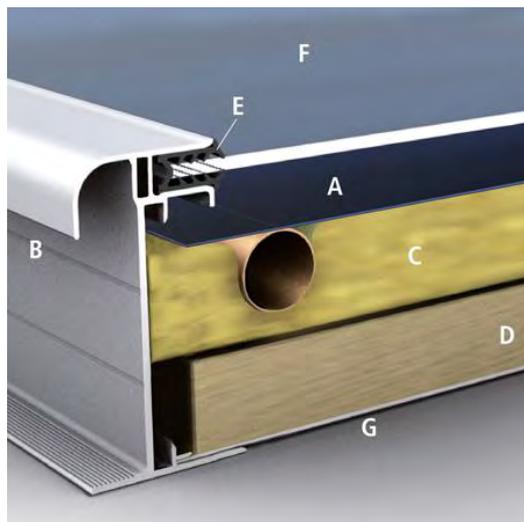


Abbildung 3: Schnitt Standard Flachkollektor mit schwimmender Lagerung zur Abdeckung Position E (Quelle: <http://elsgo.com>)

Das Gehäuse besteht aus einem extrudierten Metallprofil (Position B). Die Glasscheibe (Position F) wird im mit einer elastischen Gummierung (Position E) im Metallprofil gehalten. Dadurch kann sich die Glasscheibe innerhalb der Gummierung und der festgelegten Toleranzen frei bewegen.

Mechanischer Zug und Druck senkrecht zur Glasscheibe wird über die Gummierung direkt an das Rahmenprofil weitergegeben. Eine Verkürzung der Scheibe durch Biegung kann durch die Beweglichkeit der Scheibe kompensiert werden. Tangential wirkende Lasten (längs oder quer) führen wegen der Beweglichkeit der Scheibe zu einer Linienlast, womit nahezu die gesamte tangential Last auf ein einzelnes Rahmenprofil übertragen wird.

Ein Kollektor mit verklebter Verbindung zur Glasscheibe (siehe Abbildung 4) zeigt ein anderes mechanisches Verhalten. Durch die feste Verbindung zwischen Kollektorgehäuse und Glasscheibe werden Zug- und Drucklasten sowohl senkrecht als auch tangential gleichmäßig an den Kollektorrahmen bzw. das Kollektorgehäuse weitergegeben. Unterschiedliche thermische Ausdehnungseigenschaften können jedoch nicht durch eine Beweglichkeit (verkürzen) der Scheibe ausgeglichen werden. Die Scheibe verhält sich wie ein festes Bauteil des Kollektors. Damit führt beispielsweise eine Biegung der Scheibe zu einem Zusammenstauchen des Rahmens auf Grund der Verkürzung der Scheibe.

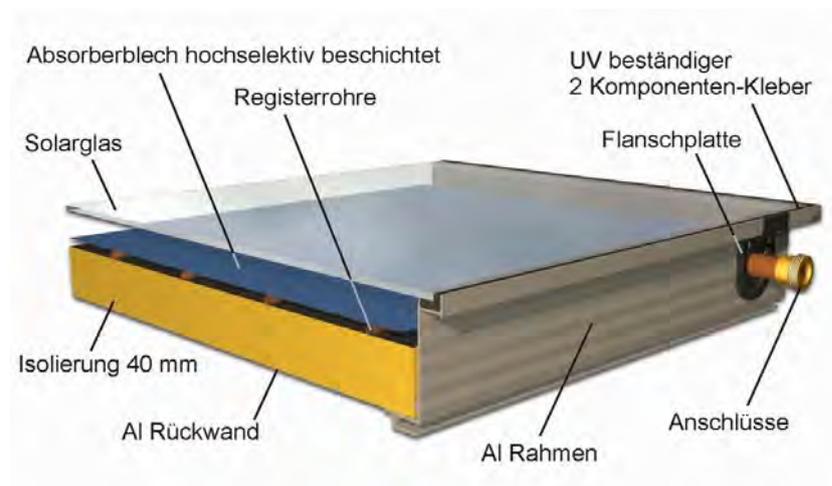


Abbildung 4: Schnitt Standard Flachkollektor mit verklebter Verbindung zur Abdeckung (Quelle: <http://killus-technik.de>)

FK mit geklebter, als auch schwimmender Lagerung sind in unterschiedlichsten Formen und Ausführungen am Markt erhältlich. Im Fall von In-Dach-Kollektoren

existieren eine Vielzahl hiervon abweichender Konstruktionen. Beispielsweise wird die Glasscheibe teilweise durch einzelne gummierte Klemmen gehalten und das Gehäuse dient lediglich als Regenschutz und Isolierungseinbettung.

3.1.2 Vakuumröhrenkollektor (VRK)

Ein VRK besteht aus mehreren parallel angeordneten evakuierten Glasröhren aus denen die Wärme über Wärmerohre oder Absorberrohre in einem Sammler zusammengeführt wird. Die Kollektoren sind je nach Typ hinter spiegelt, um das eintreffende Sonnenlicht zu konzentrieren. Hierdurch lässt sich bei hohem Direktstrahlungsangebot ein höherer Temperaturhub erzielen.



Abbildung 5: Teilschnitt eines hinter spiegelt Vakuumröhrenkollektor mit eingeschobenen Röhren, mechanisch gehalten über Dichtring bzw. Plastikkappen am unteren Ende. (Quelle: <http://paradigma.de>)

In Abbildung 5 ist ein Beispiel einer oberen mechanische Anbindung eines hinter spiegelt Vakuumröhrenkollektors in einem Teilschnitt dargestellt. Die Spiegelelemente sind an einem Profilschienensystem entlang des Sammlers befestigt. Die Vakuumröhren werden über elastische Dichtringe von unten eingeschoben. Dadurch können sich die Vakuumröhren im oberen Bereich des Sammlers bis auf die Reibung / Toleranzen frei bewegen.

Grundsätzlich bietet die Hinterspiegelung von Vakuumröhrenkollektoren eine höhere Angriffsfläche für Wind- und Schneelasten im Vergleich zu Kollektoren ohne Hinterspiegelung.

In dem weiteren Beispiel in Abbildung 6 sind die Vakuumröhren ebenfalls über einen Dichtring im oberen Bereich verbunden, die Befestigung im Endbereich der Vakuumröhren ist über Schellen realisiert. Hiermit sind die Vakuumröhren vom Endbereich her fixiert. Bewegungen durch thermische Ausdehnung (der Gestellmaterialien) können im oberen Bereich ausgeglichen werden.

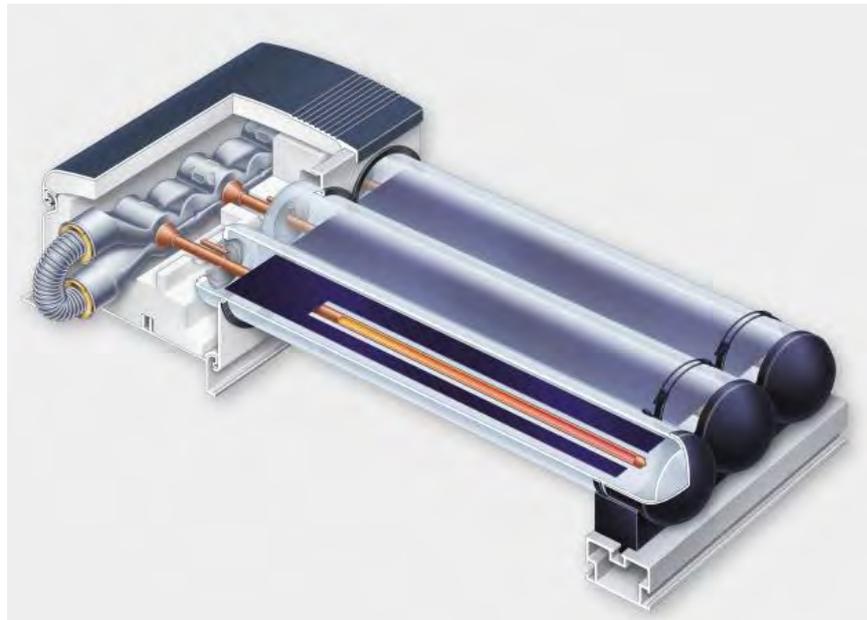


Abbildung 6: Teilschnitt durch einen Vakuumröhrenkollektor mit eingeschobenen Röhren, über Dichtring am Header und Schellenfixierung im Endbereich gelagert (Quelle: <http://viessmann.de>)

Je nach Ausführung der Schellenfixierung können tangentielle Lasten (z. B. aufgestauter Schnee bei Schrägdachmontage) in Richtung der Vakuumröhre auf die untere Profilschiene übertragen werden.

Abbildung 7 zeigt ein weiteres Beispiel in der unten Kunststoffkappen als Verbindungselemente verwendet werden. Im Vergleich zu einer

Schellenfixierung wird hier die Fixierung über eine passende Formgebung für den Endbereich der Vakuumröhren realisiert. Tangentiale Kräfte können möglicherweise eine Verformung der Kunststoffendkappen bewirken, werden jedoch grundsätzlich durch die Endkappen aufgenommen. Wie in den vorigen Beispielen scheint auch hier im oberen Bereich der Verbindung eine Bewegungsfreiheit gegeben zu sein.

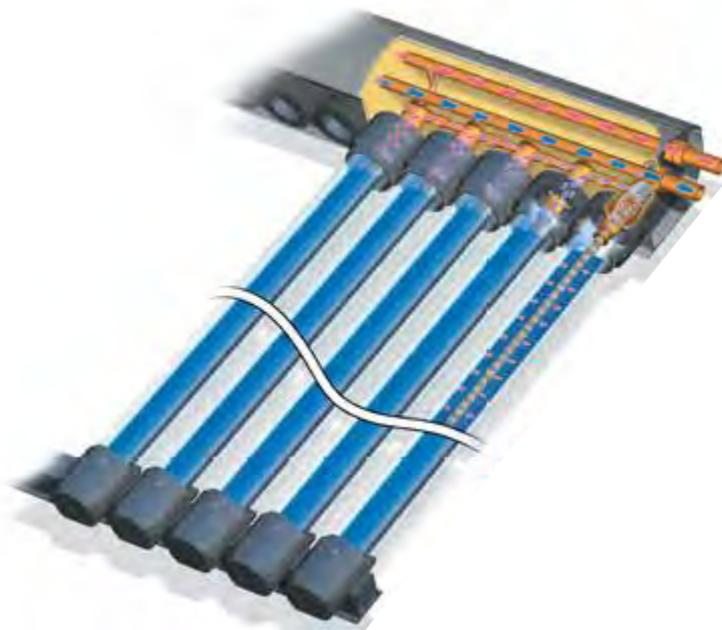


Abbildung 7: Teilschnitt durch einen Vakuumröhrenkollektor mit eingeschobenen Röhren über Dichtkappe im oberen Bereich und Endkappe im unteren Bereich (Quelle: <http://www.elco.de>)

Ein weiteres Beispiel für die untere Verbindung der Vakuumröhren ist in Abbildung 8 dargestellt. In diesem Fall wurde zusätzlich zur erforderlichen Kunststoffabdeckkappe auf Grund der Anbindung an die Glasröhre eine Metallendkappe eingesetzt. Dies bietet den potentiellen Vorteil, dass selbst höhere tangentielle Lasten zu keiner nennenswerten Verformung des unteren Anbindungsbereichs der Vakuumröhrenkollektoren führen können.

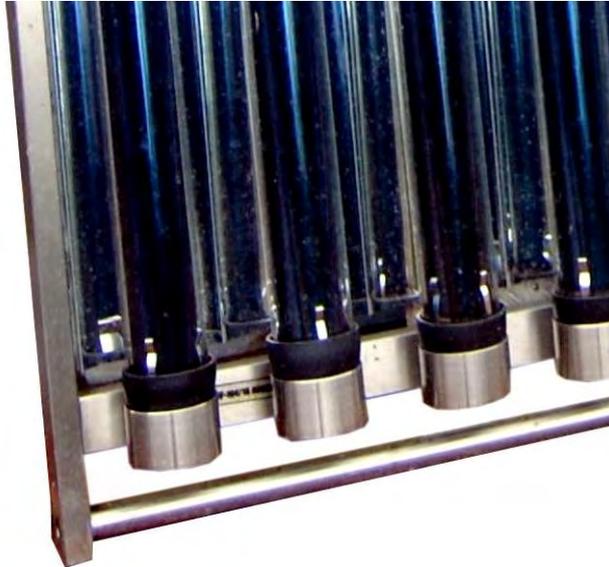


Abbildung 8: Vakuumröhrenkollektor mit Kunststoff als auch Metallendkappe im unteren Verbindungsbereich (Quelle: <http://www.wefa-service.com>)

3.1.3 Kompaktanlagen mit Speicher

In Südeuropa sowie weltweit in wärmeren Regionen werden bevorzugt Kompaktanlagen mit Speicher und Flachdachaufstellung eingesetzt. Da die Anlagen vorwiegend ohne Umwälzung betrieben werden und den Thermosiphon Effekt nutzen, muss der Speicher im Vergleich zum Kollektor erhöht positioniert werden. Dabei sollte die Konstruktion der mechanischen Aufständigung das hohe Gewicht des Speichers sowie Krafteinwirkungen durch Wind- oder Schneelasten des Kollektors gleichermaßen berücksichtigen.

Abbildung 9 zeigt ein typisches in China sehr verbreitetes Beispiel einer solchen Thermosiphonanlage. In diesem Fall ist Kollektor und Speicher nicht trennbar, da die Vakuumröhren direkt mit dem Speicher verbunden sind. Der Unterschied im Vergleich zu den bereits aufgeführten Vakuumröhrenkollektoren liegt hier vor allem in der standardmäßigen Aufständigung und dem schweren Tank.



Abbildung 9: Typische in China verbreitete Thermosiphonanlage, die Vakuurröhren sind direkt mit dem Speicher verbunden (Quelle: <http://baunetzwissen.de> / Zhejiang Shentai)

Im Vergleich hierzu wirkt das nächste Beispiel einer Kompaktanlage mit zwei Flachkollektoren reichlich instabiler (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Kompaktanlage mit Flachkollektoren und zwei Speichern in „abenteuerlicher“ Aufständigung (Quelle: <http://ezinc.com.tr>)

Windeinwirkungen durch Druck oder Sog auf den Kollektor würden sich in diesem Beispiel direkt auf die Aufständigung der Speichertanks auswirken und ab einer bestimmten Grenze ein Versagen herbeiführen.

Als weiteres Beispiel dient eine Thermosiphonanlage auf einem Schrägdach mit zusätzlichem Anstellwinkel montiert.



Abbildung 11: Thermosiphonanlage in Schrägdachmontage mit zusätzlichem Anstellwinkel (Quelle: <http://flow-tech.co.za>)

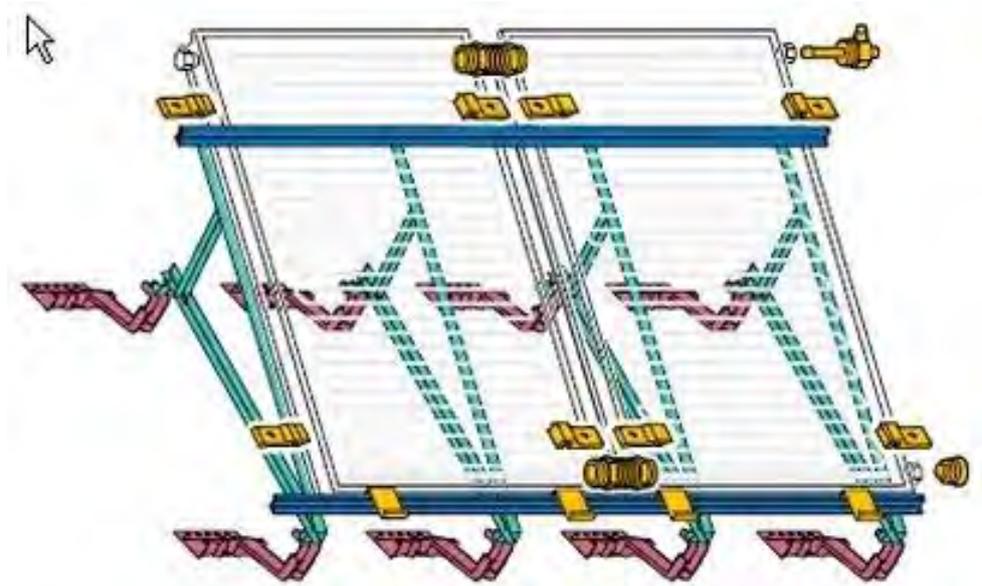
Die Herausforderung bei dieser Konstruktion liegt darin die Kräfte durch Gewicht und Belastungen in das Tragwerk des Daches einzuleiten. Besonders werden hier durch das Speichergewicht ohne zusätzliche Wind- oder Schneelasten dauerhaft Schublasten auf das Montagesystem zwischen Tragwerk (Dach) und Anlage übertragen.

3.2 Befestigungs- und Montagesysteme

3.2.1 Begrifflichkeiten

Neben den Eigenschaften der mechanischen Verbindungen innerhalb der Kollektoren oder Kompaktanlagen selbst gilt es die wirkenden Kräfte (Wind, Schnee, hohes Eigengewicht) in die Tragstruktur eines Gebäudes oder den Boden einzuleiten. Dies geschieht mittels der Befestigungs- und

Montagesysteme. Was in diesem Bericht darunter zu verstehen ist, soll an einem Beispiel in Abbildung 12 veranschaulicht werden.



- Befestigungssystem:** ■ **Kollektorbefestigung (ohne hyd. Verbinder)**
 ■ **Dachbefestigung**
- Montagesystem:** ■ **Montageschiene**
 ■ **Aufständerung (optional)**

Abbildung 12: Zuordnung der im Bericht verwendeten Begrifflichkeiten
(Bildquelle: <http://loebbeshop.de>)

Demnach gelten in diesem Bericht als **Befestigungssystem** („collector fixings“) diejenigen **Verbinder**, die direkt zwischen Kollektor und Montageschiene bzw. zwischen Montageschiene und Tragstruktur Verwendung finden. Das heißt bezeichnend ist, dass das **Befestigungssystem** die übergeordneten Elemente (Kollektor oder Gesamtsystem mit Montageschiene) **befestigt**.

Als **Montagesystem** („collector mounting“) werden Montageschiene oder ggf. Aufständerungsmaterial bezeichnet die als Hilfsmaterial dienen um den Kollektor an der **Tragstruktur** in der passenden Ausrichtung zu **montieren**.

Die Begriffe Befestigungs- und Montagesysteme lassen sich im Einzelfall nicht scharf voneinander trennen, in der Branche wird im Allgemeinen unter Montagesysteme die Gesamtheit der Anbindung verstanden, teilweise jedoch auch nur Einzelteile davon. Im Rahmen dieser Ausführungen soll die Trennung jedoch bewusst fortgeführt werden um eine höhere Detailschärfe zu erreichen und Mißverständnissen vorzubeugen.

3.2.2 Stand der Technik

Im Bereich der Befestigungs- und Montagesysteme ist der Markt von einer breiten Differenzierung beherrscht. Nahezu jeder Kollektorhersteller entwickelt spezifisch für seine Kollektortypen ein eigenes Kollektorbefestigungs- und Montagesystem, wenn auch die Komponenten teilweise sehr ähnlich sind. Oft bestimmt dabei die individuelle Gehäusekante des Kollektors die Anforderung an die Ausführung der spezifischen Kollektorbefestigungen, was eine Kompatibilität zu Kollektoren anderer Hersteller unmöglich macht. Dies ist vermutlich dem Marktinteresse von Diversifizierung geschuldet, sich mit den eigenen Produkten möglichst von der Konkurrenz zu unterscheiden. Hiervon kann jedoch der Endkunde letztendlich nicht profitieren, es erhöht im Gegenteil den relativen Aufwand für Prüfungen und Sicherheitsnachweise.

Im Bereich der Verbindung des Montagesystems mit dem Tragwerk – der Dachbefestigung – gibt es größere Auswahlmöglichkeiten, da die Montageschienen über Verschraubungen relativ einfach mit den Dachbefestigungen verbunden werden können.

In Tabelle 1 sind typische Dachbefestigungen aufgeführt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Besonders Dachhaken und Dachbügel bergen die Gefahr einer unsachgemäßen Installation, weil die Dachbefestigungen auch ohne genaue Einhaltung einer Installationsanleitung ohne spezielle Vorkenntnisse am Dach montierbar sind. Die darauf folgenden Probleme sind detailliert in Abschnitt 5 aufgeführt.

Dachbügel (Ziegeldach)	
Dachhaken (Ziegeldach)	
Falzklemme (Blechedach)	
Sparrenanker (Ziegeldach)	
Stockschraube (Ziegeldach und andere)	
Befestigungshalter (Ziegeldach, Monier Brass)	

Tabelle 1: Typische Dachbefestigungslösungen

4 Normen im Zusammenhang mit mechanischen Lasten

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die für mechanische Belastungen auf Solarkollektoren maßgeblichen Normen geben. Neben der gültigen Prüfnorm [Norm DIN EN 12976-2:2006] werden als Vergleich auch die Prüfnormen im Bereich der Photovoltaik [Norm IEC 61215:2005 ; Norm IEC 61646:2008] betrachtet. Der Eurocode 1 mit der Beschreibung der Einwirkungen durch Wind- und Schneelasten [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005] geben Aufschluss über die in Europa bestehenden Anforderungen und Einwirkungen auf Tragwerke. In Deutschland gelten weiterhin die nationalen Anhänge [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010]. Zusätzlich erwähnt sind Normen, die vergleichbare Themengebiete behandeln, wie [Norm DIN EN 12210:2003 ; Norm DIN EN 12211:2000] für Fenster und Türen und [Norm DIN EN 12179:2000] für Vorhangfassaden (Fassadenelemente ohne tragende Funktion), da sie Ansatzpunkte für gegenüber der [Norm DIN EN 12975-2:2006] erweiterte Prüfungen geben. Ferner wird kurz auf die amerikanische Norm [Norm ASTM E 1830 – 09] eingegangen. Der Abschnitt wird mit einem Vergleich der Normen mit Blick auf die zu erarbeitenden Lastfälle abgeschlossen.

4.1 EN 12975 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren

Die Europäische Norm EN 12975 ist das ausschlaggebende Regelwerk für solarthermische Flüssigkeitskollektoren und ist in zwei Teile gegliedert. Die, im Jahr 2000 erstmals erschienene und 2006 überarbeitete EN 12975-1 gibt allgemeine Anforderungen für Flüssigkeitskollektoren vor [Norm EN 12975-1:2006]. Diese Anforderungen beziehen sich auf die Leistungsfähigkeit, Funktionalität, Sicherheit und mechanische Belastbarkeit der Produkte. Die Anforderungen sollen sicherstellen, dass derart geprüfte Kollektoren in der Lage sind, den Umwelteinflüssen an ihrem Aufstellungsort Stand zu halten und einen Mindest-Qualitätsstandard zu erfüllen [Norm EN 12975-1:2006]. Die [Norm DIN EN 12975-2:2006] legt die Prüfverfahren fest, mit denen die Erfüllung der Vorgaben kontrolliert werden kann. Die Prüfungen sind genau definiert und

reproduzierbar. Neben Tests der Zuverlässigkeit sind zusätzlich zwei Verfahren zur Charakterisierung der Wärmeleistung von Flüssigkeitskollektoren enthalten [Norm DIN EN 12975-2:2006]. In Abschnitt 5.9 ist die *Mechanische Belastungsprüfung* beschrieben. Die Prüfung dient dazu die **Belastbarkeit der Verbindung zwischen Kollektorgehäuse und Kollektorabdeckung gegenüber Schnee- und Windlasten zu bestimmen**. Sie beinhaltet einen Ablauf von definierten Belastungen, die auf den Kollektor aufgebracht werden und ist in eine Druck- und eine Unterdruckprüfung unterteilt. Der Kollektor wird dabei horizontal auf eine geeignete Unterlage mittels der zugehörigen Kollektorbefestigung fixiert. Der Prüfdruck (sowohl Zug als auch Druck) wird in Stufen von 250 Pa bis mindestens 1000 Pa erhöht. Die Zeit zwischen den Stufen muss ausreichend sein, um den Prüfdruck zu stabilisieren. Zudem hat der Hersteller die Möglichkeit einen über 1000 Pa liegenden Grenzbelastungswert mit dem Prüflabor abzustimmen oder die Prüfung kann bis zum Versagen fortgeführt werden. Die Prüfung gilt als nicht bestanden, wenn es entweder zu einer Zerstörung der Abdeckung oder anderer Bauteile kommt, oder eine dauerhafte Verformung von mehr als 0,5 % der Kollektorlänge in vertikaler Richtung auftritt. Die Druckbeaufschlagung kann entweder mit Saugnäpfen, oder mit einer gefüllten Rahmenkonstruktion (Wasser, Kies, etc.) auf den Kollektor übertragen werden. Für luftdichte Kollektoren ist auch ein Verfahren mit Luftdruck nach [Norm DIN EN 12211:2000] zulässig.

Die Ergebnisse und ggf. Schäden werden erfasst und in einem Prüfbericht dokumentiert. Einzelheiten, zusammen mit Informationen zum maximalen Druck oder Unterdruck dem der Kollektor schadensfrei standgehalten hat, sind anzugeben. Die Bemessungsfläche entspricht der Aperturfläche des Kollektors. Der zulässige Druck p_{zul} wird durch Division mit einem Sicherheitsfaktor S_p ermittelt. Dieser beträgt für positiven Druck $S_{p+} = 1,5$ und für negativen Druck $S_{p-} = 2$, so dass gilt:

$$p_{zul} = \frac{p_{Messung}}{S_p} \quad S_p = 1,5 \text{ für Zug; } S_p = 2 \text{ für Druck}$$

Wird beispielsweise der geforderte Mindestdruck von 1000 Pa zum Bestehen der Prüfung erreicht, sind lediglich 670 Pa für Druckbelastung bzw. 500 Pa für Zugbelastung zulässig.

Bezüglich der **Montagesysteme** wird im Abschnitt der mechanischen Belastungsprüfung auf **nationale und europäische Richtlinien der Bauplanung** nach EN 1991 (Eurocode 1) verwiesen. Damit sind die Montagesysteme von der Prüfung ausgenommen und der Nachweis bzw. die Prüfung der Sicherheit liegt alleinig beim Hersteller (vgl. Abschnitt 10).

4.2 EN 12976 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - vorgefertigte Anlagen

Die EN 12976 Teil 1 und 2 ist entsprechend der EN 12975 in Allgemeine Anforderungen [Norm DIN EN 12976-1:2006] und Prüfverfahren [Norm DIN EN 12976-2:2006] gegliedert. In ihren Bereich fallen vorgefertigte thermische Solaranlagen, welche wiederum Thermosiphon-Anlagen beinhalten. Die Norm verweist hier im Fall der mechanischen Belastungsprüfung für vorgefertigte Anlagen mit nicht trennbarem Kollektor auf eine Handhabung wie in der EN 12975-2 beschrieben. Im Fall von Thermosiphonsystemen mit Vakuumröhrenkollektoren bleibt weitgehend ungeklärt, wie die Prüfung umgesetzt wird. Zum Beispiel ist eine Drehung in die Horizontale im Sinne der Prüfanweisung für Kollektoren, bei vielen Kompaktanlagen auf Grund der statischen Konzeption völlig unmöglich, der Tank würde sofort aus seiner Lagerung fallen. Ansätze dazu wie es dennoch zu ausreichend reproduzierbaren Prüfbedingungen kommen kann wurden im Rahmen der Solar Keymark scheme rules später übergangsweise festgelegt.

Solaranlagen bei denen der Kollektor getrennt vom Speicher geprüft werden kann durchlaufen die Prüfungen nach EN 12975-2 und damit die im vorigen Abschnitt beschriebene mechanische Belastungsprüfung.

Das bedeutet eine Überprüfung der **mechanischen Stabilität der Aufständigung** in Verbindung mit dem Speichertank ist bei Anlagen mit

trennbarem Kollektor **durch die Prüfnormen für solarthermische Anlagen nicht gegeben!**

Allerdings gilt hier weiterhin der Verweis auf nationale und europäische Richtlinien der Bauplanung nach EN 1991 (Eurocode 1).

4.3 EN 12179 Widerstand gegen Windlast-Prüfverfahren von Vorhangfassaden

Die [Norm DIN EN 12179:2000] beschreibt die Prüfung durch positiven und negativen Luftdruck solcher Fassadenelemente, die keine tragende Funktion erfüllen und daher auch als Vorhangfassaden bezeichnet werden. Sie bezieht sich in ihrer Windlastbemessung ausdrücklich auf den Eurocode 1 (EN 1991) und verlangt eine praxisnahe Befestigung des Prüfkörpers. Auch hier werden mehrere Messungen von Durchbiegung und Lageänderung durchgeführt.

Die Norm kann auch zur Prüfung von Kollektoren eingesetzt werden. Vor der Prüfung werden die entsprechenden Drücke, die durch die Windlasten übertragen werden, rechnerisch ermittelt. Geprüft wird mit einer Druckkammer, in die der Kollektor als Rückwand eingesetzt wird. Der Aufbau muss mindestens bis zu dem höchsten Prüfdruck luft-undurchlässig sein. Die Einrichtung muss zusätzlich in der Lage sein, schnell aufeinanderfolgende, geregelte positive und negative Druckwechsel zu vollziehen. Eine messtechnische Erfassung der Lageänderung mit einer Genauigkeit von mindestens 0,1 mm ist ein vorgeschriebener Teil der Versuchseinrichtung. Der Prüfling wird in voll gebrauchsfähigem Zustand in die Druckkammer eingesetzt. Die Durchführung der Prüfung erfolgt zuerst mittels positivem Druck. Dazu wird ein Zyklus durchlaufen, der aus einer Abfolge von Luftdruckstößen besteht. Der Prüfkörper wird in vier Schritten bis zur maximal errechneten Belastung getestet. Zuvor werden drei Luftdruckstöße à 3 sek. mit 50 % der maximalen Windlast oder 500 Pa, je nachdem welcher Wert größer ist, eingeleitet. Danach wird der eigentliche Prüfverlauf in vier 25 % Schritten durchgeführt. Die Stufen werden jeweils für $15 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ aufrechterhalten. Falls gewünscht, kann der Prüfling bei einer erhöhten Belastung von bis zu 150 % der Windlastmessung

für einen zusätzlichen Sicherheitsnachweis getestet werden. Die Prüfung bei negativem Druck erfolgt nach dem gleichen Verfahren. Innerhalb von 1 h nach dem Test sind bleibende Verformungen und Schäden festzuhalten. Ein ausführlicher Prüfbericht mit allen Ergebnissen sowie eine Zeichnung des Prüfkörpers in der Einrichtung sind Bestandteile dieser Normprüfung [Norm DIN EN 12179:2000].

4.4 EN 12211 Fenster und Türen Windwiderstandsfähigkeit Prüfverfahren

Die Norm [Norm DIN EN 12211:2000] beschreibt die Prüfverfahren von Fenstern und Türen auf Widerstandsfähigkeit gegen Winddruck. Sie kann ebenfalls für Bauteile in solarthermischen Anlagen in Betracht gezogen werden. Beispielsweise ist eine Anwendung für Fenster mit integrierten Kollektoren sinnvoll. Die Druckkammer entspricht in ihrem Aufbau der in der EN 12179 beschriebenen Einrichtung. Abweichend ist die vorbereitende Akklimatisierung des Prüflings bei einer relativen Feuchte von 25 % - 75 % und einer Temperatur von 10 °C bis 30 °C über einen Zeitraum von vier Stunden. Der Prüfdruck P ist in die drei Werte P1, P2 und P3 eingeteilt, die in dem folgenden Verhältnis zueinander stehen:

$$P2 = 0,5 \cdot P1$$

$$P3 = 1,5 \cdot P1$$

Ziel der Prüfung ist die Erfassung der relativen, frontalen Durchbiegung. Ähnlich dem Verfahren in der EN 12179 werden für positiven Druck zu Anfang drei Druckstöße aufgebracht, welche um 10 % höher liegen als der Prüfdruck P1. Anschließend wird der Druck in Schritten von 100 Pa/s bis P1 erhöht und 30 s lang gehalten. Die Durchbiegung in dieser Prüfstellung wird an insgesamt 8 Messpunkten erfasst. Danach wird der Prüfdruck mit derselben Geschwindigkeit reduziert. Negativer Druck wird nach dem gleichen Ablauf geprüft. Der Test mit wiederholtem Druck dient der Abbildung böiger Windlasten. Der Prüfkörper wird mit dem Prüfdruck P2 über 50 Zyklen wechselnd negativ und positiv belastet. Die Druckänderung von -P2 auf +P2

und die Haltezeit des Drucks in den jeweiligen Endpunkten beträgt 7 ± 3 s. Die Sicherheitsprüfung mit dem höchsten Prüfdruck P3 ist nach demselben Schema aufgebaut, mit dem Unterschied, dass in dem Durchgang bei 0 Pa ein Haltepunkt von ebenfalls 7 ± 3 s vorgesehen ist. Die abschließende Sicherheitsprüfung mit P3 stellt geringere Anforderungen an den Prüfkörper; hier sind Verformungen ausdrücklich auch in hohem Maße zugelassen. Kriterium ist die anhaltende Dichtheit.

