

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Institut für  
Solarenergieforschung GmbH  
Hameln/Emmerthal

# Transport und Handling von Wafer- basierten Silizium Photovoltaik-Modulen

## Technische Studie

Marc Köntges, Michael Siebert

30. April 2015

**Kontakt:**

Dr. Marc Köntges  
Am Ohrberg 1 • D-31860 Emmerthal  
Telefon +49(0)5151-999-432  
Telefax +49(0)5151-999-400

[m.koentges@isfh.de](mailto:m.koentges@isfh.de)



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

ISBN 978-3-9816770-1-0

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel der Studie</b> .....	<b>4</b>
1.1	Aufbau der Studie.....	4
1.2	Definitionen.....	5
<b>2</b>	<b>Während des Transports gefundene Belastungsformen für PV-Module</b> .....	<b>6</b>
2.1	Beschreibung der Transportbegleitungen.....	6
2.2	Während der Transportbegleitungen aufgetretene Zellrisse .....	7
2.3	Vergleich der Stoßhäufigkeitsverteilung bei Horizontal- und Vertikal-Transport.....	8
2.4	Auswirkung von Stößen auf Zellrissebildung .....	11
2.5	Vergleich der Modulmittenauslenkung bei Horizontal- und Vertikal-Transport .....	15
2.6	Modulvibrationen, gemessen für Horizontal- und Vertikal-Transporte .....	16
2.7	Auswirkung von Modulvibrationen auf Zellrissebildung.....	18
2.8	Wodurch wird die Zellbruchrate beeinflusst?.....	20
<b>3</b>	<b>Prüfung Modultransport</b> .....	<b>22</b>
3.1	Prüfung des Modultransports für Einzelmodule .....	22
3.2	Prüfung des Modultransports für Transportverpackungen .....	26
<b>4</b>	<b>Empfehlungen für die Verpackung</b> .....	<b>27</b>
4.1	Spezifische Vor- und Nachteile von Horizontal- und Vertikaltransport .....	27
4.2	Anforderungen an die Palette .....	28
4.3	Anforderungen an die Abspannbänder.....	28
4.4	Besondere Fehler bei Verpackungen .....	29
<b>5</b>	<b>Beobachtete Modulbelastungen begleiteter Modulmontagen</b> .....	<b>30</b>
5.1	Stoßbelastung während der Installation .....	30
5.2	Besondere Belastungsformen während der Installation und Montage von PV-Modulen....	32
<b>6</b>	<b>Prüfung von Modulhandhabung</b> .....	<b>34</b>
6.1	Vorgehensweise Prüfung Handhabungsfehler .....	36
6.1.1	Modultrittbelastungen .....	36
6.1.2	Kugelfalltests über Zellen .....	38
6.1.3	Fallenlassen des Moduls über die kurze Kante .....	40
6.2	Ergebnisse der Modul Handhabungsprüfung.....	42
<b>7</b>	<b>Empfehlungen für Modulhandhabung</b> .....	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Einfluss des Modulrahmens auf Zellbruch</b> .....	<b>51</b>
8.1	Rahmenarten.....	51
8.2	Sinus-Resonanzanregung .....	52

8.3	Rauschanregung .....	53
8.4	Schockanregung .....	54
8.5	Zusammenfassung des Einflusses des Modulrahmens auf Zellbruch .....	55
<b>9</b>	<b>Zellbruchbilder in PV-Modulen und deren Ursachen .....</b>	<b>56</b>
9.1	Schlagbelastung.....	56
9.2	Abstapeln von PV-Modulen.....	57
9.3	Zellbrüche durch Transport.....	59
9.4	Umkippen und Ablegen von PV-Modulen.....	60
9.5	Betreten von PV-Modulen.....	61
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>64</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>65</b>

# 1 Ziel der Studie

Diese Studie soll die typischen Bedingungen unter denen Photovoltaik(PV)-Module transportiert und gehandhabt werden zusammenstellen und Empfehlungen für den Umgang während des Transports und der Handhabung geben. Es wurden Prüfmethode entwickelt, die möglichst reale Transport- und Handhabungssituationen nachstellen sollen. Dies soll den Herstellern von PV-Modulen erlauben, die Auswirkungen des Transports und der Installation beurteilen zu können und eigene Transport- und Handhabungsvorschriften zu entwickeln. Diese Studie soll Planern und Installateuren erlauben, die Folgen der Handhabung von PV-Modulen auf einer Baustelle besser einschätzen zu können und es ermöglichen Maßnahmen zu ergreifen, um Zellrisse durch die Handhabung von PV-Modulen zu vermeiden.

## 1.1 Aufbau der Studie

Im zweiten Kapitel wird beschrieben, wie reale Transporte mit Beschleunigungssensoren überwacht und mittels Elektrolumineszenzmessungen die Zellrisse gezählt werden, die während eines Transportes entstehen. Anschließend wird die Stoßhäufigkeitsverteilung von horizontal transportierten und vertikal transportierten PV Modulen miteinander verglichen. Um einen Zusammenhang zwischen Stoßart, Modulmittenauslenkung und daraus resultierendem Zellbruch im Modul herzustellen, werden typische Stöße auf PV-Module mit einem Shaker nachgestellt. Die vorher erstellte Stoßhäufigkeitsverteilung wird mit dem Zusammenhang zwischen Stoßart und Zellbruch neu bewertet. Neben Stößen können auch unregelmäßige, zufällige Vibrationen die Module während eines Transportes in Schwingung versetzen. Diese Form der Belastung wird für Strecken mit normalen und besonderen Belastungen untersucht. Aus den bei den Transporten gemessenen Beschleunigungsdaten werden Energiedichtespektren generiert und als Prüfpektrum für Transportprüfungen an Einzelmodulen auf einem Shaker verwendet. Im dritten Kapitel wird eine Empfehlung gegeben, wie mittels eines Shakeraufbaus PV-Module geprüft werden können. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die PV-Module keinen Zellbruch oder andere Schäden durch typische Belastungen erleiden, die bei einem Transport auftreten.

Das vierte Kapitel beschreibt knapp, wie die Modul-Verpackung gestaltet sein sollte, um Schäden an PV-Modulen zu vermeiden.

Anhand von Beobachtungen von PV-Modul-Installationen werden besondere Belastungsklassen für PV-Module in Kapitel fünf zusammengestellt. Anhand dieser Belastungen werden in Kapitel sechs Prüfungen zur Nachstellung der beobachteten Belastungen vorgestellt. Zwei PV-Modultypen werden mit den Prüfungen untersucht und die Ergebnisse dazu vorgestellt. Aus den Prüfungsergebnissen werden in Kapitel sieben Empfehlungen gegeben, wie PV-Module behandelt werden sollen, um Zellrisse zu vermeiden.

In Kapitel acht wird anhand von experimentellen Ergebnissen diskutiert, welchen Einfluss der Modulrahmen auf die Zellbruchempfindlichkeit hat.

Im neunten Kapitel werden Beispiele von Zellrissen in PV-Modulen gezeigt und ihren Handhabungsursachen zugeordnet.

## 1.2 Definitionen

In diesem Kapitel werden die in dieser Studie benutzten Begriffe definiert.

Mit einem **Vertikaltransport** wird ein Transport von PV-Modulen bezeichnet, bei dem die PV-Module auf der kurzen oder langen Rahmenkante im Transportfahrzeug gelagert sind.

Mit einem **Horizontaltransport** wird ein Transport von PV-Modulen bezeichnet, bei dem die PV-Module mit der Sonnenseite nach unten (Sunny-side down) im Transportfahrzeug gelagert sind.

Eine übliche Methode zur Klassifizierung von Stößen ist die Bildung des **Effektivwerts eines Schocks**. Zur Bildung des Effektivwerts eines Schocks wird die Beschleunigungszeitreihe  $a(j)$  für jeden Messpunkt  $j$  benötigt. Der Mittelwert aller quadrierten Beschleunigungswerte wird jeweils von Nulldurchgang zu Nulldurchgang von  $a(j)$  gebildet und daraus die Quadratwurzel gezogen. Stoßereignisse bestehen häufig aus einer größeren Anzahl von Schwingungen. Von allen  $n$  Schwingungen wird jeweils von Nulldurchgang bis Nulldurchgang die root-mean-square Beschleunigung bestimmt. Die größte root-mean-square Beschleunigung jedes Stoßereignisses spiegelt dessen maximalen Effektivwert  $g_{rms}$  wieder:

$$g_{rms} = \max_{1 \leq i \leq n} \left( \sqrt[2]{\frac{\sum_{j=t_{a=0}(i)}^{t_{a=0}(i+1)} a^2(j)}{t_{a=0}(i+1) - t_{a=0}(i) + 1}} \right). \quad (1)$$

Der Iterator  $i$  zählt die Nulldurchgänge des Beschleunigungssignales in dem aufgezeichneten Zeitintervall bis zum letzten ( $n$ ) Nulldurchgang. Die Messpunkte  $t_{a=0}(i)$  sind die zugehörigen Messpunkte an denen das Beschleunigungssignal das Vorzeichen wechselt. Durch diese Vorgehensweise wird automatisch sichergestellt, dass nur der Beschleunigungsspeak mit der höchsten root-mean-square Beschleunigung aus dem aufgetretenen Stoßereignis ermittelt wird. Vor- oder Nachschocks werden dadurch nicht berücksichtigt.

Die **Erdbeschleunigung** wird mit einem kursiv geschriebenen  $g$  symboliert. Im Gegensatz dazu wird für die Einheit Gramm ein nicht kursives  $g$  verwendet. Der Wert der Erdbeschleunigung wird mit 9,81 m/s angenommen.

Ein **Stoß** ist ein Ereignis, welches bei einem Transport zum Auslösen der Aufzeichnung eines Beschleunigungs-Datenloggers führt.

Ein **Schock** ist eine kurzzeitige Beschleunigung, die künstlich erzeugt wurde.

Mit **Sunny-side down** und **Sunny-side up** bezeichnet man die Lagerungsart eines PV-Moduls. Ein **Sunny-side down** gelagertes PV-Modul weist mit der Kotaktdose nach oben. Ein **Sunny-side up** gelagertes PV-Modul weist mit der Kotaktdose nach unten.

## **2 Während des Transports gefundene Belastungsformen für PV-Module**

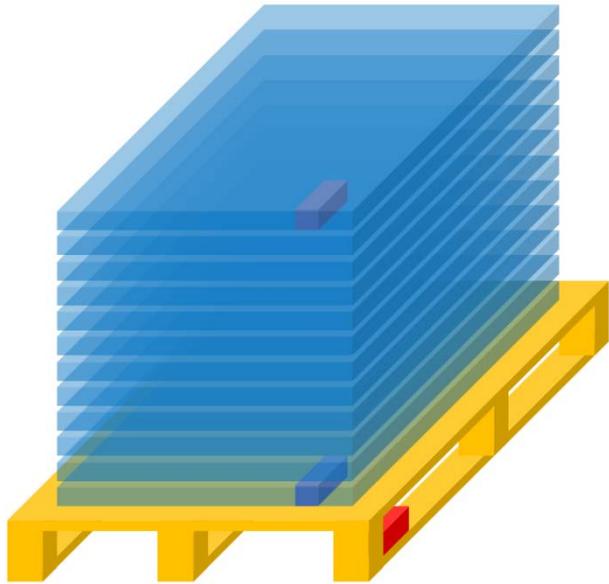
Es wurden PV-Modul Transporte begleitet, um die auf die Module wirkenden Beschleunigungen in realen Situationen zu ermitteln und um die Ursachen von Schäden an PV-Module zu identifizieren.

### **2.1 Beschreibung der Transportbegleitungen**

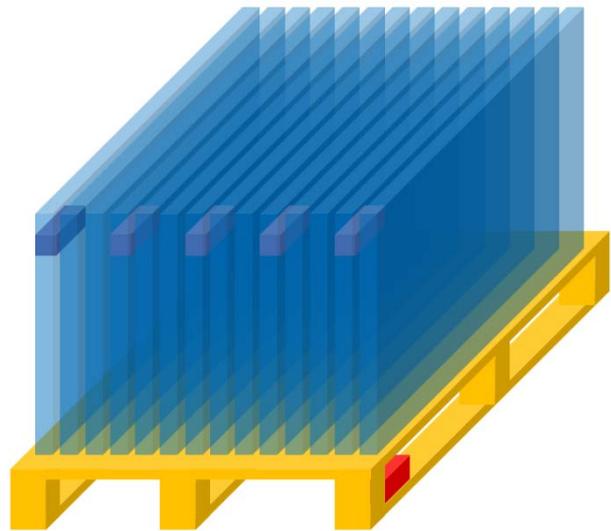
Für die Ermittlung der Modulbelastungen / -schädigungen werden mehrere Modultransporte mit Standardverpackungen verschiedener Modulhersteller durchgeführt. Die Module werden sowohl in horizontaler Lage, als auch in vertikaler Lage transportiert. In horizontaler Lage werden die Module mittels Stapelecken an allen 4 Modulecken auf einer Palette übereinander gestapelt und mit Spannbändern im Bereich der Modulecken auf der Palette fixiert. Zusätzlich sind die Module mit einer Kunststoffolie umwickelt oder eingeschweißt. Die Vertikaltransporte werden mit Kammkartons oder einfachen Kartons mit Pappecken als Kantenschutz für die Module durchgeführt. Die Kartons sind ebenfalls an den Ecken mit Spannbändern versehen. Alle Transporte wurden mit den vom Hersteller empfohlenen Verpackungen durchgeführt und die Transportunternehmen haben die Fracht mit der vorschriftsmäßigen Transportsicherung versehen. Nicht sachgemäße Transporte oder Transportunfälle wurden nicht untersucht.

Während der Transporte werden die auftretenden Beschleunigungen mittels Beschleunigungsloggern aufgezeichnet. Zur Erfassung der Beschleunigungen der Palette dient ein ShockLog298 der Firma Shockwatch. Dieser wird in einer Palettenecke auf das untere Brett der Palette geschraubt. Mit diesem Logger werden Schocks ab 3 g bis zu 30 g mit einer Abtastrate von 4096 Hz, einem Bandpassfilter von 0,1 Hz bis 250 Hz und einer Aufzeichnungsdauer von je 1 Sekunde erfasst. Die Beschleunigungen der Module werden mit bis zu 6 MSR165 Loggern der Firma MSR Electronics GmbH aus der Schweiz erfasst. Vorteil dieser Datenlogger ist das geringe Gewicht von nur 69 Gramm, welches die Modulschwingung nur wenig beeinflusst. Mit diesen Loggern können Schocks und Vibrationen bis zu 16 g mit einer Abtastrate von 1600 Hz und ereignisabhängiger Aufzeichnungsdauer, ohne Frequenzfilter aufgezeichnet werden. Zur Aufzeichnung von Schocks wird, wie auch beim Shocklog298, als unterer Schwellwert für die Aufzeichnung 3 g gewählt. Da der ShockLog298 den Schwellwert im Gegensatz zu den MSR165 Loggern auf bereits gefilterte Schocks anwendet, werden mit diesem Logger weniger Schocks aufgezeichnet. Der Schwellwert gilt für alle 3 Beschleunigungsachsen der Logger.

Die Aufzeichnung von Vibrationen erfolgt ohne einen Schwellwert manuell mit einer Funkfernsteuerung. Die Aufzeichnungsdauer von Vibrationen beträgt 10 Sekunden. Die aufgezeichneten Beschleunigungsdaten werden vor der Weiterverarbeitung mit einem digitalen Bandpassfilter auf das Frequenzband von 0,5 Hz bis 250 Hz gefiltert. Durch diese Filterung wird die Erdbeschleunigung bei den Auswertungen herausgefiltert. Die Logger werden auf der Modulrückseite möglichst nahe der Modulecke mit dünnem doppelseitigem Klebeband fixiert. Im horizontalen Modulstapel wird das unterste, das oberste (bzw. das 2. von oben) und ggf. ein mittleres Modul mit Loggern versehen. Im Falle eines Vertikaltransports werden die Logger an der oberen Modulecke an beiden Seiten des Kartons und auch im Bereich dazwischen angebracht.



**Abb. 1: Loggerpositionen Horizontaltransport**



**Abb. 2: Loggerpositionen Vertikaltransport**

Stöße, deren Stoßrichtungen in der Modulebene liegen, führen nicht zu Zellrissen [1]. Daher werden zur Auswertung nur Beschleunigungen senkrecht zur Moduloberfläche herangezogen.

Neben der Erfassung der Beschleunigungen werden die GPS-Positionen der Palette mit einem GPS Logger erfasst, um die aufgezeichneten Stoßereignisse der LKW-Position und -Geschwindigkeit zuordnen zu können. So kann auch für nicht begleitete Transporte eine Unterscheidung von Stoßereignissen, die während der Fahrt, und Stoßereignissen, die während eines Warenumschlags auftreten, getroffen werden.

Die Transporte erfolgen mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Die begleiteten Transporte, sowie die bekannten Anteile (Abholung und Anlieferung) der nicht begleiteten Übernachttransporte erfolgen mit 7,5-Tonnern.

## 2.2 Während der Transportbegleitungen aufgetretene Zellrisse

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der bei den Modultransporten aufgetretenen Zellrisse. Um die Anzahl der neu gerissenen Zellen bestimmen zu können, werden Elektrolumineszenz-Aufnahmen vor und nach dem Transport in ausreichender Qualität angefertigt. Aus diesen Aufnahmen werden mittels einer Differenzbildanalyse die Zellrisse identifiziert. Dies ist bei manchen Transporten nicht, bzw. nur eingeschränkt möglich. Die Tabelle enthält nur Transporte, für die eine Bestimmung der neuen Zellrisse möglich ist. Teilweise wurden nicht alle Module eines Transports ausgewertet. Alle Transporte wurden innerhalb Deutschlands durchgeführt.

Mit Ausnahme des ersten Transports in Tab. 1 sind während der von uns ausgewerteten Transporte nur wenige Zellrisse zu beobachten. Für die 8 Zellrisse des ersten Transports ist der Bruch der Transportpalette verantwortlich. Durch das Anheben der Palette mit einem Hubwagen mit kurzen Zinken ist der mittlere Verbindungsklotz zwischen unterer und oberer Bretterlage gerissen, und die oberen Bretter drücken so auf die Glasseite des unteren Moduls und verformen es. Zudem kann der Rissvorgang zu einem Schlag auf die Glasseite des unteren Moduls geführt haben. Dieser Fehler wurde auch bei weiteren nicht begleiteten Transporten beobachtet.

Für zwei Transporte wurde eine Strecke mit besonderen Belastungen ausgewählt. Die Strecke führt über eine Schotterstraße mit tiefen Schlaglöchern und Regenablaufgräben, eine Asphaltstraße mit sehr schlechtem Asphalt und Schlaglöchern, eine Straße mit sehr grobem Kopfsteinpflaster und starken Bodenwellen, sowie eine bessere Kopfsteinpflasterstraße. Auch Bahnübergänge sind auf der Strecke enthalten. Mit maximal 2 Zellrissen pro Modul während des Horizontaltransports und keinen Zellrissen während des Vertikaltransports stellen diese Transportstrecken für die transportierten Modultypen keine außergewöhnlich kritische Belastung dar.

Die Anzahl der Vertikaltransporte ist zwar relativ klein, aber man erkennt, dass sich bei den Vertikaltransporten im Vergleich zu den Horizontaltransporten in allen drei untersuchten Fällen keine zusätzlichen Zellrisse nachweisen lassen.

**Tab. 1: Während der Modultransporte aufgetretene Zellrisse mit Angabe von Transportart, Entfernung und Besonderheiten des Transports. Alle Horizontaltransporte werden mit Sunny-side down durchgeführt.**

Transportart	Entfernung [km]	Besonderheiten	Mittlere Anzahl gerissener Zellen pro Modul	Maximale Anzahl gerissener Zellen pro Modul	Ausgewertete Module	Transportierte Module
Horizontal, über Nacht	80	Risse im unteren Modul durch Palettenbruch	8,00	8	1	40
Horizontal, mit Begleitung	330	Strecke mit besonderen Belastungen	0,61	2	18	18
Horizontal, über Nacht	80		0,17	1	6	40
Horizontal, über Nacht	1635	Hintransport 40-Tonner voll, Rücktransport unbekanntes Fzg.	0,09	1	32	32
Horizontal, mit Begleitung	323	Kleintransporter (Iveco 3,5 t), 2 Paletten mit je 5 Modulen	0,40	4	10	10
Vertikal, mit Begleitung	252	40-Tonner, einziges Packstück	0,00	0	4	28
Vertikal, mit Begleitung	307	Strecke mit besonderen Belastungen	0,00	0	5	28
Vertikal, über Nacht	855		0,00*	0*	20	20
<b>Gesamt:</b>					<b>96</b>	<b>216</b>

\* Eingeschränkte Aussagekraft durch andersartige Bewertungsmethode und Module waren vor Transport stark beschädigt.

### 2.3 Vergleich der Stoßhäufigkeitsverteilung bei Horizontal- und Vertikal-Transport

Für den Vergleich der Stoßhäufigkeiten werden Histogramme, unterschieden nach Transportart und Loggerpositionen, erstellt. Zudem werden die Stoßereignisse des Transports von denen des Warenumschlags getrennt bewertet.

Die verwendeten Logger zur Aufnahme der Stoßbeschleunigung an den Modulecken wurden so eingestellt, dass diese ein Stoßereignis in alle drei Raumrichtungen aufzeichnen, sobald ein Sensor einer Raumrichtung die Grenze von  $3\text{ g}$  erreicht. Für die folgende Auswertung werden nur die Stöße berücksichtigt, die die  $3\text{ g}$  in Richtung der Modulnormalen erreichen. Stöße die eine Amplitude von mehr als  $3\text{ g}$  in einer Richtung aufweisen, die in der Glasebene des PV-Moduls liegt, werden nicht berücksichtigt.

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen den Vergleich der Effektiv-Beschleunigungen eines Horizontaltransports mit einem Vertikaltransport. Es handelt sich bei beiden Transporten um Speditionstransporte. Die Ereignisse während der Warenumschläge dieser Transporte sind in der Abb. 3 und Abb. 4 herausgefiltert. Beide Transportstrecken betragen ca.  $855\text{ km}$ , es handelt sich allerdings um zwei unterschiedliche innerdeutsche Strecken. Bis auf die Abholung und die Anlieferung des Vertikaltransports mit jeweils einem  $7,5\text{-Tonner}$  sind die verwendeten Fahrzeuge unbekannt. Beide Transporte weisen jedoch den gleichen Ablauf auf: Abholung und Transport zu einem Umschlagzentrum in der Nähe, Haupttransport zu einem weiteren Umschlagzentrum, Transport mit Auslieferung in der Nähe. Dies spricht auch für die Verwendung von vergleichbaren Fahrzeugtypen. In den Klassen direkt unterhalb der Klassen mit den maximalen Effektiv-Beschleunigungen ist eine wesentliche Anzahl von Schockereignissen des jeweiligen Transports zu finden. Dies zeigt, dass es während der Transporte nicht zu einzelnen außergewöhnlich großen Belastungen gekommen ist.

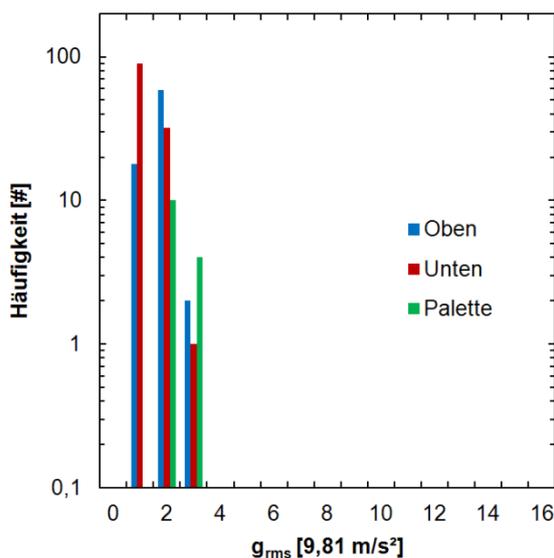


Abb. 3: Stoßhistogramm der Effektiv-Beschleunigung für horizontalen Speditionstransport .

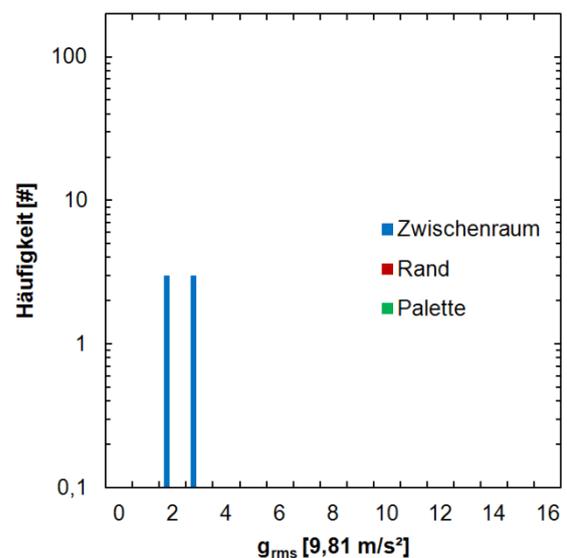


Abb. 4: Stoßhistogramm der Effektiv-Beschleunigung für vertikalen Speditionstransport.

