

„Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die Verbindungsqualität und die Kontakteigenschaften typischer Lötwerkstoffe für die Solarverschaltung“

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering (B. Eng.)“

vorgelegt von

Anne Hernsdorf

geboren am 23.09.1991 in Halle (Saale)

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Valentin Cepas
Hochschule Merseburg – Fachbereich INW
Geusaer Straße, 06217 Merseburg

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Sebastian Schindler
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle (Saale)

vorgelegt am: 20.09.2013

Aufgabenstellung
für die Bachelorarbeit (B. Eng.)
von Frau Anne Hernsdorf
(Matrikelnummer 17725)

Thema: **Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die Verbindungsqualität und die Kontakteigenschaften typischer Lötwerkstoffe für die Solarverschaltung**

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Valentin Cepus
Dipl.-Ing. Sebastian Schindler

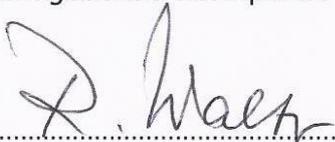
Aufgabenstellung

Ein verlässlicher und reproduzierbarer Lötprozess ist die Grundvoraussetzung für elektrisch zuverlässige Verbindungen zur Serienverschaltung von Solarzellen in Photovoltaikmodulen. Die Messung der Benetzungskraft stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Methodik zum Screening und zur Bewertung der Ausbildung der Lotverbindung dar. Im Rahmen der Bachelorarbeit wird der Einfluss verschiedener Zellmetallisierungsoberflächen und die Wechselwirkung mit unterschiedlichen Lotwerkstoffen und Flussmitteln auf Lötbarkeit untersucht.

Schwerpunkte

1. Entwicklung eines reproduzierbaren Verfahrens zur Messung der Benetzungskraft beim Lötprozess
2. Ermittlung von Benetzungsparametern eines Lot-Referenzsystems
3. Variation von Parametern des Lötprozesses, wie z.B. Substrate, Lotzusammensetzung, Flussmittel, Temperatur und messtechnische Erfassung der Benetzungseigenschaften
4. Experimentelle Untersuchung und Bewertung der Lötprozesse und Lotverbindungseigenschaften in Abhängigkeit des erhobenen Parametersatzes

abzugebende Exemplare: 2 schriftliche Arbeiten + PDF-Datei


.....

Prof. Dr. rer. nat. Regina Walter
Vorsitzender des Prüfungsausschusses


.....

Prof. Dr. rer. nat. Valentin Cepus
Themenstellender Hochschullehrer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|--------|
| Inhaltsverzeichnis..... | - 3 - |
| Abkürzungsverzeichnis..... | - 4 - |
| 1 Einleitung und Motivation | - 5 - |
| 2 Theoretische Grundlagen der Benetzungskraftmessungen | - 9 - |
| 2.1 Benetzung und Löten | - 9 - |
| 2.2 Vorgang der Benetzungskraftmessung..... | - 13 - |
| 2.3 Versuchsdurchführung, Probenvorbereitung, Materialzusammenstellung | - 16 - |
| 2.4 Bewertungskriterien zur Auswertung | - 19 - |
| 3 Das Lot-Referenzsystem..... | - 22 - |
| 3.1 Experimentelle Durchführung der Benetzungskraftmessungen | - 22 - |
| 3.2 Zusammenfassung..... | - 25 - |
| 4 Experimentelle Untersuchungen..... | - 26 - |
| 4.1 Variation von Parametern des Lötprozesses | - 26 - |
| 4.2 Experimentelle Untersuchung | - 27 - |
| 4.3 Ergebnisdarstellung der Experimente, Benetzungskraftkurven..... | - 28 - |
| 4.4 Zusammenfassung, Diskussion..... | - 43 - |
| 5 Referenz-/Vergleichsmessungen zur Bewertung der Zellmetallisierung | - 49 - |
| 5.1 Kontaktwinkelmessung..... | - 49 - |
| 5.1.1 Material und Methode..... | - 49 - |
| 5.1.2 Ergebnisse | - 52 - |
| 6 Zusammenfassung und Ausblick..... | - 56 - |
| Literaturverzeichnis | - 58 - |
| Abbildungsverzeichnis..... | - 59 - |
| Tabellenverzeichnis..... | - 62 - |
| Anlagenverzeichnis | - 63 - |
| Eidesstattliche Erklärung | - 64 - |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung/Symbol | Maßeinheit | Bedeutung |
|------------------|---|---|
| θ | [°] | Kontaktwinkel |
| σ_{SA} | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right]$ oder $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$ | Oberflächenspannung zwischen Feststoff und Luft |
| σ_{LS} | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right]$ oder $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$ | Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff |
| σ_{LA} | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right]$ oder $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$ | Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Luft |
| IEC | | Internationale Elektrotechnische Kommission |
| CSP | | Center für Silizium-Photovoltaik |
| F | [N] oder [mN] | vertikale Kraft / Benetzungskraft |
| γ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$ | Oberflächenspannung des geschmolzenes Lotes mit Flussmittel |
| U | [m] | Umfang des Prüflings |
| g | $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$ | Erdbeschleunigung |
| ρ | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ | Dichte des geschmolzenen Lotes |
| V | [m ³] | verdrängtes Volumen |
| Sn | | Zinn |
| Pb | | Blei |
| Ag | | Silber |
| Cu | | Kupfer |

1 Einleitung und Motivation

Erneuerbare Energien spielen in der heutigen Zeit eine immer größer werdende Rolle. Auch in den Wahlprogrammen der Parteien, vor allem der Grünen, findet sich das Thema der regenerativen Energien vermehrt wieder. Neben Klimaschutz und der Schaffung von Arbeitsplätzen ist das Thema auch in Hinblick auf die weitere Entwicklung der weltweiten Energieverbräuche relevant. /1/

Der globale Energiebedarf kann langfristig nicht mehr mit den fossilen Energieträgern, wie Kohle, Öl und Gas gedeckt werden. Der Fokus der Energiegewinnung muss in Zukunft auf der Nutzung von erneuerbaren Energien, die laut ihrer Definition *„unter menschlichen Zeithorizonten unerschöpflich sind“* /2, Seite 34/, liegen. Regenerative Energiequellen sind:

- geothermische Energie
- Planetenenergie und
- Sonnenenergie. /2, Seite 34ff/

Unter geothermischer Energie versteht man die Nutzung der Wärme im Erdinneren. Durch hohe Energiedifferenzen zwischen Erdkruste und Erdkern findet ein unentwegter Wärmestrom statt, dessen Energie durch Geothermie nutzbar gemacht werden kann. Wirtschaftlich ist diese Methode bislang jedoch nur in früheren oder heutigen Vulkangebieten, da dort bereits in geringen Tiefen der Erdoberfläche hohe Temperaturen herrschen. /2, Seite 288f/

Die Planetenenergie bezieht sich auf die Wechselwirkung zwischen Mond, Sonne und Erde, wodurch die Anziehungskräfte durch Erddrehung unaufhörlich ihre Richtung ändern. Diese Anziehungskräfte reißen die Wassermassen der Ozeane mit sich. Infolgedessen entstehen die Gezeiten, die in Gezeitenkraftwerken zur Energiegewinnung genutzt werden können. Dazu wird in Gebieten mit Höhenunterschieden im Bereich der Küste ein Damm mit Turbine installiert. Bei Flut strömt das Wasser der Ozeane durch die Turbine in die Bucht und bei Ebbe wieder zurück. Mit Hilfe der Turbine und einem verbundenen Generator wird aus der Energie des Wassers elektrische Energie erzeugt. /2, Seite 284f/

Die Sonnenenergie stellt die größte regenerative Energiequelle dar. Die jährlich von der Sonne abgestrahlte Energie übersteigt sämtliche Energiereserven und den jährlichen Energieverbrauch der gesamten Weltbevölkerung. Deswegen liegt der Fokus im Ausbau der Techniken, die aus der Sonnenenergie direkt und indirekt Strom erzeugen können.

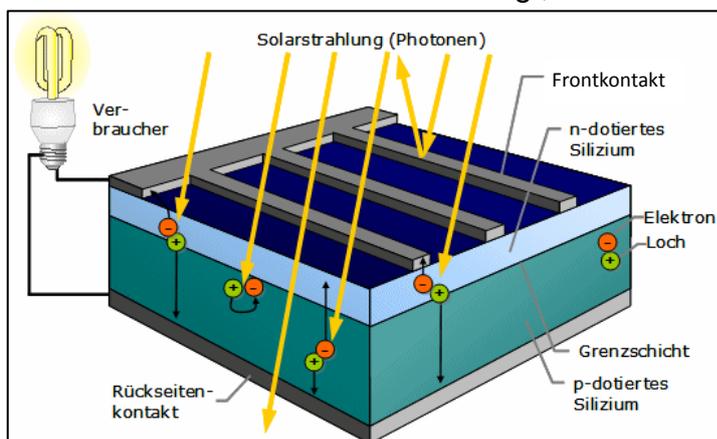
Unter indirekter Nutzung der Sonnenenergie versteht man die natürliche Umwandlung dieser in alternative Energieformen durch folgende Vorgänge:

- Verdunstung, Niederschlag, Wasserströme
- Schmelzen von Schnee
- Wellenbewegung
- Meeresströmung
- Biomasseproduktion
- Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre und
- Windströmung.

Die energetische Verwendung der direkten Sonnenenergie wird mit Hilfe von verschiedenen Techniken, wie Solarthermie, Photolyseeinrichtungen, Solarkollektoren und Photovoltaik, ermöglicht. /2, Seite 36ff/

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Energieumwandlung mit Hilfe von Photovoltaik, das die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom bedeutet. Der Begriff setzt sich aus den beiden Worten „Photo“, das für Licht steht und „Volta“, in dem sich die Maßeinheit der Spannung Volt wiederfindet, zusammen. Bereits 1839 wurde von Alexandre Edmond Becquerel festgestellt, dass es zu einer Erhöhung der elektrischen Spannung kommt, wenn man elektrochemische Batterien mit Licht bestrahlt. Der Effekt wurde ungefähr 40 Jahre später auch am Halbleiter Selen festgestellt, doch erst 1905 konnte der dafür verantwortliche Photoeffekt von Albert Einstein quantenphysikalisch charakterisiert werden. Der Photoeffekt beschreibt das Herauslösen von Elektronen aus einem Metall durch Bestrahlung mit Licht, also mit Photonen. /3, Seite 102/

Dieser Effekt spielt auch im Bereich der Photovoltaik eine entscheidende Rolle. Mit Solarzellen wird elektrischer Strom erzeugt, dazu ist ein Fluss von Elektronen, den negativen Ladungsträgern erforderlich. Es ist notwendig, dass das Material der Solarzellen über zwei Ebenen verfügt, deshalb werden Rohstoffe verwendet, die als



Halbleiter gelten, wie beispielsweise Silizium. In einer Ebene befinden sich frei bewegliche Elektronen und in der anderen sind die Elektronen fest gebunden. Photonen sind in der Lage, die gebundenen Elektronen herauszulösen und in die zweite Ebene anzuheben.

Abb. 01 Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle /3, Seite 105/

Um den Elektronenfluss in der zweiten Ebene zu ermöglichen, muss ein elektrisches Feld vorhanden sein, das die negativ geladenen Elektronen auf eine Seite bewegt. Das elektrische Feld wird erzeugt, indem der Halbleiter dotiert wird. Das geschieht durch bewusste Verunreinigungen im Halbleitermaterial in Form von Elementen wie Bor und Phosphor, die auf gegenüberliegenden Seiten eingebracht werden. Die beiden dotierten Schichten des Siliziums werden als n- und p-dotiertes Silizium bezeichnet. Zwischen den beiden Bereichen befindet sich eine Grenzschicht, durch die die Elektronen nach dem Herauslösen aus der ersten Ebene wandern und in der zweiten Ebene durch dünne Frontkontakte gesammelt und über einen externen Stromkreis, in dem die Energie der Elektronen abgegeben wird, zurück in die erste Ebene geführt werden. /3, Seite 103ff/

Die heutigen Solarzellen bestehen aus Silizium, das ein sehr häufig auftretendes Element in der Erdkruste ist. Jedoch kommt es fast vollkommen gebunden vor, zum Beispiel in Quarzsand, silikathaltigen Gesteinen oder Kieselsäure in den Weltmeeren. Das reine Silizium, aus dem die Solarzellen gefertigt werden, wird aus Quarzsand, der chemisch gesehen reines Siliziumoxid ist, gewonnen. Dazu muss der Quarzsand in einem Lichtbogenofen bei circa 2000 °C reduziert werden, wodurch die Sauerstoffatome abgetrennt werden. Als Ergebnis erhält man Silizium mit einer Reinheit von 98 bis 99 Prozent. Zur Herstellung von Solarzellen muss die Reinheit des Siliziums jedoch höher sein. Um den Rohstoff weiter zu reinigen, findet eine Umsetzung mit Chlorwasserstoff statt, wodurch Trichlorsilan entsteht. Abschließend wird das Trichlorsilan bei Temperaturen von 1000 bis 1200 °C destilliert, wodurch sich das polykristalline Silizium mit einer Reinheit von über 99,99 Prozent in langen Stäben abscheidet. Um monokristallines Silizium herzustellen, muss eine erneute Aufschmelzen durchgeführt werden. Ein Siliziumkristall wird in die Schmelze getaucht und mit einer Drehbewegung nach oben gezogen. Dabei findet eine Anlagerung des flüssigen Siliziums statt, indem sich die Kristalle des Siliziums gleichförmig ausrichten. Die Verunreinigungen bleiben im Schmelztiegel zurück, weshalb das monokristalline Silizium eine Reinheit von über 99,9999 Prozent erreichen kann. Die mono- bzw. polykristallinen Siliziumstäbe werden nach der Reinigung in dünne Scheiben, die Wafer genannt werden, geschnitten. Anschließend findet die Dotierung der Wafer statt, um die p- und n-Schicht der Solarzellen zu erzeugen. Die typisch blaue Farbe erhalten die Zellen durch Aufbringung einer Antireflexschicht, die die Reflexionsverluste stark minimiert. Die Kontakte, die sich auf den Solarzellen befinden und die für die Verbindung derer notwendig sind, werden durch Siebdruck auf Vorder- und Rückseite aufgebracht. /3, Seite 108ff/

Einzelne Solarzellen haben nur eine Spannung von 0,6 bis 0,7 Volt. Um die Solarzellen auch praktisch nutzen zu können, ist es daher notwendig viele Zellen miteinander in Reihe zu verschalten. Dies geschieht indem die Frontkontakte einer Zelle jeweils mit dem Rückseitenkontakten einer anderen Zelle verbunden werden.

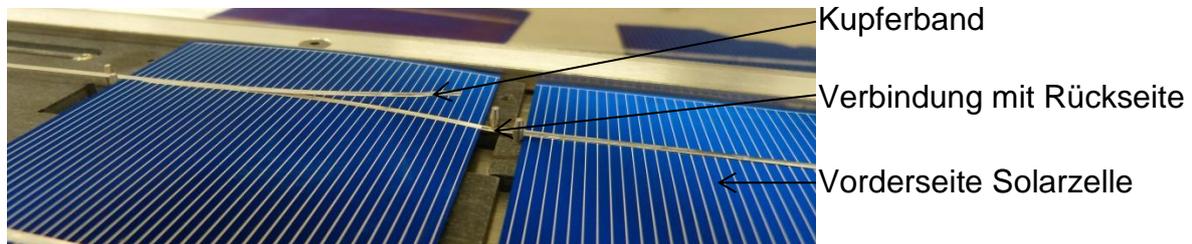


Abb. 02 Verbindung der Solarzellen

Diese Verbindung, die in Abbildung 2 dargestellt ist, wird mit Hilfe von Kupferbändchen realisiert. Um die Zellstrings und die kompletten Solarmodule vor mechanischen Einwirkungen und Witterungseinflüssen zu schützen, ist es erforderlich, dass die Zellen in einer Kunststoffolie eingebettet werden. Auf der Vorderseite wird eine Glasscheibe laminiert, die Schutz vor Korrosion und Schäden bietet und auf der Rückseite wird typischerweise eine Rückseitenfolie angebracht. /3, Seite 110f/

Als Motivation für die Themenstellung dieser Abschlussarbeit ist vor allem zu nennen, dass fehlerhafte Lötvorgänge bei der Verbindung von Solarzellen dazu führen, dass die fertigen Solarmodule nicht die maximal mögliche Leistung erreichen können. Um dies zu verhindern, ist es notwendig, dass das Verlöten der Solarzellen stets einwandfrei und gleichermaßen abläuft, da die Verbindung der Zellen der wichtigste Schritt bei der Herstellung von Solarmodulen ist. Außerdem soll zukünftig auch bleifreies Lotmaterial im Bereich der Photovoltaik Anwendung finden, da die Verwendung von Blei stets ein Risiko im Bereich von Umwelt und Gesundheit birgt. Ob bleifreie Lotmaterialien ein optimales Lötresultat liefern, ist mit Hilfe von Messungen mit Benetzungswaagen, wobei Benetzungskraft-Zeit-Kurven aufgezeichnet werden, charakterisierbar. Die Benetzungskraft ist ein Kriterium mit dem Aussagen über die Lötbarkeit und die Benetzung der Solarzellmetallisierung möglich sind. Der Zusammenhang zwischen Benetzung und Lötbarkeit wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

2 Theoretische Grundlagen der Benetzungskraftmessungen

2.1 Benetzung und Löten

Eine gute Benetzung zwischen Lötmaterial und Bauteiloberfläche ist sehr wichtig, um eine Lötstelle stabil und vor allem haltbar verbinden zu können. Benetzung ist laut /4/ auf Seite 102 als „*das Aufziehen einer Flüssigkeit auf eine Festkörperoberfläche*“ definiert. Um die Benetzung zu charakterisieren bietet sich die Bestimmung eines Kontaktwinkels, der die Tangente an die Flüssigkeitsoberfläche darstellt, an. Je kleiner dieser Kontaktwinkel ist, desto besser wird die feste Oberfläche mit der jeweiligen Flüssigkeit benetzt. /4, Seite 102/

Es lassen sich drei Arten der Benetzung unterscheiden:

- vollständige
- partielle und
- keine Benetzung.

Man spricht von vollständiger Benetzung, wenn sich die Flüssigkeit lückenlos auf der Oberfläche als eine flache Schicht ausdehnt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Dabei ist der Kontaktwinkel kleiner als 30° . Ein Kontaktwinkel von theoretisch 0° stellt die ideale Benetzung von Fluid und Festkörperoberfläche dar.



Abb. 03 vollständige Benetzung

Bei partieller Benetzung ist der Kontaktwinkel zwischen 30° und 90° . Der Flüssigkeitstropfen bildet, wie in Abbildung 4 aufgezeigt, eine runde Kuppel aus. Die Benetzung ist nur teilweise gewährleistet, wodurch es möglich ist, dass die jeweilige Lötstelle nicht ausnahmslos haltbar ist.



Abb. 04 partielle Benetzung

Der dritte Fall beschreibt die Nicht-Benetzung der Oberfläche. Dabei überwiegen die Kohäsionskräfte innerhalb des Tropfens im Vergleich zu den Adhäsionskräften gegenüber der festen Oberfläche, weshalb sich die Flüssigkeit zu einem kugelförmigen Tropfen ballt, der in Abbildung 5 dargestellt ist. Der Kontaktwinkel übersteigt dabei einen Winkel von 90° .

Der Fall der absoluten Nicht-Benetzung liegt bei einem Kontaktwinkel von 180° vor, wobei sich Flüssigkeit und Feststoffoberfläche in nur noch einem Punkt berühren. /5, Seite 99ff/

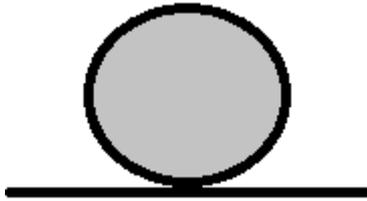


Abb. 05 keine Benetzung

Die Benetzung ist entscheidend, um den Vorgang des Lötens optimal durchführen zu können. Das Löten ist laut /6/ als „*das Verbinden erwärmter, im festen Zustand verbleibender Metalle durch schmelzende metallische Zusatzwerkstoffe (Lote)*“ definiert. An der Lötstelle muss mindestens die Schmelztemperatur des Lotes anliegen, um die Bindung der beiden Metalle zu realisieren. Im Bereich der Photovoltaik findet das Weichlöten Anwendung, da die Löttemperatur unter 450°C liegt. /6/

In der DIN 32506 /7/ ist die Lötbarkeitsprüfung für das Weichlöten verankert. Dort ist auch die Benetzungskraftmessung aufgeführt, bei der eine Probe an eine Kraftmesseinrichtung gehängt und vertikal einen definierten Höhenbereich in schmelzflüssiges Lotmaterial eingetaucht wird. Dabei findet die Aufzeichnung der Benetzungskraft als Funktion der Zeit statt.

Neben dem Kontaktwinkel ist die Benetzungskraft also entscheidend, um eine sinnhafte Charakterisierung der Benetzungsfähigkeit und der Lötbarkeit ausführen zu können. Wird eine zu benetzende Probe in ein flüssiges Lot eingetaucht, so findet in der Regel eine Benetzung statt. Beim Herausziehen der jeweiligen Probe senkrecht nach oben, muss die Gewichtskraft und ebenfalls eine Kraft, die versucht die Probe im schmelzflüssigen Lotdepot zu halten, überwunden werden. Diese Kraft wird als Benetzungskraft bezeichnet und kann mit Hilfe von Benetzungswaagen gemessen und über die Zeit aufgetragen werden. Die genaue Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise der Benetzungswaage folgt im nächsten Punkt dieser Arbeit.

Zunächst ist es notwendig, dass eine Benetzung zwischen dem geschmolzenen Lot und der Oberfläche des Metalls gewährleistet ist. Dazu muss das Zinn im Lot mit der jeweiligen Probe eine Legierung bilden, wofür keinerlei Verunreinigungen auf den Oberflächen von Lot und Probe vorhanden sein dürfen.

Die Benetzung findet nur statt, wenn sämtliche Oxidschichten und organische Verunreinigungen durch Verwendung eines Flussmittels entfernt werden und dadurch die Bildung der intermetallischen Schicht aus Lotmaterial und Probenoberfläche, wie in Abbildung 6 dargestellt, möglich wird. /8, Seite 4/

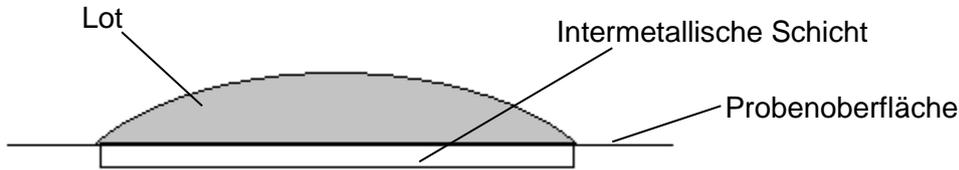


Abb. 06 Bildung der Legierung auf gereinigter Oberfläche

Ebenfalls von Bedeutung, um die die Benetzung sicherzustellen, sind die Oberflächenspannungen zwischen:

- Feststoff und Luft,
- Feststoff und Lot und
- Lot und Luft.

Für eine gute Benetzung muss der Kontaktwinkel θ kleiner 90° sein und der dazugehörige Kosinus somit zwischen 0 und 1 liegen.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SA} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LA}} \quad (1)$$

Mit Hilfe der umgestellten Gleichung von Young (1) wird ersichtlich, dass die Oberflächenspannung zwischen dem Feststoff und der Luft σ_{SA} hoch sein muss. Dies wird erreicht, wenn die Probenoberfläche frei von Verunreinigungen ist.

Die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot und dem Feststoff σ_{LS} soll niedrig sein, damit die intermetallische Schicht problemlos entstehen kann.

Außerdem wird die Oberflächenspannung zwischen dem Lot und der Luft σ_{LA} durch die Verwendung des Flussmittels verringert. Dieser Faktor wird wesentlich von der Lotlegierung, der Löttemperatur und dem verwendeten Flussmittel bestimmt. Doch um die Benetzung zu ermöglichen, muss die Oberflächenspannung zwischen dem Lotmaterial und der Luft hoch sein. /8, Seite 5/

Der Begriff der Lötbarkeit wurde in den IEC Richtlinien (Internationale Elektrotechnische Kommission) als „...die Gesamteignung eines Bauteilanschlusses für das industrielle Löten...“ /8, Seite 6/ definiert.

Daraus lassen sich drei für die Lötbarkeit entscheidende Eigenschaften ableiten:

- Benetzungsfähigkeit,
- Wärmebedarf und
- Wärmebeständigkeit.

Benetzungsfähigkeit ist die Eigenschaft von dem zu testenden Bauteil, mit dem Lotmaterial eine Legierung zu erzeugen. Unter Wärmebedarf versteht man, dass die Lötstelle eine bestimmte Temperatur erreichen muss, um den Lötprozess stattfinden zu lassen. Doch das Bauteil muss eine gewisse Wärmebeständigkeit aufweisen, das heißt, dass es die auftretende Wärme während des Lötprozesses ohne Einbuße in der Funktionalität standhalten muss. /8, Seite 6/

Diverse Metalle weisen verschiedene Benetzungsfähigkeiten und Lötbarkeiten auf. Es beruht in der Fähigkeit der Metalle, mit dem Zinn im Lot eine intermetallische Verbindung zu bilden. Bestehen die Bauteile beispielsweise aus Gold, so ist die Bildung einer Legierung mit dem Zinn im Lot sehr gut möglich, wodurch die Benetzung und auch die Lötbarkeit in einem hohen Maß erfolgen. Im Gegensatz dazu steht Titan. Es bildet mit Zinn kaum eine Legierung, weshalb das Löten nur sehr schwierig möglich ist. /8, Seite 3/

Auch die Zusammensetzung des Lotes ist im Themengebiet der Lötbarkeit entscheidend. Das Lot muss innerhalb und vor allem auf der Oberfläche vollkommen frei von Verschmutzungen sein, weil dadurch das Benetzungsverhalten verändert und auch verschlechtert werden kann. Es ist darauf zu achten, dass sämtliche Schmutzpartikel von den Lotmaterialien fern gehalten werden bzw. durch Einsatz von Flussmitteln entfernt werden. Die Oberflächenspannungen des Lotes werden durch an die Oberfläche dringende Störstoffe verringert und demzufolge wird die Benetzungsfähigkeit des schmelzflüssigen Lotdepots verschlechtert. /8, Seite 8/

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine hohe Benetzungsfähigkeit und im Zuge dessen die gute Lötbarkeit von Bauteilen von großer Bedeutung in der Technik sind. Es bieten sich viele Vorteile die das Löten vereinfachen und auch verbessern können. Als Vorteile von guter Lötbarkeit werden laut /8/ auf den Seiten 18 und 19:

- stärkere Lötverbindungen
- stabiler elektrischer Kontakt
- geringe Löttemperaturen
- kurze Lötzeiten
- Einsatz mild aktivierter Flussmittel
- einheitliche Lötzeiten und
- Kosten genannt.

Geringe Löttemperaturen bieten den Vorteil, dass beim Lötvorgang die Wärmebelastung auf das Bauteil nicht so hoch ist, so dass Beschädigungen eingedämmt werden können. Kurze Lötzeiten beschränken den Prozess der Wärmebelastung ebenfalls, außerdem wird die Bildung der intermetallischen Phase, die deutlich spröder ist, zwischen dem Bauteil und dem Lot reduziert und dadurch die Haltbarkeit der Verbindung erhöht. Der Punkt Kosten bezieht sich darauf, dass es deutlich weniger Kapital und Zeit benötigt, ein Bauteil mit schlechter Lötbarkeit aus dem Produktionsprozess zu entfernen, als eine schadhafte Lötstelle ausfindig zu machen und auszubessern. /8, Seite 18f/

2.2 Vorgang der Benetzungskraftmessung

Ein aussagekräftiger Parameter, um die Lötbarkeit zu charakterisieren, ist die Benetzungskraft, die mit Hilfe von Benetzungswaagen gemessen werden kann. Benetzungswaagen zeichnen die vertikale Kraft auf, die das aufgeschmolzene Lot auf den jeweiligen Prüfling ausübt, während es die Oberfläche benetzt und sich darauf während der Testzeit ausbreitet. Mit Hilfe eines Messwandlers wird das analoge Signal in ein digitales umgewandelt, woraus die Benetzungskraft-Zeit-Kurve ermittelt werden kann. /8, Seite 19/

Es gibt zwei verschiedene Methoden, um mit Benetzungswaagen die charakteristischen Benetzungskräfte zu messen.

Zum einen gibt es die Methodik des Lotbades. Hierbei wird der Prüfling mit einem schmelzflüssigen Bad aus Lotmaterial in Berührung gebracht und eine gewisse Testzeit dort eingetaucht. Das Lotbad hat im Vergleich zu dem zu prüfenden Bauteil ein unendlich großes Volumen. Zum anderen gibt es die Methode der laut /8/ auf Seite 24 sogenannten „...*Mikrobenetzungswaage*...“. Dabei wird ein Lotpellet, das üblicherweise zwischen 5 und 200 Milligramm schwer ist und dessen Volumen somit relativ klein ist, verwendet. Der Prüfling, der sich in einem Halter befindet, wird mit dem schmelzflüssigen Lotpellet in Berührung gebracht und die Benetzung findet ebenfalls statt. Mit diesem Verfahren können auch sehr kleine Bauteile getestet werden und zudem können die Messungen schneller vollzogen werden, da nicht erst eine große Menge an Lotmaterial aufgeschmolzen werden muss. /8, Seite 24f/

Mit Hilfe der Benetzungswaage werden Benetzungskurven aufgenommen, die einen typischen Verlauf, entsprechend Abbildung 7, haben. Der Ausgangspunkt (0) der Prüfung ist der Nullpunkt auf der Y-Achse, auf der die Benetzungskraft aufgetragen ist. Die Kurve startet stets auf dieser Nulllinie, da vor Beginn des Versuchsablaufes die Gewichtskraft von dem zu untersuchenden Bauteil und dem dazugehörigen Halter genullt werden.



Abb. 07 Typischer Benetzungskraftkurvenverlauf mit den charakteristischen Stadien (0-3) der Probenbenetzung

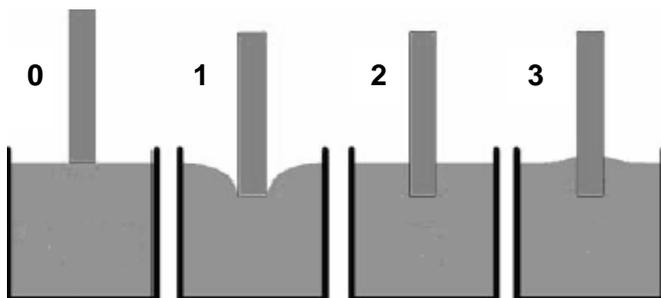


Abb. 08 Benetzungsschema /8, Seite 33/

Danach wird der bewegliche Tisch der Benetzungswaage nach oben gefahren und der Prüfling kommt mit dem Lotbad bzw. dem Lotpellet in Berührung und wird dann einen definierten Höhenbereich, beispielsweise 0,08 mm, eingetaucht. Die Eintauchgeschwindigkeit sollte stets so hoch sein, dass der Benetzungsvorgang nicht während des Eintauchens bereits beginnt. Das Lotmaterial wird zunächst vom Prüfling verdrängt und dann beginnt die Benetzung (1).

Es kann vorkommen, dass der Wärmebedarf, der zum Benetzen, also zum Löten, benötigt wird, in dem Punkt noch nicht erreicht ist, dann bleibt der Kraftwert konstant bis die Temperatur im Bauteil ausreichend hoch ist. Im Punkt 2 ist die Lotoberfläche horizontal, das bedeutet, dass die Verdrängung, die durch das Eintauchen aufgetreten ist, ausgeglichen ist. Hat der Vorgang des Lötens begonnen, so kann beobachtet werden, wie das Lot an der Oberfläche des Prüflings hochsteigt. Das Lotmaterial befindet sich zunächst rechtwinklig zum Prüfling. Danach steigt das Lot über die Oberfläche des Lotbades bzw. des Lotpellets hinaus und erreicht im Punkt 3 ein Maximum des starken Anstieges. Anschließend findet die Benetzung weiter statt, jedoch ist der Anstieg deutlich geringer und es wird ein konstanter Wert erreicht. Nach der festgelegten Testzeit, wird die Messung beendet und anschließend der bewegliche Tisch hinuntergefahren. /9/

Das Herunterfahren des Tisches ist für den Benetzungskraft-Zeit-Verlauf nicht entscheidend, da es keine verwertbaren Informationen liefert. Das wird vor allem mit der Bildung einer Oxidschicht im Verlauf der Messung begründet, die eine Verbindung zwischen Prüfling und Lotbad bzw. Lotpellet herstellt, so dass keine vergleichbaren Aussagen aus dem Herausziehen der Probe getroffen werden können. /8, Seite 23/

Nach Beendigung des Benetzungstestes ist es notwendig eine visuelle Betrachtung der Prüfkörper durchzuführen, da es auch vorkommen kann, dass eine Benetzungskraft detektiert wird, aber auf der Probenoberfläche kein dauerhaftes Anhaften von Lotmaterial beobachtet wird. Es ist also entscheidend, auch die Prüflinge zu untersuchen, um die aufgezeichnete Benetzung sinnhaft zu bestätigen.

Die von der Benetzungswaage aufgezeichnete vertikale Kraft ermöglicht Aussagen über die Veränderung der vertikalen Komponente der Oberflächenspannung. Es wird also die Änderung des Kontaktwinkels zwischen dem Lotmaterial und dem Prüfling, dessen Kosinus proportional zur vertikalen Kraft ist, deutlich. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 2, die die gemessene vertikale Kraft wiedergibt, ersichtlich:

$$F = \gamma \cdot U \cdot \cos \theta - g \cdot \rho \cdot V \quad (2)$$

Die Kraft setzt sich aus dem Produkt der Oberflächenspannung des geschmolzenen Lotes mit Flussmittel γ , dem Umfang des Prüfkörpers U und dem Kosinus des Kontaktwinkels $\cos \theta$ subtrahiert von dem Produkt aus Erdbeschleunigung g , der Dichte des geschmolzenes Lotes ρ und dem vom Prüfkörper verdrängten Volumen V zusammen.