Der Prüfbericht enthält eine Skizze der Prüfoberfläche, die Anordnung der Messpunkte zur Bestimmung der Lageveränderung und alle aufgetretenen Schäden sowie die Durchbiegung bei Prüfdruck P1.

Im Bereich der Solarthermie wird diese Norm insbesondere vom französischen Prüfzentrum CSTB (Centre Scientifique et Technique de Bâtiment) zur mechanischen Kollektorprüfung eingesetzt.

4.5 IEC 61646/61215 Photovoltaik Prüfnormen

Die beiden IEC-Normen [Norm IEC 61215:2005 ; Norm IEC 61646:2008] beschäftigen sich mit der Prüfung von Photovoltaikmodulen auf kristalliner und Dünnschichttechnologie-Basis. Sie sind die mechanische Prüfung betreffend weitestgehend miteinander identisch und bezüglich ihres Verwendungszwecks als äquivalent zur DIN 12975 für solarthermische Kollektoren anzusehen.

Ogleich die Testbedingungen in vielen Belangen denen der DIN 12975 entsprechen, gibt es abgesehen von der besonderen Beachtung der elektrischen Komponenten einige weitere deutliche Unterschiede:

- Es wird grundsätzlich bei einem Druck und Zug von 2400 Pa geprüft. Als Basis dieser Festlegung dient die Annahme einer Windgeschwindigkeit von 130km/h was einem äquivalenten Druck von 800 Pa und einem Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung von Böen und Ungenauigkeiten des Verfahrens von 3 entspricht (Abschnitt 10.16.3 Anmerkung 1).

- Für den Fall einer zu erwartenden besonders starken Eis- oder Schneeeinwirkung ist die Vorderseite zusätzlich mit 5400 Pa positivem Druck zu belasten (Abschnitt 10.16.3 Anmerkung 1).
- Es wird ausdrücklich auf die potentielle Notwendigkeit hingewiesen, nationale beziehungsweise regionale klimatische Bedingungen zu berücksichtigen und dazu nationale Regelwerke zu Rate zu ziehen (Abschnitt 10.16.3 Anmerkung 2).
- Verschiedene Konfigurationen der Prüfung **müssen alle geplanten Befestigungsmethoden darstellen** (Abschnitt 10.16.3 Anmerkung 3).
- Die aufzubringende Last ist jeweils für eine Stunde zu halten (Abschnitt 10.16.3 c).
- Der gesamte Lastzyklus (positiver Druck, halten, negativer Druck, halten) wird drei Mal durchgeführt womit sich eine Gesamtprüfzeit von mindestens sechs Stunden ergibt.

4.6 EN 1991 Einwirkungen auf Tragwerke

Die Europäische Normenreihe EN 1991 (Eurocode 1) beinhaltet mit den nationalen Anhängen beispielsweise für Deutschland mit [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010] einige Anpassung an die lokalen Gegebenheiten, insbesondere die Einteilung in Schnee- und Windzonen. Anhand dieser Kategorisierung lassen sich vereinfachte Rechenverfahren zur Ermittlung der statistischen umweltbedingten Lasten auf Gebäude und für Gebäudeteile durchführen. Dabei hat die europäische Normenreihe EN 1991 inzwischen die deutsche Normenreihe mit [Norm DIN 1055-4:2005 ; Norm DIN 1055-5:2005] und weiteren ersetzt. Obwohl es sich grundsätzlich gegenüber solarthermischen Kollektoren um **fachfremde Normen (Bauwesen)** handelt, war ehemals in der [Norm DIN 1055-4:2005] zur Einwirkung durch Windlasten

durch Satz 6 ihres Anwendungsbereiches **auch eine Anwendung auf nicht ausdrücklich genannte Gebiete zugelassen**¹. Die Aufführung nicht ausdrücklich genannter Gebiete ist in dieser Form in der [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] nicht mehr enthalten.

In der Praxis der Industrie ist die Normenreihe der EN 1991 mit [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005] und ihren nationalen Anhängen der maßgebliche Leitfaden zur Auslegung und Berechnung solarthermischer Kollektoren. In einer vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme durchgeführten Umfrage, die ca. 20% der neu installierten Leistung in Deutschland abdeckt, konnte dieses Bild bestätigt werden. Die in der EN 1991 angenommenen Referenzlasten haben eine jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit² von 0,02.

4.6.1 EN 1991-1-4: Einwirkungen auf Tragwerke, Windlasten

Windeinwirkung ist durch die [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] als freie veränderliche Einwirkung definiert. Ihre räumliche Verteilung am Bauwerk ist nicht explizit bekannt, sondern kann unterschiedliche Formen annehmen. Größe und Richtung der gesamten Einwirkung ist nicht durch Größe und Richtung in einem Punkt abbildbar. Außerdem ist ihre zeitliche Änderung nicht vorhersehbar, insbesondere auch wechselnd³. Die Norm beschäftigt sich mit der Berechnung von Windlasten an Bauwerken und deren Bauteilen bis zu einer Bauhöhe von 300 m. Sie basiert auf dem Eurocode 1 und damit der Normenreihe EN 1991. Es ist grundsätzlich zulässig mit Hilfe dieser Norm Windlasten an Bauteilen zu ermitteln, die nicht ausdrücklich in der Norm genannt werden,

¹ Trotz dieser formal zugelassenen Übertragbarkeit muss festgestellt werden, dass viele der hinterlegten Beiwerte und Formeln insbesondere im Bereich der Schwingungsbetrachtung auf große Bauwerke ausgerichtet sind und daher für Kollektoren keine Anwendung finden können.

² Wahrscheinlichkeit, dass die angegebenen Werte innerhalb eines Jahres überschritten werden (p-Wert).

³ Zu den Definitionen der Klassifikation der Einwirkung siehe [Norm DIN EN 1990:2010] Abschnitt 1.53

beispielsweise an solarthermischen Kollektoren. Die Norm verwendet zur Berechnung Geschwindigkeitsdrücke, die aus Windgeschwindigkeiten ermittelt werden. Diese werden, soweit keine anderen statistischen Werte vorliegen, unabhängig von der Himmelsrichtung mit vollem Wert und normal zur Fläche angenommen.

Der Geschwindigkeitsdruck q wird in folgender Relation zu der Windgeschwindigkeit v definiert:

$$q = \rho/2 \cdot v^2 \quad \text{mit } \rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

Für nicht schwingungsanfällige Bauteile ist es ausreichend eine statische Ersatzlast nach den vorgegebenen Rechenwegen zu ermitteln. Die entsprechenden Windgeschwindigkeiten sind in den Eurocodes enthalten und können in diesem Beispiel für Deutschland der Windkarte (Abbildung 13) entnommen werden.

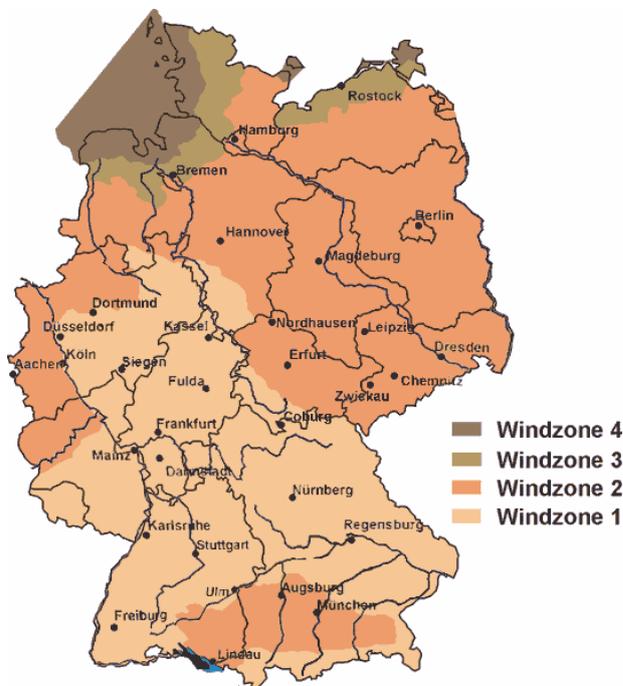


Abbildung 13: Windzonenkarte Bundesrepublik Deutschland (Quelle: [Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010])

Um aus der Geschwindigkeit den Winddruck zu berechnen ist es im nächsten Schritt notwendig, Höhe, Aussetzung, die Gebäudeform und die Lage des Bauteils mit einzubeziehen. Windlasten an Bauwerken bis zu einer Bauhöhe von 25 m dürfen nach einem vereinfachten Verfahren berechnet werden.

Als schwingungsanfällige Bauwerke und Bauteile gelten solche, bei denen ihre Verformung infolge von Windeinwirkungen durch Böenresonanz um 10 % oder mehr vergrößert wird [Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010]. Eine zusätzliche statische Ersatzlast wird zur Abbildung dieser Belastung herangezogen. Weitere winderregte Beanspruchungen und Instabilitätseffekte sowie wirbelerregte Querschwingungen müssen gesondert untersucht werden.

Der so auf die Außenflächen einwirkende Winddruck ermittelte Winddruck w_e wird abschließend mit seinem aerodynamischen Beiwert c_{pe} multipliziert, der sich aus einer modellhaften Annäherung über Geometrie, Bauform und Lage des Bauteils ergibt [Norm DIN EN 1991-1-4:2005]:

$$w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e) \quad q_p(z_e): \text{Böengeschwindigkeitsdruck bei Bezugshöhe } z_e$$

Die Beiwerte können dabei auch negative Werte annehmen, um Sog darzustellen. Die Höhe über NN spielt dabei erst ab 800 m eine Rolle, ab dort wird der Druck linear um 10% des Grundwertes pro 100 m erhöht. Die so in der Norm angegebenen Werte werden durch Messungen in [Clobes 2008] für die Windzone 2 bestätigt.

4.6.2 EN 1991-1-3 Einwirkungen auf Tragwerke, Schneelasten

Die aus dem Eurocode 1, Teil 1-3 abgeleitete [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] enthält Berechnungsgrundlagen für Schnee- und Eislasten an Bauwerken und Anlagen an Orten, die nicht höher als 1500 m ü. NN liegen. Schneeeinwirkung ist als veränderliche Einwirkung definiert (vgl. [Norm DIN EN 1990:2010] Abschnit 1.5.3). Darüber hinaus kann man sie in bestimmten Grenzen als ortsfest annehmen. Davon abweichende Sonderfälle wie Überhang, Verwehungen und andere asymmetrische Lastfälle sind generell gut vorhersag-

und darstellbar. Aufgrund empirischer Erkenntnisse ist für das Norddeutsche Tiefland eine von der sonstigen Berechnung abweichende außergewöhnliche Schneelast anzunehmen, da die rechnerischen Werte in seltenen Fällen um ein Mehrfaches überschritten wurden [BDH and BSW 2012].

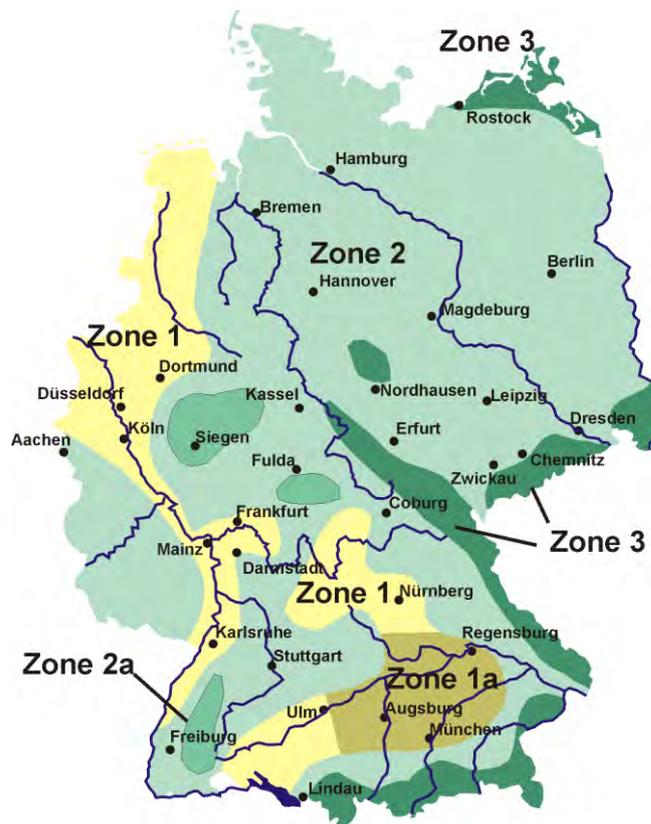
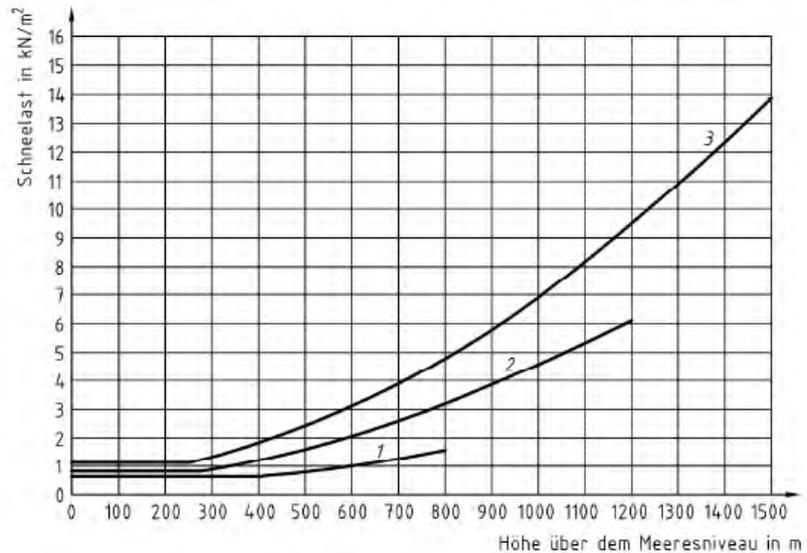


Abbildung 14: Schneelastzonenkarte Bundesrepublik Deutschland, (Quelle: [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010])

Die Schneezonenkarte Abbildung 14 für den deutschen Raum gibt Aufschluss über die drei Schneezonen. Zusammen mit dem Betrag der Geländehöhe über Meeresniveau in Meter kann der Wert der Schneelast S_k auf dem Boden in kN/m^2 ermittelt werden. Für jede Zone sind zusätzlich Sockelbeträge angegeben, die nicht unterschritten werden dürfen. Die Abhängigkeiten sind in Abbildung 15 dargestellt.



Legende	Sockelbeträge (Mindestwerte):
1 Zone 1	Zone 1 0,65 kN/m ² (bis 400 m ü. d. M.)
2 Zone 2	Zone 2 0,85 kN/m ² (bis 285 m ü. d. M.)
3 Zone 3	Zone 3 1,10 kN/m ² (bis 255 m ü. d. M.)

Abbildung 15: Schneelastzonen und Abhängigkeit von der Höhe über Meeresniveau (Quelle: [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010])

Die charakteristischen Werte in den Zonen 1a und 2a ergeben sich jeweils durch Erhöhung der Werte aus den Zonen 1 und 2 mit dem Faktor 1,25. Die aus der Bodenlast S_k resultierende Schneelast auf dem Dach lässt sich durch Einbeziehung der Dachform und des zugehörigen **Formbeiwertes** bestimmen. Dabei spielt der Neigungswinkel des Daches eine besondere Rolle, da er bestimmt, in welchem Maß Schnee abrutscht oder sich ansammeln kann. Die Norm gibt Regelungen für alle Dachformen und berücksichtigt zusätzlich auftretende Verwehungen. Beispielsweise ergibt sich für ein Pultdach mit Neigungswinkel von $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ein Formbeiwert μ von 0,8. die Schneelast auf dem Dach S_i berechnet sich wie folgt [Norm DIN EN 1991-1-3:2010]:

$$S_i = \mu \cdot S_k \quad \mu = \text{Formbeiwert}, S_k = \text{Schneelast auf dem Boden}$$

Grundsätzlich wird ein Abtauen des Schnees durch Wärmeübergang aus dem Dach nicht berücksichtigt. Bezogen auf moderne gedämmte Gebäude und auch

auf ST Kollektoren ist dies sicher sinnvoll, da beispielsweise im Falle einer Aufdachmontage der Wärmeübergang eines vollständig bedeckten Kollektors gering ist. Dabei ist von solchen Fällen auszugehen, in denen der Schneefall tatsächlich stark genug ist, den Kollektor dauerhaft zu bedecken (nur dann kann aber auch eine mechanische Belastung entstehen)⁴. Darüber hinaus ist der in der Norm der Umgang mit einigen Spezialfällen beschrieben, die eine lokal erhöhte Last erzeugen

4.6.3 Arbeitsblatt zur Ermittlung von Schneelasten an ST Anlagen (BDH, BSW)

Wegen der unklaren Situation der konkreten Anwendung [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] für solarthermische Anlagen wurde im Mai 2012 für Schneelasten von den Industrieverbänden (BDH, BSW) ein Arbeitsblatt zur Norm herausgegeben [BDH and BSW 2012]. Hierin sind spezielle Anwendungsfälle beschrieben und Empfehlungen für die Auslegungspraxis angegeben. Das Arbeitsblatt umfasst 7 Seiten und behandelt entstehende Linienlasten durch Schneefanggitter oder Dachaufbauten; abrutschenden Schnee von Höhensprüngen; die außergewöhnliche Situation im Norrdeutschen Tiefland; Schneeanwehung bei aufgeständerten Systemen und Schneelasten bei Wandmontage von ST Anlagen.

Das Arbeitsblatt zeigt grundsätzlich den Klärungsbedarf der Berechnungsgrundlagen, wenn es in diesem Fall auch vorerst für die Situation in Deutschland entwickelt wurde. Ein entsprechendes Arbeitsblatt für Windlasten war ebenfalls geplant. Dies konnte jedoch auf Grund des Bedarfs weiterer Untersuchungen bisher nicht fertiggestellt werden.

⁴ Im Normalfall genügt bereits eine kleine unbedeckte Fläche um den Kollektor durch Eigenerwärmung vom Schnee zu befreien.

4.7 ASTM E1830

Der von der US-amerikanischen „ASTM International“ herausgegebene Standard [Norm ASTM E 1830 – 09] zur Prüfung von PV-Modulen gleicht in vielerlei Hinsicht seinen deutschen Entsprechungen. Zusätzlich zu den in den deutschen PV-Normen beschriebenen Prüfungen wird allerdings eine Prüfung der Festigkeit unter Torsion bis zu einem Winkel von $1,2^\circ$ durchgeführt. Dadurch soll eine nicht-planare Einbau- oder Transportsituation simuliert werden. Außerdem beinhaltet das Verfahren einen zyklischen Lasttest⁵.

4.8 Verfahren in Europa

In französischen Testzentren wird nach [Norm DIN EN 12179:2000 ; Norm DIN EN 12210:2003 ; Norm DIN EN 12211:2000] geprüft, die für Fenster, Türen und Vorhangfassaden (also Fassadenelemente, die keine tragende Funktion ausüben; nur „vorgehängt“ sind) gelten. Die DIN 12179 beschreibt Prüfverfahren in denen mit Hilfe einer Druckkammer positiver und negativer Druck auf die Probe aufgebracht werden kann. Die Probe muss dazu aufwändig präpariert und mit einem Holzrahmen versehen werden, um die tatsächliche Befestigungssituation gut abzubilden. Dachhaken und Befestigungssysteme werden auch getestet. Die Drücke werden je nach jeweiliger Topographie und Lage dem Eurocode 1 entnommen.

In Frankreich befinden sich Hersteller, die von den Synergien zwischen Fenster und Kollektorfertigung profitieren. Ein Unternehmen, welches in Fensterscheiben integrierte Flachkollektoren herstellt bestätigt die Übertragbarkeit der Erfahrungen.

Schwedische Prüfzentren benutzen die bereits erwähnte Vakuum-Methode, bei der der Röhrenkollektor mit einer Plane luftdicht umschlossen wird. Danach

⁵ [Norm ASTM E 1830 – 09] Abschnitt 1.1.4 und 7.7: 10000 Zyklen unter 1400 Pa Belastung; die Qualität der Belastung (wechselnd oder schwellend, Frequenz usw.) wird nicht definiert

wird die Luft so lange herausgesaugt, bis der zur Prüfung vorgeschriebene Druck vorhanden ist. Nach diesem Prinzip plant das italienische ENEA, ebenfalls in naher Zukunft zu prüfen. Bei Flachkollektoren verfahren sie nach dem Saugfuß-Prinzip.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass auch im europäischen Ausland die Industrie momentan auf eigene Erfahrungen und Berechnungen baut und die in der EN 12975 vorgeschriebenen Tests nur pro forma durchführen lässt (um das für Förderungen der BAFA zwingend notwendige Solar Keymark Zertifikat zu erhalten). Die Ausgestaltung der DIN 12179, die für Vorhangfassaden gilt, wirkt in ihren mechanischen Lastannahmen und durch die Nachahmung realistischer Einbaubedingungen gegenüber der EN 12975 bedeutend sinnvoller. Ebenso scheint die zur Erlangung des französischen CSTBat-Zertifikats notwendige Konformität mit der EN 12211 aufgrund der durchgeführten Lastwechsel, stärker ausgearbeiteter Messungen und generell höheren Belastung (bis 3000 Pa) der Realität näher zu sein. Die dazu notwendigen Prüfungen sind jedoch auch um ein Vielfaches aufwendiger und nicht für alle Kollektorbauarten anwendbar.

4.9 Vergleich der Normen

Der Vergleich der verschiedenen Ansätze bezüglich Lastannahmen und Prüfbedingungen dient dazu, grundlegende Gemeinsamkeiten aller genannten Verfahren zu ermitteln. Dabei ist immer wieder der Bezug zur gültigen Prüfnorm EN 12975 herzustellen und gerade die Unterschiede der angenommenen Lastgröße auf ihre Folgen zu untersuchen.

Zunächst fällt auf, dass alle angeführten Normen eine über den gesamten Prüfkörper **homogen verteilte, quasi-statisch** aufgebrachte und **normal** zur Oberfläche wirkende Last fordern. Dies ist offenbar weniger den in der Natur üblichen Bedingungen geschuldet sondern dem sinnvollen Bestreben nach einer möglichst leichten Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Im Fall von Windbelastung ist diese Annahme durchaus vertretbar, da Effekte wie lokale Druckspitzen und

Böenwirkung durch einen entsprechenden Sicherheitsfaktor erfasst werden können⁶. Auf diese Weise verbleibt selbst bei unerwarteten kurzfristigen Lastspitzen noch eine Sicherheitsreserve. Darüber hinaus ist bei jenen geometrischen Abmessungen, wie sie bei Kollektoren und Modulen vorkommen, keine starke Belastung durch Reibwirkung an der Oberfläche zu erwarten, der Wind kann also als rein normal auf die Oberfläche wirkend angenommen werden.

Belastung durch Schnee allerdings erzeugt erfahrungsgemäß⁷ deutlich asymmetrische Lastfälle. Insbesondere die Annahme der homogenen Verteilung ist im Fall abrutschender Schneemassen, Überhängen und Verwehungen sowie Ansammlungen an bestimmten Dachzonen nicht mehr erfüllt. Zusätzlich entstehen an der geneigten Kollektor-/Dachebene Hangabtriebskräfte tangential zur Oberfläche. Diese werden im Falle von schwimmend gelagerten Kollektoren über die Abdeckung an die Unterkante des Rahmens geleitet und erzeugen so vorrangig eine Linienlast auf eine Rahmenkante. Durch inhomogenen Lastangriff entstehen zusätzlich Biege- und Torsionsbeanspruchungen in den Befestigungspunkten, die in der Prüfung mit homogen verteilter Last nicht oder nur in geringem Umfang dargestellt werden können.

Inwiefern eine **Last mit einem Prüfverfahren mehr oder weniger homogen aufgebracht werden kann** ist zudem in den Normen nicht hinreichend geklärt. Für den Fall von Vakuumsaugern wurde dies im Projektvorhaben eingehend untersucht (siehe Abschnitt 9.2).

Unterschiedlich in den Normen wird offenbar die **Erfassung der Verformungen** während und nach den verschiedenen Prüfungen gehandhabt.

⁶ Wie bei den PV-Normen [Norm IEC 61215:2005 ; Norm IEC 61646:2008] mit Sicherheit 3

⁷ Vgl. [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] Abschnitt 6: Örtliche Effekte

Während die Normen für Fenster und Vorhangfassaden eine Vielzahl von Messungen fordern und insbesondere die [Norm DIN EN 12211:2000] mit 8 Messpunkten enormen Aufwand betreibt, beschränken sich die Vorgaben in der Photovoltaik und der Solarthermie auf Sichtprüfung und einer qualitativen Einschätzung⁸. Dies hängt allerdings auch damit zusammen, dass gerade bei Fenstern bewegliche Teile vorhanden sind und daher selbst geringe Verformungen schon eine Beeinträchtigung der Funktion (Schließmechanismus) bewirken können.

Die Behandlung der **Befestigungs- und Montagesysteme** im Rahmen der Prüfungen ist uneinheitlich und in vielen Fällen unklar geregelt. Die [Norm DIN EN 12179:2000] spricht ausdrücklich von einer praxisnahen Befestigung und der Verwendung der gleichen Befestigungen wie auf der Baustelle⁹. Die [Norm DIN EN 12975-2:2006] verweist bezüglich der Befestigungs- und Montagesysteme auf nationale und europäische Richtlinien der Bauplanung nach EN 1991. Dies zieht einen entsprechend hohen Aufwand beim Hersteller nach sich vor allem weil die Thematik im Grunde durch die Normenreihe der EN 1991 nicht zufriedenstellend abgedeckt ist. Der Fokus der Prüfungen nach [Norm DIN EN 12975-2:2006] liegt auf der Untersuchung des Kollektors als Einzelkomponente unabhängig von Befestigungs- und Montagesystemen. Im Bereich der Photovoltaik zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Forderung, das PV-Modul „nach dem vom Hersteller vorgeschriebenen Verfahren“¹⁰ zu befestigen lässt viele Unklarheiten. Da die Befestigungslösungen der Hersteller darüber hinaus sehr unterschiedlich sind und beispielsweise verschiedene Profile als Tragwerk Verwendung finden, ist es in der Praxis der Prüfung mit den derzeit verwendeten Prüfständen eher die Ausnahme denn die Regel, dass das bzw. die

⁸ Mangels eines vorgegebenen Messverfahrens in der [Norm DIN EN 12975-2:2006] beschränkt sich die Einschätzung der zu bewertenden Verformung <0,5% in der Praxis auch auf eine qualitative Betrachtung. Zusätzlich ist nicht eindeutig: 0,5% wovon?

⁹ [Norm DIN EN 12179:2000] Abschnitt 5.1 und 6

¹⁰ [Norm IEC 61646:2008] Abschnitt 10.16.2

beschriebene Befestigungs- und Montagesysteme tatsächlich in der Prüfung aufgebaut werden. Insofern wird der Begriff „Befestigung“ meist nur als Darstellung der Anklemm- oder Anschraubpunkte am Kollektor verstanden, womit die kritische Verbindung zum Dach außen vor bleibt. Befestigungs- und Montagesysteme werden also in den Prüfnormen erwähnt, jedoch praktisch nicht berücksichtigt. Generell kann also im Bereich der Solarthermie und der Photovoltaik nicht von einer Prüfung der Befestigungs- und Montagesysteme gesprochen werden.

Eine mögliche Folge dieser Lücke in der Prüfung ist das immer wieder beobachtete durch unzulässige Verformung der Befestigung (Dachhaken) auftretende Phänomen des Ziegelbruchs, welches durch direkte Krafteinleitung in den Ziegel verursacht wird wie im folgenden Abschnitt zu sehen sein wird. Dieses Schadensbild kann allerdings zusätzlich auch auf fehlerhafte Montage durch zu geringes Spiel zwischen Befestigung und Ziegel zurückzuführen sein.

Deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Regelwerken treten auch bezüglich der Annahmen der **Lastgrößen** auf. Die Photovoltaiknormen¹¹ bieten hier den konservativsten Ansatz mit einer hohen Lastannahme und dem Hinweis auf Berücksichtigung nationaler Besonderheiten. Der zugrunde gelegte Winddruck (2400 Pa) entspricht Orkanstärke¹² und die verbleibende Sicherheit von 3 ist ausreichend, um alle Ungenauigkeiten des Verfahrens zu kompensieren. Allerdings wurden in [Aßmus and Koehl 2012] Lasten bis 1200 Pa bei 130km/h festgestellt und dementsprechend eine Erhöhung der Prüflast auf 3600 Pa empfohlen. Die gesteigerte Last von 5400 Pa bei starker Schneeeinwirkung erfasst bis auf die Gipfel der großen Mittelgebirge und die

¹¹ Sowie der ASTM Standard 1830

¹² 130 km/h, Stufe 12+ auf der Beaufort-Skala. Böen dieser Stufe sind allerdings auch bei einer weitaus geringeren Grundgeschwindigkeit möglich, daher sollte man aus der geringen Häufigkeit von Orkanen in Deutschland nicht auf das Nichtvorhandensein derartiger Windgeschwindigkeiten schließen. Da die Produkte mit einer Verweilzeit von 25 Jahren oder mehr den Witterungsbedingungen ausgesetzt werden, sind entsprechend auch extreme Wetterereignisse statistisch mit einzukalkulieren.

Alpen den größten Teil Deutschlands¹³. Die [Norm DIN EN 12210:2003] legt zur Erreichung der höchsten Klasse eine maximale Grundbelastung von 2000 Pa zugrunde, ohne jedoch eine Berechnungsgrundlage anzugeben. Die Forderungen der [Norm DIN EN 12179:2000] hingegen sind durch Bezug auf den Eurocode 1 wohlbegründet. Allerdings fehlt es hier am Nachweis einer geeigneten Sicherheit. Da die Prüfung mit 150% Bemessungslast nicht verpflichtend ist, kann als Grundlage einer bestandenen Prüfung ohne weitere Informationen nur der Versuchsteil mit 100% angesehen werden. Die Sicherheit ist gegenüber den zu erwartenden Belastungen also gerade 1 und damit zu gering. Im ungünstigen Fall wird die erwähnte Überschreitungswahrscheinlichkeit der Lastannahmen der EN 1991 zur Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des Bauteils. Auch Ungenauigkeiten der Messung und des gesamten Verfahrens werden so nicht abgebildet. Die [Norm DIN EN 12975-2:2006] schließlich bildet sowohl was Belastungshöhe als auch Begründung derselben angeht das Schlusslicht dieser Betrachtung. Ein nach Norm geprüfter Kollektor mit einer zulässigen Belastung von 670 Pa Druck (500 Pa Zug) könnte unter Beachtung des Eurocode 1 nur in jenen seltenen Gegenden Deutschlands aufgestellt werden, in denen sowohl ungewöhnlich niedrige Wind- als auch Schneelasten auftreten. Die in der [Norm DIN EN 12975-2:2006] geforderten 1000 Pa können daher nur eine standardisierte Minimalanforderung allein für den Kollektor darstellen. Eine Verwertung für den Sicherheitsnachweis ist daher nur eingeschränkt möglich. Hersteller lassen ihre Kollektoren allerdings im Allgemeinen darüber hinausgehend auf größere Lasten prüfen, um Einsatzgrenzen gemäß ihren eigenen Berechnungen angeben und bestätigen zu können.

Die Betrachtung der angewendeten Belastungsarten schließt auch die **zeitliche Verteilung** ein. So ist sowohl im amerikanischen Standard als auch in der [Norm DIN EN 12211:2000] eine Belastung mit verschiedenen Schwingspielen

¹³ Bezogen auf die in der DIN 1055-5 angegebenen Werte: Bild 1 und 2 der Norm

beschrieben, um dynamische Windwirkung nachzustellen. In den anderen Regelwerken fehlt dieser Ansatz. Da eine schwingungstechnische Erfassung von Kollektoren entlang der [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] nicht möglich ist, fehlen auf diesem Gebiet auch notwendige Grundlagen.

4.10 Weitere Anforderungen und Entwicklungen im Normungskontext

4.10.1 CE Kennzeichnung

Durch die Mandatierung der EU zur Einbindung der solarthermischen Kollektoren in den Anwendungsbereich der Bauprodukteverordnung (ehemals Bauprodukten Richtlinie) sind verschiedenen Anpassungen notwendig geworden. Grundsätzlich bedeutet dies, dass um den Nachweis der Leistungsbeständigkeit (ehemals Konformitätserklärung) gegenüber der BauPVo nachzuweisen (System 3)¹⁴, einige Nachweise über die Erfüllung der Leistungskriterien vorgelegt werden müssen. Dies erfolgt in der Regel (geregeltes Bauprodukt) über eine zugrunde liegende harmonisierte Norm. Ist eine solche nicht vorhanden muss der Einzelnachweis erbracht werden (ETA Verfahren für „nicht geregelte Bauprodukte“). Die damit notwendige Harmonisierung der Normen wurde im Rahmen der mandatierten Überarbeitung von EN 12975-1,2:2006¹⁵ bearbeitet. Diese Überarbeitung (prEN 12975-1:2013) befindet sich momentan im letzten Schritt vor dem Final Vote und wird voraussichtlich mit Juli 2014 gültig. Zumindest für den Kollektorhersteller an sich wird dies administrative Vereinfachungen bringen. Die Situation des Montagesystems löst die Überarbeitung nicht.

¹⁴ System 3 bedeutet, dass die nachzuweisenden Leistungskriterien durch eine notifizierte Stelle erbracht werden müssen, also keine Selbst-Erklärung zulässig ist.

