

Abschlussbericht zum Teilvorhaben

**Entwicklung eines HTSL - SQUID - Messmoduls zur
kontaktlosen Strommessung in Solarzellen**

im BMBF - Verbundprojekt

Photoscanning SQUID - Messverfahren

(FKZ 13N7503/6)

Prof. Dr. H. J. Möller
Dr. J. Kabs, Dr. J. Klais, Dr. J. Koriath, Dr. E. Soyka

Institut für Experimentelle Physik
Technische Universität Bergakademie Freiberg

November 2002

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Überblick	3
1.1	Aufgabenstellung und Voraussetzungen	3
1.2	Planung und Ablauf	6
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.4	Zusammenarbeiten	7
2.	Experimentelle Ergebnisse	8
2.1	Aufbau der Messapparatur	8
2.2	Stromverteilungsmessungen an verschiedenen Solarzellentypen	10
2.3	Kurzschlüsse in Solarzellen	12
2.4	Untersuchung der Stromverteilungen in pn – Übergängen	14
2.5	Berechnung der Stromverteilung und numerische Simulation	15
2.6	Kurzschlüsse in pn – Übergängen von monokristallinen Wafern	17
2.7	Kurzschlüsse in pn – Übergängen von multikristallinen Wafern	18
3.	Zusammenfassung	19
4.	Nutzen des Verbundprojektes für das Institut	20
5	Veröffentlichungen	20
5.1	Literaturverzeichnis	20
5.2	Eigene Veröffentlichungen	20

Entwicklung eines HTSL - SQUID - Messmoduls zur kontaktlosen Strommessung in Solarzellen

1. Einleitung und Überblick

Ziel des Projekts war es, eine prozessbegleitende, schnelle und zerstörungsfreie Charakterisierungsmethode für bestimmte funktionelle Elemente von Solarzellen zu entwickeln, die bisher gar nicht oder nur sehr schwierig zu messen waren. Dazu zählen vor allem die stromsammelnden Elemente wie der pn – Übergang und die elektrischen Kontakte. Lokale Fehler in diesen Bereichen, wie Kurzschlüsse oder hohe Widerstände, sind nur mit Hilfe von topographischen Verfahren zu detektieren.

Dazu wurde von uns früher das CASQ - Verfahren entwickelt, mit dem man die Stromverteilung im Emitter und den Kontakten einer Solarzelle orts aufgelöst messen und damit Fehler feststellen kann. Die Methode basiert darauf, dass die in diesen Teilen der Zelle vorwiegend parallel zur Oberfläche fließenden Ströme ein Magnetfeld erzeugen, das man außerhalb der Zelle messen kann. Diese Felder sind zwar sehr klein, im Nano – Teslabereich, können aber gut mit SQUIDs detektiert werden. Dazu wurde von uns bereits früher ein erstes Messsystem entwickelt, das einen kommerziellen Hochtemperatur (HTSL) – SQUID verwendete. Der Vorteil ist hierbei, dass man mit einer Flüssig - Stickstoff - Kühlung und damit einer einfacheren Kryostat - Technologie auskommt. Diese wird benötigt, um den SQUID – Sensor möglichst nahe an die Solarzellenoberfläche heranzubringen und damit eine hohe Ortsauflösung zu bekommen.

In den früheren Untersuchungen vor Beginn des Projektes konnte gezeigt werden, dass über solche magnetfeldtopographischen Messungen die Stromverteilungen in Solarzellen gemessen werden können. Jedoch reichte die lokale Auflösung nur, um damit qualitative Aussagen über die Qualität der Kontaktstrukturen zu gewinnen. Die zu geringe örtliche Empfindlichkeit des verwendeten SQUID - Systems ließ kaum Rückschlüsse auf materialspezifische Eigenschaften oder die Qualität des pn – Überganges zu.

In dem beantragten Vorhaben sollte daher ein neues SQUID-System entwickelt werden, das mit einer höheren Ortsauflösung und Messempfindlichkeit auch die Stromverteilungen zwischen den Kontaktstrukturen und im pn – Übergang messen kann. Gleichzeitig sollten verschiedene Nachteile der früheren Messapparatur, wie zum Beispiel die Instabilität und kurze Lebensdauer der kommerziellen SQUIDs verbessert werden. Im einzelnen sind die im folgenden beschriebenen Ziele bearbeitet worden.

1.1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Die Aufgabenstellung für das Projekt ergab sich aus den Erfahrungen mit dem bereits vorher von uns entwickelten CASQ – Messsystem. Um eine deutliche Verbesserung des Verfahrens zu erzielen, war ein kompletter Neubau der Anlage erforderlich. Im einzelnen mussten dabei folgende Teilaufgaben bearbeitet und Probleme gelöst werden.

1.1.1 Messaufbau und Messverfahren

Neukonstruktion des optischen und mechanischen Messaufbaus

Im Zentrum stand zunächst ein völliger Neubau der Anlage. Dabei sollten vor allem die mechanischen Verschiebetische für die zu messenden Solarzellen außerhalb der magnetischen Abschirmung gelegt werden. Dies hat den Vorteil, dass man kommerzielle x-y - Tische einsetzen kann, die schneller und mechanisch stabiler bewegt werden können. Weiterhin sollte das Beleuchtungssystem für die Solarzellen variabler gestaltet und verbessert werden, um zum Beispiel monochromatische und gepulste Beleuchtung zu ermöglichen.