Die maximale Effektiv-Beschleunigung der Modulecken beträgt bei beiden Transporten  $3\text{ g}$ . An der Palette treten beim Horizontaltransport in vertikaler Richtung (senkrecht zur Modulfläche) Effektiv-Beschleunigungen bis zu  $3\text{ g}$  auf, während beim Vertikaltransport keine Stöße in horizontaler Richtung (senkrecht zur Modulfläche) an der Palette zu beobachten sind. In vertikaler Richtung treten bei diesem Transport jedoch an der Palette ebenfalls Effektiv-Beschleunigungen bis zu  $3\text{ g}$  auf. Die meisten Stöße für Packstücke bei einem LKW-Transport werden wie erwartet senkrecht zur Palettenebene aufgezeichnet. Die Anzahl der Palettenstöße senkrecht zur Palettenebene beträgt beim Horizontaltransport  $14$  (vgl. Abb. 3) und beim Vertikaltransport  $16$ . Die ähnliche Anzahl und Intensität dieser Stöße zeigt die gute Vergleichbarkeit der beiden Transporte.

Ein dem horizontalen Speditionstransport vergleichbarer Transport mit einem voll beladenen 40-Tonner mit der Palette über der Hinterachse weist insgesamt nur 3 Stoßereignisse an einem Modul mit einer maximalen Effektiv-Beschleunigung von  $2g$  auf. Die Beschaffenheit der Transportfahrzeuge, sowie deren Beladung und evtl. auch die Position der Modulpalette auf dem Fahrzeug sind demnach wichtige Parameter für die während eines Transports auftretenden Belastungen.

Zur Bestimmung der Anzahl der Warenumschläge werden die GPS-Daten der Transporte herangezogen. Mit diesen Daten ist es möglich den Standort und die aktuelle Geschwindigkeit des LKW zu ermitteln. Allerdings ist es nicht möglich, zu beurteilen, ob bei einem Stopp ein Warenumschlag stattgefunden hat, und ob die Modulpalette umgepackt wurde. Aus diesem Grund werden nur die Stopps als Warenumschläge gezählt, während denen Stöße mit einer Beschleunigungsamplitude von mind.  $3g$  senkrecht zur Modulebene aufgetreten sind. Während beider Transporte haben je 3 Warenumschläge, die dieser Bedingung entsprechen, stattgefunden.

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen den Vergleich der Effektiv-Beschleunigungen der Warenumschläge des Horizontaltransports und des Vertikaltransports. Es fällt auf, dass während des Warenumschlags an der Palette deutlich größere Effektiv-Beschleunigungen als an den Modulecken auftreten. Diese Art der Beschleunigungen wird offenbar besser von der Verpackung absorbiert als die Beschleunigungen während eines Transports. Die Lücken in den Klassen zwischen den Maximal-Effektiv-Beschleunigungen und der Hauptmenge der Palettenbeschleunigungen zeigen, dass es sich bei den Maximal-Effektiv-Beschleunigungen um außergewöhnliche Einzelereignisse handelt.

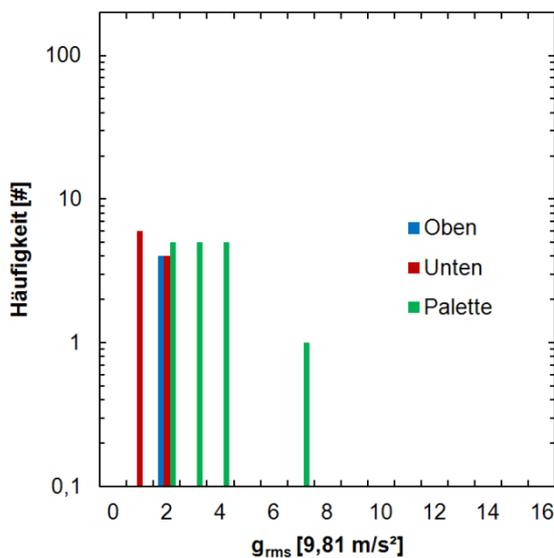


Abb. 5: Stoßhistogramm der Effektiv-Beschleunigungen für horizontalen Warenumschlag.

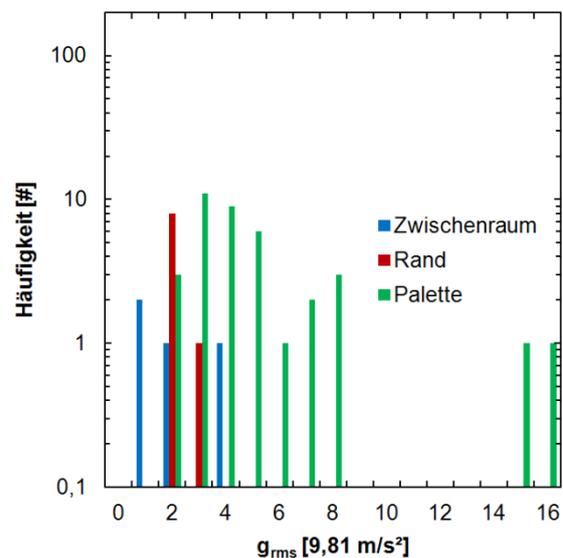


Abb. 6: Stoßhistogramm der Effektiv-Beschleunigung für vertikalen Warenumschlag.

An den Modulecken treten beim Warenumschlag des Horizontaltransports maximal Effektiv-Beschleunigungen von  $2g$  auf und beim Warenumschlag des Vertikaltransports  $4g$ . Die stärkeren Belastungen während des Warenumschlags beim Vertikaltransport sind dem rauen Umgang der Spedition mit der Palette zuzuschreiben. In vertikaler Richtung sind an der Palette bei diesem Warenumschlag sogar Stöße bis zu einer Effektiv-Beschleunigung von  $27g$  zu beobachten. Eine Vergleichbarkeit der Belastungen der Warenumschläge ist somit nicht gegeben, es wird aber

deutlich, dass die Vorteile eines Vertikaltransports durch einen rauen Warenumsschlag leicht zunichte gemacht werden können.

## 2.4 Auswirkung von Stößen auf Zellrissbildung

Während eines Transportes mit zugehörigem Warenumsschlag treten verschiedene Arten von Stößen auf. Zum einen unterscheiden sie sich in ihrer Intensität, zum anderen in ihrer Dauer. In Abb. 7 sind die Zeitabhängigkeiten gemessener Beschleunigungen in der Modulecke ausgewählter Stöße aufgetragen.

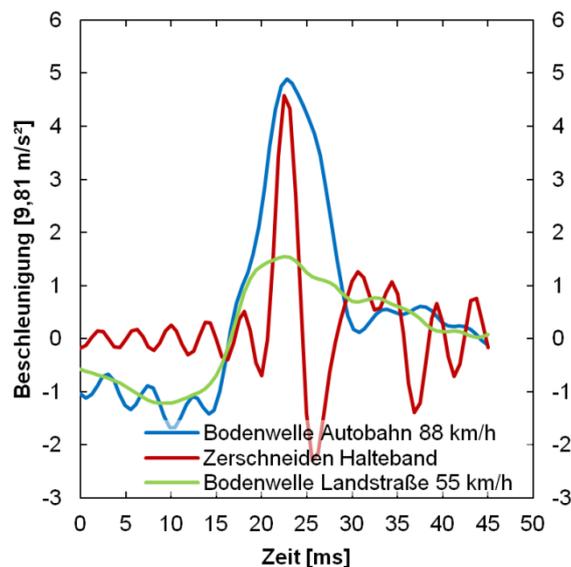


Abb. 7: Ausgewählte Stoßformen gemessen an einer Modulecke während eines Modultransports.

Da während eines Transports die Zuordnung der Bildung von Zellrissen zu bestimmten Stoßereignissen nicht möglich ist, werden verschiedene Arten von Stößen mit einem Shaker SW8142-TGE10-4 der Firma RMS Regelungs- und Messtechnik Dipl.-Ing. Schäfer GmbH & Co KG simuliert und die Bildung von Zellrissen mittels einer Differenzbildanalyse von Elektrolumineszenzaufnahmen untersucht. Alle Stöße, die mit dem Shaker nachgebildet werden, werden zur sprachlichen Abgrenzung von Stößen aus realen Beobachtungen als Schocks bezeichnet.

Die Module werden Sunny-side down auf dem Shaker montiert. Auf der Shakerplattform werden hierfür zwei Trägerprofile montiert, die von 5 Hz bis 135 Hz resonanzfrei sind. An ihren Enden werden die 4 Modulecken fest eingeklemmt bzw. verschraubt. Die anderen Modulrahmenbereiche können frei schwingen. Die Befestigung der Module wird so einem Horizontaltransport nachempfunden, bei dem die Module mit Distanzstücken an den Modulecken (Stapelecken) übereinander gestapelt werden und mittels Abspannbändern über den Modulecken fixiert werden. Diese Art der Montage wird für alle Prüfungen auf dem Shaker gewählt.

Während der Schocks wird die maximale Auslenkung der Modulmitte (Peak to Peak) mit einem Laserdistanzaufnehmer (OWLE 5012 AA S1 von Welotec) mit einer Abtastrate von 1,1 kHz und einer erweiterten Messunsicherheit von  $\pm 0,2 \text{ mm}$  bestimmt. Der Laserdistanzaufnehmer wird dazu auf der Shakerplattform unterhalb der Modulmitte montiert. Abb. 8 zeigt ein auf den Trägerprofilen

montiertes Modul mit dem unter der Modulmitte befindlichen, auf der Shakerplattform montierten Laserdistanzsensor.



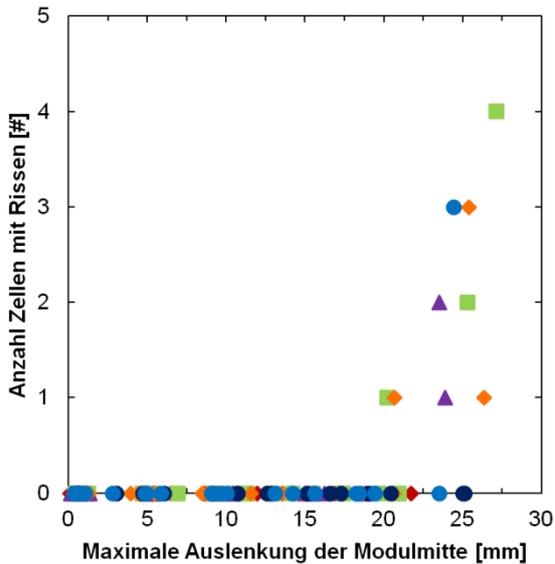
**Abb. 8: Auf Shaker montiertes Modul mit Laserdistanzaufnehmer unter der Modulmitte.**

Als Schockform wird die Halbsinusform gewählt, da sie den realen Stößen am ähnlichsten und für theoretische Überlegungen am zugänglichsten ist. Zur Shaker-Regelung dient ein Beschleunigungssensor auf einer Befestigungsecke des Moduls. Jeder Schock wird 5 Mal wiederholt. Zwischen den Schocks wird eine Pause von 5 s zum Ausschwingen des Moduls eingehalten. Das Toleranzband wird nach DIN-IC-68 festgelegt.

Für die Bewegung der Shakerplattform aus der Ruhelage vor dem Schock und in die Ruhelage nach dem Schock, sowie für den Auf- und Abbau der notwendigen Geschwindigkeit der Shakerplattform werden der so genannte Vor- und Nachschock benötigt.

In einer Testreihe wird die Rissbildung aufgrund unterschiedlicher Schockanregungen mit Schockamplituden von 5, 10, 15, 20 und 30 m/s<sup>2</sup> und 4 unterschiedlichen Schockdauern untersucht. Es werden zwei Schockdauern mit geringer Modulmittenauslenkung und zwei Schockdauern mit großer Modulmittenauslenkung gewählt. Diese Testreihe erfolgt mit einer Vor- und Nachschockamplitude von 25 % der Schockamplitude. Diese Vor- und Nachschocks interferieren mit dem Hauptschock und führen zu Überhöhungen bzw. Reduktionen der Modulmittenauslenkung bei bestimmten Schockdauern. Auch wenn der Zusammenhang zwischen Schockdauer und Auslenkungsamplitude nicht korrekt ist, gehen wir davon aus, dass der Zusammenhang zwischen Auslenkungsamplitude und Zellbruch korrekt ist. Nach jeder Schockprüfung wird eine Elektrolumineszenzaufnahme angefertigt und die Zellrissbildung anhand einer Differenzbildanalyse bestimmt.

In Abb. 9 sind die Anzahl neu gerissener Zellen über der maximalen Modulmittenauslenkung jeder Schockprüfung aufgetragen. Jedes Symbol steht für einen Modultyp. Es ist eine deutliche Korrelation zwischen der maximalen Auslenkung der Modulmitte und der Bildung von Zellrissen zu erkennen. Keine Schockprüfung mit Schockdauern mit weniger als 20 mm Modulmittenauslenkung hat zu Zellrissen geführt. Die ersten Zellrisse treten bei dem empfindlichsten Modul ab einer Modulmittenauslenkung von 20 mm auf. Diese Modulauslenkung wird in den folgenden Auswertungen als Zellbruchgrenze bezeichnet.



Aus einem Beschleunigungsdatensatz eines Stoßereignisses wird die Schwingung mit der Größten Amplitude ermittelt. Die Schockdauer  $t$  dieser gemessenen Schockschwingung wird über ihre Halbwertdauer  $t_{FDHM}$  ermittelt. Die Dauer einer halben Sinusschwingung entspricht dem 1,5 fachen ihrer Halbwertsbreite. Die Multiplikation der ermittelten Halbwertsdauer mit dem Faktor 1,5 ergibt die Schockdauer, der zu einem Halbsinusschock idealisierten, Sinusschwingung:

$$t = 1,5 \times t_{FDHM} \quad (1)$$

Anschließend wird die Maximalbeschleunigung  $a_{max}$  mit dem der Schockdauer zugehörigen Wert der Schocktransferfunktion  $T(t)$  multipliziert:

$$A_M(t, a_{max}) = T(t) \times a_{max} \quad (2)$$

Es wird eine lineare Interpolation der Schockdauer  $t$  durchgeführt. Die so ermittelte Auslenkung der Modulmitte eines Stoßereignisses stellt eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Modulmittenauslenkung dar, weil die reale Abhängigkeit der Beschleunigung in der Modulecke von einer sinusförmigen Abhängigkeit abweichen kann und Schocks nicht unbedingt an allen vier Modulecken gleichzeitig auftreten müssen. Zur Bewertung von Stößen wird im Folgenden der Mittelwert der Transferfunktionen von den zwei Modultypen aus Abb. 10 verwendet.

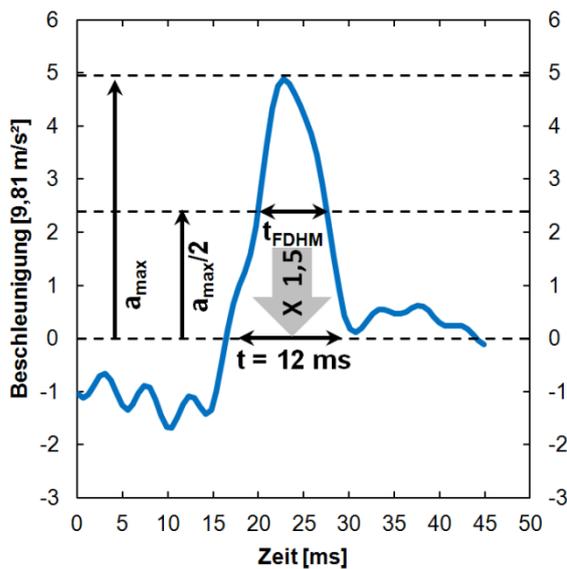


Abb. 11: Vorgehen zur Ermittlung der Schockdauer  $t$  und Schockamplitude  $a_{max}$  eines Stoßes aus den Beschleunigungsdaten einer Stoßaufzeichnung an der Modulecke während eines Modultransportes.

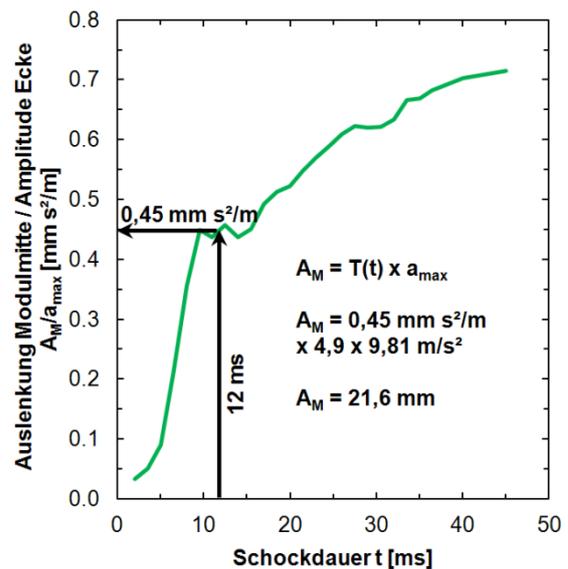


Abb. 12: Anhand der aus Abb. 11 ermittelten Schockdauer  $t$  und der Schockamplitude  $a_{max}$  kann durch Ablesen der Schocktransferfunktion  $T$  an der Stelle  $t$  mit Hilfe von Gleichung (2) die zu erwartende Modulmittenauslenkung  $A_M$  berechnet werden.

## 2.5 Vergleich der Modulmittenauslenkung bei Horizontal- und Vertikal-Transport

Anhand der Stöße der in Kapitel 2.3 vorgestellten Transporte werden gemäß der in Kapitel 2.4 vorgestellten Schocktransferfunktion Modulmittenauslenkungen abgeschätzt. Die ermittelten Modulmittenauslenkungen werden wieder in 16 Klassen aufgeteilt und als Histogramm aufgetragen.

In Abb. 13 und Abb. 14 sind die berechneten Auslenkungen der Modulmitten des horizontalen und vertikalen Speditionstransports aufgetragen. Wie das Histogramm der Effektivbeschleunigungen weist der Horizontaltransport größere Werte der Modulmittenauslenkung auf, als der Vertikaltransport. Das Maximum des Horizontaltransports liegt bei 22 mm und übersteigt damit knapp die Zellbruchgrenze für empfindliche PV Module. Das Maximum des Vertikaltransports liegt mit 6 mm deutlich unter der Zellbruchgrenze. Es fällt auf, dass beim Horizontaltransport das obere Modul größere Auslenkungen der Modulmitte aufweist als das untere Modul im Horizontaltransportstapel.

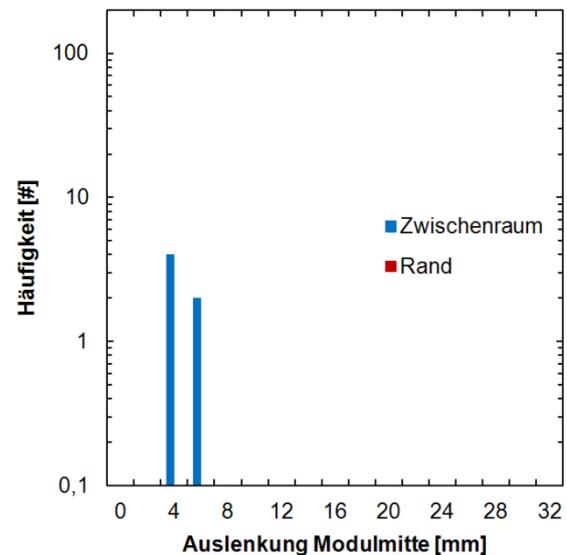
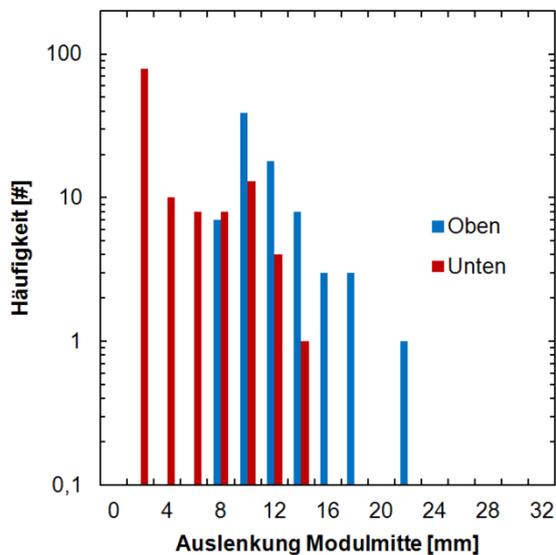


Abb. 13: Histogramm der Modulmittenauslenkung Speditionstransport horizontal.

Abb. 14: Histogramm der Modulmittenauslenkung Speditionstransport vertikal.

Die in Abb. 15 und Abb. 16 aufgetragenen berechneten Modulmittenauslenkungen der Warenumschläge des Horizontal- und Vertikaltransports zeigen große Abweichungen voneinander. Diese sind, wie bereits oben erwähnt, nicht den unterschiedlichen Transportarten zuzuschreiben sondern dem unterschiedlichen Umgang der Speditionen mit den Modulpaletten. Die maximale berechnete Auslenkung der Modulmitte beträgt 32 mm und übersteigt die Zellbruchgrenze deutlich.

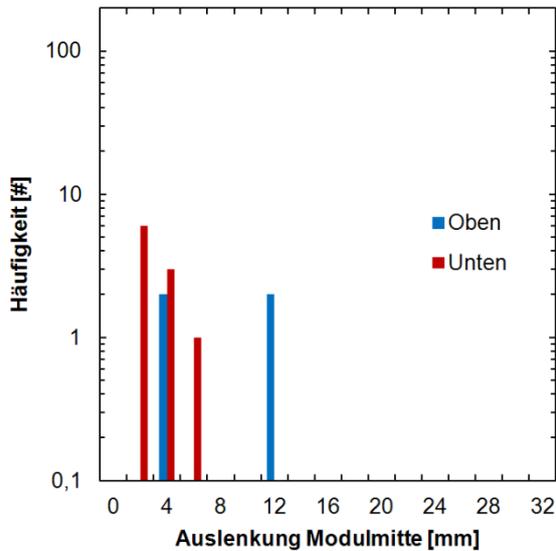


Abb. 15: Histogramm der Modulmittenauslenkung Warenumschlag horizontal.

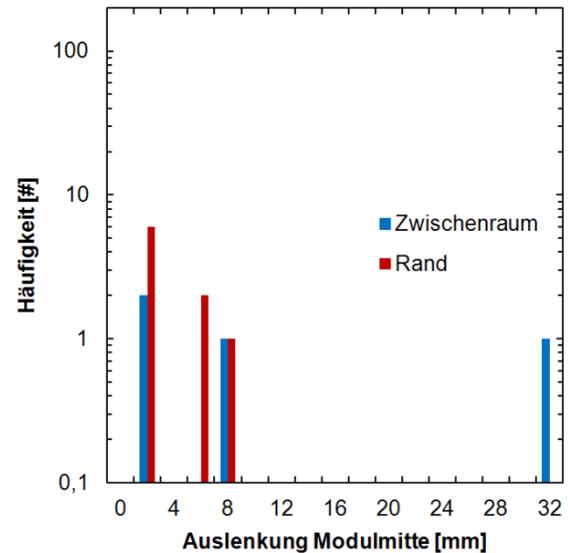


Abb. 16: Histogramm der Modulmittenauslenkung Warenumschlag vertikal.

Da die Bildung von Zellrissen für empfindliche Module bereits ab einer Modulmittenauslenkung von 20 mm beobachtet wird, ist die maximale Modulmittenauslenkung des Warenumschlags beim Vertikaltransport als kritisch zu bewerten. Wenn auch der reine Vertikaltransport zu deutlich geringeren Auslenkungen der Modulmitte führt, bleibt das Risiko der Zellrissbildung aufgrund eines unsanften Warenumschlags. Dies gilt allerdings für beide Transportarten. Herstellereigene Warenumschläge zeigen bei unseren Auswertungen keine Belastungen durch die eine Zellrissbildung zu erwarten ist. Eine Sensibilisierung von Fremdspeditionen für den Umgang mit Modulpaletten erscheint ratsam.