Die rechte Seite dieser Gleichung stellt die Auftriebskraft der jeweiligen Probe dar. Diese bleibt während der gesamten Testzeit der Benetzung konstant und wird daher subtrahiert. Die Benetzungskraft ist somit das Produkt aus Oberflächenspannung des Lotes, dem Umfang des Prüfkörpers und dem Kosinus des Kontaktwinkels. Während der Testdauer ändert sich lediglich der Kontaktwinkel, wodurch sich durch die Proportionalität zueinander die Benetzungskraft in dem aufgezeigten typischen Verlauf über der Zeit verhält. /8, Seite 20f/

2.3 Versuchsdurchführung, Probenvorbereitung, Materialzusammenstellung

Die Messungen für diese Arbeit wurden ausschließlich mit der Methode der Mikrobenetzungswaage durchgeführt, da ein komplettes Eintauchen der Solarzellproben nicht dem praktischen Verlöten von Solarmodulen entspricht.

Um die Messungen mit Hilfe der Benetzungswaage durchführen zu können, müssen die Busbarstrukturen der Solarzellen, wie in Abbildung 9 dargestellt, aus der Gesamtstruktur der Zelle gelöst werden.

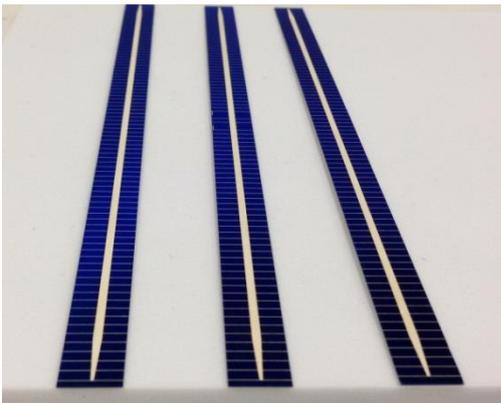


Abb. 09 Vereinzelte Busbarstrukturen

Dies wurde mit der Bearbeitung eines Lasers realisiert. Die Busbarstrukturen, die die Sammelkontakte darstellen, sind die Bereiche der Zellen, die mit einer weiteren Zelle mit Hilfe von Kupferbändchen verlötet werden. Dabei wird die Rückseite der einen Zelle mit der Vorderseite der zweiten Zelle verbunden, weshalb es wichtig ist, dass die Benetzung der Bereiche auf Vorder- und Rückseite der Zelle einwandfrei möglich ist. Im Abstand von 4 mm zu den Busbarstrukturen wurde auf beiden Seiten mit Hilfe von Laserschneiden der relevante Bereich aus den Solarzellen getrennt. Der Abstand zu den messtechnisch bedeutenden Strukturen ist notwendig, damit noch ausreichend Platz zum Befestigen der Solarzellproben ist. Im Anschluss erfolgte das manuelle Brechen der Busbar-bereiche auf eine handliche Größe von ungefähr 1 cm Länge unter Verwendung eines Diamantritzers.

Es wurde dabei auf eine Unterscheidung von Vorder- und Rückseite der Busbarstrukturen geachtet, da diese getrennt voneinander getestet werden (vgl. Abbildung 10).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit kam es noch zur Untersuchung von Solarzellen der Firma JA Solar, deren Kontaktflächen lediglich auf der Rückseite in Form von runden Bereichen aufgebracht sind. Es gibt dabei ebenfalls eine Unterscheidung von Vorder- und Rückseite, da es Kontaktflächen gibt, die mit der Vorderseite der Zellen verbunden sind und welche, die lediglich auf der Rückseite angebracht sind. Diese Kontaktflächen wurden ebenfalls durch Laserschneiden aus der Gesamtstruktur getrennt und einzeln mit der Benetzungswaage getestet (vgl. Abbildung 11).

Diese Zellprobenstücke, die in Abbildung 10 und 11 dargestellt sind, wurden vor den Tests mit der Benetzungswaage noch mit Ethanol gereinigt.

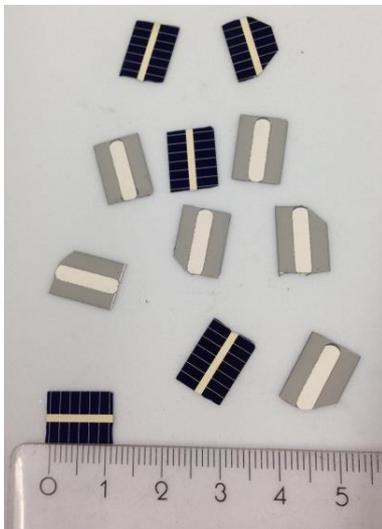


Abb. 10 Zellproben Q-Cells & Sunways



Abb. 11 Zellproben JA Solar

Zur Vorbereitung des beweglichen Tisches mit Heizplatte muss lediglich das bereits verwendete Pellet entfernt werden und ein neues Pellet aufgesetzt werden. Durch die hohen Temperaturen der Heizplatte, die bei den durchgeführten Messungen zwischen 235 und 265 °C liegen, wird das jeweilige Lot schmelzflüssig. Die Zellproben und die Lotpellets werden anschließend mit verschiedenen Flussmitteln behandelt, um organische Substrate und Oxidschichten zu entfernen.

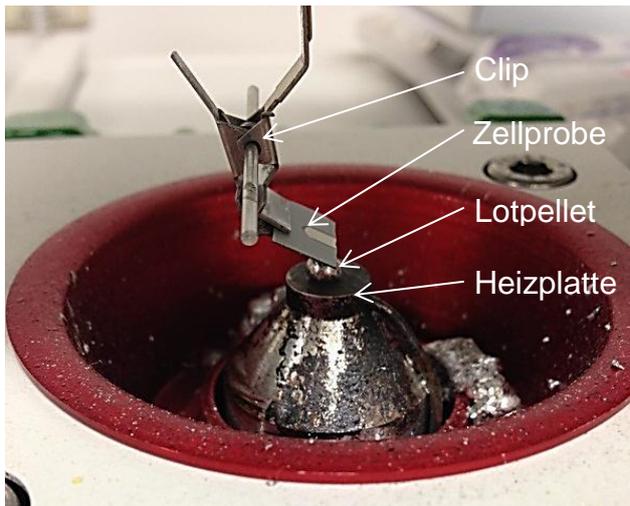


Abb. 12 Versuchsaufbau Benetzungswaage

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 12 dargestellt. Nach dem Einhängen der Probe und dem Austauschen des Lotpellets erfolgt die Ausrichtung des beweglichen Tisches, damit der Kontakt von Zellprobe und Lotmaterial sichergestellt ist. Nach diesem Schritt bewegt sich der Tisch mit Heizplatte und Lotpellet etwas nach unten, um die Messphase einzuleiten. Die Aufzeichnung der Benetzungskraft beginnt, wenn der Kraftsensor eine Berührung mit dem schmelzflüssigen Lot detektiert. Als Testzeit sind zehn Sekunden festgelegt. Dieser Zeitraum impliziert die praktischen Lötprozesse der Solarzellen, die in ungefähr drei Sekunden beendet sind. Längere Messintervalle würden Ergebnisse liefern, die mit dem praktischen Lötvorgang der Solarverschaltung schlecht vergleichbar wären.

Im Vorfeld der relevanten Messungen, wurden Probemessungen durchgeführt, um vor allem die Einarbeitung mit dem am Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) am Standort Halle (Saale) vorhandenen Messgerät der Firma GEN³ SYSTEMS durchzuführen und um verschiedene messtechnische Schwierigkeiten und Parameter zu überprüfen, um ein optimales und reproduzierbares Messergebnis zu gewährleisten.

Die Benetzungswaage stellt eine Vielzahl an variablen Parametern für die Messdurchführung bereit. Jedoch nicht alle Variationen bewirken Unterschiede der Benetzungsfähigkeit und der gemessenen Benetzungskräfte der Proben, sodass die weitere Untersuchung derer nicht relevant für die Verbindungsqualität der Solarzellen ist. Zunächst wurde der Fokus der vorab durchgeführten Benetzungstests auf die Veränderung der Vorheizzeiten gelegt. Das Gerät kann nach dem Ausrichtungsschritt die Heizplatte einen definierten Zeitraum knapp unter dem Prüfling halten, um eine Vorheizung der Probe durchzuführen.

Es wurden Versuche bei drei verschiedenen Vorheizzeiten durchgeführt, die jedoch keine erheblichen Unterschiede in den Benetzungskraft-Zeit-Kurven zur Folge hatten, sodass dieser Parameter für nachfolgende Messungen keine Relevanz hatte. In den zehn Sekunden des Testintervalls ist außerdem ausreichend Zeit, um die Wärme der Heizplatte auf das zu benetzende Zellstück zu übertragen.

Ein weiterer zu testender Faktor ist die Ausrichtung der Prüflinge. Praktisch findet das Verlöten der Solarzellen mit einem Tabber Stringer statt. Dabei werden die einzelnen Solarzellen zu Strings, was eine Aneinanderreihung von Solarzellen bedeutet, verbunden. Der Lötvorgang findet dabei horizontal statt. Die Ausrichtung der Prüflinge bei den Benetzungskraftuntersuchungen kann ebenfalls horizontal, aber auch unter einem Winkel von ungefähr 45° geschehen. Die Befestigung der Proben wird mit Clips realisiert, die zum Zubehör der Benetzungswaage gehören. Um die Messungen möglichst praxisorientiert durchzuführen, wurde zunächst ein Clip verwendet, der das Zellstück horizontal mit dem Lotpellet in Verbindung bringt, wie in Abbildung 13 aufgezeigt. Jedoch ist es schwierig die leicht zerbrechlichen Solarzellstückchen fest und stabil in diesen Clip zu bringen. Außerdem ist das manuelle Ausrichten schwierig möglich, da man schlecht erkennen kann, ob das Lotpellet die relevante Kontaktfläche der Zellprobe optimal berührt. Deshalb wurde ein anderer Clip verwendet, der die Solarzelle unter einem Winkel von ungefähr 45° in Berührung mit dem Lotpellet bringt. Das Probenhandling, die Fixierung und auch die Ausrichtung gelingen deutlich besser, auch mit Zellproben die durch das Brechen unterschiedliche Längen oder Breiten aufweisen. Mit Hilfe von durchgeführten Untersuchungen mit der Benetzungswaage ergaben sich keinerlei Unterschiede in den aufgezeichneten Benetzungskräften bei Variation der Zellausrichtung über dem Lotpellet. Alle relevanten Messungen wurden anschließend mit dem Clip durchgeführt, dessen Ausrichtung der Zelle über dem Lotmaterial in Abbildung 14 dargestellt ist.



Abb. 13 horizontale Ausrichtung der Solarzellprobe **Abb. 14** schräge Ausrichtung der Solarzellprobe

2.4 Bewertungskriterien zur Auswertung

Zur Auswertung der Benetzungskraftmessungen ist es erforderlich, dass Vergleichskriterien festgelegt werden, die es ermöglichen, die Kurvenverläufe zu charakterisieren und untereinander zu vergleichen.

Im Folgenden ist ein Diagramm mit drei typischen Benetzungskraftverläufen dargestellt, anhand dessen die Auswertungskriterien aufgezeigt werden.

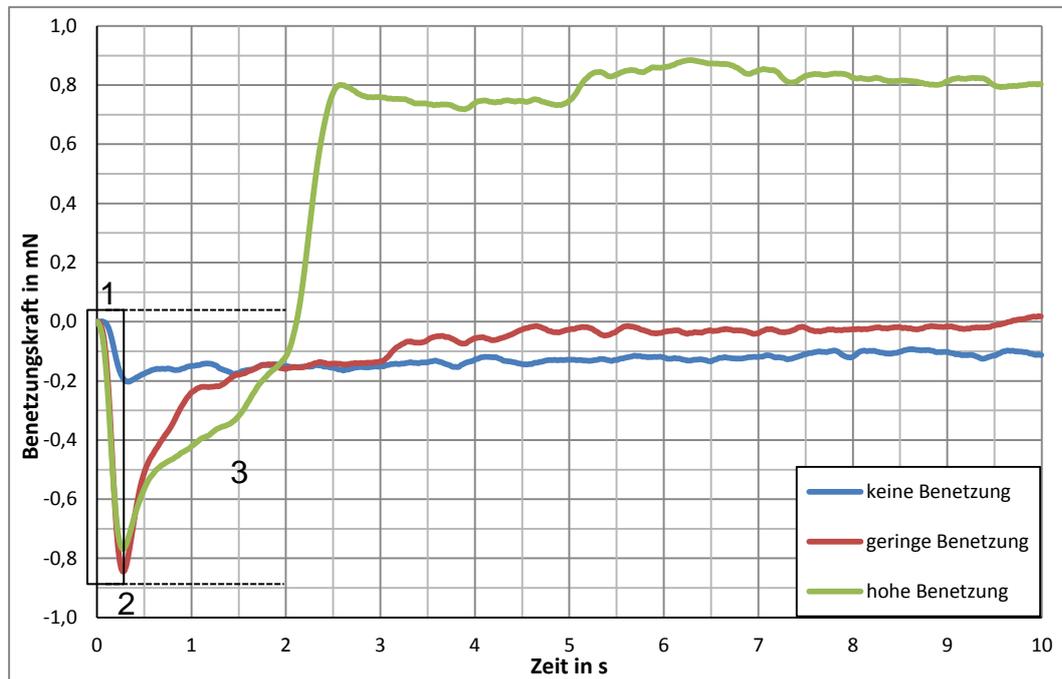


Abb. 15 Muster-Diagramm typischer Benetzungskraft-Zeit-Verläufe und ihrer charakteristischen Zeit-/ Kraftabschnitte zur Bewertung der Benetzbarkeit

Im obigen Diagramm sind typische Verläufe der Benetzungskraft über die Zeit dargestellt, wobei eine Differenzierung der Benetzungsfähigkeit möglich ist.

Zu Beginn der Messung findet das Eintauchen des Prüflings in das Lotmaterial statt, was zu einer Absenkung der Benetzungskraft, entsprechend Bereich 1 in Abbildung 15, führt. Ist die Eintauchphase beendet, beginnt die aktive Benetzung in Punkt 2. Die Zeit, die vergeht, bis der Anstieg der Kraft stattfindet, ist bei den Messungen stets verschieden bzw. in einer weiten Zeitspanne, wodurch Aussagen über die Benetzungsfähigkeit möglich sind. Ein weiterer Faktor ist der Anstieg nach der Eintauchphase. Ein steiler Anstieg, wie in Bereich 3 zu sehen ist, bedeutet, dass die Benetzung des Prüflings in einem hohen Maß abläuft und das Lotmaterial an der Oberfläche anfließt und anhaften kann. Ist der Anstieg sehr flach oder kaum vorhanden, wie in der blauen Kurve im Diagramm, so ist die Benetzung kaum bzw. gar nicht abgelaufen. Außerdem ist auch die maximale Benetzungskraft ausschlaggebend für die Charakterisierung der Benetzungskraftkurven. Dabei gilt, desto höher die Benetzungskraft ist, desto besser ist die Probe benetzt und/oder desto mehr Lotmaterial ist auf der Oberfläche des Prüflings zurückgeblieben.

Es ist notwendig alle drei aufgezeigten Kriterien zu beachten, denn wenn man beispielsweise das Augenmerk lediglich auf die maximale Benetzungskraft legt, so sind falsche Schlüsse möglich.

Im Vergleich zwischen der blauen Kurve, die keinerlei Benetzung darstellt und der roten Kurven, die eine Benetzung in geringem Maß charakterisiert, unterscheiden sich die maximal erreichbaren Kraftwerte nur um 0,1 mN. Doch, wenn man die Anstiege vergleicht, wird der Unterschied der Benetzungsfähigkeit deutlich.

Ein weiteres Bewertungskriterium der Benetzungskurven ist ein mehrstufiges Ansteigen der Benetzungskraft. Dabei findet der Anstieg nach dem Eintauchen nicht stetig statt, sondern es kommt nach der geringen Zunahme der Kraftwerte noch zu einem sehr steilen bis vertikalen Anstieg. Dabei findet ein erhöhtes Anhaften von Lotmaterial an der Probenoberfläche statt, wie in der grünen Kurve im obigen Diagramm aufgezeigt. Dieser Anstieg kann einmal, aber auch mehrfach auftreten. Während der Messungen kann visuell ein erhöhtes Anfließen des Lotdepots beobachtet werden, wenn der beschriebene mehrstufige Kurvenverlauf auftritt.

3 Das Lot-Referenzsystem

Das Referenzsystem bezieht sich auf die Arbeitsweise, die im Modultechnologiezentrum des Fraunhofer CSP in Schkopau angewendet wird. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse der Benetzungskraftuntersuchungen in die dortige Arbeitsweise einfließen zu lassen und gegebenenfalls die Auswahl des Flussmittels oder der verwendeten Lotpaste in Kombination mit den jeweiligen Zelltypen zu überdenken und durch Variation bisher angewendeter Parameter, ein besseres Benetzungsergebnis und somit haltbarere Lötverbindungen zu erzielen. Am Standort Schkopau werden komplette Solarmodule für Auftragskunden oder hauseigene Forschungszwecke hergestellt.

Als Vergleichssystem der Benetzungskraftmessungen wurde als Zelltyp die Q-Cells monokristalline Zelle in Verbindung mit Zinn-Blei-Silber Lotpellets und dem Flussmittel X3210i ausgewählt, die bei einer Temperatur von 235 °C unter Verwendung der Benetzungswaage untersucht worden sind. Das Flussmittel X3210i der Firma Stannol ist das derzeit beim Fraunhofer CSP verwendete Flussmittel zum Verlöten der Zellen. Die monokristallinen Solarzellen der Firma Q-Cells wurden ausgewählt, da dieser Zelltyp in einer großen Menge zur Verfügung stand. Die Lotpellets aus Zinn-Silber-Kupfer wurden verwendet, da in Schkopau verzinnte Kupferbändchen mit dieser Zusammensetzung beim Verlöten genutzt werden.

3.1 Experimentelle Durchführung der Benetzungskraftmessungen

Die oben aufgeführten Parameter wurden genutzt, um die Referenzkurven der Benetzungskraftmessungen zu erstellen. Die Differenzierung von Vorder- und Rückseite der Zellen ist stets notwendig, da sich die Metallisierungen auf den beiden Seiten unterscheiden.

Außerdem erfolgt noch der Vergleich der Kurven mit den benetzten Prüflingen, die im Anschluss an die jeweiligen Messungen mit Hilfe von Mikroskopieaufnahmen dokumentiert wurden sind. Dadurch können die Verläufe der Benetzungskurven besser gedeutet und ausgewertet werden.

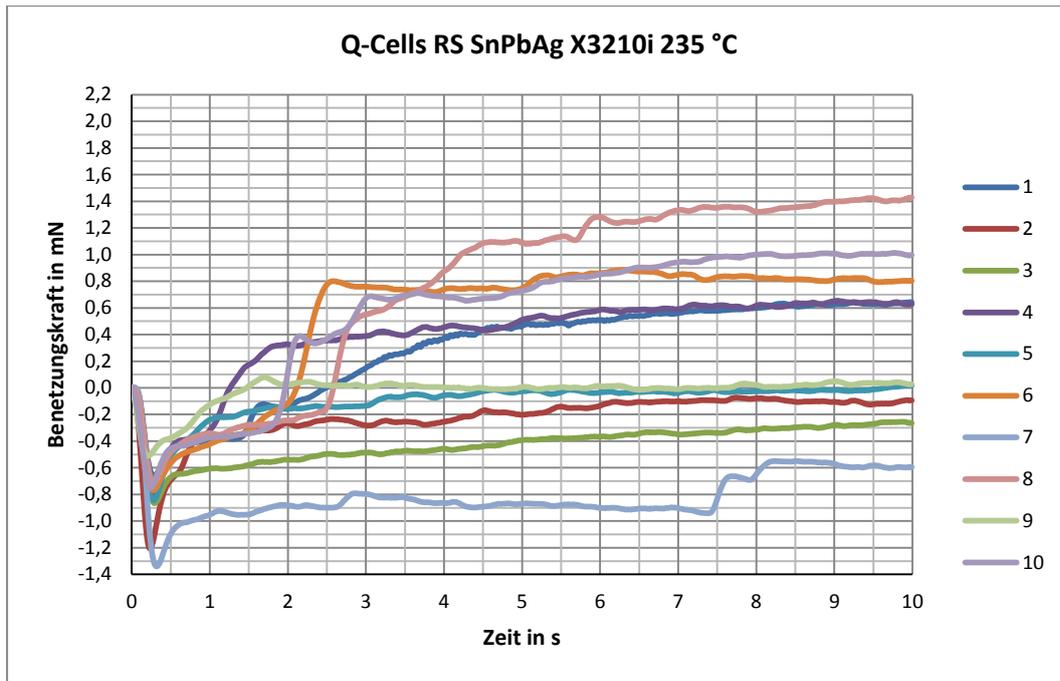


Abb. 16 Referenzsystem Rückseite

Die Kurvenverläufe der Kontaktflächen auf der Rückseite der Referenzzellsorte zeigen zu Beginn der Testdurchführung einen untereinander gleichen Verlauf auf. Die Eintauchphase ist für die zehn durchgeführten Messungen nach 0,29 s beendet. Die darauffolgenden Anstiege sind alle eher steil, wodurch eine stattfindende Benetzung bereits nach dem Eintauchen ersichtlich wird. Im weiteren Verlauf der Messung ist eine Unterteilung in zwei Kraftbereiche ersichtlich. Die Hälfte der untersuchten Zellproben weist einen zweiten Kraftanstieg auf, der ein erhöhtes Anhaften von Lotmaterial zur Folge hat. Fünf der durchgeführten Messungen erreichen einen maximal Benetzungskraftwert im Bereich von -0,3 bis 0,0 mN. Diese Werte sind relativ gering, was auch bei visueller Betrachtung der Zellproben nach den Messungen erkennbar wird, da deutlich weniger benetzte Fläche sichtbar ist, wie in Abbildung 17 dargestellt.

erneuter Kraftanstieg



stetiger/einmaliger Kraftanstieg



Abb.17 Referenzproben der Rückseite nach Benetzungstest

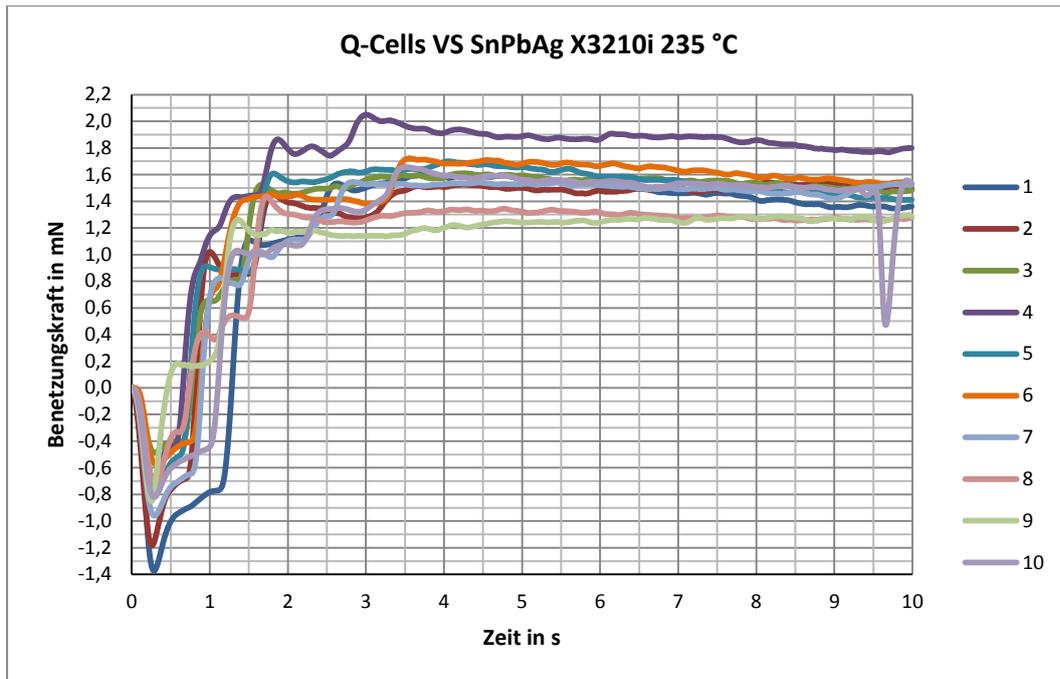


Abb. 18 Referenzsystem Vorderseite

Die Kurven der Benetzungskräfte der Vorderseite des Referenzsystems haben einen untereinander gleichen Verlauf. Das Eintauchen ist nach 0,32 s abgeschlossen und danach beginnt die aktive Benetzung aller Prüflinge. Die Anstiege sind von Beginn an sehr steil, was die gute Benetzung verdeutlicht. Eine zweite Zunahme der Kraftwerte findet ebenfalls statt, aber da die Kurven bereits sofort nach dem Eintauchen einen hohen Kraftwert erreichten, ist kein erhöhtes Anfließen zu beobachten. Die maximal erreichbaren Benetzungskräfte, die im Bereich von 1,3 bis 1,8 mN liegen, sind nach knapp 3,5 s erreicht. Das visuelle Benetzungsergebnis und die Menge an zurück-gebliebenem Lotmaterial sind bei allen durchgeführten Messungen vergleichbar. In Abbildung 19 ist die zurückgebliebene Menge des Lotmaterials an den Busbarstrukturen von zwei Prüflingen dargestellt.

zurückgebliebenes Lotmaterial



Abb. 19 Referenzproben der Vorderseite nach Benetzungstest

3.2 Zusammenfassung

Das Benetzungsergebnis, das zum einen die Benetzungskraftmessungen und zum anderen die optische Betrachtung der angehafteten Lotmenge umfasst, ist bei Vorder- und Rückseite der monokristallinen Solarzelle in Verbindung mit dem Standard-Flussmittel und den Standard-Lotpellets als gut benetzt zu bewerten. Die Benetzung fand bei allen untersuchten Prüflingen statt und es kam zur dauerhaften Anhaftung von Lotmaterial auf den Oberflächen der Zellproben. Prinzipiell ist das Benetzungsergebnis auf der Vorderseite besser, da die Kraftwerte schneller einen hohen Kraftbereich erreichen und alle Kurvenverläufe einen Wert von über 1,3 mN erreichen. Die Zellproben der Rückseiten weisen einen mehrstufigen Verlauf auf, wodurch die maximalen Kraftwerte erst später erreicht werden. Da die maximale Löttemperatur beim technischen Lötprozess nur knapp 2 Sekunden erreicht wird, ist zu diskutieren, ob das Verlöten haltbar stattfindet. Einige Messungen erreichen die maximalen Kraftwerte erst nach ungefähr 3,5 Sekunden. Außerdem bleiben die Kraftwerte der Hälfte der getesteten Zellproben in einem niedrigen Bereich. Das kann dazu führen, dass das Verlöten mit der Vorderseite nicht einwandfrei möglich ist, da die Benetzung nicht hinreichend schnell abläuft.

Nichtsdestotrotz ist das Verlöten mit diesen Parametern der derzeitige Stand der Technik. Im Folgenden findet die Variation der für die Benetzung und damit auch die Lötbarkeit relevanten Parameter statt.

4 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit belaufen sich hauptsächlich auf Benetzungskraftuntersuchungen in Verbindung mit der Variation von Parametern, die im Lötprozess relevant sind, wie:

- Zelltypen,
- Zellseiten,
- Lotmaterialien,
- Flussmittel und
- Löttemperatur.

Zunächst erfolgt die detaillierte Beschreibung der Parameter in Bezug auf den Einfluss derer auf den Lötprozess und die Benetzungsfähigkeit.

4.1 Variation von Parametern des Lötprozesses

Die Messungen mit der Benetzungswaage wurden mit drei Zelltypen von drei verschiedenen Herstellern durchgeführt. Die monokristalline Solarzelle der Firma Hanwha Q-Cells fungiert als Referenzzelle. Im Vergleich dazu werden Messungen mit polykristallinen Zellen der Firma Sunways gestellt. Diese beiden Zelltypen sind bezüglich Anordnung und Form der Kontaktflächen auf Vorder- und Rückseite vergleichbar. Der dritte Zelltyp der Firma JA Solar hat runde Kontaktflächen, die nur auf der Rückseite der Zelle aufgebracht sind. Es gibt eine direkte Verbindung von Kontaktflächen mit der Vorderseite, wodurch die Differenzierung der Seiten ebenfalls möglich und erforderlich ist.

Es liegen unterschiedliche Metallisierungen auf den Seiten der Zellen vor. Da die Zellen auf beiden Seiten verlötbar sein müssen, ist es notwendig, dass die Benetzungskraftmessungen jeweils auf beiden Seiten ausgeführt werden.

Um die Benetzungstests auszuführen, werden Lotpellets verwendet, die eine Masse von 200 mg haben. Die Zusammensetzung der Pellets wird mit Hilfe von Masseprozenten angegeben. Als Referenz wird ein bleihaltiges Lot aus Zinn-Blei-Silber mit einer Zusammensetzung von 62/36/2 % verwendet. Um den Einfluss verschiedener Lotmaterialien herauszufinden, werden die Benetzungstests ebenfalls mit zwei bleifreien Loten ausgeführt. Zum einen mit Zinn-Silber Lotpellets mit einer Zusammensetzung von 96/4 % und zum anderen mit Pellets aus Zinn-Silber-Kupfer mit einer Zusammensetzung von 96,5/3,0/0,5 %. Da die Bändchen, die zum Verlöten der Solarzellen verwendet werden, aus Kupfer bestehen, erhofft man sich durch den Zusatz von Kupferanteilen in den Lotpellets, eine bessere Lötbarkeit zu erzielen.

Die Löttemperatur, die auch bei den Benetzungstests entscheidend ist, unterscheidet sich zwischen bleihaltigen und bleifreien Loten. Die durchgeführten Benetzungstests wurden mit den bleihaltigen Loten bei einer Temperatur von 235 °C und mit den bleifreien Lot bei 250 °C durchgeführt. Diese Temperaturen wurden im Vorfeld an die Messungen aus der Quelle /10/ entnommen und erwiesen sich als die passenden Arbeitstemperaturen für die ausgeführten Untersuchungen.

Der Einfluss des Flussmittels ist ein weiterer Aspekt, der bei den Benetzungskraftmessungen untersucht worden ist. Es wurden drei verschiedene Flussmittel verwendet, die mit Hilfe der technischen Datenblatt kurz charakterisiert werden. Das Referenz-Flussmittel X3210i der Firma Stannol wird als „rückstandsarmes, halogenfreies Flussmittel“ /11/ bezeichnet. Es hat einen alkoholischen Geruch und einen Feststoffanteil von 2,5 m%. /11/

Die beiden anderen für die Benetzungstests angewendeten Flussmittel sind von der Firma Balver Zinn. In den Datenblättern dieser beiden Flussmittel ist eine optimale Verarbeitungstemperatur bei Verwendung von bleifreien Loten von 265 °C angegeben, weshalb Messungen bei dieser Temperatur durchgeführt worden sind. Das Flussmittel 396-DRX+ hat einen Feststoffanteil von 2,4 m% und einen Wassergehalt von 97 m%. Es wird als geruchslos und farblos charakterisiert. /12/

Im Gegensatz dazu steht das Flussmittel 390-RX-HT. Es hat einen starken alkoholischen Geruch und lediglich einen Wassergehalt von 5 m%. Der Feststoffanteil beträgt 2,2 m%. /13/

4.2 Experimentelle Untersuchung

Die Vielzahl der durchgeführten Messungen ist in folgender Versuchsmatrix dargestellt.

| Zelltyp | Lotmaterial | Temperatur | Flussmittel |
|---------------------|-------------|------------|---------------------------------|
| Q-Cells (VS/RS) | SnPbAg | 235-250 °C | X3210i 396-DRX+ 390-RX-HT |
| | SnAg | 235-265 °C | |
| | SnAgCu | | |
| Sunways (VS/RS) | SnPbAg | 235°C | X3210i 396-DRX+ 390-RX-HT |
| | SnAg | 235-250 °C | |
| | SnAgCu | 250 °C | |
| JA Solar (VS/RS) | SnPbAg | 235 °C | X3210i |
| | SnAg | 250 °C | |
| | SnAgCu | | |

Tabelle 1 Versuchsmatrix der Materialkombinationen für die Benetzungstests

Die Temperaturen sind in Bereichen dargestellt, die sich durch die technischen Datenblätter der Flussmittel, die in Punkt 4.1 / Variation von Parametern des Lötprozesses aufgezeigt sind, begründen lassen. Die Abkürzungen VS und RS stehen jeweils für Vorder- bzw. Rückseite. Sämtliche Benetzungstests wurden entsprechend für beide Seiten der Solarzellen durchgeführt, da sich die relevanten Metallisierungen der Kontaktflächen gegenseitig unterscheiden.

4.3 Ergebnisdarstellung der Experimente, Benetzungskraftkurven

Die oben aufgeführten Experimente wurden durchgeführt und die Benetzungskraftkurven über der Zeit aufgetragen. Zudem erfolgte die Bewertung der Lotanhaftung an den Kontaktflächen der Solarzellen. Mit Hilfe von Aufnahmen der Zellproben ist eine eindeutigere Charakterisierung der durchgeführten Benetzungstests möglich.

Zunächst wurden die Einflüsse der Variationen von Lotmaterial, Flussmittel und Temperatur an der als Standard festgelegten Zelle von Q-Cells untersucht.