Entwicklung neuer SQUIDs und zugehörige Elektronik

Ein flexiblerer und offener mechanischer Aufbau hat den Nachteil einer geringeren magnetischen Abschirmung. Daher mussten auch bessere SQUIDs entwickelt werden. Eine Neuentwicklung der SQUIDs war allerdings auch erforderlich, da das bisherige kommerzielle System sehr empfindlich war und nur eine kurze Lebensdauer hatte. Aus diesem Grunde wurde die Zusammenarbeit mit der PTB Berlin gesucht, die in der Lage war eigene SQUIDs zu entwickeln und über dieses Projekt mit eingebunden werden konnte. Mit der Entwicklung der SQUIDs musste auch die dazugehörige Messelektronik neu konzipiert werden. Diese Aufgabe wurde von der PTB Berlin übernommen. Für die eventuelle kommerzielle Weiterentwicklung eines solchen neuen Messsystems war die Firma Innomess in Berlin als weiterer Projektpartner vorgesehen.

Entwicklung eines neuen Kryostaten

Zur weiteren Verbesserung des Signal – Rauschverhältnisses und damit der Empfindlichkeit der Magnetfeldmessung sollte auch einer neuer Kryostat entwickelt werden. Der bisher verwendete Stahlkryostat hatte den Nachteil, dass hochfrequente elektromagnetische Störsignale, die schlecht magnetisch abgeschirmt werden können, im Kryostatmantel Wirbelströme induzieren, die wiederum Störmagnetfelder am Ort des SQUIDs erzeugen. Eine Verbesserung lässt sich hier erzielen, wenn man auf nicht – leitende Materialien (zum Beispiel Polymere) ausweicht. Kryostaten aus Polymeren bekommt man nur als Sonderanfertigungen, und müssen daher speziell entwickelt werden. Bei der Konzeption sollte weiterhin versucht werden, den Abstand zwischen SQUID und Messort auf 300 – 500 μm zu verringern. Dieser Abstand bestimmt die Ortsauflösung der Methode und sollte so gering wie möglich gehalten werden.

1.1.2 Hochauflösende Stromverteilungsmessungen

Mit der neu entwickelten und gebauten Anlage sollte dann ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt werden. Im Vordergrund standen dabei folgende Aufgaben:

Untersuchung verschiedener Solarzellentypen

Im industriellen Maßstab werden heute eine Reihe unterschiedlicher Solarzellentypen angeboten. Diese unterscheiden sich nicht nur im Ausgangsmaterial sondern auch hinsichtlich des Solarzellendesigns und der Herstellungsprozesse. Es sollte daher zunächst untersucht werden, wie sich diese unterschiedlichen Typen mit der CASQ - Methode analysieren lassen und welche charakteristischen Ergebnisse gewonnen werden können.

Charakterisierung möglicher Ausfallmechanismen von Solarzellen

Im Vordergrund stehen dabei typische Ausfallursachen, die in Zusammenhang mit den jeweiligen Herstellungsverfahren zu sehen sind. Hier sollten nicht nur Fehler in den Kontaktstrukturen detektiert werden, sondern insbesondere die Qualität des Emitters und pn – Übergangs untersucht werden. Dies sollte mit dem neuen System erstmalig möglich werden.

Entwicklung eines schnellen, numerischen Auswertungsverfahrens zur Stromverteilung

Das SQUID Messverfahren misst das von den Solarzellen unter Beleuchtung erzeugte Magnetfeld. Relevant ist jedoch die dazugehörige Stromverteilung. Aus grundsätzlichen physikalischen Gründen kann man aus einer Magnetfeldmessung im allgemeinen nicht die dazugehörige Stromverteilung konstruieren. Dieses sogenannte Inverse Problem ist nicht eindeutig lösbar. Unter bestimmten einschränkenden Annahmen kann man jedoch eindeutige Lösungen bekommen. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn die zu Grunde liegende Stromverteilung zweidimensional ist. Dies ist bei Solarzellen teilweise erfüllt, da die das Magnetfeld erzeugenden Ströme vorwiegend parallel zur Oberfläche im Emitter und den Kontakten fließen. Da es jedoch Front und Rückseitenkontakte gibt, überlagern sich die Magnetfelder aus beiden Bereichen, so dass das Problem nicht vollständig zweidimensional beschreibbar ist. Verringert man jedoch den Abstand zur Oberfläche, wie hier vorgesehen, wird der Einfluss des Solarzellenrückseitenkontaktes geringer und die Stromverteilung nähert sich zunehmend diesem Grenzfall an. In diesem Fall kann man numerische Algorithmen entwickeln, die eine direkte Umrechnung auf die zweidimensionale Stromverteilung erlauben. Zunächst sollte dazu mit Hilfe eines kommerziellen Programms (DESSIS) die Stromverteilung in Solarzellen analysiert werden, um dann daraus ein schnelles numerisches Verfahren für den zweidimensionalen Fall zu entwickeln.

1.1.3 Weiterentwicklung des Messverfahrens

Nach dem Aufbau des neuen Systems sollte untersucht werden, inwieweit eine Weiterentwicklung zu einem industriell einsetzbaren Messplatz in der Solarzellenfertigung möglich ist.

Aufbau eines vereinfachten Messplatzes

Bei dem Einsatz eines solchen Systems in einer Fertigungslinie für Solarzellen hat man besondere Anforderungen zu berücksichtigen, vor allem eine geringe Störanfälligkeit gegenüber magnetischen Störfeldern sowie kurze Mess- und Auswertezeiten. Dazu muss das ganze System einfach konzipiert und unkompliziert im Messablauf sein. Diese Randbedingungen sind bei dem neu konzipierten System nur zu einem geringen Teil berücksichtigt worden. Man konnte jedoch erwarten, dass sich Hinweise auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten ergeben würden. Dazu sollten im weiteren Projektverlauf kontinuierlich Solarzellen aus der industriellen Produktion auf ihre möglichen Ausfallursachen hin überprüft und analysiert werden.