## 2.6 Modulvibrationen, gemessen für Horizontal- und Vertikal-Transporte

Um die Vibrationen der Module während des Transports auf einem Shaker nachstellen zu können, werden Beschleunigungsdichtespektren der Module während einiger Transporte aufgenommen. Die Beschleunigungen werden mit MSR165-Beschleunigungssensoren an den Ecken der Module gemessen. Für die Auswertung der Horizontaltransporte dienen die Daten des oberen und unteren Moduls, für die Auswertung der Vertikaltransporte werden die Daten einer oberen Modulecke und einer unteren Modulecke nahe dem Rand des Modulkartons herangezogen. Als Transportmittel dienen 7,5-Tonner. Die Packstücke befinden sich an der vorderen Wand der Ladefläche. Die Auslösung der Beschleunigungsaufzeichnung erfolgt nicht über einen Schwellwert, sondern über eine Funkfernsteuerung, da bestimmte Transportsituationen aufgenommen werden sollen. Die Transportsituationen werden unterschieden in Stadtverkehr, Landstraßentransport, Autobahntransport und Transport mit besonderen Belastungen. Diese besonderen Belastungen stellen den Transport über besonders schlechte Straßen dar und sind in Kapitel 1.2 beschrieben. Aus den maximal gemessenen Beschleunigungen werden nach Transportsituation aufgegliederte Beschleunigungsdichtespektren gemäß der Norm DIN EN 15433-5\_Feb2008 erstellt.

In Abb. 17 und Abb. 18 werden die Beschleunigungsdichtespektren der Horizontaltransporte denen der Vertikaltransporte gegenüber gestellt. Neben den gemessenen Spektren ist auch das Standard ISFH

Leistungsdichtespektrum ASTM D4169-09 Truck Assurance Level II aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Horizontaltransporte insbesondere für Vibrationen mit Frequenzen bis 20 Hz höhere Beschleunigungswerte aufweisen als die Vertikaltransporte. Die vertikalen Autobahntransporte weisen das niedrigste Leistungsdichtespektrum auf. Erwartungsgemäß weisen die Spektren der Transporte mit besonderen Belastungen höhere Intensitäten im Leistungsdichtespektrum auf als die der anderen Transportsituationen. Tab. 2 verschafft einen Überblick über die Effektivbeschleunigungen der begleiteten Transporte.

Das mittlere Niveau aller Spektren der Horizontaltransporte liegt bei  $g_{rms} = 0,41 g$  und das der Vertikaltransporte bei  $g_{rms} = 0,18 g$ . Dies verspricht schon eine geringere Belastung der Module durch Vibrationen während eines Vertikaltransports. Weitaus entscheidender ist jedoch das deutlich geringere Beschleunigungsniveau der Vertikaltransporte im Frequenzbereich von 10 Hz bis 15 Hz, da in diesem Frequenzbereich die Resonanzfrequenzen üblicher 60-Zell-Module liegen. Eine Anregung der Modulecken im Resonanzbereich führt zu einem Aufschwingen der Modulfläche und somit zu großen Auslenkungen der Modulmitte. Eine reine Sinus-Resonanzanregung der Modulecken mit einer Effektiv-Beschleunigung von  $g_{rms} = 0,25 g$  auf dem Shaker führt bei den von uns getesteten Modulen zu einer maximalen Modulmittenauslenkung (Spitze-Spitze) von bis zu 15 mm. Dieser Fall tritt während eines Transports natürlich nicht auf. Eine Reduzierung der Intensität der Vibrationen im Resonanzbereich der Module führt zu geringeren Modulmittenauslenkungen und lässt eine deutlich geringere Zerrissbildung erwarten. Hier zeigt der Vertikaltransport deutliche Vorteile gegenüber dem Horizontaltransport.

**Tab. 2: Effektiv-Beschleunigungen  $g_{rms}$  in  $g$  der Transportspektren mit Mittelwerten aus Spektren aus Abb. 17 und Abb. 18. Zum Vergleich ist die effektiv-Beschleunigung des Normspektrum Practice D 4169 Assurance Level II mit Faktor 1 angegeben.**

Transportstrecke	Horizontaltransporte			Vertikaltransporte		
	Stadtverkehr	0,36	0,34	0,41	0,15	0,13
Landstraße	0,31	0,14				
Autobahn	0,37	0,10				
Besondere Belastungen	0,61			0,35		
Practice D 4169 Assurance Level II	0,52					

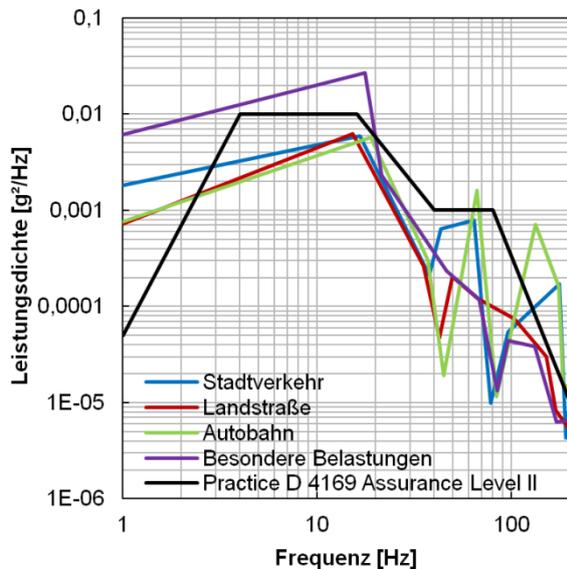


Abb. 17: Leistungsdichtespektrum Horizontaltransporte für Stadt, Landstraße, Autobahn und besondere Belastungen.

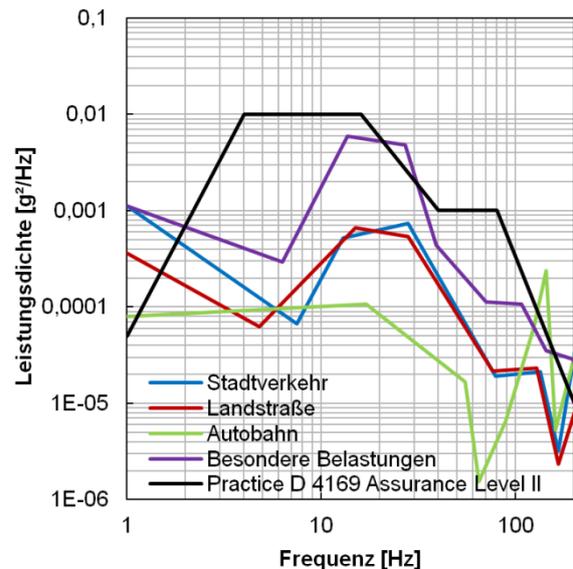


Abb. 18: Leistungsdichtespektrum Vertikaltransporte für Stadt, Landstraße, Autobahn und besondere Belastungen.

## 2.7 Auswirkung von Modulvibrationen auf Zellerisbildung

Zur Überprüfung der Zellerisbildung durch Modulvibrationen werden Rauschprüfungen auf dem Shaker mit 5 Modultypen durchgeführt. Für eine Rauschprüfung muss zunächst ein Prüfspektrum festgelegt werden. Der Shaker generiert eine zufällige Aneinanderreihung von Schwingungen gemäß den Frequenzen und zugehörigen Intensitäten des Prüfspektrums. Als Prüfspektrum wird das in Abb. 17 aufgetragene Leistungsdichtespektrum ASTM D4169-09 Truck Assurance Level II ab einer Frequenz von 5 Hz gewählt, da es in guter Näherung den Verlauf der Spektren aus den Horizontaltransporten abbildet. Seine Intensität von  $g_{rms} = 0,5 g$  liegt allerdings über der mittleren Intensität der Transportspektren von  $g_{rms} = 0,4 g$ . Aus diesem Grund wird es mit einem Faktor von 0,8 für den ersten Prüfschritt auf  $g_{rms} = 0,4 g$  reduziert und für weitere Prüfschritte mit Faktoren von 1,0 und 1,4 wieder angehoben.

Jede Rauschprüfung erfolgt in zwei Zeitintervallen die in Summe 3 h ergeben. Zunächst erfolgt eine 15-minütige Prüfung und im Anschluss daran eine Prüfung über 2 Stunden und 45 Minuten. Diese Aufteilung wird gewählt, um die Zellerisbildung aufgrund der Rauschintensität von der Zellerisbildung aufgrund der Dauer der Prüfung unterscheiden zu können. Vor und nach jeder Prüfung werden Elektrolumineszenzaufnahmen angefertigt und die Zellerisbildung mittels Differenzbildanalyse ermittelt.

Die Montage der Module auf dem Shaker erfolgt gemäß der Beschreibung in Kapitel 2.4 und die Auslenkungen der Modulmitte werden während der ersten 10 Minuten jeder Prüfung mit dem Laserdistanzaufnehmer aufgezeichnet. Als Regelpunkt für den Shaker dient ein Beschleunigungssensor auf einer Moduleckhalterung.

In Abb. 19 ist die kumulierte Anzahl der neu gerissenen Zellen über dem zeitlichen Verlauf der Rauschprüfungen aufgetragen. Nach jeweils 3 h Prüfdauer wird die Intensität des Prüfspektrums über den auf der X-Achse angegebenen Faktor angehoben. Zwei Modultypen weisen schon zu Beginn der Prüfungen eine größere Anzahl gerissener Zellen auf. Diese steigt sowohl über die Prüfdauer, als auch mit Erhöhung der Prüfindensität stetig bis auf über 30 gerissene Zellen an. Die drei anderen Modultypen weisen eine deutlich geringere Zellrissbildung auf, der stabilste Modultyp weist erst nach Ende des letzten Prüfschritts mit Faktor 1,4 eine gerissene Zelle auf. Die Zellrissanzahl nimmt mit der Prüfdauer als auch mit Erhöhung der Prüfindensität zu.

In Abb. 20 sind die Auslenkungen der Modulmitten während der ersten 10 Minuten jeder Prüfung aufgetragen. Die unterschiedlichen Modulmittenauslenkungen während eines Prüfschrittes mit gleichem Faktor resultieren aus der zufälligen Zusammensetzung der Anregungsfrequenzen aus dem Rauschspektrum, wodurch es mal mehr, mal weniger zu kurzzeitigen Resonanzanregungen kommt. Die Auslenkungen der Modulmitten schwanken im ersten Prüfschritt je nach Modultyp zwischen 24 und 28 mm und im letzten Prüfschritt zwischen 35 und knapp 40 mm. Eine Steigerung der Prüfindensität führt ebenso zu einer Steigerung der Modulmittenauslenkung. Bemerkenswert ist, dass die Modultypen mit der stärksten Zellrissbildung die niedrigsten Modulmittenauslenkungen aufweisen. Der Modultyp mit der geringsten Zellrissbildung hingegen weist die maximale Modulmittenauslenkung von knapp 40 mm auf wenn der erste Zellriss entsteht. Das ist nahezu die doppelte Modulmittenauslenkung verglichen mit der Modulmittenauslenkung für die Zellbruchgrenze der Schockprüfungen aus Kapitel 2.4. Die hohe Anzahl der gerissenen Zellen (5 und 16) im ersten Prüfschritt der beiden Modultypen mit vielen Zellrissen weist hingegen auf eine niedrigere Zellbruchgrenze hin, als ihre Modulmittenauslenkung von ca. 25 mm im ersten Prüfschritt. Die Bruchschwelle für die Zellen ist demnach von Modultyp zu Modultyp sehr unterschiedlich.

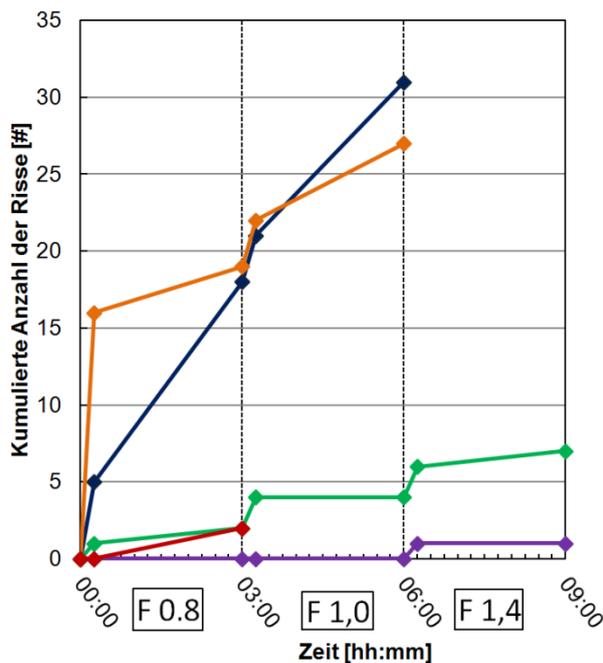


Abb. 19: Zellrissbildung durch Modulvibrationen, angeregt mit Practice D 4169 Assurance Level II mit Verstärkungsfaktoren von F 0,8 bis F 1,4. Jede Kurve steht für einen Modultyp.

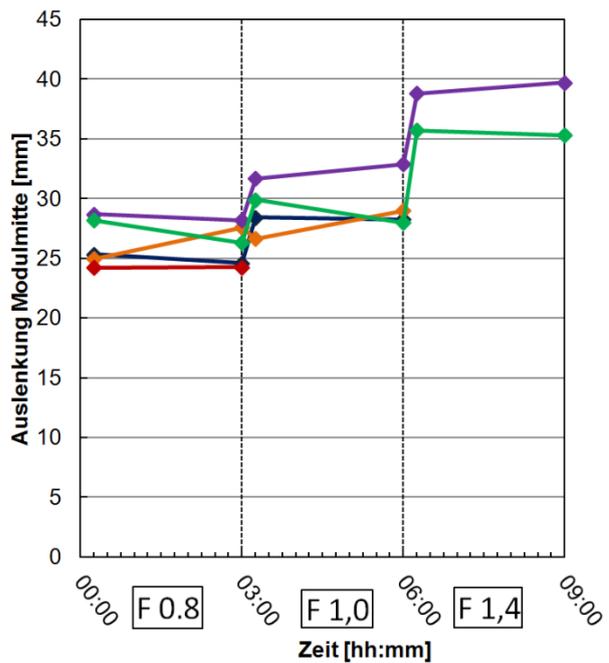


Abb. 20: Maximale Auslenkungen der Modulmitte (Spitze - Spitze) durch Anregung mit Practice D 4169 Assurance Level II mit Verstärkungsfaktoren von F = 0,8 bis F 1,4. Die Farbuordnung der Kurven zu den Modultypen ist identisch mit der aus Abb. 19.

Die Zellrissbildung der durchgeführten Rauschprüfungen ist stark vom geprüften Modultyp abhängig. Während dieser Prüfungen sind Bruchgrenzen von unter 25 bis knapp 40 mm zu beobachten. In der Schockprüfung in Kapitel 2.4 findet man auch diese Streuung der Bruchgrenzen der unterschiedlichen Modultypen wieder. Eine Bruchgrenze kann nicht für jeden Modultyp angegeben werden, da es nicht bei allen Modultypen in den Prüfungen zu Zellrissen gekommen ist.

## 2.8 Wodurch wird die Zellbruchrate beeinflusst?

Während unserer Prüfungen haben wir bei Betrachtung eines Modultyps die Auslenkung der Modulmitte als den relevanten Parameter für die Zellrissbildung identifiziert. Allerdings führt nicht die Auslenkung der Modulmitte zum Zellbruch, sondern die Spannungen in den Zellen, die durch die Durchbiegung des Modullaminats entstehen. Im Modullaminat ist die Glasscheibe das formbestimmende Element. Wird das Modullaminat gebogen, liegt die neutrale Phase nahe der Mitte der Glasscheibe. Da sich die Zellen an einer Seite der Glasscheibe befinden, werden sie bei einer Durchbiegung des Laminats entweder gestaucht oder gestreckt. Dies erzeugt Druck- bzw. Zugspannungen in den Zellen. Je weiter ein Modul durchgebogen wird, desto größer sind die Spannungen in den Zellen. Die Zellrisse entstehen aufgrund von Zugspannungen. Aus diesem Grund ist der Transport der Module mit Sunny-side down dem Transport mit Sunny-side up vorzuziehen. Die durch die Erdbeschleunigung verursachte Moduldurchbiegung führt im Fall Sunny-side down überwiegend zu einer Druckspannung in den Zellen. Dadurch befinden sich die Zellen in einem sicheren vorgespannten Zustand. Glas-Glas-Module, bei denen die Solarzellen sich in der neutralen Phase befinden, sind unempfindlicher gegenüber Zellbruch, weil die Solarzellen selbst beim Durchbiegen des Laminates nur geringe Zugspannungen erfahren.

Vergleicht man mehrere Modultypen miteinander, zeigt sich, dass die Bruchempfindlichkeit der Zellen im Modul von Modultyp zu Modultyp sehr unterschiedlich ist. Die Bruchempfindlichkeit der Zellen wird durch die Herstellung der Solarzellen, den Stringprozess und das Einbettmaterial [2] wesentlich bestimmt. Gleiche Belastungen unterschiedlicher Modultypen führen zu unterschiedlichen Auslenkungen der Modulmitten, wobei bei verschiedenen Modultypen nicht die größten Modulmittenauslenkungen zu den meisten gerissenen Zellen führen. Jedoch innerhalb eines Modultyps gilt, dass eine höhere Modulauslenkung auch zu einer höheren Zellbruchrate führt.

### 3 Prüfung Modultransport

#### 3.1 Prüfung des Modultransports für Einzelmodule

Als Prüfung von Einzelmodulen schlagen wir eine Kombination aus Schockprüfungen und einer Rauschprüfung nach folgendem Ablauf vor:

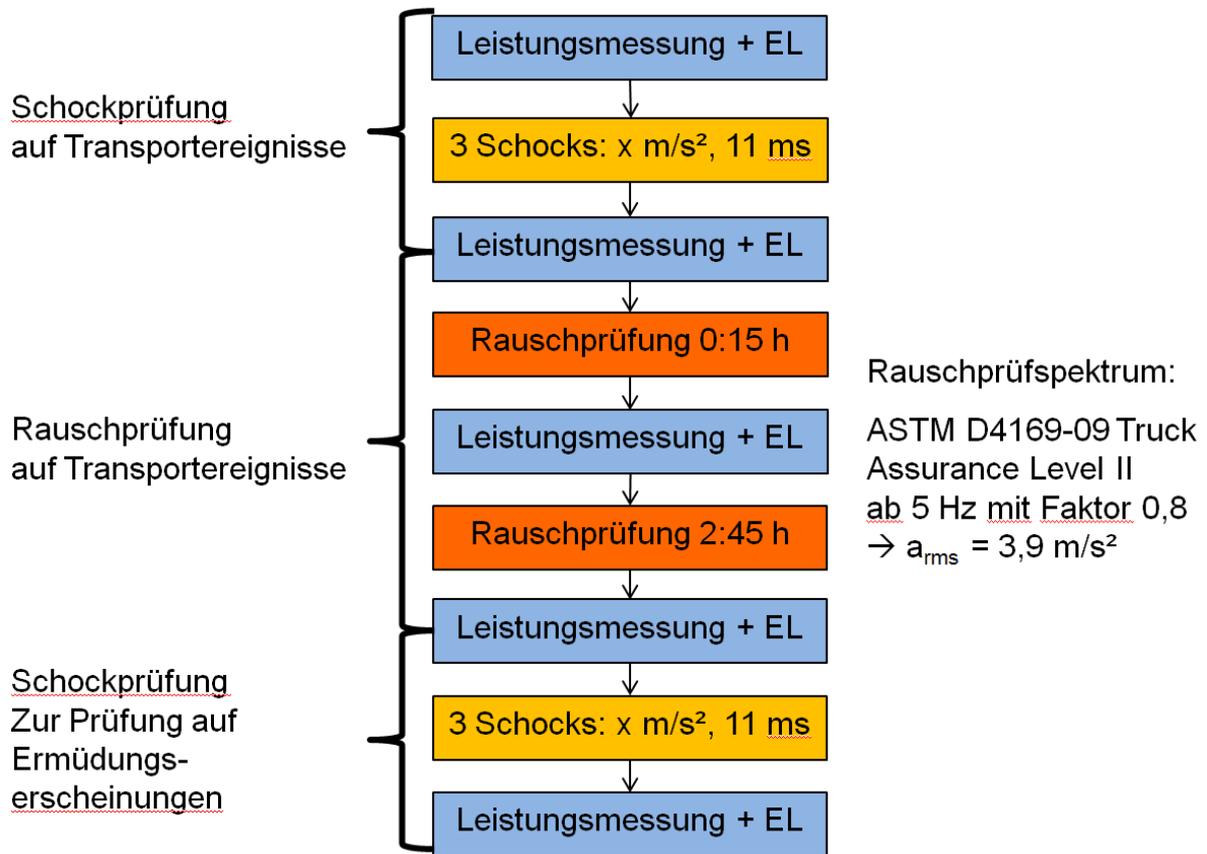


Abb. 21: Ablauf Transportprüfung für Einzelmodule

Vor und nach jeder Prüfung wird eine Leistungsbestimmung durchgeführt und eine Elektrolumineszenzaufnahme angefertigt. So können nach jeder Prüfung eventuelle Leistungsverluste und die Bildung von Zellrissen mittels Differenzbildanalyse der EL-Aufnahmen bestimmt werden. Die Module werden Sunny-side down nur an ihren Ecken auf dem Shaker fixiert. Zur Regelung dient ein Beschleunigungssensor auf einem Eckbefestigungspunkt. Je nach Bedarf kann eine Erfassung der Auslenkung der Modulmitte über einen Laserdistanzaufnehmer erfolgen.

Die Rauschprüfungen spiegeln die Modulbelastungen durch Vibrationen während eines horizontalen LKW-Transports wieder. Die Prüfdauer von insgesamt 3 Stunden ist die empfohlene Prüfdauer der Norm ASTM D4169-09, der auch das verwendete Prüfspektrum Truck Assurance Level II entnommen wurde. Dieses Prüfspektrum bildet die Form der von uns ermittelten Transportspektren gut ab, und wird zur Angleichung seiner Intensität auf die mittlere Intensität der Transportspektren mit Faktor 0,8 multipliziert. Aufgrund des Frequenzgangs der von uns verwendeten Beschleunigungssensoren wird die untere Frequenz des Prüfspektrums auf 5 Hz festgelegt. Seine reduzierte Intensität beträgt

nun  $3,9 \text{ m/s}^2$  (siehe Tab. 3). Die Unterbrechung der Prüfung dient der Unterscheidung von Zellrissen, die spontan auftreten und Zellrissen, die aufgrund der Prüfdauer durch Ermüdung auftreten.

**Tab. 3: Stützstellen des Prüfspektrums für ausgewählte Faktoren mit Angabe der Intensität**

<b>Faktor c</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>
<b>Frequenz</b>	<b>Stützstellen</b>	<b>Stützstellen</b>	<b>Stützstellen</b>	<b>Stützstellen</b>	<b>Stützstellen</b>
<b>[Hz]</b>	<b>[(m/s<sup>2</sup>)/Hz]</b>	<b>[(m/s<sup>2</sup>)/Hz]</b>	<b>[(m/s<sup>2</sup>)/Hz]</b>	<b>[(m/s<sup>2</sup>)/Hz]</b>	<b>[(m/s<sup>2</sup>)/Hz]</b>
5	0,4716	0,6159	0,9624	1,3858	1,8862
16	0,4716	0,6159	0,9624	1,3858	1,8862
40	0,0472	0,0616	0,0962	0,1386	0,1886
80	0,0472	0,0616	0,0962	0,1386	0,1886
200	0,0005	0,0006	0,0010	0,0014	0,0019
<b>a<sub>rms</sub> [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>3,4245</b>	<b>3,9137</b>	<b>4,8921</b>	<b>5,8706</b>	<b>6,8490</b>

Die von uns so durchgeführten Rauschprüfungen führen bei zwei der geprüften Modultypen zu erheblicher Bildung von Zellrissen. Während der von uns durchgeführten Transporte kam es jedoch nur zu wenigen Zellrissen. In den Transportspektren sind auch die Transporte mit besonderen Belastungen enthalten, was zu einer Erhöhung der Intensität des Spektrums führt. Die beiden o.g. Modultypen wurden nicht auf dieser Strecke transportiert, was das Ausbleiben der Beobachtung einer größeren Anzahl von Zellrissen erklären kann. Leider stehen diese Modultypen nicht für die Prüfung in einem Realtransport zur Verfügung. Soll eine Rauschprüfung nur die Belastungen von Stadtverkehr, Landstraße und Autobahn widerspiegeln, kann die Intensität des Prüfspektrums z.B. mit Faktor  $c = 0,7$  auf eine Effektiv-Beschleunigung von  $a_{rms} = 3,4 \text{ m/s}^2$  reduziert werden. Die Stützstellen des Prüfspektrums müssen hierfür mit dem quadrierten Faktor multipliziert werden.