¹⁵ Korbinian Kramer ist sowohl im DIN Spiegelausschuss NHRS, als auch als Delegierter für Deutschland im CEN und ISO vertreten. Ebenfalls nimmt er an den AK Norm Treffen des BSW/BDH teil. Zur Abstimmung trafen sich das „Branchentreffen Wind- und Schneelast“ sowie die Projektbeteiligten „MechTest“ ebenfalls.

4.10.2 Anforderungen des DiBt in Deutschland

Das DiBt (Deutsches Institut für Bautechnik) überwacht die Liste der geregelten und ungeregelten Bauprodukte. Die Zulassung vieler regionaler Bauordnungen bezieht sich auf diese Listen. In der derzeitigen Phase in der noch keine harmonisierte Norm zur Verfügung steht musste vom DiBt eine „eigene“ Definition für geregelte Solarthermiekollektoren bzw. auch PV Module und un-geregelte gefunden werden. Dies wurde in Iteration mit den *Branchen* Verbänden BSW/BDH getan. Ebenfalls wurde ein Workshop veranstaltet um über die Regularien zu informieren.¹⁶ Die Frage welche Nachweise in Zukunft notwendig sein werden, ist bisher unklar. Eindeutig erscheint derzeit, dass die Montagebauteile separat geprüft und zugelassen werden. Dies geschieht durch Verfahren der klassischen Materialprüfung. Eine Überprüfung der Funktionalität, und eben des Kraftschlusses der verschiedenen Bauteile der Montage- und Befestigungssituation eines oder mehrerer Kollektoren (gemeinsame Krafteinleitung) kann so nicht sinnvoll abgebildet werden. Es wird deshalb dringend empfohlen in dieser Frage weitere Untersuchungen und andere Zulassungspfade zu erarbeiten.

4.10.3 Normentwurf des CEN Technical Comitee 128 Workgroup 3

Durch die un-geregelte Situation und gleichzeitig massiv zunehmenden Installationen insbesondere der PV, wurden leider auch viele unprofessionelle Montage- und Befestigungslösungen umgesetzt, die zu Gefahr für Leib und Leben wurden. Neben den massiven Beschädigungen zum Beispiel von Leichtbauhallen durch statisch nicht korrekt ausgeführten Aufbau von PV Anlagen wurden auch Gefahren durch Brandverhalten von PV Anlagen bekannt. Die zuständigen Behörden wurden aktiv und bezogen insbesondere auch die Normungskreise für Dach- und Wand bedeckende Produkte CEN TC

¹⁶ Am 22. Oktober 2012 fand die **DIBt-Fachtagung Bauaufsichtliche Anforderungen an Solaranlagen** www.dibt.de/de/DIBt/Neues-aus-dem-DIBt.html, statt.

254 und TC 128 ein. Für diese wiederum waren Solarthermische Kollektoren und PV Module schwer zu unterscheiden, weshalb man den Terminus Solaranlagen wählte, der alles zusammenfassen sollte. Für diese wiederum sollte nun eine eigene Regelung zur Handhabung entwickelt werden. Der Normungskreis für PV (TC 82) reagierte nun seinerseits um Auflagen durch andere TC zuvor zu kommen und begann mit der Erstellung einer eigenen Norm für die Fassadenintegration von PV. Dies führte neben einiger Verwirrung letztlich dazu, dass die einberufene Sonderarbeitsgruppe des TC 128 WG3, die ad-hoc working group: „renewables on buildings“ sich ausschließlich mit den Verbindungselementen von „Solaranlagen“ und dem Tragwerk beschäftigt. Korbinian Kramer konnte im Rahmen dieses Projekts an den Treffen teilnehmen und beraten. Der letzte Entwurf des dort erarbeiteten Vor-normativen Regelwerks ist über das Fraunhofer ISE erhältlich [CEN-TC128-WG3-N0047].

5 AP 1 Analyse von Schadensfällen und Schadensursachen

Anhand von Experteninterviews und Umfragen unter Vertretern der Hersteller solarthermischer Kollektoren und Systeme und der Versicherungsbranche wurden Schadensfälle ausgewertet um den aktuellen Stand unter Qualitäts- und Sicherheitsaspekten bezüglich Kollektoren und insbesondere deren Befestigungs- und Montagesystemen zu erfassen. Es wurden rund 20 Experteninterviews im Rahmen von Fachmessen durchgeführt. Weiterhin wurden Fragebögen an Vertreter nahezu der gesamten Branche mit einer zweiten Erinnerung versendet. Trotzdem war die Rücklaufquote der versandten Fragebögen verhältnismäßig gering. Anhand vorliegender Daten über die Branche kann jedoch abgeschätzt werden, dass die antwortenden Firmen 30-40% des Marktanteils an neu installierter Leistung repräsentieren [Sonne Wind & Wärme 2010]. Von den größten Vertretern der Branche war leider bis zu Projektende trotz Erinnerungen keine Rückmeldung zu verzeichnen. Dabei muss jedoch auch beachtet werden, dass die Thematik von Schadensfällen für Hersteller durchaus ein sensibles Thema ist, trotzdem wäre es aus Sicht des Fraunhofer ISE gut diese gemeinsam anzugehen.

Das Thema konnte im Rahmen des „Expert workshop mechanical loads“ am 23.11.2012 ein zweites Mal aufgegriffen werden. Dabei waren über 40 Teilnehmer anwesend, darunter 15 branchenrelevante Industrieunternehmen und 9 Dienstleister. Der Marktführer im Bereich PV Montagesysteme war ebenfalls vertreten. Nach einer Vortragsreihe wurde unter den Experten in sinnvoll eingeteilten Gruppen die Thematik an Hand eines neuen Fragebogens diskutiert. Neu an dem Fragebogen war besonders die Einschätzung der Relevanz der einzelnen Fragestellungen für die Branche.

Die Ergebnisse wichen teilweise stark von den Rückmeldungen des ersten Fragebogens ab (siehe Abschnitt 0). Deutlich war, dass das Thema in der Branche inzwischen eine hohe Präsenz erreicht hat.

5.1 Schäden an Kollektoren oder deren Befestigungs- und Montagesystemen

Die ersten Umfragen haben ergeben, dass der größte Teil der Angaben über Schadensfälle auf Montagefehler, bzw. in untergeordneter Anzahl auf meteorologische Extremereignisse zurückzuführen sind. Wobei die meteorologischen Extremereignisse im Fragebogen nicht genauer spezifiziert wurden und daher das Ergebnis einer qualitativen Einschätzung entspricht.

Insgesamt wird mechanisches Versagen als selten eingestuft. Dem gegenüber steht jedoch die Aussage beinahe aller Antwortenden, bereits Schäden durch Wind- und Schneelasten repariert zu haben.

Die Hersteller von Kollektoren und Befestigungen geben an Ihre Produkte zumeist unter Zugrundelegung der Belastungen der EN 1991 zu prüfen. Dabei werden die Prüfungen der EN 12975 mit dementsprechend stark gesteigerten Lasten an den Kollektoren durchgeführt.

Schadenaufwand in % von 2003 bis heute.

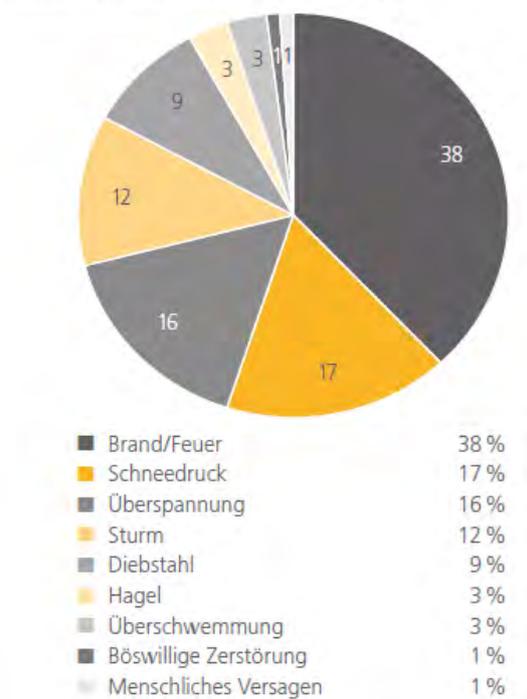


Abbildung 16: Schadenaufwand an ST- und PV-Anlagen (Solarthermieanteil etwa 3 %, Quelle: Werbematerial Versicherer)

In einem Beispiel in Abbildung 16 zeigen abweichend vom eben genannten die Schadenstatistiken von Versicherern, dass Schnee- und Sturmschäden an PV- und ST- Anlagen (Anteil der Solarthermischen Anlagen hier rund 3 %) mindestens 30% der Schadenssumme ausmachen. Dieser Schadenanteil wird lediglich durch Brandschäden übertroffen (38%). Inwieweit hier der Anteil der PV-Anlagen bzw. deren Technik Auslöser und nicht nur Opfer der Flammen sind, wird hier nicht differenziert. Da solarthermische Anlagen nicht von Überspannung betroffen sind, fällt dieser Anteil weg. So kann man anhand der vorliegenden Informationen und unter der Annahme, dass wetterbedingte Lasten vergleichbar auf PV- und Solarthermieanlagen wirken, davon ausgehen, dass Wind und Schnee für bis zu 40% der Schadenssumme verantwortlich sind. Dieser hohe Anteil, im Vergleich mit der angegebenen geringen Schadenshäufigkeit in den Rückmeldungen der Industrie, kann möglicherweise durch die hohen Kosten bei mechanischem Versagen erklärt werden. Schäden am Befestigungs- und Montagesystem bedingen oft eine komplette De- und Neumontage der Anlage. Mögliche Schäden an der Dachhaut oder dem Tragwerk und eine damit einhergehende Einschränkung der Dachfunktion, können die Kosten der Anlage (für die Kollektoren an sich) deutlich übertreffen; insbesondere dann, wenn durch Wassereintritt Folgeschäden entstehen.

Gerade bei Schäden an der Dachkonstruktion stellen die direkten Verbindungen/Durchführung durch die Dachhaut zum Tragwerk die kritische Stelle dar. Dies sind zum Beispiel; Dachanker, Dachhaken oder andere Dachbefestigungskonzepte.

Wobei sich die Branche über die Bezeichnungen nicht einig ist. Dies wurde besonders in der Umfrage deutlich da hier ein Interpretationsspielraum für die Einordnung der verwendeten Bezeichnungen der Befestigungs- und Montagesysteme gegeben war, worauf sehr unterschiedlich reagiert wurde. Eine qualitative Auswertung der verwendeten Systeme ergibt, dass die Dachbefestigungstechnik mit Stockschraube und andere Befestigungstechnologien durchweg etwa 10..20 %, sowie Dachhaken bzw. Sparrenanker mit 80..90 % als Dachbefestigungstechnik vertreten waren.

Häufigste Folge von Mängeln an den meist verwendeten Elementen sind Ziegelbruch und eine Verletzung der Dachhaut wie in Abbildung 17 und Abbildung 18 zu sehen.



Abbildung 17: Ziegelbruch (Quelle: Kunde Solarthermie Anbieter)

Dementsprechend sind Anzahl und Beschaffenheit der Dachbefestigungen in den technischen Dokumentationen der Hersteller oft individuell für viele Lastfälle geregelt. In vielen Fällen findet sich jedoch keinerlei Installationshilfe in den Herstellerunterlagen. Dieses Defizit an Information verschiebt die

Verantwortung zum Installateur, der oftmals kein einschlägiges Fachwissen für Dachinstallationen hat.



Abbildung 18: Ziegelbruch mit unzulässig installiertem und verformtem Dachhaken (Quelle: Sachverständigenbüro Dipl.-Ing. E. Wiesenhütter)

5.2 Situation Flachkollektoren

Flachkollektoren bilden in Deutschland den größten Marktanteil an installierten Kollektorbauarten. Einige Hersteller testen mit einem Teststand nach dem Saugfußprinzip, oder mit Sandsäcken auf positiven und negativen Druck.

Alternativ oder ergänzend verpflichten sie unabhängige Testzentren, die auf Wunsch auch Prüfungen bis zur Materialzerstörung durchführen. Diese arbeiten neben Vakuum-Systemen auch mit Wasser und Sand. Das Vorgehen entspricht dem in der DIN 12975-2 beschriebenen Kiesverfahren. Dabei werden vom Hersteller Lasten gewählt, die sich aus berechneten Wind- und Schneelasten der [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005] bzw. ihren nationalen Anhängen ergeben.

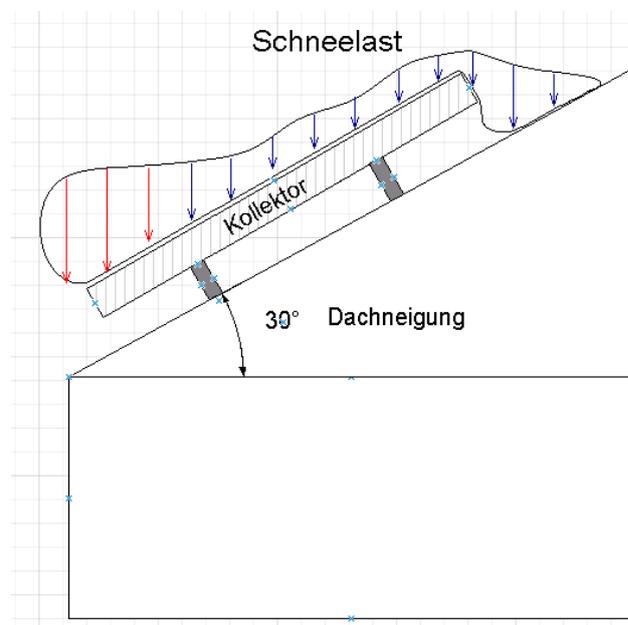


Abbildung 19: Schneelast Aufdachmontage

Die Berechnungen werden überwiegend von Tragwerksplanern übernommen und die genannten Werte der verschiedenen Hersteller reichen bis zu 5400 Pa, was sowohl für Wind- als auch Schneebelastung in etwa dem nach [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] denkbaren Maximum in Deutschland entspricht. Je nach Lastfall und Art der Befestigung werden dabei verschiedene Vereinfachungen für den Umgang mit der Norm angenommen. Abbildung 19 stellt einen typischen Schneelastfall dar, wie er derzeit von der DIN 12975 nicht abgebildet wird. Besonders zu beachten ist die asymmetrische Belastung durch Schneeüberhang. Nicht dargestellt aber ebenso relevant sind die durch

Hangabtriebskraft entstehenden tangentialen Kräfte auf die Verbindung zwischen Kollektorgehäuse und Kollektorabdeckung.

Oft werden Belastbarkeiten durch Hersteller anhand der geographischen und topographischen Einteilung in der Normenreihe EN 1991 definiert, beispielsweise wird die maximale Montagehöhe (über Grund) in der Windzone 2 auf 25m begrenzt oder in Anlehnung an EN 1991 [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] eine maximale Höhe über NN angegeben, um die rechnerische maximale Schneelast zu limitieren. Dies wird jeweils in Abhängigkeit von Hersteller, Befestigungssystem und spezifischer Ausführung in aufwendigen technischen Dokumentationen ausgeführt. Durch die aus der EN 1991 übernommene jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02 der charakteristischen Lastannahmen (2 % Überschreitungswahrscheinlichkeit der Lastannahmen pro Jahr) werden in der generell anzusetzenden wirtschaftlichen Lebensdauer von 20 Jahren die errechneten Lasten allerdings mit einer Wahrscheinlichkeit von 33%¹⁷ überschritten. Die Norm beschreibt also ausdrücklich **nicht die maximal möglichen Lasten sondern nur die schwächsten 98% der jährlich auftretenden Belastungen**. Daher ist der Nachweis einer Sicherheitsreserve notwendig, um als extrem einzustufende Wetterereignisse zu berücksichtigen. Im Vergleich von [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] (Windlasten) und [Norm DIN EN 12975-2:2006] verbleibt eine maximale Sicherheit von 2 bzw. 1,5. Im Vergleich von [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] (Schneelasten) und [Norm DIN EN 12975-2:2006] sind teilweise keine Sicherheiten mehr gegeben.

Wie sich die Problematik äußern kann ist in einem Schadensbeispiel in Abbildung 20 dargestellt. Hier scheint jedoch auf den ersten Blick die

¹⁷ Die für einen Bezugszeitraum t angegebene Überschreitungswahrscheinlichkeit $F^*(y)$ für einen erweiterten Zeitraum T berechnet sich hier nach: $F^*(y)_T = 1 - [F(y)]^{T/t}$, da es sich um verkettete Zufallsereignisse handelt [Ruscheweyh 1982]
Mit $t=1$ Jahr, $T=20$ Jahre und $F(y)=0,98$ (Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeit = $1 - F^*(y)_t$) wird $F^*(y)_T = 0,332$

Überschreitung des Auslegungsfalls eingetreten zu sein. Wie an der höheren Durchbiegung und dem Glasbruch zu erkennen, ist die Belastung der oberen Kollektorreihe offensichtlich höher ausgefallen, was durch das verhinderte Abrutschen des Schnees nach unten (durch die Installation eines Schneefang-Gitters oberhalb der unteren Kollektorreihe) und dem dadurch begünstigten Anstauen des Schnees erklärt werden kann. Der Glasbruch im Fall der beiden mittigen Kollektoren kann beispielsweise eine Folge des Versagens von Befestigungs- und Montagesystem sein, da dies besonders im mittleren Bereich eine hohe Belastung erfährt (Auflage von zwei Kollektoren pro Stützpunkt im Vergleich zu Auflage von einem Kollektor pro Stützpunkt im Randbereich). Da zu dem Schaden keine weiteren detaillierten Informationen vorliegen bleiben die wirklichen Ursachen wie in vielen anderen Fällen ungeklärt.



Abbildung 20: Schaden durch hohe Schneelast, Val die Sole, Norditalien (Quelle: Fraunhofer ISE)

5.3 Besonderheit aufgeständerter Anlagen und Aufdachmontage

Während Indachanlagen wie ein Teil des Daches gemäß EN 1991 behandelt werden können, müssen für die Lastermittlung aufgeständerter und dachparalleler Anlagen in der Norm genannte Sonderfälle wie frei stehende Wände, Anzeigetafeln oder besondere Dachformen berücksichtigt werden. Die besonders bei dachparallelen Anlagen entstehende Sogströmung durch die zusätzliche Unterströmung wie sie in Abbildung 21 schematisch gezeigt ist, wird in der EN 1991 nicht erfasst.

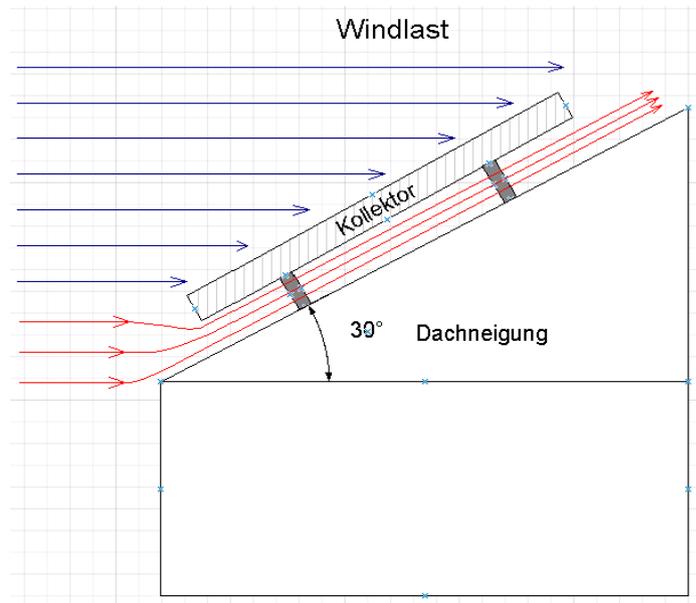


Abbildung 21: Hinterströmung Aufdachmontage

Da aufgeständerte Anlagen die Dachgeometrie in erhöhtem Maße verändern können bei ihnen die in der Norm angegebenen Strömungsbeiwerte nicht oder nur sehr eingeschränkt zugrunde gelegt werden. Dies ist unbefriedigend und für eine verlässliche Auslegung nicht hinreichend. Aus diesem Grund wird im Rahmen eines „Branchentreffen DIN 1055“ an einer Interpretation in Bezug auf Solarenergieanlagen gearbeitet. Erstes Ergebnis ist das Arbeitsblatt zur Ermittlung von Schneelasten an solarthermischen Anlagen herausgegeben von BDH und BSW [BDH and BSW 2012]. Bezüglich der Windlasten insbesondere für eine Flachdach- oder Feldaufstellung von ST Kollektoren sind bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, die jedoch bisher keine abschließende Klärung der Problematik herbeiführen konnten. Derzeit werden die Ergebnisse weiterhin analysiert mit dem Ziel Anfang 2014 eine Veröffentlichung eines weiteren Arbeitsblatts zur Ermittlung von Windlasten an ST Kollektoren, ähnlich dem Arbeitsblatt für Schneelasten, herauszugeben.

5.4 Situation VRK

Aufgrund der komplizierteren Geometrie gestalten sich Belastungsprüfungen an Röhrenkollektoren schwieriger. In Testzentren wird nach der Sandsackmethode oder mit wassergefüllten Planen geprüft. Die verglichen mit Flachkollektoren geringen Kompetenzen auf diesem Gebiet lassen sich in Deutschland, wie auch in Österreich, auf den geringen Umfang der heimischen Fertigung zurückführen. Meist werden hierzulande nur die Rahmen an die zugelieferten Röhren angepasst die damit zum wesentlichen Teil zur Stabilität des Systems beitragen. Es existieren nur wenige Berichte über Fälle von Brüchen von Vakuumröhren. Dies mag zum Teil auch an dem geringen Marktanteil installierter Flächen von etwa 6% liegen (bezogen auf die neu installierte Leistung 2009 13% [Weiss, Bergmann et al. 2009]). Obwohl die in Abbildung 22 dargestellten Daten bereits einige Jahre alt sind, verdeutlichen sie die marktbeherrschende Stellung der Flachkollektoren und die untergeordnete Rolle von Vakuumröhrenkollektoren in Deutschland.

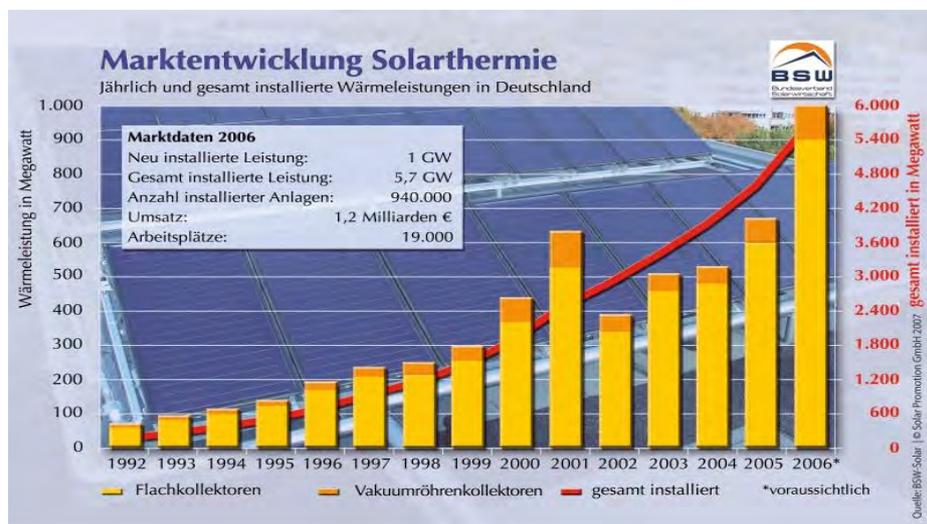


Abbildung 22: Marktentwicklung Solarthermie 2006
 (Quelle: Bundesverband Solarwirtschaft (BSW))

Dieses Bild setzt sich in den meisten Teilen Europas fort, wird aber in China, das im Solarthermiebereich eine Spitzenposition in installierter Leistung und Wachstum einnimmt, komplett umgekehrt, wie Abbildung 23 zeigt.

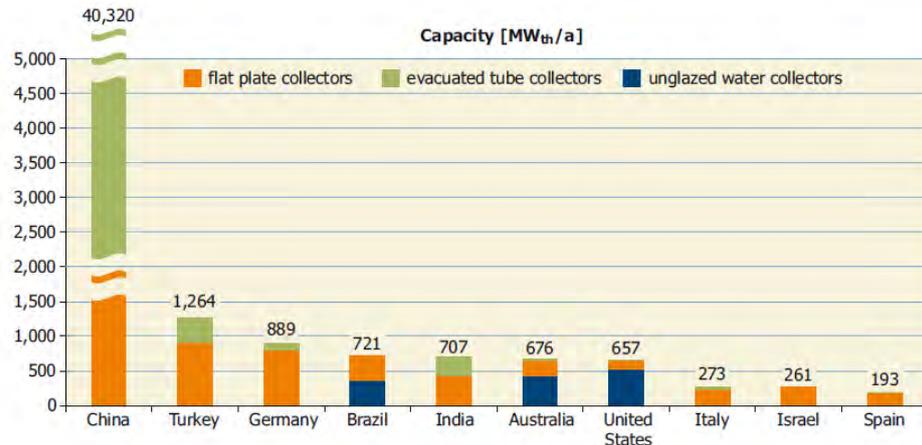


Abbildung 23: Anteil Kollektortypen der 10 führenden Ländern 2011 (Quelle: [Mauthner and Weiss 2013])

Die wirtschaftliche Bedeutung der Vakuumröhrentechnologien und damit der Forschungsbedarf in dieser Richtung darf also trotz des bisher geringen heimischen Marktes nicht unterschätzt werden. 2008 wurden bereits 50% der produzierten Vakuumröhren exportiert [Sonne Wind & Wärme 2010].

Die Berechnungen nach [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] sind allerdings deutlich erschwert. Unklar sind Strömungsbeiwerte, Verwirbelungen und das zugrunde zu legende Ersatzmodell. Die nach [Norm DIN EN 1991-1-4:2005] zwingend zu bewertende Schwingungsanfälligkeit ist wie bereits beschrieben nicht ohne Weiteres erfassbar.

5.5 Situation Thermosiphonsysteme

Durch die geringe Verbreitung im deutschen Markt ist F&E zu Thermosiphonsystemen in Deutschland schwach ausgeprägt. Der Haupteinsatzort im wärmeren Klima erlaubt die Argumentation, Schneelasten seien unkritisch. Die in den letzten Jahren und in Zukunft zu erwartenden

stärkeren Wetterextreme lassen allerdings eine steigende Relevanz von auch großen Mengen Schnee in ganz Europa vermuten. Die Testbedingungen für diese Systeme sind uneinheitlich und liefern durch eine teilweise erlaubte getrennte Prüfung von Kollektor und Aufständerung (was im Allgemeinen dazu führt, dass die Aufständerung nicht geprüft wird) schwer vergleichbare Werte. Derzeit ist die normative Methode für derartige Systeme in vielen Fällen tatsächlich nicht anwendbar. Im Rahmen des Projektes MechTest konnte hier bereits eine Vorgehensweise entwickelt werden, die die normative Arbeit in diesem Bereich anstoßen kann. Dazu wurde eine überarbeitete Methode in die EN 12976-2 eingebracht. Diese befindet sich im Prozess der Überarbeitung und wird aller Voraussicht nach in 2014 gültig werden.

5.6 Situation Befestigungs- und Montagesysteme

Die Halterung eines ST-Kollektors, welche gleichzeitig die Verbindung des Moduls mit dem Dach oder der Freifläche darstellt, muss alle auf den Kollektor einwirkenden Lasten sowie ihr Eigengewicht verlässlich in ein dafür ausgelegtes Tragwerk leiten können. Die Montagesysteme bilden somit die Schnittstelle zwischen dem Verantwortungsgebiet des Kollektorherstellers und dem des Baustatikers. Während jedoch das tragwerkseitige Montagesystem auf das entsprechende Tragwerk abgestimmt sein muss, muss das kollektorseitige Befestigungssystem auf den Kollektor abgestimmt sein (vgl. Abschnitt 3.2).

Die Hersteller von ST-Kollektoren, Befestigungs- und Montagesystemen für unterschiedlichste Dachanbindungen gehen dabei unterschiedlich mit ihrer Verantwortung um, die Sicherheit für die Konstruktion zu gewährleisten. Manche führen Berechnungen nach dem Eurocode 1 durch, testen ihre Gestelle und Dachhaken firmenintern und lassen den Nachweis der Belastbarkeit zusätzlich unabhängig durch ein Prüfzentrum bestätigen. Je nach Eignung ordnen sie den Montagesystemen und Flachdachaufständerungen unterschiedliche Einsatzgebiete zu. Andere verlassen sich auf Erfahrungswerte, oder befinden sich noch in der Forschungsphase. Dritte wiederum nutzen das Angebot spezialisierter Unternehmen, welche Montagesysteme und Dachhaken

für Solarthermie und Photovoltaik anbieten. Diese beraten zusätzlich über die Anzahl der zu verwendenden Dachhaken und Befestigungen und bieten individuelle Lösungen für schneereiche Gebiete. Der Kollektorhersteller muss Aufstellort, das Gewicht und die Neigung des Moduls kommunizieren. Obwohl die Befestigungskonzepte vieler Hersteller sehr ähnlich sind, kann man jedoch nicht von Kompatibilität oder Standardisierung sprechen. Dies hängt zum Teil ursächlich mit dem wohlbegründeten Unternehmerinteresse an der Verstärkung der Kundenbindung zusammen, schädigt aber mittelfristig Absatzchancen.

Die unterschiedlichen Vorgehensweisen mit zum Teil erheblichem Aufwand zeigen, dass **einheitliche Vorgaben zum Nachweis der Sicherheit von Befestigungs- und Montagesystemen fehlen**. Dies zeigt sich besonders auch daran dass trotz der Bemühungen vieler Hersteller die häufigsten Schäden auf ein Versagen der Befestigungs- und Montagesysteme zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 0).

Langfristig ist aufgrund der tendenziell sinkenden Förderung für Systeme Erneuerbarer Energien im Allgemeinen und der bereits jetzt stark eingeschränkten Förderung von PV im Speziellen davon auszugehen, dass sich größere Unternehmen und damit auch deren Befestigungssysteme einen Großteil des Marktes sichern werden und sich somit eine quasi-Standardisierung mit unterschiedlichen Ansätzen (und Ansprüchen) einstellt. Spätestens dann wird die Industrie auf eine umfassende Neuordnung der Norm drängen, insbesondere wenn die eigene „Befestigungslösung“ keine Marktvorteile mehr mit sich bringt.

5.7 Rechtliche Bestimmungen und Versicherungsumfang

Gemäß BGB besteht die Mängelhaftung jeweils zwischen Käufer und Verkäufer einer Ware. Somit bleibt der Hersteller nach Verkauf seiner Kollektoren zwar in der Haftung, dies jedoch nur gegenüber dem Installateur, der wiederum dem Endkunden für eine mängelfreie Ausführung der Gesamtanlage(!) (soweit er sie installiert hat) verantwortlich ist. Das die Montage durchführende Unternehmen

ist somit im Fall eines Kollektorschadens von zwei Seiten eingeklemt, sowohl als Haftender als auch als Geschädigter. Der Hersteller wiederum versucht, sich mit möglichst genauen Montageanleitungen abzusichern.

Versicherungen bieten zum Teil ganze Versicherungspakete für solarthermische Anlagen, obwohl diese nach Installation als Teil des Gebäudes anzusehen sind und somit unter die Gebäudeversicherung fallen. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass eine größere Investition den Wert des Gebäudes erhöht und somit die Deckungssumme unter Umständen zu gering ist. Im Regelfall (unabhängig von der Gebäudeversicherung) handelt es sich bei von Versicherungen erfassten Schäden allerdings um kleine Summen bis 600 Euro, hauptsächlich durch Hagel oder andere mechanische Lasten verursacht. Hageltests sind auch Bestandteil der [Norm DIN EN 12975-2:2006], für eine Solar Keymark Zertifizierung jedoch bisher nicht zwingend erforderlich. Größere Schäden an bzw. durch Kollektoren mit Schädigungen der Dachhaut und Folgeschäden wie Wassereintritt sind schwer zu recherchieren, da zum einen die Versicherer PV und ST Komponenten bisher zusammenfassen und mehr die Schadenshöhe (Schaden Dachhaut mit Folgeschäden) für die Kategorisierung maßgeblich ist.

5.8 Zusammenfassung

Der Eurocode 1 und im deutschen Raum insbesondere die nationalen Anhänge [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010] sind in der Praxis die Grundlagen für Belastungsberechnungen mit Wind- und Schneelasten auch für solarthermische Anlagen. Hier ist eine Berechnungsmethode für ungleichmäßige Schneelast (Überhang, Verwehungen) und Hangabtriebskraft des Schnees am Schrägdach implementiert. Inwiefern diese Lastfälle alleine durch eine horizontale Prüfung wie beispielsweise nach der EN 12975 ausreichend berücksichtigt sind ist fraglich. Dabei muss zwischen dach-parallelen, dach-integrierten und aufgeständerten Modulen in der Berechnung unterschieden werden. Der Bezug zu EN 1991, EN 12211 und EN 12179 könnte einen wichtigen Beitrag zur

Nachvollziehbarkeit und Kohärenz der Normenlandschaft zu diesem Themenfeld leisten. Ziel dabei sollte ein standardisierter Prüfablauf sein, der an die gegebenen Belastungen von [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005] anknüpft und langfristig eine Stütze für die Industrie darstellt und hilft, aufwändige firmeneigene Untersuchungen zu minimieren bzw. zu standardisieren.