Weiterentwicklung des SQUID-Systems

In gleicher Weise sollte versucht werden, in Zusammenarbeit mit der PTB Berlin auch das SQUID System weiter zu entwickeln. Eine Entwicklungsrichtung dabei wurde in einer weiteren Miniaturisierung gesehen, die dann wiederum eine höhere Ortsauflösung erlauben würde. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten liegen in einer Reduktion der Störanfälligkeit, sowie der Erhöhung der Messgeschwindigkeit.

1.2 Planung und Ablauf

Dieses Teilprojekt wurde nacheinander von mehreren wissenschaftlichen Mitarbeitern bearbeitet, die auf Grund anderer beruflicher Entwicklungen jeweils nach etwa einem Jahr auschieden. Es war jedoch jeweils möglich, dass für eine gewisse Zeit eine Überlappung der Arbeitsverhältnisse bestand, so dass eine gute Einarbeitung möglich war. Das Projekt hat daher trotz des personellen Wechsel keine zeitlichen Verzögerungen erfahren.

Im gesamten Projektzeitraum wurden von der PTB Berlin mehrere SQUIDs hergestellt. Auf Grund von technischen Problemen bei der Herstellung sind diese SQUIDs jedoch nicht immer zu den dafür vorgesehenen Zeitpunkten bereitgestellt worden. Dies hat zu Beginn zu einer gewissen Zeitverzögerung in unserem Teilprojekt geführt. Es konnten dafür jedoch andere Aufgaben vorgezogen werden, so dass insgesamt das Projekt nicht darunter gelitten hat. Es hat sich allerdings im Verlaufe des Projektes herausgestellt, dass die dort hergestellten SQUIDs nur eine begrenzte Lebensdauer haben. Es ist zu vermuten, dass dies mit einem grundsätzlichen Problem des SQUID Designs zu tun hat, was aber erst gegen Ende des Projektes erkannt wurde. Geplante Veränderungen an der Konstruktion konnte daher aus technischen Gründen bei der PTB Berlin nicht mehr realisiert werden

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der zur Zeit stark anwachsende Photovoltaikmarkt fordert von der wissenschaftlichen und technischen Seite immer umfangreichere und schnellere Charakterisierungsverfahren für Solarzellen. Solche Anlagen werden zur Qualitätskontrolle in der Produktionslinie benötigt, sowie um ein detailliertes Verständnis von Fehlfunktionen der Solarzelle zu bekommen. Dies erfordert Entwicklungen im Bereich schneller, zerstörungsfreier und orts aufgelöster Messapparaturen.

Die etablierten elektrischen Charakterisierungsverfahren für Solarzellen erlauben heute umfangreiche topographische Messungen der verschiedensten Parameter. Trotzdem sind bestimmte Funktionen der Solarzelle immer noch schwierig zu untersuchen. Dazu gehört die großflächige Charakterisierung des pn-Übergangs, des Emitters und der Kontaktstruktur auf der Zelle. Fehlfunktionen sind hier Kurzschlüsse oder zu hohe Übergangswiderstände. Beides wirkt sich auf den Wirkungsgrad der Zelle aus. Die Detektion dieser häufig sehr lokalen Störungen ist möglich über die Messung der Stromverteilung. Hier sind in den letzten Jahren im wesentlichen zwei Verfahren entwickelt worden, die Thermographie und die CASQ – Methode. Im ersten Fall wird eine lokale Stromkonzentration durch die dabei erzeugte Wärme detektiert. Diese Methode ist in der Zwischenzeit weit entwickelt worden und erlaubt einen schnellen und direkten Nachweis von Kurzschlüssen. Der Strom wird hierbei nicht durch Beleuchtung generiert, sondern durch Anlegen einer äußeren Spannung. Das Verfahren funktioniert daher nur an Solarzellen mit Kontakten, aber nicht unter den normalen Beleuchtungsbedingungen. Trotzdem hat es sich mittlerweile wegen seiner Einfachheit als das geeignetste Verfahren erwiesen.

Das von uns entwickelte CASQ – Verfahren (*Current Analysis by Squids*) misst die Stromverteilung orts aufgelöst direkt über das dabei generierte Magnetfeld mit Hilfe eines Hochtemperatur-SQUIDs. Die Solarzelle kann sowohl unbeleuchtet mit anliegender Spannung, als auch unter Beleuchtung vermessen werden. Bei (variabler) Beleuchtungsintensität wird der Gesamtstrom aus der Zelle durch einen Lastwiderstand justiert. Die Solarzelle kann daher

unter normalen Beleuchtungsbedingungen untersucht werden. Die Messtechnik ist jedoch schwieriger zu handhaben und hat bisher nicht die gleiche Ortsauflösung wie das Thermographieverfahren. Die in diesem Projekt entwickelten, nicht kommerziellen HTSC - SQUIDs erlauben momentan eine Annäherung der Messebene an die Solarzelle von ca. $0,5\mu\text{m}$ für die vertikale Magnetfeldkomponente (B_z), was der räumlichen Auflösung der Messung entspricht. Die Entwicklungen in diesem Projekt haben jedoch gezeigt, dass das CASQ – Verfahren auch Messungen an Wafern erlaubt, die keine Kontakte und nur pn – Übergängen haben. Damit kann man auch direkt die Qualität des Emitters und des dazu notwendigen Prozessschrittes untersuchen, was neue Einsatzmöglichkeiten für diese Methode erlaubt.