Mit den beiden Schockprüfungen werden zwei Ziele verfolgt. Mit der ersten Schockprüfung wird das Modul auf Belastungen durch während des Transports und des Warenumschlags auftretende Stöße geprüft. Mit der zweiten Schockprüfung wird überprüft, ob es durch die vorangegangene Rauschprüfung aufgrund von Materialermüdung zu einer Veränderung des Schwingverhaltens des Moduls gekommen ist. Eine Schwächung der Rahmenkonstruktion oder eine Lockerung der Verbindung zwischen Rahmen und Laminat würde sich in einer Vergrößerung der Auslenkung der Modulmitte bemerkbar machen.

Es werden Halbsinusschocks gemäß DIN EN 60068-2-27 für die Schockprüfung angewendet. Allerdings werden die Schocks nur senkrecht zur Moduloberfläche durchgeführt, da die Module gegenüber Stößen in Richtung der Modulebene wesentlich unempfindlicher sind. Die Modulmontage erfolgt analog zum Rauschtest. Die Schockdauer von 11 ms entspricht einer bevorzugten Schockdauer der o.g. Norm. Wie in Abb. 10 zu erkennen ist, führt die Schockdauer von 11 ms zum Einkoppeln der Schockenergie in die Modulglasscheibe. Die meisten von uns ermittelten Stoßdauern der durchgeführten Umschläge liegen im Bereich von 4 ms bis 16 ms. Wie man in Abb. 10 erkennen kann, reagieren die 60-Zell-Module oberhalb von 10 ms Schockbreite mit einer besonders hohen Auslenkung. Somit liegt die Dauer der Prüfchocks mit 11 ms im relevanten Bereich. Da es sich bei den beobachteten Maximalstößen um Einzelereignisse handelt, werden normgemäß 3

Schockwiederholungen für die Schockprüfung gewählt. Die nächst höhere in der Norm genannte Schockanzahl von 100 übersteigt das in der Realität zu erwartende Belastungsmaß deutlich.

Die Spitzenbeschleunigung des ausgewählten Normschärfegrades der Schockprüfung beträgt  $100 \text{ m/s}^2$ . Eine Schockanregung gemäß der beschriebenen Prüfung mit dieser Beschleunigung führt zu einer Modulmittenauslenkung eines Beispielmodultyps von ca. 35 mm (siehe lila Kurve in Abb. 23). Sie liegt damit über der von uns aus den Transport- / Umschlagbeschleunigungen ermittelten maximalen Modulmittenauslenkung von 32 mm.

Die in Abb. 23 eingetragene Zellbruchgrenze mit 20 mm Modulmittenauslenkung wird für den Beispielmodultyp bei dieser Schockprüfung mit einer Spitzenbeschleunigung von  $42 \text{ m/s}^2$  erreicht.

Im Folgenden wird erläutert, wie die Schockamplitude und damit der Härtegrad für eine Prüfung mit 11 ms Schockbreite sinnvoll festgelegt werden kann. Ein Flussdiagramm zur Vorgehensweise wird in Abb. 22 gegeben. Im Folgenden wird sich auf das Flussdiagramm unter Angabe der Schrittnummer (x) bezogen.

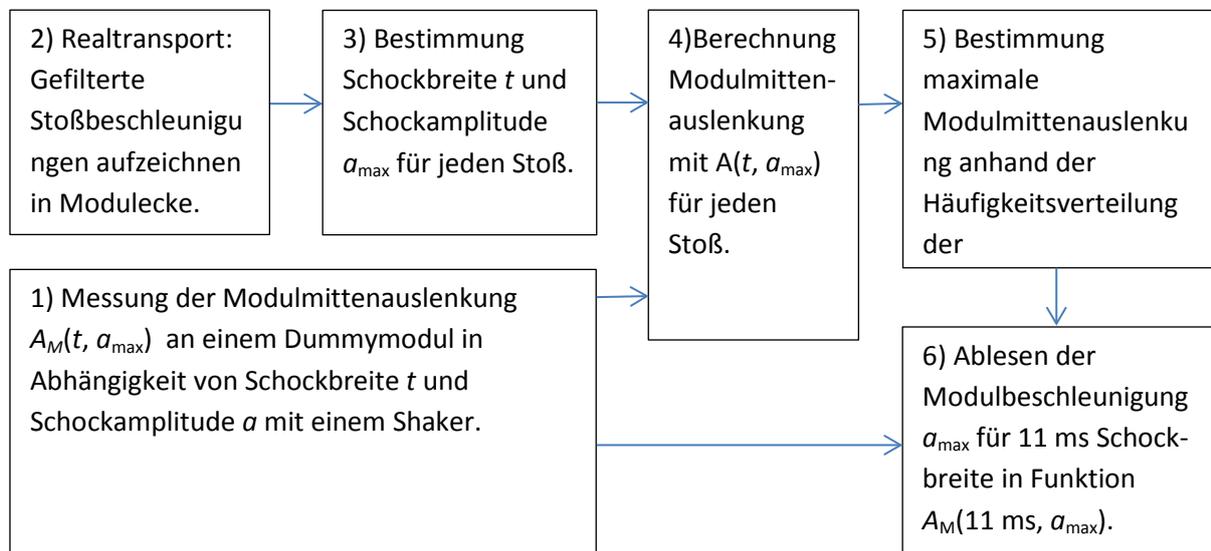


Abb. 22: Ablaufdiagramm zur Ermittlung einer sinnvollen Stoßamplitude für Schockprüfungen mit 11 ms Schockbreite.

Voraussetzung für eine Schockprüfung eines unbekanntes Modultyps sind vorgelagerte Sinus-Schocktestreihen mit einem Dummymodul dieses Typs mit einem Shaker (1). In einer Schocktestreihe werden die Modulmittenauslenkungen  $A_M(t, a_{max})$  des Modultyps in Abhängigkeit der Schockdauer  $t$  und der Schockamplitude  $a_{max}$  bestimmt, vgl. auch Abb. 10. In Kapitel 2.5 wird erläutert, wie aus den gemessenen Schockaufzeichnungen von Realtransporten (2) die Modulmittenauslenkung unter Verwendung einer Schocktransferfunktion ermittelt wird (3,4). Diese Vorgehensweise dient dem Transfer der Beschleunigungsdaten der durchgeführten Modultransporte und -umschläge in zugehörige Modulmittenauslenkungen eines Modultyps. Diese Umrechnung wird mit Gleichung (2) aus Kapitel 2.5 durchgeführt. Aus den so ermittelten Modulmittenauslenkungen wird eine Häufigkeitsverteilung der Modulmittenauslenkungen des neuen Modultyps gebildet (5). In der Schocktestreihe (1) werden die Modulmittenauslenkungen  $A_M(t, a_{max})$  des Modultyps auch in Abhängigkeit der Schockamplitude an der Modulecke mit einer Schockdauer von 11 ms erfasst. Mit dieser Abhängigkeit kann bestimmten Modulmittenauslenkungen die erforderlichen

Beschleunigungen der Modulecken für die Schockprüfung mit 11 ms Schockbreite zugeordnet werden (6). Der Zusammenhang zwischen der Modulmittenauslenkung und der Beschleunigung an der Modulecke ist für 11 ms Schocks in Abb. 23 und Abb. 24 auf der x-Achse und der Sekundärachse aufgetragen.

In Abb. 23 sind zusätzlich die Häufigkeitsverteilungen der von uns aus den Transport- / Umschlagbeschleunigungen errechneten Modulmittenauslenkungen aus zwei Transporten aufgeschlüsselt nach Transport und Umschlagereignissen aufgetragen. In Abb. 24 ist die Häufigkeitsverteilung der Modulmittenauslenkungen für den Horizontaltransport beispielhaft herausgegriffen. Anhand dieser Abbildung wird die Ermittlung der Schockbeschleunigung für die 11 ms breiten Normschocks erläutert.

Sollen z.B. 99 % aller auftretenden Schocks des Horizontaltransports mit einer Schockprüfung abgedeckt werden, sucht man zunächst in der Häufigkeitsverteilung des Horizontaltransports die Modulmittenauslenkung für die 99 % der Modulmittenauslenkungen der Schocks kleiner oder gleich groß sind, siehe Abb. 24. In dem in Abb. 24 gezeigten Fall beträgt die Modulmittenauslenkung 17,5 mm. Anschließend wählt man die hierzu gehörige Beschleunigung der Modulecke aus der Kurve der Schockprüfungen mit 11 ms Schockdauer, in diesem Fall  $36 \text{ m/s}^2$ . Mit dieser Beschleunigungsamplitude wird das Modul an den Ecken während der Schockprüfung beschleunigt, was zu einer Modulmittenauslenkung von 17,5 mm führt. Sollen 100% aller Schocks, die bei den von uns begleiteten Transporten aufgetreten sind, abgedeckt werden, so ist eine maximale Beschleunigungsamplitude für die Schockprüfung von  $90 \text{ m/s}^2$  ablesbar. Die Anzahl der Schocks (drei gemäß Norm) sollte nicht mehr angepasst werden, weil man die Schockprüfung so auslegen sollte, dass auf besonders intensive Einzelereignisse geprüft wird.

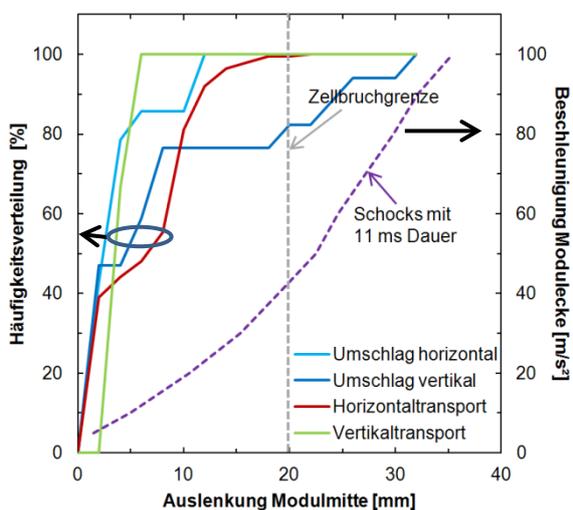


Abb. 23: Häufigkeitsverteilung der Modulmittenauslenkungen durch Stöße während des Transports und des Warenumschlags mit Angabe der ermittelten Zellbruchgrenze und den Modulmittenauslenkungen von Schockprüfungen mit einer Schockdauer von 11 ms.

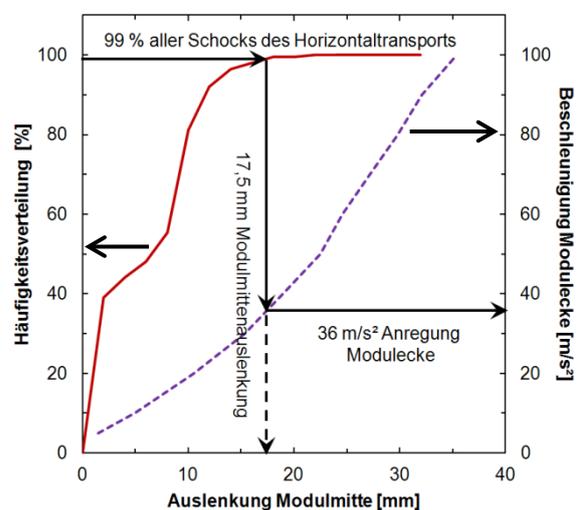


Abb. 24: Auswahl der Intensität einer Schockprüfung mit einer Schockdauer von 11 ms. Die rote Kurve zeigt die Häufigkeitsverteilung der berechneten Modulmittenauslenkungen durch Stöße des Horizontaltransports. Die gestrichelte lila Kurve zeigt die Beschleunigung der Modulecken, die notwendig ist um eine bestimmte Modulmittenauslenkung mit einer Schockprüfung mit 11 ms Schockdauer zu erzeugen.

## **3.2 Prüfung des Modultransports für Transportverpackungen**

Für die Prüfung von kompletten Verpackungseinheiten erarbeitet der TÜV Rheinland den Transportnormentwurf IEC 62759-1 2012-11. Es handelt sich um eine Transportsimulation mit nachgeschalteter Umwetalterung. Die dort vorgeschlagenen Prüfungen halten wird insbesondere für die Transportprüfung von Horizontaltransporten für sinnvoll. Für den Vertikaltransport sollte noch sichergestellt werden, dass die Prüfung auch die Stöße und Vibrationen in Richtung der Modulsenkrechten berücksichtigt. Dies ist beim Entwurf IEC 62759-1 2012-11 nicht der Fall.

## 4 Empfehlungen für die Verpackung

Die Verpackung schützt die PV-Module vor Stößen und soll eine sichere Lagerung während des Transportes gewährleisten. Außerdem sollte die Verpackung auch für Arbeiten auf der Baustelle geeignet sein, um z.B. die Module leicht entnehmen zu können und evtl. Module umsortieren zu können.

### 4.1 Spezifische Vor- und Nachteile von Horizontal- und Vertikaltransport

In den folgenden zwei Tabellen sind die uns aufgefallenen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Transportarten gegenüber gestellt.

**Tab. 4: Vor- und Nachteile Horizontaltransport.**

Vorteile	Nachteile
Leichtes Ab stapeln der Module auf der Baustelle	Hauptstoßrichtungen beim Modultransport regen Module maximal zum Resonanz-Schwingen an.
Zusammenstellen kleinerer Verpackungseinheiten mit abweichender Anzahl von der Originalpackung relativ einfach umsetzbar (Distributor), ohne dass es zu einer erhöhten Gefährdung der Module durch das Um stapeln kommt.	Stöße durch unsanftes Absetzen der Palette beim Warenums Schlag können Zellrisse verursachen.
Geringe Verpackungskosten	Ab stapeln der Module kann auf Baustelle zum Aufschlagen der oberen Module auf die Rückseitenfolie der unteren Module führen
	Einwickeln oder Einschweißen des Modulstapels mit Kunststofffolie kann evtl. zu Überspannungsschäden an den Bypassdioden führen.

**Tab. 5: Vor- und Nachteile Vertikaltransport.**

Vorteile	Nachteile
Geringe Auslenkung der Modulmitten bei senkrechten Stößen auf die Modulpalette	Schwierige Handhabung auf Baustelle
Geringere Resonanzanregung der Module beim Transport	Ohne Kartonrippen: Umfallen der Module möglich beim Entpacken, bzw. zusätzliche Zwischenrippen nötig.
	Empfindlicher bei Stößen von der Seite, z.B. beim Warenums Schlag
	Zusammenstellen kleiner Verpackungseinheiten (Distributor) ist nicht einfach umsetzbar.

Gemäß Tab. 4 und Tab. 5 bietet der Horizontaltransport Vorteile, bei kurzen Transportstrecken, Umpacken beim Distributor oder bei zu erwartenden unprofessionellen Entpacken der Modulverpackung. Dies ist vorzugsweise bei Anlieferung für kleinere Hausinstallation der Fall. Der Vertikaltransport bietet deutliche Vorteile bei langen Transportwegen mit dem Lastwagen, mit wenig Umschlag, keiner Notwendigkeit für das Umpacken in kleinere Verpackungseinheiten und professionellem Handling auf der Baustelle. Dies ist vorzugsweise auf Großbaustellen der Fall, bei denen z.B. eine Direktlieferung vom Werk zur Baustelle stattfindet.

## **4.2 Anforderungen an die Palette**

Da eine Druckbelastung auf die Glasoberseite für ein PV Modul schädlicher ist als eine Sogbelastung, sollten PV Module auf einer Palette mit der Glasseite nach unten liegen. Durch die Gravitation werden die Module in die unempfindlichere Biegerichtung leicht vorgespannt.

Die Palette darf sich während der Gabelstapler- oder Hubwagenhandhabung nur so weit in der Palettenmitte durchbiegen, dass die Palette die Glasfläche des untersten PV-Moduls sicher nicht berührt. Dies gibt den häufigsten von uns beobachteten Fehler bei der Auslegung von Modulpaletten wieder.

Der Rand der Palette kann z.B. so erhöht / verstärkt werden, dass ein Kontakt der Palettenmitte mit dem Modulglas auch bei einer Durchbiegung der Palette verhindert wird. Außerdem sollte die Randverstärkung so dimensioniert werden, dass das unterste Modul auf der Palette nur an den Modulecken aufliegt und den Palettenrahmen an keiner anderen Stelle berührt. Die Dimensionierung sollte für den Fall ausgelegt werden, dass die Palette von der kurzen Seite mit einem Hubwagen mit kurzen Gabeln angehoben werden kann. Für die Dimensionierung muss auch ein ruckartiges Anheben der Palette berücksichtigt werden.

## **4.3 Anforderungen an die Abspannbänder**

Die Abspannbänder haben die Aufgabe, die Module mit der Palette zusammen zu halten. Sie müssen verhindern, dass die Module im Stapel durch Stoß und Schwingungsanregung nicht untereinander schwingen. Die Abspannbänder müssen über die Auflagepunkte der Module gezogen werden, um ein Durchbiegen der Modulrahmen zu vermeiden. Je weiter die Abspannbänder von den Auflagepunkten (Modulecken) entfernt sind, desto mehr kann der Modulstapel federn. Die Abspannbänder müssen so angezogen werden, dass sie unter Spannung stehen, aber sich nicht unelastisch verformen. Um ein Schwingen der Module untereinander zu verhindern, können Stretchfolien zum Umwickeln des Modulstapels verwendet werden. Die Stretchfolien reduzieren ein Schwingen der Module untereinander. Bei der Verwendung von Stretchfolien ist jedoch darauf zu achten, dass statische Aufladungen beim Auspacken die Schottky Bypassdioden der PV-Module zerstören können. Eine Auslieferung mit geschlossenen Steckern oder hochspannungsfesten Bypassdioden ist in diesem Fall geeignet, um eine Zerstörung der Bypassdioden durch Überspannung zu vermeiden.

#### **4.4 Besondere Fehler bei Verpackungen**

Während der Transportbegleitung sind uns einige besondere ungünstige Eigenschaften von Verpackungen aufgefallen, die hier beschrieben werden sollen.

Manche Stapelecken von PV-Modulen sind so ineinander und mit den PV-Modulen verkeilt, dass beim Abstapeln der Module sich die Stapelecken nicht leicht von den Modulen lösen. Dies kann beim Abheben eines Modules dazu führen, dass über die Stapelecken das nächst untere Modul mit angehoben wird und evtl. nach kurzem Anheben von selbst wieder zurückfällt. Zellbrüche in dem zurückfallenden Modul sind sehr wahrscheinlich.

In Vertikalverpackungen ist unbedingt darauf zu achten, dass die vertikal stehenden Module beim Auspacken nicht zur Seite kippen und dadurch beschädigt werden. Das zur Seite Kippen kann z.B. durch Kartonlamellen zwischen den Modulen verhindert werden, oder die Monteure werden entsprechend geschult, dass die Palette vor dem Entnehmen der Module so schräg aufgestellt wird, das ein Umkippen der Module in der Verpackung verhindert wird.

## 5 Beobachtete Modulbelastungen begleiteter Modulmontagen

Um die Belastungen für Module während der Installation zu ermitteln, haben wir zwei Aufdachmontagen und eine Freifelddemontage begleitet. Im folgenden Kapitel werden die auftretenden Stoßbelastungen gemessen und bewertet. Im nächsten Kapitel werden besondere Belastungsformen notiert und systematisiert.

### 5.1 Stoßbelastung während der Installation

Zur Erfassung der kritischen Belastungsformen während der Montage von Modulen haben wir Modulmontagen begleitet, und in zwei Fällen die Module auch mit Beschleunigungsloggern ausgestattet. Die leichten MSR165-Beschleunigungslogger werden entweder auf der Laminatrückseite oder auf dem Glas in der Nähe der Modulecke mit doppelseitigem Klebeband fixiert. Sie werden in der Schock-Betriebsart mit einer Auslöseschwelle von  $3 g$  betrieben. Ihre Abtastrate beträgt 1600 Hz. Die Nachbehandlung und Auswertung der Beschleunigungsdaten erfolgt wie bei den Modultransporten.

Während Aufdachmontagen werden die Module in einem Fall von einer Person auf der Schulter getragen und über eine Leiter und die Modultragschienen zur Montageposition auf dem Dach gebracht. In einem anderen Fall werden die Module mit einem Fahrstuhl auf das Dach transportiert und von zwei Personen am Modulrahmen zur Montageposition getragen.

Im Freifeld haben wir die Demontage von Modulen begleitet. Die Module werden gelöst und mittels 3 Saugnapfgriffen von zwei Personen angehoben und Sunny-side up auf einem Kammkarton abgelegt. Die Saugnapfgriffe werden entfernt und das Modul in den Karton gestellt. Der Transport erfolgt in Schrittgeschwindigkeit über einen leicht huckeligen Wiesenweg auf einem kleinen KFZ-Anhänger.

Während aller Montagebegleitungen wird sehr vorsichtig mit den Modulen umgegangen.

In Abb. 25 und Abb. 26 sind die Stöße der Aufdachmontage den Stößen der Freifelddemontage gegenübergestellt. Es sind die Häufigkeiten der Stöße über ihren in 16 Klassen aufgeteilten Effektiv-Beschleunigungen aufgetragen. Die Aufdachmontage zeigt etwas höhere Beschleunigungen von maximal  $6 g$ . Beide liegen über den maximalen Effektiv-Beschleunigungen von Transport und Warenumschlag.

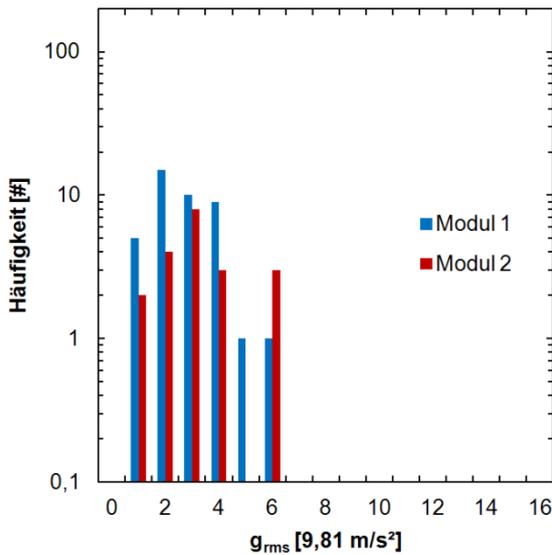


Abb. 25: Stoßhistogramm Aufdachmontage.

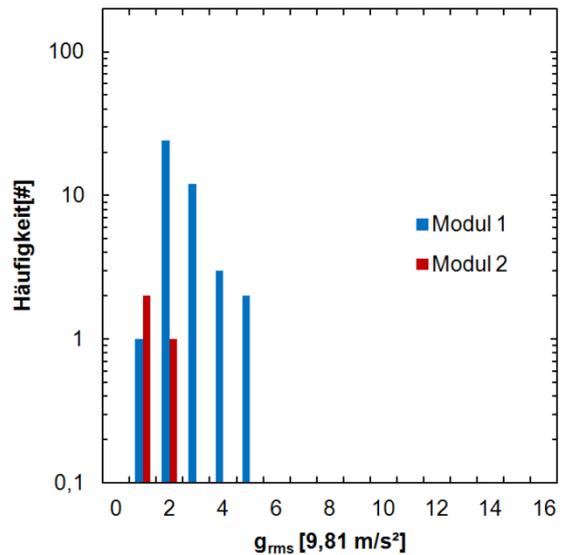


Abb. 26: Stoßhistogramm Freifeldmontage.

Für eine Abschätzung der Auswirkungen der aufgetretenen Stöße werden mithilfe ihrer Dauer  $t$  und der Schocktransferfunktion aus Abb. 10 die aus den Stößen resultierenden Modulmittenauslenkungen berechnet. Diese sind in Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt. Die Aufdachmontage weist ein kritisches Maximum der Modulmittenauslenkungen von 32 mm auf, während die maximale Auslenkung der Modulmitte bei der Freifeldmontage 20 mm beträgt.

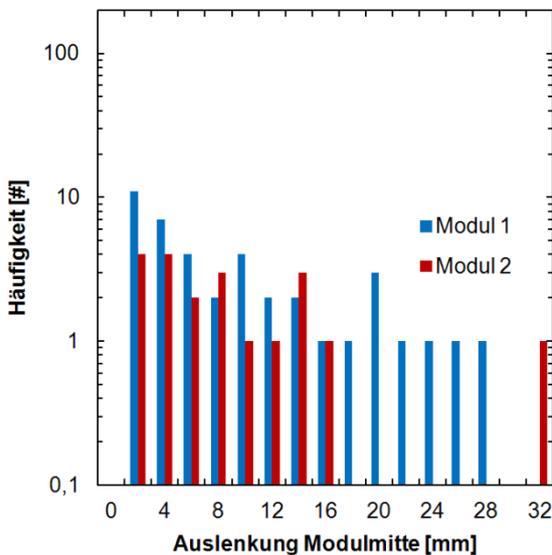


Abb. 27: Histogramm der berechneten Modulmittenauslenkung durch Aufdachmontage.