Vor allem im Bereich der Vakuum- Röhren Kollektoren ist ein hohes Forschungspotential erkennbar, wenn auch die Schäden als vergleichbar gering einzustufen sind (derzeit geringer Marktanteil). Belastungstests an den Röhren bzw. Hinterspiegelungen auf Zug werden nicht durchgeführt, sind jedoch ebenso in der EN 12975 verankert. Weiterhin würden Untersuchungen zum Einfluss von frequenter Anregung Aufklärung zur normativen Behandlung geben (Untersuchung der Schwingungsanfälligkeit gemäß [Norm DIN EN 1991-1-4:2005]). Dies ist nur eingeschränkt Inhalt des MechTest Projekts.

Schäden entstehen in der Regel nicht spontan sondern sind sichtbare Folge von zum Teil versteckten Mängeln. Dadurch können sich versteckte Schäden, die zunächst nicht zum Bauteilversagen führen unbemerkt verstärken und der sichtbare Schaden tritt dann als Folgeschaden in verstärktem Maße ein. Dies liegt zunächst an der schlechten Zugänglichkeit der kritischen Stellen (Verbindungselemente zwischen Kollektoren und Dach). Dort auftretende Verformungen oder Brüche machen sich erst durch ihre Auswirkungen auf das darunter befindliche Tragwerk bemerkbar, was die Charakterisierung des Ziegelbruchs als häufigsten Schadensfall erklärt; tatsächlich handelt es sich hierbei aber meist um einen Folgeschaden, der auf die unzulässige Verformung der Befestigung zurückzuführen ist. Dazu kommen Fehler in der Installation, die nur über Umwege auf den Kollektor zu beziehen sind. Grundsätzlich ist ein Test der Befestigungs- und Montagesysteme in der EN 12975 nicht vorgesehen und die Anforderungen an den Kollektor sind sehr gering (+/- 1000 Pa). Diese Lücke wird bei namhaften Herstellern durch eigene Untersuchungen auf Basis der EN 1991 geschlossen. Sie führt jedoch auch zu hohem Auslegungsaufwand und zu Montagelösungen auf dem europäischen und internationalen Markt, die stark

überdimensioniert werden. Außerdem ergeben sich durch die vielen Installationsvarianten oft Fehler in der Ausführung.

Dass die EN 12975 mit den angegebenen 1000 Pa und den stark idealisierten Lastfällen nur in entsprechenden Wetterzonen angemessen ist, erscheint offensichtlich. Die tatsächlich in der Natur auftretenden Belastungen liegen zumindest nach der EN 1991 höher, bei Berücksichtigung der Wetterzonen (maximale statische Ersatzlasten [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] teilweise bis über 5000 Pa). Die tatsächlichen Belastungen und die Temperaturabhängigkeiten der resultierenden Belastungen werden derzeit in weiteren Arbeitspaketen von MechTest genauer untersucht. Aufgrund der gesammelten Daten ist sowohl rechnerisch als auch experimentell mit einer regelmäßigen Überschreitung der Prüfwerte der DIN 12975 sowohl am gesamten Kollektor als auch in kleinen lokalen Bereichen aufgrund ungleichförmiger Lastverteilung zu rechnen. Daraus wird voraussichtlich eine erhöhte Beanspruchung der Befestigung resultieren. Inwieweit einzelne Schadensformen (hier ist insbesondere die dominierende Form „Ziegelbruch“ zu untersuchen) direkt auf diese Lasten zurückgeführt werden können bleibt abzuwarten. Wenn die Ergebnisse vielversprechend erscheinen, könnte die Messeinrichtung zusätzlich zu diesem Zweck erweitert werden, um Verformungen der Befestigung und damit eine mögliche ungewollte und unvorhergesehene Krafteinleitung in die Anschlussgeometrie gezielt zu erfassen.

5.9 Ergebnisse des „Expert workshop mechanical loads“ vom 23.11.2012

Im Rahmen des Workshops wurden Vorträge mit folgenden Themen und Referenten initiiert:

- Requirements for structural connections to solar panels **Dr. B. Chan**
Convenor TC128 WG3
- Montagesysteme aus Sicht der Tragwerksplanung **Dr. F. Zapfe**
Dr. Zapfe GmbH (Schletter)
- Erweiterte Untersuchungen zur mech. Stabilität von ST-Kollektoren **K. Geimer**
Fraunhofer ISE
- Einfluss des Dachabstandes auf die Windlast von PV und Solaranlagen **Prof. H. Ruscheweyh**
Ruscheweyh Consult GmbH
- Wind und Schneelasten an ST Anlagen Stand der Technik und Entwicklung eines Arbeitsblatts **C. Stadler**
Sonnenkraft Deutschland GmbH
- Normung von building integrated PV (BIPV) Solarelementen **C. Erban**
Fraunhofer ISE

Durch die aktuellen Vortragsinhalte und die erfreulich hohe Beteiligung von über 40 Teilnehmern aus den Bereichen Industrie, Servicedienstleistungen und Presse konnte eine wichtige Erkenntnis des Projektvorhabens unterstrichen werden: Es besteht ein hoher Bedarf an Vorgaben und standardisierten Prüfverfahren um die offenen Fragestellungen gemeinsam zu lösen.

Dies wurde auch in der anschließenden Expertendiskussionsrunde durch die Ergebnisse bestätigt. Ziel war es dabei in sinnvoll zusammengestellten Gruppen (insgesamt 7 Gruppen) die aktuellen Fragestellungen gemeinsam zu diskutieren und zu beantworten. Dabei wurde zusätzlich die Relevanz der jeweiligen Fragestellung für die Branche abgefragt.

Die Auswertung der Fragestellungen mit der höchst bewerteten Relevanz lässt sich mit den folgenden Ergebnissen zusammenfassen:

- Die Schwachstelle bei aufgetretenen Schäden sind am häufigsten Befestigungs- und Montagesysteme
- Externe Tragwerksplanung sowie eigene Untersuchungen sind die Methode der Wahl um die Sicherheit von Befestigungs- und Montagesystemen nachzuweisen, ferner werden auch Zertifizierungspfade genutzt
- Der Reihe nach wurden statistisch aus der Auswertung folgende Ursachen für Schäden durch die Expertengruppen am höchsten bewertet:
 - Außerordentliche Wetterereignisse in Kombination mit unsachgemäßer Installation
 - Unsachgemäße Installation
 - Außerordentliche Wetterereignisse (alle Anlagen im Umkreis wiesen Schäden auf)
 - Planungsfehler
 - Weitere Ursachen zu kleinen Anteilen wie unzureichende Installationsanleitung; Installationen durch Nichtfachmann; Fehlende Qualitätssicherung an Befestigungs- oder Montagesystem bzw. Kollektor oder Modulen, Materialfehler

Es herrschte im letzten Punkt jedoch bei weitem keine Einigkeit. In einer Gruppe wurden beispielsweise Planungsfehler mit 80 % bewertet, während in einer anderen Gruppe außerordentliche Wetterereignisse in Kombination mit unsachgemäßer Installation mit 80 % als Hauptursache befunden wurden.

Die Ergebnisse der Fragestellungen mit mittlerer Relevanz können wie folgt zusammengefasst werden:

- Am meisten Schäden bei Auf- und Flachdachsystemen
- Keine Einigkeit über Hauptursache der Schäden (Wind- oder Schnee)
- Die Schadensfälle werden im Bereich von unter 10 Fällen pro 10.000 eingeschätzt
- Zertifizierung und eigene Untersuchungen sind das Mittel der Wahl um die Sicherheit des Kollektors / Moduls nachzuweisen, ferner wird auch auf externe Tragwerksplanung zurückgegriffen
- Es besteht ein hoher Bedarf an der Entwicklung von Rechenmethoden und harmonisierten Standards zum Nachweis der Sicherheit von Kollektoren/Modulen mit Ihren Befestigungs- und Montagesystemen

Die Frage des Potentials, mit harmonisierten Prüfverfahren und Zertifizierungspfaden den Aufwand für den Nachweis der Sicherheit zu verringern wurde mit geringer Relevanz eingestuft, obwohl das Potential selbst mit mittel bis hoch eingeschätzt wurde. Dies ist vermutlich der Einschätzung über die Zeitdauer bis eine Harmonisierung zum tragen kommt geschuldet.

Besonders Interessant fiel die Einstufung des Standardisierungsgrads und der Kompatibilität von ST- und PV Befestigungs- und Montagesystemen aus. Während die Standardisierung im Falle der ST als gering und im Falle der PV als Mittel eingeordnet wurde, wurden beide Fragestellungen mit geringer bis garkeiner Relevanz eingestuft. Dies spiegelt leider auch der Markt genau in dieser Form wieder. Auf die möglichen Gründe wurde bereits in Abschnitt 3.2.2 eingegangen.

Bezüglich des Kostenanteils an Befestigungs-, Montagesystem inkl. Montage an den Gesamtkosten hat sich ein Bild ergeben wie in Abbildung 24 dargestellt.

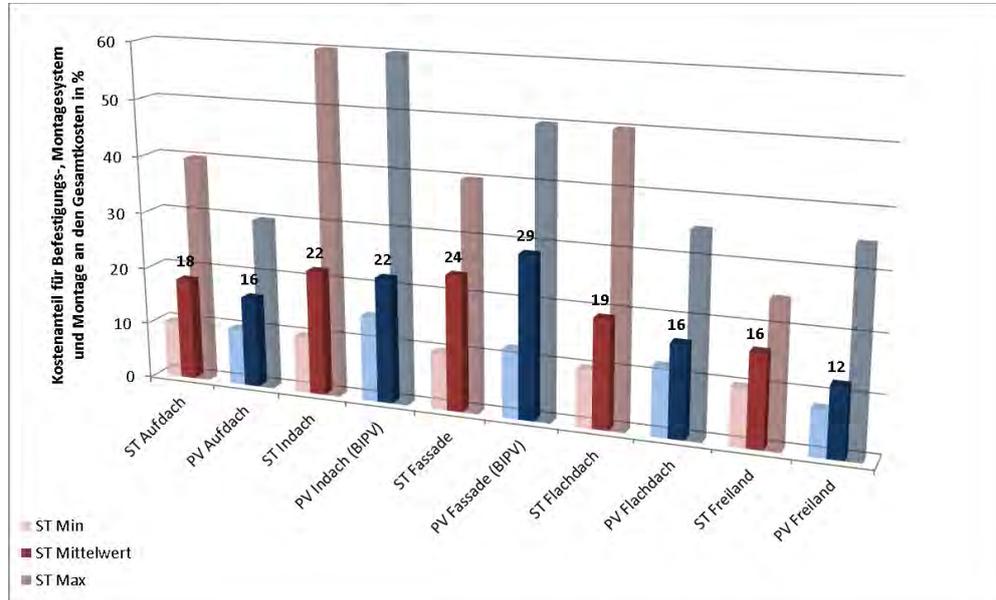


Abbildung 24: Kostenaufteilung für Befestigungs-, Montagesystem inkl. Montage im Verhältnis zum Gesamtsystem in % mit Angabe der Streuung der Expertenrückmeldungen (Min/Max)

Dies stellt jedoch wie auch im Falle der Schadensursachen das statistische Ergebnis dar. Die Experten waren sich hier besonders im Indach und BIPV Bereich nicht immer einig (Werte einzelner Gruppen bis 60 % vertreten).

6 AP 2 Aufbau eines Forschungsteststands für erweiterte mechanische Belastungstests

Für die Weiterentwicklung von Qualitätssicherungskonzepten von solarthermischen Kollektoren und deren Montagesystemen wurde im Rahmen des Projektvorhabens ein neuer Belastungsteststand entwickelt. Die Herausforderung bestand darin unter Berücksichtigung aller sicherheits- und technischen Voraussetzungen alle als relevant abgeschätzten oder erst abzuschätzenden Lastfälle im Prüfstand abbilden zu können.

Während der Entwicklung, Herstellung und Inbetriebnahme in Zusammenarbeit mit der PSE AG sind vielfältige Detailfragen aufgetaucht, die vorab nicht in allen Details absehbar waren. So hat sich die Inbetriebnahme Phase über einen längeren Zeitraum erstreckt und der Prüfstand konnte letztlich am 23.11.2012 mit vollem Funktionsumfang eingeweiht werden. Dabei ist eine weltweit einzigartige Anlage entstanden, die den Standort Freiburg für umfassende Untersuchungen zum Thema Solarthermie und Photovoltaik bereichert und bestärkt.

Mit dem Prüfstand ist das Fraunhofer ISE in der Lage die mechanische Stabilität von solarthermischen Kollektoren unterschiedlichster Bauart einschließlich deren Montagesysteme für Dach- und Fassadenanwendungen realitätsnah zu prüfen. Der Prüfstand setzt sich aus einer Klimakammer der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH und einer mechanischen Prüfeinheit der PSE AG zusammen wie in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25: Neuer Belastungsprüfstand Fraunhofer ISE, Freiburg

Die großen Türen der Klimakammer ermöglichen es an dem Belastungsteststand auch größere nicht demontierbare Kompaktsysteme einzubringen und bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zu prüfen.

Das Grundgestell der mechanischen Prüfeinheit besteht aus zwei linearen Führungen, die sich von vorne betrachtet auf der linken und rechten Seite befinden, siehe Abbildung 26.

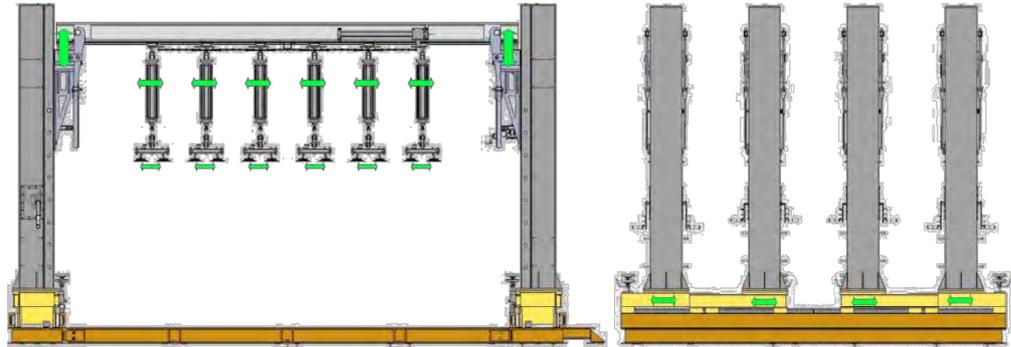


Abbildung 26: Vorderansicht (links), Seitenansicht (rechts) der mechanischen Prüfeinheit des Belastungsteststands

Auf den Führungen sind jeweils vier Säulen befestigt. Die Säulen sind über Querträger verbunden und bilden eine sogenannte Traverse. An den Querträgern sind Linearführungen angebracht an der je sechs Pneumatikzylinder befestigt sind.

Insgesamt verfügt der Belastungsteststand über vier Traversen, die verschiebbar und höhenverstellbar sind, sowie 24 doppelt-wirkende Pneumatikzylinder, deren Abstände sich ebenfalls verändern lassen. Durch die Einstellmöglichkeiten lässt sich der Prüfstand auf den jeweiligen zu prüfenden Kollektor oder auf ein aufgeständertes System flexibel einstellen.

An den Pneumatikzylindern sind sogenannte Saugerplatten befestigt wie in Abbildung 27 dargestellt.

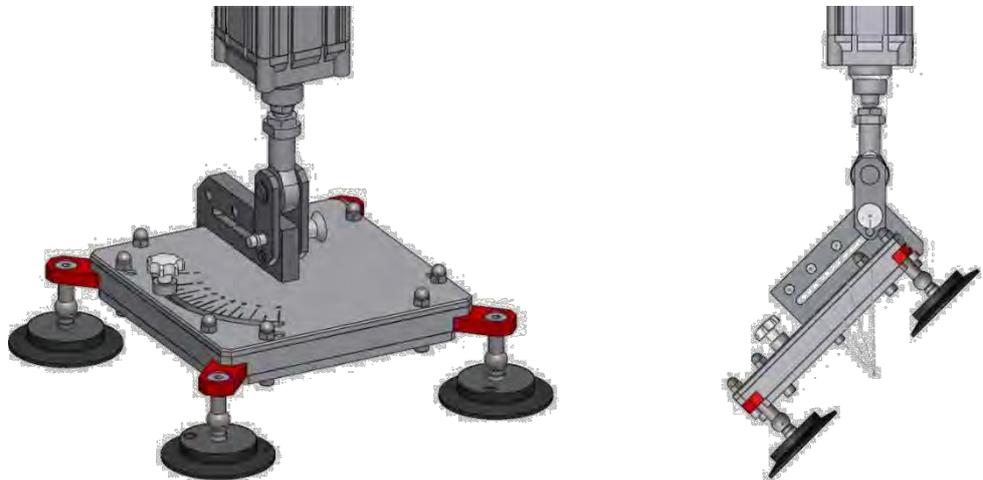


Abbildung 27: Saugerplatte

Über die Saugerplatten lässt sich der Abstand der Vakuumsauger, sowie der Winkel für eine zentrische Krafteinleitung im Fall von nicht senkrechten Lastfällen verstellen.

Um eine Rückkopplung der gemessenen Kräfte zu realisieren werden die Prüflinge auf einer Messebene installiert. Die Messebene besteht aus einem Druckrahmen, welcher über mehrere 3D-Kraftsensoren mit dem Grundgestell der mechanischen Prüfeinheit verbunden ist. Über eine Auswertung der Daten der 3D-Kraftsensoren kann somit unabhängig von den Drücken der Zylinder die Gesamtkraft und Richtung der Belastung auf die Messebene bzw. den Prüfling bestimmt werden.

In Abbildung 28 sind die geometrischen Beziehungen von Krafteinleitung und Kraftrichtung für einen Beispielfall im mechanischen Belastungsteststand dargestellt. Aus dem resultierenden Krafteinleitungswinkel und dem Kollektoranstellwinkel ergibt sich demnach der relative Anstellwinkel bezogen auf die Kollektoroberfläche.

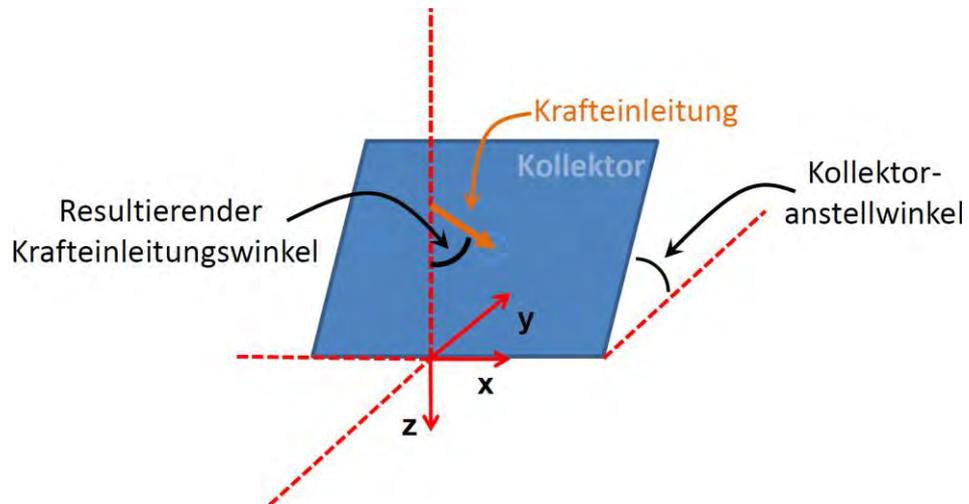


Abbildung 28: Geometrische Beziehungen am mechanischen Belastungsteststand

Gesamtkraft und Richtung der Krafteinleitung können dabei über unterschiedliche Berechnungsmodelle durch Auswertung der 3D-Kraftsensoren bestimmt werden. Je nach Lastfall wird die Wäge-Methode oder die vektorielle Methode verwendet. Die Wäge-Methode ist tendenziell genauer wobei die vektorielle Methode eine höhere Flexibilität bei variablen resultierenden Krafteinleitungswinkeln bietet [Mergele 2013].

Die Verformung wird während der Versuche mit einem Seilzugsensor an der Auslenkung eines vorgegebenen Bemessungszylinders bestimmt. Die Werte sind dabei als relative Anhaltswerte für die Verformung zu sehen. Eine absolute Messung der Verformung beispielsweise durch ein Laserverfahren war auf Grund des großen Temperatureinsatzbereichs nicht umsetzbar (Kosten für Laser zu hoch), könnte jedoch im Einzelfall zusätzlich eingesetzt werden.

Idealer Weise sollte der Seilzugsensor zur Messung der Verformung möglichst mittig in Bezug zur Kollektorabdeckung platziert werden. Dies ist jedoch selten gegeben, da sich der Bemessungszylinder in den meisten Fällen auf der einen Hälfte der Kollektorabdeckung befindet wie in einer beispielhaften Prüfanordnung in Abbildung 29 dargestellt. Dies bedeutet für die Prüfpraxis,

dass die absolute Verformung tatsächlich höher ausfallen kann als durch die Werte des Seilzugsensors ermittelt.

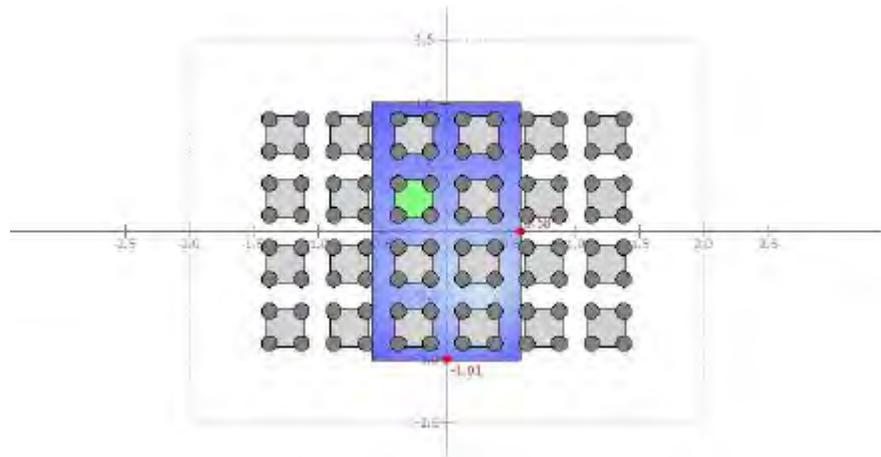


Abbildung 29: Beispielprüfanordnung unter Einsatz von 8 Zylindern mit Markierung der Position der Verformungsmessung (grün)

Weiterhin wird bei Schrägstellung der Saugerplatten das Messeil aufgrund dessen Anbringung nicht nur vertikal, sondern auch horizontal ausgelenkt. Die Zylinderbewegung und die lokale Verformung eines Kollektors entsprechen dadurch nicht mehr der gemessenen Auslenkung des Messeils.

Trotz dieser Einschränkungen ist eine grundsätzliche Bestimmung der Verformung zumindest weitgehend proportional zur maximalen Verformung während der Messungen gegeben.

Die mit dem Teststand realisierbaren Prüfmöglichkeiten sind im Abschnitt 9 beschrieben.

7 AP 3.2 Charakterisierung realer Lasten an unterschiedlichen Extremstandorten

Um real auftretende Lasten an Extremstandorten zu charakterisieren wurden Feldtests mit Kraft- und Windmessung an einem Referenzkollektor durchgeführt. Als Standorte dienten Freiburg, Pozo Izquierdo (Gran Canaria) und die Umweltforschungsstation Schneeferner Haus auf der Zugspitze (2650 m ü. d. M.) Während in Freiburg die Messtechnik in Betrieb genommen und überprüft wurde, war das Ziel auf Gran Canaria hohe dynamische Windlasten und auf der Zugspitze hohe statische Schneelasten messtechnisch zu erfassen.

Herausforderungen dabei waren Auswahl und sinnvolle Anbindung der Kraftaufnehmer an Befestigungs- und Montagesysteme sowie die Auswertung der dynamischen Daten aus Gran Canaria.

7.1 Feldmessungen auf Gran Canaria

Auf dem Gelände des Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) der südlichen Hälfte der Ostküste Gran Canarias in Pozo Izquierdo wurde ein Referenzkollektor mit Messausrüstung aufgebaut wie in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 30: Testgelände ITC, Pozo Izquierdo, Gran Canaria

Durch die Nähe zum atlantischen Ozean und dem damit verbundenen Seeklima dominieren in dieser Küstenregion mäßige bis starke Böen und beständige Nord- bis Nordostwinde mit Stärken bis zu 6-7 auf der Beaufortskala¹⁸ (Quelle: <http://de.windfinder.com>).

Derartige Winde werden in der Meteorologie Passatwinde genannt. Kurzzeitige Böen können deutlich stärker ausfallen. Weiterhin herrscht dort eine durch das nahe Meer stark salzhaltige Atmosphäre, welche starke Korrosion hervorruft, was dazu führt, dass sich die Lebensdauer der Messausrüstung im Allgemeinen leider sehr verkürzt.

7.1.1 Messaufbau

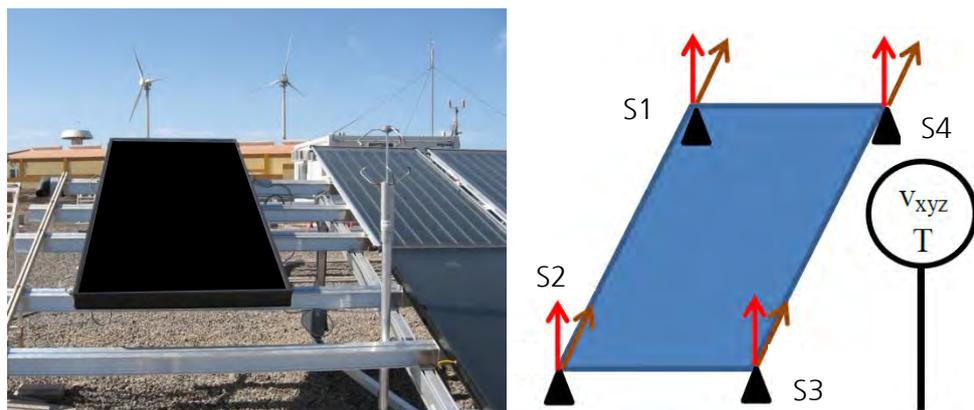


Abbildung 31: Foto des Messaufbaus (links), schematischer Aufbau mit Kraftsensoren (S1..S4) und Windmesser V_{xyz} (rechts) (Quelle: Fraunhofer ISE)

In Abbildung 31 ist der Aufbau des Test-Kollektors auf Gran Canaria zu sehen. Der Kollektor befindet sich fest montiert auf einem Rack mit einer Ausrichtung von 20° nach Westen und einem Aufstellwinkel von 23° zur horizontalen.

¹⁸ Die Beaufortskala ist eine Skala zur Einordnung der Windgeschwindigkeit in einen ganzzahligen Wert von 0 bis 12 und wird in der Meteorologie zur Beurteilung der Windstärke verwendet (Beispiel 7 entspricht 50-61 km/h).

Zur Messung der lokalen Windgeschwindigkeit wurde in Kollektornähe ein 3D Ultraschallanemometer (V_{xyz}) installiert mit dem auch Böen- und Spitzenwerte trägheitslos erfasst werden können.

Um die Auflagerkräfte messen zu können ist der Kollektor an vier Kraftsensoren (S1...S4) befestigt, die den Kollektor mit dem Rack verbinden. Die Kräfte werden von den Sensoren bezüglich der Kollektorfläche in tangentialer und normaler Richtung erfasst. Um Biegung der Scherkraftaufnehmer zu vermeiden wurden zur Kompensation jeweils zwei Dämpfer pro Verbindung angebracht wie in Abbildung 32 dargestellt.

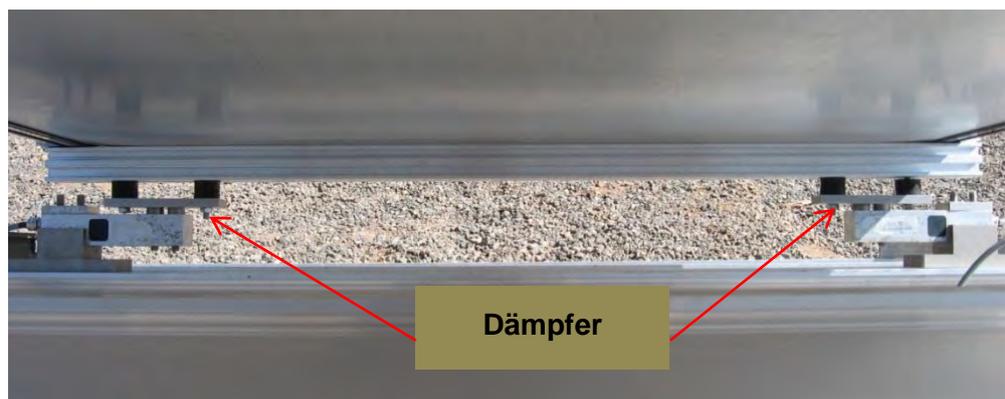


Abbildung 32: Anbindung Kraftaufnehmer Kollektorrückseite, unten

Die Information wird an dieser Stelle mit aufgeführt, da nicht auszuschließen ist, dass das Schwingungsverhalten durch diese Anordnung beeinflusst wird.

Es handelt sich bei dieser Lagerungsart grundsätzlich um ein statisch unbestimmtes System (Lagerkräfte beeinflussen sich gegenseitig). Dies ist im Rahmen dieser Untersuchungen sinnvoll, da in der Praxis für einzelne Lagerreaktionen durch anfängliche Vorspannungen und weitere Einflüsse lokale Maxima pro Lagerbefestigung auftreten können, die für die Auswertung besonders von Bedeutung sind. Im Falle einer statisch bestimmten Lagerung würden diese Informationen fehlen.

7.1.2 Versuchsdurchführung

Seit Mai 2012 wurden die Auflagerkräfte (vertikal und horizontal), sowie Windrichtung und Intensität am Standort gemessen. Um die Kräfte von kurzzeitigen starken Böen erfassen zu können wurde eine Datenerfassungstechnologie mit Kraftmessung mit bis zu 100 Hz eingesetzt. Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgte standardmäßig mit einer Auflösung von 5 Hz, teilweise wurden auch Messungen mit 10 Hz und höheren Abstraten durchgeführt. Um den Temperatureinfluss auf die Kraftsensoren zu untersuchen wurde mit Hilfe des 3D Ultraschallanemometers zusätzlich die Lufttemperatur in Kollektornähe bestimmt. Messkonfiguration und Datenerfassung wurden per Fernzugriff (SSH) administriert.

7.1.3 Auswertung und Ergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse aus den Freilandversuchen auf Gran Canaria wurde der Zeitraum vom 01.06.2012 bis 31.12.2012 untersucht. Über angepasste Linux Auswerteskripte wurden insgesamt über 5 GB Daten automatisiert analysiert und Zeitpunkte der maximalen Dynamik ermittelt. Aus den Ergebnissen der Wind- und Belastungswerte wurden in einem zweiten Schritt Wertepaare ermittelt, bei denen Maxima bezüglich Wind- und Belastungsdynamik zeitlich in einem Rahmen von bis zu 180 Sekunden zusammen auftraten. Mit diesem Auswertungsschritt wurden aussagekräftige Zeitabschnitte identifiziert, in denen die hohe Windbelastung mit entsprechenden Böen mit den hohen dynamischen Auflagerlasten korrelierten.

Die maximale Winddynamik im untersuchten Zeitraum wurde am 5.7.2013 ermittelt. Dabei geht es in Bezug auf die Winddaten um ermittelte Windspitzengeschwindigkeiten, in Bezug auf die Belastungsdaten um maximale Änderungen der Belastung in zwei aufeinanderfolgenden Kraftmesswerten. Diese Kriterien berücksichtigen sowohl die Belastung durch hohe Windintensität als auch Schwingungen bzw. Stöße auf die Auflager des Kollektors.

Das Diagramm in Abbildung 33 zeigt exemplarisch Windgeschwindigkeit, Temperatur und Kraftmesswerte einer einzelnen Kraftkomponente vom 5.7.2012.