Q-Cells X3210i

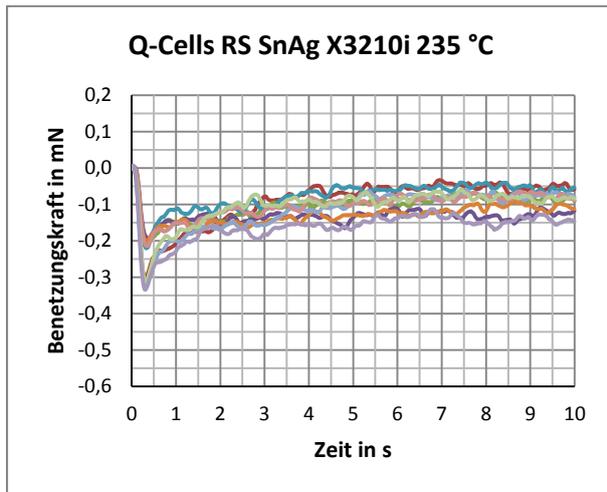


Abb. 20 Q-Cells Rückseite SnAg X3210i 235 °C

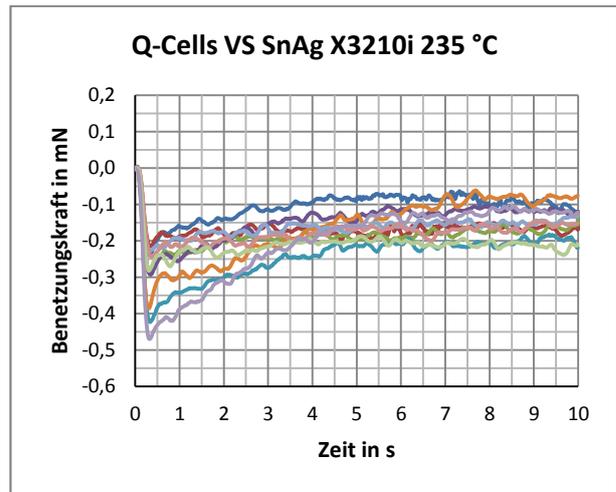


Abb. 21 Q-Cells Vorderseite SnAg X3210i 235 °C

Die erste Variation bezüglich des Referenzsystems bezieht sich auf die Verwendung eines bleifreien Lotpellets aus Zinn-Silber. Das Eintauchen ist bei allen Messungen und auf beiden Seiten der Solarzelle nach 0,25 s beendet. Die Kraftwerte sinken bei den Benetzungstests auf der Vorderseite deutlich weiter ab. Die aktive Benetzung findet anschließend kaum bzw. sehr wenig statt, was zum einen durch die geringen Anstiege der Kurven und zum anderen durch die niedrigen maximal erreichbaren Kraftwerte offensichtlich wird. Auf den Kontaktflächen der Rückseite liegen diese Kräfte in einem Bereich von -0,15 bis -0,05 mN und auf der Vorderseite zwischen -0,25 und -0,1 mN. Eine dauerhafte Anhaftung von Lotmaterial ist nach den Messungen selten zu beobachten. Bei der Vielzahl der Messungen blieb beim Herunterfahren des beweglichen Tisches kein Lot an der Oberfläche der Zelle zurück oder es kam zum Ablösen des Lotes nach Abkühlung der Prüflinge, wie in Abbildung 22 ersichtlich wird. Die Benetzung wird bei Verwendung der Zinn-Silber-Pellets auf beiden Zellseiten als nicht ordnungsgemäß bewertet.

Rückseite



Vorderseite

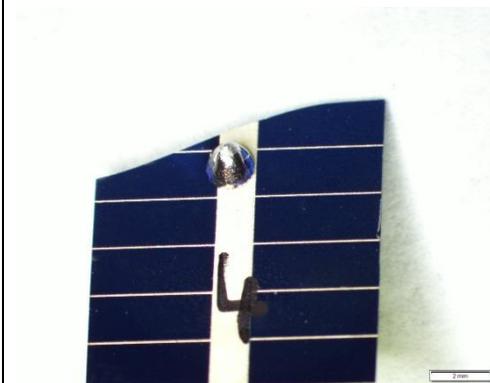


Abb. 22 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAg X3210i 235 °C

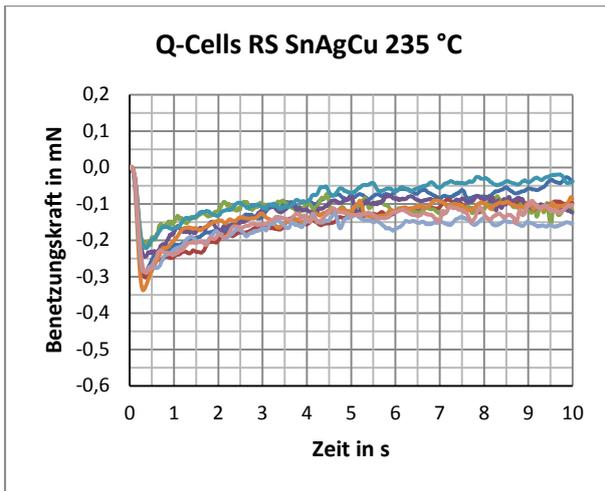


Abb. 23 Q-Cells Rückseite SnAgCu X3210i 235 °C

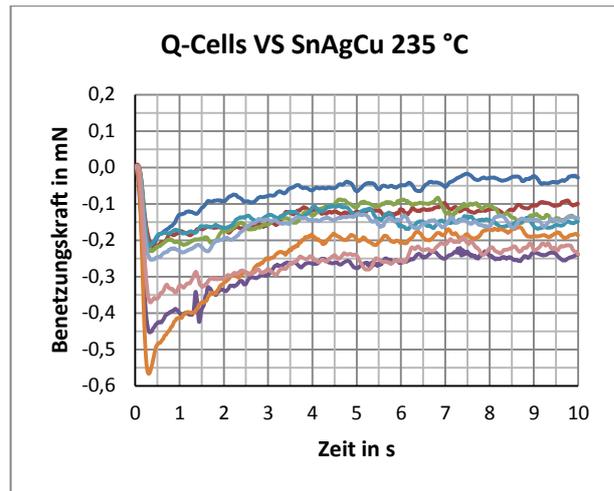


Abb. 24 Q-Cells Vorderseite SnAgCu X3210i 235 °C

Die Kurvenverläufe unter Verwendung der Lotpellets aus Zinn-Silber-Kupfer unterscheiden sich bei 235 °C kaum von denen der Zinn-Silber-Lote. Die maximal erreichbaren Kraftwerte bleiben im negativen Bereich. Die Eintauchphase ist bei allen durchgeführten Messungen nach 0,25 s beendet. Die Anstiege der Kurven nach dem Eintauchen sind zumeist sehr flach, wodurch die geringe Benetzungsfähigkeit deutlich wird. Die Benetzungskräfte der Vorder- und Rückseite unterscheiden sich dadurch, dass die Streuung der aufgezeichneten Kurven auf der Vorderseite höher ist. Sämtliche durchgeführte Benetzungstests der Kontaktflächen der Rückseiten zeigen im Anschluss an die Messungen keinerlei zurück gebliebenes Lotmaterial, wie in Abbildung 25 offensichtlich wird. Es kam vermehrt dazu, dass Lot an der Oberfläche anhaftete, doch nach dem Abkühlen löste sich das Material ohne Rückstände auf der Busbarstruktur. Die Vorderseite der Standard-Zelle unterscheidet sich in ihrer Benetzungsfähigkeit minimal von der Rückseite. Einige der acht Kurven haben einen relativen steilen Anstieg, weshalb es an zwei Prüflingen zu einer dauerhaften Anhaftung von Lot kam, jedoch nur punktuell auf dem Busbar.

Rückseite



Vorderseite



Abb. 25 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu X3210i 235 °C

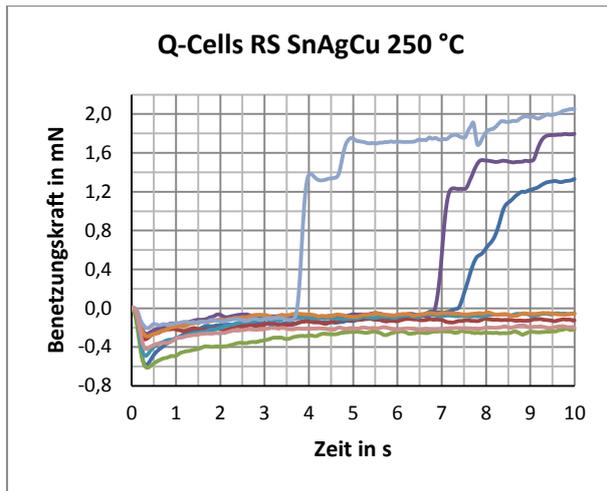


Abb. 26 Q-Cells Rückseite SnAgCu X3210i 250 °C

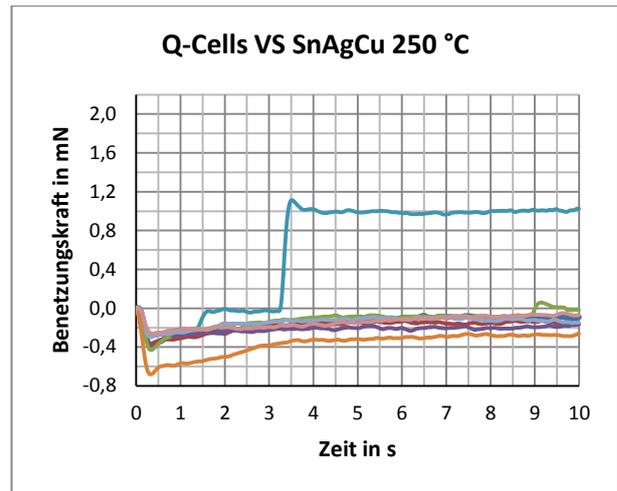


Abb. 27 Q-Cells Vorderseite SnAgCu X3210i 250 °C

Da das Benetzungsergebnis mit den Lotpellets aus Zinn-Silber-Kupfer bei 235 °C nicht zufriedenstellend war, wurde die Temperatur um 15 K erhöht und die Messungen erneut durchgeführt. Die Kurvenverläufe der Benetzungskraft unterscheiden sich kaum bei Variation der Temperatur. Die Kraftwerte bleiben bei beiden Seiten der Solarzellproben auf einem niedrigen Niveau. Auffällig ist, dass es bei drei Prüflingen, deren Rückseitenkontakt untersucht worden ist, zu einem weiteren Anstieg der Benetzungskraft kommt. Die Kraft steigt auf einen Wert von bis zu 2,05 mN an. Diese drei Prüflinge sind im Anschluss an die Untersuchung der Benetzungswaage stark mit Lotmaterial benetzt. Das erhöhte Anfließen ist während der Versuchsdurchführung beobachtbar gewesen. Auch auf der Vorderseite gab es eine Benetzungskurve, die diesen Verlauf aufweist. Entsprechend Abbildung 28 wird der beschriebene Kraftanstieg auch optisch auf den Prüflingen sichtbar. Üblicherweise liegen die Kraftwerte der durchgeführten Benetzungstests der Rückseitenkontakte zwischen -0,25 und -0,05 mN, was vergleichbar mit den Werten ist, die bei einer Messtemperatur von 235 °C erreicht worden sind.

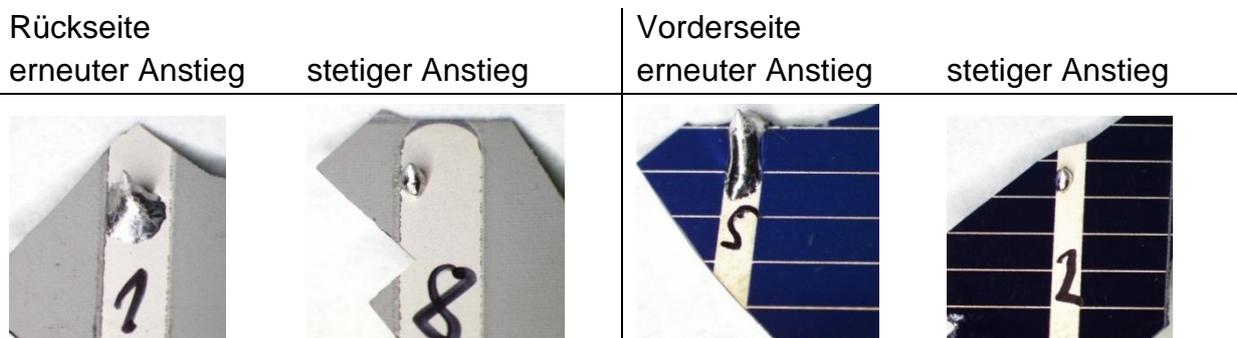


Abb. 28 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu X3210i 250 °C

Q-Cells 396-DRX+

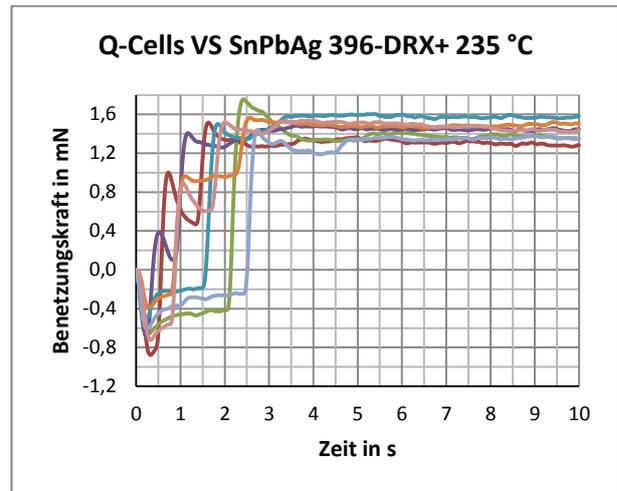
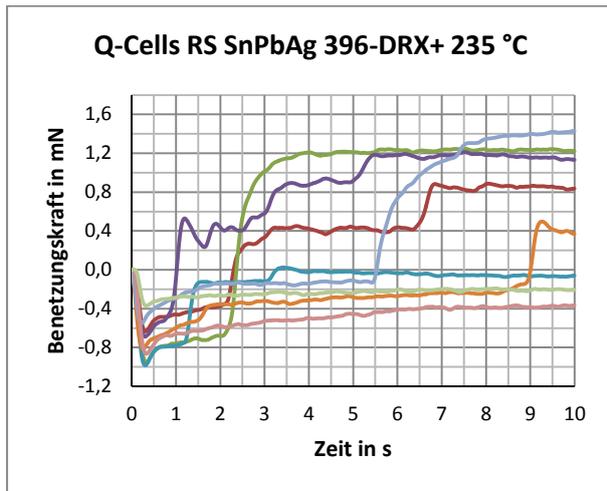


Abb. 29 Q-Cells Rückseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

Abb. 30 Q-Cells Vorderseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

Die Variation des Flussmittels bei der als Standard festgelegten Zellsorte mit den Lotpellets aus Zinn-Blei-Silber zeigt eine deutliche Unterscheidung der Kraft-verläufe von Vorder- und Rückseite auf. Die Kurven der Rückseiten haben generell einen zweistufigen Anstieg und streuen sichtbar untereinander. Die maximal erreichbaren Benetzungskraftwerte sind in zwei Bereiche zu differenzieren. Findet ein erneuter Kraftanstieg statt, so ist mehr Lotmaterial an der Oberfläche der Kontaktfläche zurückgeblieben, entsprechend Abbildung 31. Die Benetzung der Rückseitenpads erfolgte in einem hohen Maß bei allen getesteten Proben. Die Kraftverläufe der Vorderseite zeigen ebenfalls stets einen mehrstufigen Verlauf, jedoch mit sprunghaften Kraftanstiegen. Die maximal erreichbaren Kraftwerte liegen in einem Bereich von 1,3 bis 1,6 mN, wodurch die gute Benetzungsfähigkeit deutlich wird. Bei allen durchgeführten Messungen sind die Kontaktflächen der Vorderseite sehr gut benetzt.

Rückseite

erneuter Anstieg

stetiger Anstieg

Vorderseite

sprunghafter Anstieg bei allen Prüflingen

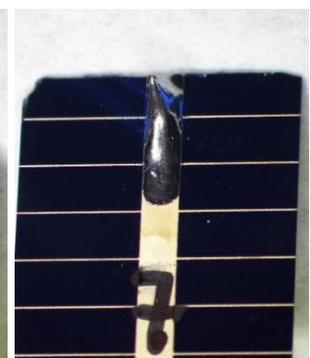
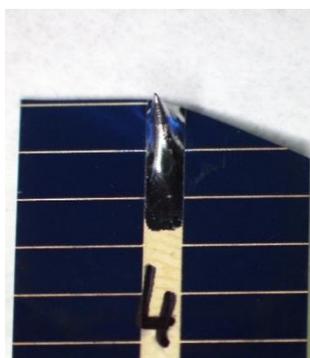


Abb. 31 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

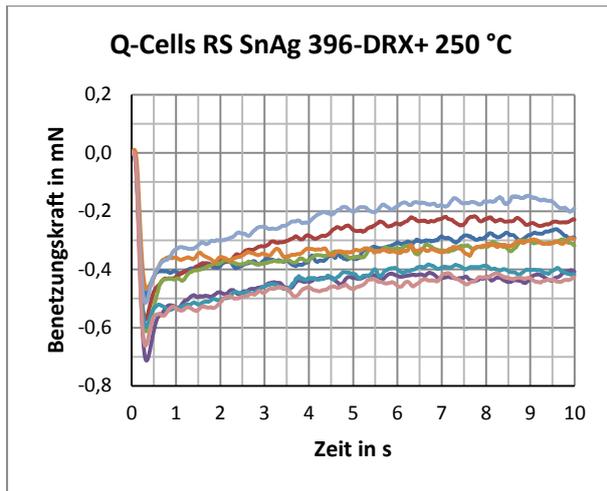


Abb. 32 Q-Cells Rückseite SnAg 396-DRX+ 250 °C

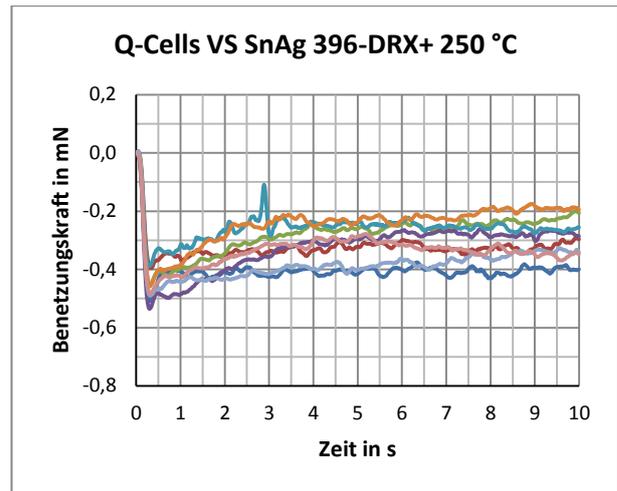
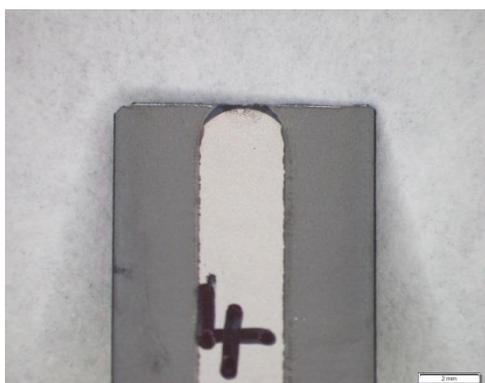


Abb. 33 Q-Cells Vorderseite SnAg 396-DRX+ 250 °C

Um vergleichbare Aussagen dieses Flussmittels bezüglich des Referenz-Flussmittels X3210i treffen zu können, ist es erforderlich, dass auch die bleifreien Lote mit Hilfe der Benetzungswaage untersucht werden.

Wie bereits durch die Kurvenverläufe der beiden Seiten der Solarzellmetallisierung ersichtlich wird, findet die Benetzung mit dem Lot aus Zinn-Silber kaum bzw. gar nicht statt. Die Anstiege nach der Eintauchphase sind beim Großteil der aufgezeichneten Benetzungskurven sehr flach. Die maximal erreichbaren Benetzungskräfte übersteigen einen Wert von -0,2 mN nicht. Wie in Abbildung 34 deutlich wird, konnte kein Lot an den Zellproben beständig anhaften. Auch auf den Kontaktflächen sind keine Rückstände sichtbar, die auf eine Reaktion des Lotes mit der jeweiligen Metallisierung zurückzuführen wären.

Rückseite



Vorderseite



Abb. 34 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAg 396-DRX+ 250 °C

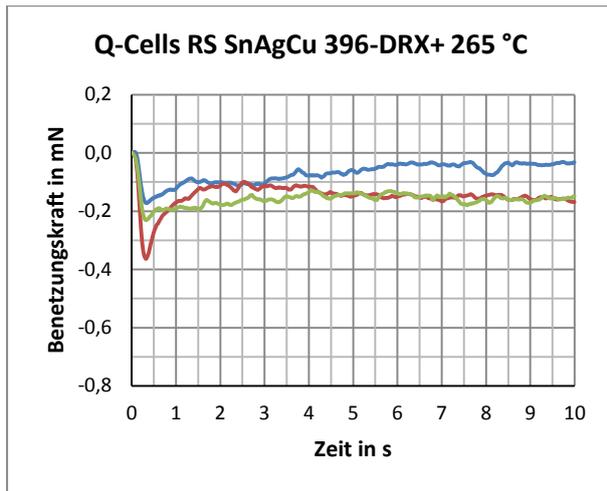


Abb. 35 Q-Cells Rückseite SnAgCu 396-DRX+ 265 °C

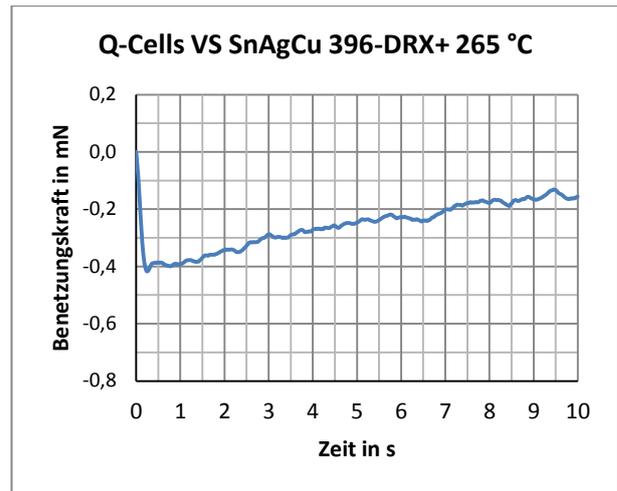


Abb. 36 Q-Cells Vorderseite SnAgCu 396-DRX+ 265 °C

Auch bei Verwendung der kupferhaltigen Pellets bei der für das Flussmittel empfohlenen Lottemperatur (265 °C) ist keine Benetzung der Solarzelle möglich. Es bleibt kein Lot an den Oberflächen haften. Die Messungen wurden vorzeitig beendet, da keinerlei Anfließen oder Interaktion zwischen Zellmetallisierung und Lotmaterial beobachtbar war.

Q-Cells 390-RX-HT

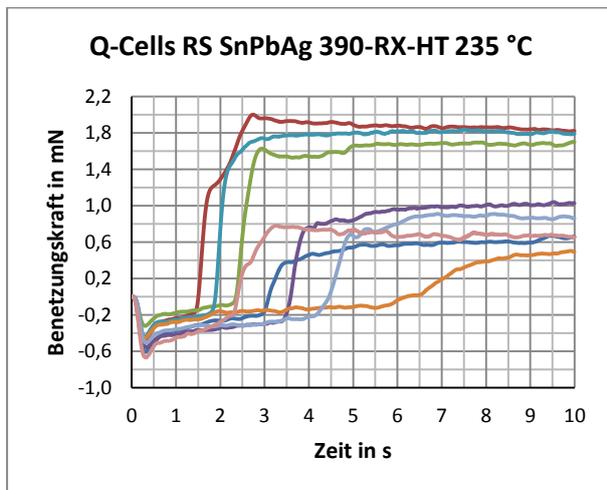


Abb. 37 Q-Cells Rückseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

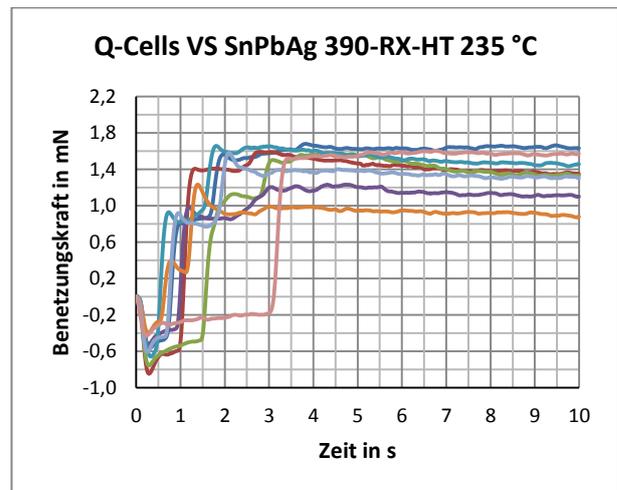


Abb. 38 Q-Cells Vorderseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

Das dritte Flussmittel, das bei den Benetzungsuntersuchungen angewendet wurde, zeigt ebenfalls ein sehr gutes Benetzungsergebnis der Q-Cells Solarzelle mit den Zinn-Blei-Silber-Pellets, was vergleichbar mit den Ergebnissen auf Seite 32 ist. Die Kraftwerte der Rückseite sind deutlich höher als unter Verwendung der beiden anderen Flussmittel. Es ist eine Unterscheidung der maximal erreichbaren Kraftwerte in zwei Bereiche möglich. Der Hauptteil der Benetzungskräfte liegt in einem Bereich von 0,5 bis 1,0 mN. Drei der getesteten Prüflinge weisen einen sehr steilen Anstieg auf, wodurch die Benetzungskraft maximal 1,8 mN erreicht und die Menge an Lot auf der Oberfläche der Zellproben ebenfalls qualitativ etwas höher ist. Die Benetzungskurven der Vorderseiten sind vergleichbar mit denen unter Nutzung der

beiden anderen Flussmittel. Es gibt einen zweistufigen Verlauf mit starkem Anstieg. Die maximalen Benetzungskräfte sind hier zwischen 0,9 und 1,65 mN. Die Benetzung ist auf beiden Seiten als gut zu bewerten. Die Menge an angehafteten Lot ist in Abbildung 39 dargestellt. Der deutlich steilere Anstieg der Benetzungskurven der Rückseitenflächen der Zellproben hat nur einen minimalen Einfluss auf die Menge des zurück gebliebenen Lotes.

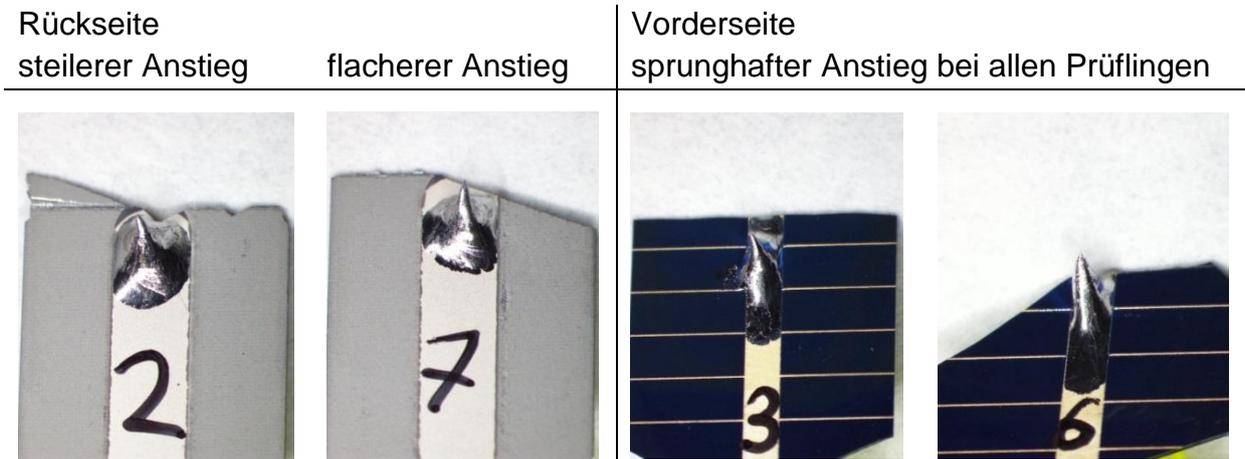


Abb. 39 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

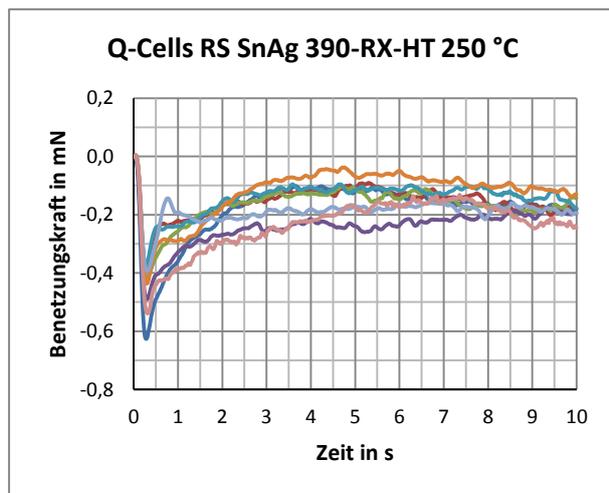


Abb. 40 Q-Cells Rückseite SnAg 390-RX-HT 250 °C

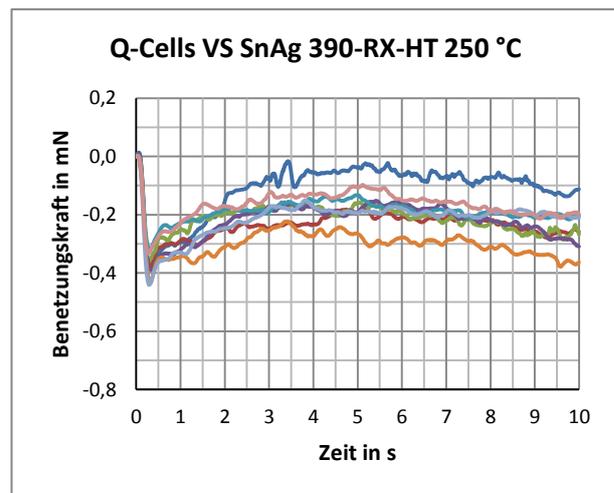


Abb. 41 Q-Cells Vorderseite SnAg 390-RX-HT 250 °C

Die Benetzung mit Zinn-Silber-Lot findet auch unter Vorbehandlung mit dem Flussmittel 390-RX-HT nicht statt. Die Benetzungskräfte bleiben wieder im negativen Bereich. Trotz einiger steiler Anstiege auf den Rückseitenkontakten ist keine Anhaftung möglich, da die Kraftwerte im Verlauf der Messungen wieder abnehmen, was auf eine Entnetzung hinweist. Weder auf Vorder- noch auf Rückseite wird eine dauerhafte Benetzung der Oberflächen ersichtlich.

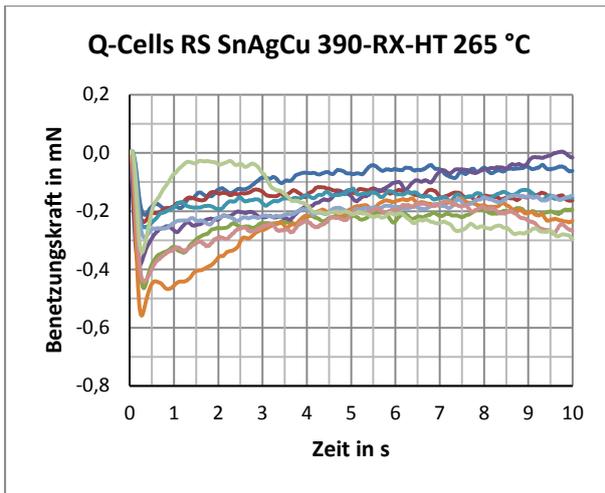


Abb. 42 Q-Cells Rückseite SnAgCu 390-RX-HT 265 °C

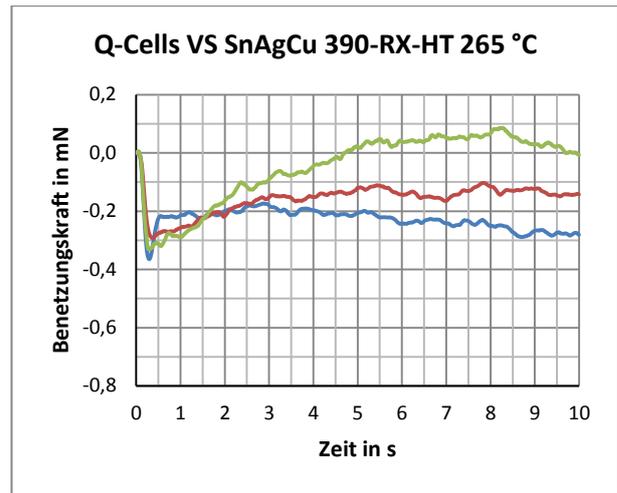


Abb. 43 Q-Cells Vorderseite SnAgCu 390-RX-HT 265 °C

Die Benetzungskurven ähneln sehr den durchgeführten Messungen mit den anderen Flussmitteln. Es ist ebenfalls keine aktive Benetzung sichtbar, weshalb die Kraftwerte wieder auf einem niedrigen Niveau bleiben. Sofort im Anschluss an die Messungen konnte vermehrt zurückgebliebenes Lotmaterial detektiert werden, das nach dem Abkühlen jedoch nicht an den Zelloberflächen anhaften konnte, wie in Abbildung 44 deutlich wird.

Aufgrund der Vielzahl der durchgeführten Messungen lag eine Verunreinigung der Heizplatte vor, wodurch es dazu kam, dass das gesamte Lotpellet beim Herunterfahren des Tisches durch Reaktion mit dem Flussmittel mitgerissen wurde, entsprechend Abbildung 44. Nach dem Abkühlen war jedoch keine Verbindung mit der Kontaktfläche ersichtlich. Diese Messreihe wurde deshalb nach dem Reinigen der Versuchseinheit erneut durchgeführt, jedoch konnte auch dabei keine Benetzung erfolgen, weshalb die Benetzungskurven der ersten Ausführung zur Auswertung verwendet werden können.