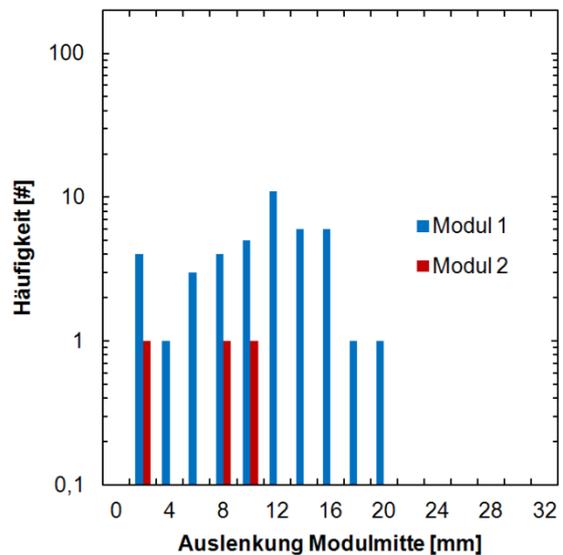


Abb. 28: Histogramm der berechneten Modulmittenauslenkung durch Freifeldmontage .

Die der Schocktransferfunktion zugrundeliegenden Schockversuche auf dem Shaker weisen die gleiche Beschleunigung an allen 4 Modulecken auf. Während der Modulmontage ist es aber sehr wahrscheinlich, dass nur eine oder zwei Ecken der Maximalbeschleunigung ausgesetzt sind, beispielsweise durch Aufsetzen einer Ecke während des Tragens oder durch Kippen des Moduls über

eine Kante beim Ablegen. In solchen Fällen wird eine geringere Energiemenge in das Modul eingebracht, was zu einer kleineren Auslenkung der Modulmitte führt als berechnet. Insofern ist davon auszugehen, dass die aufgetragenen Modulmittenauslenkungen deutlich überschätzt sind. Geht man von einer Halbierung der berechneten Modulmittenauslenkungen aus, z.B. aufgrund des Ablegens des Moduls durch Kippen über eine Kante, befinden sich die Modulmittenauslenkung (max. 16 mm) noch in einem für Zellbruch unkritischen Bereich. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass während der beobachteten Montagen ausgesprochen vorsichtig mit den Modulen umgegangen wurde.

## **5.2 Besondere Belastungsformen während der Installation und Montage von PV-Modulen**

Tab. 6 zeigt die von C.Olschok [3] und dem ISFH während der Montage beobachteten Belastungsszenarien für PV Module. Die unfallartigen Belastungen Lfd. Nr. 1-10 wurden bereits von C.Olschok et.al. untersucht. Im Folgenden beschränken wir uns deshalb auf die verbotenen, aber häufig beobachteten Lfd. Nr. 8-10 und die üblichen Handhabungsfehler Lfd. Nr. 11-12, die zu Zellbruch führen.

Tab. 6: Beobachtete Montagelasten: Lfd. Nr. 1 – 10: aus [3]. Die mit \* gekennzeichneten Einträge wurden auch in ähnlicher Form vom ISFH beobachtet. Lfd. Nr. 11 – 13: Zusätzliche Beobachtungen vom ISFH. Kategorien: Lfd. Nr. 1 – 6: in rot Unfall; Lfd. Nr. 7 – 10: Verbotene Handhabung, aber häufig zu beobachten in orange; Lfd. Nr. 11 – 13: Übliche Handhabung in grün.

Nr.	Beobachtete Montagelasten	Auswirkung
1	Umkippen aus senkrechtem Stand auf Glasseite	Zellbruch
2	Umfallen einer Modulpalette (Senkrechttransport)	Zellbruch, Glas
3*	Schlecht verpackte Modulpalette (Waagrechttransport)	Zellbruch
4	Waagerechter Sturz aus bis zu 95 cm	Zellbruch, erheblich
5	Senkrechter Sturz aus bis zu 75 cm	Rahmen
6*	Abrutschen vom Rahmen und Ziehen einer Modulrahmenecke über andere Modulrückseite	Zellbruch, Rückseitenfolie
7	Ziehen Modulrückseite über Leiter	Rückseitenfolie
8*	Gehen auf Modulrahmen	Zellbruch
9	Überqueren Generatorfeld	Zellbruch
10	Herabfallen Werkzeug	Zellbruch
11	Herabfallen einer Modulseite aus geringer Höhe (ca. 15 cm) durch Haken der Stapelecken	Zellbruch
12	Unsanftes Ablegen des Moduls auf Unterkonstruktion	Zellbruch
13	Kopf über Tragen (Modulrückseite liegt auf Helm auf)	keine

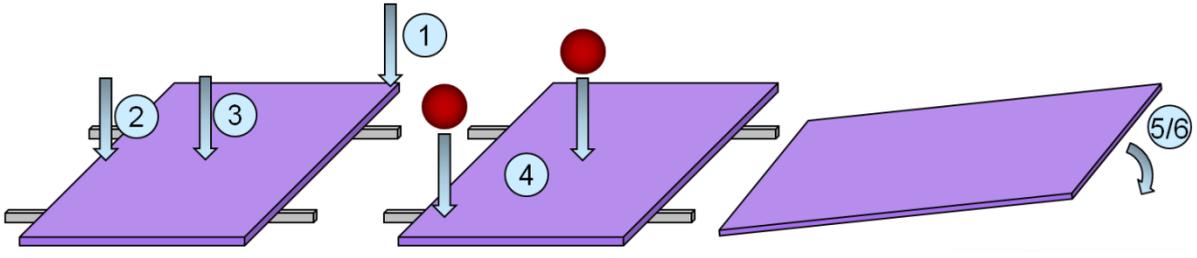
## 6 Prüfung von Modulhandhabung

Aufgrund der von C.Olschok et.al. und dem ISFH beobachteten Montagelasten wird ein reproduzierbarer Prüfablauf entworfen, um Montagelasten möglichst realitätsnah nachstellen zu können. Mit dieser Prüfung werden zwei Modultypen geprüft, um die relevantesten Schädigungseinflüsse ermitteln zu können.

Ein wesentlicher Unterschied zu den Prüfungen von C.Olschok et.al. ist, dass alle von uns vorgesehenen Prüfungen mit ansteigenden Belastungen erfolgen, um feststellen zu können, ab welcher Belastung Schäden auftreten. Außerdem wird bei unseren Prüfungen berücksichtigt, dass Montagearbeiten auch bei niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Aus anderen Arbeiten ist bekannt, dass Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu ganz anderen Schadensbildern führen und das die PV-Module in diesem Fall durch die Versteifung des Laminationsmaterials wesentlich anfälliger sein können [2]. Die niedrigste Temperatur, die wir während einer Modulmontage beobachtet haben ist  $-5^{\circ}\text{C}$ . Deshalb werden alle Prüfungen bei  $25^{\circ}\text{C}$  und  $-5^{\circ}\text{C}$  durchgeführt, da Modulinstallationen sowohl im Sommer, als auch im Winter durchgeführt werden. Ein senkrechter Falltest wird nicht durchgeführt, da in den Experimenten von C.Olschok et.al. und Vorversuchen von uns bei diesem Handhabungsfehler (Nummer 5) keine Zellrisse zu beobachten sind. Auch das Ziehen der Modulrückseite über eine Leiter (Nummer 7) und das Kopf über Tragen eines Moduls (Nummer 13) zeigen keinen Einfluss auf Zellrissebildung und werden daher nicht in unsere Prüfung aufgenommen. Wir konzentrieren uns bei unserer Prüfung auf Handhabungen (Nummer 8 – 12), die üblich sind und einem typischen Installateur als unproblematisch erscheinen. In Tab. 7 sind die einzelnen Prüfungen zusammengefasst. Mit diesen Prüfungen ist es möglich, die Stärken und Schwächen bestimmter Modultypen zu bestimmen, bzw. diese gezielt zu optimieren.

Tab. 7: Übersicht der durchgeführten Montagelastprüfungen

Nr.	Testbeschreibung	Temperatur	# Module
1	Belasten Rahmenecke mit steigendem Gewicht	-5°C / 25°C	2
2	Belasten Rahmen lange Seite mit steigendem Gewicht	-5°C / 25°C	2
3	Belasten Modulmitte mit steigendem Gewicht	-5°C / 25°C	2
4	Herabfallen Kegelkugel auf Modulmitte /-ecke über Zellen mit steigender Fallhöhe	-5°C / 25°C	2
5	Modul fallen lassen über Kante mit steigender Fallhöhe, Sunny-side down	-5°C / 25°C	2
6	Modul fallen lassen über Kante mit steigender Fallhöhe, Sunny-side up	-5°C / 25°C	

Die Tests 1 bis 3 simulieren das Betreten der installierten Module bzw. ihrer Rahmen. In diesen Tests betreten Mitarbeiter/innen des ISFH die zu belastenden Stellen langsam, die Belastung wird 5 s gehalten und das Modul wieder langsam verlassen. Durch diesen Ablauf sollen sowohl langsames Gehen, als auch Stehen/Knien auf dem Modul nachempfunden werden. Test 4 simuliert das Herabfallen eines Werkzeugs auf die Moduloberfläche. Mit Test 5 wird das Herabfallen einer Modulseite aus geringer Höhe durch Haken der Stapellecken simuliert. In Test 6 wird das unsanfte Ablegen des Moduls auf der Unterkonstruktion oder eine Palette simuliert.

## **6.1 Vorgehensweise Prüfung Handhabungsfehler**

Alle Tests werden mit 2 Modultemperaturen durchgeführt. Diese sind 25 °C und -5 °C. Für jede Temperatur wird ein neues Modul verwendet. Vor Beginn eines Tests muss sich das Modul mind. 30 Minuten auf der Testtemperatur befinden. Die Testpersonen werden vor dem Test gewogen und über einen Rucksack und zusätzliche Gewichte wird gegebenenfalls das effektive Gewicht der Testperson angepasst.

Vor jeder Testreihe und nach jedem Testschritt werden EL-Aufnahmen und eine Leistungsbestimmung des Moduls angefertigt. Mittels Differenzbildanalyse und / oder manuellem Bildvergleich werden neu entstandene Risse festgestellt.

### **6.1.1 Modultrittbelastungen**

In diesen Tests (Test 1, 2 und 3) betreten Testpersonen das horizontal montierte Modul an unterschiedlichen Positionen.

#### **Versuchsaufbau**

Die Montage der Module erfolgt mittels 4 Klemmungen auf einem Zweischienensystem des Modulherstellers, welches fest mit einer Alu-Unterkonstruktion verbunden wird. Die zulässigen Klemmbereiche am Modul werden gemäß der Montageanleitung des Herstellers für die Prüfung beachtet. Über dem Modul, 8 cm neben der zu belastenden Stelle, wird ein Laserdistanzsensor platziert, um die Auslenkung der belasteten Stelle aus der Ruhelage zu erfassen.

Das Gewicht der Testperson wird über eine elektronische Waage bestimmt. Die Gewichtsbelastungen des Moduls werden von 50 kg bis 120 kg in 10 kg Schritten gesteigert. Die Testperson muss während des Tests Schnitenschutzstiefel, Lederhandschuhe und eine Schutzbrille für den Fall eines Glasbruchs tragen. Während der Modulbelastung soll die Testperson die Knie nicht durchdrücken, um im Falle eines Durchbruchs des Moduls den Sturz besser abfedern zu können.

#### **Belasten Rahmenecke**

Die Montage der Module erfolgt mit kleinstmöglichem Abstand der Montageklammern zueinander. Für die ersten beiden Tests werden 2 Module nebeneinander montiert und beide nebeneinanderliegende Modulecken gleichmäßig zunächst mit 50 kg und anschließend mit 70 kg belastet. Der Fuß wird für die Belastung der einzelnen Modulecke auf die Rahmenecke gestellt, für die Belastung beider Modulecken gleichmäßig auf beide Rahmenecken.



**Abb. 29: Belasten der Rahmenecke.**

### **Belasten Rahmen in der Mitte der langen Seite**

Die Montage der Module erfolgt mit größtmöglichem Abstand der Montageklemmen zueinander. Der Fuß wird für die Belastung längs auf den Rahmen in der Mitte der langen Modulseite gestellt.



**Abb. 30: Belasten Rahmen in der Mitte der langen Seite.**

### **Belasten der Modulmitte**

Die Montage der Module erfolgt mit größtem möglichem Abstand der Montageklemmen zueinander. Der Fuß wird für die Belastung genau mittig auf das Modul gestellt.



**Abb. 31: Belasten der Modulmitte.**

### **Versuchsablauf**

Die Testperson stellt sich mit einem Fuß einmal auf die zu belastende Position, verharrt dort 5 Sekunden und entfernt die Belastung anschließend vollständig vom PV Modul. Das PV-Modul wird nur an der gewünschten Stelle belastet. Der Vorgang des Aufsetzens des Fußes soll innerhalb einer Sekunde erfolgen („wie langsames Gehen“). Nach jeder Belastung wird eine EL-Aufnahme erstellt und eine Leistungsbestimmung durchgeführt.

### **Versuchsauswertung**

Das Gewicht der ersten Rissbildung jeder Zelle wird in ein Modulschema eingetragen. Die unterschiedlichen Gewichte werden farblich hervorgehoben. Die jeweilige Belastungsposition wird markiert.

Die Modulauslenkung 8 cm neben der Belastungsstelle und die Anzahl der Zellen mit neuen Rissen werden über dem Belastungsgewicht aufgetragen.

### **Diskussion**

Die ausgewählten Belastungspositionen sind jeweils herausragende besondere Belastungspunkte. Gerade Trittstellen im Rahmenbereich können bei Belastung auf die Glasfläche zu Zellrissen führen. Die Belastung der Glasfläche ist bei dieser Prüfung explizit gewollt, weil Sie auch in Realität auftritt. Jedoch gibt es gerade während der Montage auf sehr schrägen Dächern z.B. 30°-45° die Situation, dass so schräg von der Seite auf den oberen Rahmen getreten wird, das ein Berühren der Glasfläche mit einer Schuhkante sehr unwahrscheinlich ist. Diese Art von Tritt wird mit dieser Prüfung nicht abgedeckt und wurde auch nicht untersucht.

## **6.1.2 Kugelfalltests über Zellen**

Auf horizontal montierte Module wird eine Kugel auf unterschiedliche Positionen fallen gelassen (Test 4). Diese Kugelfalltests sollen ein Herabfallen eines Werkzeugs (z.B. Akkuschauber) auf das installierte Modul simulieren.

## Versuchsaufbau

Die Montage der Module erfolgt mittels 4 Klemmungen auf einem Zweischiensystem des Modulherstellers, welches fest mit einer Alu-Unterkonstruktion verbunden wird. Die Montage der Schienen erfolgt an den langen Modulseiten mit minimalem Modulüberstand über die Befestigungspunkte.

Als Fallobjekt dient eine „Jugend C“ Kegelkugel mit  $130\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$  Durchmesser und einem Gewicht von  $1515\text{ g}$ . Die Oberflächenhärte der Kegelkugel beträgt bei  $20\text{ °C}$   $75 \pm 5$  Grad Shore D. Die Kugel wurde nach den technischen Vorschriften des Deutschen Kegler- und Bowlingbundes e. V. gefertigt [4]. Die Kugel wird bei Raumtemperatur gelagert, damit ihre Oberflächenhärte bei allen Versuchen gleich bleibt. Das Gewicht und die Shore Härte entspricht etwa dem Gewicht eines Typischen Akkuschraubers. Von 2687 (100%) im Internet recherchierten Akkuschraubern liegen 1369 (50%) im Bereich zwischen 1 bis 2 kg Gewicht (September 2014). Nur 451 (17%) davon wiegen über 2,5 kg.



**Abb. 32: Versuchsaufbau Kugelfalltest.**

Die Kugelfalltests erfolgen auf zwei unterschiedliche Modulbereiche: Modulecke (X) und Modulmitte (O). Aus Symmetriegründen stehen je Position (X,O) 4 Zellpositionen für die Kugelfalltests zur Verfügung. Die zu testenden Zellen dürfen vor den Tests keine Risse aufweisen. Falls eine Zelle in der Modulmitte einen Riss aufweist kann auf eine mittige Nachbarzelle ausgewichen werden. Die Kugel soll mittig auf die Zellen treffen. Die direkt getroffene Zelle wird als Primärzelle bezeichnet. Zellen, die bei einem Versuch nicht direkt getroffen werden, werden als Sekundärzellen bezeichnet. Es wird verhindert, dass die Kugel nach dem Aufprall andere Bereiche trifft als die Primärzelle. Die Kugel wird an ein höhenverstellbares Gestell mit Auslösevorrichtung gehängt, welches neben das Modul gestellt wird. Zur Positionierung des Gestells dient ein Lot. Die Kegelkugel wird mit einem Saugnapf mit Unterdruck in Position gebracht. Über die Belüftung des Saugnapfs wird der Fall eingeleitet.

X									X
			O			O			
			O			O			
X									X

Abb. 33: Positionen für Kugelfalltests.

### Versuchsablauf

Die Kugelhalterung wird so platziert, dass sich das Lot mittig über der zu prüfenden Zelle befindet. Das Lot wird anschließend ausgehängt, die Kugel befestigt und diese anschließend ausgelöst. Im Anschluss wird eine EL-Aufnahme angefertigt und eine Leistungsbestimmung durchgeführt.

Die Fallhöhe wird von 5 cm mit einer Schrittweite von 5 cm bis auf 20 cm und anschließend mit einer Schrittweite von 10 cm bis auf maximal 100 cm gesteigert. Nach jedem Kugelfalltest wird eine EL-Aufnahme angefertigt und eine Leistungsbestimmung durchgeführt. Mittels Differenzbildanalyse werden neue Zellrisse identifiziert. Sobald eine Primärzelle einen Riss aufweist, wird eine neue Zellposition für den nächsten Kugelfalltest mit der nächsthöheren Fallhöhe verwendet. Ist bei einer Primärzelle ein Sternriss entstanden, wird für die nächste Zellposition wieder mit der kleinsten Fallhöhe fortgefahren. Weisen alle 8 Zellen Risse auf, wird die Testreihe beendet.

### Versuchsauswertung

Die Kugelfallhöhe und zugehörige Kugelfallposition der ersten Rissbildung jeder Zelle wird erfasst. Zu der Kugelfallhöhe wird eine äquivalente Kugelfallhöhe für eine 45°-Modulmontage angegeben.

### Diskussion

Die Auswahl der Zellmitte als Fallposition kann evtl. zu besonders schnellem Bruch führen, weil gerade an dieser Stelle die Kugel das Verbinderbändchen auf der Zelle trifft. Der Bereich um das Verbinderbändchen ist ein besonders empfindlicher Bereich auf der Zelle, weil dort durch eingefrorene Eigenspannungen vom Lötprozess die Zelle eine besonders hohe Stresskonzentration aufweist.

### 6.1.3 Fallenlassen des Moduls über die kurze Kante

Dieser Versuchsteil entspricht den Tests 5 und 6.

#### Versuchsaufbau Sunny-side down

Das Modul wird mit der Glasseite nach unten auf ein weiteres Modul gelegt. Die Lagerung erfolgt über Stapelecken. Die Stapelecken, auf die das Modul auftreffen soll, werden so ausgeschnitten, dass nur die Auflagefläche übrig bleibt, um zu verhindern, dass das Modul auf eine überstehende Kante der Stapelecke trifft. Die Modulkante über die das Modul fallengelassen wird, wird mit Klebeband fixiert, um ein Verrutschen des Moduls während der Fallprüfung zu verhindern. Das Modul wird in der Mitte des Rahmens der gegenüberliegenden kurzen Seite mit einem Stab aufgestellt. An dem Stab befindet sich eine Zugschnur, über die der Stab ruckartig entfernt wird, und das Modul auf das darunterliegende Modul fällt. Es wird die Seite mit der Anschlussdose angehoben.



**Abb. 34: Modulkipptest Sunny-side down.**

#### **Versuchsaufbau Sunny-side up**

Das Modul wird mit der Glasseite nach oben direkt auf eine Palette gelegt. Das Modul wird in der Mitte des Rahmens der kurzen Seite mit einem Stab aufgestellt. An dem Stab befindet sich eine Zugschnur, über die der Stab ruckartig entfernt wird, und das Modul auf die Palette fällt. Die Palette verfügt über ausreichend große Lücken um eine Dämpfung des Falls durch ein Luftpolster zu verhindern. Es wird die Seite mit der Anschlussdose angehoben. Das Anschlusskabel wird so geführt, dass es beim Fall nicht zwischen Modul und Palette eingeklemmt werden kann.



**Abb. 35: Modulkipptest Sunny-side up.**

## Versuchsablauf

Die Fallhöhe wird von 5 cm mit einer Schrittweite von 5 cm bis auf 20 cm gesteigert. Anschließend wird die Fallhöhe um je 10 cm erhöht, Sunny-side down bis auf 50 cm, Sunny-side up bis auf 30 cm. Nach jedem Kipptest wird eine EL-Aufnahme angefertigt und die Modulleistung bestimmt.

## Versuchsauswertung

Die Fallhöhe der ersten Rissbildung jeder Zelle wird in ein Modulschema eingetragen. Die unterschiedlichen Fallhöhen werden farblich hervorgehoben. Die kumulierte Anzahl der Zellen mit neuen Rissen werden über der Fallhöhe aufgetragen.

## 6.2 Ergebnisse der Modul Handhabungsprüfung

In den Diagrammen in Abb. 36 und Abb. 37 sind die Ergebnisse der Trittbelastungsprüfungen für beide Modultypen und Prüftemperaturen dargestellt. In der oberen X-Achse ist zu Vergleichszwecken die gerechnete äquivalente Trittbelastung ( $m_{45}$ ) von Modulen mit einer 45° Neigung zur Horizontalen aufgetragen.

$$m_{45} = \frac{m}{\cos(45^\circ)} \quad (3)$$

Die Datenreihen zeigen die Durchbiegung des Moduls 8 cm neben der belasteten Stelle in Abhängigkeit des Belastungsgewichts. Die eingekreisten Belastungsfälle haben zu Zellrissen geführt. Die jeweilige Zahl gibt die Anzahl der gerissenen Zellen an.

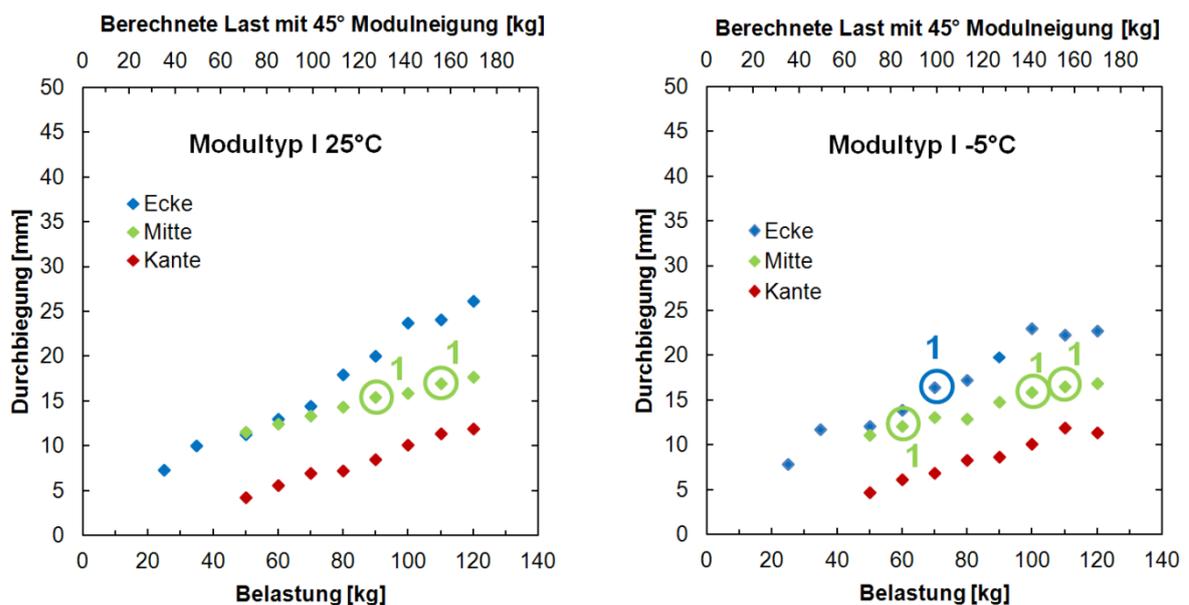


Abb. 36: Durchbiegung der belasteten Modulposition in Abhängigkeit des Belastungsgewichts, unterschieden nach Modultemperatur. Die eingekreisten Belastungsfälle haben zu Zellrissen geführt. Die jeweilige Zahl gibt die Anzahl der gerissenen Zellen an.