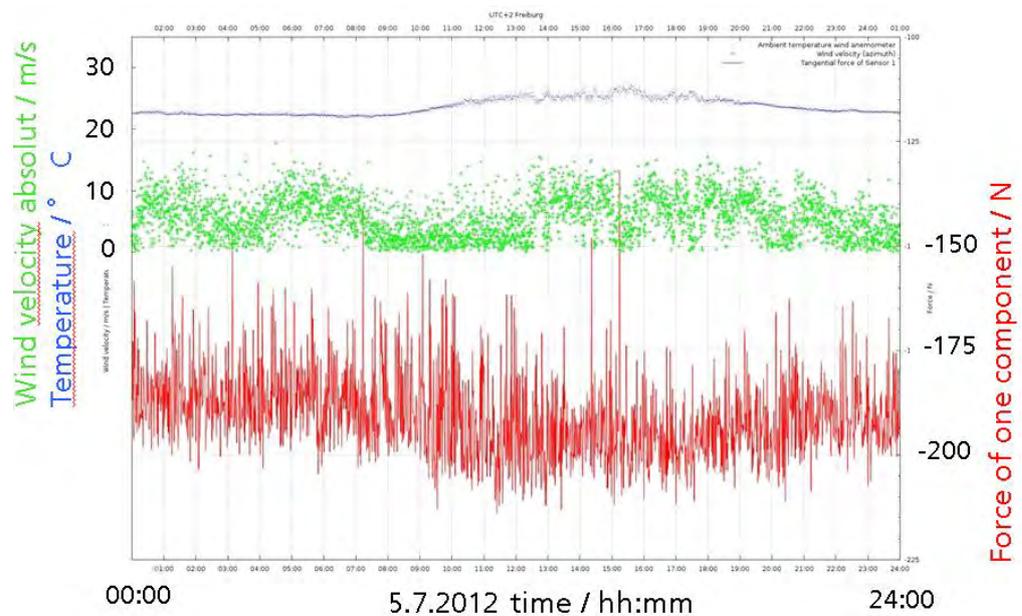


Abbildung 33: Tagesverlauf 5.7.2012, maximale Dynamik

Es ist deutlich die hohe Dynamik erkennbar. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 34 ein Tag mit Anstieg der Windaktivität und damit Anstieg der Kraftdynamik dargestellt. Hier ist auch der Temperatureinfluss erkennbar. Dieser ist durch eine Längenausdehnung des gesamten Kollektorgehäuses, sowie geringfügig durch die Temperaturabhängigkeit der Kraftsensoren gegeben.

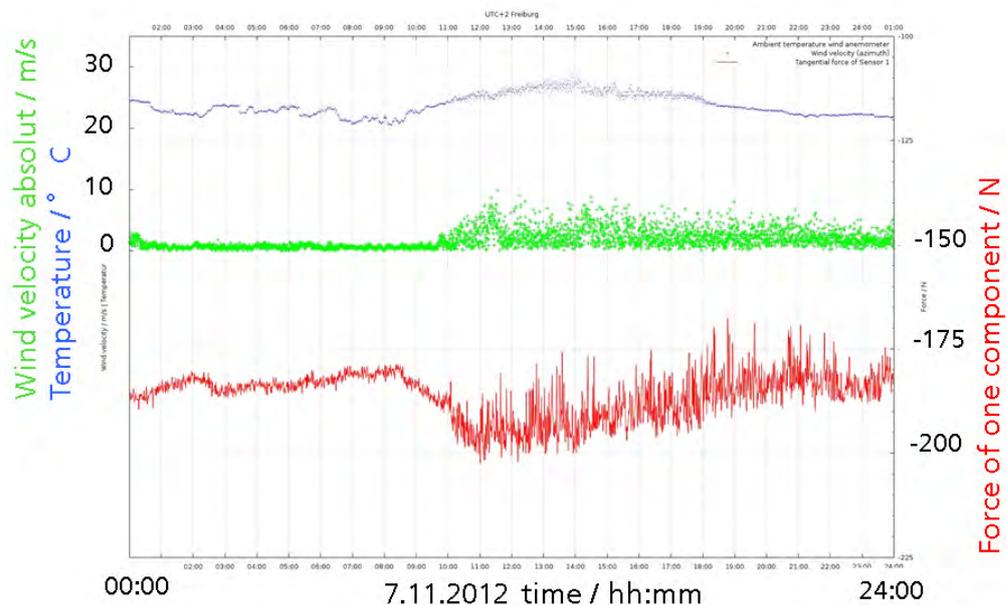


Abbildung 34: Tagesverlauf 7.11.2012, Anstieg Dynamik

Zur Untersuchung des Einfluss der Windaktivität auf die Kollektorlagerungen sind die lokalen Maxima bzw. maximalen Stöße von Bedeutung. Dabei spielt der Absolutwert der Gesamtbelastung auf den Kollektor eine untergeordnete Rolle. Daher ist der Einfluss beispielsweise der Temperaturabhängigkeit der Sensoren weitgehend unproblematisch, da hauptsächlich die Relativwerte in kleinen Zeiträumen ausgewertet werden.

In Tabelle 2 sind die am 5.7.2012 ermittelten Belastungsspitzen in Bezug zum zeitlichen Maximum um 05:17 Uhr aufgeführt. Rechnerisch würde sich ein Geschwindigkeitsdruck auf Basis der freien Windgeschwindigkeit, in diesem Fall 57 km/h, von **150 Pa** ergeben (vgl. Berechnung nach Norm in Abschnitt 4.6.1). Dies würde bei einer anzunehmenden Aperturfläche von 2,3 m² zu vier Auflagerkräften von je **115 N** führen (ohne Eigengewicht und Verspannungen). Im Vergleich hierzu wurden einzelne Auflagerstöße von bis zu **178 N in 1/10 Sekunde** pro Auflager gemessen.

Tabelle 2: Ermittelte Spitzenbelastungen am 5.7.2012

Freie Windgeschwindigkeit in 6 m Höhe	57 km/h @ 05:17 (71 km/h @ 00:26)
Maximale Windböen / Windgeschwindigkeiten in Kollektornähe (vgl. Abschnitt 7.1.1)	52 km/h @ 05:17 75 km/h @ 05:21 (85 km/h @ 14:22)
Maximale Auflagerstöße in 1/10 Sekunde (Betrag pro Auflager)	133 N @ S1 05:17 178 N @ S3 05:17
Maximale Absolutkräfte an Kollektorlagerungen (Betrag pro Auflager)	298 N @ S1 05:17 351 N @ S3 05:17

Das bedeutet, dass der Wind hochdynamisch wirkt (Wechsel von Maximaler zu Minimaler Windgeschwindigkeit innerhalb von Sekundenbruchteilen). Zudem lässt sich ableiten, dass in dem gemessenen Fall die Dynamik von starken ungleichmäßig verteilten Kraftstößen durch **Windböen und Turbulenzen schlagartig bis zum 1,5 fachen des theoretisch aus der freien Windgeschwindigkeit ermittelten Belastungswerts pro Auflager wirkt**. Ob dieser Faktor im Falle von realen Extremwetterereignissen ebenfalls realistisch ist oder erhöht werden muss ist in diesem Rahmen nicht abschließend zu beantworten. Weiterhin hat sich gezeigt, dass einzelne hohe gemessene Geschwindigkeiten nicht zwangsläufig zu hohen Auflagerstößen führen müssen. Zum Beispiel wurden durch die maximale gemessene lokale Windgeschwindigkeit von 85 km/h keine hohen Auflagerstöße ausgelöst. Die Ursache hierfür liegt in einer Windrichtung bzw. Böeneigenschaft, die zu keiner nennenswerten Kollektorbelastung führt, wie beispielsweise einer tangentialen Belastung.

Die Dynamik im Detail für einen Zeitabschnitt von 10 Sekunden ist in Abbildung 35 dargestellt. Über die Standardabweichung der Beträge aller vier Kraftsensoren lassen sich Werte von 15...40 N ermitteln die in diesem Zusammenhang als Maß für die Höhe der mittleren Schwingungsbelastung der Auflager bei 10 Hz darstellt. Die häufig auftretende Frequenz der Schwingung ist jedoch auf diese Art nicht bestimmbar.

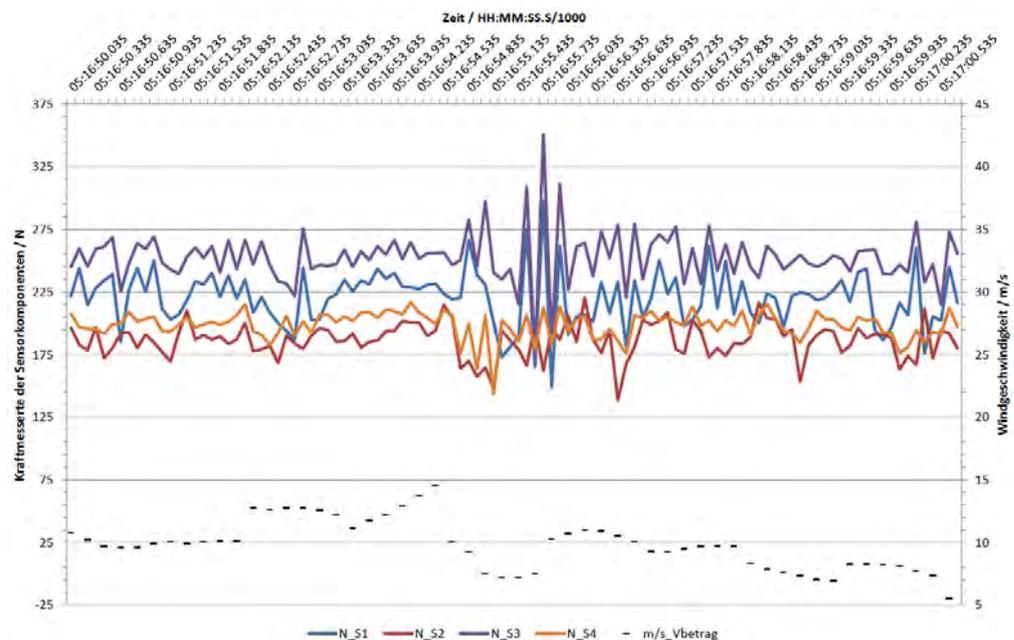


Abbildung 35: 5.7.2012 Detail 10s Abschnitt mit Dynamikmaximum (mittig) Beträge Auflagerreaktionen S1..S4 und Windbetrag

Um die Frequenzen zu ermitteln durch die der Kollektor durch den Wind angeregt wird wurde mit den Messergebnissen eine Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt [Merzle 2013].

Als ein weiterer Tag mit hoher Winddynamik wurde der 28.06.2012 ermittelt. Hierbei fielen besonders häufig Maxima der lokalen Windgeschwindigkeit mit Maxima einzelner Auflagerkräfte zusammen. In Abbildung 36 sind die Messwerte dargestellt.

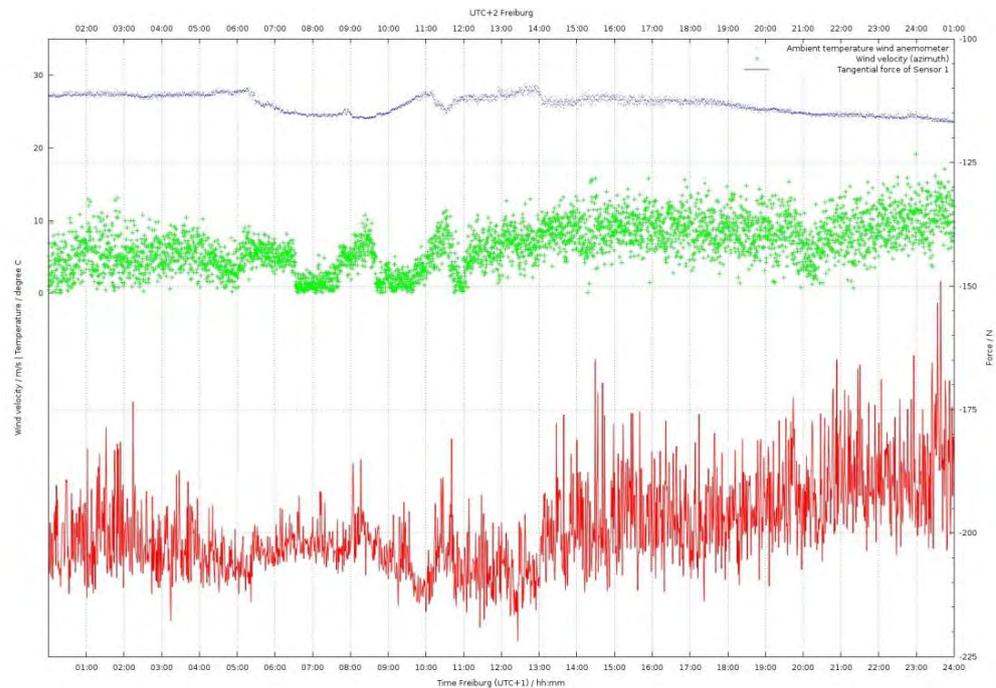


Abbildung 36 Messergebnisse Exposition Gran Canaria (28.06.2012)

In Abbildung 37 ist die Auswertung mittels FFT vom 28.06.2012 dargestellt. Da die Messwerte mit 10 Hz abgetastet wurden, konnten nach dem Abtasttheorem Frequenzen im Frequenzbereich bis zu 5 Hz untersucht werden.

Die Amplituden auf der y-Achse wurden dabei in logarithmischer Darstellung über der Frequenz aufgetragen. Als Ergebnis lässt sich starkes Rauschen mit einem schwach ausgeprägten Amplitudenanstieg bei etwa 4,4 Hz erkennen. Der hohe Anfangswert lässt sich auf das Rauschen zurückführen. Auch an abweichenden Tagen mit erhöhter Winddynamik konnte bei einer Abtastfrequenz von 10 Hz ein schwacher Amplitudenanstieg zwischen 4 und 5 Hz ermittelt werden.

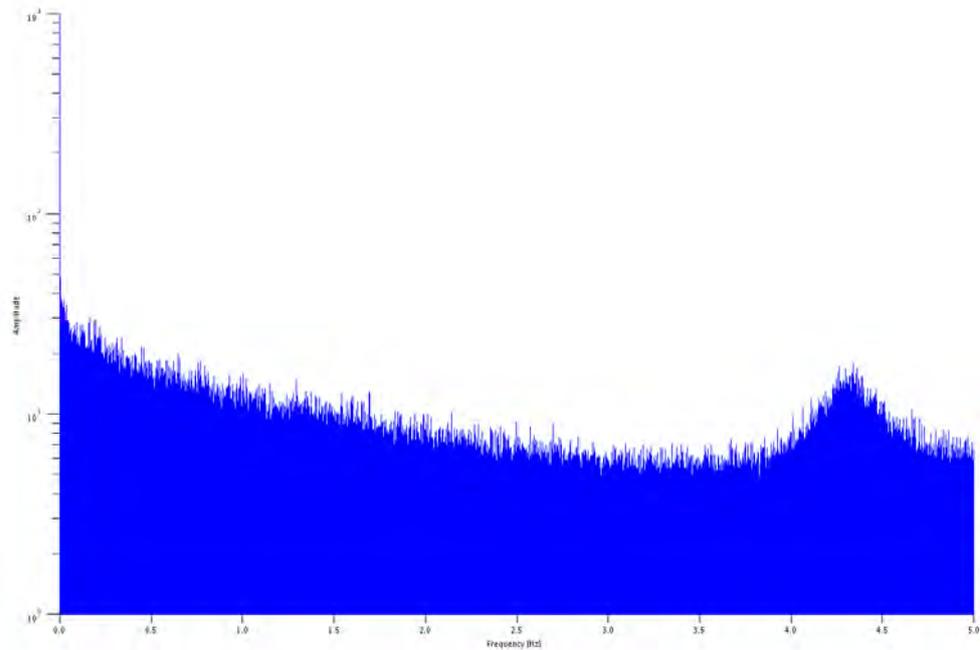


Abbildung 37: FFT über Daten vom 28.6.2012

Im Vergleich dazu ergibt ein windstiller Tag lediglich ein hohes Rauschen, womit eine gute Plausibilität gegeben ist. Da bisher mittels der FFT wegen der geringen Abtastfrequenz nur Frequenzen im Bereich bis zu 5 Hz untersucht werden konnten, wurden ebenfalls Daten mit höherer Winddynamik und einer Abtastfrequenz von 100 Hz überprüft.

In Abbildung 38 ist die Auswertung mittels FFT mit einer Abtastrate von 100 Hz dargestellt. Dabei konnten die Amplituden in einem Frequenzbereich bis 50 Hz ausgewertet werden. Als Ergebnis war ein Amplitudenanstieg bei 5,8 Hz zu verzeichnen. Ob das Maximum bei 5,8 Hz möglicherweise die Eigenfrequenz des Gesamtsystems darstellt, konnte noch nicht abschließend ermittelt werden. Eine Ermittlung der Abklingkurve für diesen Aufbau war im gegebenen Projektrahmen nicht mehr möglich.

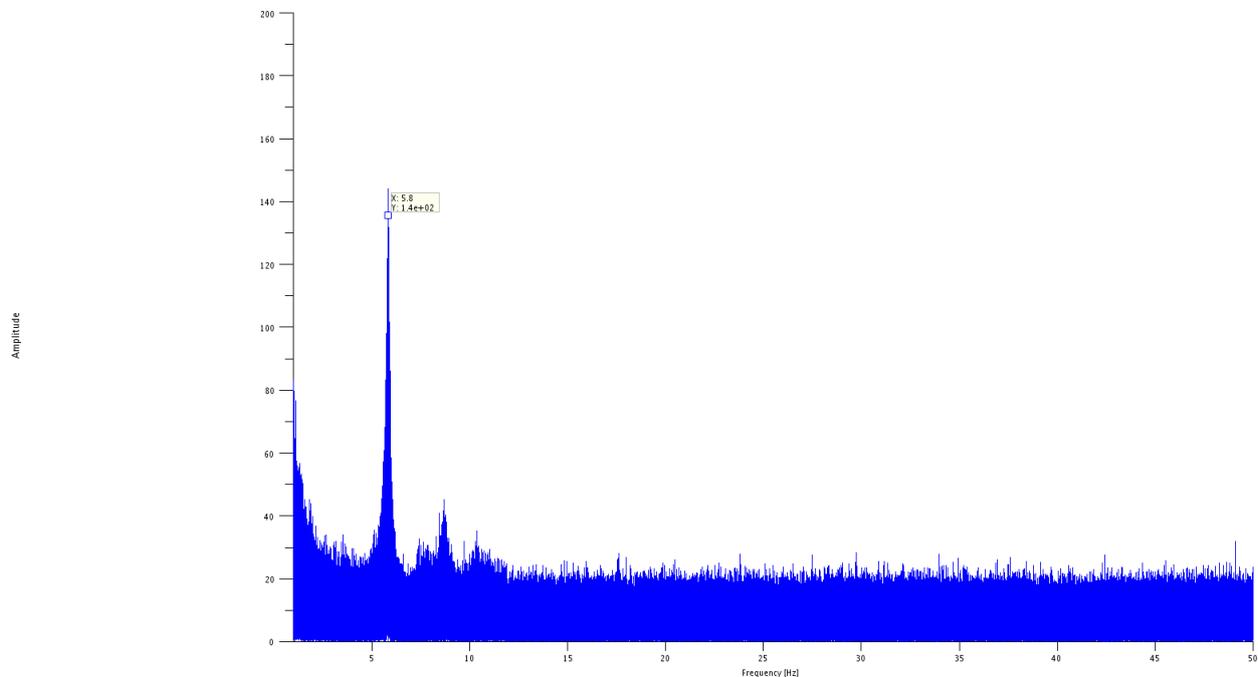


Abbildung 38: FFT über Daten vom 07.11.2012

7.2 Feldmessungen auf der Zugspitze

Um hohe statische Schneelasten an einem Extremstandort zu bestimmen wurde ein Kollektor auf Deutschlands höchst gelegener Umweltforschungsstation, dem Schneefernerhaus auf der Zugspitze installiert. Die Zugspitze befindet sich im Bereich der Westwindzone. Als erster hoher Berg in westlicher Richtung ist sie den Westwinden die relativ feuchte Luftmassen transportieren und den damit zusammenhängenden Wetterereignissen besonders stark ausgesetzt.

Dadurch kommt es in dieser Region ganzjährig zu intensiven Niederschlägen, die im Winter in kurzer Zeit zu großen Neuschneemengen führen.

7.2.1 Messaufbau und Versuchsdurchführung

Der Kollektor befindet sich an einem nach Süden ausgerichteten Rack des Schneefernerhaus und wurde unter einem Winkel von 45° zur horizontalen installiert wie in Abbildung 39 dargestellt.



Abbildung 39: Test-Kollektor auf der Zugspitze mit Zuordnung der Kraftsensoren S1...S4

Auf der Unterseite des Kollektors sind vier Kraftsensoren angebracht mit denen die Kräfte analog zum Versuchsaufbau auf Gran Canaria vertikal und horizontal zum Kollektor erfasst werden. Neben den Kräften wird auch die Absorbtemperatur gemessen.

Die Messanordnung konnte im August 2012 installiert werden. Die Kraft- und Temperaturmessung erfolgt mit einer Auflösung von 60 Sekunden.

Zum Zeitpunkt der Kollektorinstallation wurde zusätzlich eine Schneefangschiene angebracht um trotz des steilen Anstellwinkels ein höheres Aufstauen des Schnees zu bewirken (siehe Abbildung 40). Noch vor dem ersten Schneefall wurde das Schneefanggitter jedoch aus Sicherheitsgründen (durch den Betreiber der Messstation, ohne uns in Kenntnis zu setzten) wieder entfernt, sodass leider keine Möglichkeiten für ein höheres Aufstauen des Schnees gegeben war.



Abbildung 40: Kollektor mit Schneefangschiene
(wurde wieder deinstalliert,
Quelle: Fraunhofer ISE)

Um die Messergebnisse bei der Auswertung mit der Situation der Schneebelastung auf dem Kollektor vergleichen zu können wurde zusätzlich täglich soweit möglich ein Foto des Kollektors aufgenommen (vgl. Abbildung 42 auf Seite 91).

7.2.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Daten wurden für den erfassten Zeitraum von 01.09.2012 bis 31.02.2013 ausgewertet. Nach [Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-3:2010] ergibt sich für ein Schrägdach mit 45 ° Anstellung und Schneezone 3 sowie einer Höhe von über 1500 m Ü. d. M. eine Schneelast s auf dem Dach von:

$$s = s_k \cdot \mu_1 = 14 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,4 = 5,6 \text{ kN/m}^2$$

Dieser Wert gilt als anzunehmender Auslegungswert für eine geringe Überschreitungswahrscheinlichkeit für Dächer. Insgesamt fielen die maximalen

Schneehöhen auf der Zugspitze im Winter 2012/2013 mit 2-3 m im Vergleich zum Vorjahr (über 4 m) relativ gering aus wie in Abbildung 41 dargestellt.



Abbildung 41: Schneestatistik im Vergleich zu vorangegangenen Wintern (Quelle: <http://schneehoeihen.de>)

Trotzdem wurde die Belastungsangabe nach Norm mit 14 kN je nach Einschätzung der Schneeart im Winter 2012/2013 erreicht. Mit der Annahme von einer Schneehöhe von 3 m feuchtem Altschnee auf dem Boden (300-500 kg/m³) würde sich die Schneelast auf dem Boden s_k wie folgt berechnen:

$$s_k = 500 \text{ kg/m}^3 \cdot 3 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 14,7 \text{ kN/m}^2$$

$$s_k = 300 \text{ kg/m}^3 \cdot 3 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 8,8 \text{ kN/m}^2$$

Wie bereits im vorigen Abschnitt beschrieben liegt der Fokus der Untersuchungen im Bereich der Auflagerkräfte, da diese durch die Messtechnik einzeln erfasst werden können. Die charakteristischen Zusammenhänge konnten besonders im Zeitabschnitt 3.1-21.1.2013 erfasst werden.

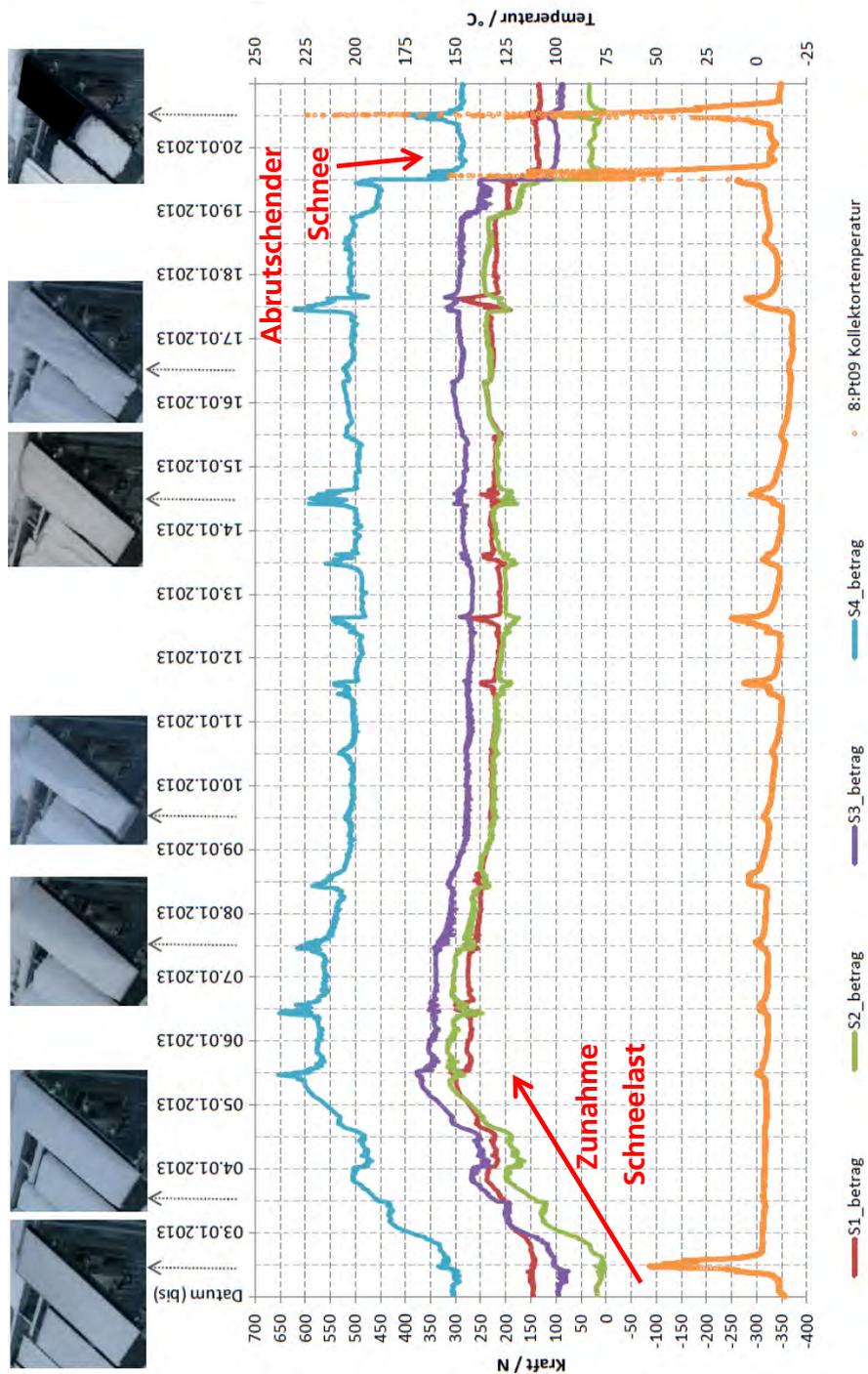


Abbildung 42: Verlauf Kollektortemperatur und Auflagerreaktionen (Beträge) durch Schneelast im Zeitraum 3.1.-21.1.2013

In Abbildung 42 sind die wichtigsten Daten mit Einzelaufnahmen der Schneeverhältnisse in diesem Zeitraum dargestellt. Aufgetragen sind Absorbertemperatur und die Beträge der einzelnen Kraftaufnehmer S1..S4.

Während etwa bis zum 6.1.2013 die Schneebelastung durch Schneefall zunimmt verringert sich bis zum 9.1.2013 die Schneelast um etwa 1/3. Ab hier bleibt Sie konstant bis zum abrutschen des Schnees am 20.1.2013, in dem die Belastungen etwa auf die Ursprungswerte zurückfallen. Die ungleichmäßige Verteilung der Auflagerreaktionen wurde durch die anfängliche Vorspannung der Installation sowie eine fortwährende Bewegung des Kollektors innerhalb der Befestigungspunkte durch thermische Längenänderungen verursacht.

Durch die in der Praxis festgestellte ungleichmäßige Verteilung der Gesamtbelastung auf die einzelnen Auflagerpunkte kann im Einzelfall die Belastung pro Auflager wie hier ermittelt **bis etwa den doppelten Wert im Vergleich zu einer theoretischen Berechnung bzw. gleichmäßigen Aufteilung erreichen**. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Erfahrungen in Gran Canaria.

Wie an den Temperaturspitzen gut zu erkennen, ist eine Kollektoraufheizung nur ohne Schneebedeckung gegeben wie beispielsweise kurz nach Abrutschen des Schnees am 20.1.2013. Abbildung 43 zeigt den entsprechenden Ausschnitt des Schneeabrutschens. Der Belastungsstoß führte dabei zu einer Verringerung der Auflagerkräfte von rund 100-200 N. In diesem Detailabschnitt ist weiter erkennbar, dass die Vorspannung durch die Kollektorinstallation rechtsseitig (S2, S4) offensichtlich wesentlich höher ausgefallen ist als linksseitig (S1, S3, vgl. Abbildung 39). Dies ist daran ersichtlich, dass sich die thermische Ausdehnung des Kollektors im Wesentlichen auf der rechtsseitigen Lagerung bemerkbar macht (vgl. Verlauf von S2 in grün und S4 in blau mit S1 und S3 gegen 15:00 Uhr).

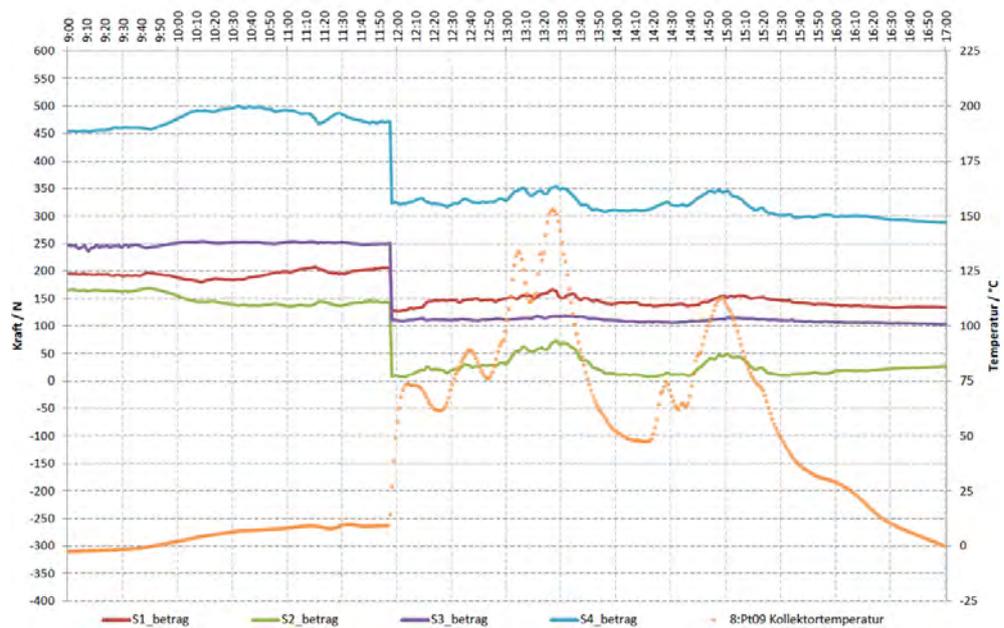


Abbildung 43: Detaildarstellung abrutschender Schnee 20.1.2013

Vergleicht man die Ergebnisse jedoch mit den Belastungen auf ein Schrägdach nach Norm bzw. der Schneestatistik des Winters 2012/2013, so sind die tatsächlich bestimmten Auflagerkräfte um etwa eine Größenordnung geringer. Bei einer Last von $5,6 \text{ kN/m}^2$ würden sich **für den Referenzkollektor pro Auflager beispielsweise rechnerisch Werte von bis zu $3,2 \text{ kN}$ ergeben** ohne Berücksichtigung von Eigengewicht und Vorspannungen. Diese Diskrepanz liegt vor allem daran, dass der Aufstellort des Kollektors nicht auf einem größeren Dach sondern weitgehend einzeln und freistehend, ohne die Möglichkeit von Schneeanstauungen installiert wurde. Hinzukommt die geometrische Beziehung, dass die Kollektorgroße (rund $2,3 \text{ m}^2$) gegenüber der Schneehöhe (2-3 m) klein ausfällt. Dies ist auch gut an den Fotos der Schneeverhältnisse in Abbildung 42 zu erkennen. In keiner Schneesituation konnte sich eine Schneedecke mit annähernd planer Oberfläche ausbilden, das heißt die eigentliche Schneehöhe im Vergleich zu einer größeren Oberfläche konnte nicht erreicht werden.

Überträgt man jedoch die Ergebnisse auf eine reale Aufdachinstallation in dieser Region beispielsweise mit einem Winkel von 45° und damit einer Lastannahme von bis zu $5,6 \text{ kN/m}^2$, so muss durch Vorspannungen und thermische Längenänderungen mit einzelnen **Auflagerkräften im Falle des Referenzkollektors von über $6,4 \text{ kN}$** gerechnet werden (bis zum doppelten theoretischen Wert durch ungleichmäßige Verteilung). In der Praxis werden als Lösung mehrere Auflagerpunkte mit zusätzlichen Sicherheiten verwendet wobei sich dadurch tendenziell auch höhere Vorspannungen ergeben können.