Aus der gemessenen Magnetfeldverteilung kann auf die laterale Stromverteilung, die das Magnetfeld induziert, zurück geschlossen werden. Wie bereits erwähnt ist für eine zweidimensionale Stromverteilung das Inverse Problem der Umrechnung Magnetfeld - Stromverteilung zu lösen. Ein solches Verfahren basiert auf der Methode der Fouriertransformation der Magnetfeldkomponenten und der dann möglichen direkten Berechnung der Stromkomponenten. Dieses Verfahren ist von uns im Projekt entwickelt worden und auch auf andere ähnliche Probleme übertragbar. Inverse Berechnungen von Stromverteilungen aus Magnetfelder sind zum Beispiel auch erforderlich bei bestimmten medizinischen Messtechniken, wie bei Messungen der Gehirnströme oder Herzstromaktivitäten. Hier könnten diese numerischen Entwicklungen ebenfalls interessant sein.

Vergleichbare magnetische Messverfahren für photovoltaische Anwendungen gibt es sonst weltweit nicht. Es werden jedoch ähnliche Entwicklungen versucht, um den Stromtransport in integrierten Schaltungen zu untersuchen. Hier ist jedoch eine sehr viel höhere Ortsauflösung der Methode notwendig. Diese Verfahren werden als SQUID-Mikroskopie bezeichnet.

1.4 Zusammenarbeiten

Das hier beschriebene Teilprojekt erforderte die Zusammenarbeit mit anderen Partner. Die Entwicklung der SQUIDs und der dazugehörigen Elektronik wurde während des gesamten Projektzeitraums in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Kryotechnik unter Leitung von Dr. Schurig der PTB Berlin durchgeführt. Dazu gehörte die konzeptionelle Entwicklung sowie die Herstellung der SQUIDs. Diese Gruppe hatte auch die Leitung des Verbundprojektes.

Weiterhin gehörten zu dem Projektverbund eine Arbeitsgruppe des Instituts für Kristallzucht, und die Firma Innomess, beide in Berlin. Diese beiden Partner entwickelten zusammen ein Photoscanning – Verfahren auf der Basis eines SQUID – Messsystems zur Detektion von Dotierinhomogenitäten in Siliziumeinkristallen. Aus dieser Zusammenarbeit haben sich im Verlauf des Projektes immer wieder Anregungen für Weiterentwicklungen und Verbesserungen beider im Projekt aufgebauten Messmethoden ergeben.

Zu Beginn des Projektes gab es weiterhin eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft- und Klimatechnik in Dresden, mit dem zusammen der Polymerkryostat entwickelt wurde. Diese Arbeit wurde im Rahmen eines Unterauftrages abgewickelt. Im Verlaufe des Projektes sind dort außerdem Verbesserungen und Reparaturen an dem Kryostat durchgeführt worden.

2. Experimentelle Ergebnisse

2.1 Aufbau der Messapparatur

Abbildung 1 zeigt den SQUID - Messplatz, wie er im Laufe des Projektes entwickelt und für die Messungen verwendet worden ist. Die wesentlichen Teile sind der Kryostat, die (hochgezogene) Abschirmung und die x-y -Verfahrtsche, auf denen der Probenteller mit Probe sitzt, der bei der Messung innerhalb der Abschirmung liegt (siehe auch schematische Darstellung). Das bei Solarzellen üblicherweise auftretende Signalrauschen führte zur Abschätzung eines erforderlichen Schirmfaktors in der vertikalen z-Richtung von 400. Dies ist mit einer zweifachen, zylindersymmetrischen Mumetall-Schirmung, die oben und unten offen ist, möglich. Um die Möglichkeit zu haben, auch schwächere Signale in dieser Anordnung zu messen, kann die untere Öffnung der Abschirmung durch eine aufsteckbare Blende auf 200 mm Durchmesser reduziert werden. Dadurch wird ein Schirmfaktor von 700 an der SQUID-Position möglich; der Fahrweg des Probentisches wird dabei nicht eingeschränkt, solange der Säulendurchmesser, auf dem der Probenteller sitzt, 50 mm nicht übersteigt.

Für die Messung kann die Probe entweder beleuchtet oder ohne Lichteinstrahlung mit angelegter Vorspannung vermessen werden. In der Abbildung ist die Beleuchtung, die über drei Glasfaserkabel das Licht diffus und homogen auf die Probenoberfläche lenkt, nicht sichtbar. Als Lichtquelle dient ein Wolfram-Halogen-Strahler mit einer Leistung von 150 W, dessen Licht außerhalb der Abschirmung in die Lichtwellenleiter eingekoppelt wird. Die Lichtintensität kann mit Hilfe einer Irisblende je nach Signalstärke variiert werden. Durch diesen Aufbau ist auch die Einkopplung von monochromatischem Licht durch Zwischenschaltung eines Monochromators oder von Filtern möglich. Die Voraussetzungen für diesen Messmodus sind ebenfalls geschaffen worden. Die Messelektronik des SQUID befindet sich zum Teil direkt am Kryostat. Von dort gelangt das Signal über einen Lock-in-Verstärker zum Messrechner, der auch den gesamten Messvorgang steuert.

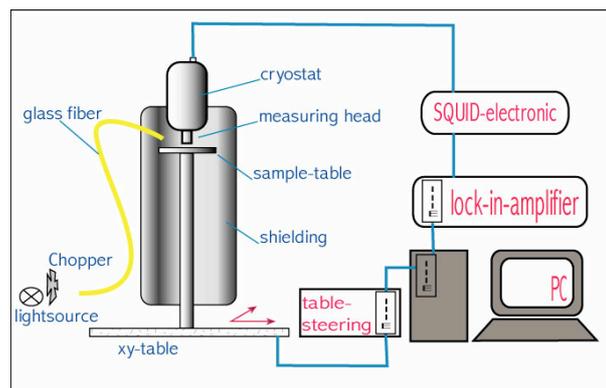


Abbildung 1

Aufbau und schematische Darstellung des CASQ - Messplatzes. Die magnetische Abschirmung ist geöffnet und nur teilweise zu sehen.