Rückseite



Vorderseite

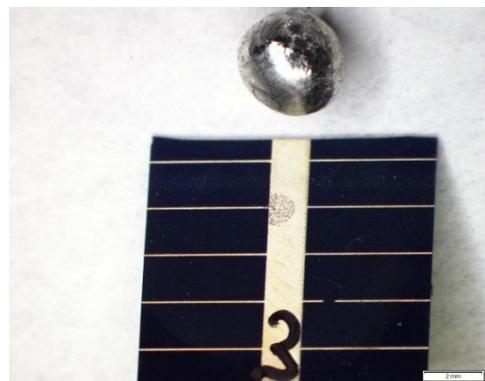


Abb. 44 Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu 390-RX-HT 265 °C

Sunways

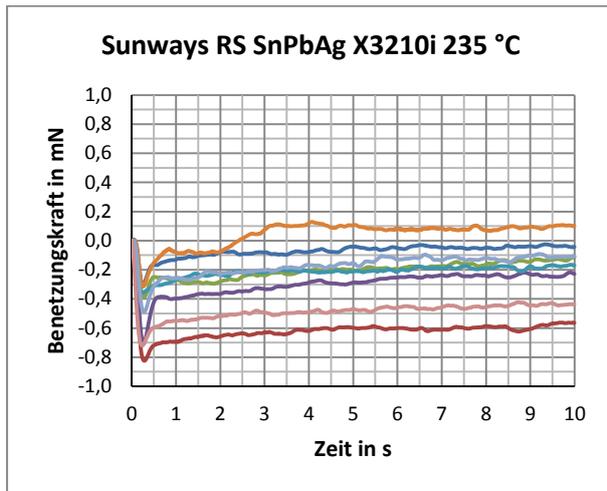


Abb. 45 Sunways Rückseite SnPbAg X3210i 235 °C

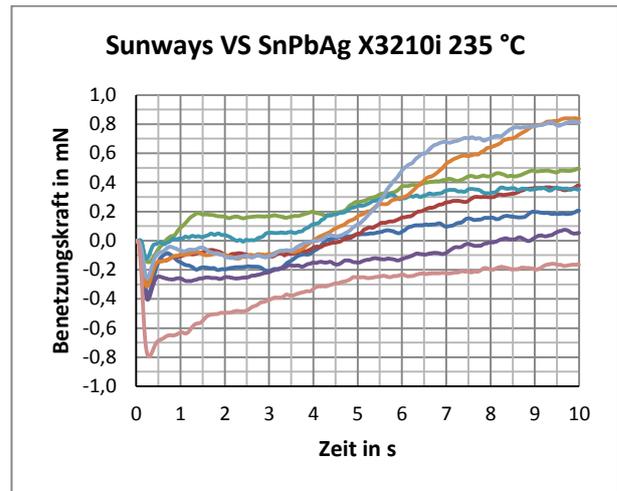


Abb. 46 Sunways Vorderseite SnPbAg X3210i 235 °C

Die Variation der Zellsorte unter Verwendung der Referenz-Parameter zeigt auf dem ersten Blick deutlich andere Kurvenverläufe als die der Q-Cells Solarzelle. Die maximal erreichten Kraftwerte liegen auf den Rückseitenkontaktflächen nur in einem Bereich von -0,6 bis 0,1 mN. Dennoch ist die Benetzung als gut zu beurteilen. Zum einen dadurch, dass die Anstiege nach der Eintauchphase steil sind und schnell die maximalen Kraftwerte erreicht sind und zum anderen dadurch, dass deutlich Lot an der Oberfläche sichtbar ist, wie auch in Abbildung 47 dargestellt. Die Kontaktflächen der Vorderseite der Sunways Zelle werden ebenfalls gut benetzt. Obwohl die maximalen Benetzungskräfte in einem weiten Bereich von -0,2 bis 0,85 mN liegen, ist entsprechend Abbildung 47 keine Differenzierung der angehafteten Lotmenge möglich.

Rückseite

Vorderseite

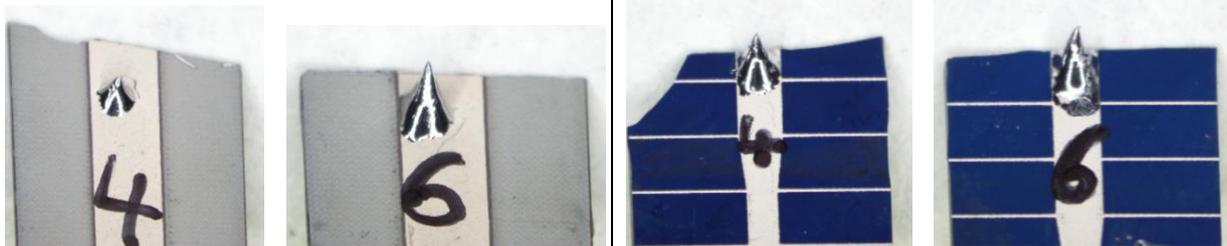


Abb. 47 Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg X3210i 235 °C

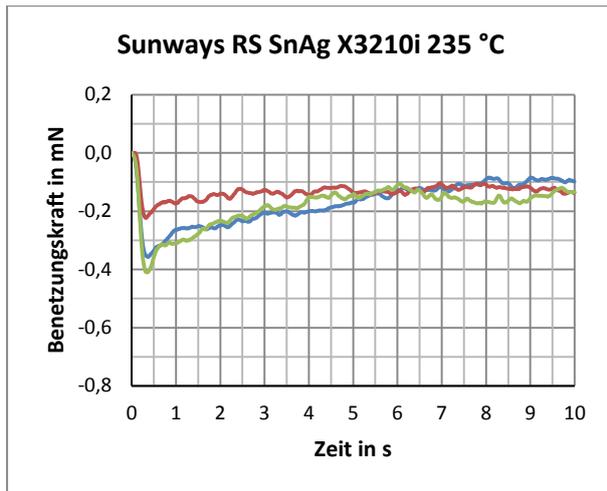


Abb. 48 Sunways Rückseite SnAg X3210i 235 °C

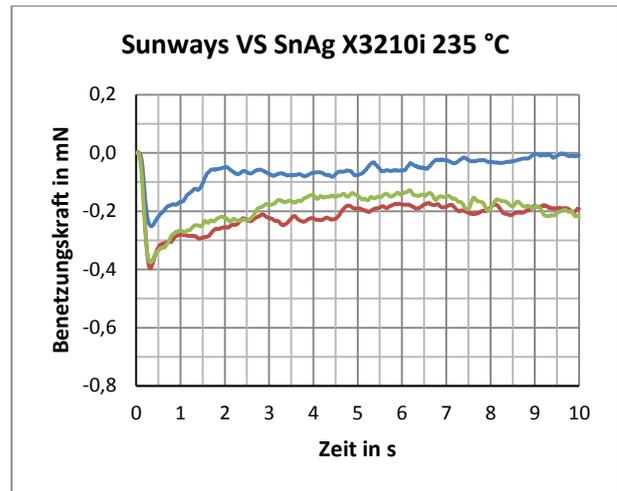


Abb. 49 Sunways Vorderseite SnAg X3210i 235 °C

Bereits nach jeweils drei durchgeführten Messungen wurde offensichtlich, dass die Benetzung unter Verwendung des bleifreien Lotes aus Zinn-Silber nicht stattfindet. Während der Messungen konnte kein Anfließen beobachtet werden, was die flachen Kurvenverläufe bestätigt. Die Benetzungskräfte erreichen weder einen positiven Wert, noch findet eine aktive Benetzung nach dem Eintauchen in das Lotpellet statt.

Unter Verwendung der Zinn-Silber-Kupfer Lotpellets ist dasselbe Benetzungsbild aufgetreten. Die Diagramme dazu können im Anhang 2 eingesehen werden. Auch bei einer höheren Temperatur von 250 °C findet keine Anhaftung des Lotes statt, wie in Abbildung 50 deutlich wird.

Rückseite



Vorderseite



Abb. 50 Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnAgCu X3210i 250 °C

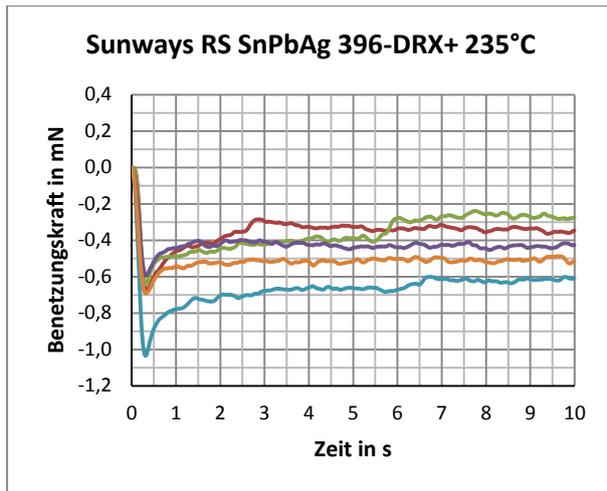


Abb. 51 Sunways Rückseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

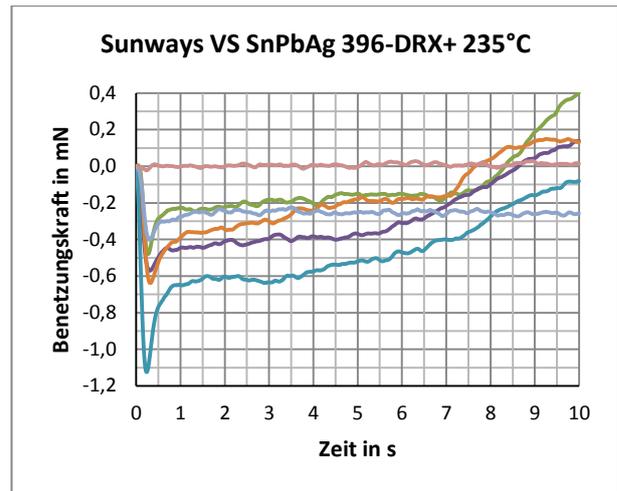


Abb. 52 Sunways Vorderseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

Die Benetzungskraftkurven sehen qualitativ bei Variation des Flussmittels und unter Verwendung des Standard-Lotpellets denen mit dem Standard-Flussmittel X3210i sehr ähnlich. Jedoch ist auf den Rückseitenkontaktflächen prinzipiell keine Benetzung mit dem bleihaltigen Lot sichtbar, siehe Abbildung 53. Die Vorderseitenstrukturen werden dennoch benetzt, wodurch die unterschiedlichen Metallisierungen der beiden Seiten der Solarzellen erkennbar werden. Die maximalen Kraftwerte der Vorderseite sind in einem Bereich von -0,3 bis 0,4 mN.

Rückseite



Vorderseite

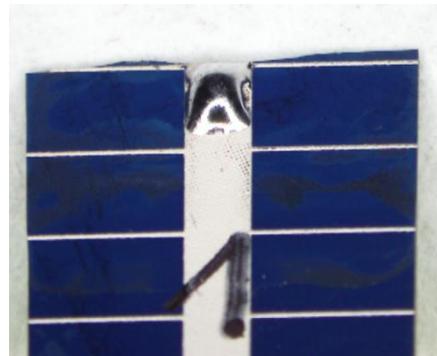


Abb. 53 Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg 396-DRX+ 235 °C

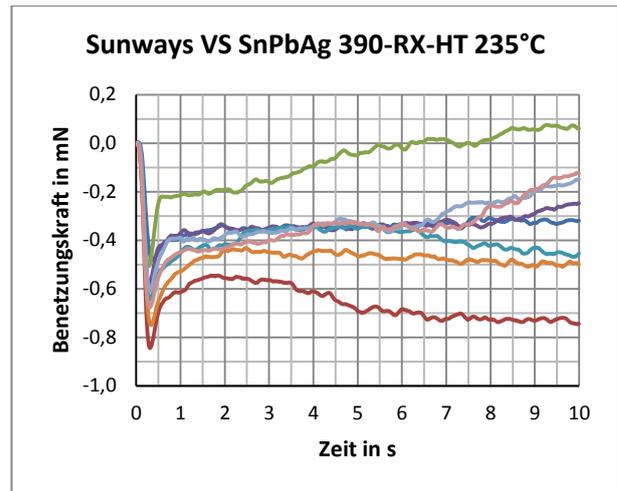
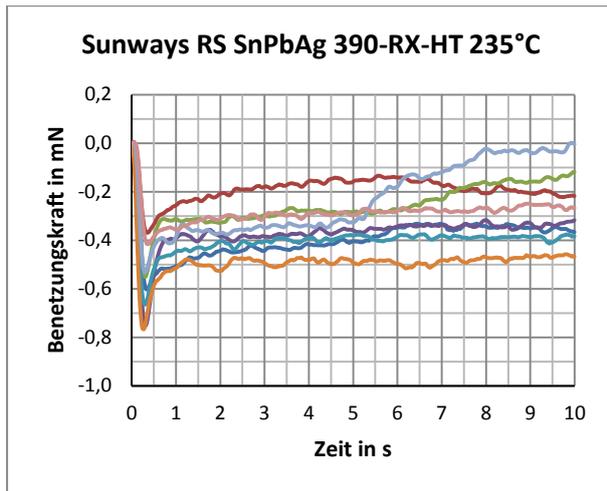


Abb. 54 Sunways Rückseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

Abb. 55 Sunways Vorderseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

Die Kurvenverläufe ähneln ebenfalls den Diagrammen der beiden anderen Flussmittel bei Verwendung des bleihaltigen Lotes. Obwohl sich die Diagramme der Benetzungskraftkurven der Rückseite im Vergleich zum Flussmittel 396-DRX+ kaum unterscheiden, kann mit dem Flussmittel 390-RX-HT eine Benetzung der Oberfläche erreicht werden. Die Bereiche der maximalen Benetzungskräfte liegt zwischen -0,5 bis 0,0 mN und dennoch ist die aktive Benetzung deutlich sichtbar. Die Busbars der Vorderseite weisen einen ähnlichen Verlauf auf, weshalb sich auch die Menge des angehafteten Lotes kaum unterscheidet.

Rückseite

Vorderseite

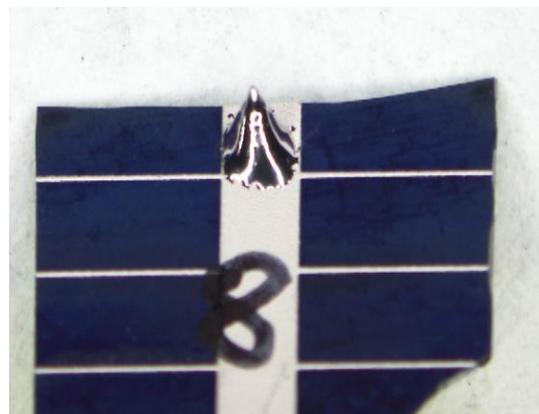


Abb. 56 Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg 390-RX-HT 235 °C

JA Solar

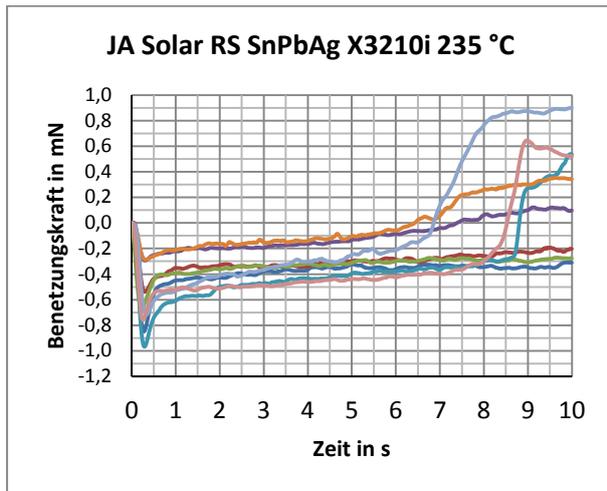


Abb. 57 JA Solar Rückseite SnPbAg X3210i 235 °C

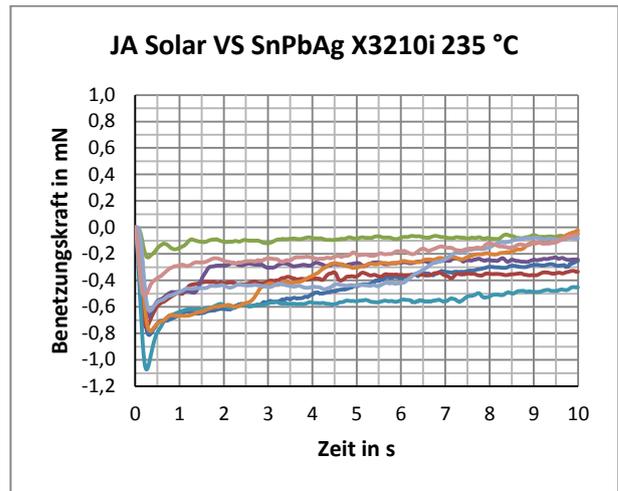


Abb. 58 JA Solar Vorderseite SnPbAg X3210i 235 °C

Abschließend wurden Benetzungstests mit den Zellen der Firma JA Solar durchgeführt, die sich durch Anordnung und Form der Kontaktflächen von den anderen Zelltypen unterscheiden. Unter Verwendung der bleihaltigen Lote ist auf den Rückseiten-Kontaktflächen eine gute Benetzung zu erkennen. Die maximal erreichbaren Benetzungskräfte haben einen Wert zwischen -0,3 bis 0,9 mN. Einige der Kurven weisen einen mehrstufigen Verlauf auf, jedoch führt dies nicht zu einem erhöhten Anfließen, da die Kontaktflächen räumlich begrenzt sind. Auch auf den Kontaktflächen, die direkt mit der Vorderseite der Solarzelle verbunden sind, fand die Benetzung gut statt, was man in Abbildung 59 sehen kann.

Rückseite

Vorderseite

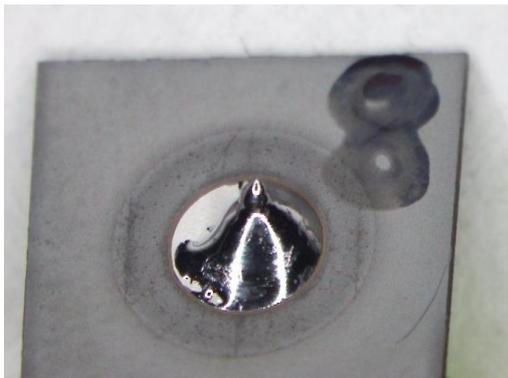


Abb. 59 Benetzungsergebnis nach den Messungen JA Solar SnPbAg X3210i 235 °C

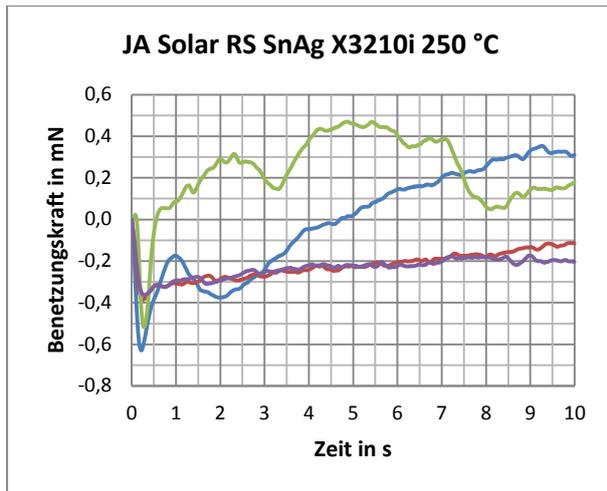


Abb. 60 JA Solar Rückseite SnAg X3210i 250 °C

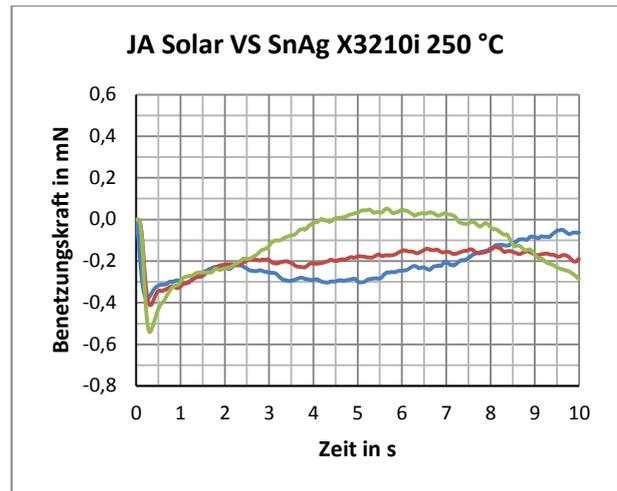


Abb. 61 JA Solar Vorderseite SnAg X3210i 250 °C

Auch diese Zellsorte wurde mit bleifreien Loten untersucht. Jedoch wurde weder eine Benetzung mit Lotpellets auch Zinn-Silber, noch aus Zinn-Silber-Kupfer erreicht. Die Kurvenverläufe unter Verwendung des Zinn-Silber-Lotes sehen sehr untypisch aus. Es scheint so als würde eine Benetzung stattfinden, die aber kurz darauf in eine Entnetzung übergeht, wie die grüne Kurve in Abbildung 60 deutlich macht. Dennoch kann bei Betrachtung der Zelloberflächen dieser Effekt nicht bestätigt werden, da keine Interaktion von Lot und Kontaktflächenstruktur stattfand. Mit den bleifreien Loten ist somit auch bei dieser Zellsorte keinerlei Benetzung aufgetreten, wie auch die Abbildung 62 aufzeigt.



Abb. 62 Benetzungsergebnis nach den Messungen JA Solar bleifrei X3210i 250 °C

4.4 Zusammenfassung, Diskussion

Um die Vielzahl der durchgeführten Messungen überblickshaft zu charakterisieren, wurden für die drei Zellsorten in Verbindung mit den jeweiligen Temperaturen, Loten und Flussmitteln Tabellen erstellt, die

- die Benetzungsfähigkeit,
- die maximal erreichbaren Benetzungskräfte,
- die Zeit bis zur aktiven Benetzung,
- das Zeitintervall, in dem ein zweiter Anstieg stattfindet und
- die Lotanhaftung darstellen.

Die Bewertung der Benetzung kann in drei signifikante Bereiche unterteilt werden:

- ✓ gute Benetzung,
- ± ausreichende/schwankende Benetzung und
- × keine Benetzung oder anschließendes Abperlen des Lotmaterials.

Q-Cells

| Seite | Lotmaterial | Flussmittel | Temperatur | Bewertung | max. Benetzungskraft [mN] | Benetzung nach [s] | t(2. Anstieg) [s] | Lotanhaftung |
|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------|
| Rückseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | -0,3 - 0,0/0,6 - 1,4 | 0,24 - 0,29 | 2,00 - 2,50 | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | 1,3 - 1,8 | 0,23 - 0,32 | 0,52 - 1,07 | ja |
| Rückseite | SnAg | X3210i | 235°C | × | -0,15 - (-0,05) | 0,25 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | X3210i | 235°C | × | -0,25 - (-0,1) | 0,25 | | nein |
| Rückseite | SnPb | X3210i | 235°C | ✓ | -0,3 - 0,35/1,15 - 1,8 | 0,22 - 0,27 | 1,52 - 4,00 | ja |
| Vorderseite | SnPb | X3210i | 235°C | ✓ | 1,0 - 1,4 | 0,23 - 0,29 | 1,00 - 4,10 | ja |
| Rückseite | SnAgCu | X3210i | 235°C | × | -0,15 - 0,0 | 0,25 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | X3210i | 235°C | × | -0,25 - 0,0 | 0,25 | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✓/× | -0,25 - (-0,05)/1,3 - 2,05 | 0,26 | | ja/nein |
| Vorderseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✓/× | -0,3 - 0,0 | 0,27 | | ja/nein |
| Rückseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 235°C | ✓ | -0,4 - (-0,05)/0,8 - 1,4 | 0,25 - 0,29 | 0,77 - 5,45 | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 235°C | ✓ | 1,3 - 1,6 | 0,19 - 0,28 | 0,85 - 2,40 | ja |
| Rückseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 250°C | ✓ | -0,4 - (-0,05) | 0,26 - 0,28 | | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 250°C | ✓ | 0,15 - 1,25 | 0,21 - 0,28 | | ja |
| Rückseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 235°C | ✓ | 0,5 - 1,0/1,7 - 1,8 | 0,22 - 0,26 | 1,42 - 4,25 | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 235°C | ✓ | 0,9 - 1,65 | 0,18 - 0,29 | 0,69 - 1,44 | ja |
| Rückseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 250°C | ±/× | -0,5 - 0,35 | 0,21 - 0,34 | | ja/nein |
| Vorderseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 250°C | ✓ | -0,3 - 0,9 | 0,11 - 0,32 | | ja |
| Rückseite | SnAgCu | 396-DRX+ | 235°C | × | | | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | 396-DRX+ | 235°C | × | | | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | 396-DRX+ | 265°C | × | -0,2 - 0,0 | 0,21 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | 396-DRX+ | 265°C | × | -0,2 | 0,18 | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | 390-RX-HT | 235°C | × | | | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | 390-RX-HT | 235°C | × | | | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | 390-RX-HT | 265°C | × | -0,3 - 0,0 | 0,21 - 0,29 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | 390-RX-HT | 265°C | × | -0,3 - 0,0 | 0,24 | | nein |
| Rückseite | SnAg | 396-DRX+ | 235°C | × | -0,6 - (-0,1) | 0,18 - 0,28 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | 396-DRX+ | 235°C | × | -0,5 - (-0,1) | 0,25 - 0,28 | | nein |
| Rückseite | SnAg | 396-DRX+ | 250°C | × | -0,45 - (-0,2) | 0,25 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | 396-DRX+ | 250°C | × | -0,4 - (-0,2) | 0,25 | | nein |
| Rückseite | SnAg | 390-RX-HT | 235°C | × | -0,3 - 0,1 | 0,24 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | 390-RX-HT | 235°C | × | -0,5 - 0,05 | 0,23 - 0,25 | | nein |
| Rückseite | SnAg | 390-RX-HT | 250°C | × | -0,25 - (-0,15) | 0,21 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | 390-RX-HT | 250°C | × | -0,4 - (-0,1) | 0,22 - 0,25 | | nein |

Tabelle 2 Bewertung des Benetzungsverhaltens Q-Cells

Sunways

| Seite | Lotmaterial | Flussmittel | Temperatur | Bewertung | max. Benetzungskraft [mN] | Benetzung nach [s] | t(2. Anstieg) [s] | Lotanhaftung |
|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------|
| Rückseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | -0,6 - 0,1 | 0,19 - 0,24 | | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | -0,2 - 0,85 | 0,17 - 0,24 | | ja |
| Rückseite | SnAg | X3210i | 235°C | ✗ | -0,2 - (-0,1) | 0,24 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | X3210i | 235°C | ✗ | -0,2 - 0,0 | 0,26 - 0,29 | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | X3210i | 235°C | ✗ | -0,2 - 0,1 | 0,24 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | X3210i | 235°C | ✗ | -0,2 - 0,0 | 0,23 - 0,24 | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✗ | -0,3 - (-0,2) | 0,22 - 0,25 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✗ | -0,35 | 0,19 | | nein |
| Rückseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 235°C | ✗ | -0,6 - (-0,3) | 0,22 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnPbAg | 396-DRX+ | 235°C | ✓/✗ | -0,7 - 0,4 | 0,20 - 0,26 | | ja/nein |
| Rückseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 235°C | ✓/✗ | -0,5 - 0,0 | 0,21 | | ja/nein |
| Vorderseite | SnPbAg | 390-RX-HT | 235°C | ✓/± | -0,7 - 0,05 | 0,27 | | ja/nein |

Tabelle 3 Bewertung des Benetzungsverhaltens Sunways

JA Solar

| Seite | Lotmaterial | Flussmittel | Temperatur | Bewertung | max. Benetzungskraft [mN] | Benetzung nach [s] | t(2. Anstieg) [s] | Lotanhaftung |
|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------|
| Rückseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | -0,3 - 0,9 | 0,19 - 0,25 | 6,72 - 8,62 | ja |
| Vorderseite | SnPbAg | X3210i | 235°C | ✓ | -0,45 - 0,0 | 0,16 - 0,30 | | ja |
| Rückseite | SnAg | X3210i | 250°C | ✗ | -0,2 - 0,3 | 0,18 - 0,24 | | nein |
| Vorderseite | SnAg | X3210i | 250°C | ✗ | -0,3 - (-0,05) | 0,20 - 0,26 | | nein |
| Rückseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✗ | -0,4 - (-0,2) | 0,21 - 0,26 | | nein |
| Vorderseite | SnAgCu | X3210i | 250°C | ✗ | -0,2 - (-0,05) | 0,25 | | nein |

Tabelle 4 Bewertung des Benetzungsverhaltens JA Solar

Neben der tabellarischen Auflistung der Versuchsmatrix und ihrer Einzelergebnisse sind auf den folgenden Seiten zusammengefasste Benetzungskraft-Zeit-Verläufe (Mittelwertkurven) zu den drei maßgeblichen Materialvariationen Flussmittel, Lote und Zellsorte dargestellt.

Zunächst folgt eine Abbildung, die die Variation des Flussmittels auf beiden Seiten der Q-Cells Zelle darstellt. Dabei werden die Mittelwerte der Benetzungskraftkurven mit dem Referenz-Lot aus Zinn-Blei-Silber und einer Temperatur von 235 °C verwendet, da dabei die besten Benetzungsergebnisse erzielt worden sind.

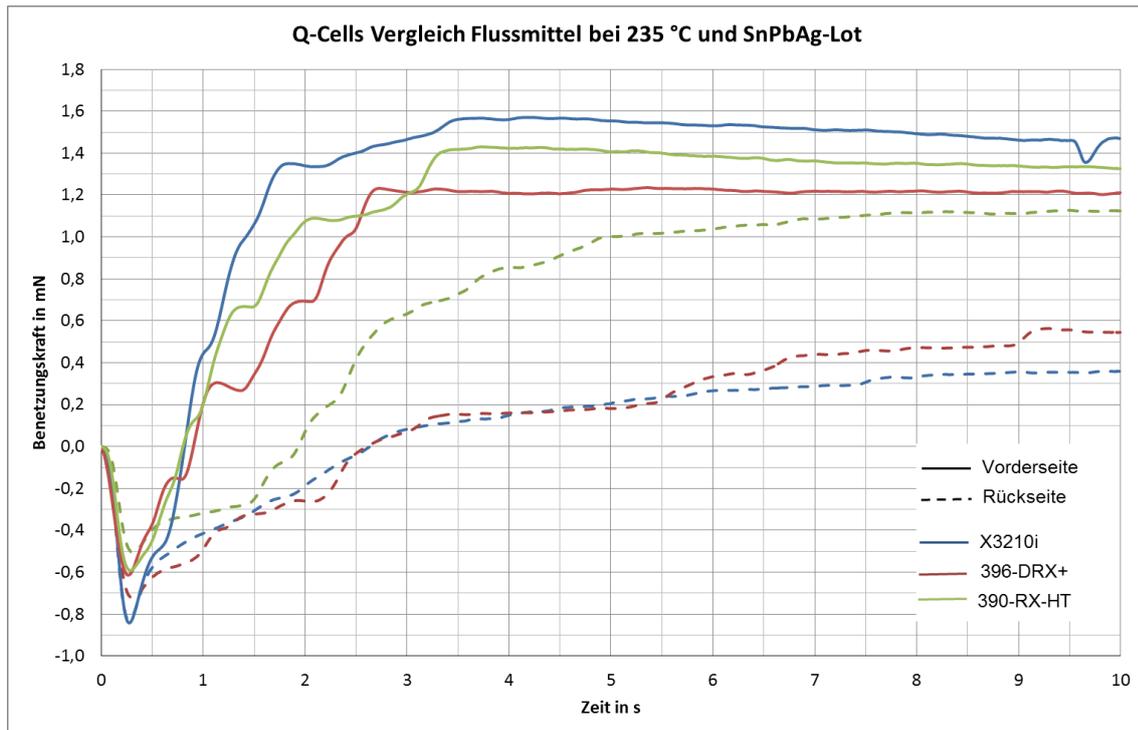


Abb. 63 Q-Cells Vergleich Flussmittel bei 235 °C und SnPbAg-Lot

In Abbildung 63 wird die Abstufung der Benetzungskräfte von Vorder- und Rückseite der Zelle offensichtlich. Auf den Kontaktflächen der Vorderseite, die mit durchgezogenen Linien dargestellt sind, sind prinzipiell höhere Kraftwerte erreichbar. Die Anstiege sind deutlich steiler als die der Rückseiten, vergleiche gestrichelte Linien. Die Benetzungskraft erreicht auf den Prüflingen der Vorderseite einen Wert von bis zu 1,6 mN. Bei Verwendung der beiden Flussmittel von Balver Zinn ist ein mehrstufiger Kraftanstieg auf der Vorderseite zu verzeichnen, der durch die Mittelwertbildung aller durchgeführten Messungen dieser Parameter noch deutlicher wird. Die Werte der Benetzungskräfte auf der Rückseite der Solarzelle weisen eine erkennbare Abstufung auf. Die Kraftwerte sind unter Verwendung des Flussmittels 390-RX-HT deutlich höher (1,1 mN), als bei den beiden anderen Flussmitteln (maximal 0,55 mN), die im Zuge dieser Arbeit Anwendung fanden.

Allgemein ist zu sagen, dass die Benetzung mit dem Lot aus Zinn-Blei-Silber stets optimal auf den Kontaktflächen der Solarzelle von Q-Cells abgelaufen ist. Die Notwendigkeit der separaten Messungen der Kontaktflächen von Vorder- und Rückseite wird in obiger Abbildung offensichtlich. Die unterschiedlichen Metallisierungen der Seiten der Solarzelle werden durch die Benetzungskraft-Zeit-Kurven dargelegt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Variation der Lot-Pellets unter Verwendung des Flussmittels X3210i der Q-Cells Zelle. Der Einfluss der Temperatur wird als minimal eingestuft, weshalb auch die bleifreien Lote, die bei 250 °C verlötet werden mit den bleihaltigen verglichen werden können. Ein Temperaturunterschied von 15 Kelvin hat bei den Benetzungskraftmessungen mit Hilfe von Benetzungswaagen keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse.