7.3 Betrachtung der Schneeanlagerung an Vakuumröhrenkollektoren (VRK)

Über einen Kurzversuch wurde die Anlagerung von Schnee an VRK untersucht. Der Versuchsaufbau wurde in Furtwangen aufgebaut. Die Konstruktion wurde dabei horizontal derart positioniert, dass ein gleichmäßiger Abstand von ca. 10m-12m zu anderen Gebäuden eingehalten wurde, um Verwirbelungen oder sonstigen Wechselwirkungen mit anderen Gebäuden vorzubeugen. Das in Abbildung 44 dargestellte Ergebnis verdeutlicht, dass sich selbst bei geringen Schneehöhen relativ schnell eine geschlossene Schneedecke über den gesamten Vakuumröhren ausbildet. Dabei konnten lokale Eisbildungen im Übergangsbereich zur Schneedecke beobachtet werden.



Abbildung 44: Schneeanlagerung VRK nach einem (oben) und drei Tagen (unten) ab 20. Januar 2012 (Quelle: [Göring 2012])

Diese Erkenntnis führt dazu, dass die Schneebelastung von VRK grundsätzlich mit der Situation von Flachkollektoren (FK) vergleichbar ist. Vielmehr ist sogar die **Annahme zulässig**, dass als anzunehmende Bemessungsfläche **nicht die Aperturfläche sondern die Bruttofläche verwendet werden sollte**. Dies ist damit zu begründen, dass sobald eine geschlossene Schneedecke vorliegt, sich die Belastung durch Schneeeinwirkung mit der Bruttofläche und nicht mit der Aperturfläche erhöht (wie bei FK).

Werden beispielsweise Systeme unter einem Anstellwinkel betrachtet so ist ein ähnlicher Effekt beobachtbar wie in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: Schneeanlagerung an Systemen

Im Vergleich zu einer horizontalen Aufstellung ist jedoch durch den Anstellwinkel eine höhere Schneelast am Boden erforderlich um eine geschlossene Schneedecke zu erhalten. Damit wäre auch hier die Anwendung des Formbeiwerts wie er in der [Norm DIN EN 1991-1-3:2010] angesetzt wird sinnvoll.

Durch den Überstand im Fall von Kompaktsystemen mit Tank ist in diesem speziellen Fall der Vorteil gegeben, dass immer der obere Teil der Vakuumröhren frei liegt, was eine potentielle Aufheizung und damit ein Abtauen (stark gebremst durch gute Dämmwirkung des Vakuums) des unteren Teils der Vakuumröhren selbst bei schlechten Witterungsbedingungen begünstigt.

8 AP 3.1 Empirische Untersuchungen von Belastungszuständen bei unterschiedlichen Belastungsarten am Prüfstand

Um den Einfluss unterschiedlicher Belastungsarten zu untersuchen wurden empirische Belastungsreihen durchgeführt. Dadurch sollen die Versagensgrenzen und -formen der Prüflinge jenen unter Bedingungen der [Norm DIN EN 12975-2:2006] gegenübergestellt und insbesondere die dort nicht erfassten Belastungen (Prüfungen nach [Norm IEC 61215:2005 ; Norm IEC 61646:2008], Schublasten, schwellende Belastung) und ihre Auswirkung auf die Widerstandsfähigkeit der Kollektoren beobachtet werden. Der Aufbau des neuen Belastungsprüfstands ist in Abschnitt 6 beschrieben. Im Folgenden wird exemplarisch ein Teil der durchgeführten Prüfreihe vorgestellt und abschließend die Ergebnisse unter Einbeziehung aller Prüfungen ausgewertet.

Versuche in Bezug zu den Feldmessungen waren in diesem Rahmen nicht sinnvoll, da während den Feldtests keine Versagensgrenzen erreicht wurden und die geschilderten Erkenntnisse für sich sprechen.

8.1 Prüfreihe Normenvergleich schwellende Belastung und Schublastprüfung

Als Prüflinge wurden Standard Flachkollektoren der gleichen Serie mit Aluminiumrahmenprofil und **schwimmender Lagerung der Kollektorabdeckung** mit einer Aperturfläche von 2,2 m² eingesetzt. Im Rahmen der Prüfreihe wurden insgesamt 6 Versuchen, teilweise mit mehreren Versuchen pro Kollektor durchgeführt.

8.1.1 Vergleich von ST-Normprüfung und PV-Normprüfung am Referenzkollektor

Zum Vergleich der Widerstandsfähigkeit eines Referenzkollektors gegenüber den Prüfanforderungen der Solarthermie (EN 12975) und der Photovoltaik (IEC 51646 / IEC 61215) wurden folgende Belastungsprüfungen durchgeführt:

- **V1 Statische Belastungsprüfung nach EN 12975**

Wechselnde Erhöhung der in 250 Pa Schritten bis zu +/- 2400 Pa mit kurzen Haltezeiten und langsamer diskontinuierlicher Krafterhöhung

- **V1.1 Zyklische Belastungsprüfung nach IEC 61646 / IEC 61215**

+2400 Pa 1h halten, Wechsel auf -2400 Pa 1h halten, drei Zyklen, Wechselzeit 20 Sekunden, bis etwa 240 Pa/s

Während die statische Prüfung ohne Probleme verlief, versagte der Kollektor beim ersten Wechsel von positiver zu negativer Belastung bei der zyklischen Belastungsprüfung, in dem die Scheibe aus der Lagerung gerissen wurde (siehe Abbildung 46). Dabei wurden die in den Kollektorrahmen verklemmten Halteschienen, die die Abdeckung von oben sichern, herausgehoben. Sowohl die Scheibe als auch der Rahmen blieben ansonsten intakt. Es konnten leichte plastische Verformungen am gesamten Rahmen festgestellt werden, die jedoch keine nennenswerten Auswirkungen auf die betrachtete Versagensform hatten.



Abbildung 46: Scheibe nach erstem Zykluswechsel aus schwimmender Lagerung gerissen bei Anwendung der PV-Prüfnorm

Es ist grundsätzlich nicht auszuschließen, dass das Versagen auf den im Vergleich zur statischen Prüfung schnellen Zykluswechsel mit rund 300 Pa/s zurückzuführen ist. In Bezug zu den schwingenden Windbelastungen auf Gran Canaria (vgl. Abschnitt 7.1.3) ist dies jedoch ein nahezu statischer Belastungswechsel.

8.1.2 Schwellende Belastung

Neben den auf Gran Canaria beobachteten Kraftstößen mit Frequenzen von > 1 Hz wurden auch schwellende Belastungen mit einer Periodendauer von 90 s beobachtet [Rehfeldt 2012]. Da mit dem neuen Belastungsprüfstand keine Schwingungsprüfungen mit höheren Frequenzen als 0,1 Hz möglich sind wurden die schwellenden Belastungen in folgenden Versuchen genauer untersucht:

- **V2 Schwellende Belastung 0..1200 Pa**
200 Schwingspiele, Periodendauer 90 s, etwa 26 Pa/s
- **V3 Schwellende Belastung 0..-1600 Pa**
200 Schwingspiele, Periodendauer 90 s, etwa 36 Pa/s
- **V3.1 Schwellende Belastung 0..-1600 Pa**
weitere 480 Schwingspiele, Periodendauer 90 s, etwa 36 Pa/s
- **V4 Schwellende Belastung 0..+2100 Pa**
200 Schwingspiele, Periodendauer 90 s, etwa 46 Pa/s
- **(V5 Schwellende Belastung 0..-2800 Pa)**
(200 Schwingspiele, Periodendauer 90 s, etwa 60 Pa/s)

Während bei V2 - V4 kein Versagen oder beobachtbare Verformungen auftraten konnte in V3.1 eine ansteigende Deformation des Kollektors festgestellt werden. Dies ist in Abbildung 47 dargestellt. Die bleibende Verformung wurde über den integrierten Seilzugsensor gemessen und Betrag

bis zu 3 mm. Je nach Auslegung der EN 12975 wäre ein prüfrelevantes Versagen durch dauerhafte Verformung ab 10 mm gegeben.

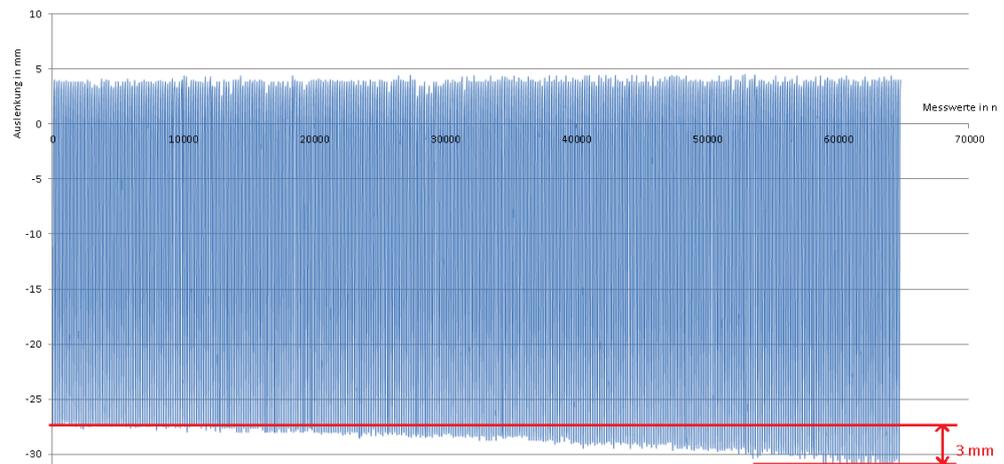


Abbildung 47: V3.1 Zunahme der Verformung

In Versuch V5 versagte der Kollektor wie auch bei V1.1 nach Erreichen von 2400 Pa Zug mit gleichem Schadensbild.

8.1.3 Ermittlung der Druckbelastungsgrenze / Variation Kollektorbefestigung

Da durch die bisherigen Ergebnisse keine Informationen über druckbedingtes Versagen gewonnen werden konnten, wurde der aus Versuch V2 unbeschädigte Kollektor für eine weitere Prüfung eingesetzt:

- V2.1 Erhöhung der Druckbelastung bis zum Versagen
geringer Belastungsanstieg von unter 1 Pa/s

Um unterschiedliche Kollektorbefestigungslösungen zu untersuchen wurden für die Prüfung rechts- und linksseitig verschiedene Kollektorbefestigungen eingesetzt. Der Kollektor versagte bei einer Belastung von **4400 Pa Druck** durch ein Einknicken des Rahmens wie in Abbildung 48 dargestellt.

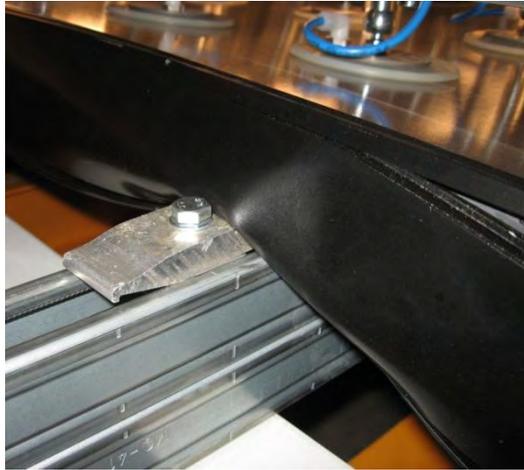


Abbildung 48: Einknicken des Rahmens im Bereich der Kollektorbefestigung

Besonders interessant war dabei der Einfluss des verwendeten Kollektorbefestigungssystems. Das Versagen durch Einknicken des Profilrahmens ist unsymmetrisch nur auf der Seite mit dem schmalen Befestigungssystem aufgetreten, während auf der gegenüberliegenden Seite der Profilrahmen intakt blieb (siehe Abbildung 49).



Abbildung 49: Versagen im Bereich der Kollektorbefestigungen mit geringerer Auflagefläche (links), kein Versagen des gegenüberliegenden Rahmenprofils mit alternativen Kollektorbefestigungen (rechts)

Offensichtlich fördern in diesem Fall Kollektorbefestigungen mit geringerer Auflagefläche ein Versagen bei hohen Druckbelastungen. Dadurch, dass die links dargestellte Kollektorbefestigung auch wesentlich robuster und damit

steifer ausgeführt war kommt weiterhin neben der unterschiedlichen Auflagefläche ein Einfluss unterschiedlicher Vorspannung in Frage. Dies spielt besonders bei Betrachtung der Anzugsdrehmomente bei der Kollektorinstallation mit Verschraubungen eine Rolle. Durch zu hohe Anzugsdrehmomente können potentiell Rahmenprofile vorgeschädigt werden was bei hohen Druckbelastungen auch zu dem hier dargestellten Schadensbild (Abbildung 49, links) führen kann.

8.1.4 Schublastprüfung

Durch eine Schrägstellung der Zylinder wie in Abbildung 50 zu sehen, werden in Versuch V6 tangentielle Belastungen erzeugt und so eine langsam ansteigende Schneebelastung auf den Kollektor simuliert:

- **V6 Schublastprüfung ansteigend ab 0 Pa bis zum Versagen**
Entsprechend Kollektoranstellwinkel von 30° ,
geringer Belastungsanstieg von unter 1 Pa/s

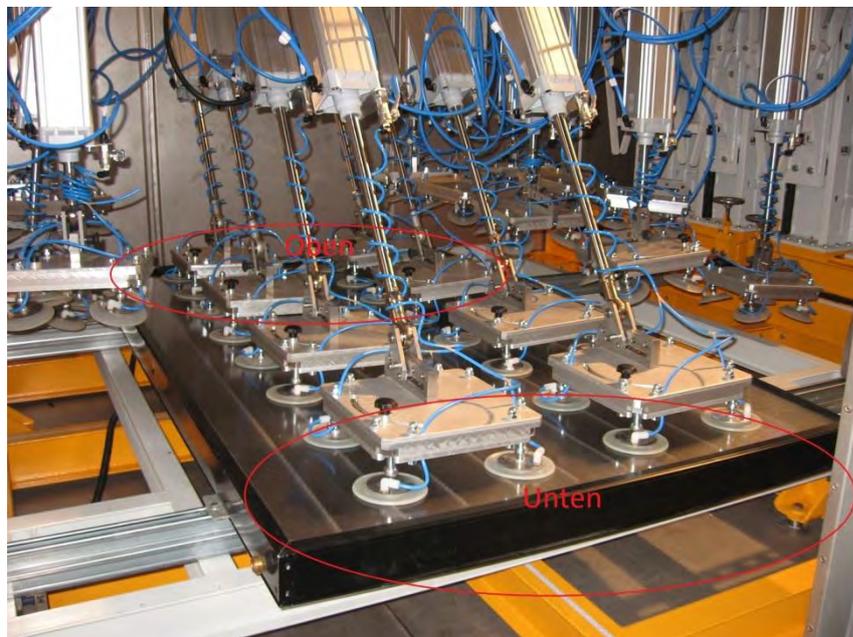


Abbildung 50: Versuchsaufbau Schublastprüfung V6

Dies entspricht einem Anstellwinkel des Daches von 30° und damit einem Lasteintrittswinkel gegenüber der Kollektoroberfläche von 60° . Der Kollektor versagte unter dieser Belastung durch Torsion des oberen Rahmens bei einem **Belastungswert von rund 4200 Pa** wie in Abbildung 51 dargestellt. Die Abdeckung wurde durch die Verformung des Rahmenprofils nicht mehr ausreichend unterstützt und auf den Absorber gedrückt.

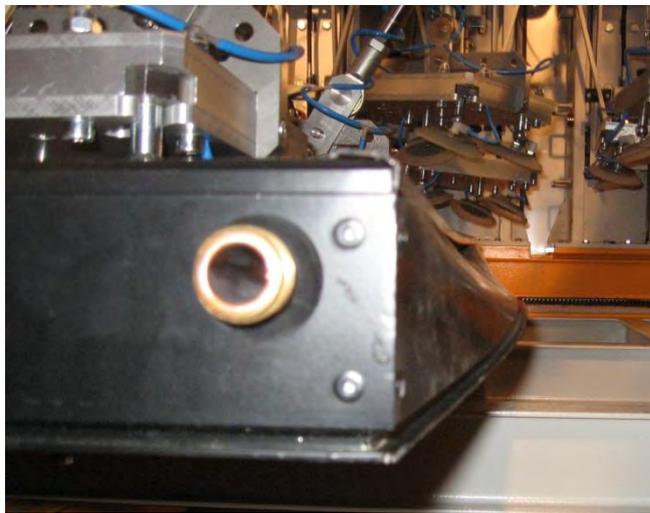


Abbildung 51: Versagen durch Schublast Torsion des oberen Rahmenprofils

Im Vergleich zur maximalen Druckbelastung (4400 Pa) erscheint der Wert von 4200 Pa nicht wesentlich geringer. Die Differenz kann jedoch bei anderen Kollektorkonstruktionen grundsätzlich höher ausfallen. Wesentlich dabei ist, dass die **Schadensbilder der unterschiedlichen Prüfarten vollkommen unterschiedlich ausfallen.**

Wird über den Anstellwinkel zwischen Normal- und Tangentialkräften unterschieden so beträgt der normal (senkrecht) wirkende Anteil 63 %. Damit steht eine maximale senkrechte Belastung zum Kollektor von **4400 Pa ohne Schublasten einer maximalen senkrechten Belastung von rund 2650 Pa mit Schublasten** theoretisch gegenüber. Der Schublast bzw. tangentielle Anteil wäre demnach rund 1550 Pa (37 %) jeweils bezogen auf die Aperturfläche.

Grundsätzlich verringert sich die Schneelast mit zunehmendem Neigungswinkel des Kollektors und bei vertikaler Anstellung (Fassadenkollektoren) erübrigt sich eine Einwirkung durch Schneelasten (vgl. Betrachtung Formbeiwerte in Abschnitt 4.6.2). Im Falle von Schneefanggittern und weiteren Aufbauten oder auch durch Aufdachkonstruktionen, die selbst als Schneefang wirken, können jedoch **erhebliche tangentielle Lastanteile** auch als festgefrorener Schnee auf die Kollektorabdeckung entstehen, **die bisher mit einer horizontalen Standardprüfung des Kollektors unberücksichtigt bleiben.**

Beispielsweise wird nach bei einem Schrägdach mit Neigung von bis zu 30 ° für die **Schneelastzone 3 in einer Höhe von 750 m** eine Belastung von rund **3800 Pa** erreicht [Rehfeldt 2012]. Gegenüber der hier ermittelten Versagensgrenze von 4200 Pa verbleibt eine **verschwindend geringe Sicherheit von 1,1**, ohne dass Schneeverwehungen, Abrutscheffekte oder im Falle einer Aufdachanlage oberhalb auf den Kollektor tangential wirkende Schneelasten berücksichtigt sind.

8.2 Prüfreihe Tieftemperaturprüfungen

Als Prüflinge wurden Standard-Flachkollektoren einer gleichen Serie mit Aluminiumrahmenprofil und **schwimmender Lagerung der Kollektorabdeckung** mit einer Aperturfläche von 2,5 m² eingesetzt. Es wurde das Original Befestigungs- und Montagesystem verwendet (Original Montageschienen mit Kollektorbefestigungen und Dachhaken). Im Rahmen der Prüfreihe wurden insgesamt 8 Versuche durchgeführt.

8.2.1 Vergleich Zugbelastungsgrenze bei Raumtemperatur und – 30 °C

Über einen vorgegebenen zyklischen Prüfablauf mit abwechselnder Erhöhung von Druck / Zug um jeweils 250 Pa wurde die maximale Zugbelastungsgrenze ermittelt. Der Prüfablauf lässt sich aus der Erfahrung ableiten, nach der die Zugbelastungsgrenze bei Kollektoren mit schwimmender Lagerung im Allgemeinen unter der Druckbelastungsgrenze liegt. Der Versuch wurde mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- **V1 Ermittlung Zugbelastungsgrenze bei Raumtemperatur**
Abwechselnde Erhöhung der Last um je 250 Pa (+500, -500, +750, -750, etc.), Belastungsanstieg bis 80 Pa/s, 1 Minute Haltezeit

Der Kollektor versagte bei einer **Zugbelastung von etwa 2450 Pa** indem die Scheibe aus der schwimmenden Lagerung herausgerissen wurde. Der Druckverlauf mit den einzelnen Belastungsstufen ist in Abbildung 52 dargestellt.

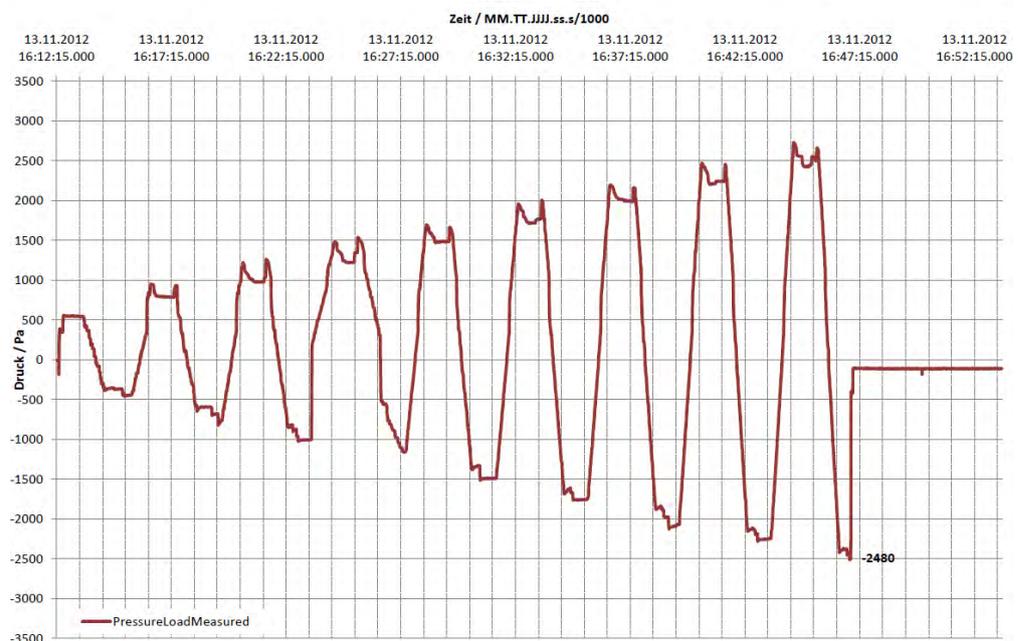


Abbildung 52: Diagramm Druckverlauf V1 bei Raumtemperatur

Im Vergleich dazu wurde Versuch V5 mit einem weiteren Kollektor mit gleichem Prüfablauf bei einer Umgebungstemperatur von -30 °C wie folgt durchgeführt:

- **V5 Ermittlung Zugbelastungsgrenze bei – 30 °C**
Abwechselnde Erhöhung der Last um je 250 Pa (+500, -500, +750, -750, etc.), Belastungsanstieg bis 90 Pa/s, 1 Minute Haltezeit

Der Verlauf des Prüfdrucks ist in Abbildung 53 dargestellt. Dabei versagten als erstes die Kollektorbefestigungselemente zwischen Kollektor und Montageschienen bei einer **Zugbelastung von 2750 Pa**. Ein Versagen der Verbindung zwischen Kollektor und Kollektorabdeckung konnte nicht festgestellt werden. Das heißt die tiefen Temperaturen haben zu einer erhöhten Steifigkeit der Verbindung zwischen Kollektor und Abdeckung geführt, sodass in diesem Zustand höhere Zugbelastungen erreicht werden können, während sich gleichzeitig **die Schwachstelle in Richtung Kollektorbefestigungen** verschoben hat.

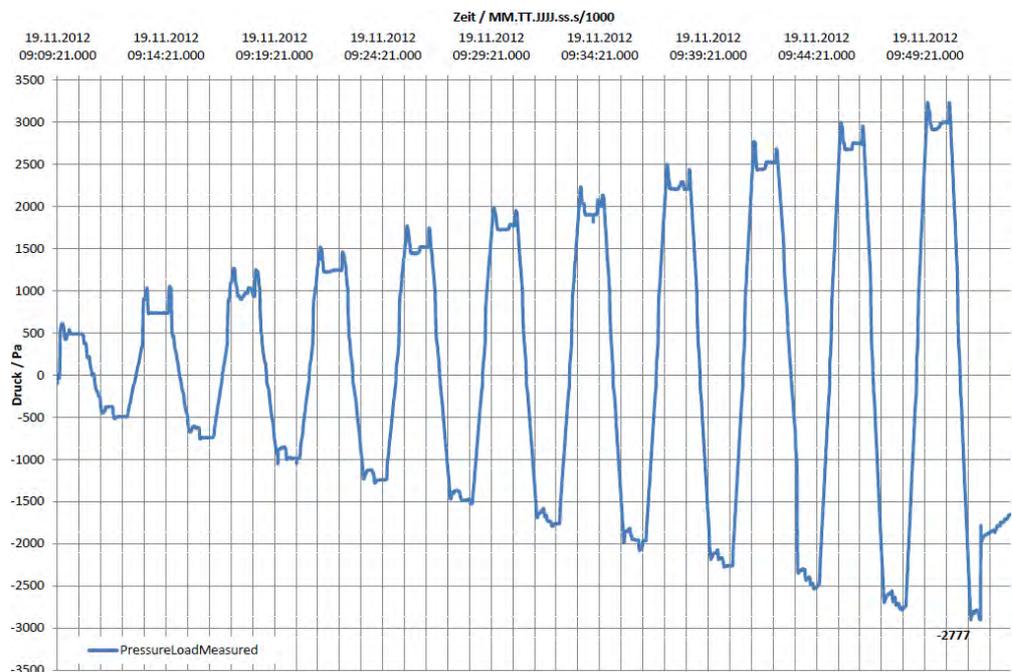


Abbildung 53: Diagramm Druckverlauf V5 bei -30 °C

Damit lässt sich der Schluss ziehen, dass im Falle von einer schwimmenden Lagerung der Kollektorabdeckung bei tiefen Temperaturen sich die Belastungsgrenze des Kollektors selbst auch erhöhen bzw. **die Grenze zu einer möglichen anderen Schwachstelle des Gesamtsystems verschoben werden kann**. Dies zeigt grundsätzlich ein schwer voraussagbares Verhalten bei Verwendung von polymerbasierten Verbindungstechnologien bei

unterschiedlichen Temperaturen. Daher sind besonders für derartige Materialien zusätzliche Prüfungen erforderlich.

8.2.2 Vergleich Druckbelastungsgrenze Dachhaken bei Raumtemperatur und – 30 °C

Der maximale Druck wurde im Falle des vorliegenden Prüflings durch die zulässige Belastung der Befestigung zwischen Montagesystem und Tragstruktur (Prüfstandaufnahme) begrenzt. Es wurden dabei vier Dachhaken für die Installation verwendet. Die Versuche V2 und V6 dienten dem Vergleich der Versagensgrenze der Dachhaken bei unterschiedlichen Temperaturen und wurden wie folgt durchgeführt:

- **V2 Ermittlung Druckbelastungsgrenze bei Raumtemperatur**
Langsame Erhöhung der Last in 250 Pa Stufen,
Belastungsanstieg bis 10 Pa/s, 1 Minute Haltezeit pro Stufe
- **V6 Ermittlung Druckbelastungsgrenze bei – 30 °C**
Langsame Erhöhung der Last in 250 Pa Stufen,
Belastungsanstieg bis 10 Pa/s, 1 Minute Haltezeit pro Stufe

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse beider Versuche in einem Kraft-Verformungsdiagramm dargestellt. Die y-Achse beschreibt die über den Seilzugsensor gemessene Verformung bzw. Auslenkung des Bemessungszylinders. Die Werte der x-Achse beschreiben die gemessene Gesamtkraft.

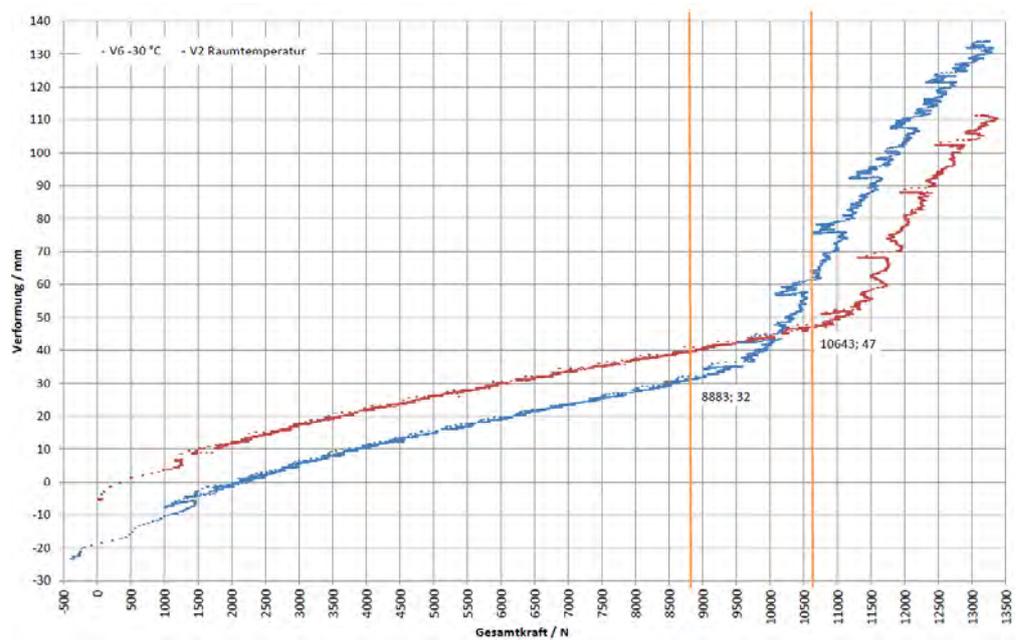


Abbildung 54: Diagramm Kraft-Verformung V2 und V6 mit Angabe des Übergangs zur plastischen Verformung (orange)

Der nahezu lineare Verlauf zwischen Kraft und Verformung endet durch den Übergang zur plastischen Verformung der Dachhaken. In V2 wurden Werte bis etwa 10,6 kN, in V6 bis etwa 8,8 kN weitgehend ohne plastische Verformung erreicht (siehe Positionen in orange).

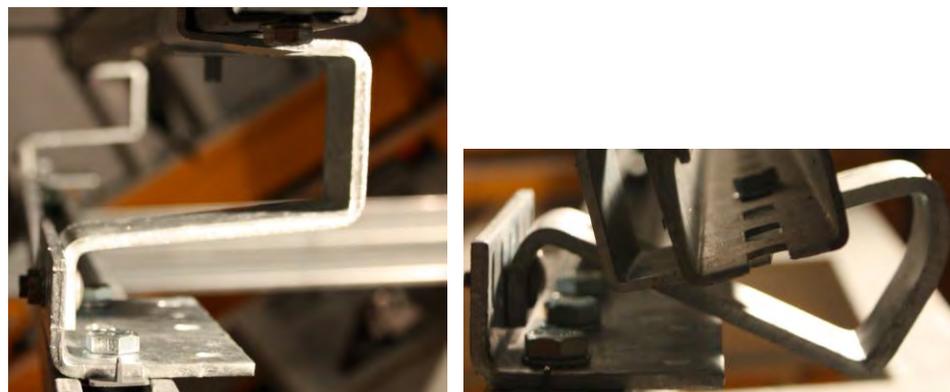


Abbildung 55: Montagesystem vor V6 (links) und nach V6 (rechts)

Somit beginnt die plastische Verformung des Montagematerials bei -30°C bereits bei einer um etwa 20 % geringeren Kraft als bei Raumtemperatur. Effekte wie Schublasten oder über einen längeren Zeitraum einwirkende Kräfte, sind dabei noch nicht berücksichtigt.

8.3 Prüfreihe VRK und Thermosiphon Kompaktsystem

Die Prüfung von Vakuumröhrenkollektoren auf ihre mechanische Belastbarkeit ist mit den herkömmlichen Vakuumsaugern nicht möglich. Im Allgemeinen werden Verfahren mit Außenrahmen, Plane und Schüttgut bzw. Flüssigkeit verwendet, um die Druckbelastungsprüfung durchzuführen (vgl. Abschnitt 4). Problematisch dabei ist, dass selbst mit dieser sehr anpassungsfähigen Methode Hinterspiegelungselemente in die Prüfung nicht ausreichend mit einbezogen werden können und grundsätzlich keine negative Druckbelastung realisiert werden kann. Letzteres wurde daher aus den Solar Keymark scheme rules ausgenommen, das heißt auch wenn positiver und negativer Druck normativ geprüft werden muss wird von Seiten der Solar Keymark Vorgaben für VRK die Zugprüfung ausgelassen. Das erscheint gerade bei großflächigen Installationen hinterspiegelter Kollektoren (z. B. bei Prozesswärmeanlagen) nicht gerechtfertigt.

Im Projektvorhaben wurden verschiedene Ansätze zur Zugprüfung von VRK untersucht, es konnte jedoch keine wirtschaftliche und praktisch umsetzbare Prüfmethode entwickelt werden. Um die Druckprüfung jedoch trotzdem im Prüfstand umsetzen zu können wurde eine Lösung mit Hilfe von Adapterplatten entwickelt [Göring 2012].

8.3.1 Adapterplatten für VRK Prüfung

Die Prüfmöglichkeit von VRK wurde über Adapterplatten in unterschiedlichen Größenmodulen realisiert. Die Module bestehen aus Siebdruckplatten¹⁹, die auf ihrer Unterseite mit einer Schaumstoffmatte verbunden sind. Der Schaumstoff ist für den Temperaturbereich für den der Belastungsteststand ausgelegt ist ohne Einschränkungen einsetzbar. Die Siebdruckplatten verfügen über eine glatte Oberfläche, sodass über die Vakuumsauger eine ausreichend stabile Verbindung hergestellt werden kann.