Ein wesentlicher Teil der Entwicklung ist für den Kryostatenbau und den SQUID aufgewendet worden. Abbildung 2 zeigt den fertigen Polymerkryostaten und schematisch seine wesentlichen Elemente. Das GFK - Material verursacht im Gegensatz zu Metall wenig magnetische Störungen (Rauschen) durch Wirbelströme. Um eine hohe Ortsauflösung zu erzielen, musste ein geringer (kalt-warm) Abstand SQUID-Probe eingehalten werden. Für diesen Zweck wurde ein Schraubdeckel mit dünnem ($200\ \mu\text{m}$) Saphirfenster vorgesehen, der eine variable Anpassung erlaubte, aber gleichzeitig ein gutes Vakuum gewährleistete, um ein Vereisen des Kühlfingers und des SQUIDs zu verhindern.

Im experimentellen Betrieb wurde allerdings festgestellt, dass dieses System mechanisch sehr anfällig ist. Wegen des geringen Abstandes zwischen Saphirfenster und Kühlfinger kam es leicht zu Beschädigungen beim Ein- und Ausbau. Ebenso beim Abkühlen und Aufwärmen infolge der thermischen Ausdehnung. Dieses Problem konnte allerdings durch einen erneuten Umbau des Kryostaten gelöst werden.

Am unteren Ende des Kryostaten auf einem Kühlfinger befindet sich der SQUID (Abbildung 3). In dieser geometrischen Anordnung kann man die Feldkomponente senkrecht zur Oberfläche (z-Komponente) messen. Dieser an der PTB Berlin entwickelte HTS-dc-SQUID ist auf einem Chipträger mit integrierter Rückkoppelpulen montiert und hat eine empfindliche Messfläche von $500 \times 500\ \mu\text{m}^2$. Dies garantiert eine geringe Störanfälligkeit und hohe Ortsauflösung. Die Steuerung und das Auslesen des SQUIDs erfolgte mit der von der PTB entwickelten Elektronik. Die Messsignale können vom Lock-in-Verstärker mit einer Sampling-Rate von bis zu 512 Hz aufgenommen werden, was eine hinreichend große Geschwindigkeit der Probe bei großer Auflösung zulässt. Gebräuchlicherweise werden 128 Messpunkte pro Sekunde aufgenommen, wobei die Probe mit etwa 13 mm/s bewegt wird. Diese Werte werden je nach gewünschter Auflösung variiert.

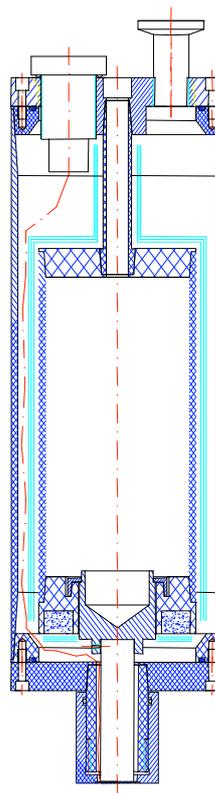


Abbildung 2

Polymerkryostat und schematische Darstellung des Aufbaus. Am unteren Ende befindet sich der verschraubbare Deckel mit Saphirfenster, hinter dem der SQUID auf einem Kühlfinger sitzt. Siehe auch die Details in Abbildung 3. Der Kryostat wird mit flüssigem Stickstoff gekühlt.

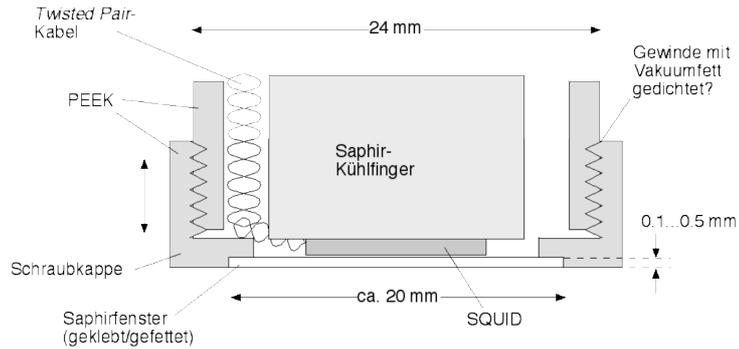
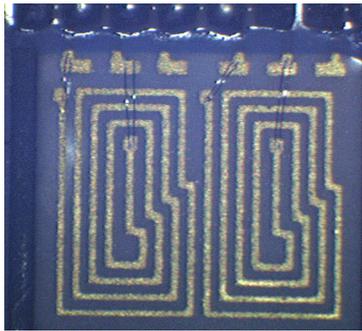


Abbildung 3 Rechts die schematische Darstellung des Kühlkopfes im Kryostat mit dem SQUID. Links die Detektionsspulen, die mit dem SQUID verbunden sind.