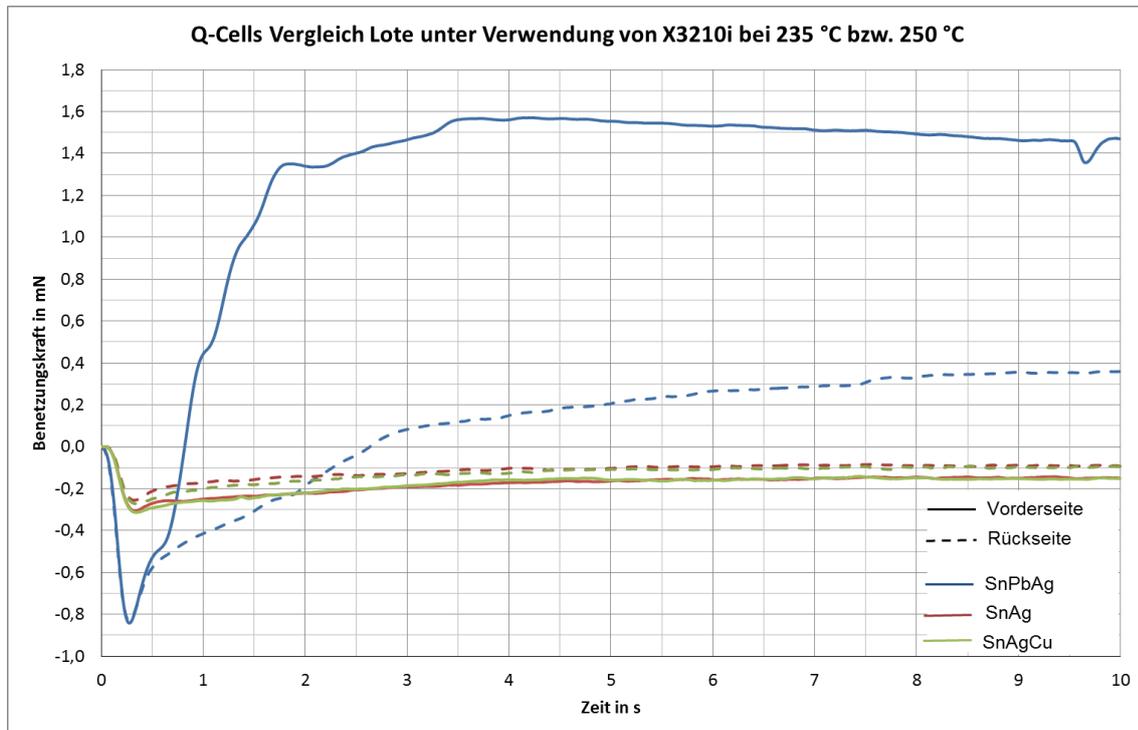


Abb. 64 Q-Cells Vergleich Lote unter Verwendung von X3210i bei 235 °C bzw. 250 °C

Bei erster Betrachtung von Abbildung 64 wird ein signifikanter Unterschied in den Benetzungskraft-Zeit-Verläufen zwischen bleihaltigen und bleifreien Loten deutlich. Die Benetzungskräfte erreichen bei den Untersuchungen mit dem bleihaltigen Lot auf den Kontaktflächen der Vorderseite einen Wert von bis zu 1,6 mN. Die Rückseiten werden mit dem Lot aus Zinn-Blei-Silber entsprechend Abbildung 64 schlechter benetzt, da der Kraftwert der Mittelwertbildung einen Bereich von ungefähr 0,4 mN nicht übersteigt. Mit den bleifreien Loten aus Zinn-Silber und Zinn-Silber-Kupfer ergibt sich ein nahezu identischer Kraft-Zeit-Verlauf für die jeweiligen Seiten der Solarzelle. Es ergibt sich auf den Kontaktflächen von Vorder- und Rückseite ein sehr flacher Anstieg nach dem Eintauchen. Die Kraftwerte steigen kaum an, wodurch deutlich wird, dass die aktive Benetzung mit Lotmaterial kaum bzw. sehr wenig stattfindet. Auch an den maximal erreichbaren Kraftwerten wird deutlich, dass die Benetzung der Zelle mit den bleifreien Loten nicht optimal erfolgt. Auf den Vorderseiten wird maximal ein Wert von -0,15 mN und auf den Rückseiten von -0,1 mN erreicht.

In Abbildung 64 wird der Unterschied der Benetzungskraftverläufe bei der Verwendung von bleihaltigen und bleifreien Loten sehr deutlich dargelegt.

Nur das Lot, das Blei enthält, kann die Kontaktflächen der Solarzelle aktiv benetzen, was wiederum das Verlöten möglich macht. Mit der vorliegenden Metallisierung ist keinerlei bleifreies Löten möglich.

Im Anschluss erfolgt die Darstellung der drei verschiedenen Zellsorten in Verbindung mit dem bleihaltigen Lot und dem Referenz-Flussmittel X3210i bei einer Temperatur von 235 °C, siehe Abbildung 65. Dabei soll gezeigt werden, wie sich die unterschiedlichen Metallisierungen der Solarzellen auf den Benetzungskraft-Zeit-Verlauf auswirken.

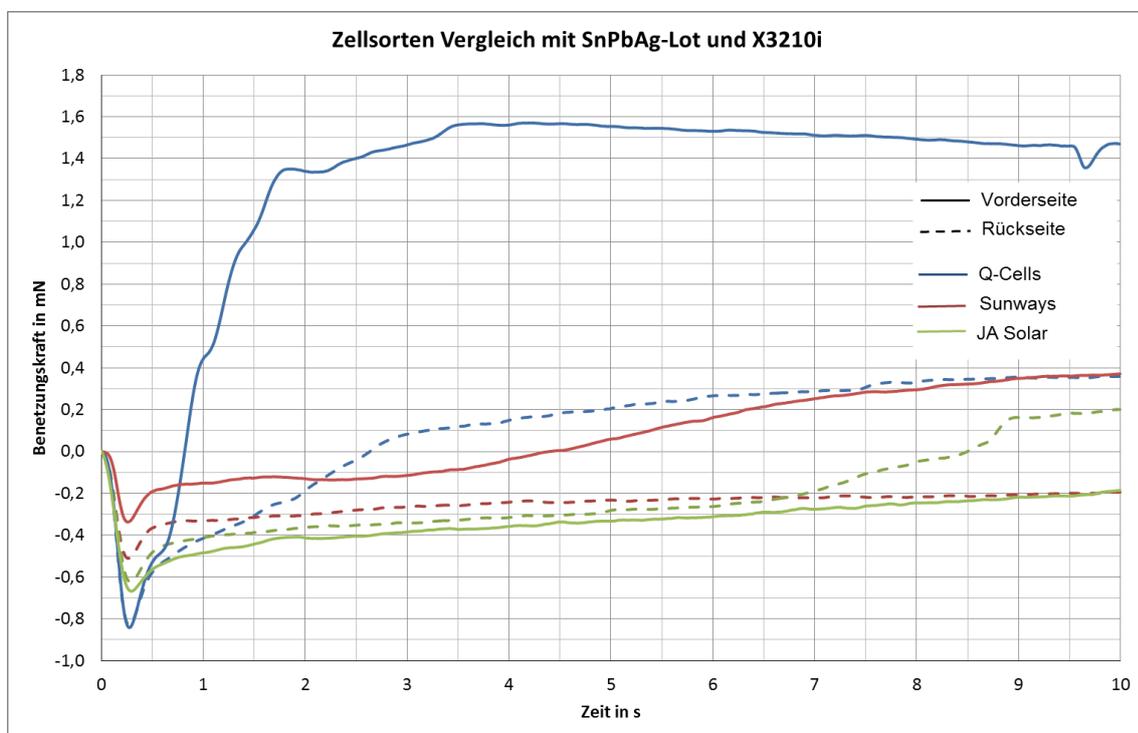


Abb. 65 Zellsorten Vergleich mit SnPbAg-Lot und X3210i

Die Benetzung mit dem bleifreien Lot in Verbindung mit dem Flussmittel X3210i hat bei allen drei getesteten Zellsorten problemlos stattgefunden. Die Benetzungskraft-Zeit-Verläufe unterscheiden sich jedoch wesentlich voneinander. Die Q-Cells Zelle erreicht die höchsten maximal erreichbaren Benetzungskräfte, wodurch ersichtlich wird, dass diese Zellsorte die beste Benetzungsfähigkeit aufweist. Die Kraftwerte der Vorderseiten liegen in einem Bereich von -0,2 mN bei Untersuchungen mit der JA Solar Zelle, bei 0,4 mN bei Verwendung der Sunways Zelle und bei ungefähr 1,6 mN bei Messungen mit der Solarzelle von Q-Cells. Trotz der weiten Streuung der Benetzungskräfte wurden sämtliche Zellproben mit dem bleihaltigen Lot optimal benetzt. Bei den Zellsorten 1 (Q-Cells) und 2 (Sunways) wird deutlich, dass es eine Abstufung der Kräfte zwischen Vorder- und Rückseite gibt.

Die Busbarstrukturen auf den Rückseiten der Zellen werden bezüglich der maximalen Benetzungskräfte schlechter benetzt. Eine solche Differenzierung ist bei den Zellen der Firma JA Solar durch die gegebenen Benetzungskraftverläufe, entsprechend Abbildung 65, nicht ersichtlich.

Aufgrund der unterschiedlichen Metallisierungen der drei getesteten Zellsorten ergeben sich verschiedene Benetzungskraft-Zeit-Kurven, die sich im Bereich des Eintauchens, dem Anstieg und den maximal erreichbaren Kraftwerten voneinander unterscheiden.

Bei Verwendung von bleifreien Loten konnte bei keiner Zellsorte eine Benetzung dargestellt werden, siehe Abbildung 64. Keine der Metallisierungen konnte eine intermetallische Schicht mit dem Lot aus Zinn-Silber bzw. Zinn-Silber-Kupfer eingehen, weshalb die Benetzung und somit auch das Verlöten nicht ablaufen kann.

5 Referenz-/Vergleichsmessungen zur Bewertung der Zellmetallisierung

5.1 Kontaktwinkelmessung

5.1.1 Material und Methode

Unter Verwendung eines Kontaktwinkelmessgerätes mit Heizplatte ist es möglich, Lotpellets auf den Kontaktflächen der Solarzellproben umzuschmelzen und die Benetzung mit Hilfe von Kontaktwinkeln zu charakterisieren. Vor allem das Benetzen mit bleifreien Loten wies Probleme bei den Benetzungsuntersuchungen mit der Benetzungswaage auf, weshalb ein weiteres Bewertungskriterium notwendig ist. Die Kontaktwinkeluntersuchungen wurden mit den monokristallinen Q-Cells, den Sunways und den JA Solar Zellen durchgeführt.

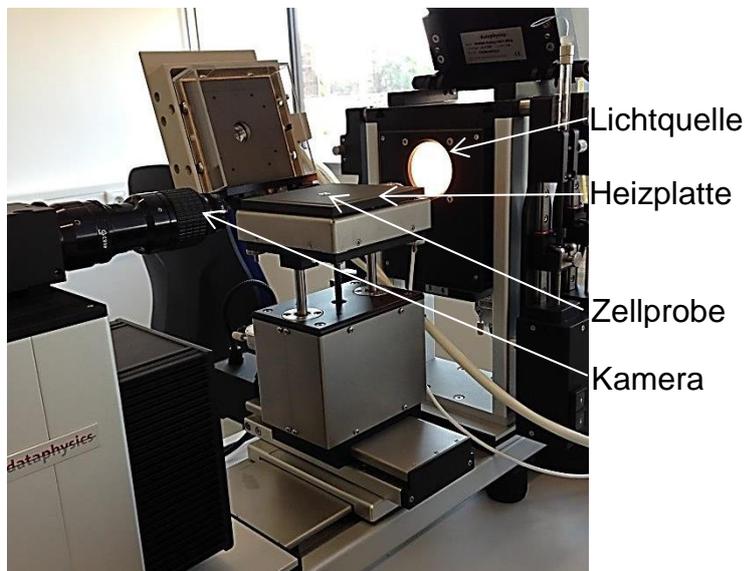


Abb. 66 Versuchsaufbau Kontaktwinkelmessgerät

Der Aufbau des Kontaktwinkelmessgerätes ist in Abbildung 66 dargestellt. Es wird eine Temperatur von 235 °C eingestellt, die auf der Heizplatte anliegt. Zunächst erfolgte die Reinigung der Zellproben mit Flussmittel und anschließend wurden Lotpellets, die ebenfalls im Vorfeld gereinigt wurden, auf die Kontaktflächen der Zellen aufgelegt. Im Gegensatz zu den Benetzungskraftuntersuchungen wurden Lotpellets verwendet, die ein Gewicht von nur 5 mg haben. Die Masse der Pellets hat theoretisch keinen Einfluss auf die Ausbildung der Kontaktwinkel, sodass es möglich ist, die kleineren Pellets, die schneller umschmelzen, zu verwenden. Nachdem das Lotmaterial schmelzflüssig ist, kann der Kontaktwinkel bestimmt werden. Dies geschieht indem die Kamera den Schatten, der durch die dahinter liegende Lichtquelle erzeugt wird, aufzeichnet.

Das Messgerät ist mit einem Computer verbunden, wodurch die Auswertung mit Hilfe eines Programmes schnell und einfach möglich ist. Es ist lediglich notwendig die Basislinie passend festzulegen und anschließend die Formkontur des aufgeschmolzenen Lotpellets zu bestimmen. Der Kontaktwinkel wird, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, abgelesen.

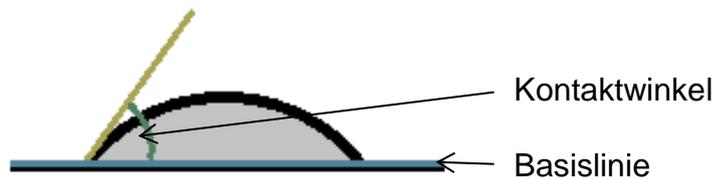


Abb. 67 Kontaktwinkelbestimmung

Zum Charakterisieren der Benetzung wurden die Kontaktwinkel auf den Vorder- und Rückseiten der Zellen mit zwei verschiedenen Flussmitteln (X3210i und 396-DRX+) und drei verschiedenen Lotmaterialien (SnPb, SnAg und SnAgCu) durchgeführt. Vor allem die Differenzierung von bleifreien und bleihaltigen Lotpellets ist bezüglich der Untersuchungen mit der Benetzungswaage entscheidend.

Zunächst erfolgen die Kategorisierung und die Bewertung der Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen. Wie im Abschnitt 2.1 beschrieben, ist die Benetzung umso besser, je kleiner der Kontaktwinkel zwischen der festen Oberfläche und dem schmelzflüssigen Lot ist. Die haltbare Anhaftung des Lotes nach dem Abkühlen, das Umschmelzen des Lotpellets und der Wert des Kontaktwinkels sind die Bewertungskriterien dieser Messungen.

Um die Ergebnisse sinnhaft miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, dass die einzelnen Proben nach den Messungen auch optisch bewertet werden. Dabei werden Effekte, wie beispielsweise das Abperlen des Lotmaterials nach dem Abkühlen, ebenfalls dokumentiert und in die Auswertung einbezogen.

Ein gutes Benetzungsergebnis der Kontaktflächen der getesteten Solarzellen ist in Abbildung 68 dargestellt.

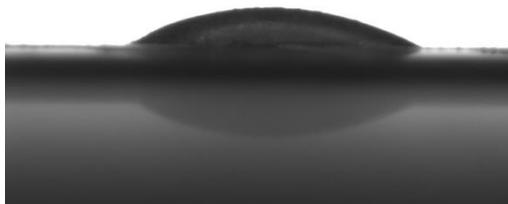


Abb. 68 gutes Benetzungsergebnis

Bei der Vielzahl der durchgeführten Messungen fand die vollständige Benetzung unter dem theoretischen Wert von 90° statt, aber es gab auch Messungen bei denen der Kontaktwinkel die 90° überstieg, die Benetzung dennoch vollständig ablief.

Das Bewertungskriterium „gut“ wird erteilt, wenn:

- die Verbindung von Lotmaterial und Solarzelloberfläche stabil und haltbar ist,
- der Kontaktwinkel unter 97° liegt und/oder
- das Lotpellet flach und gleichmäßig umschmilzt.

Neben den guten Benetzungsercheinungen gab es auch Proben, bei denen zwar eine Benetzung stattfand, aber der Kontaktwinkel deutlich höher war und das Lotmaterial eine flache Kuppel ausbildete, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abb. 69 mittelmäßiges Benetzungsergebnis

Ein mittelmäßiges Benetzungsergebnis wird vor allem dadurch charakterisiert, dass der Kontaktwinkel unter 125° liegt, aber dennoch eine Benetzung ersichtlich wird. Das Lotmaterial haftet an der Oberfläche der zu untersuchenden Kontaktfläche an, jedoch ist der Winkel deutlich höher und die Aufnahmen mit der Kamera zeigen deutlich, dass die Benetzung schlechter ablief. Das Lotpellet fließt kaum bzw. gar nicht auf der Kontaktstruktur an und bleibt in der ursprünglichen Form.

Der dritte Fall, der bei den Kontaktwinkelmessungen beobachtet wurde, ist die Nicht-Benetzung der Proben. Dabei bildet das Lotpellet eine Kugel aus und berührt die Zelloberfläche nur minimal, wie in Abbildung 70 zu sehen ist.

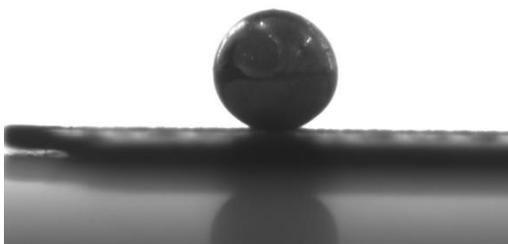


Abb. 70 schlechtes Benetzungsergebnis

Es findet keinerlei Benetzung statt und ebenfalls kam es vor, dass das Lotmaterial nach dem Abkühlen der Proben nicht anhaftete. Die Kontaktwinkel dieser nicht-benetzen Zellproben liegen bei den durchgeführten Messungen über 125° und erreichen maximal einen Wert von $168,2^\circ$. Eine theoretische vollständige Nicht-Benetzung, bei der der Kontaktwinkel 180° beträgt, tritt demnach nicht auf, wodurch begründet sein kann, dass das Lot bei der Mehrheit der Messungen trotz schlechter bzw. punktueller Benetzung anhaftete. Die Berührungsfläche von Lotpellet und Zelloberfläche ist groß genug, um eine Anhaftung zu ermöglichen.

5.1.2 Ergebnisse

Bei den Kontaktwinkelmessungen kam es zur Variation der Zelltypen, der Zellseiten, der Lotmaterialien und der Flussmittel. Da das Benetzungsergebnis nicht immer gleich ist, wurden pro Variante drei bis vier Messungen durchgeführt. Als Referenzlotmaterial wurde Zinn-Blei (SnPb) ausgewählt, da keine 5 mg Pellets aus Zinn-Blei-Silber (SnPbAg) vorhanden waren. Dem wurden Lotpellets aus Zinn-Silber (SnAg) und Zinn-Silber-Kupfer (SnAgCu) gegenübergestellt, um die Unterschiede von bleifreien Lotmaterialien deutlich zu machen. Auch das Standard-Flussmittel X3210i wurde angewendet und mit dem 396-DRX+, einem der Flussmittel von Balver Zinn, verglichen. Die Proben der JA Solar Zelle wurden nur mit X3210i getestet, da auch die Benetzungskraftuntersuchungen dieser Zellart mit nur einem Flussmittel durchgeführt wurden. Die Kontaktwinkelmessungen sind nachfolgend in einer Tabelle dargestellt, in der ebenfalls die Bewertung der Benetzungsfähigkeit hinterlegt ist. Dabei bedeutet:

- ✓ eine gute Benetzung mit flachem Kontaktwinkel,
- ± eine mittelmäßige Benetzung und
- × keine Benetzung oder anschließendes Abperlen des Lotmaterials.

Es werden pro Zellstück zwei Kontaktwinkel angegeben, das liegt daran, dass das schmelzflüssige Lotpellet nicht auf beiden Seiten symmetrisch ist und sich damit zwei relevante Winkel ergeben, die auch ein Maß für die Homogenität des Umschmelzen des Lotpellets sind.

| Q-Cells Mono | | | | | | Sunways | | | JA Solar | | |
|--------------|----------|--------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Seite | Flux | Lot | θ links | θ rechts | Bewertung | θ links | θ rechts | Bewertung | θ links | θ rechts | Bewertung |
| Vorderseite | X3210i | SnPb | 69,2° | 61,4° | ± | 72,5° | 75,1° | ± | 30,9° | 31,6° | ✓ |
| | | | 34,8° | 34,8° | ✓ | 66,0° | 71,5° | ✓ | 30,1° | 28,3° | ✓ |
| | | | 32,0° | 27,9° | ✓ | 75,5° | 69,1° | ✓ | 38,2° | 36,9° | ✓ |
| | | | 45,7° | 36,5° | ✓ | 78,7° | 77,9° | ✓ | 33,5° | 42,0° | ✓ |
| Rückseite | | | 73,9° | 63,0° | ± | 54,3° | 56,2° | ✓ | 42,2° | 46,4° | ✓ |
| | | | 71,6° | 75,1° | ± | 118,5° | 120,9° | ± | 68,0° | 63,6° | ± |
| | | | 73,8° | 74,1° | ± | 119,8° | 117,3° | ± | 65,5° | 69,5° | ± |
| | | | 63,1° | 59,9° | ± | 83,8° | 86,6° | ± | | | |
| Vorderseite | X3210i | SnAg | 80,5° | 82,1° | ± | 88,3° | 82,1° | ± | 108,5° | 103,6° | ± |
| | | | 77,9° | 63,2° | ± | 70,1° | 73,4° | ✓ | 69,8° | 68,4° | ± |
| | | | 96,7° | 92,1° | ✓ | 99,2° | 88,8° | ± | 79,5° | 60,0° | ± |
| | | | 59,8° | 69,2° | ✓ | 79,6° | 79,5° | ✓ | 60,2° | 59,4° | ✓ |
| Rückseite | | | 97,6° | 94,6° | ± | 77,3° | 61,0° | ± | 107,1° | 110,4° | ± |
| | | | 67,2° | 71,4° | ± | 82,7° | 77,0° | ± | 82,0° | 58,8° | ± |
| | | | 107,5° | 107,9° | ± | 99,2° | 99,6° | ± | 65,4° | 78,6° | ± |
| | | | 78,3° | 80,0° | ± | 78,9° | 80,8° | ± | 100,0° | 106,4° | ± |
| Vorderseite | X3210i | SnAgCu | 47,8° | 94,0° | ± | 144,9° | 148,9° | ✗ | 143,1° | 134,2° | ✗ |
| | | | 108,1° | 103,4° | ± | 118,4° | 103,6° | ± | 120,1° | 127,5° | ✗ |
| | | | 144,1° | 137,3° | ✗ | 120,8° | 91,7° | ± | 142,5° | 145,5° | ✗ |
| | | | 109,0° | 108,1° | ± | 94,6° | 103,1° | ± | 113,2° | 108,6° | ± |
| Rückseite | | | 143,2° | 140,3° | ✗ | 134,5° | 136,2° | ✗ | 116,1° | 108,5° | ✗ |
| | | | 125,6° | 113,5° | ✗ | 143,6° | 144,0° | ✗ | 122,6° | 126,5° | ✗ |
| | | | 110,8° | 102,4° | ± | 142,1° | 147,2° | ✗ | 132,5° | 125,3° | ✗ |
| | | | 83,4° | 92,2° | ± | 126,5° | 120,1° | ± | 105,6° | 100,4° | ± |
| Vorderseite | 396-DRX+ | SnPb | 54,5° | 14,4° | ✓ | 154,0° | 153,5° | ✗ | | | |
| | | | 62,2° | 21,6° | ✓ | 150,0° | 152,1° | ✗ | | | |
| | | | 31,8° | 32,0° | ✓ | 139,0° | 140,6° | ✗ | | | |
| Rückseite | | | 111,0° | 95,2° | ± | 122,8° | 126,2° | ✗ | | | |
| | | | 83,1° | 88,2° | ± | 139,6° | 121,9° | ✗ | | | |
| | | | 136,9° | 115,8° | ✗ | 168,2° | 166,1° | ✗ | | | |
| Vorderseite | 396-DRX+ | SnAg | 49,5° | 23,2° | ✓ | 110,4° | 104,4° | ± | | | |
| | | | 71,6° | 112,8° | ± | 128,0° | 130,8° | ✗ | | | |
| | | | 66,0° | 55,0° | ✓ | 139,2° | 139,4° | ✗ | | | |
| Rückseite | | | 90,7° | 94,7° | ± | 97,8° | 94,4° | ± | | | |
| | | | 113,0° | 114,3° | ± | 157,3° | 157,1° | ✗ | | | |
| | | | 126,9° | 126,0° | ✗ | 133,6° | 141,5° | ✗ | | | |
| Vorderseite | 396-DRX+ | SnAgCu | 132,4° | 141,7° | ✗ | 133,1° | 132,0° | ✗ | | | |
| | | | 142,6° | 144,0° | ✗ | 113,3° | 122,7° | ± | | | |
| | | | 125,3° | 98,2° | ± | 87,6° | 94,6° | ± | | | |
| Rückseite | | | 136,6° | 143,0° | ✗ | 154,2° | 156,0° | ✗ | | | |
| | | | 129,2° | 138,3° | ✗ | 142,5° | 150,4° | ✗ | | | |
| | | | 115,2° | 119,4° | ± | 149,4° | 147,8° | ✗ | | | |

Tabelle 4 Bewertung der Benetzung in Bezug auf die Kontaktwinkelmessung

Zunächst wird der Auswertungsschwerpunkt auf die Verwendung des Flussmittels X3210i gelegt. Es ist offensichtlich, dass die Kontaktwinkel bei Verwendung der bleihaltigen Lotpellets deutlich geringer sind, was die bessere Benetzung deutlich macht.

Die Vorderseiten aller drei getesteten Solarzelltypen wurden größtenteils sehr gut benetzt. Bei den dazugehörigen Kontaktflächen der Rückseiten ist vermehrt eher ein mittelmäßiges Benetzungsergebnis zu beobachten.

Die bleifreien Lote benetzen die Zelloberflächen in einem deutlich höheren Kontaktwinkel, das bedeutet, dass die Benetzung schlechter stattfindet. Auf den Vorderseiten der drei Zelltypen ist unter Verwendung des Lotes aus Zinn-Silber eine ausreichende bis gute Benetzung möglich. Die Kontaktwinkel übersteigen meist den Wert von 90° nicht, wodurch die außerordentliche Benetzung deutlich wird. Die Rückseitenkontakte werden ebenfalls, wie unter Verwendung des bleihaltigen Lotes, schlechter benetzt.

Außerdem erfolgten noch Messungen mit Lotpellets aus Zinn-Silber-Kupfer. Dabei ist bei den drei getesteten Zellsorten keine Benetzung im Sinne der Definition der Kontaktwinkel zu erreichen. Zum einen sind die Kontaktwinkel sehr hoch, wodurch die Ausbildung einer Kugelform des Lotmaterials begünstigt wird und zum anderen schmelzen die Lotpellets nicht homogen um, weshalb sich die Kontaktwinkel auf der rechten und linken Seite der Lotoberflächen unterscheiden. Die Abstufung in der Benetzungsfähigkeit der Rückseiten ist auch bei dem Lotmaterial deutlich. Es ist allgemein so, dass sich die Rückseitenflächen der Solarzellen schlechter benetzen lassen als die dazugehörigen Vorderseiten. Die auftretenden Unterschiede von Vorder- und Rückseite lassen sich auf verschiedene Metallisierungen der Seiten der Solarzellen zurückführen.

Weitere Messungen wurden anschließend mit einem der Flussmittel der Firma Balver Zinn ausgeführt, jedoch nur mit den monokristallinen Q-Cells und den Sunways Zellen. Bereits durch die Werte der Kontaktwinkel ist ersichtlich, dass die Benetzung der Sunways Zelle mit dem Flussmittel 396-DRX+ problematisch ist. Selbst mit dem bleihaltigen Lot konnte keine Benetzung erzielt werden. Das Flussmittel scheint die Oberflächenmetallisierung der Sunways Zelle nicht genügend zu aktivieren, sodass der Vorgang der Benetzung ausbleibt. Die bleifreien Lote konnten ebenfalls, wie mit dem Flussmittel X3210i, keine Benetzung auf den Kontaktflächen der Solarzellen erzielen.

Im Gegensatz zu diesem Effekt stehen die Kontaktwinkelmessungen der Q-Cells Zelle. Auch mit Variation des Flussmittels liefert das bleihaltige Lot ein zufriedenstellendes Benetzungsergebnis. Die bleifreien Lote führen ebenfalls zu einer schlechteren Benetzung, was vergleichbar mit dem Standard-Flussmittel X3210i ist. Auch hier ist eine Differenzierung der Werte der Kontaktwinkel von Vorder- und Rückseite möglich. Die Rückseiten wurden bei sämtlichen Messungen und Variationen der Parameter schlechter benetzt als die Vorderseiten der Solarzellen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es eine eindeutige Unterscheidung von Vorder- und Rückseiten der Zellen gibt, entsprechend Abbildung 71. Bei allen drei getesteten Zellsorten sind die Kontaktwinkel auf den Rückkontaktflächen größer. Vor allem unter Verwendung des bleihaltigen Lotes, das eine gute Benetzungsfähigkeit aufweist, ist der Unterschied in den Werten der Winkel auffällig. Mit den bleifreien Lotpellets, die die Zelloberflächen ohnehin schlechter benetzen, ist die Differenzierung der jeweiligen Seiten in einem geringeren Maß möglich. Außerdem kann man erkennen, dass die runden Kontaktflächen der JA Solar Zellen im Vergleich zu den konventionellen Busbarstrukturen der Sunways und Q-Cells Zellen das beste Benetzungsergebnis mit dem Zinn-Blei Lot liefern. Die Variation des Flussmittels hat auf die Kontaktwinkel und die visuelle Benetzungerscheinung der Q-Cells Zelle keinen merklichen Einfluss. Bei den zu benetzenden Kontaktflächen der Sunways Zelle ist die geringe Wirksamkeit des Flussmittels 396-DRX+ deutlich zu erkennen. Die Benetzung findet weder mit den bleifreien, noch mit den bleihaltigen Loten statt. Des Weiteren ist nach dem Umschmelzversuch und der Kontaktwinkelmessung häufig aufgetreten, dass die Anhaftung des Lotes an die Zelloberfläche nicht haltbar war. Es bleibt folglich kein Lotmaterial auf den Kontaktflächen zurück, wodurch die Nicht-Benetzung deutlich wird.

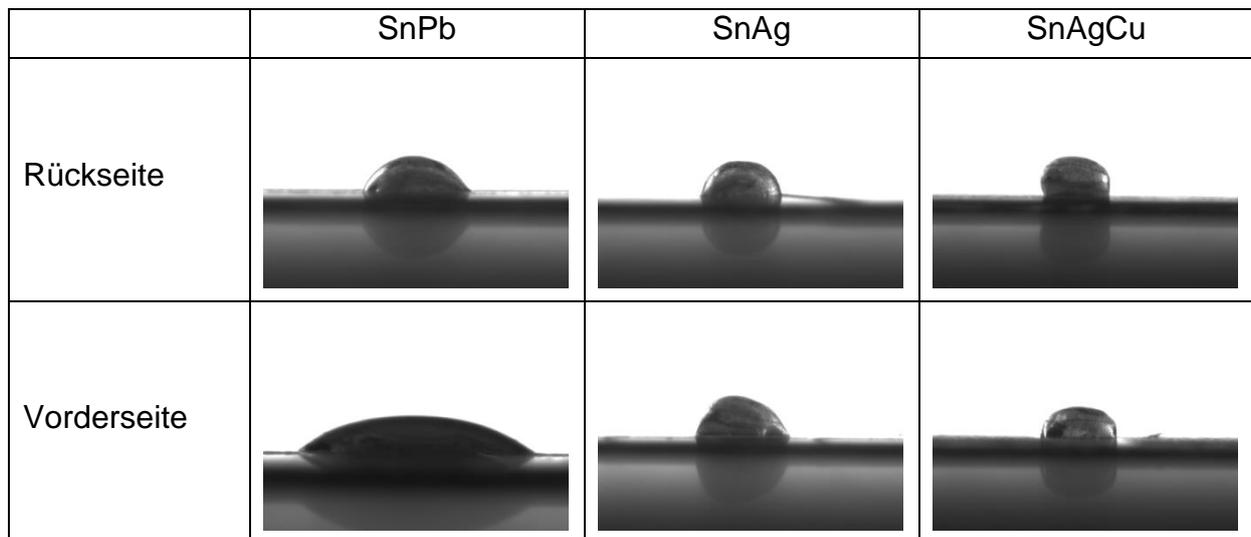


Abb. 71 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen Q-Cells mit X3210i

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist zunächst zu sagen, dass ausschließlich durch die Benetzungskraftmessungen mit der Benetzungswaage keine eindeutige Bewertung der Benetzungsfähigkeit möglich ist. Die Benetzungskraft-Zeit-Kurven sind sehr komplex und bei deren Auswertung muss man auf viele Aspekte achten, wie z.B. die Zeitphase bis die aktive Benetzung beginnt, der darauf folgende Anstieg und die maximal erreichbaren Benetzungskräfte. Aufgezeichnete Kraftmessungen müssen nicht unmittelbar mit einer Lotbenetzung auf der Solarzellmetallisierung korrelieren. Erst durch Charakterisierung der Lotanhaftung auf den Kontaktflächen der Solarzellen ist eine eindeutige Bewertung der Benetzungsfähigkeit möglich. Verlässt man sich ausschließlich auf die Informationen, die man durch die Benetzungskraft-Zeit-Kurven erhält, so sind falsche Schlüsse in Bezug auf die Benetzbarkeit der Prüflinge denkbar.