Abbildung 56: Adaptionsvorrichtung zur Prüfung von VRK (zwei Module)

Damit ist es möglich eine gleichmäßige Belastung auf einen VRK aufzubringen und so eine Schneebelastung bzw. Windlast in Kollektorrichtung zu simulieren. In Abbildung 56 sind die Adapterplatten bei der mechanischen Prüfung eines VRK am Belastungsprüfstand dargestellt.

¹⁹ Platte bestehend aus Holz mit glatter Oberfläche, die in dünnen Schichten querverleimt wurde und aufgrund ihre Verbundstruktur eine hohe Steifigkeit aufweist

Problematisch im Vergleich zu FK-Prüfungen ist die Bestimmung der relativen Verformung. Da sich der Schaumstoff während der Prüfung staucht ist das Signal der Auslenkung des Bemessungszylinders über den Seilzugsensor nicht nutzbar, da hiermit mehr die Stauchung des Schaumstoffs als die Verformung der Glasröhren gemessen wird. Dadurch ist ausschließlich eine optische Einschätzung der Verformung gegeben, was jedoch über entsprechend gewählte Kamerapositionen gut überwacht werden kann. Weiterhin dient das akustische Signal eines Glasbruchs einer Röhre oder eines Risses als Referenz um die Belastungsgrenzen zu identifizieren.

8.3.2 VRK-Prüfung horizontal

Um die Eigenschaften der Adapterplatten zu testen wurden am Belastungsteststand verschiedene Versuche an VRK durchgeführt. Dabei wurden die Adapterplatten zuerst an einem horizontal ausgerichteten VRK getestet (vgl. Abbildung 56). Hierbei wurden die Platten so auf dem Kollektor angeordnet, dass die Saugerplatten der mittleren Zylinderreihe jeweils zur Hälfte auf beiden Adapterplatten ausgerichtet werden konnten. Anschließend wurde der Kollektor bis zum hörbaren Glasbruch einer Röhre belastet. Der Druckverlauf des Versuchs ist in Abbildung 57 dargestellt.

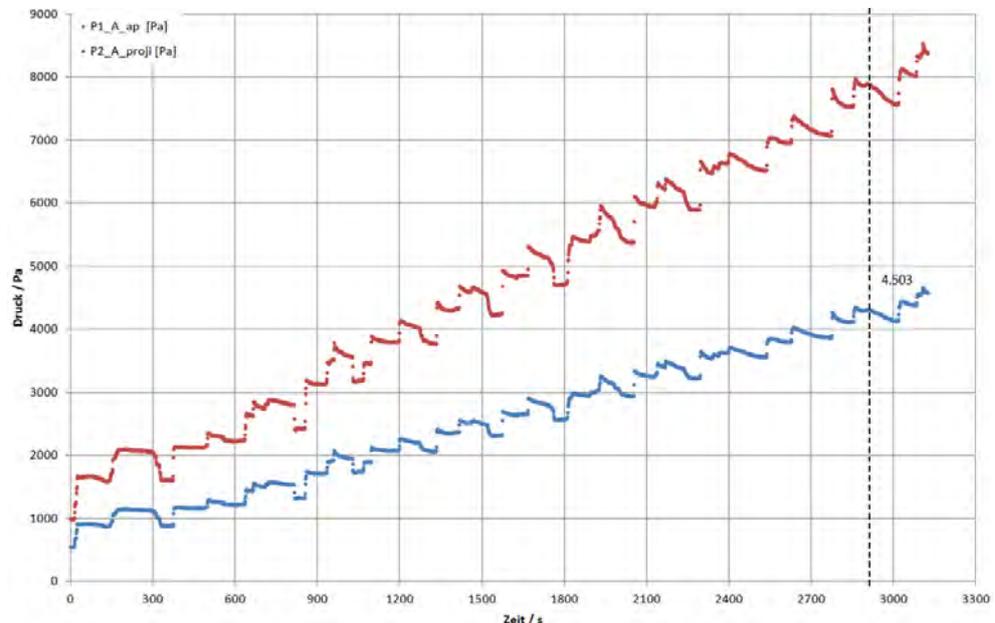


Abbildung 57: Druckverlauf horizontale VRK Prüfung auf Basis von Aperturfläche A_{Ap} (blau) und projizierter Fläche über Röhrenaußendurchmesser A_{proj} (rot)

Der Druckverlauf wurde auf unterschiedliche Bezugsflächen bezogen. Nach Norm wird bisher die Aperturfläche als Bezugsfläche verwendet. Diese fällt bei dem geprüften Kollektor auf Grund der Hinterspiegelung relativ hoch aus, daher ist der entsprechende Druckverlauf vergleichsweise gering. Der **Glasbruch der Röhre ereignete sich bei rund 4500 Pa**. Wird als Bezugsfläche der projizierte Außendurchmesser der Außenröhre verwendet werden theoretisch wesentlich höhere Flächenbelastungen erreicht (**bis über 7800 Pa**). Wie in Abschnitt 7.3 gezeigt ist die Annahme der Aperturfläche jedoch weitgehend unrealistisch und eine Verwendung der Bruttofläche sinnvoll. Welche **Bezugsfläche** verwendet werden muss ist jedoch **normativ vorgeschrieben**, was wie in diesem Fall **nicht sinnvoll erscheint**.

Die Belastungsgrenzen von VRK fallen allerdings auch bei Verwendung der Bruttofläche im Vergleich zu FK relativ hoch aus. Dies ist jedoch auch damit begründet, dass nur auf Druck geprüft wird. Schwachstellen sind

erfahrungsgemäß durch das Montagesystem oder Wechselwirkungen von Durchbiegung der Röhren und Interaktion mit Elementen des Montagesystems gegeben.

8.3.3 Prüfung VRK Thermosiphon Kompaktsystem

Neben weiteren VRK-Prüfungen auch unter Schublasten wurden Versuche an einem VRK Thermosiphon Kompaktsystem durchgeführt.

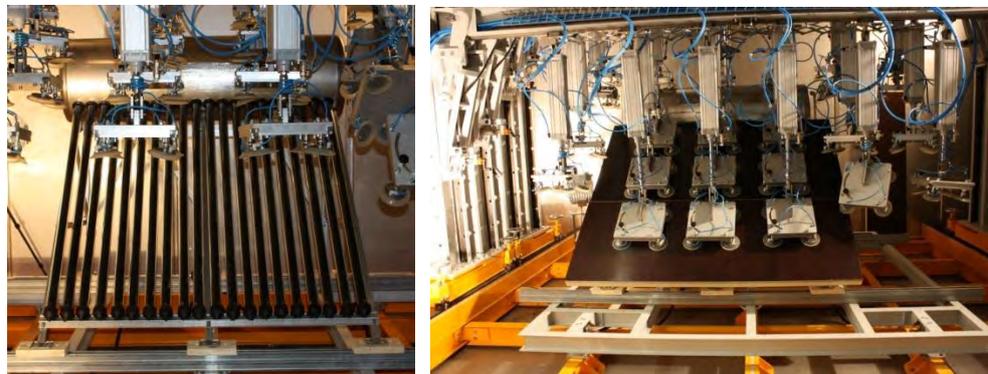


Abbildung 58: VRK Thermosiphon System mit Aufständering installiert (links) und kurz vor Versuchsbeginn mit Adapterplatten und ausgerichteten Saugerplatten (rechts)

Die Belastungsprüfung wurde in vertikaler Richtung (Schublasten) durchgeführt was im Fall von Schneelasten als realistisch anzusehen ist. Eine Prüfung normal zu den Röhrenachsen eines VRK Systems ist am Prüfstand nur schwer realisierbar und wird in der Prüfpraxis auch nur sehr selten durchgeführt. Geprüft wurde dabei das Gesamtsystem mit Aufständering und der neuen Möglichkeit den Tank zu belasten. Durch den relativ großen Tankdurchmesser konnten die Sauger passend auf dem Tank angebracht werden und das Vakuum aktiviert werden (siehe Abbildung 59).

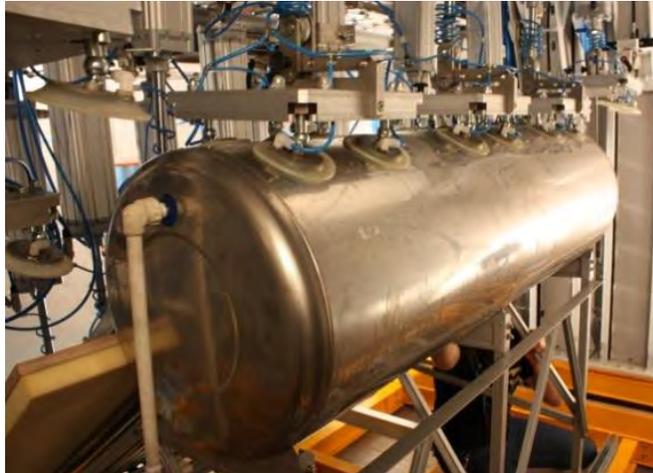


Abbildung 59: Belastung des Tanks mit Saugerplatten

Die neue Möglichkeit den Tank zusätzlich zu prüfen ist besonders für die Optimierung der Aufständerung sowie realistische Tests des Gesamtsystems von Bedeutung. Dabei kann für die Saugerpakete auf dem Tank **eine zusätzliche Belastung definiert werden um das Eigengewicht des gefüllten Tanks mit zu simulieren.**

Das Versuchsergebnis fiel ähnlich aus wie bei den vorangegangenen VRK Untersuchungen unter Schublasten, die in diesem Rahmen nicht einzeln behandelt werden. An der Aufständerung wurden keine Schäden oder unzulässige Verformungen beobachtet. In Tabelle 3 sind einzelne Aspekte der Prüfmethode und deren Ergebnis hervorgehoben

Ziel	Ergebnis
Überprüfung der Rutschfestigkeit bei einem Anstellwinkel von 45°	Beim Ausrichten der Adapterplatten auf dem VRK und bei Belastung mit Schublasten kommt es trotz tangentialer Lasten bis zum Glasbruch zu keinem Abrutschen.
Glasbruch/ Verhalten der Röhre bei Schublasten	Aufgrund der Schubbelastung wurden die Röhren oben aus der schwimmenden Einfassung herausgezogen (an schwarzer

	<p>Markierung zu sehen).</p>  <p>Dadurch wurden die Röhren in die unteren Kunststoffkappen eingedrückt wodurch einige Röhren beschädigt wurden, da das Vakuum in der Röhre entweichen konnte.</p>  <p>Weiterhin kam es bei einer der mittleren Röhren zum Glasbruch.</p>
--	---

Tabelle 3: Untersuchungen der Prüfmethode von VRK und typische Versagensgrenzen durch Schublastprüfung

8.4 Zusammenfassung

Insgesamt konnten im Projektvorhaben über 40 Versuche mit unterschiedlichsten Belastungsarten, Umgebungsbedingungen und Prüflingen durchgeführt werden. Eine Übersicht der durchgeführten Prüfungen ist in Abbildung 60 dargestellt.

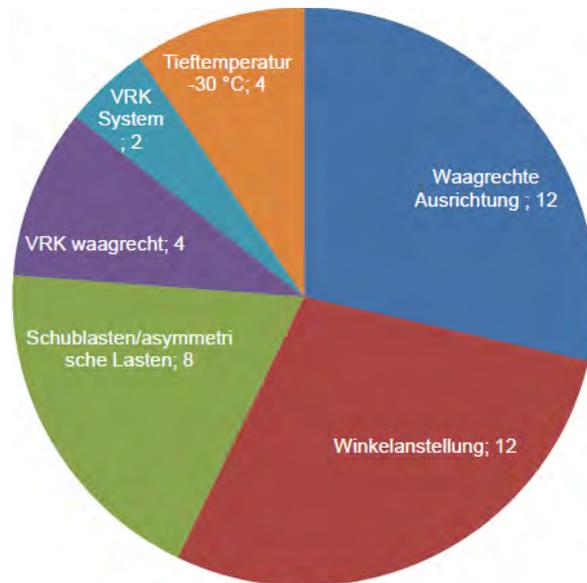


Abbildung 60: Übersicht durchgeführte Versuche nach Belastungsart / Umgebungsbedingungen

Ein Anteil der Untersuchungsergebnisse wurde in gesonderten vertraulichen Berichten an die Projektpartner übermittelt und wird in diesem Rahmen nicht detailliert behandelt.

Aus den empirischen Untersuchungsreihen können bisher folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Befestigungs- und Montagesysteme stellen oft die Schwachstelle des Gesamtsystems dar
- Eine weitere Schwachstelle zeigt sich in der auf Zug belasteten Glaseinfassung schwimmend gelagerter Kollektorabdeckungen
- Schublastprüfungen bringen teilweise stark abweichende Versagensgrenzen im Vergleich zur senkrechten Belastungsprüfung
- Über mehrere Lastzyklen und realistische Haltezeiten (siehe Abschnitt 8.1) können aussagekräftigere Belastungsgrenzen bestimmt werden, im Vergleich zu statischen Prüfungen ohne Zyklen mit kurzen Haltezeiten

9 AP 4 Ableitung verbesserter Prüfverfahren

Im Projektvorhaben konnten aus den Untersuchungen mit zusätzlichen theoretischen Betrachtungen neue verbesserte Prüfverfahren abgeleitet werden.

Neben der unterschiedlichen Lastfällen und deren Bedeutung für die Prüfpraxis wurde insbesondere der Einfluss der Saugerverteilung mit einer idealen Flächenlast verglichen. Weiterhin wurde an einem Beispiel untersucht inwiefern Rechenmethoden als Hilfsmittel sinnvoll für die Bestimmung der Belastungsgrenzen der mechanischen Kollektorkomponenten eingesetzt werden können.

9.1 Unterschiedliche Lastfälle und deren Bedeutung für die Prüfpraxis

Im Folgenden werden die entwickelten unterschiedlichen Lastfälle und deren sinnvolle Einsatzszenarien sowie die Realisierung am Prüfstand kurz beschrieben [Mergele 2013].

9.1.1 Senkrechte Lasten – vertikal angeordnete Zylinder

Die allgemeine Prüfpraxis beschränkt sich bis auf Ausnahmefälle auf eine senkrechte Prüfung in Bezug zur Prüflingsoberfläche bei horizontal ausgerichtetem Kollektor (vgl. Abschnitt 4). Mit diesem Lastfall ist eine **gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse über verschiedene Produkte** gegeben und der Aufwand der Prüfungen ist vergleichbar gering. Die Belastungsart entspricht einem gleichmäßig verteilten Winddruck (positiv, negativ) oder bis zu geringen Anstellwinkeln einer gleichmäßig verteilten Schneelast. Befestigungs- und Montagesysteme können hier bereits berücksichtigt werden. **In der Praxis kommen jedoch sehr selten horizontale Einbaulagen von Kollektoren zum Einsatz.**

Das Schema des Lastfalls sowie die Aufteilung der wirkenden Kräfte ist in Abbildung 61 dargestellt.

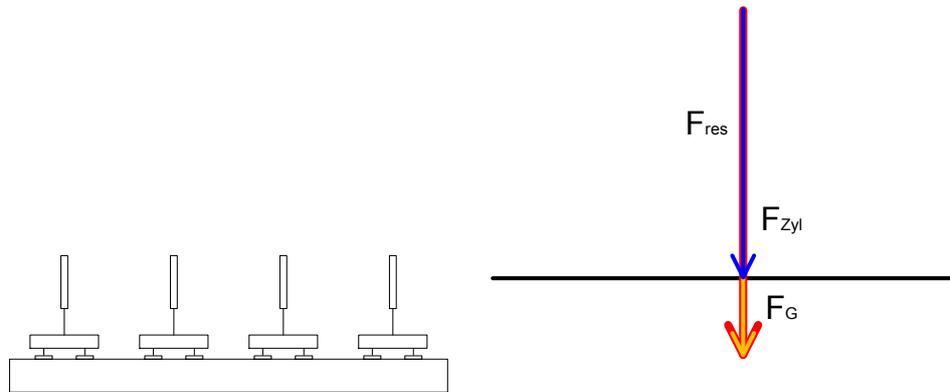


Abbildung 61: Senkrechte Belastungsart, vertikal angeordnete Zylinder mit Kraftaufteilung, F_{res} =Resultierende (rot), F_{Zyl} =Zylinderkraft (blau), F_G =Gewichtskraft (gelb)

9.1.2 Senkrechte Lasten – schräg angeordnete Zylinder

Sobald Montagesysteme wie zum Beispiel Aufständereien in der Prüfung zusätzlich berücksichtigt werden, muss die Kraft unter dem entsprechenden Anstellwinkel eingebracht werden, damit Sie trotzdem senkrecht entsprechend einer positiven oder negativen Windbelastung auf die Kollektoroberfläche wirken kann. Der Vorteil liegt dabei in der **Prüfung des Gesamtsystems inklusive aller Befestigungs- und Montagesysteme**. Hiermit konnten in der Praxis schon mehrfach eindeutige Schwachstellen im Bereich des Montagesystems identifiziert werden, wobei die Belastungsgrenze der Schwachstelle des Montagesystems teilweise um ein Vielfaches geringer war als die Belastungsgrenze des Kollektors selbst.

Durch die gelenkige Lagerung der Zylinder ist es möglich, die Zylinder bis zu einem Winkel von 45° zur Horizontalen auszurichten wie in Abbildung 62 dargestellt. Durch das Eigengewicht der Saugerplatten, welches senkrecht nach unten wirkt, ist bei dieser Anordnung der resultierende Krafteinleitungswinkel α nicht gleich dem Zylinderkrafteinleitungs- bzw. Anstellwinkel β .

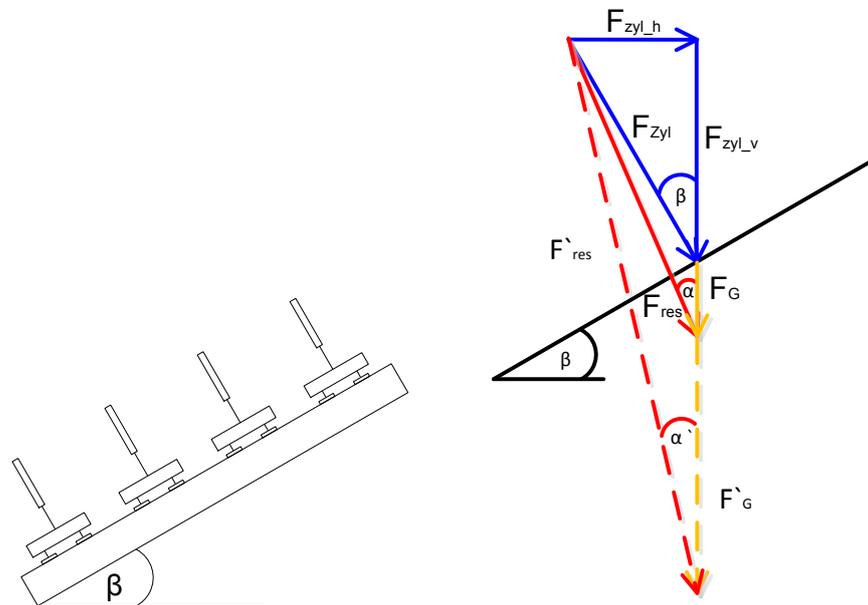


Abbildung 62: Senkrechte Belastungsart, schräg angeordnete Zylinder mit Kraftaufteilung, F_{res} =Resultierende (rot), F_{zyl} =Zylinderkraft (blau), F_G =Gewichtskraft (gelb)

Da sich das Eigengewicht der Saugerplatten technisch nicht kompensieren lässt, vergrößert sich der Anteil der Gewichtskraft an der resultierenden Kraft mit zunehmender Zylinderanzahl. Dadurch ändert sich auch der Krafteinleitungswinkel der resultierenden Kraft, wodurch α durch die höhere Gewichtskraft kleiner als α wird.

Des Weiteren führt das Eigengewicht der Saugerplatten zu Schublasten parallel zur Kollektorfläche sowie einer Kraft senkrecht zur Kollektorfläche.

Mit zunehmender Zylinderkraft reduziert sich jedoch der Anteil des Eigengewichts der Saugerplatten an der resultierenden Kraft F_{res} . Dadurch nähert sich der resultierende Krafteinleitungswinkel α während dem Test dem Anstellungswinkel β an.

Dabei entsprechen senkrechte Zug- und Drucklasten (normal zur Kollektoroberfläche) einer Prüfung auf Windeinwirkung. Die senkrechten

Lastfälle sind weiterhin für zyklische Belastungen gut geeignet, da Sie durch Windeinwirkungen auch in der Praxis auftreten und besonders bei schräg angeordneten Zylindern die Aufständigung bzw. Dachbefestigung in realistischem Aufbau mit berücksichtigt werden kann.

9.1.3 Schublasten – vertikal angeordnete Zylinder

Sobald hohe Schneelasten beispielsweise auf Schrägdächern oder einer Flachdachaufstellung realistisch geprüft werden, stößt die bisher beschriebene Methode mit senkrechter Lasteinleitung an Ihre Grenzen.

Auf den Kollektor wirken zusätzliche **tangentiale Hangabtriebskräfte durch das Gewicht des haftenden Schnees**. Die Kräfte können sich dabei auch punktuell oder **linienförmig** beispielsweise **auf die Unterkante** des Kollektors konzentrieren. Wie bereits in Abschnitt 8.1.4 erläutert ergeben sich durch die Berücksichtigung von Schublasten **verringerte Belastungsgrenzen und andere Versagensformen**.

Auch hier besteht die Möglichkeit das **Gesamtsystem inklusive Aufständigung oder Dachbefestigung** zu prüfen um die Schwachstellen zu ermitteln.

Bei vertikaler Zylinderstellung lassen sich die Saugerplatten an den Aufstellungswinkel beispielsweise eines aufgeständerten Systems anpassen, wie in Abbildung 63 dargestellt. Die Konstruktion berücksichtigt dabei eine zentrische Krafteinleitung zwischen den einzelnen Vakuumsaugern.

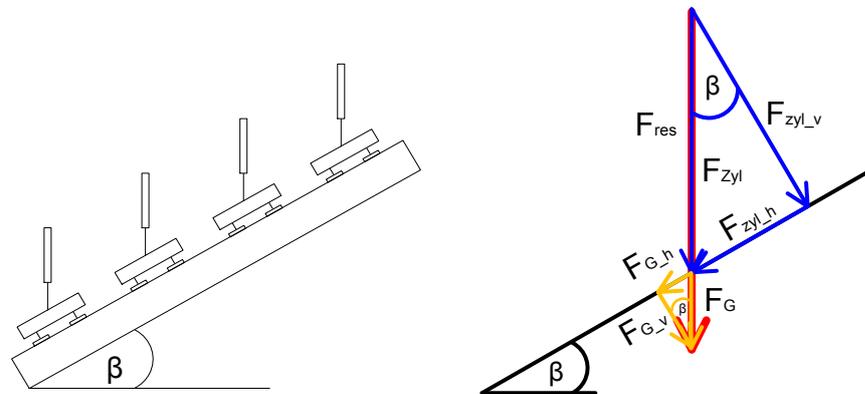


Abbildung 63: Schublasten, vertikal angeordnete Zylinder mit Kraftaufteilung, F_{res} =Resultierende (rot), F_{zyl} =Zylinderkraft (blau), F_G =Gewichtskraft (gelb)

Dabei teilt sich die Zylinderkraft sowie das Eigengewicht der Saugerplatten in eine vertikale Kraft senkrecht zur Kollektorfläche und eine horizontale Schubkraft parallel zur Kollektorfläche auf. Da die Zylinderkraft und die Gewichtskraft der Saugerplatten senkrecht nach unten wirken ist die Richtung der resultierenden Kraft gleich der eingeleiteten Kraft.

9.1.4 Schublasten – schräg angeordnete Zylinder

Für Schrägdachaufstellungen von Kollektoren ist zumeist keine eigene Kollektoraufständerung gegeben. Um Kollektoren entsprechend **mit Ihren Dachbefestigungen auf Schublasten zu prüfen** reicht eine horizontale Prüfung mit schräg angeordneten Zylindern aus, was hilft den Aufwand für den Aufbau zu reduzieren.

Mit dieser Anordnung kann an einem horizontal liegenden Kollektor abrutschender und sich aufstauender Schnee realitätsnah simuliert werden.

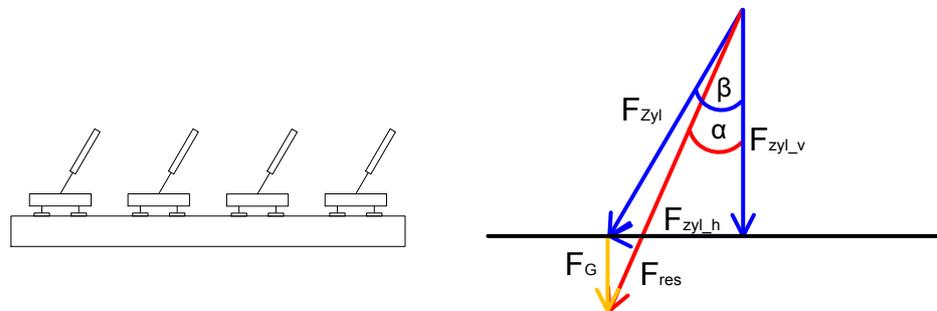


Abbildung 64: Schublasten, schräg angeordnete Zylinder mit Kraftaufteilung, F_{res} =Resultierende (rot), F_{zyl} =Zylinderkraft (blau), F_G =Gewichtskraft (gelb)

Durch das Eigengewicht der Saugerplatten, welches senkrecht nach unten wirkt, ist bei dieser Anordnung analog zur Krafteinleitung in Abschnitt 9.1.2 der resultierende Krafteinleitungswinkel α nicht gleich dem Zylinderkrafteinleitungswinkel β .

Schublasten durch Schnee treten im Allgemeinen nicht in Form von zyklischen oder negativen Einwirkungen auf. Daher ist für diese Lastfälle eine langsame fortwährende Steigerung einer positiven Last entsprechend anhaltenden Schneefalls sinnvoll. Trotzdem können **Effekte von abrutschenden Schneemassen kurzzeitig zu hohen Laständerungen**, besonders des tangentialen Kraftanteils **führen**. Dies kann zum einen mit einer zusätzlichen Sicherheit oder mit einer Sequenz gegen Prüfungsende beispielsweise durch einen ruckartigen Abfall von maximaler Schubbelastung auf Null Belastung berücksichtigt werden.

9.2 Einfluss von Saugerverteilung und Randabstand auf die Homogenität der Flächenlast

Um die Durchbiegung der Kollektorabdeckung infolge einer Flächenlast möglichst gut durch Einzellasten abbilden zu können, werden bei der mechanischen Prüfung von solarthermischen Kollektoren die Saugerplatten

bzw. Vakuumsauger möglichst gleichmäßig auf der Aperturfläche²⁰ eines Kollektors verteilt wie in Abbildung 65 dargestellt.



Abbildung 65: Saugerplatten auf der Aperturfläche eines Kollektors verteilt

Der Abstand der vier Saugnäpfe einer Saugerplatte (vgl. Abschnitt 6) lässt sich im Belastungsprüfstand nur zu gleichen Abständen in x- und y-Richtung verstellen. Weiterhin geben die einschlägigen Prüfnormen keine Auskunft über die Art und Weise der homogenen Verteilung der Vakuumsauger beispielsweise bezüglich des Randabstands. Daher wurde im Projektvorhaben der Einfluss der Saugerplattenverteilung und der Einfluss des Randabstands auf die Durchbiegung der Kollektorabdeckung näher untersucht [Merzle 2013].

Über eine Modellierung der Kollektorabdeckung als Flächentragwerk und die Betrachtung unterschiedlicher Lagerungsfälle konnte berechnet werden, wie sich der Einfluss der Saugerabstände und des Randabstands auf die mittige Durchbiegung auswirkt. Kriterium für die Optimierung war dabei eine Konfiguration zu finden, in der die Durchbiegung möglichst der Durchbiegung einer Flächenlast nahe kommt. Exemplarisch wurde dazu eine Kollektorgroße

²⁰ Als Aperturfläche ist als die Projektion der unbeschatteten Kollektorfläche definiert, durch die Licht in den Kollektor eintritt.

von 2 m x 1,15 m gewählt, die von Ihren Abmessungen her keine gleichmäßige Verteilung der Saugerpakete in beiden Richtungen zulässt.

9.2.1 Modellgrundlage

Bei Belastung einer am Plattenrand allseits gestützten Platte werden die einzelnen Plattenstreifen nicht nur balkenartig verbogen, sondern auch verdrillt, wie in Abbildung 66 dargestellt.

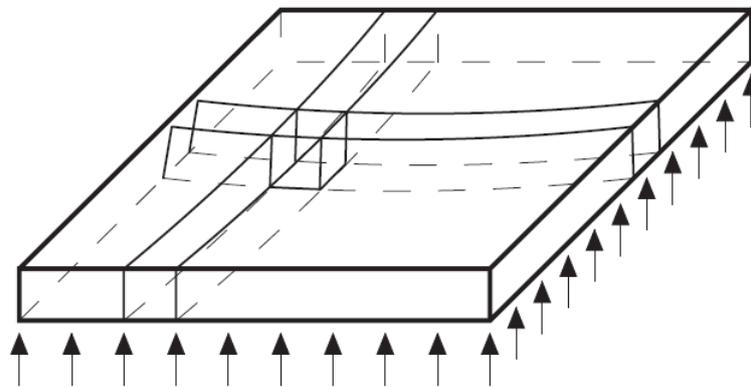


Abbildung 66: Verformung einzelner Plattenstreifen (Quelle:[Hake and Meskouris 2007])

Somit treten in der Platte nicht nur Biegemomente sondern auch Drillmomente auf. Werden die Drillmomente vernachlässigt, ist die Durchbiegung w_x und w_y an der Stelle sich kreuzender Plattenstreifen gleich groß. Dadurch kann die konstante Belastung $p(x,y)$ auf eine allseits gelagerte Rechteckplatte in die Anteile p_x und p_y aufgeteilt werden und die Durchbiegung der Platte in x- und y-Richtungen als Balken berechnet werden. Nach [Hake and Meskouris 2007] ist die dabei entstehende Streckenlast q_x und q_y proportional zur aufgetragenen Flächenlast.

Platten können fest oder gelenkig gelagert sein. Je nach Kollektorbauart ist dessen Abdeckung unterschiedlich gelagert. Kollektorkonstruktionen

entsprechen im Allgemeinen Lagerfall 1 (schwimmend gelagert) oder Lagerfall 6 (verklebt) wie in Abbildung 67 dargestellt.

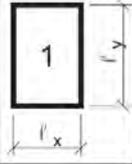
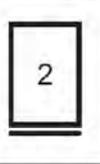
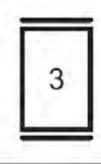
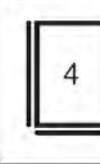
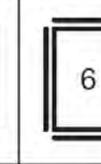
Stüt- zungsart						
κ	$\frac{\epsilon^4}{1+\epsilon^4}$	$\frac{2\epsilon^4}{5+2\epsilon^4}$	$\frac{\epsilon^4}{5+\epsilon^4}$	$\frac{\epsilon^4}{1+\epsilon^4}$	$\frac{2\epsilon^4}{1+2\epsilon^4}$	$\frac{\epsilon^4}{1+\epsilon^4}$

Abbildung 67: Lagerungsfälle Rechteckplatte [Hake and Meskouris 2007]

Abhängig von der Lagerungsbedingung der Platte und dem Seitenverhältnis ϵ ergibt sich für den jeweiligen Lagerungsfall die Lastanteilszahl κ .

Unter Einsatz der axialen Flächenmomente und der beschriebenen Kennwerte lassen sich die Biegelinien für eine Flächenlast berechnen.

Da die Belastung der Kollektorabdeckung mit den Saugerplatten nicht mehr einer homogenen Flächenlast entspricht, werden Einzellasten angenommen. Für unterschiedliche Krafteinleitungspositionen bzw. Krafteinleitungsverteilungen durch die Vakuumsauger wurden die Biegelinien durch Überlagerung einzelner Krafteinleitungen berechnet [Assmann and Selke 2006].

9.2.2 Ergebnis und Umsetzung in der Prüfpraxis

Für Lagerungsfall 1 und Lagerungsfall 6 wurden exemplarisch die mittigen Biegelinien für die beschriebenen Abdeckungsabmessungen (2 m x 1,15 m) bestimmt. Das Ergebnis für Lagerungsfall 1 (schwimmende Lagerung) ist in Abbildung 68 dargestellt.