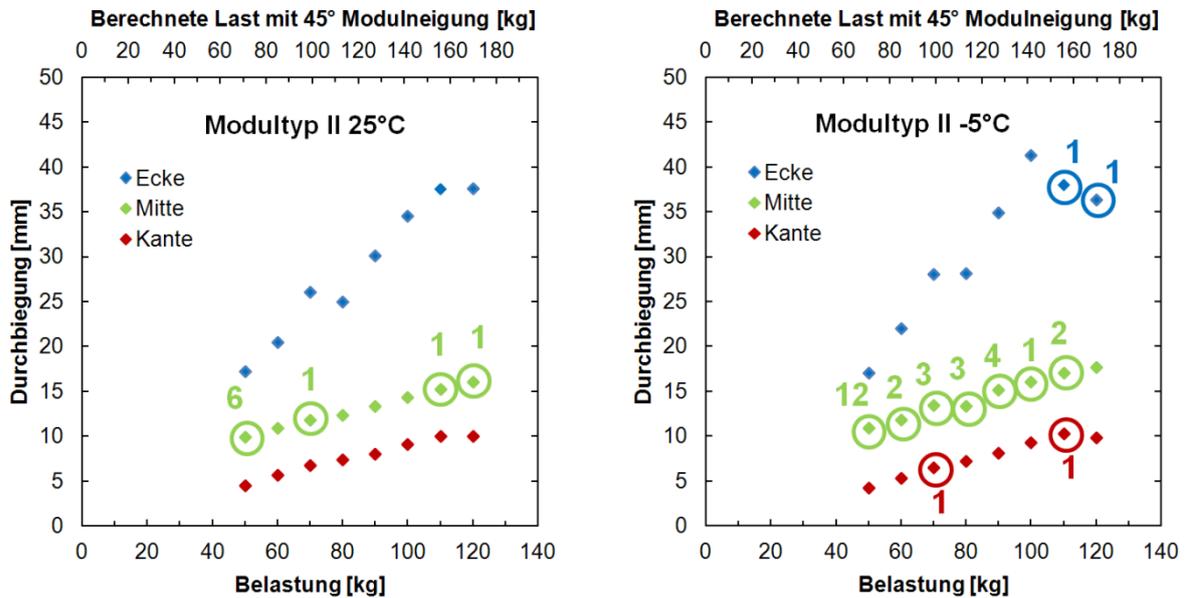
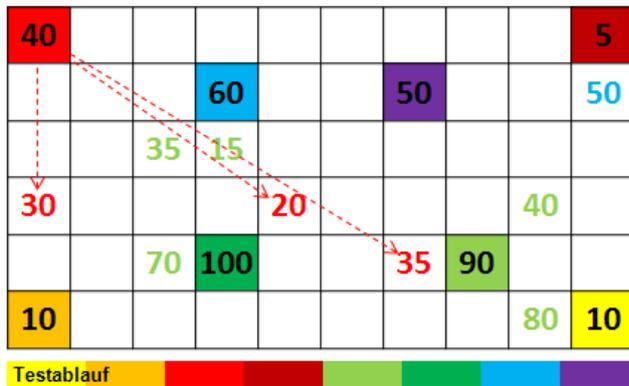


Abb. 37: Durchbiegung der belasteten Modulposition in Abhängigkeit des Belastungsgewichts, unterschieden nach Modultemperatur. Die eingekreisten Belastungsfälle haben zu Zellrissen geführt. Die jeweilige Zahl gibt die Anzahl der gerissenen Zellen an.

Trotz deutlich größerer Durchbiegung bei Belastung der Modulecke treten hier die wenigsten Risse auf. Dies resultiert aus der umgekehrten Biegerichtung im Vergleich zur Belastung der Modulmitte. Die Zellen werden durch die Belastung der Modulmitte und der Rahmenmitte gestreckt und durch die Belastung der Modulecke gestaucht. Die deutlich größere Durchbiegung bei Belastungen der Modulecke von Modultyp II resultiert auch in einem größeren zulässigen Abstand der Montageschienen zur Modulecke. Wie erwartet führen die Belastungen bei -5 °C zu mehr Zellrissen als die Belastungen bei 25 °C. Grundsätzlich ist ein Betreten der Modulmitte als kritisch zu betrachten, das Betreten des Modulrahmens ist für 25 °C Umgebungstemperatur selbst für das empfindlichere Modul vom Typ II unkritisch.

Abb. 38 a) zeigt beispielhaft die Verteilung von Zellrissen nach Durchführung der Kugelfalltests. Die Zahlen geben die Kugelfallhöhe an, die zu Zellrissen der jeweiligen Zelle geführt hat. Die Farbe der Zahl soll veranschaulichen, zu welcher Kugelfallposition das Rissereignis gehört. In vielen Fällen treten zunächst Zellrisse in anderen als der von der Kugel getroffenen Zelle auf (Sekundärrisse). So werden beim Kugelfalltest auf die rote Zelle (links oben) zunächst 3 andere Zellen bei Fallhöhen von 20, 30 und 35 cm geschädigt, bevor in der getroffenen Zelle bei 40 cm Fallhöhe markante sternförmige Trümmerbrüche entsteht, wie in Abb. 38 b) zu sehen ist. Die Sekundärrisse zeigen keine spezifische Form.

a)



b)

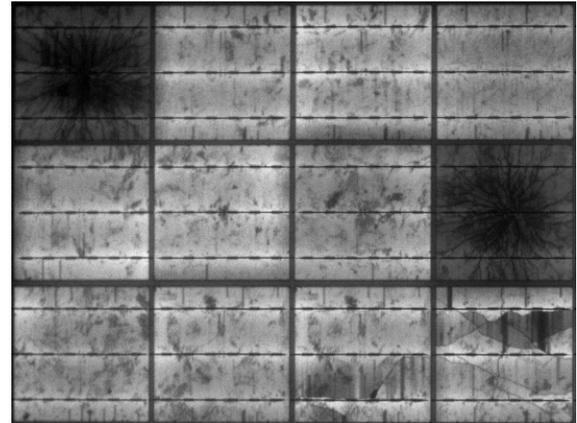


Abb. 38: a) Detaillierte Rissverteilung eines Kugelfalltests. Die 8 farbigen Zellen veranschaulichen die zugehörigen Kugelfallpositionen. Die Zahlen geben die Kugelfallhöhe der ersten Rissbildung in den Zellen an. Die Zahlfarbe veranschaulicht die zugehörige Kugelfallposition der Sekundärrisse. Beispielhaft zeigen die roten Pfeile auf die Zellen, in denen aufgrund des Kugelfalls auf die rote Zelle Risse entstanden sind. b) Elektrolumineszenzaufnahme eines Teils (links oben) desselben Moduls nach Durchführung der Kugelfalltests.

In Abb. 39 sind alle Kugelfallhöhen mit Rissbildung in Abhängigkeit der Kugelfallposition sowie der Modultemperatur aufgetragen. Die zweite Y-Achse weist die gerechneten äquivalenten Kugelfallhöhen  $h_{45}$  einer 45° Modulneigung aus:

$$h_{45} = \frac{h}{\cos(45^\circ)} \quad (4)$$

Die Quadrate markieren die Rissbildungen der direkt von der Kugel getroffenen Zellen (Primärrisse). Die Gesamtanzahl der gerissenen Zellen ist in diesen Diagrammen nicht ablesbar, da pro Fallhöhe auch mehrere Zellrisse entstanden sind. Die waagerechten Striche markieren die mittlere Kugelfallhöhe aller Zellrisse.

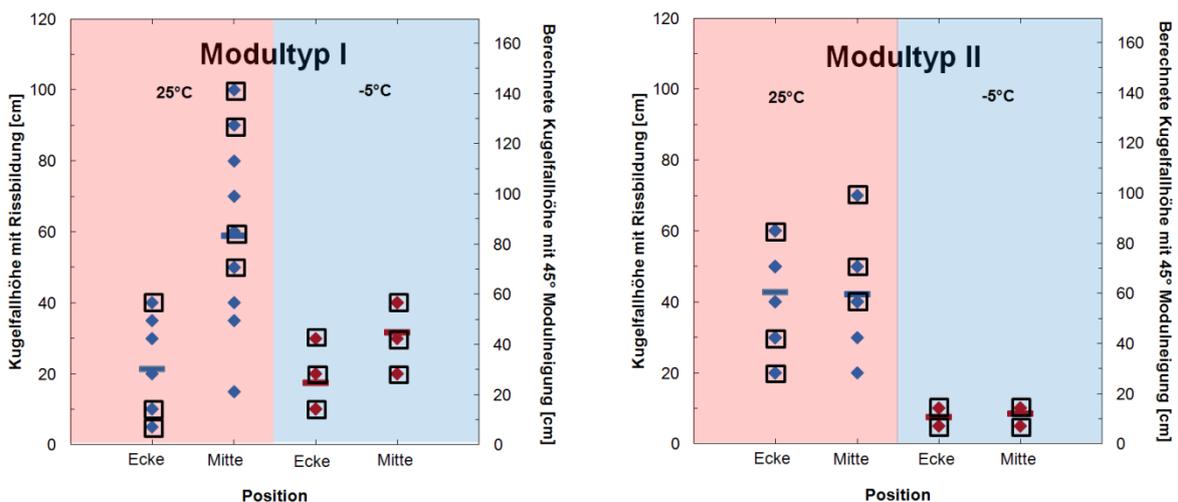


Abb. 39: Vergleich der Kugelfallhöhen mit Rissbildung in Abhängigkeit der Kugelfallposition und der Modultemperatur. Die Quadrate markieren die Rissbildungen der direkt von der Kugel getroffenen Zellen. Die Markierungen ohne schwarze quadratische Umrandung sind Sekundärrisse.

In Abb. 39 ist zu sehen, dass bei niedrigen Temperaturen die meisten Zellrisse schon bei geringeren Kugelfallhöhen auftreten, und nur direkt getroffene Zellen Risse aufweisen. Des Weiteren treten die meisten Primärzellrisse in den Modulecken schon bei niedrigeren Kugelfallhöhen als bei Zellen in der Modulmitte auf. Die Modulmitte ist also weniger anfällig gegenüber Primärrissen als die Modulecken. In der Modulmitte werden im Mittel höhere Fallhöhen benötigt um Zellrisse zu erzeugen als an einer Modulecke. Bei Modultyp II ist dieser Unterschied jedoch sehr gering.

Die Stoßenergie der Kegelkugel beim Aufprall auf die Glasoberfläche lässt sich aus der potentiellen Energie entsprechend der Fallhöhe der Kegelkugel bestimmen:

$$E_p = mgh. \quad (5)$$

Die Masse  $m$  beträgt für die Kegelkugel 1,515 kg,  $h$  ist die Fallhöhe und  $g$  ist die Erdbeschleunigung mit  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Für die verwendete Kegelkugel, wie sie hier zur Anwendung kommt, beträgt die durch Luftreibung verlorene Energie bis zu einer Fallhöhe von 1 m 0,33% der potentiellen Energie. Aus diesem Grund kann die Aufprallenergie mit der Formel für die potentielle Energie  $E_p$  bestimmt werden ohne die Verluste durch Luftreibung zu berücksichtigen.

In Tab. 8 sind die Fallhöhen der Kegelkugel und die entsprechende Aufprallenergie zusammengestellt. Zusammen mit Tab. 9 ermöglicht diese Tabelle einen Vergleich der Aufprallenergie der Kegelkugel mit den im Hagelregister des VKF (Verband der kantonalen Feuerversicherer in der Schweiz) und der Norm IEC 61215 festgelegten Hagelklassen.

**Tab. 8: Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Aufprallenergie der Kegelkugel.**

Fallhöhe	Aufprallenergie der Kegelkugel
[cm]	[J]
5	0,74
10	1,49
15	2,23
20	2,97
25	3,72
30	4,46
35	5,20
40	5,94
45	6,69
50	7,43
60	8,92
70	10,40
80	11,89
90	13,38
100	14,86

**Tab. 9: Hagelklassen nach IEC 61215 (10.17 Hagel Test) und nach dem „global VKF hail resistance register“ (HW3-5).**

Class	Diameter	Mass	Velocity	Aufprallenergie	Entsprechende Fallhöhe der Kegelkugel
	[mm]	[g]	[m/s]	[J]	[cm]
HW3	30	12,30	23,90	3,51	ca. 25
HW4	40	29,20	27,50	11,04	ca. 80
HW5	50	56,90	30,80	26,99	-
IEC 25	25	7,53	23,00	1,99	ca. 15
IEC 35	35	20,70	27,20	7,66	ca. 50

Tab. 10: Die Anteil der bei der Schlagprüfung aufgetretenen Brüche unterschieden nach direkt von der Kugel getroffenen Zellen (Primärrisse) und nicht von der Kugel getroffenen Zellen (Sekundärrisse).

Modul- typ	Temperatur	Direktrisse			Sekundärrisse		
		Gerissene Zellen	Stern- brüche	Anteil [%]	Gerissene Zellen	Stern- brüche	Anteil [%]
II	25°C	8	8	100,0	22	0	0,0
II	-5°C	8	3	37,5	3	0	0,0
I	25°C	8	6	75,0	9	0	0,0
I	-5°C	8	8	100,0	2	0	0,0

In Tab. 10 wird gezeigt, dass Primärrisse (direkt von Kugel getroffene Zelle) einen hohen Anteil von Sternbrüchen aufweisen, Sekundärrisse (nicht von Kugel getroffene Zellen) weisen in keinem Fall einen Sternriss auf.

Schon ab einer Kugelfallhöhe von 5 cm werden Zellrisse beobachtet. Daher ist das Herabfallen eines Werkzeugs auf die Moduloberfläche grundsätzlich als kritisch zu betrachten. Insbesondere bei Kälte und im Randbereich des Moduls besteht hierdurch eine große Gefahr der Bildung von Zellrissen.

Die Modulkipptests (Tests 5 und 6) spiegeln zwei Szenarien wieder. Das Kippen des Moduls auf ein anderes Modul mit Sunny-side down (Test 5) konnte nahezu identisch beim Handling von Modulen beobachtet werden. Durch Klemmen der Stapelecken wurde beim Anheben eines Moduls das darunterliegende versehentlich an einer Seite mit angehoben und fiel aus einer Höhe von ca. 15 cm wieder zurück auf den Modulstapel. Das Kippen des Moduls auf eine Palette mit Sunny-side up (Test 6) spiegelt ein unsanftes Ablegen des Moduls auf den Montageschienen oder anderen Paletten wieder. Die Module werden über eine kurze Kante mit ansteigenden Kipphöhen fallen gelassen. Nach jedem Kippversuch wird eine Elektrolumineszenzaufnahme angefertigt und mittels Differenzbildanalyse die Zellrisse erfasst. Im Test 5 werden die Module auf den Stapelecken des Herstellers gelagert. Um das versehentliche Auftreffen des Moduls auf eine Stapeleckenkante zu vermeiden, werden die beiden Stapelecken der Auftreffseite eben geschliffen. In der Realität kann dies allerdings passieren, und die Punktbelastung an nur einer Ecke kann zu höheren Belastungen führen.

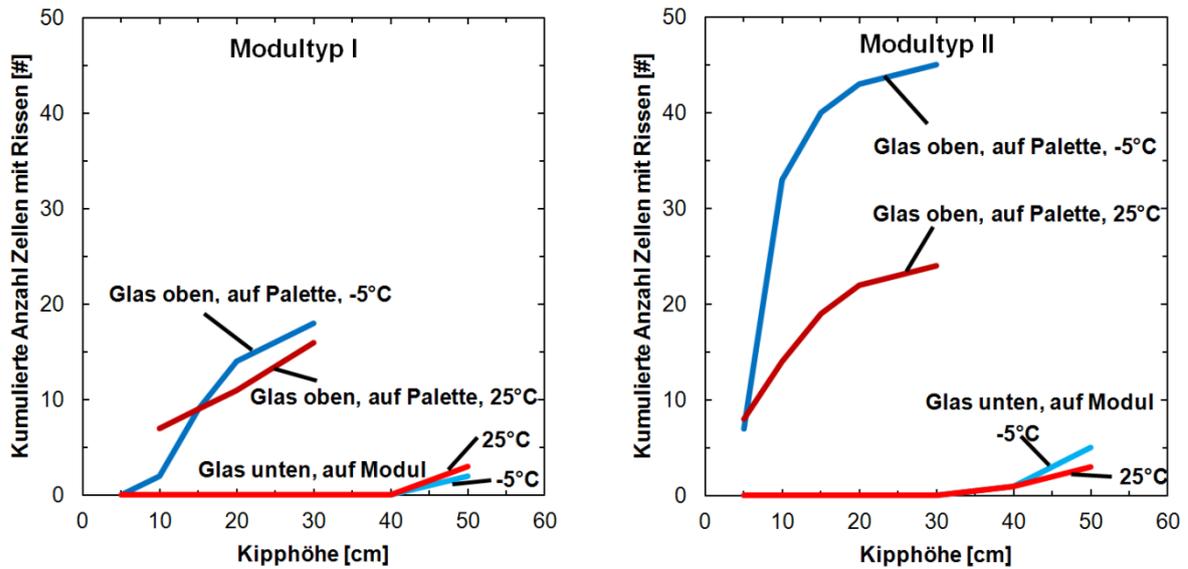


Abb. 40: Vergleich der kumulierten Anzahl gerissener Zellen in Abhängigkeit der Kipphöhe und der Modultemperatur. Zwei Testarten werden unterschieden: Kippen auf ein weiteres Modul, Sunny-side Down (Glas unten) und Kippen auf eine Holzpalette Sunny-side Up (Glas oben).

Die Auswertung der Modulkipptests in Abb. 40 zeigt eine deutlich geringere Rissbildung der Tests mit Sunny-side down. Dies liegt zum einen daran, dass die Zellen in dieser Belastungsrichtung gestaucht werden, zum anderen konnten wir eine Dämpfung des Modulfalls durch das Luftpolster zwischen den Modulen feststellen. Die Kipptests mit Sunny-side up zeigen schon ab 5 cm Kipphöhe eine deutliche Rissbildung. Verantwortlich hierfür ist eine Zugbelastung in den Zellen bei dieser Belastungsrichtung. Eine niedrige Modultemperatur führt meist zu einer verstärkten Rissbildung.

Ein unachtsames Ablegen von Modulen mit Sunny-side up ist als kritisch einzustufen, und sollte vermieden werden, da bereits die kleinste getestete Kipphöhe von 5 cm zu relevanten Zellrissen führt. Es ist nicht auszuschließen, dass auch bei kleineren Kipphöhen als 5 cm erste Risse entstehen. Die Kipptests mit Sunny-side down erscheinen eher unkritisch, da sie erst ab einer Kipphöhe über 30 cm zu Zellrissen führen. Allerdings wurde bei der für diese Testreihe zugrundeliegenden Beobachtung einer realen Situation bereits ein Zellriss bei einer Fallhöhe von ca. 15 cm festgestellt. Evtl. ist das Modul in diesem Fall auf eine Kante der Stapellecken gestürzt und wurde dadurch stärker belastet.

## 7 Empfehlungen für Modulhandhabung

Anhand der vorangegangenen Ergebnisse der Prüfungen werden Handlungsempfehlungen für den Umgang mit PV-Modulen abgeleitet.

### **Folgende Handhabungen sollen mit Solarmodulen nicht durchgeführt werden:**

1. Solarmodule dürfen nicht auf der Glas- oder Rückseitenfläche betreten werden.
2. Insgesamt gesehen ist die Zellrisswahrscheinlichkeit beim Betreten des Rahmens eher gering. Ein Abstützen oder Betreten des Modulrahmens sollte jedoch trotzdem vermieden werden, da insbesondere bei niedrigen Temperaturen Zellrisse schon bei relativ niedrigen Belastungsgewichten auftreten können.
3. Es dürfen keine Schläge auf Vorder- oder Rückseite der PV Module ausgeübt werden. Der Fall eines Akkuschraubers auf die Glasseite eines PV Moduls mit ca. 1,5 kg Gewicht kann schon ab 5 cm Fallhöhe zur Rissbildung in den Solarzellen führen.
4. Beim Abstapeln der Solarmodule, insbesondere bei Sunny-side down Horizontalstapeln, muss sichergestellt werden, dass die Modulecke des entnommenen Moduls nicht auf die Modulrückseite des darunter liegenden Moduls aufsetzt. Durch das Aufsetzen wird in die darunterliegenden Solarzellen Kreuzrisse induziert und beim Herüberziehen eine Kreuzrisslinie. Außerdem wird evtl. die Isolationswirkung der Rückseitenfolie durch eine Verletzung der Rückseitenfolie beeinträchtigt. Dies kann Isolationsfehler und ein Sicherheitsrisiko in einem PV-System verursachen.
5. Solarmodule dürfen nicht mit Sunny-side up fallen gelassen werden, auch nicht nur eine Seite, da dies schon aus einer Höhe von nur 5 cm zu erheblichen Zellschäden führen kann.

### **Empfehlungen zur Handhabung von PV-Modulen:**

1. Solarmodule sollten möglichst stets senkrecht getragen werden, damit bei Fall oder Absetzen des Moduls die Solarzellen nicht beschädigt werden. Eine leichte Deformation des Modulrahmens ist für die Modulfunktion unkritischer, als die Beschädigung der Solarzellen.
2. Solarmodule dürfen nur auf dem Rücken einer Person getragen werden, wenn sich auf dem Rücken der Person keine harten oder scharfen Teile befinden. Die Solarmodule dürfen nur mit der Folienseite auf dem Rücken getragen werden. Ein Tragen auf der Glasseite ist zu vermeiden.
3. Stöße senkrecht auf den Modulrahmen sind wesentlich unkritischer als Stöße gegen die Glasseite oder Rückseitenfolie. Dies sollte beim Ablegen oder Transport über Hindernisse berücksichtigt werden, indem das Modul nach Möglichkeit auf der Rahmenseite aufgesetzt wird.
4. Falls die Generatorfläche betreten werden muss, ist das Gewicht gleichmäßig auf den Modulrahmen zu verteilen. Dazu müssen entsprechend dafür vorgesehene Hilfsmittel verwendet werden. Jedoch zeigen die Versuche, dass bei Temperaturen unter 0°C auch schon eine Belastung von 70 kg auf den Rahmen zu Zellrissen führen kann. Selbst ein Betreten mit zugelassenen Hilfsmitteln, die die Last verteilen, sollte deshalb bei Temperaturen unter 0°C vermieden werden.

5. Solarmodule müssen, wenn Sie mit der Sunny-side up abgelegt werden, z.B. beim Auflegen auf das Montagesystem, sanft abgelegt werden. Die Module dürfen nicht die letzten Zentimeter frei fallen. Gerade beim Ablegen in Schienensysteme in die der Modulrahmen eingelegt wird, ist evtl. ein sanftes Ablegen schwierig, wenn die Module Dicht an Dicht in die Schienen eingelegt werden. Es ist deshalb sinnvoll die Module so einzulegen, dass man die Module seitlich fassen kann und bis zum letzten mm sanft in die Schienen einlegt. Anschließend schiebt man die Module auf den erforderlichen Abstand zusammen.

## 8 Einfluss des Modulrahmens auf Zellbruch

Über den Modulrahmen kann evtl. die Schwingungsamplitude und die Eigenfrequenz der Glasscheibe des PV Moduls beeinflusst werden. Wichtig ist, dass zum einen der Rahmen nicht aus der Halterung herausgezogen wird, und zum anderen der Rahmen möglichst verwindungssteif ist. Je verwindungssteifer der Rahmen ist, desto weniger werden die Solarzellen bei einer Schwingung des Solarmoduls gedehnt, und damit werden Solarzellenrisse vermieden.

### 8.1 Rahmenarten

Zur Überprüfung des Einflusses des Modulrahmens auf die Schwingungsamplitude und die Eigenfrequenz werden 2 Modultypen mit unterschiedlichen Rahmen miteinander verglichen. Bei den Rahmen handelt es sich zum einen um einen einwandigen „E“-Rahmen, und zum anderen um einen Hohlkammerrahmen. Neben diesen beiden Rahmen wird eine besonders steife Laminathalterung (Abb. 41 und Abb. 42) verwendet, in die die Lamine der beiden Modultypen eingespannt werden können.