Es war prinzipiell so, dass die maximal erreichbaren Benetzungskräfte auf den Vorderseiten der Zellen von Q-Cells und Sunways merklich höher waren, als die auf den Rückseiten. Bei der dritten untersuchten Zellsorte von JA Solar war dieser Effekt nicht aufgetreten. Ein Grund hierfür kann in der anderen Zelltechnologie (Rückseitenkontaktsolarzelle) liegen, die unter Umständen keine Differenzierung zwischen Vorder- und Rückseite mehr notwendig macht.

Gemessene Benetzungskräfte liegen für die Q-Cells Zellen in Verbindung mit den als Standard festgelegten Parametern (Zinn-Blei-Silber Lot und X3210i) auf den Rückseiten maximal in einem Bereich von 0,6 bis 1,4 mN. Auf den Vorderseiten sind Werte von bis zu 1,8 mN erreicht worden, was die bessere Benetzung der Kontaktflächen der Vorderseiten verdeutlicht.

Die Benetzungskräfte der Sunways Zelle mit den Standard-Parametern sind deutlich geringer. Auf der Rückseite erreichen die Kräfte maximal 0,1 mN und auf der Vorderseite maximal 0,85 mN. Trotz der geringeren Kraftwerte, ist die Benetzung als gut zu bewerten, da die Lotanhaftung in einem hohen Maß ablief.

Die Benetzungskräfte der JA Solar Zelle mit den Standard-Parametern liegen für die Kontaktflächen der Rückseite in einem Bereich von -0,3 bis 0,9 mN und auf den Vorderseiten werden Kraftwerte von maximal 0,0 mN erreicht. Auch hier waren deutliche Lotanhaftungen an den Kontaktpads zu dokumentieren.

In Variation der Materialien aus der Versuchsmatrix konnten weitere Erkenntnisse abgeleitet werden. Die Benetzung mit den bleifreien Loten ist bei keiner der untersuchten Zellsorten mit dem Benetzungstester darstellbar.

Zum anderen ergeben sich durch die Variation des Flussmittels kaum merkliche Veränderungen der Benetzungsfähigkeit. Es ist zwar entscheidend für den Vorgang des Benetzens, dass es zur Verwendung von Flussmitteln kommt, jedoch erweisen sich Unterschiede in der Zusammensetzung der Flussmittel allgemein als kaum merkbar im Ergebnis der Benetzungstests.

Durch Kontaktwinkelmessungen, als alternative Messmethode, konnten die Ergebnisse zur Bewertung der Benetzbarkeit der Prüflinge bestätigt bzw. widerlegt werden. Mit den sich dabei ergebenden Messwerten ist eine allgemeine Klassifizierung der Benetzungsfähigkeit der Solarzellen in Verbindung mit den jeweiligen Flussmitteln und Lot-Pellets möglich. Die geringere Benetzung auf den Zellrückseiten konnte durch größere Kontaktwinkel bestätigt werden.

Ebenso zeigten die Umschmelzversuche mit bleifreien Loten ein Abperlen von der Zellmetallisierung. Diese Ergebnisse korrelieren ebenfalls mit den Erkenntnissen aus den Benetzungstests, verbunden mit nicht vorhandenen Lotanhaftungen und sehr flach verlaufenden Benetzungskraft-Zeit-Verläufen.

Um beispielsweise die Unterschiede der Metallisierungen von Vorder- und Rückseite der Zellen besser zu belegen, besteht die Möglichkeit in nachfolgenden Untersuchungen, die Topographie dieser Kontaktflächen mit Hilfe von Laserprofilometeraufnahmen zu bestimmen. Dadurch lassen sich zum einen die unterschiedlichen Benetzungskraftwerte von Vorder- und Rückseite erklären und zum anderen ist die weite Streuung der Kurven der einzelnen Messungen deutbar.

Literaturverzeichnis

- /1/ <http://www.gruene.de/partei/dafuer-und-dagegen-brauchs-gruen/dafuer-erneuerbare-energien.html/>
Wahlprogramm Bündnis 90 / Die Grünen 2013; abgerufen am 27. August 2013
- /2/ Quaschnig, Volker „Regenerative Energiesysteme“, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 5. Auflage: 2007
- /3/ Quaschnig, Volker „Erneuerbare Energien und Klimaschutz“, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 1. Auflage: 2008
- /4/ Nürnberg, Eberhard und Surmann, Peter „Hagers Handbuch der pharmazeutischen Praxis: Band 2“, Springer Verlag, 5. Auflage: 1991
- /5/ Matthes, Klaus-Jürgen und Riedel, Frank „Fügetechnik“, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 1. Auflage: 2003
- /6/ Grote, Karl- Heinrich und Feldhusen, Jörg „DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau“ G25, Springer Verlag, 21. Auflage: 2004
- /7/ DIN 32506 Teil 1 „Lötbarkeitsprüfungen für das Weichlöten - Benetzungsprüfungen“, Juli 1981
- /8/ Graham K Naisbitt, “MUST SYSTEM: Solderability testing using the wetting balance and micro-wetting balance methods“
- /9/ Martorano, K.M.; Martorano, M.A. und Brandi, S.D. “Optimal conditions for the wetting balance test”, 2008
- /10/ Podzemský, J.; Urbánek, J. “Test of Wettability of Lead-Free Solders”, 2011
- /11/ Stannol, “Technisches Datenblatt Stannol Lötflusmittel X32-10i”, 17.03.2009
- /12/ Balver Zinn, Cobar „Product Data Sheet 396-DRX+“, 01.10.2010
- /13/ Balver Zinn, Cobar „ Product Data Sheet 390-RX-HT“, 16.03.2010

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|--------|
| 01 | Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle /3, Seite 105/ | - 6 - |
| 02 | Verbindung der Solarzellen | - 8 - |
| 03 | vollständige Benetzung | - 9 - |
| 04 | partielle Benetzung | - 9 - |
| 05 | keine Benetzung | - 10 - |
| 06 | Bildung der Legierung auf gereinigter Oberfläche | - 11 - |
| 07 | Typischer Benetzungskraftkurvenverlauf mit den charakteristischen Stadien (0-3) der Probenbenetzung | - 14 - |
| 08 | Benetzungsschema /8, Seite 33/ | - 14 - |
| 09 | Vereinzelte Busbarstrukturen | - 16 - |
| 10 | Zellproben Q-Cells und Sunways | - 17 - |
| 11 | Zellproben JA Solar | - 17 - |
| 12 | Versuchsaufbau Benetzungswaage | - 18 - |
| 13 | horizontale Ausrichtung der Solarzellprobe | - 19 - |
| 14 | schräge Ausrichtung der Solarzellprobe | - 19 - |
| 15 | Muster-Diagramm typischer Benetzungskraft-Zeit-Verläufe und ihrer charakteristischen Zeit-/ Kraftabschnitte zur Bewertung der Benetzbarkeit | - 20 - |
| 16 | Referenzsystem Rückseite | - 23 - |
| 17 | Referenzproben der Rückseite nach Benetzungstest | - 23 - |
| 18 | Referenzsystem Vorderseite | - 24 - |
| 19 | Referenzproben der Vorderseite nach Benetzungstest | - 24 - |
| 20 | Q-Cells Rückseite SnAg X3210i 235 °C | - 29 - |
| 21 | Q-Cells Vorderseite SnAg X3210i 235 °C | - 29 - |
| 22 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAg X3210i 235 °C | - 29 - |
| 23 | Q-Cells Rückseite SnAgCu X3210i 235 °C | - 30 - |
| 24 | Q-Cells Vorderseite SnAgCu X3210i 235 °C | - 30 - |
| 25 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu X3210i 235 °C | - 30 - |
| 26 | Q-Cells Rückseite SnAgCu X3210i 250 °C | - 31 - |
| 27 | Q-Cells Vorderseite SnAgCu X3210i 250 °C | - 31 - |

| | | |
|----|---|--------|
| 28 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu X3210i 250 °C | - 31 - |
| 29 | Q-Cells Rückseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C | - 32 - |
| 30 | Q-Cells Vorderseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C | - 32 - |
| 31 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnPbAg 396-DRX+ 235 °C | - 32 - |
| 32 | Q-Cells Rückseite SnAg 396-DRX+ 250 °C | - 33 - |
| 33 | Q-Cells Vorderseite SnAg 396-DRX+ 250 °C | - 33 - |
| 34 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAg 396-DRX+ 250 °C | - 33 - |
| 35 | Q-Cells Rückseite SnAgCu 396-DRX+ 265 °C | - 34 - |
| 36 | Q-Cells Vorderseite SnAgCu 396-DRX+ 265 °C | - 34 - |
| 37 | Q-Cells Rückseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C | - 34 - |
| 38 | Q-Cells Vorderseite SnPbAg 390-RX-HT 235 °C | - 34 - |
| 39 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnPbAg 390-RX- HT 235 °C | - 35 - |
| 40 | Q-Cells Rückseite SnAg 390-RX-HT 250 °C | - 35 - |
| 41 | Q-Cells Vorderseite SnAg 390-RX-HT 250 °C | - 35 - |
| 42 | Q-Cells Rückseite SnAgCu 390-RX-HT 265 °C | - 36 - |
| 43 | Q-Cells Vorderseite SnAgCu 390-RX-HT 265 °C | - 36 - |
| 44 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Q-Cells SnAgCu 390-RX- HT 265 °C | - 36 - |
| 45 | Sunways Rückseite SnPbAg X3210i 235 °C | - 37 - |
| 46 | Sunways Vorderseite SnPbAg X3210i 235 °C | - 37 - |
| 47 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg X3210i 235 °C | - 37 - |
| 48 | Sunways Rückseite SnAg X3210i 235 °C | - 38 - |
| 49 | Sunways Vorderseite SnAg X3210i 235 °C | - 38 - |
| 50 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnAgCu X3210i 250 °C | - 38 - |
| 51 | Sunways Rückseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C | - 39 - |
| 52 | Sunways Vorderseite SnPbAg 396-DRX+ 235 °C | - 39 - |
| 53 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg 396- DRX+ 235 °C | - 39 - |

| | | |
|----|--|--------|
| 54 | Sunways Rückseite SnPbAg 390 RX-HT 235 °C | - 40 - |
| 55 | Sunways Vorderseite SnPbAg 390RX-HT 235 °C | - 40 - |
| 56 | Benetzungsergebnis nach den Messungen Sunways SnPbAg 390- RX-HT 235 °C | - 40 - |
| 57 | JA Solar Rückseite SnPbAg X3210i 235 °C | - 41 - |
| 58 | JA Solar Vorderseite SnPbAg X3210i 235 °C | - 41 - |
| 59 | Benetzungsergebnis nach den Messungen JA Solar SnPbAg X3210i 235 °C | - 41 - |
| 60 | JA Solar Rückseite SnAg X3210i 250 °C | - 42 - |
| 61 | JA Solar Vorderseite SnAg X3210i 250 °C | - 42 - |
| 62 | Benetzungsergebnis nach den Messungen JA Solar bleifrei X3210i 250 °C | - 42 - |
| 63 | Q-Cells Vergleich Flussmittel bei 235 °C und SnPbAg-Lot | - 45 - |
| 64 | Q-Cells Vergleich Lote unter Verwendung von X3210i bei 235 °C bzw. 250 °C | - 46 - |
| 65 | Zellsorten Vergleich mit SnPbAg-Lot und X3210i | - 47 - |
| 66 | Versuchsaufbau Kontaktwinkelmessgerät | - 49 - |
| 67 | Kontaktwinkelbestimmung | - 50 - |
| 68 | gutes Benetzungsergebnis | - 50 - |
| 69 | mittelmäßiges Benetzungsergebnis | - 51 - |
| 70 | schlechtes Benetzungsergebnis | - 51 - |
| 71 | Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen Q-Cells mit X3210i | - 55 - |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----|--|--------|
| 01 | Versuchsmatrix der Materialkombinationen für die Benetzungstests | - 27 - |
| 02 | Bewertung des Benetzungsverhaltens HQC Mono | - 43 - |
| 03 | Bewertung des Benetzungsverhaltens Sunways | - 44 - |
| 04 | Bewertung des Benetzungsverhaltens JA Solar | - 44 - |
| 05 | Bewertung der Benetzung in Bezug auf die Kontaktwinkelmessung | - 53 - |

Anlagenverzeichnis

| | | |
|----|--|---------|
| 01 | Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen Q-Cells | - I - |
| 02 | Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen Sunways | - XI - |
| 03 | Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen JA Solar | - XVI - |

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

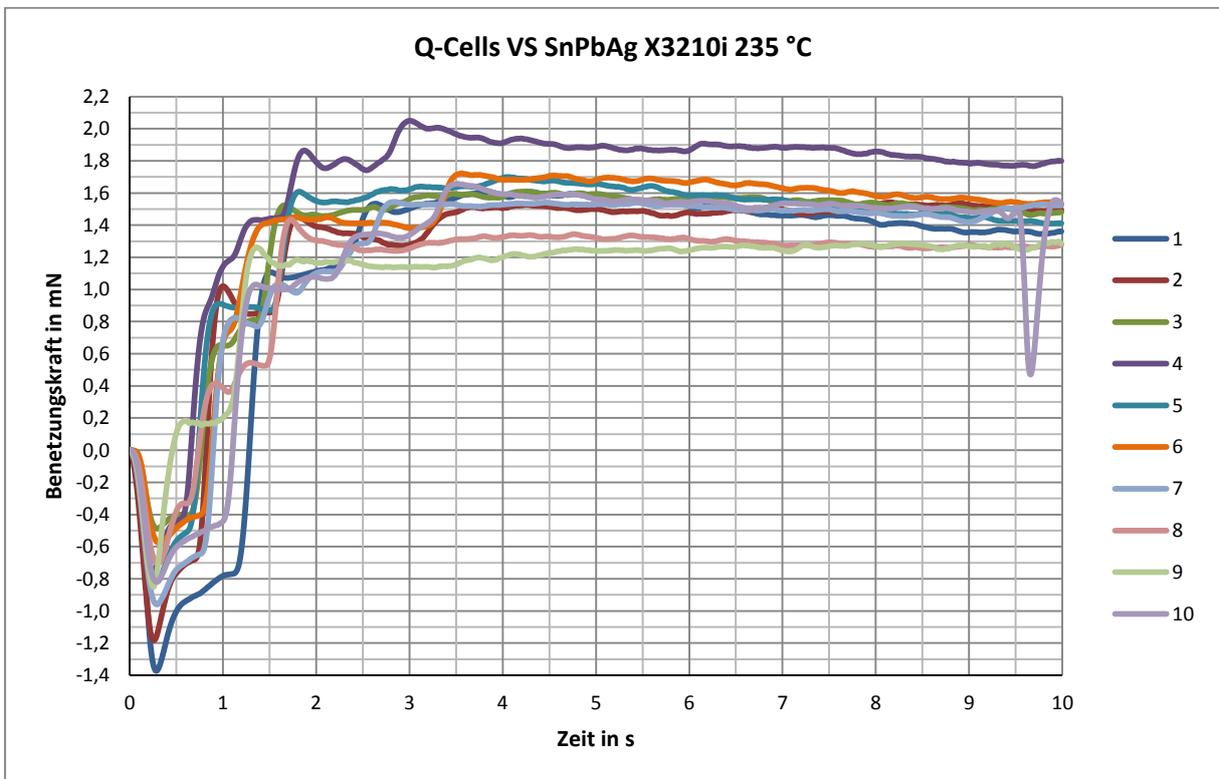
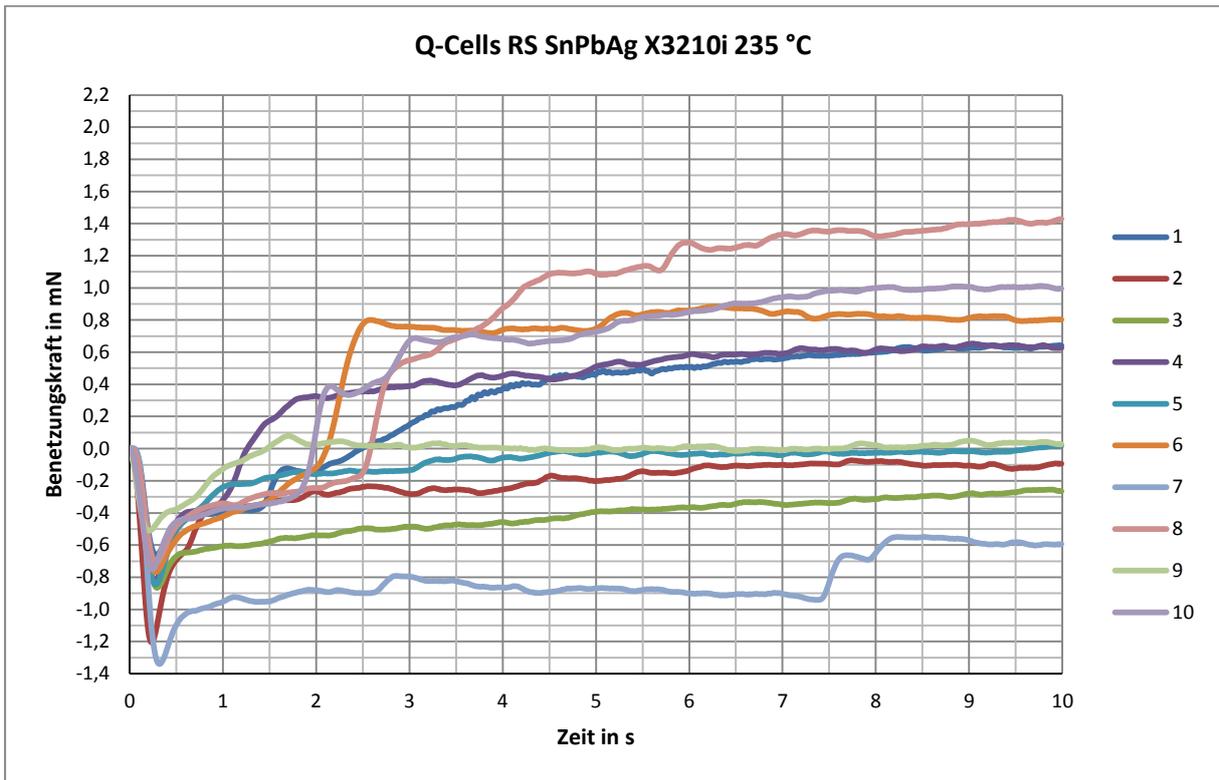
Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die Verbindungsqualität und die Kontakteigenschaften typischer Lötwerkstoffe für die Solarverschaltung

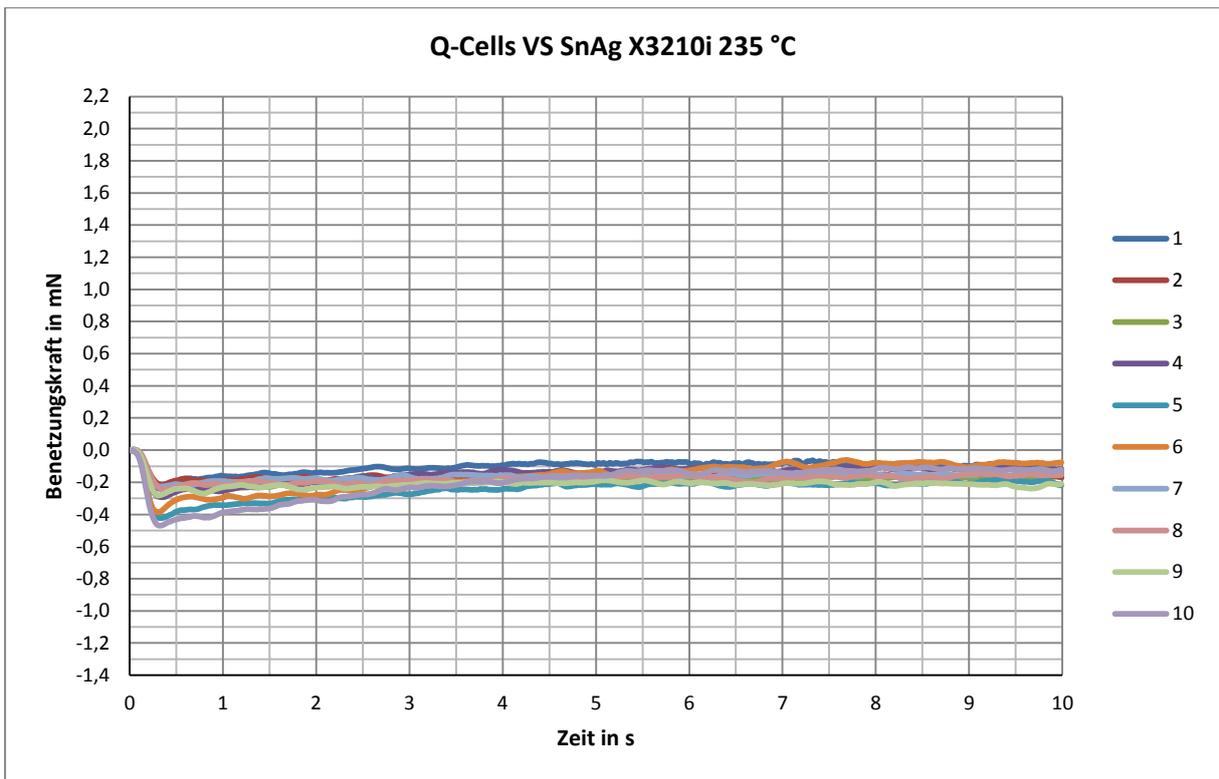
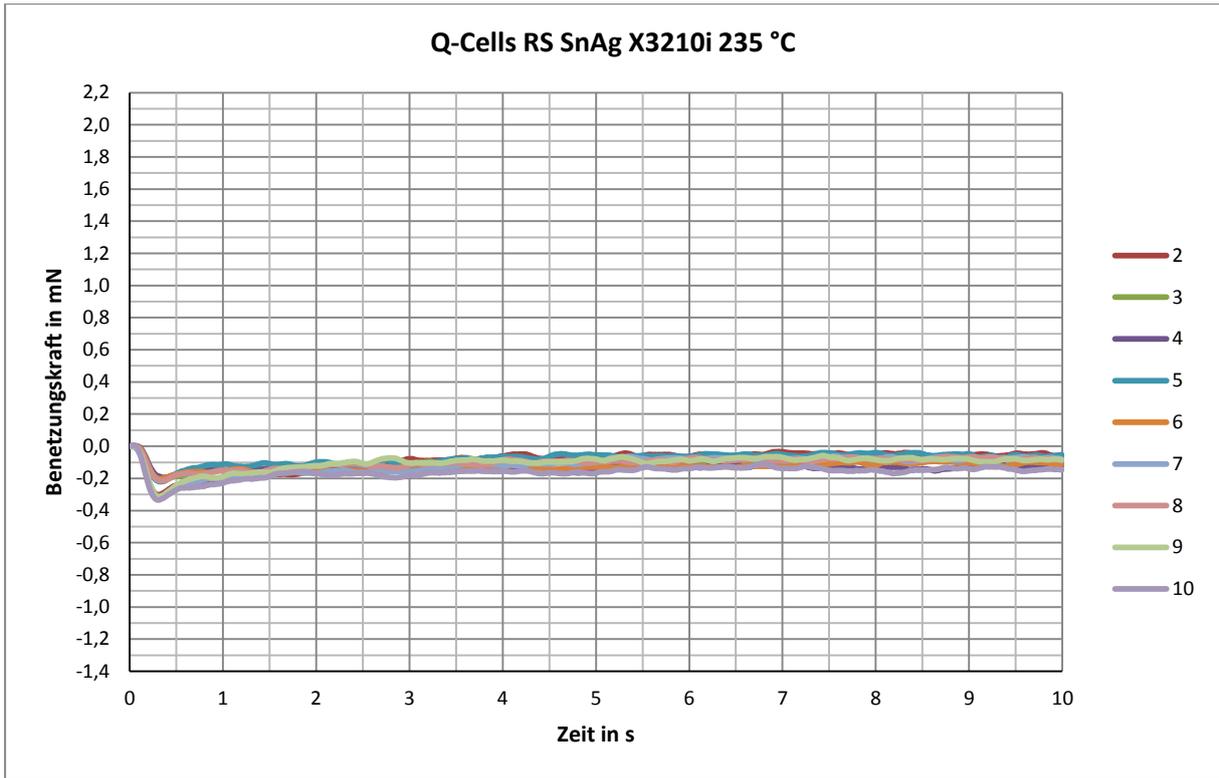
selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

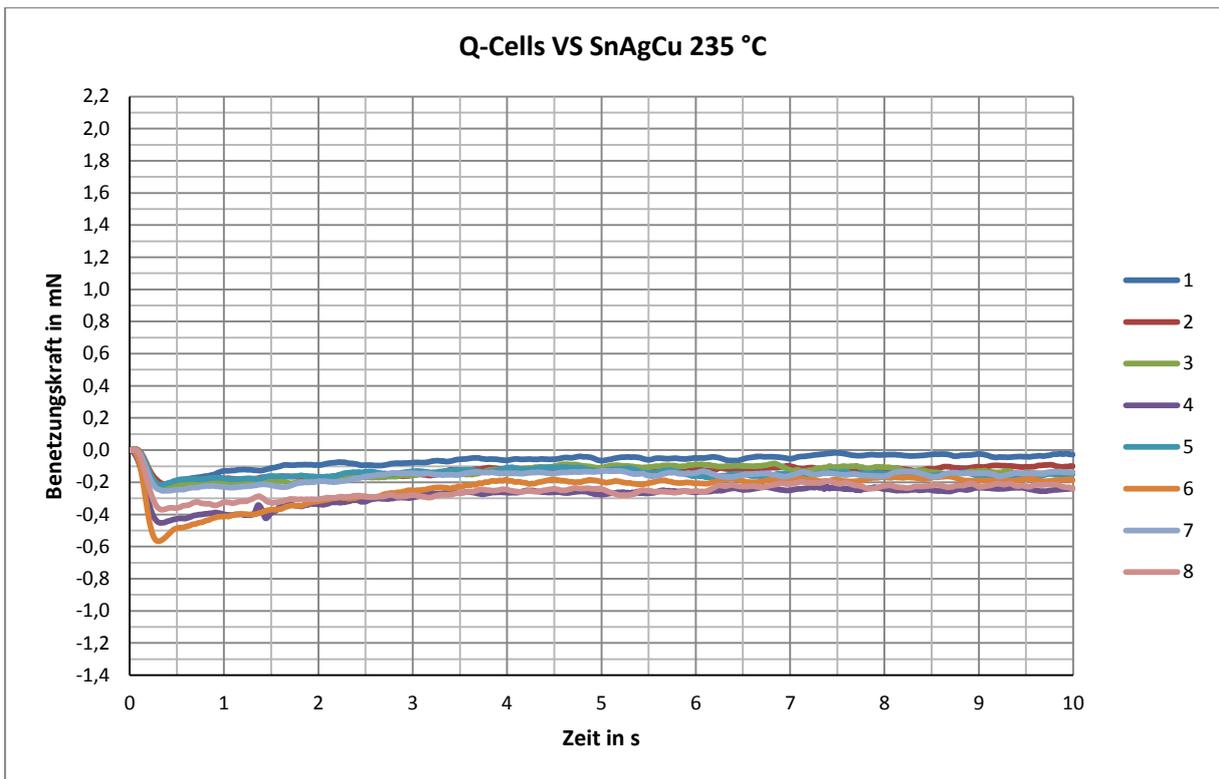
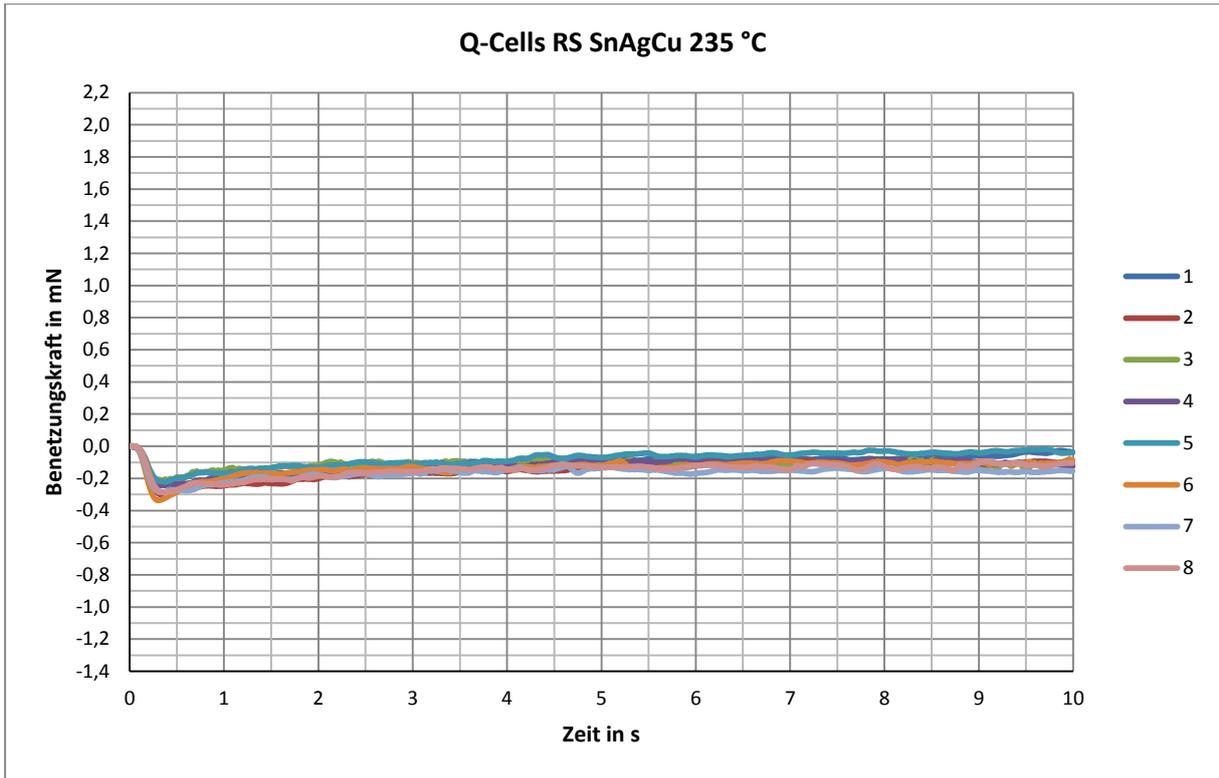
Merseburg, 20.09.2013

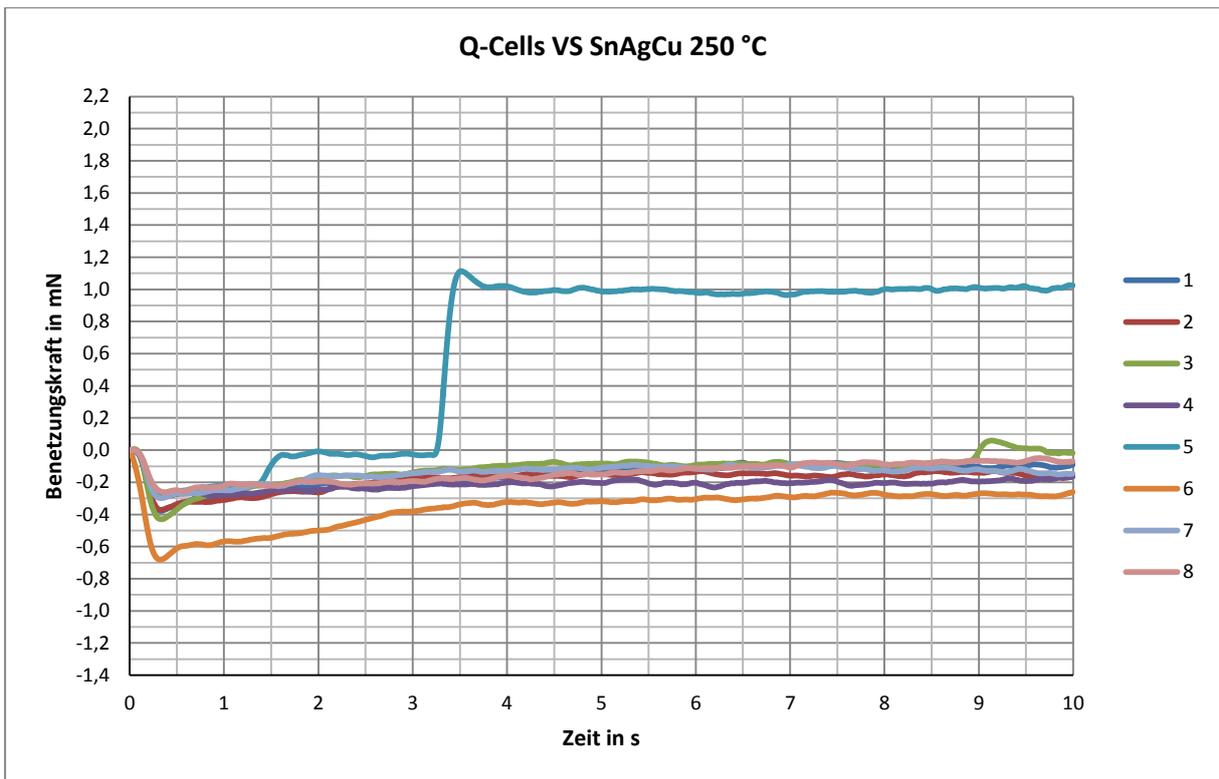
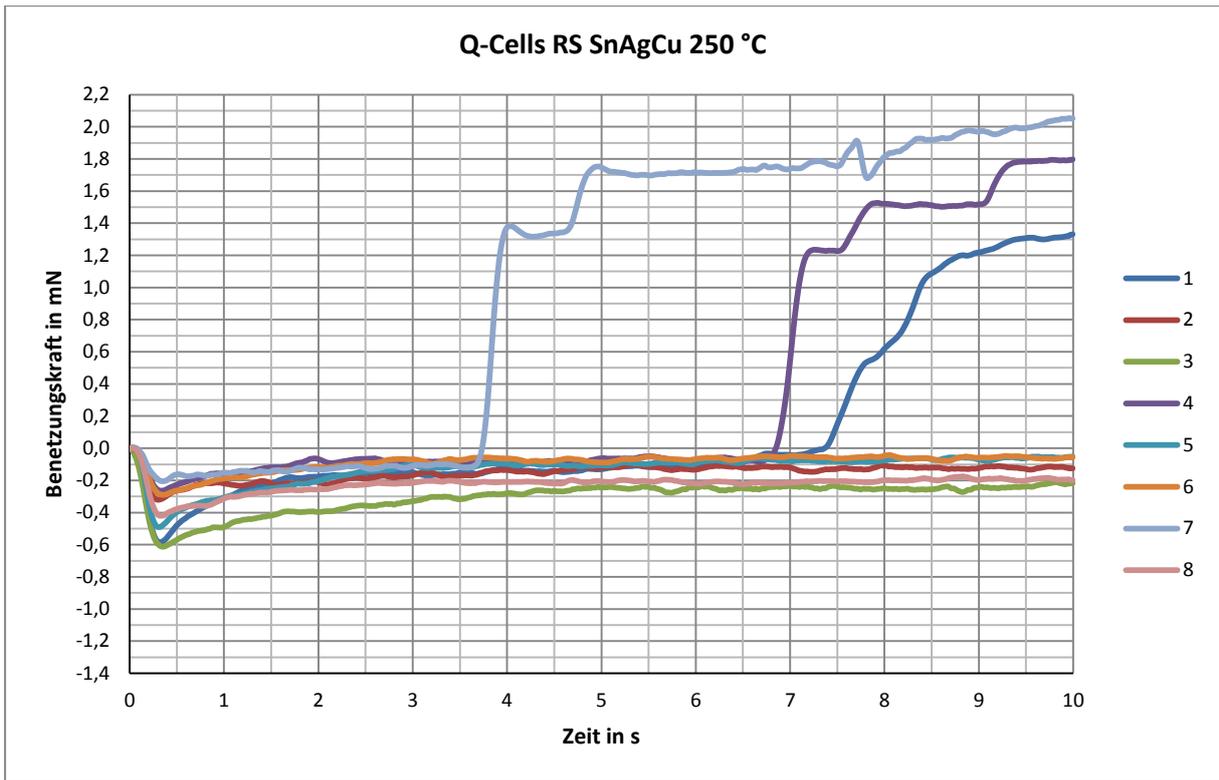
Anne Hernsdorf