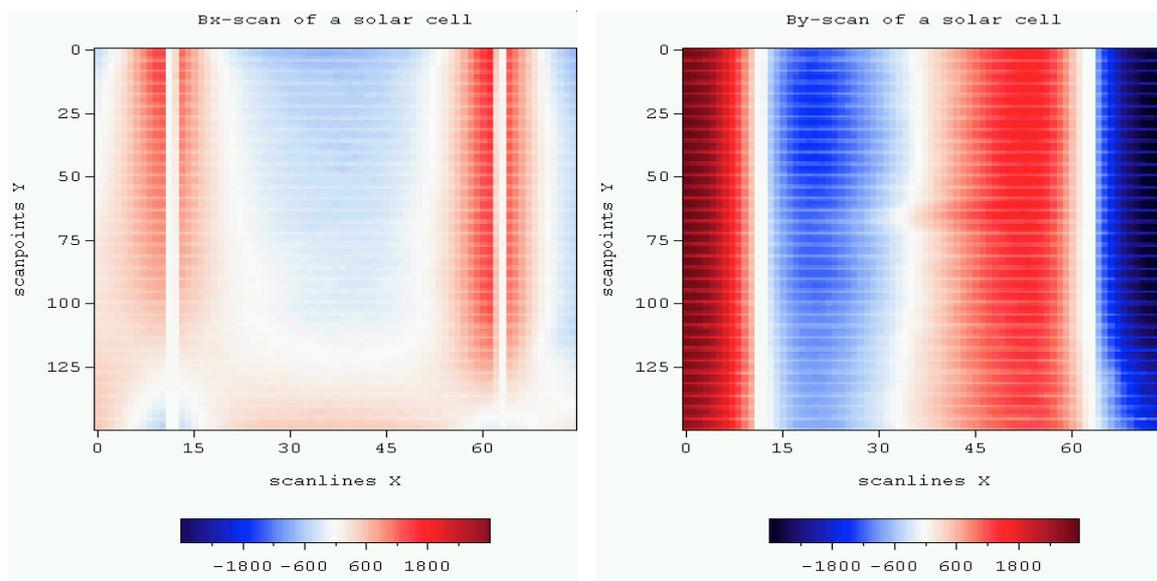
Das für diesen SQUID ermittelte Rausch-Spektrum führte zur Entscheidung, eine gepulste Lichtanregung > 100 Hz in der lock-in-Messtechnik einzusetzen. Die dafür notwendige Modulation des anregenden Lichtes wird verhältnismäßig einfach durch einen zwischen Beleuchtungsquelle und Glasfaserbündel eingesetzten mechanischen Chopper erzeugt.

Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass ein wesentliches Problem bei den SQUIDs die Lebensdauer war. Alle SQUIDs degradierten mehr oder weniger schnell und waren nach einer gewissen Zeit nicht mehr einsetzbar. Dies war im Hinblick auf eine Anwendung des Messsystems in einer industrieller Umgebung eine entscheidender Nachteil. Zu Beginn wurde vermutet, dass die SQUIDs möglicherweise durch den Kontakt mit Feuchtigkeit degradieren. Dies war auch in der Vergangenheit schon ein Problem mit den älteren SQUID – Typen gewesen. Hier war das möglich, da die SQUIDs aus Platzgründen nicht eingekapselt und nur durch Vakuumsfett geschützt waren. Beim Abkühlen und Aufheizen des Kryostaten bestand daher die Möglichkeit, dass Luft und Feuchtigkeit in das System eindringen konnte. Eine genauere Untersuchung der SQUIDs gegen Ende des Projektes ließ allerdings vermuten, dass eventuell noch andere Gründe eine Rolle spielen. Hier ist eine genauere Untersuchung des SQUID-Materials unter verschiedenen Umweltbedingungen erforderlich, die aus zeitlichen Gründen aber nicht mehr durchgeführt werden konnte. Es ist jedoch geplant, solche Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt nachzuholen.

2.2 Stromverteilungsmessungen an verschiedenen Solarzellentypen

Mit der neuen Messanlage sind zunächst eine Reihe von Solarzellentypen untersucht worden. Im folgenden sollen dabei zwei Klassen unterschieden werden: mono- und multikristalline Solarzellen. Ein typisches Beispiel für die z-Komponente des Magnetfeldes gemessen an einer monokristallinen Solarzelle ist in Abbildung 4 gezeigt. Blau dargestellte Werte stehen für die negative Richtung des Magnetfeldes (senkrecht zur Oberfläche), rot dargestellte für die positive Richtung. Die Kantenlänge des quadratischen Messbereichs beträgt 90 mm, es wurden $90 \cdot 90$ Messpunkte aufgenommen. Bei diesem Punktmessverfahren wird die Probe Punkt für Punkt abgerastert wird. Diese Prozedur ist verhältnismäßig zeitaufwendig, besonders bei noch größeren Auflösungen. Eine Messung dieser Art dauert etwa 4 bis 5 Stunden. Aus diesem Grund wurde ein schnelleres Linienscanverfahren entwickelt, bei dem die Probe zeilen-

weise vermessen wird und die Messdaten während der Bewegung simultan übertragen und im Lock-in-Verstärker gespeichert werden. Erst am Ende jeder Zeile werden sie zum Messrechner gesendet. Die hier dargestellte Messung besteht aus 180 Zeilen mit 450 Messpunkten pro Zeile bei einer Messzeit von etwa 50 Minuten. Dies macht sich auch in einer höheren Punktauflösung der Topogramme bemerkbar (Abbildung 4b). Außerdem ist dieser Messmodus damit etwa sechs mal schneller. Insgesamt sind die Ergebnisse im Vergleich mit früheren Messungen auch deutlich rauschärmer, was auf die besseren SQUIDs zurückzuführen ist.



(a)

(b)

Abbildung 4 Topographische Messung der z -Komponente des Magnetfeldes über einer beleuchteten Solarzelle. (a) Punktmessmodus mit einem Raster von 90×90 Punkten. (b) Linienscanmodus mit 180 Zeilen und 450 Messpunkten pro Zeile.