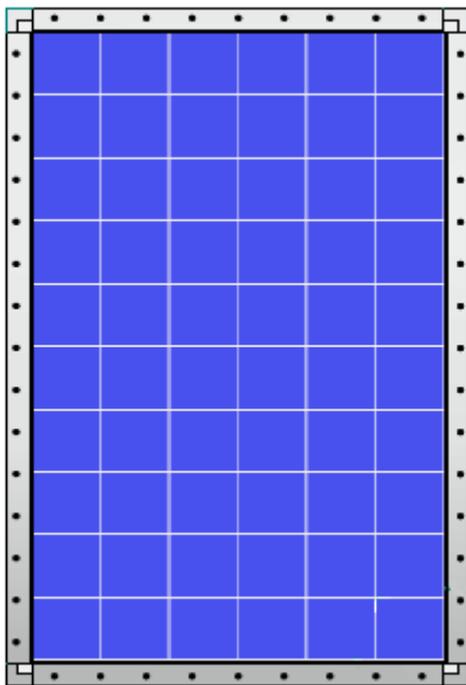


Abb. 41: Laminathalter

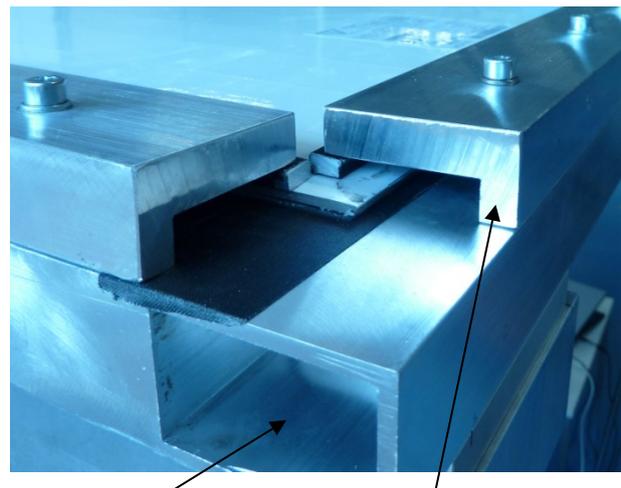


Abb. 42: Eckansicht des Laminalthalters

Der Grundrahmen dieser Laminathalterung besteht aus verschweißten Aluminiumrechteckprofilen (60 x 40 x 4 mm). Auf diesen wird die Glasseite des Laminats gelegt. Über massive Aluklemmbacken (55 x 14/25 x 10 mm) und Auflageschienen (5 x 10 mm) wird das Laminat eingeklemmt. Die Klemmbacken werden mit 48 gleichmäßig verteilten Schrauben in drei Schritten (4 Nm, 7 Nm und 10 Nm) umlaufend fixiert. Die Kontaktflächen zum Laminat sind mit feinem Gewebeklebeband versehen, um Unebenheiten auszugleichen. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen der Lamine kommt es durch die Verwendung des universellen Laminatträgers zu einer

Flächenreduktion der frei schwingenden Laminatfläche von maximal 4%. Der Einfluss dieser Flächenverringernung auf das Schwingverhalten wird als gering eingeschätzt.

## 8.2 Sinus-Resonanzanregung

Auf dem Shaker werden die PV-Module mit Sinusschwingungen in Resonanz angeregt. Die Module werden wieder Sunny-side down, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, auf dem Shaker montiert. Die maximale Auslenkung der Modulmitte (Peak to Peak) wird während der Sinusanregung mit dem unter der Modulmitte montierten Laserdistanzaufnehmer bestimmt. Es werden Beschleunigungssensoren auf einem der Eckbefestigungspunkte der Module, sowie auf der Modulmitte platziert. Die Anregungsamplitude der Modulecken beträgt  $3,5 \text{ m/s}^2$ . Zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen wird zunächst ein Sinussweep im Frequenzbereich von 5 Hz bis 100 Hz durchgeführt. Anschließend werden die so ermittelten Resonanzfrequenzbereiche mit einem langsamen Sweep (0,1 Okt./min.) mit ansteigender und abfallender Frequenz angefahren. Die Frequenz mit der maximalen Summe der Modulmittenbeschleunigung aus beiden Sweeprichtungen wird als Testfrequenz gewählt. Aufgrund von Rückkopplungen der Modulschwingungen in den Regelkreis des Shakers ist es bei einigen Prüfungen erforderlich, den Regelpunkt von der Modulecke auf einen weiteren Beschleunigungssensor auf der Shakerplattform zu verlegen. Die Beschleunigungsamplitude der Shakerplattform wird in diesen Fällen so eingestellt, dass die Modulecke wie erforderlich mit dem Sollwert von  $3,5 \text{ m/s}^2$  beschleunigt wird.

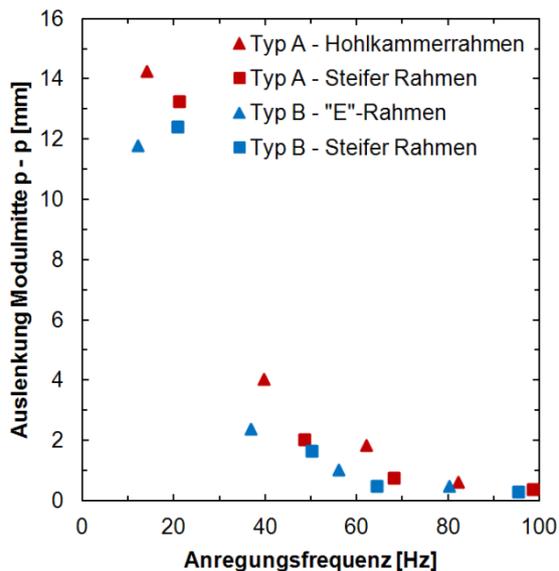


Abb. 43: Auslenkung Modulmitte durch Sinusanregung mit Resonanzfrequenzen

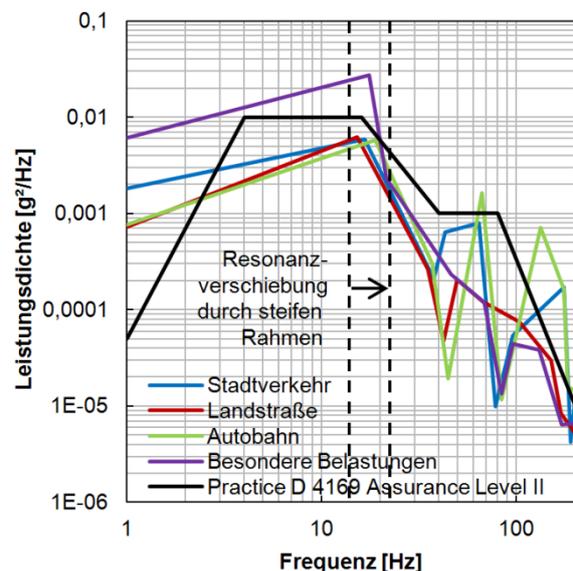


Abb. 44: Leistungsdichtespektrum Horizontaltransporte für Stadt, Landstraße, Autobahn und besondere Belastungen; Verschiebung der Resonanzverschiebung durch Verwendung des steifen Modulrahmens

In Abb. 43 sind die Auslenkungen der Modulmitte (Peak to Peak) über der Anregungsfrequenz der Sinus-Resonanzanregung aufgetragen. Das Modul mit dem Hohlkammerrahmen hat leicht höhere Resonanzfrequenzen als das Modul mit „E“-Rahmen und weist eine geringfügig höhere Auslenkung der Modulmitte auf. Durch die Verwendung des steifen Rahmens können die Resonanzfrequenzen der beiden Modultypen angehoben werden, die erwartete deutliche Verringerung der ISFH

Modulmittenauslenkung bleibt jedoch aus. In einem Fall steigt die maximale Modulmittenauslenkung sogar an. In Abb. 44 ist die Verschiebung der Resonanzfrequenz durch Verwendung des Steifen Rahmens zusammen mit den in Kapitel 2.6 ermittelten Rauschspektren aufgetragen. Die Leistungsdichte des Prüfspektrums der neuen Resonanzfrequenz weist etwa die halbe Intensität der alten Resonanzfrequenz auf. Auch die Spektren der Vibrationsmessungen weisen bei dieser Frequenz eine deutlich niedrigere Intensität auf. So ist es vorstellbar, dass die geringeren Amplituden im Resonanzbereich des Moduls auch zu geringeren Modulmittenauslenkungen der gesamten Rauschanregung führen können.

Für eine reine Sinus-Resonanzanregung lässt die Verwendung eines steiferen Rahmens keine Reduzierung der Zellrissobildung erwarten, weil keine signifikante Reduktion in der maximalen Modulmittenschwingungsamplitude in den Experimenten erreicht wurde. Der Belastungsfall mittels einer Sinus-Anregung ist während Transport und Montage nicht zu erwarten. Es ist aber vorstellbar, dass eine deutliche Erhöhung der Resonanzfrequenz durch eine Versteifung des Rahmens während des Transports zu einer Reduzierung einer resonanzbedingten Auslenkung der Modulmitte führt und somit das Zellrisiko reduziert. Dies soll im folgenden Kapitel überprüft werden.

### **8.3 Rauschanregung**

Um den Einfluss des Modulrahmens auf Modulvibrationen, wie sie bei Transporten auftreten, zu überprüfen, wird ein Modultyp zunächst mit „E“-Rahmen und anschließend mit dem steifen Rahmen einer Rauschprüfung mit einem Rauschspektrum nach Practice D 4169 Assurance Level II unterzogen. Diese Prüfung erfolgt in zwei Schritten, zunächst mit einer über den Faktor 0,8 reduzierten Leistung und anschließend mit voller Leistung (Faktor 1,0). Die Dauer der Prüfung beträgt pro Schritt 3 Stunden. Sie wird aber nach 15 min. unterbrochen, um eine Elektrolumineszenzaufnahme des Moduls anzufertigen. Nach Abschluss eines Prüfschrittes wird ebenfalls eine Elektrolumineszenzaufnahme angefertigt. Über eine Differenzbildanalyse dieser Aufnahmen werden die neu gebildeten Zellrisse identifiziert. Während der ersten 10 Minuten jeder Prüfung wird die maximale Auslenkung der Modulmitte (peak to peak) mit dem Laserdistanzaufnehmer erfasst. Die Modulmontage erfolgt analog zu den vorigen Testreihen. Der Regelpunkt des Shakers für diese Prüfung ist eine Modulecke.

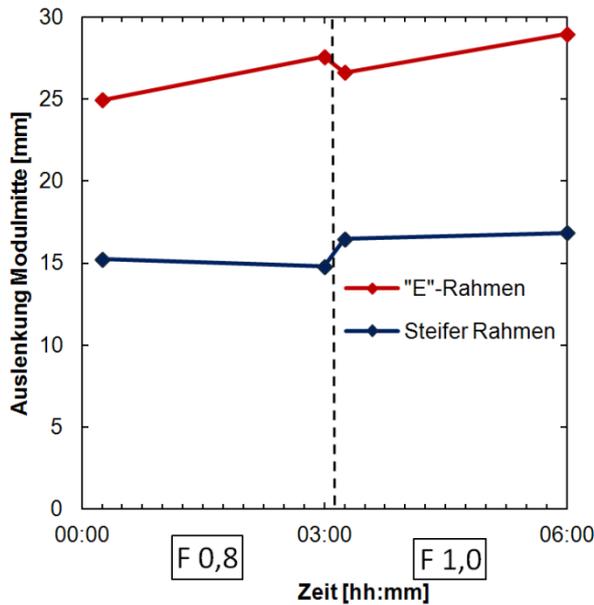


Abb. 45: Auslenkungen der Modulmitte durch Anregung mit Practice D 4169 Assurance Level II mit Verstärkungsfaktoren von F 0,8 bis F 1,0

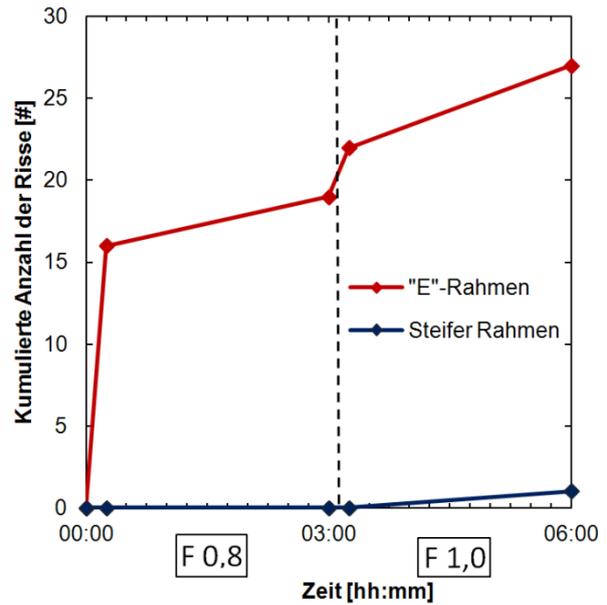


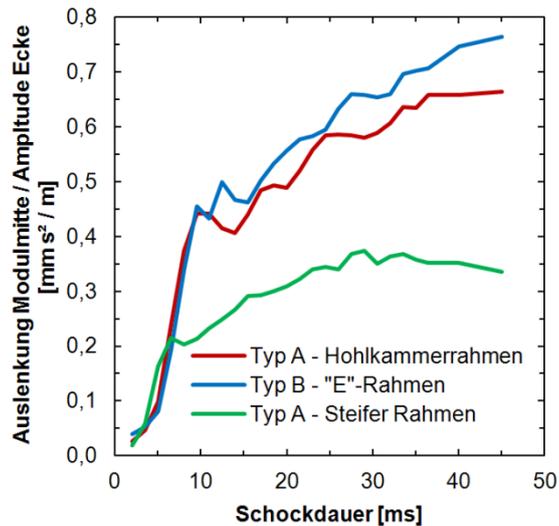
Abb. 46: Zellrissbildung durch Modulvibrationen, angeregt mit Practice D 4169 Assurance Level II mit Verstärkungsfaktoren von F 0,8 bis F 1,0

Abb. 45 zeigt die maximalen Auslenkungen der Modulmitte während der Rauschprüfung. Im Gegensatz zur Sinus-Resonanzanregung ist eine deutliche Reduzierung, nahezu eine Halbierung der Modulmittenauslenkung durch Verwendung des steifen Rahmens festzustellen. Die unterschiedlichen Modulmittenauslenkungen während eines Prüfschrittes resultieren aus der zufälligen Zusammensetzung der Anregungsfrequenzen aus dem Rauschspektrum, wodurch es mal mehr, mal weniger zu kurzzeitigen Resonanzanregungen kommt.

Abb. 46 zeigt die während der Prüfungen aufgetretene kumulierte Anzahl von Zellen mit Rissbildung. Neue Risse in Zellen, die bereits Risse aufweisen, bleiben unberücksichtigt. Während das Modul mit „E“-Rahmen bereits nach den ersten 15 Minuten der Rauschprüfung mit Faktor 0,8 viele gerissene Zellen aufweist, und deren Anzahl bis zum Ende der Testreihe auf 27 ansteigt, ist bei dem Modul mit dem steifen Rahmen erst nach Abschluss der gesamten Testreihe 1 gerissene Zelle zu beobachten. Wie auch bei der Zellrissbildung durch einzelne Schocks in Kapitel 2.4 zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Auslenkung der Modulmitte und der Zellrissbildung im Modul.

## 8.4 Schockanregung

In einer weiteren Testreihe wird der Einfluss des Modulrahmens auf die Modulmittenauslenkung für Einzelschocks überprüft. Die Montage der Module erfolgt wie in der vorigen Testreihe. Als Regelpunkt für Shaker dient ein Beschleunigungssensor auf einer Modulecke. Es werden Halbsinusschocks mit Beschleunigungsamplituden von 5, 10, 20 und 30 m/s<sup>2</sup> durchgeführt. Die Schockdauer wird in 26 Schritten von 2 ms bis auf 45 ms gesteigert. Jeder Schock wird 5 Mal wiederholt. Zwischen den Schocks wird eine Pause von 5 s zum Ausschwingen des Moduls eingehalten. Während der Schocks wird die maximale Auslenkung der Modulmitte (Peak to Peak) mit dem o.g. Laserdistanzaufnehmer bestimmt. Die positive Beschleunigungsamplitude des Vor- und Nachschocks wird auf 5 % und die negative Beschleunigungsamplitude auf 12 % der Schockamplitude begrenzt.



**Abb. 47: Vergleich der Modulmittenauslenkung mit unterschiedlichen Modulrahmen**

In Abb. 47 sind die Mittelwerte der durch die Anregungsamplitude geteilten Modulmittenauslenkungen über der Schockdauer aufgetragen. Die maximale Auslenkung der Modulmitte beträgt 25,24 mm bei einer Schockamplitude von 30 m/s<sup>2</sup>. Im Gegensatz zur Sinus-Resonanzanregung führt bei der Schockanregung die Verwendung des steifen Rahmens etwa zur Halbierung der maximalen Modulmittenauslenkung. Diese deutliche Reduzierung betrifft den größten Bereich der relevanten Schockdauern und stellt somit eine signifikante Verbesserung des Zellbruchverhaltens in Aussicht. Dieses Ergebnis zeigt, dass pro Anregungsschwingung weniger Energie in die Glasschwingung eingekoppelt werden kann.

## 8.5 Zusammenfassung des Einflusses des Modulrahmens auf Zellbruch

Der von uns verwendete steife Rahmen hat zwar keine Praxisrelevanz. Dennoch zeigt der Vergleich mit den Standardrahmen, dass eine Reduzierung der Empfindlichkeit der Module gegenüber Zellbruch durch Modulvibrationen und einzelne Stöße mit besonders steifen Modulrahmen möglich ist. Neben der Biegesteifigkeit des Rahmens sind auch seine Torsionssteifigkeit, sowie die Festigkeit der Verbindung zwischen Rahmen und Laminate relevante Parameter, um die Zellbruchwahrscheinlichkeit zu beeinflussen.

## 9 Zellbruchbilder in PV-Modulen und deren Ursachen

In diesem Kapitel sollen Zellrissbilder im PV-Modul gezeigt werden, die durch bestimmte Belastungsarten auftreten.

### 9.1 Schlagbelastung

Die in Abb. 48 zu erkennenden Zellrisse sind durch Aufprall einer Kegelkugel auf die Glasoberfläche entstanden. Je größer die Energie der Kegelkugel ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass ein Sternriss in der unterliegenden Solarzelle auftritt. Ein schwacher Schlag kann aber ebenso gut einen Zellriss hervorrufen, der nicht von anderen Zellrissen zu unterscheiden ist. Ebenso kann der Zellriss an einer Stelle im Modul auftreten, die weit von dem Aufschlagpunkt entfernt liegt. Bei flächigen Belastungen und beim Umkippen von Solarmodulen treten ähnlich aussehende Trümmerbrüche oder auch dendritische Risse auf, aber diese zeigen keine Sternform. Die Sternform ist dadurch charakterisiert, dass alle Risse einer Solarzelle sternförmig auf denselben Ursprung zulaufen. Dendritisch zerbrochene Zellen oder auch Trümmerbrüche haben evtl. mehrere Ursprungsorte und die Risse laufen nicht sternförmig auf einen Punkt zu. Ein sternförmiger Riss ist charakteristisch für ein Schlagereignis. Dies kann ein z.B. fallengelassenes Werkzeug oder auch Hagelschlag sein.

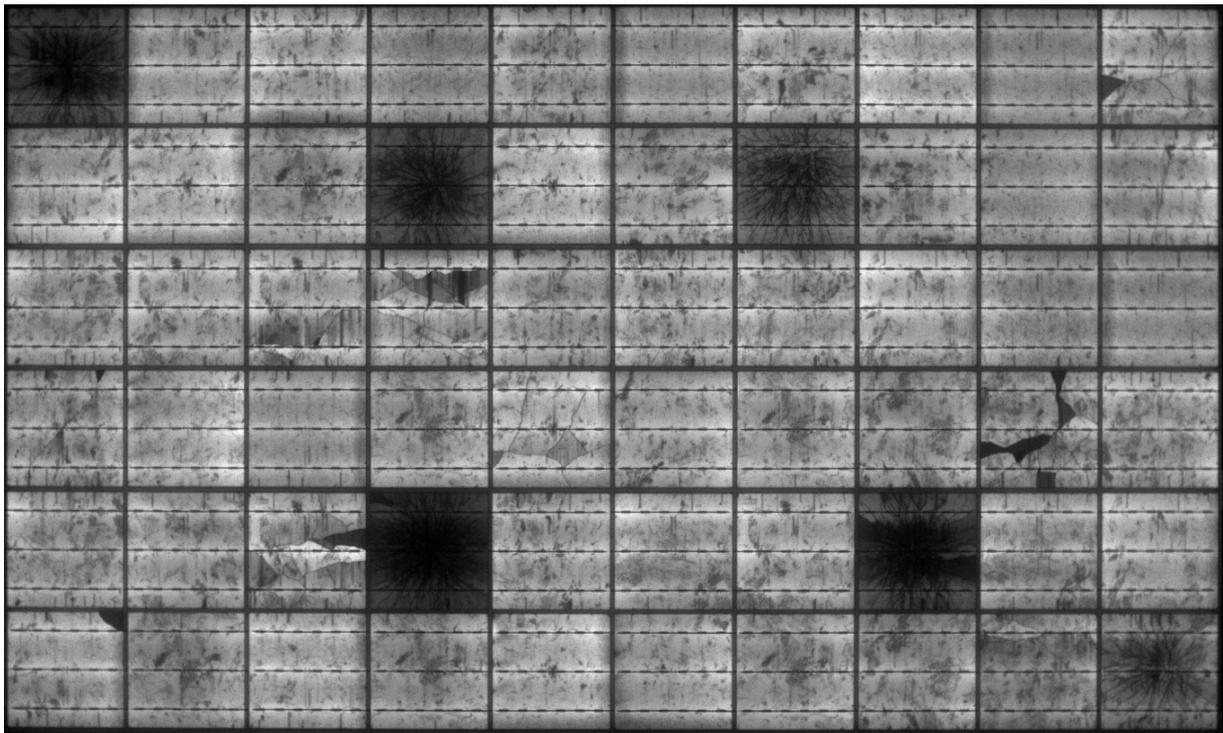


Abb. 48: Zellbruch durch Aufprall einer Kegelkugel auf die Glasoberfläche.

## 9.2 Ab stapeln von PV-Modulen

Beim Ab stapeln von horizontal transportierten Modulen mit Sunny-side up Lagerung kann es passieren, dass eine Ecke des gerade abgehobenen Moduls auf die Rückseitenfolie des darunter liegenden Moduls fällt und anschließend noch ein Stück über die Rückseitenfolie gezogen wird. In diesem Fall zeigt sich das in Abb. 49 gezeigte Rissbild. Punktuelle Belastungen auf der Rückseitenfolie hinterlassen in den Solarzellen meist eine Kreuzrisslinie, die auch über mehrere Solarzellen hinweg verlaufen kann. In diesem Fall ist auf der Rückseitenfolie häufig eine entsprechende Beschädigung bzw. Linienverformung der Rückseitenfolie zu erkennen. Typischerweise beginnen die Kreuzrisslinien in einer Modulecke, wenn Sie durch den oben beschriebenen Ab stapelfehler verursacht wurden. Eine Beschädigung der Rückseitenfolie kann zu einem Isolationsfehler führen.