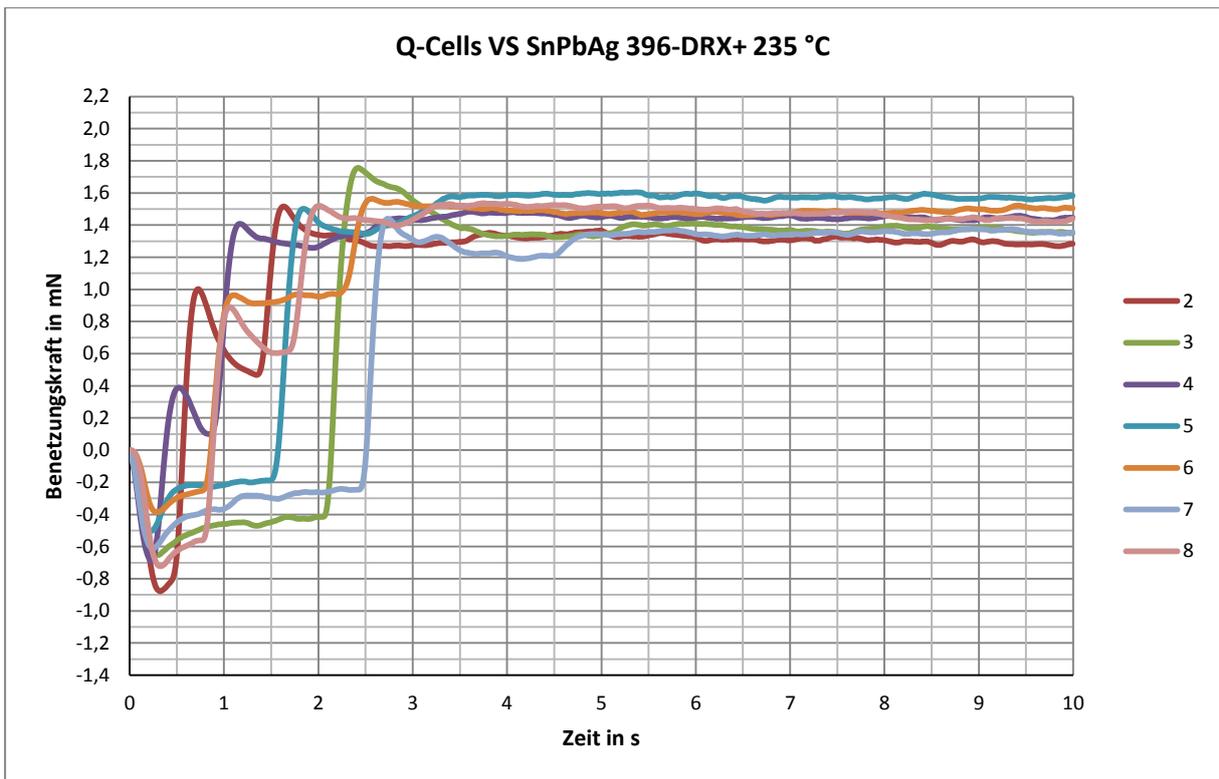
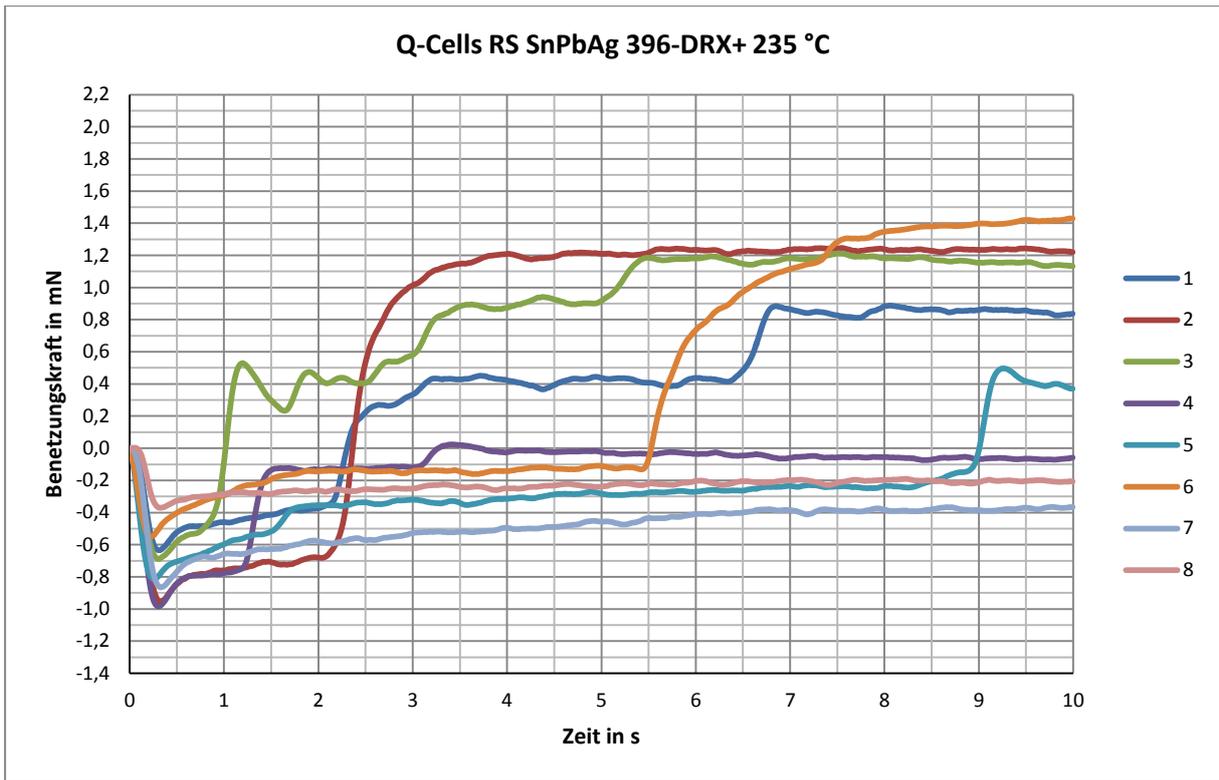
Anlage 1 – Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen Q-Cells

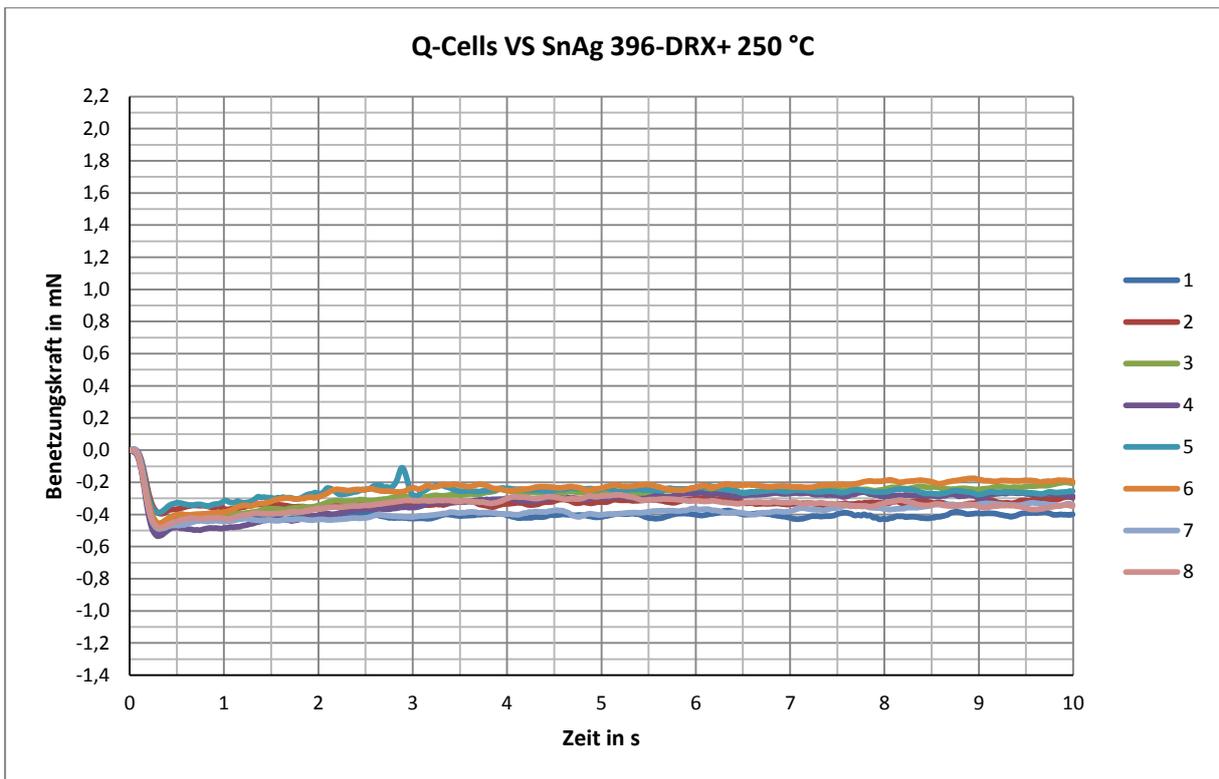
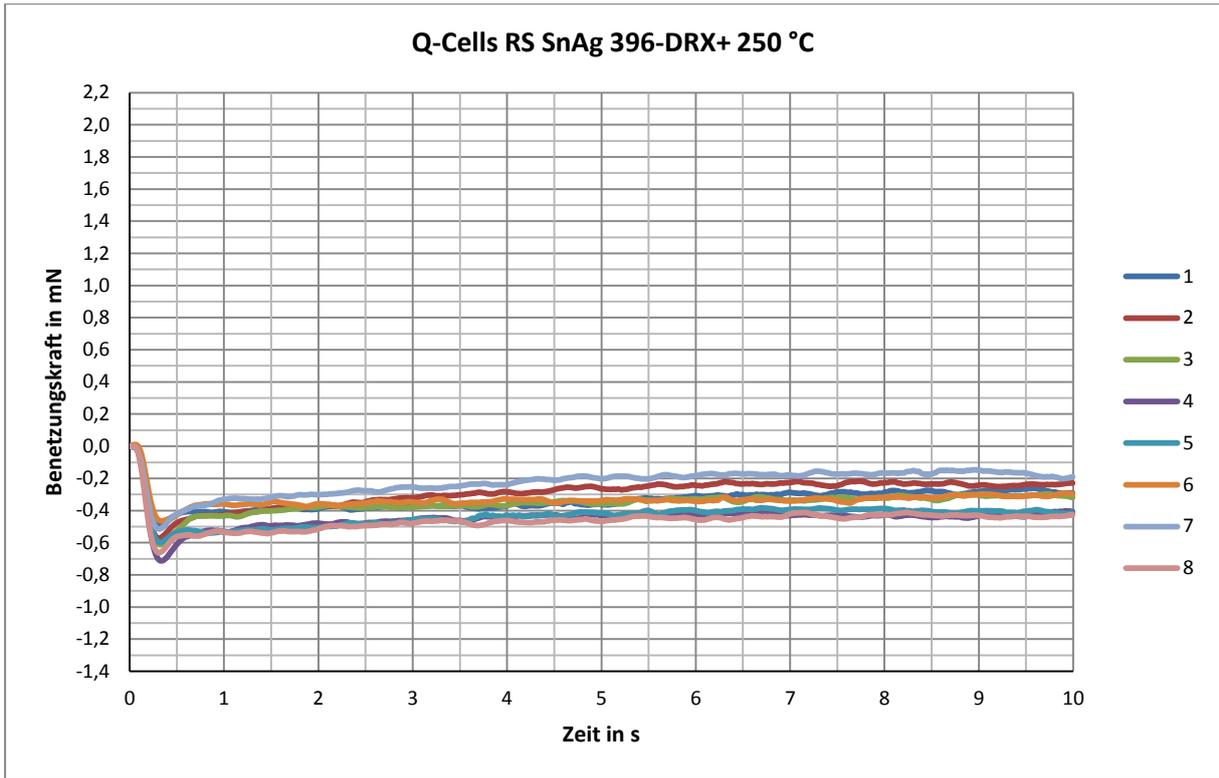


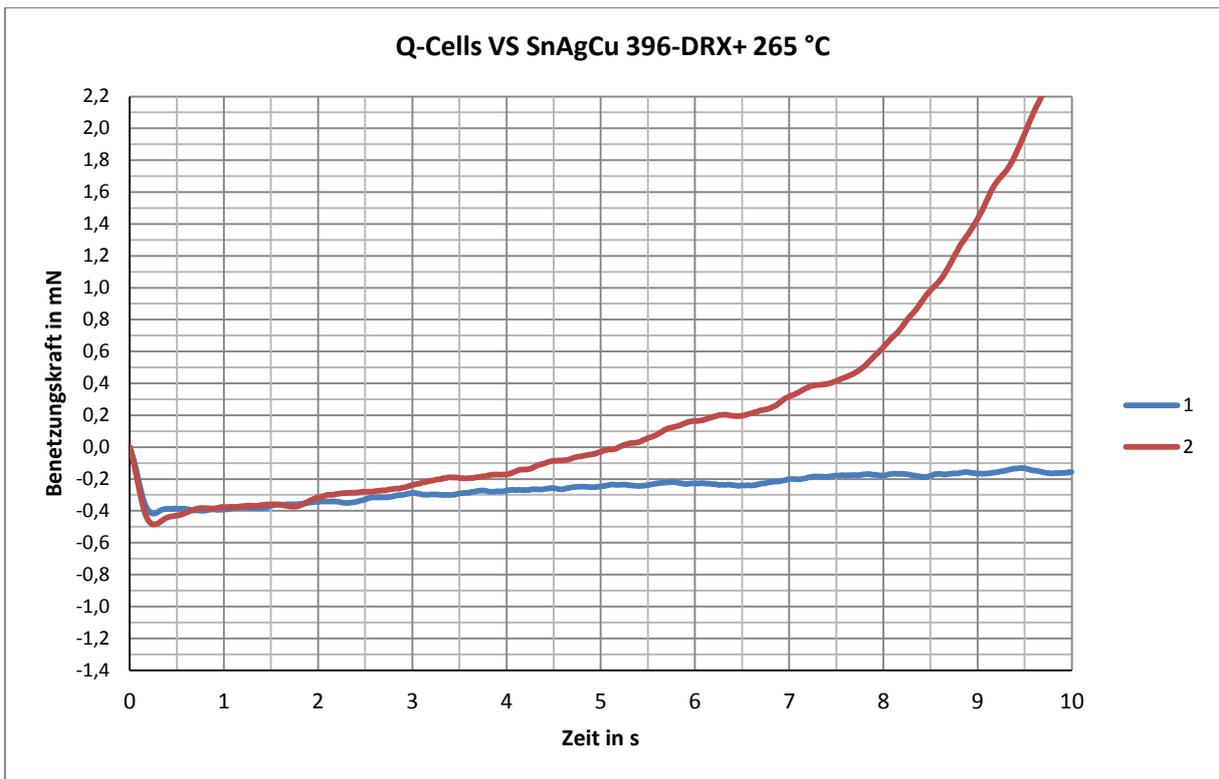
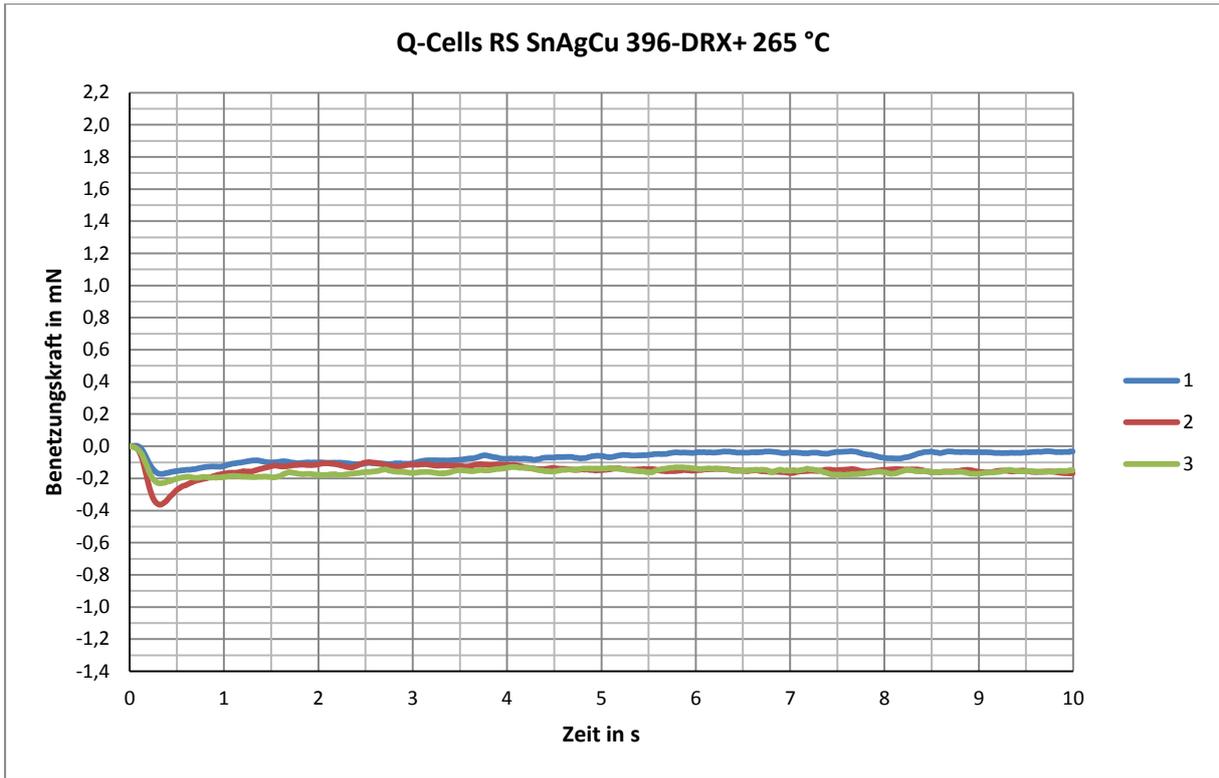


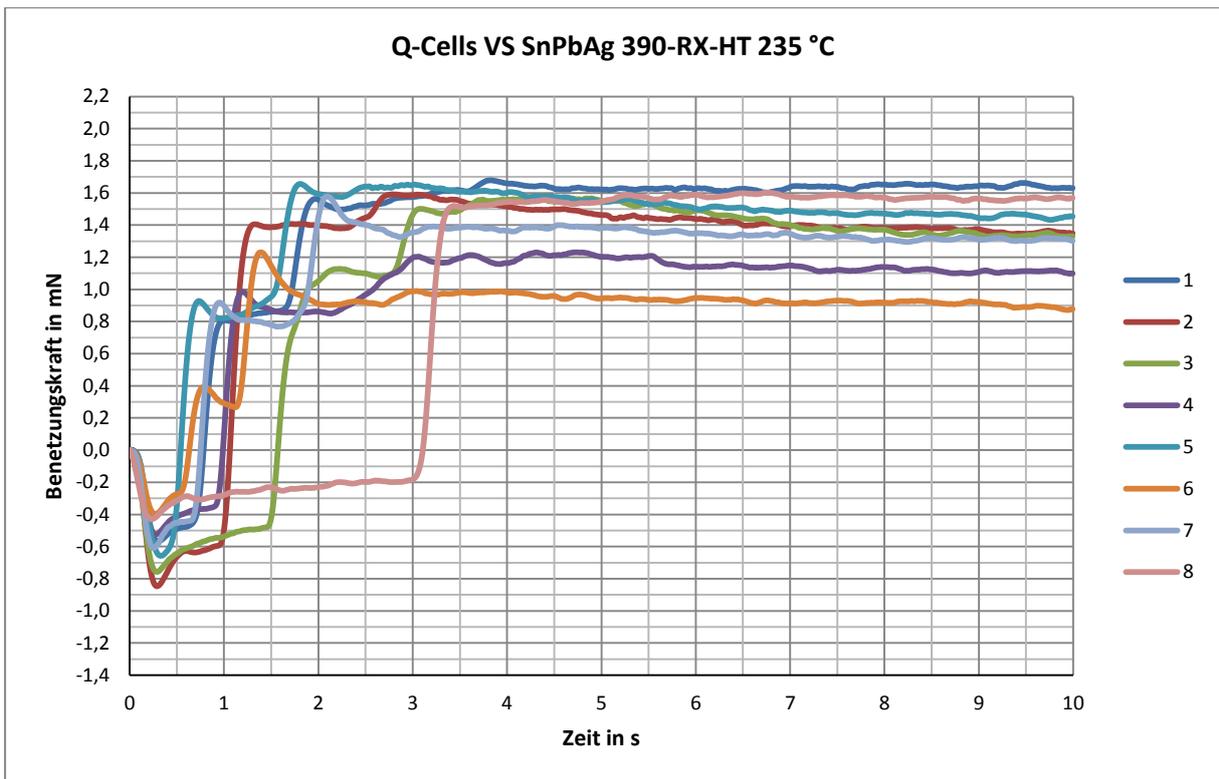
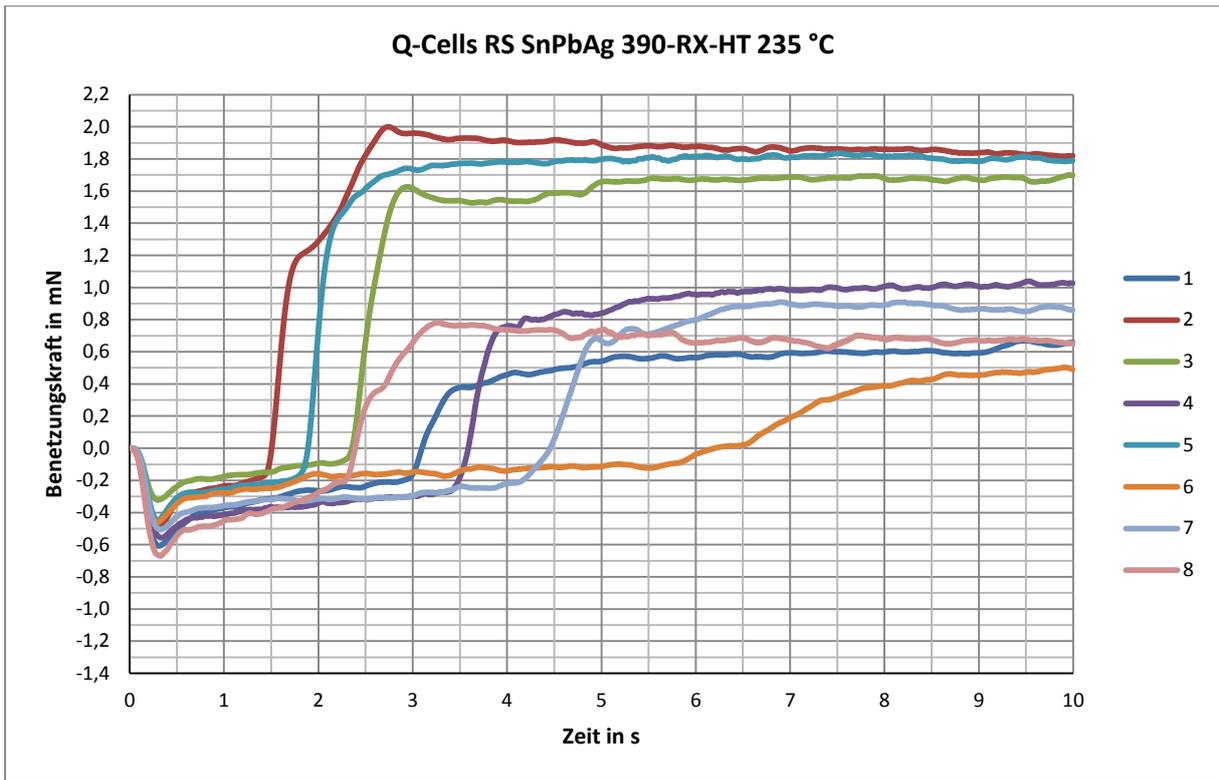


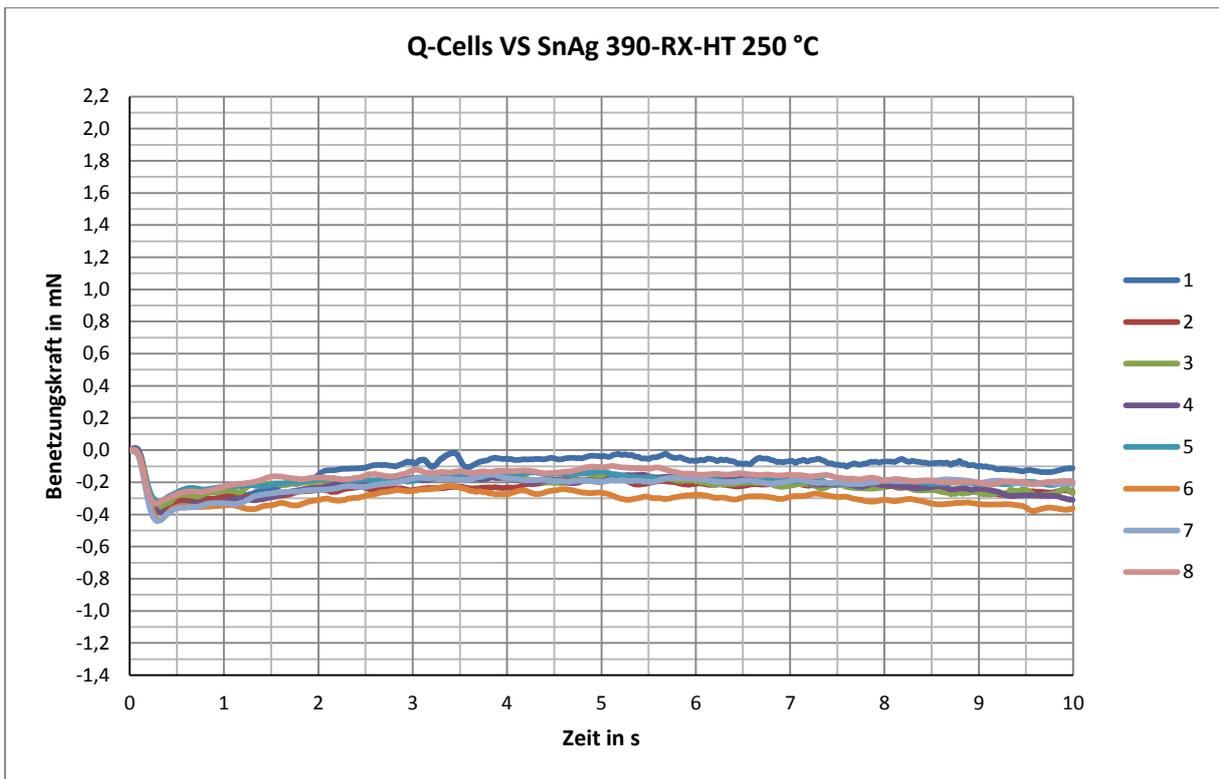
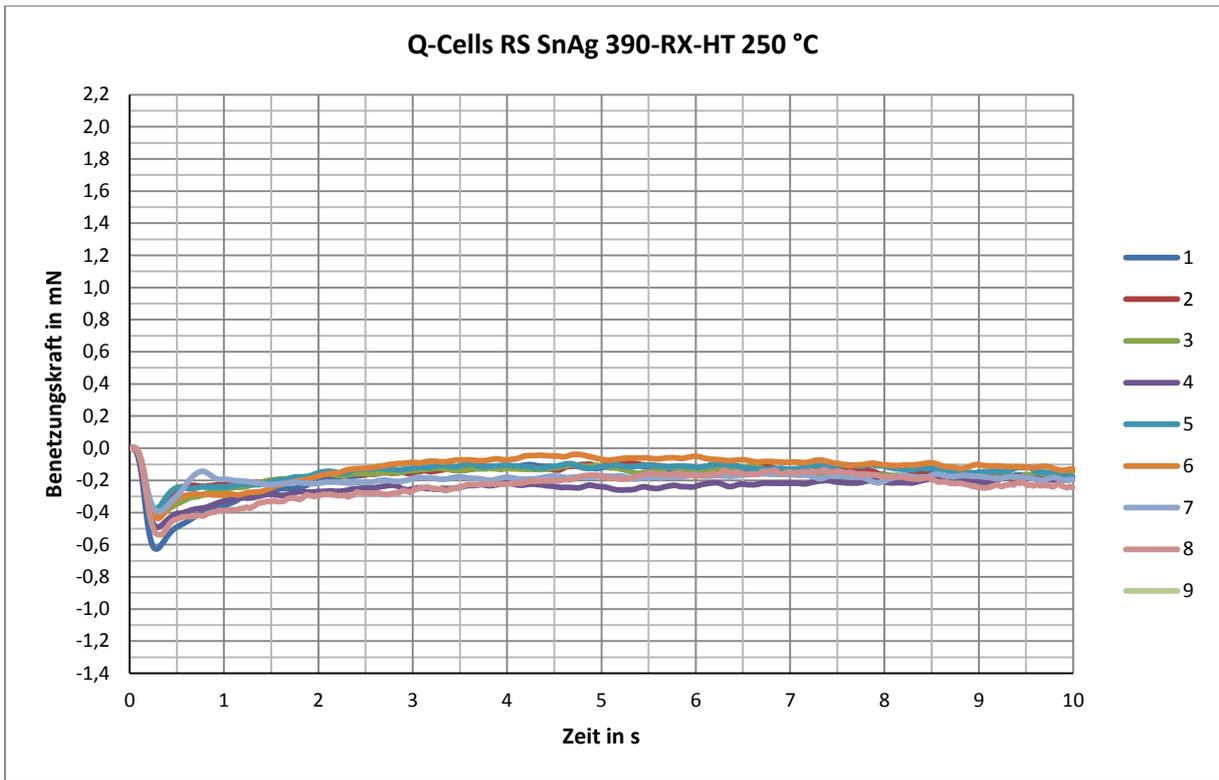