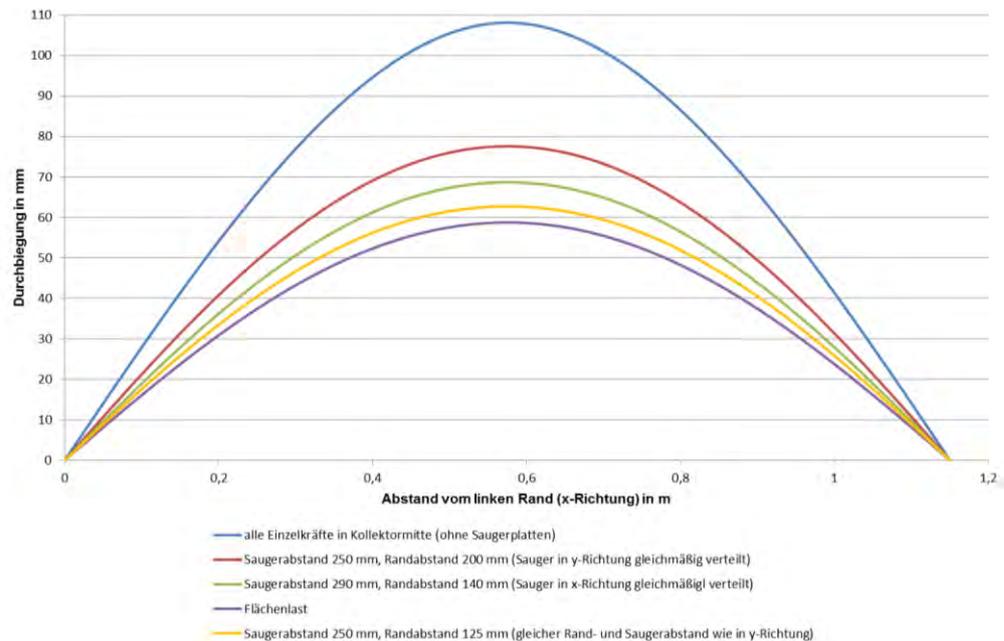


Abbildung 68: Biegelinien über Kollektorbreite Lagerungsfall 1 (schwimmend gelagert) für Einzellast, Flächenlast und unterschiedliche Vakuumsaugerkonfigurationen [Mergle 2013]

Deutlich ist, dass die Durchbiegung über eine gleichmäßige Verteilung der Sauger entweder in x- (Breite) oder in y-Richtung (Länge) **stärker von der idealen Durchbiegung abweicht im Vergleich zu einem konstanten Randabstand basierend auf der Hälfte des Saugerabstands** (gelbe Linie). Das bedeutet von dem idealen Abstand (halber Saugerabstand) abweichende Zwischenräume zwischen den Krafteinleitungspunkten werden tendenziell in Richtung Mitte der durchzubiegenden Platte besser ausgeglichen als in Richtung Rand. Dies liegt daran, dass die gesamte Durchbiegung auf Veränderungen im Randbereich vergleichbar sensibel reagiert, da sich hier die Lagerung bzw. Einspannung befindet.

Dies verhält sich bei Lagerungsfall 6 (verklebt) ähnlich (siehe Abbildung 69). Die Betrachtung der Biegelinien über die Kollektorlänge ergeben die gleichen Zusammenhänge (gelbe Linie), wenn auch in diesem Fall die Durchbiegung

sogar geringer ausfällt im Vergleich zur idealen Durchbiegung basierend auf einer Flächenlast.

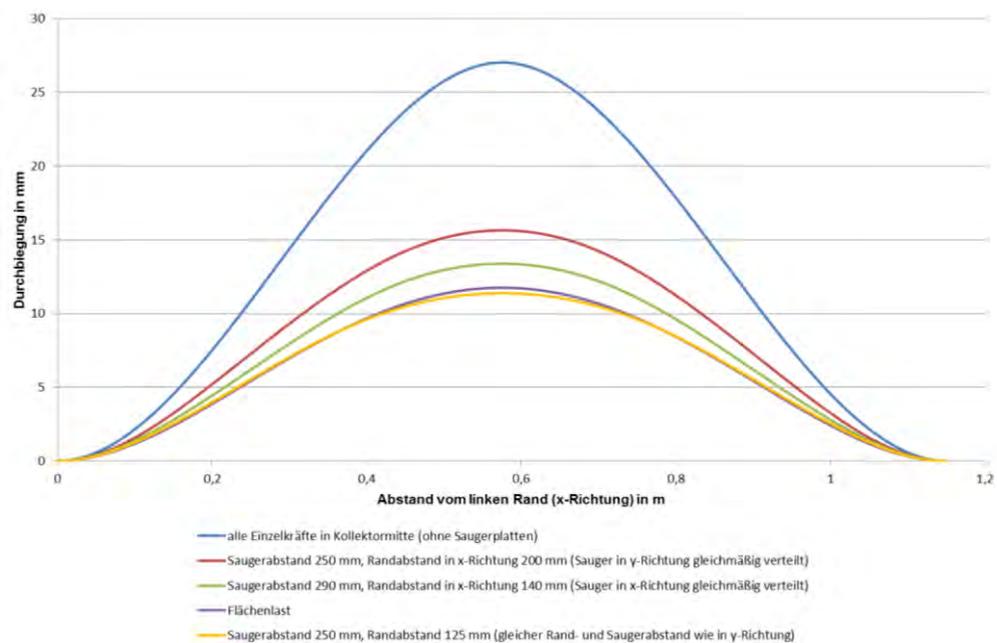


Abbildung 69: Biegelinien über Kollektorbreite Lagerungsfall 6 (verklebt) für Einzellast, Flächenlast und unterschiedliche Vakuumsaugerkonfigurationen [Mergle 2013]

Für die Prüfpraxis bedeutet dies, dass die Einstellung des Randabstands entscheidend die Durchbiegung beeinflussen kann. Aus den Ausführungen geht weiterhin hervor, dass für möglichst realistische Prüfungen mit annähernd homogener Kraftverteilung **der Randabstand auf die Hälfte des Saugerabstands eingestellt werden sollte**, auch wenn sich dadurch in Richtung Abdeckungsmitte abweichende Zwischenräume ergeben.

Dies ist auch bei Prüfständen mit frei einstellbaren Saugern anwendbar. Wird beispielsweise der Randabstand gegenüber dem halben Saugerabstand reduziert, so entstehen sowohl für Lagerungsfall 1 als auch für Lagerungsfall 6 geringere Durchbiegungen, da die Kräfte zu einem hohen Teil direkt an die Rahmenkonstruktion übertragen werden können. **Insgesamt wird klar, dass**

auf die Anordnung für eine wiederhol-genaue und für unterschiedlichen Kollektor geometrien faire Bewertung zu achten ist.

9.3 Untersuchung geeigneter Rechenmethoden

Mit Mitteln der Technischen Mechanik wurde in weiteren Untersuchungen geprüft inwiefern mit dem Streifenkreuzverfahren nach Marcus Ansätze zur einfachen Berechnung der Versagensgrenzen solarthermischer Kollektoren gefunden werden können [Rehfeldt 2012].

Wie die vergleichenden Versuche gezeigt haben, wurde jedoch das Modell durch die Unsicherheit über die Art der Verbindung von Abdeckung mit Rahmenprofil unbrauchbar. Es stellten sich von den Vorhersagen des Modells abweichende Versagensformen ein, die jeweils von Einzelheiten des jeweiligen Kollektors und seiner Befestigung abhängig waren, was eine Verallgemeinerung erschwert. Die Versagensformen waren dabei von der Qualität der Belastung abhängig, unzulässige Verformungen traten stets bei den gleichen Druckniveaus auf. Insbesondere die unter einem Winkel aufgebrachte Belastung erzeugte ein anderes Schadensbild als die rein normal wirkende Belastung [Rehfeldt 2012].

Das entwickelte mechanische Modell ließe sich mit Untersuchungen der Verbindung von Abdeckung und Rahmen weiter verbessern. Dies ist insbesondere deshalb interessant, weil letztlich ein zusätzlicher Faktor ausreichen könnte, um das Tragverhalten der Lagerung der Abdeckung zwischen den beiden Extremen „Feste Einspannung“ (verklebt) und „Drehbares Lager“ (schwimmende Lagerung) einzuordnen. Die für die Ermittlung dieses Faktors notwendigen Versuche waren im Rahmen des Projektvorhabens jedoch nicht durchführbar.

10 Diskussion der Ergebnisse vor dem Hintergrund der erforderlichen bauaufsichtlichen Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)

Durch das Einführen der neuen Bauprodukten Verordnung (VO (EU) 305 / 2011), die ihre europaweite Gültigkeit zum 1. Juli 2013 erlangt hat, steht das Thema der mechanischen Sicherheit besonders im Fokus. Die darauffolgende Einordnung von Solaranlagen als Bauprodukte (Februar 2012) hatte eine rechtliche Sackgasse zur Folge. Während Solarkollektoren bis zu einer Einzelglasfläche von 3 m² und einem Neigungswinkel $\leq 75^\circ$ keines Verwendbarkeitsnachweis bedürfen, ist für alle davon abweichenden Solarkollektoren eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch Einzelprüfung (ungleich hoher zeitlicher und personeller Aufwand) oder eine Prüfung nach einer harmonisierten Norm erforderlich. Auch wenn die Solarkollektoren zum größten Teil Einzelglasflächen von unter 3 m² aufweisen entsteht jedoch beispielsweise für den Sicherheitsnachweis von Fassaden- oder Großflächenkollektoren ein enormer Mehraufwand. Die harmonisierte Norm für Solarkollektoren soll voraussichtlich Mitte 2014 erscheinen (die Arbeiten aus Mechtest konnten dort teilweise aufgegriffen werden). **Unberücksichtigt bleiben** jedoch dabei **die mechanisch tragenden Verbindungen** des Gesamtsystems wie beispielsweise Dachbefestigungen, Montageschienen, Kollektorständer etc.

Dadurch ist die aktuelle Situation blockierend, da rechtlich gesehen keine weiteren Installationen ohne allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. eingehende Tragwerksplanung für Befestigungs- und Montagesysteme als auch für größere Kollektoren (>3 m² Einzelglasfläche; $> 75^\circ$) zulässig sind.

Vor diesem Hintergrund ist die potentielle Anwendung der neuen Prüfverfahren von besonderer Bedeutung. Diese wäre in Zusammenarbeit mit der Industrie und dem DIBt als alternative Prüfmethode zu etablieren, um die gesetzlichen Auflagen zu erfüllen und auf die zeit- und kostenintensiven Einzelprüfungen aller Befestigungs- und Montagekomponenten zu verzichten.

11 Zusammenfassung

In Deutschland trägt Wärme aus Solarthermie (ST) und Strom aus Photovoltaik (PV) einen signifikanten Teil zu den erneuerbaren Energien bei. Ziel ist es diesen Anteil auch weiterhin zu erhöhen bzw. in Europa auf ein ähnlich hohes Niveau zu heben. Dabei ist es entscheidend sichere und wirtschaftliche Technologien einzusetzen. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die mechanische Sicherheit von kleinen als auch von großen ST oder PV Anlagen, da sie die Grundlage für einen dauerhaften zuverlässigen Betrieb darstellt. Gleichzeitig dürfen die Kosten der Tragwerksanbindung nicht weiter steigen.

In den letzten Jahren sind dabei in Europa im Bereich von Normung und Zertifizierung zur mechanischen Sicherheit erhebliche Defizite deutlich geworden. Diese äußern sich darin, dass das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen für Nachweis und Prüfung der mechanischen Sicherheit für Hersteller ungünstig ausfällt und teilweise ähnliche Schäden wiederholt auftreten.

Die Gründe dafür liegen beispielsweise in der Entwicklung von eigenen länderspezifischen Regelungen mangels gegenseitiger Abstimmung oder dem Fehlen von europaweiten einschlägigen Berechnungs- und Prüfvorschriften. Dies führt für die fortschrittlichen und qualitativ hochwertig anbietenden Hersteller zu einer sich negativ auswirkenden Wettbewerbsverzerrung.

Das durch das BMU geförderte Projektvorhaben „MechTest“ verfolgte die Charakterisierung der mechanischen Lastfälle durch Wind- und Schneelasten an ST Kollektoren mit ihren Montagesystemen. Schwerpunkt war dabei eine Bestandsaufnahme und Weiterentwicklung der bestehenden Prüfverfahren entsprechend des Bedarfs. Dazu wurde im Projekt ein neuer mechanischer Prüfstand aufgebaut und Prüfreihe mit unterschiedlichsten Belastungsarten durchgeführt. Eine Analyse von Schadensfällen und Schadensursachen war ebenso Inhalt des Projekts wie die Charakterisierung realer Lasten in Feldversuchen an Extremstandorten.

Im Projektverlauf wurde großer Wert auf den engen Dialog mit der Industrie gelegt. Dabei hat sich gezeigt, dass das Thema in der Industrie zusehends an Bedeutung gewinnt. Dies wurde besonders im Rahmen des „Expert workshop mechanical loads“ am 23.11.2012 mit über 40 Teilnehmern deutlich. Hier wurden unter Anderem erste Ergebnisse des Projektvorhabens und die Herangehensweise der erfahrenen Industrie bzw. Tragwerksplanung präsentiert. Die Vorgehensweise der klassischen Tragwerksplanung besteht dabei zumeist in der Betrachtung von Einzelkomponenten und deren Nachweis bzw. Prüfung. Es wird dabei Kollektor oder Modul von Befestigungselementen, Montageschienen, Dachbefestigungen, etc. getrennt betrachtet.

Im Vergleich hierzu wurde im Projektvorhaben möglichst das verbundene Gesamtsystem aller mechanischen Komponenten betrachtet. Dies ist von der Prüfseite kommend von Vorteil, da sich das teilweise schwer / nicht zu berechnende Zusammenspiel der Einzelkomponenten durch eine Gesamtprüfung sehr gut abbilden lässt. Dabei hat sich eine gute Übereinstimmung der Analyse der Schadensfälle und Schadensursachen mit den Erkenntnissen aus den Versuchen ergeben. Dies zeigte sich darin, dass in den Prüfreiheien oft die Befestigungs- und Montagesysteme die Schwachstelle bildeten, wie auch in der Analyse der Schadensfälle und Ursachen festgestellt. Weiterhin wurden bestimmte Schwachstellen von Befestigungs- und Montagesystemen erst durch die Prüfung des Gesamtsystems unter realistischen Belastungsarten deutlich, wie sie allein durch Anwendung der normativen Prüfungen nicht erfasst werden können.

Um die Prüfungen mit realen Belastungen abzugleichen wurden Feldversuche an Extremstandorten durchgeführt. Hierdurch konnten erste charakteristische Werte für die dynamische Belastung von Kollektorauflagern unter realen Windgeschwindigkeiten von bis zu 75 km/h ermittelt werden. Eine wesentliche Erkenntnis war hierbei, dass die Vorspannung durch die Kollektormontage sowie thermische Verspannungen eine ungleiche Verteilung der einzelnen Auflagerbelastungen bewirken. So konnten bis zu 50 % höhere lokale

Belastungen der Auflager gemessen werden im Gegensatz zu einer theoretisch gleichmäßigen Lastaufteilung.

Die Feldversuche auf der Zugspitze waren dabei nur bedingt hilfreich. Die gemessenen Belastungen unterschritten weit die nach Norm anzunehmenden Werte, obwohl sie laut Schneestatistik in der Region erreicht wurden. Dies lag daran, dass Aufstellungsort und ursprüngliche Maßnahmen zur Schneeanhäufung am Standort nicht optimal umgesetzt werden konnten. Die Messungen auf der Zugspitze waren dennoch hilfreich, da sich die Erkenntnisse der Feldmessungen auf Gran Canaria wie die weitgehend ungleichmäßige Verteilung der Belastungen der einzelnen Auflager auch auf der Zugspitze bestätigen ließen.

Damit haben die Feldmessungen unter Anderem zeigen können, dass das Zusammenspiel einzelner Komponenten eines gesamten mechanischen Aufbaus im realen Einsatz erheblich von der Theorie abweichen kann. Die Ergebnisse der Feldversuche bekräftigen den gewählten Prüfansatz, Befestigungs- und Montagesysteme möglichst im Originalaufbau zu berücksichtigen. So war es möglich während den durchgeführten Prüfreihen klar die Belastungsgrenzen auf Schwachstellen einzelner Komponenten des Gesamtaufbaus zurückzuführen.

Die Erfahrungen aus allen durchgeführten Prüfreihen flossen in die Entwicklung verbesserter Prüfverfahren ein. In Abbildung 70 ist ein erster Vorschlag ausgearbeitet wie die Prüfverfahren in Verbindung mit den im Eurocode 1 beschriebenen Wind- und Schneelasten [Norm DIN EN 1991-1-3:2010 ; Norm DIN EN 1991-1-4:2005] zur Qualifizierung von Solarthermischen Anlagen mit ihren Befestigungs- und Montagesystemen angewendet werden sollten.

Über die Thematik ist inzwischen durch Austausch von angewandter Forschung, Industriebranche, Verbänden und Bauaufsicht sowie Normungsgremien ein guter Dialog entstanden.

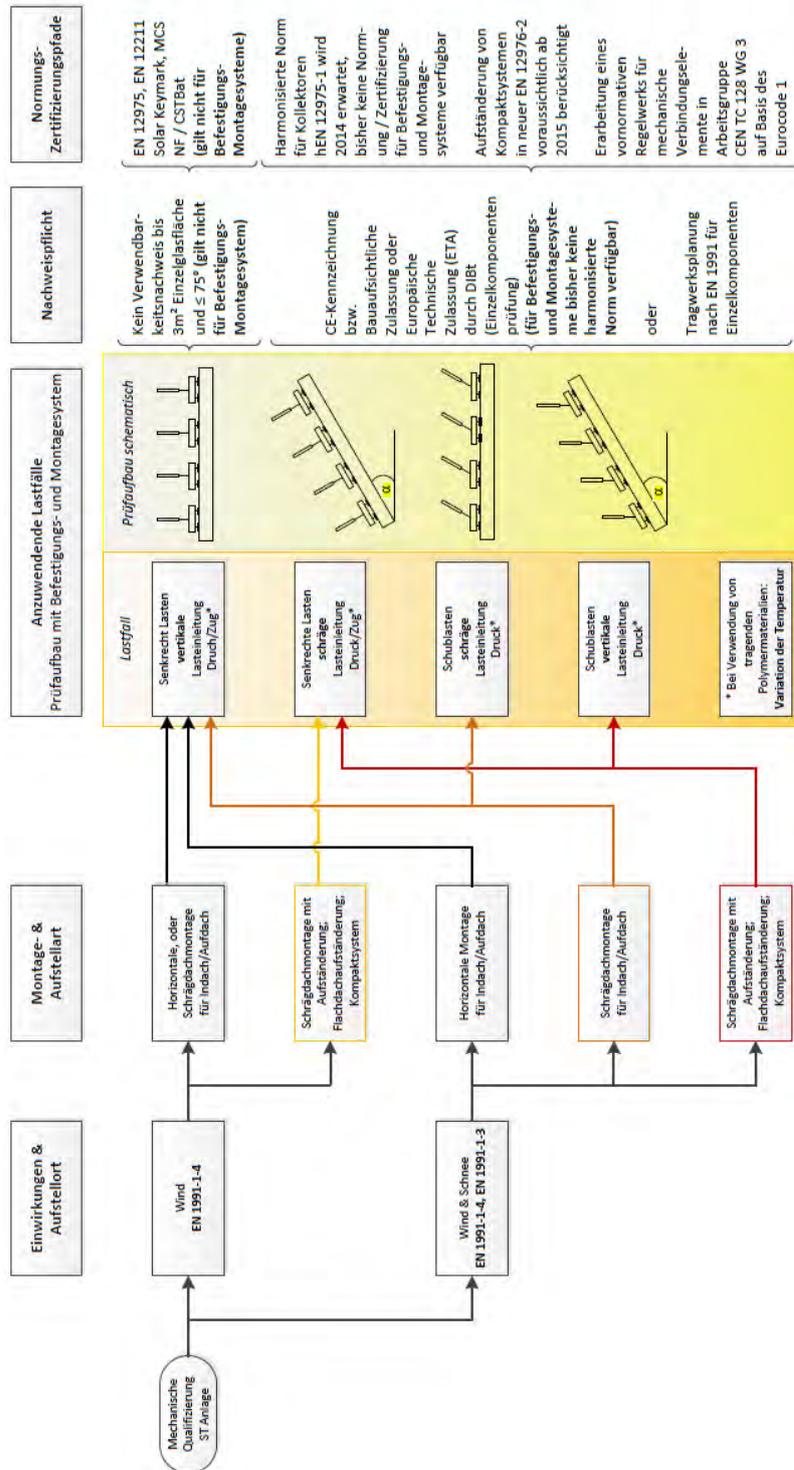


Abbildung 70: Vorgeschlagenes Prüfverfahren und deren Anwendung zur mechanischen Qualifizierung von ST Anlagen

Klar ist dabei, dass die einschlägigen Prüfnormen [Norm DIN EN 12975-2:2006 ; Norm IEC 61215:2005 ; Norm IEC 61646:2008] nur den horizontalen Einbaufall bzw. eine Schrägdachmontage – allerdings ohne Befestigungs- und Montagesysteme – berücksichtigen. Alle anderen Lastfälle sind als Gesamtsystem nicht durch standardisierte Prüfverfahren abgedeckt.

Die im Projektrahmen neu erarbeiteten **Prüfmöglichkeiten** können hier ansetzen und **mit weitaus geringerem Aufwand** im Vergleich zur klassischen Methode der Tragwerksplanung mit Einzelversuchen schnell zu einer Qualifizierung des Gesamtsystems beitragen. Dabei lassen sich für jedes Prüfverfahren je nach Einwirkungen und Aufstellort individuelle Belastungsstufen und Kraftverläufe für den Prüfablauf festlegen.

Der Einsatz von polymer-Materialien spielt hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften wie erwartet eine Sonderrolle. Prüfreihen bei tiefen Temperaturen von -30 °C ergaben beispielsweise eine Verringerung der Versagensgrenzen der verwendeten Dachbefestigungen von rund 20 % gegenüber den Prüfungen unter Raumtemperatur. Im Gegensatz dazu wurde jedoch auch eine maßgebliche Erhöhung der Versagensgrenze der schwimmenden Lagerung zwischen Kollektorrahmen und Kollektorabdeckung aus EPDM (ethylene propylenedienemonomer) bei tiefen Temperaturen gegenüber Raumtemperatur beobachtet. Das bedeutet besonders **für polymerbasierte mechanische tragende Materialien sind Prüfungen bei unterschiedlichen Temperaturen erforderlich**, da die mechanischen Eigenschaften eine hohe Temperaturabhängigkeit aufweisen.

Im Rahmen der Entwicklung verbesserter Prüfverfahren wurde ebenfalls exemplarisch untersucht inwiefern mit einfachen mechanischen Modellen eine Voraussage der mechanischen Belastungsgrenzen der Verbindung zwischen Kollektor und Kollektorabdeckung ermittelt werden kann. Es stellten sich jedoch in den Validierungsversuchen von den Vorhersagen des Modells abweichende Versagensformen ein, die jeweils von Einzelheiten des jeweiligen Kollektors und seiner Befestigung abhängig waren.

Insgesamt konnten jedoch alle wesentlichen Fragestellungen im Projektvorhaben geklärt werden. Die Ergebnisse zeigen in eine zukunftsweisende Richtung und tragen wesentlich zur Vereinfachung und Beschleunigung der mechanischen Qualifizierung von ST Anlagen bei.

Das Vorhaben konnte ebenfalls aufzeigen, dass das Thema mechanischer Lasten weiterhin Potential bietet, Kosten zu senken und gleichzeitig die Zuverlässigkeit von ST Anlagen zu erhöhen.

12 Verwertung der Ergebnisse und Ausblick

Vor dem Hintergrund der aktuellen bauaufsichtlichen Auflagen durch das DIBt können die entwickelten Prüfmethode sowohl übergangsweise als auch langfristig als wichtiger Baustein zu einer branchenweiten Lösung beitragen.

Dabei besteht der **wesentliche Vorteil** im Vergleich zur klassischen Methode der Tragwerksplanung in einem **Zeitgewinn**, da das **Gesamtsystem mit Befestigungs- und Montagekomponenten** geprüft wird und damit die Belastungsgrenzen im **realistischen Zusammenspiel** aller Einzelkomponenten ermittelt werden können. Dabei muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass die Prüfung nur für das geprüfte Gesamtsystem gilt und nicht direkt auf andere Konstruktionen übertragen werden kann, was wiederum mit der klassischen Methode je nach Umfang der Einzelprüfungen bzw. den zugehörigen Berechnungen gegeben ist.

Bereits nach dem „Expert workshop mechanical loads“ vom 23.11.2012 konnten einige Industrieanfragen mit der Fragestellung einer Prüfung des Gesamtsystems verzeichnet werden. So wurden bisher mehrere Aufträge abgearbeitet bei denen besonders die Untersuchung der Befestigungs- und Montagekomponenten im originalen Gesamtaufbau im Fokus stand.

Für die Anwendung der Prüfmethode muss jedoch nicht zwangsläufig der neu entwickelte Prüfstand eingesetzt werden. Mit dem im Projektvorhaben erarbeiteten Verständnis über die Lastfälle können mit vergleichbar geringem Aufwand eigene Prüfstände entwickelt werden um die jeweils erforderlichen Lastfälle abzubilden. Für die Prüfung von polymerbasierten Materialien ergibt sich jedoch ein hoher Aufwand zur Entwicklung eigener Prüfstände, da der Betrieb eines mechanischen Teststands bei unterschiedlichen Temperaturen neben der Einbettung in einer Klimakammer erfahrungsgemäß viele Detailprobleme mit sich bringt.

Leider konnten im Rahmen des Projekts bisher keine Prüfungen an polymerbasierten Montagesystemen / Kollektoren mit erhöhten Temperaturen

durchgeführt werden. Dies lag vor allem an fehlenden Prüflingen bzw. Projektpartnern mit derartigen Fragestellungen. Betrachtet man jedoch den aktuellen Markt beispielsweise von Aufständersystemen für eine Flachdachmontage so werden derartige Fragestellungen in Zukunft zunehmen. Dies liegt daran, dass polymerbasierte Materialien das Potential einer hohen Wirtschaftlichkeit aufweisen und gezielt auch für Montageanwendungen bzw. Verbindungstechnologien optimiert werden können. Klebeverbindungen zwischen Kollektorrahmen und Abdeckung spielen dabei ebenso eine Rolle wie beispielsweise Rahmenprofile aus Kunststoff.

Der neu entwickelte Prüfstand ist damit hervorragend geeignet um der Industrie eine wichtige Entwicklungs- und Qualifizierungsstütze zu bieten. Gleichzeitig tragen die neuen Erkenntnisse über die Anwendung der Prüfverfahren dazu bei, dass ebenfalls andere Prüfstellen ihre Methodik überprüfen können wie beispielsweise die Untersuchungen zum Einfluss der Saugerverteilung gezeigt hat.

Einige Ergebnisse haben auch neue Fragestellungen für zukünftige Untersuchungen ergeben. Beispielsweise konnte mangels Prüflingen nicht eingehend geklärt werden, inwieweit die statistische Aussagekraft einzelner Prüfungen für eine Qualifizierung ausreichend ist. Unterschiedlich ausfallende Ergebnisse sind zum einen von Qualitätsunterschieden der Prüflinge abhängig, können jedoch auch teilweise mit dem Prüfverfahren zusammenhängen (Beispiel: Auswirkung einer ungenau positionierten Saugerverteilung auf das Ergebnis).

Hieran schließt sich auch die Frage an inwiefern unterschiedliche Prüfstellen mit gleicher Fragestellung zum gleichen Ergebnis kommen. Derartige „Round Robin“ Prüfungen sollten ebenfalls Ziel weiterer Untersuchungen sein. Dies gilt vor allem für die normativen Standardprüfungen, auch wenn hier bisher Befestigungs- und Montagesysteme unberücksichtigt bleiben.

Über die Ergebnisse wurde in einer Reihe von Veröffentlichungen und Presserückmeldungen berichtet (vgl. Abschnitt 13.1 und 0.) Hervorzuheben ist dabei ein Beitrag kurz nach Projektende auf dem 23. OTTI-Symposium „Thermische Solarenergie“ in Bad Staffelstein. In Kürze wurden hier die Ergebnisse des Projektvorhabens „MechTest“ im Anschluss an den Vortrag „Bauaufsichtliche Anforderungen an Komponenten von Solaranlagen“ der Verbände BSW und BDH vorgestellt.

13 Literatur und Referenzen

13.1 Veröffentlichungen

DSTTP Innovationstagung 2010: Entwicklung einer Methodik zur Prüfung von Wind- und Schneelasten an solarthermischen Kollektoren und ihren Bauteilen

Eurosun 2010: MechTest – Developing a methodology for testing the mechanical snow and wind load on solar thermal collectors, Paper

ISES 2011: Testing methods for innovative collectors and systems, Paper

Eurosun 2012: Mechanical load tests for solar thermal collectors, Vortrag

Fraunhofer ISE 2013: Fraunhofer ISE eröffnet neuen Prüfstand für thermische Solarkollektoren, Umfangreiche Belastungsprüfungen bei unterschiedlichen Klimata, Pressemeldung 23.11.2013

Fraunhofer ISE 2013: Untersuchungen von Wind- und Schneelasten an ST Kollektoren, Beitrag zum Jahresbericht 2013

OTTI 2013: Belastungsprüfungen für solarthermische Kollektoren – Probleme der Testverfahren und ergänzende Prüfungen, Posterbeitrag

SWW 2013: Windlasten: „Wir brauchen bindende Normen“, 4-seitiger Beitrag im Branchen-Magazin für alle erneuerbare Energien Sonne Wind & Wärme

13.2 Presserückmeldungen

Rückmeldungen zur Eröffnung des neuen Prüfstands, Pressemeldung
Fraunhofer ISE vom 23.11.2012:

11.2012 <http://eqmaglive.com>: Artikel

23.11.2012 <http://www.solarportal24.de>: Artikel

23.11.2012 <http://www.globalsolartechnology.com>: Artikel

23.11.2012 <http://greenjobs.com>: News

24.11.2012 <http://www.windkraft-journal.de>: News

25.11.2012 <http://www.sonnenseite.com>: Artikel

25.11.2012 <http://www.tga-fachplaner.de>: News

26.11.2012 <http://www.solarserver.de>: News

26.11.2012 <http://www.energetica-india.net>: News

26.11.2012 <http://www.energy20.net/week>: Artikel

11.03.2013 Hörbeitrag Deutschlandfunk im Programmpunkt Forschung Aktuell:
„Extremtest für thermische Solaranlagen“

13.3 Literaturangaben

Assmann, B. and P. Selke (2006). Technische Mechanik Band 2: Festigkeitslehre, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2006.

Aßmus, M. and M. Koehl (2012). "Experimental investigation of the mechanical behavior of photovoltaic modules at defined inflow conditions." Journal of Photonics for Energy.

BDH and BSW (2012). Arbeitsblatt zur Ermittlung von Schneelasten an Solarthermischen Anlagen. Informationsblatt Nr. 49.

CEN-TC 128-WG3-N0047 Draft CEN TR Renewable Energy on the roof - Proposed CEN Technical Report on solar energy systems for roofs - requirements for structural connections to solar panels.

Clobes, M. (2008). Identifikation und Simulation instationärer Übertragung der Windturbulenz im Zeitbereich. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina

Göring, M. (2012). Entwicklung einer Adaptionsvorrichtung für einen mechanischen Belastungsteststand zur Prüfung von Vakuumröhrenkollektoren auf Wind- und Schneebelastungen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie. Bachelor of mechanical engineering.

Hake, E. and K. Meskouris (2007). Statik der Flächentragwerke, Springer Berlin Heidelberg, 2007.

Mauthner, F. and W. Weiss (2013). Solar heat worldwide - Markets and contribution to the energy supply 2011. IEA Solar Heating & Cooling Programme. Gleisdorf, Austria, AEE - Institute for Sustainable Technologies.

Mergele, B. (2013). Mechanische Belastungstests an solarthermischen Kollektoren (vertraulich). Offenburg, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien. Master of mechanical engineering.

Norm ASTM E 1830 – 09 Standard Test Methods for Determining Mechanical Integrity of Photovoltaic Modules.

Norm DIN 1055-4:2005 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten.

Norm DIN 1055-5:2005 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee und Eislasten.

Norm DIN EN 1990:2010 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.

Norm DIN EN 1991-1-3/NA:2010 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.

Norm DIN EN 1991-1-3:2010 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten.

Norm DIN EN 1991-1-4/NA:2010 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.

Norm DIN EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.

Norm DIN EN 12179:2000 Vorhangfassaden - Widerstand gegen Windlast - Prüfverfahren.

Norm DIN EN 12210:2003 Fenster und Türen - Widerstandsfähigkeit bei Windlast.

Norm DIN EN 12211:2000 Fenster und Türen - Windwiderstandsfähigkeit - Prüfverfahren.

Norm DIN EN 12975-2:2006 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile; Kollektoren Teil 2: Prüfverfahren, Ausgabe 2006.

Norm DIN EN 12976-1:2006 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2006-04.

Norm DIN EN 12976-2:2006 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen – Teil 2: Prüfverfahren, Ausgabe 2006-04.

Norm EN 12975-1:2006 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2006.

Norm IEC 61215:2005 Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.

Norm IEC 61646:2008 Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval.

Rehfeldt, M. (2012). Mechanische Belastungstests an solarthermischen Kollektoren. Berlin, Beuth Hochschule für Technik. Bachelor of mechanical engineering renewable energies.

Ruscheweyh, H. (1982). Dynamische Windwirkung an Bauwerken. Wiesbaden, Bauverlag.

Sonne Wind & Wärme (2010). Technik & Trends. Sonne Wind & Wärme: 140-145.

Weiss, W., I. Bergmann, et al. (2009). Solar heat worldwide - Markets and contribution to the energy supply 2007. IEA Solar Heating & Cooling Programme. Gleisdorf, Austria, AEE - Institute for Sustainable Technologies: 48.