Man erkennt an den Magnetfeldtopogrammen bereits die sehr homogene Stromgeneration unter Beleuchtung. Bei der hier vorliegenden Auflösung wird das Magnetfeld im wesentlichen von den in den Kontakten gesammelten Strömen erzeugt. Am unteren Ende der Busleitung ist die Solarzelle kontaktiert und über einen Lastwiderstand mit dem Rückseitenkontakt verbunden worden. Man sieht an der geringfügigen lokalen Umkehrung der Feldrichtung (nur links), dass der zurückfließende Strom auf der Unterseite in der Nähe des punktförmigen Kontaktes kaum zum Magnetfeld beiträgt. In den restlichen Teilen der Zelle ist der Strom auf der Unterseite wegen des ganzflächigen Rückseitenkontaktes so verteilt, dass sein Magnetfeld an der Oberseite der Zelle bereits zu schwach ist, um signifikant beizutragen. Diese Ergebnisse zeigen daher, dass man in guter Näherung das an der Oberseite der Zelle gemessene Magnetfeld im wesentlichen der Stromverteilung im Emitter und den Frontkontakten zuordnen kann. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die numerische Berechnung der Stromverteilung gegeben, nämlich eine zweidimensionale Anordnung.

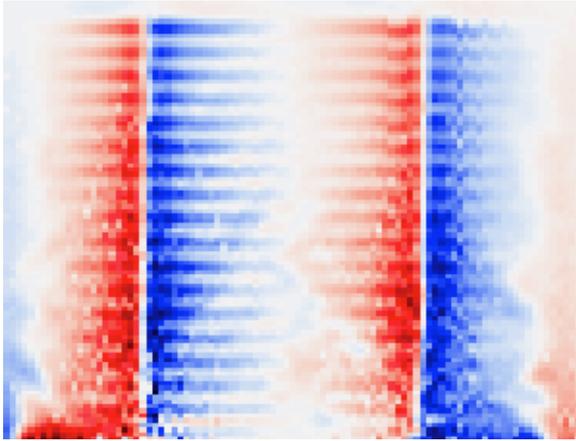


Abbildung 5

Topographische Messung der B_z -Komponente des Magnetfeldes über einer beleuchteten multikristallinen Solarzelle im Kurzschlußfall mit der früheren CASQ - Anlage.

Vergleicht man die Ergebnisse mit Messungen der früheren Anlage, so zeigen sich deutliche Fortschritt hinsichtlich des Rauschens und der Ortsauflösung (siehe Abbildung 5). Wesentliche Unterschiede zwischen mono- und multikristallinem Solarzellen werden jedoch nicht sichtbar, da das Magnetfeld weiterhin nur die Stromverteilung in den Kontakten zeigt.

2.3 Kurzschlüsse in Solarzellen

Wie schon bei früheren Messungen gefunden wurde, zeigen Solarzellen häufig Fehler durch innere Kurzschlüsse zum Rückseitenkontakt. In der integralen Kennlinie einer Solarzelle machen sich solche Kurzschlüsse in einer Verringerung des Füllfaktors und damit des Wirkungsgrades bemerkbar. Nachdem mit der Thermographie- und der CASQ - Methode erstmalig Verfahren zur Verfügung standen, mit denen man solche Kurzschlüsse lokalisieren konnte, wurde es möglich, die Ursachen dafür näher zu untersuchen. In den Abbildungen 6 sind zwei Beispiele für Kurzschlüsse gezeigt, am Rande und in der Mitte einer Solarzelle. Hierdurch wird der Strom nicht mehr vollständig am Außenkontakt gesammelt, sondern fließt über den Kurzschluss direkt zum Rückseitenkontakt. Dadurch verändert sich die Strom- und damit auch die Magnetfeldrichtung. Untersuchungen an einer größeren Zahl von Solarzellen haben gezeigt, dass diese Kurzschlüsse häufig sind und meistens am Rande der Solarzellen oder unterhalb der Kontaktfinger liegen. Bei genauerer optischer Untersuchung zeigt sich, dass an diesen Stellen die Kontakte entweder unterbrochen sind oder mechanische Beschädigungen am Rand vorliegen (Abbildung 7). Diese sogenannten Shunts entstehen wahrscheinlich bei der mechanischen Randbearbeitung zur Unterbrechung des pn-Übergangs und bei der Kontaktherstellung auf der Solarzelle im Siebdruckverfahren. Auf diese Problematik bei der Herstellung von Solarzellen ist man in der Industrie erst in den letzten Jahren aufmerksam geworden, bedingt durch die Ergebnisse mittels der Thermographie- und der CASQ - Methode.

Weitere Untersuchungen von lokaler Shunts haben gezeigt, dass es solche mit einer linearen Strom-Spannungscharakteristik gibt, und solche mit diodenähnlichen Verhalten. Bei nicht-linearem Verhalten sind die Shunts unterschiedlich wirksam, abhängig von der äußeren elektrischen Belastung der Zelle und der Beleuchtungsintensität. Mit wachsender äußerer Belastung werden dann immer mehr Kurzschlüsse aktiv. Nicht-lineare Shunts können auch erst in Sperrrichtung sichtbar werden. Diese Eigenschaften müssen beim Zusammenschalten von Zellen in Modulen beachtet werden, bei denen unterschiedlich Spannungen anliegen können.