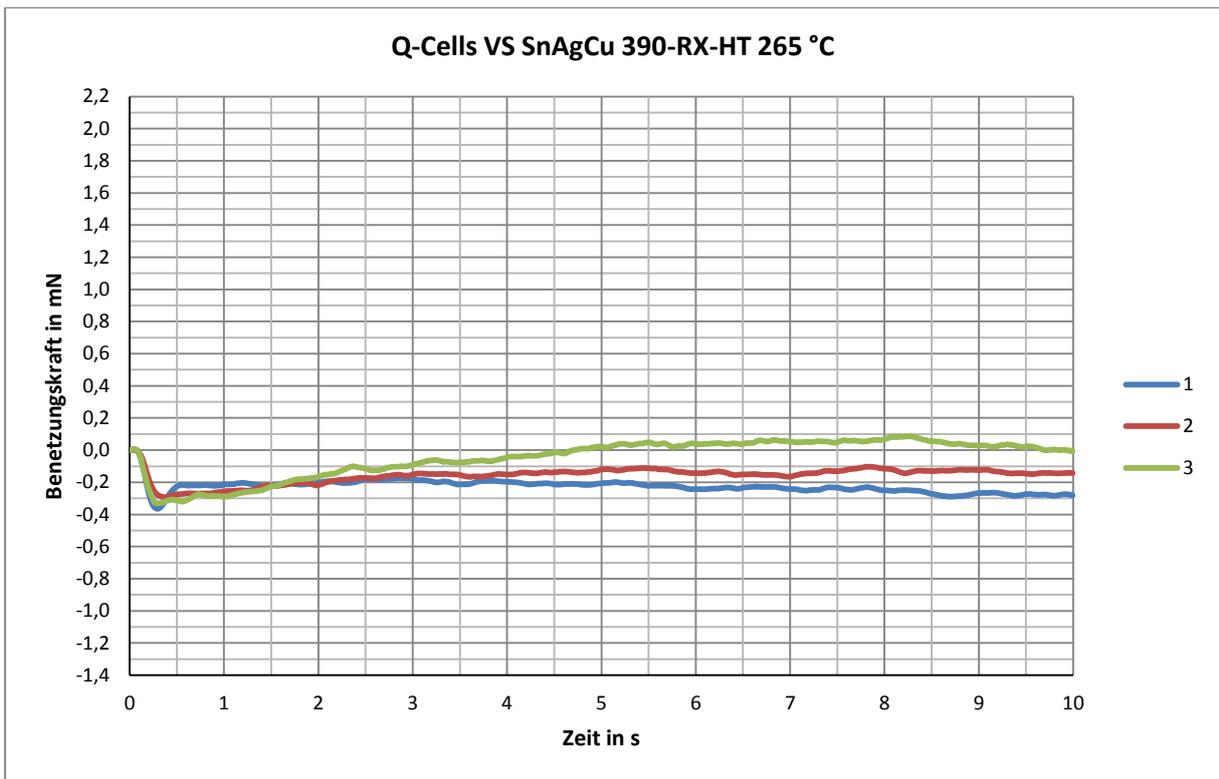
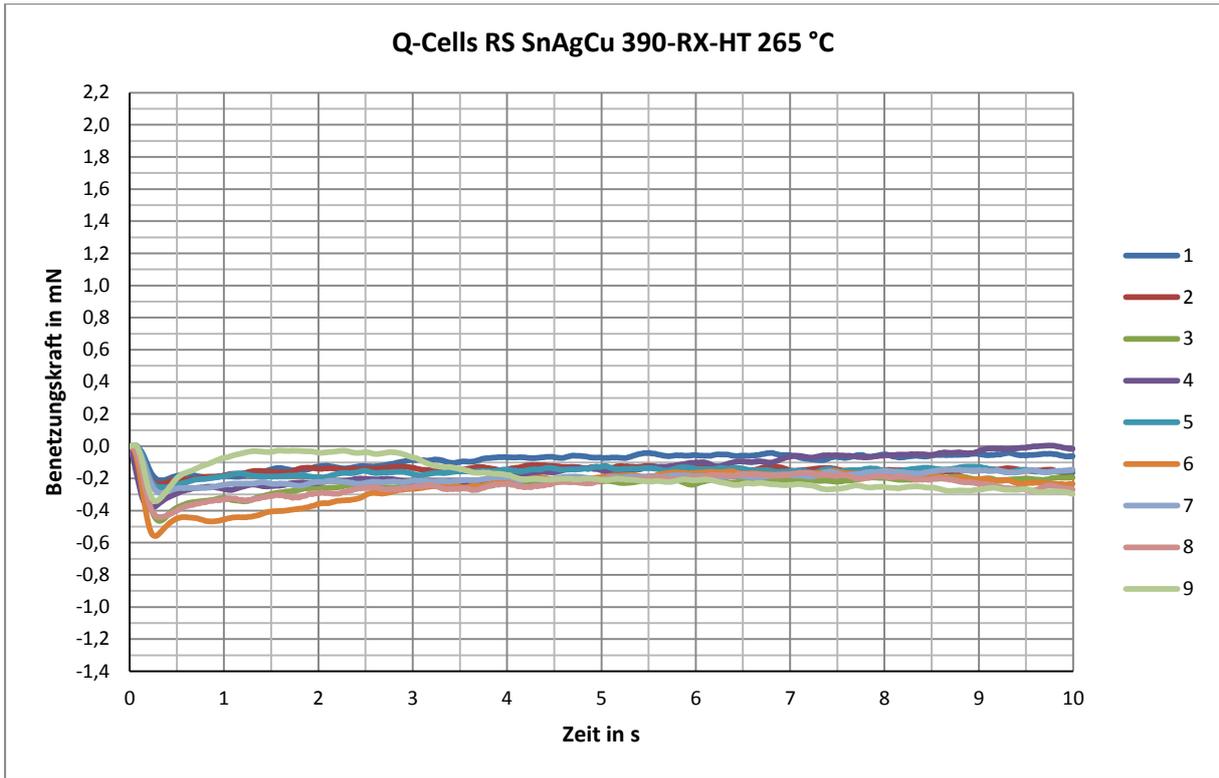




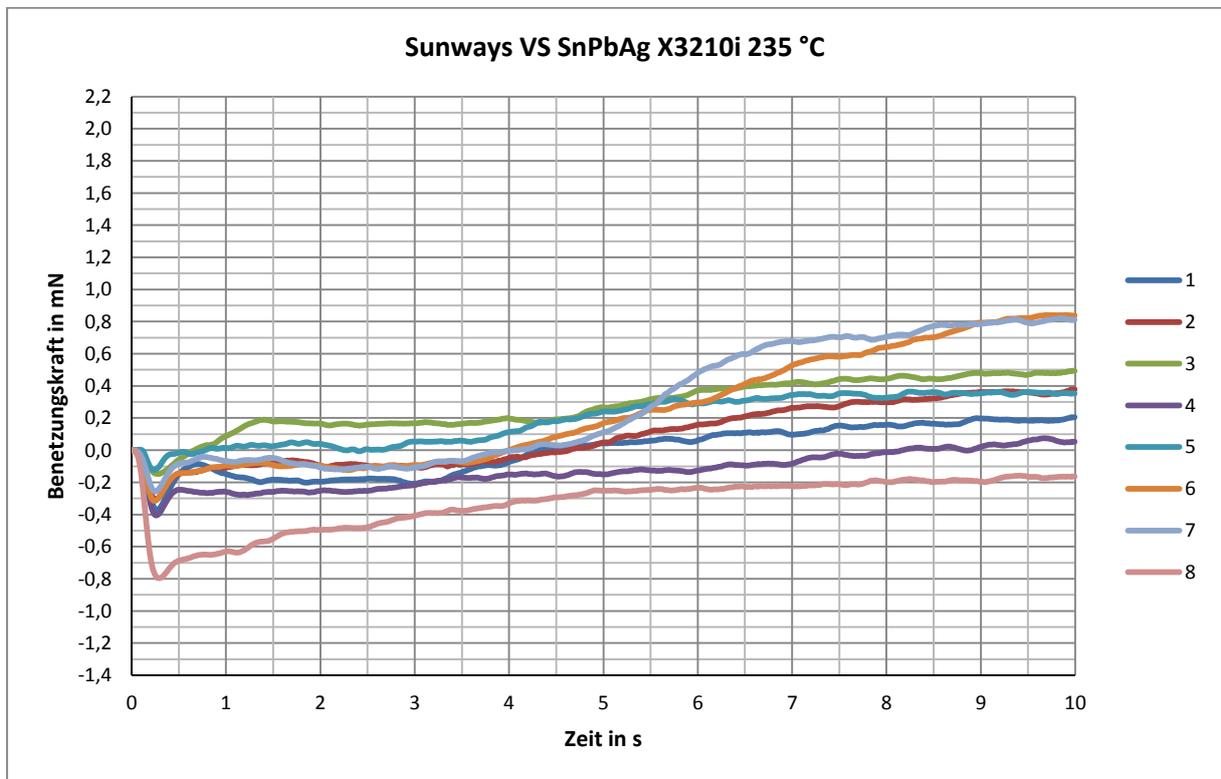
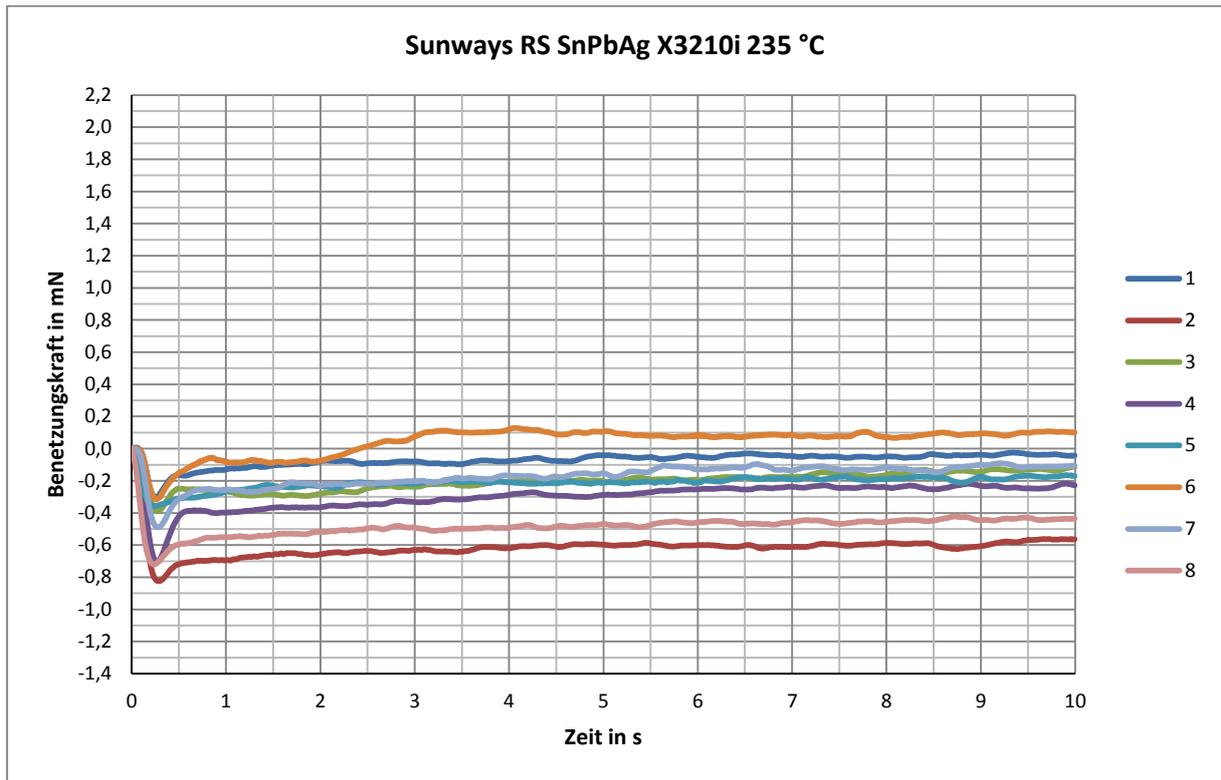


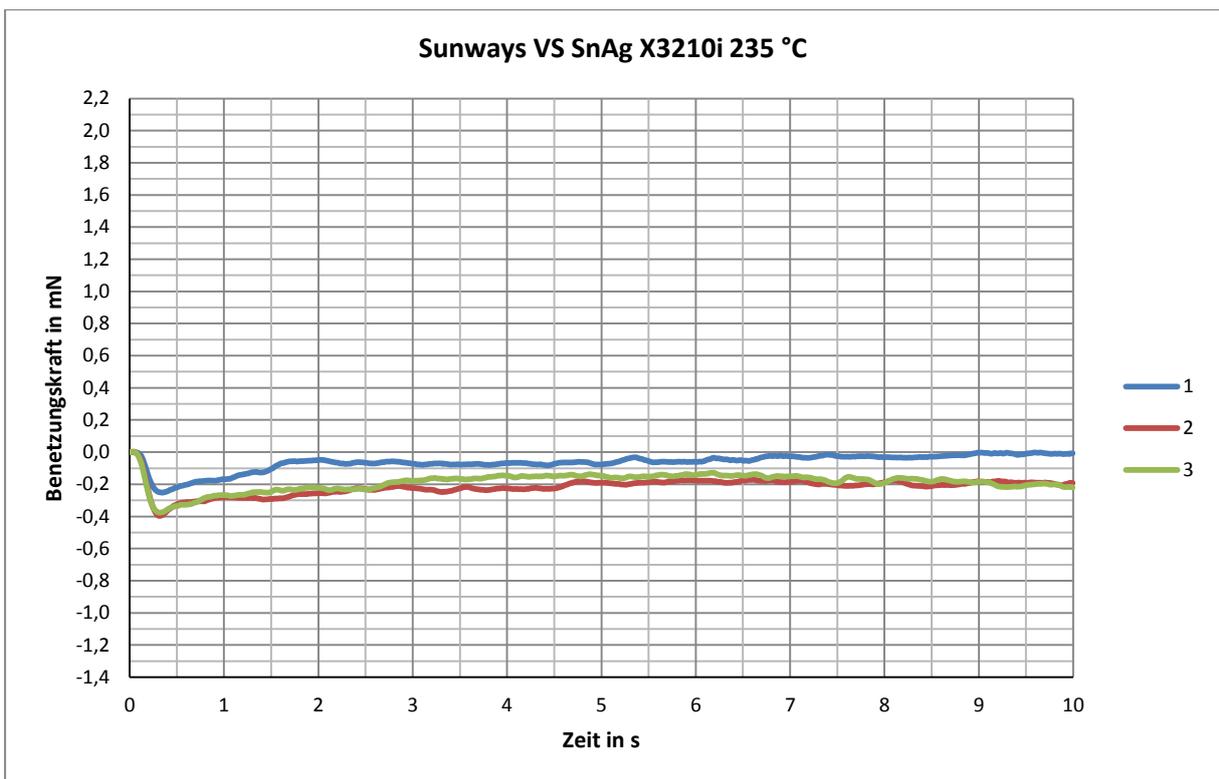
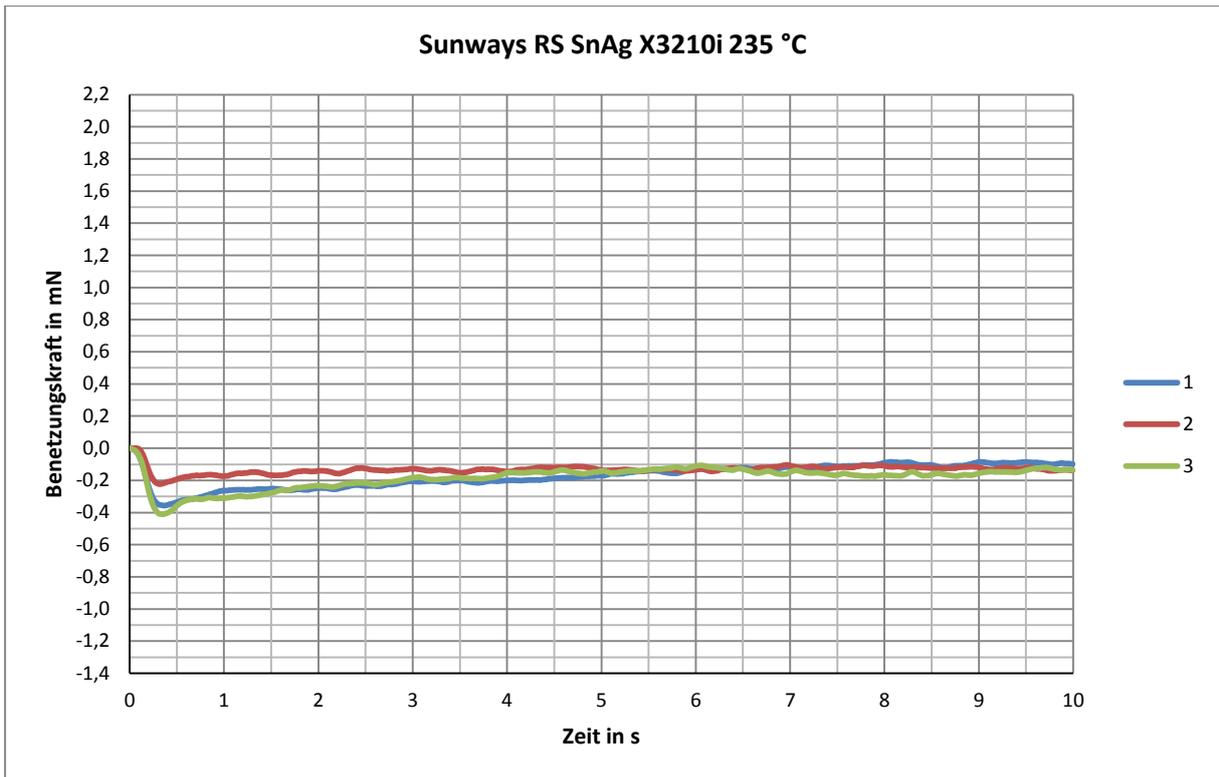


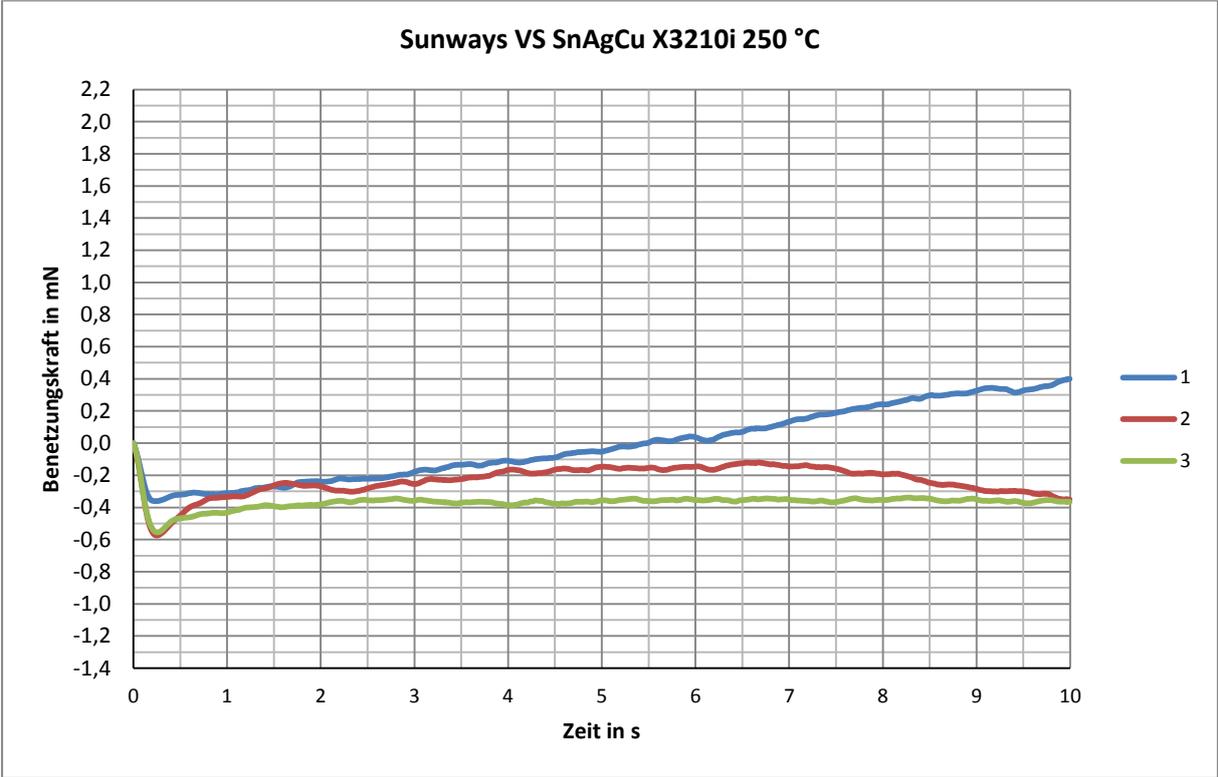
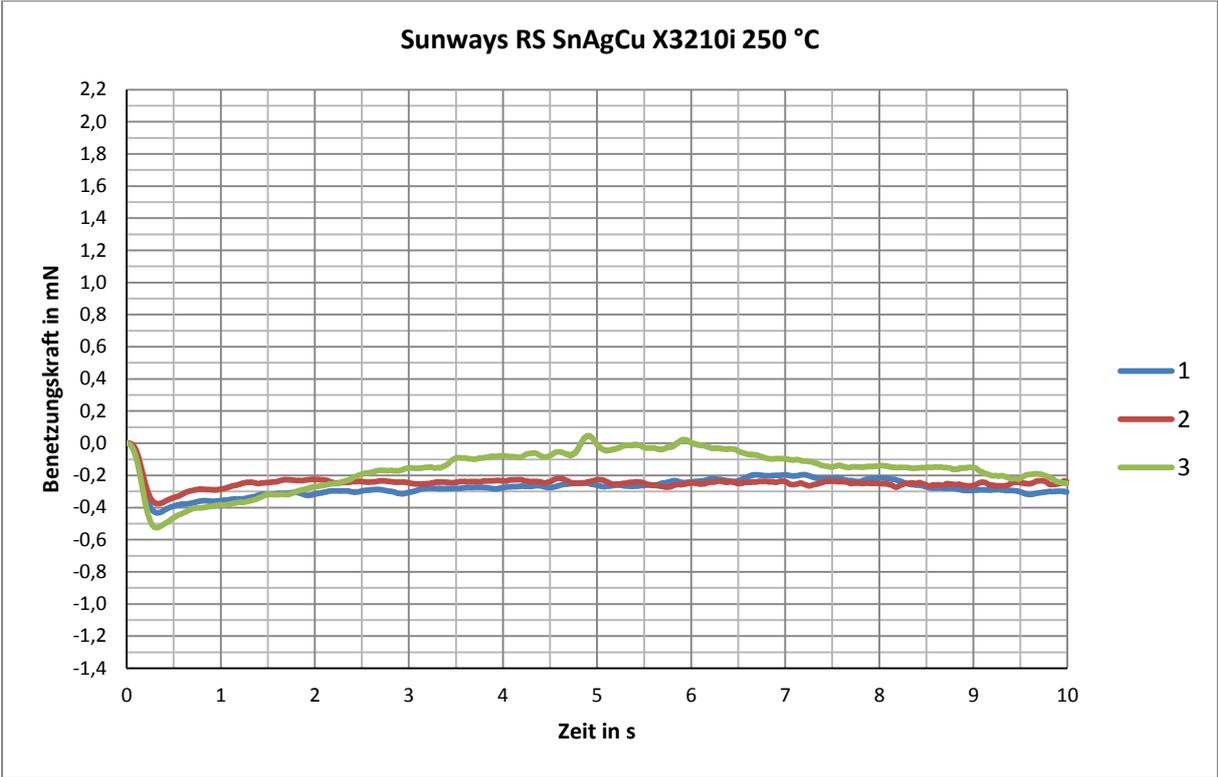


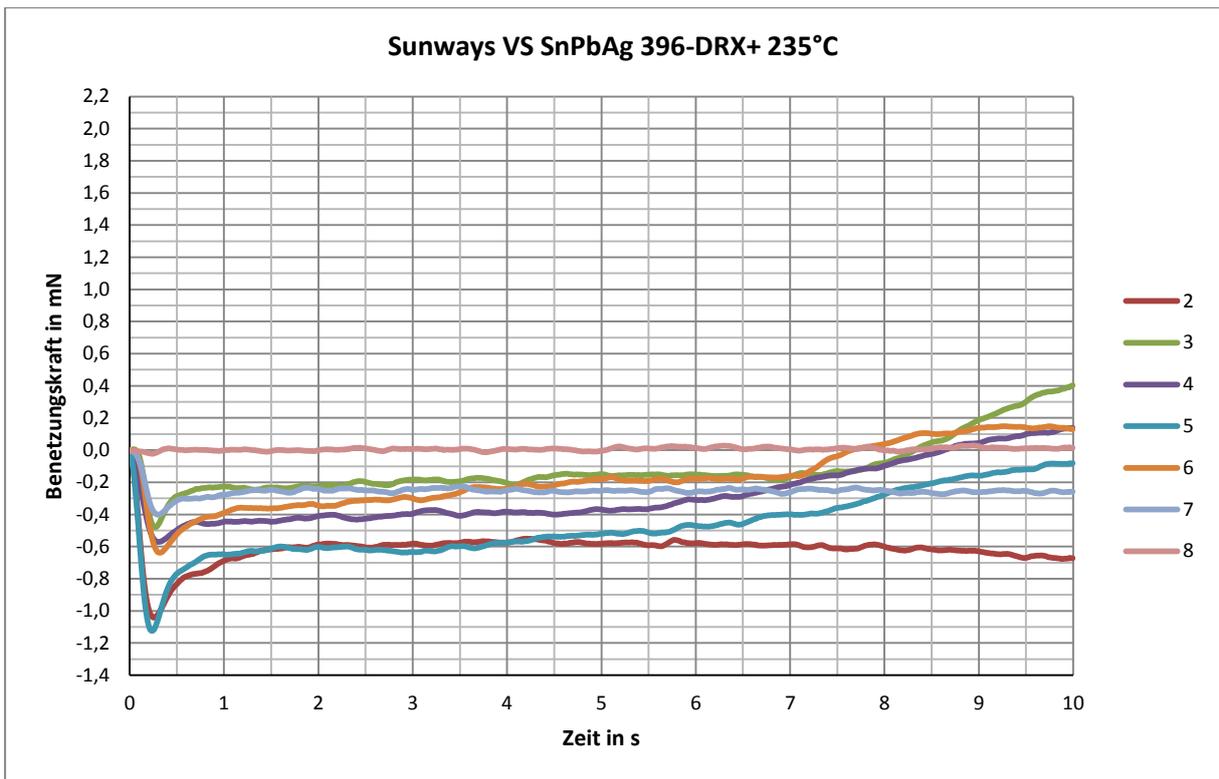
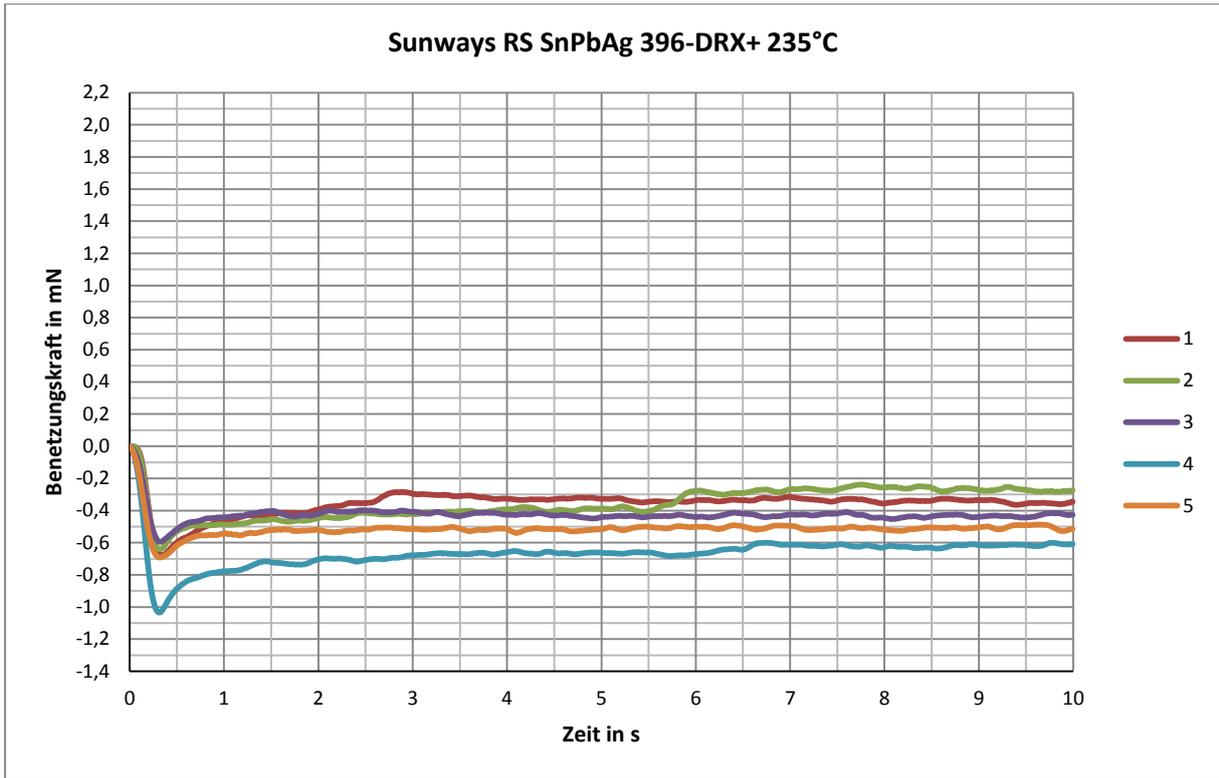


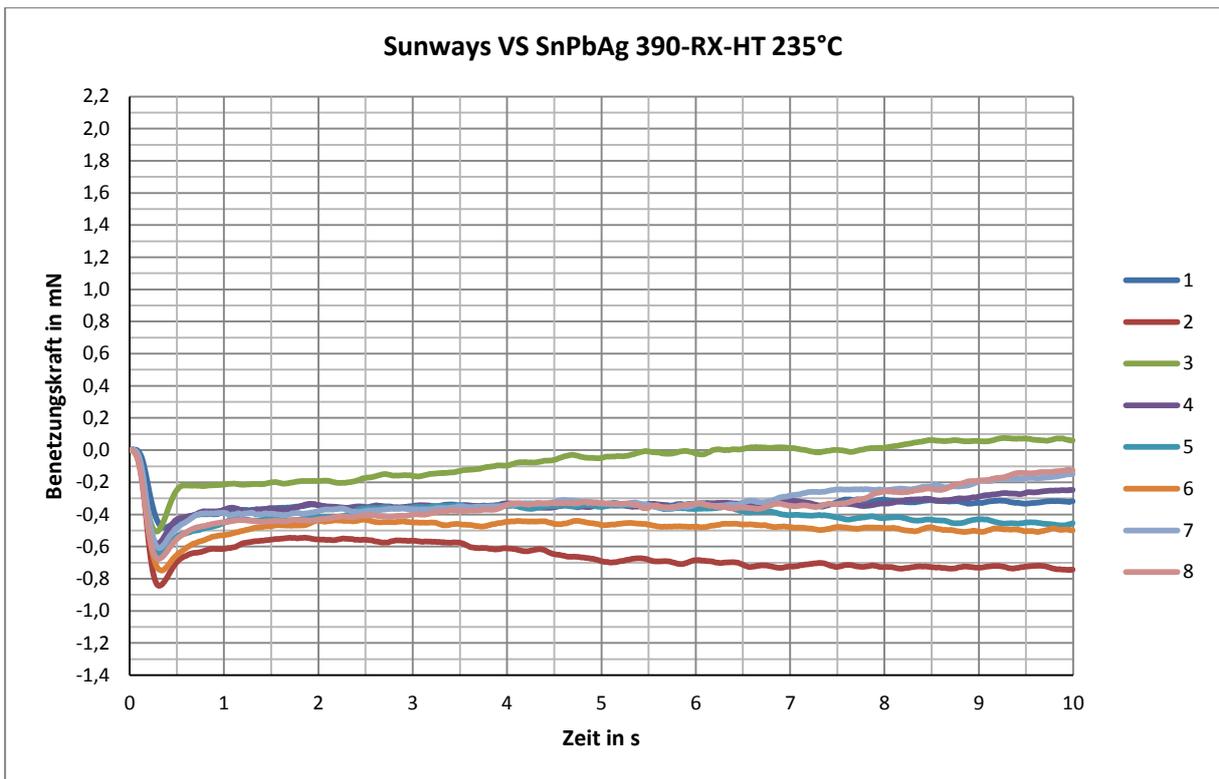
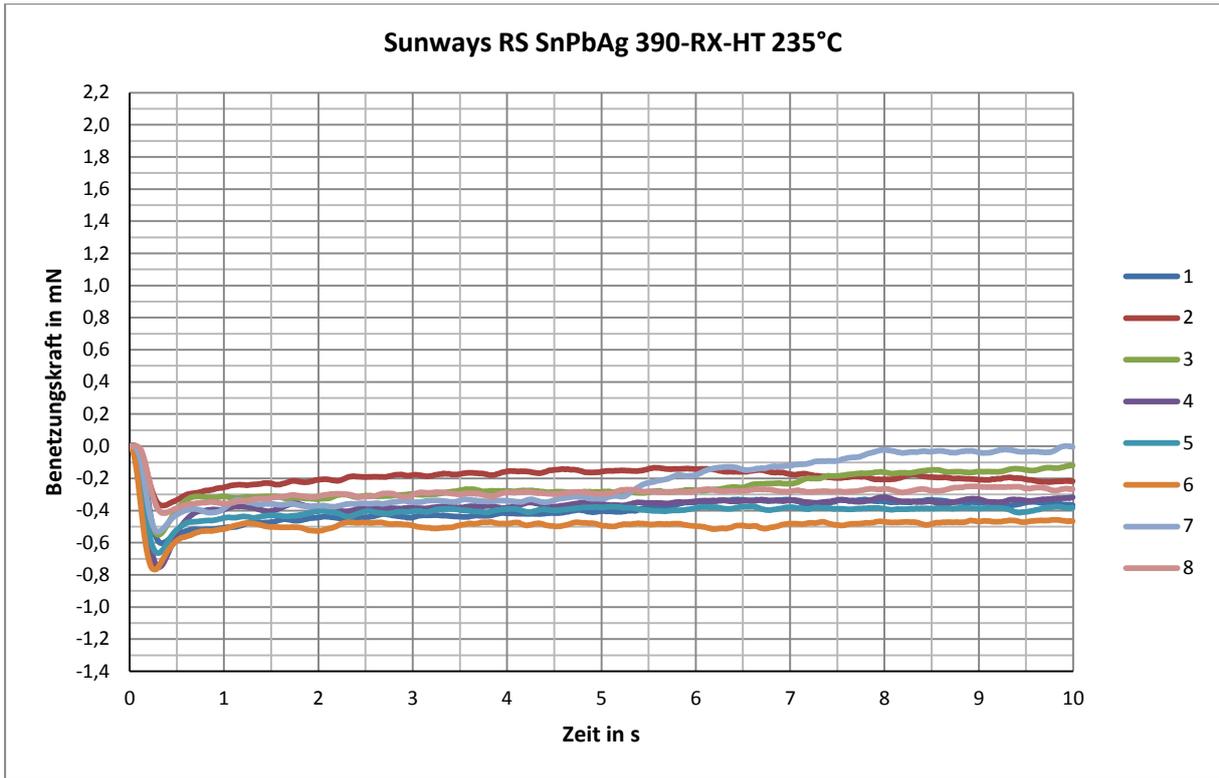
Anlage 2 – Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen Sunways











Anlage 3 – Diagramme der Benetzungskraftuntersuchungen JA Solar