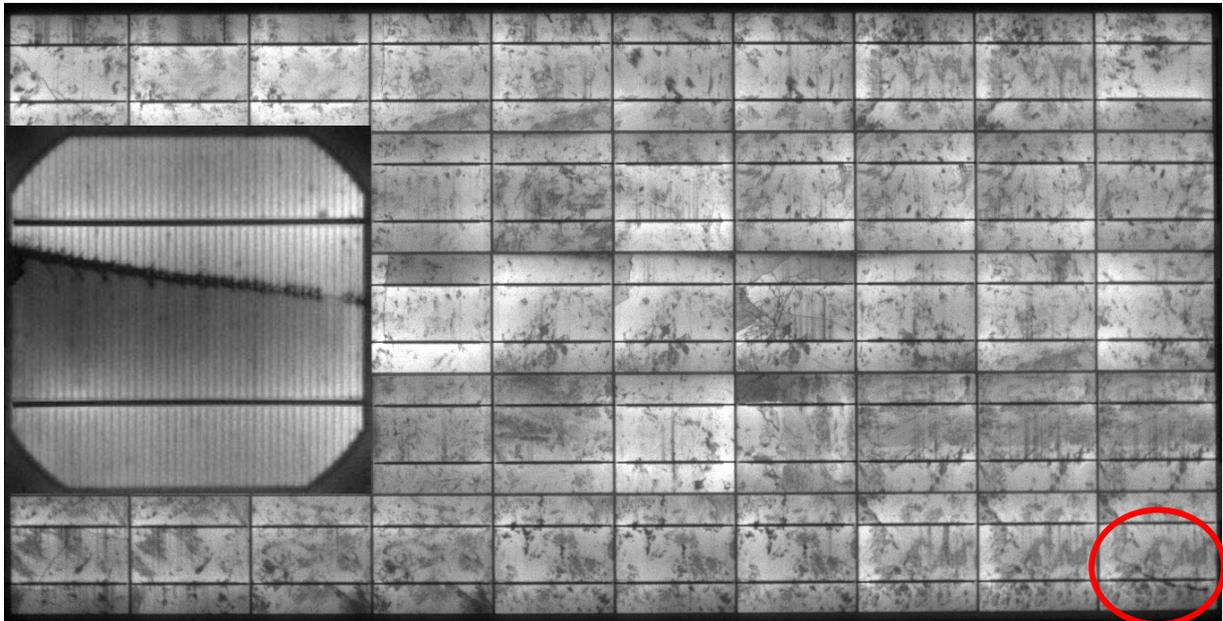
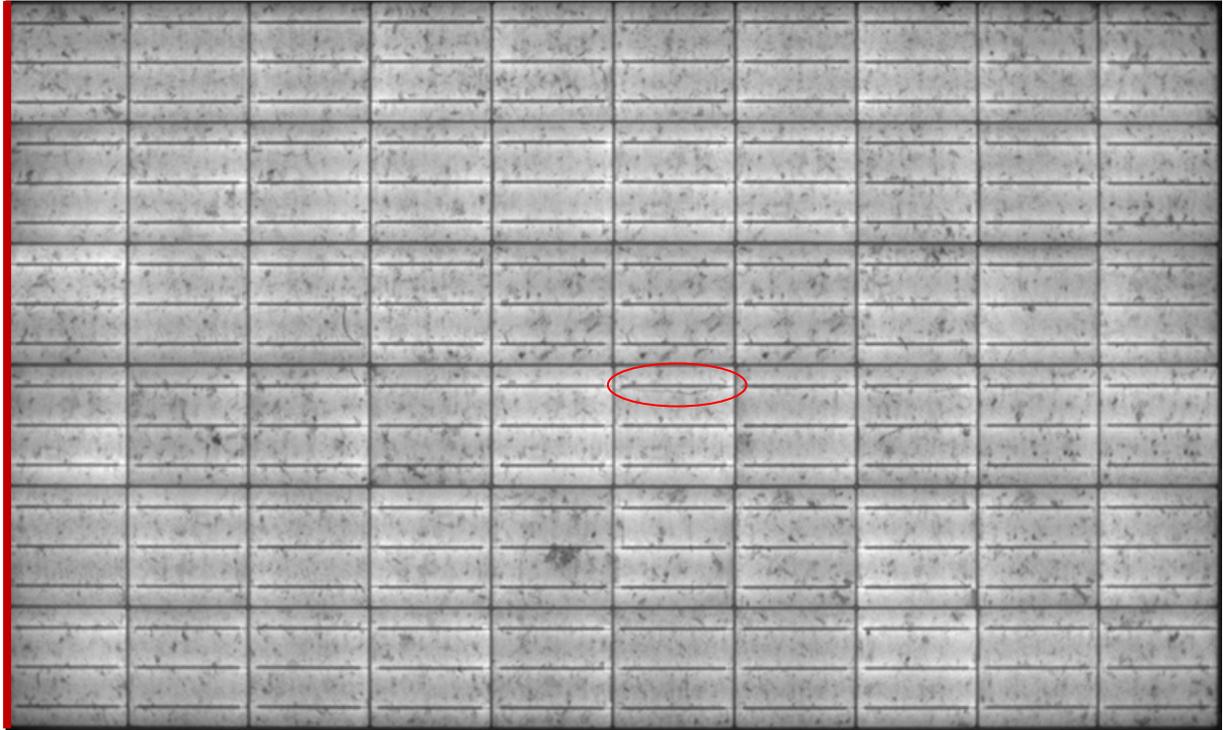


Abb. 49: Zellbruch durch Ziehen von Modulkante über Modulrückseite .

Durch das Abstackeln von Modulen von einem Horizontalstapel mit Sunny-side down Modulen kann es bei manchen Stapelecken zum Verklemmen der Stapelecken kommen, so dass ein zweites Modul unbeabsichtigt mit angehoben wird und aus einer Höhe von einigen cm wieder auf den Modul Stapel zurückfällt. In diesem Fall haben wir wenige gebrochene Zellen in der Modulmitte identifizieren können, wie es Abb. 50 zeigt.



**Abb. 50: Zellbruch durch Zurückfallen des Moduls beim Abstackeln (Sunny-side down). Das Modul ist auf die rot markierte Seite gefallen.**

### 9.3 Zellbrüche durch Transport

Durch Schwingungen und Stöße können Zellrisse während eines Transportes auftreten. Bei sachgemäßer Verpackung und Transporten über Strecken mit besonderer Belastung konnten wir in allen in Tab. 1 untersuchten Transporten nur sehr geringfügige Zellrisse feststellen, vgl. Abb. 51. Die Anzahl der gerissenen Zellen liegt bei maximal zwei pro Modul. Bei Sonderverpackungen, haben wir durchaus viel stärkere Beschädigungen festgestellt. Hierbei war jedoch nie sicher zu ermitteln, wodurch die Schäden aufgetreten sind.

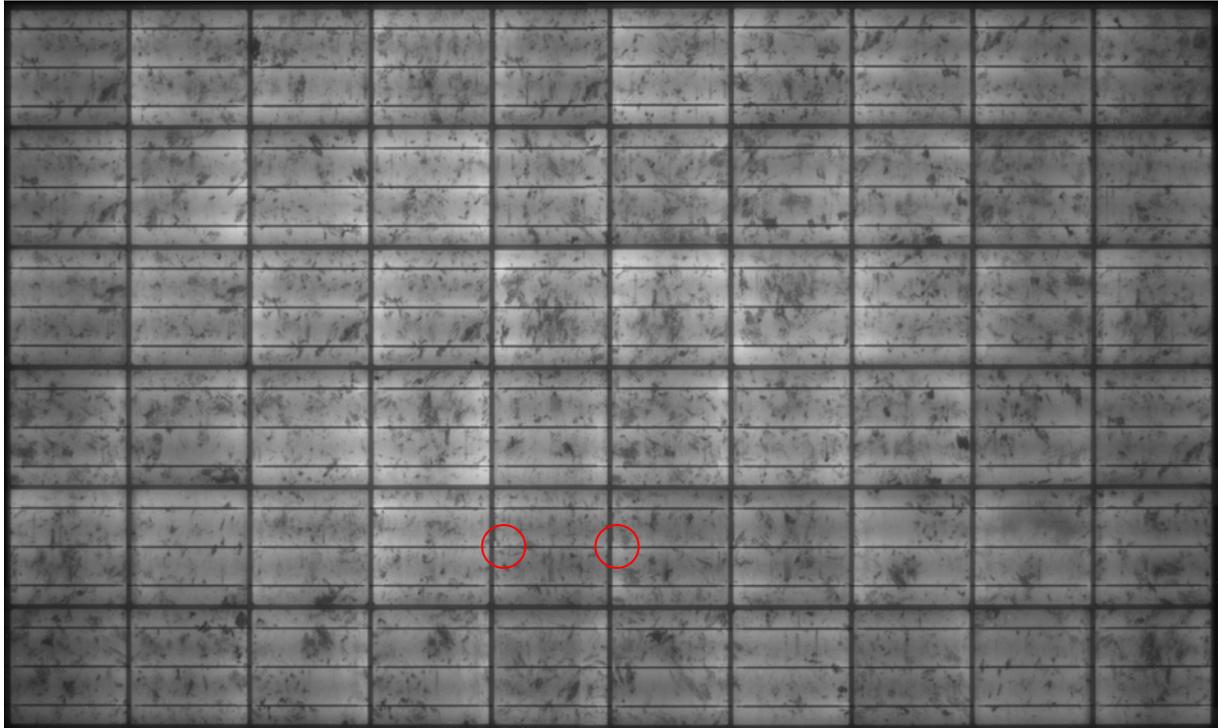


Abb. 51: Zellbruch durch Modulvibrationen bei einem rauen Transport.

## 9.4 Umkippen und Ablegen von PV-Modulen

Das Umkippen von Modulen auf die Modulrückseite kann schon aus wenigen cm Fallhöhe zu vielen gebrochenen Zellen führen. Dies geschieht auch, wenn das Modul aus niedriger Höhe einseitig fallen gelassen wird. Bei niedrigen Fallhöhen (5-10 cm) brechen zunächst die Zellen in der Mitte des Moduls. Mit zunehmender Fallhöhe prägt sich das in Abb. 52 gezeigte X-Rissmuster aus, das auch bei starker flächiger Belastung gemäß einer Normprüfung nach IEC61215 Punkt 10.16 manchmal zu finden ist.



**Abb. 52:** Zellbruch durch Fallenlassen des Moduls beim Ablegen (Sunny-side up). Das Modul ist auf die rot markierte Seite gefallen.

## 9.5 Betreten von PV-Modulen

Beim Begehen der Glasseite eines Moduls entstehen typischerweise Zellrisse in der direkten Umgebung der Trittbelastung. Jedoch können auch weiter von der Trittbelastung entfernte Zellen brechen. Abb. 53 zeigt Zellrisse nach einer Trittbelastungen in der Modulmitte. Trittbelastungen in der auf dem Modulglas führen meist zu vielen Zellrissen.

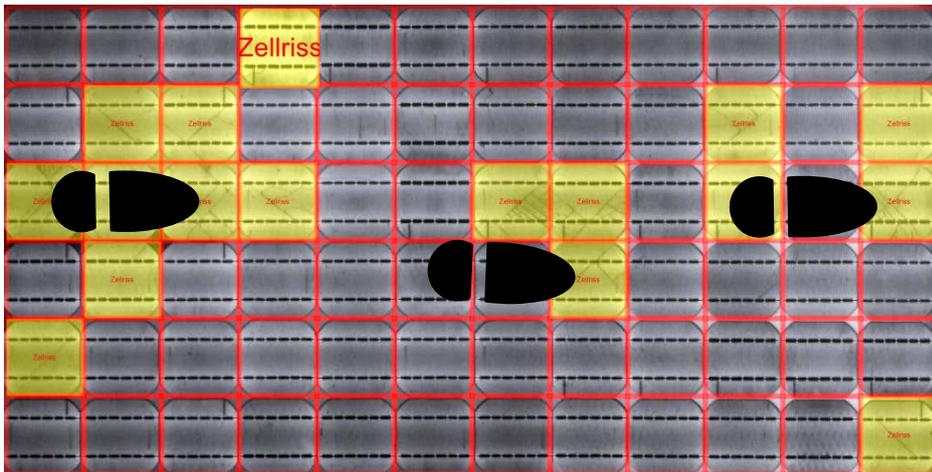
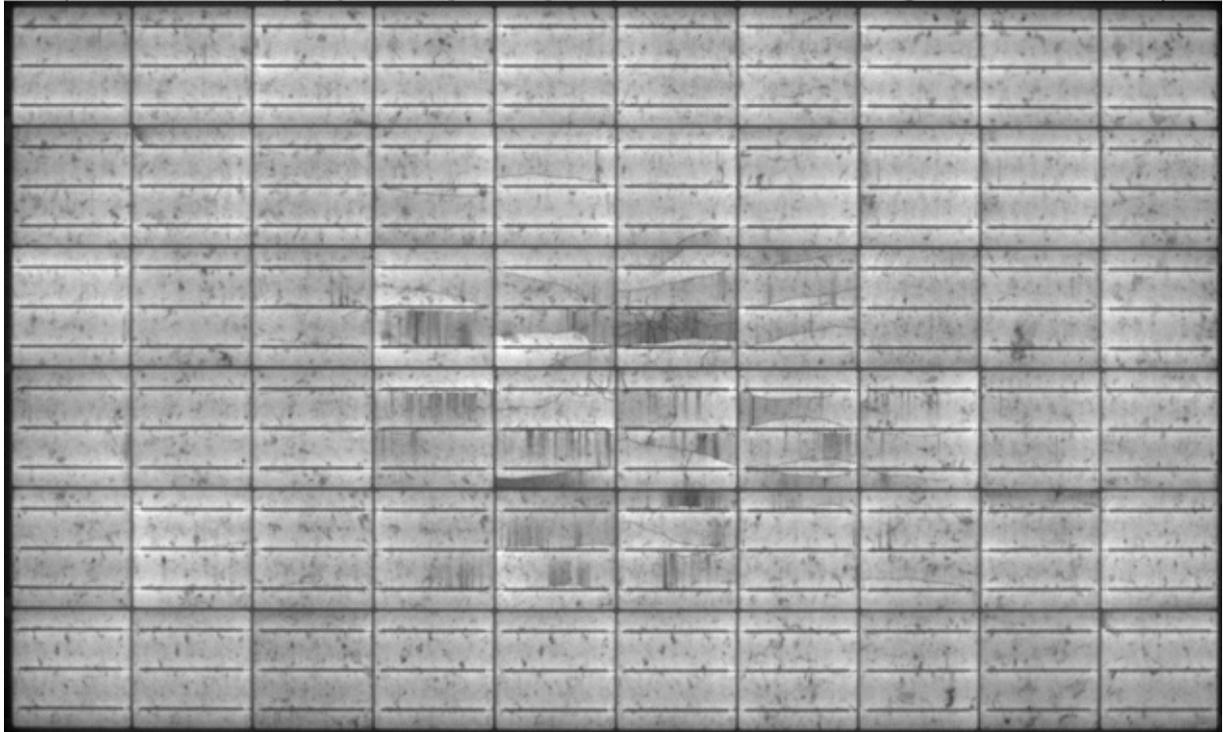
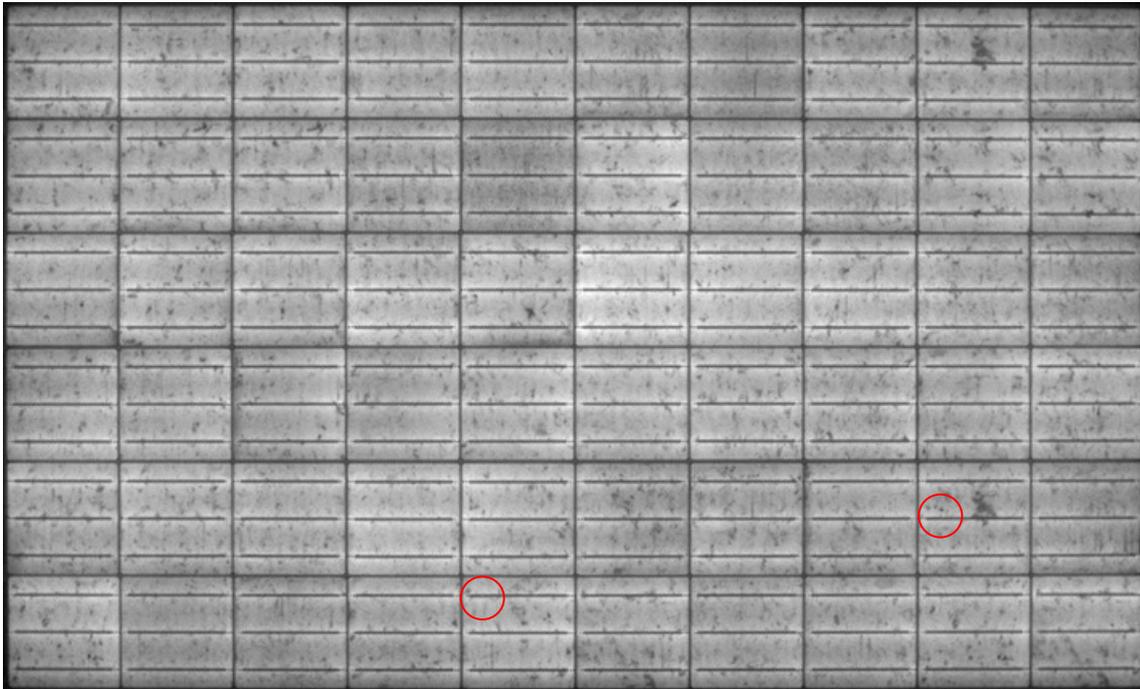
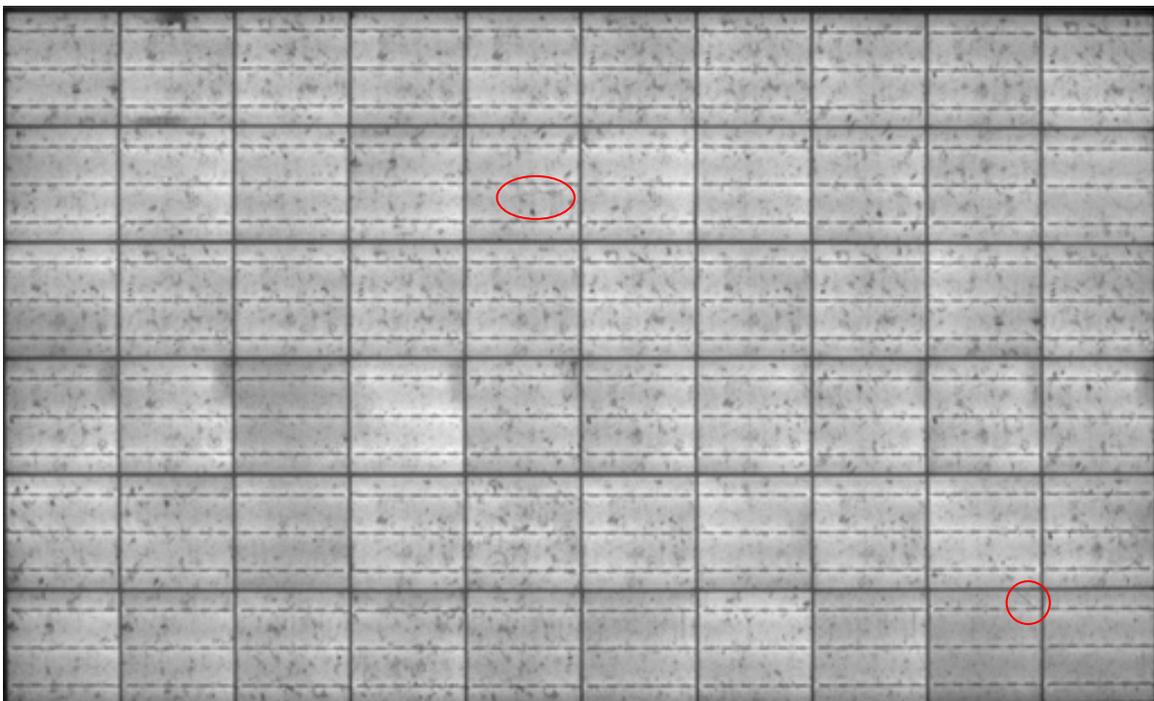


Abb. 53: Zellbruch durch Betreten eines Moduls auf die Modulmitte (oberes Bild) und Zellbruch durch Überqueren eines Moduls (unteres Bild). Im unteren Bild sind die Trittpositionen markiert. Die Zelle mit dem Text „Zellriss“ war schon vor dem Betreten des Moduls gerissen.

Das Betreten der Solarmodule auf dem Rand erzeugte in unseren Versuchen nur sehr wenige Zellrisse, vgl. Abb. 54. und Abb. 55. Aufgrund der geringen Anzahl von Rissen ist hier eine Korrelation des Aufttrittortes mit der Rissbildverteilung nicht möglich.



**Abb. 54:** Zellbruch durch Betreten eines Moduls auf die Mitte des langen Modulrahmens. Es sind nur sehr kurze, kaum zu erkennende Zellrisse aufgetreten.



**Abb. 55:** Zellbruch durch Betreten eines Moduls an der Modulecke.

## 10 Zusammenfassung

In dieser Studie wird dargestellt, welche Einflüsse beim Transport und der Installation von Solarmodulen die Solarzellen im Modul beschädigen können. Zu diesem Zweck wurden die realen Belastungsformen erfasst und entsprechende Prüfungen entworfen, die ein Nachstellen der Belastungen im Labor ermöglichen. Für drei Belastungsformen wurden Prüfungen entwickelt:

1. Prüfung von Stößen einzelner PV-Module in der Verpackung während eines Transportes.
2. Prüfung von zufälligen Vibrationen einzelner PV-Module in der Verpackung während eines Transportes.
3. Prüfungen von Belastungen wie sie während der Installation von PV-Modulen auftreten.

Diese Prüfungen ermöglichen es einem Modulhersteller die Qualität seiner Module zu prüfen und damit zu optimieren.

Die Erfahrungen während Transportbegleitungen haben gezeigt, dass bei sachgemäßer Verpackung und Transportsicherung selbst bei extrem rauen Transportstrecken keine wesentlichen Schäden an den PV-Modulen festzustellen sind. In diesen Fällen haben wir höchstens zwei geringfügig gerissene Zellen pro Modul gefunden, wenn Schäden nicht durch die Modulpalette verursacht worden sind.

Wir haben festgestellt, dass die Modulpalette in einigen Fällen nicht steif genug ausgeführt war, um zu verhindern, dass beim Anheben einer Palette mit Horizontal gelagerten Modulen die Palette das unterste Modul in der Mitte durchbiegt. Die Steifigkeit der Palette muss entsprechend ausgelegt sein, damit die Palette in keinem Fall das untenliegende Modul berührt. Dies führt zu einer Beschädigung des untersten Moduls.

Insbesondere die Prüfungen von Belastungen die während der Installation auftreten haben gezeigt, dass durch übliche Handhabungen Zellrisse in den Modulen erzeugt werden können. Wie schon länger bekannt, werden Zellrisse induziert, wenn das Modul betreten wird. Dies muss durch geeignete Tritthilfen vermieden werden. Ebenso können bei besonders empfindlichen PV-Modulen Zellrisse beim Ablegen der Module induziert werden, wenn das Modul mit der Glasseite nach oben an einer Seite aus 5 cm Höhe auf eine Unterlage fallen gelassen wird. Dies kann z.B. passieren, wenn ein Modul auf eine Unterkonstruktion etwas unsanft abgelegt wird. Auf ein sanftes Ablegen der Module auf die Unterkonstruktion ist deshalb unbedingt zu achten.

Wir haben beobachtet, dass Modulmontagen bis zu Umgebungstemperaturen von  $-5^{\circ}\text{C}$  durchgeführt werden. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes sind PV Module besonders empfindlich. In den meisten Prüfungen zeigen die Module bei  $-5^{\circ}\text{C}$  mehr als doppelt so viele Zellrisse als bei  $25^{\circ}\text{C}$ . Eine Montage von PV-Modulen bei Umgebungstemperaturen unterhalb von  $0^{\circ}\text{C}$  sollte deshalb vermieden werden.

Neben den Möglichkeiten zur Zellrisssvermeidung aufgrund von Transport und Installation haben wir die Möglichkeiten des Modulherstellers evaluiert auf die Zellrissempfindlichkeit Einfluss zu nehmen. Durch die Biege- und Torsionssteifigkeit des Rahmens eines PV-Moduls kann die Rissanfälligkeit durch Schwingungs- und Stoßbelastung wesentlich beeinflusst werden. Wir haben zeigen können, dass die Zellrisseanfälligkeit in einer Transportprüfung durch einen extrem torsionssteifen Rahmen im

Vergleich zu einem Standardrahmen von 15 Zellbrüchen auf null reduziert werden kann. Neben der Rahmung des Moduls haben die Zellherstellung und die Verlotung der Solarzellen im Modul großen Einfluss auf die Zellbruchempfindlichkeit eines Moduls.

Die Summe aller vorgestellten Maßnahmen kann zu einer deutlichen Reduzierung von Zellbruch in PV-Anlagen genutzt werden, wenn die in dieser Studie vorgeschlagenen Regeln beachtet werden.

## **11 Danksagung**

Wir möchten uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Förderung des dieser Studie zugrundeliegenden Projektes HERMES unter dem Förderkennzeichen 0325295A bedanken. Für die finanzielle Unterstützung des Projektes HERMES durch die Firmen alfasolar GmbH, Conergy SolarModule GmbH & Co. KG, Schott Solar GmbH, Q-Cells SE und Hanwha Q-Cells SE und die Bereitstellung von PV-Modulen und durch Vermittlung der Begleitung von Transporten und Installationen möchten wir uns bedanken.

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] C. Olschok, M. Schmid, R. Haas und B. G., „Inappropriate Exposure to PV Modules: Description and Effects of Handling Defaults,“ *Proc. of EU-PVSEC, Paris, France*, pp. 3138 - 3141, 2013.
- [2] R. Mickiewicz, B. Li, D. Doble, T. Christian, J. Lloyd, A. Stokes, C. Völker, M. Winter, B. Ketola, A. Norris und N. Shephard, „Effect of Encapsulation Modulus on the Response of PV Modules to Mechanical Stress,“ *proc. of 26th EU-PVSEC, Hamburg, Germany*, pp. 3157 - 3161, 2011.
- [3] M. R. G. C. Olschok, „Unsachgemäßer Umgang mit PV-Modulen: Beschreibung und Auswirkungen von Handhabungsfehlern,“ in *Konferenzprotokoll 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein , 2013.
- [4] Deutscher Kegler- und Bowlingverbund e.V., „Technische Vorschriften Ninepin - Classic,“ Deutscher Kegler- und Bowlingverbund e.V., 05.05.2012.