Neben den lokalen Kurzschlüssen beobachtet man allerdings auch ausgedehnte Bereiche, in denen Strom im Inneren der Zelle verloren gehen kann. Hier ließen sich keine lokalen Schädigungen nachweisen, so dass vermutet wurde, dass es sich hierbei um schlecht sperrende Bereiche des pn - Übergang handelt, wo entweder weniger Strom generiert wird oder mehr Strom durch Rekombination verloren geht.

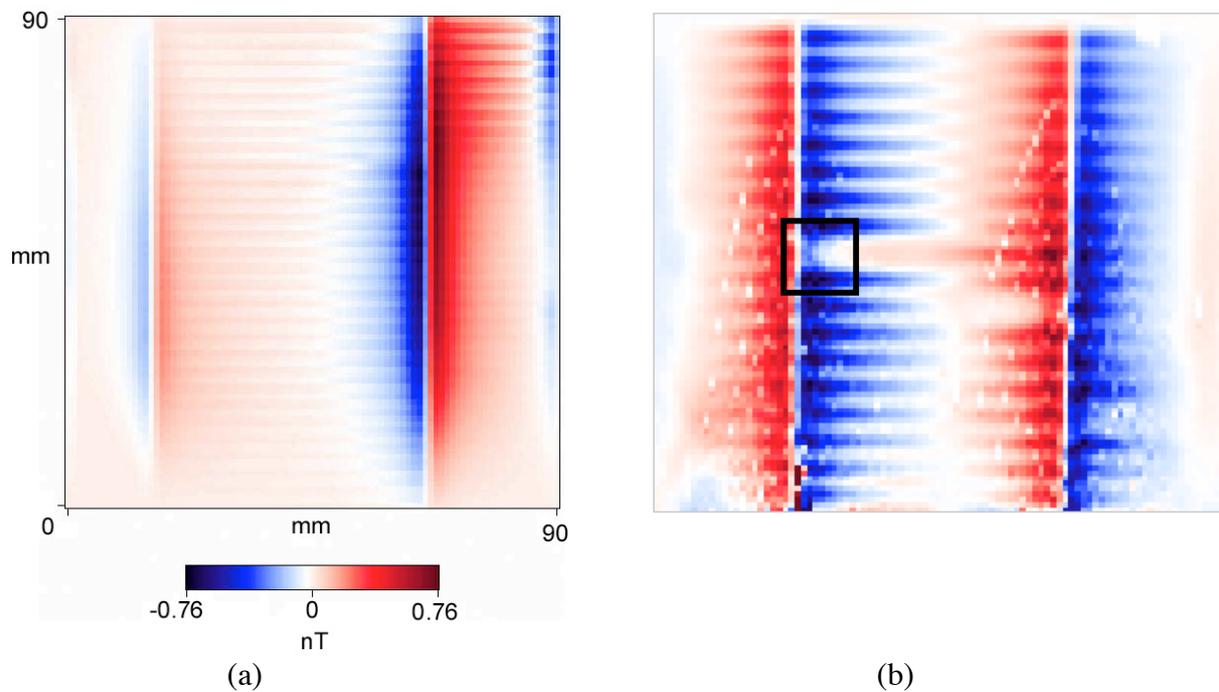


Abbildung 6 Topographische Messung der z -Komponente des Magnetfeldes über einer beleuchteten Solarzelle mit Kurzschlüssen. (a) Kurzschluss am rechten Rand (b) Kurzschluss an einem Kontakt in der Mitte der Zelle (siehe Markierung).

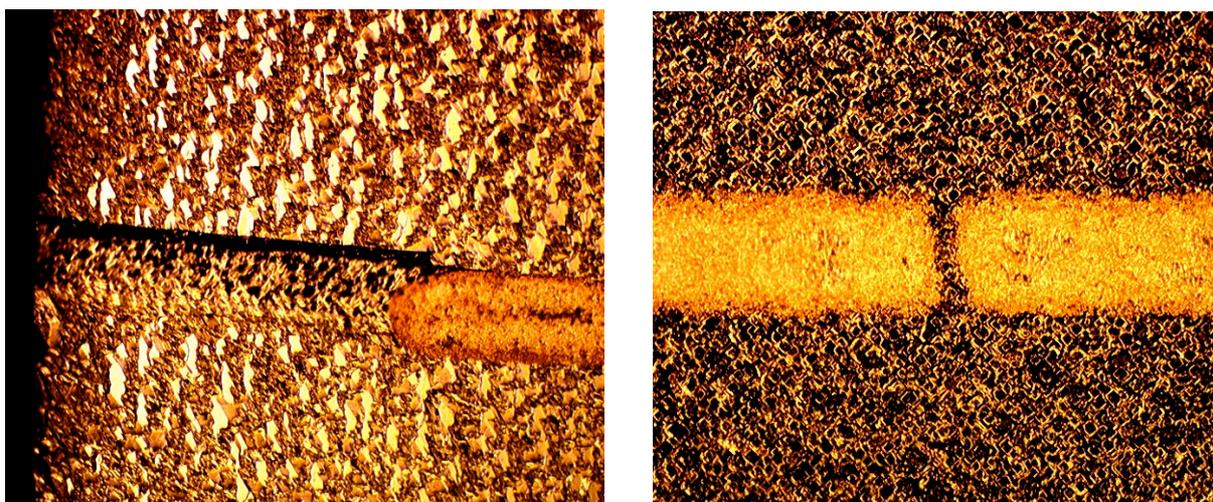


Abbildung 7 Lichtmikroskopische Bilder von beschädigten Kontakten in den Zellen in Abbildung 6. Links am Rande eine mechanische Sägespur am Ende eines Kontaktes, (b) rechts ein unterbrochener Kontakt.

Stromverluste durch Inhomogenitäten in dem pn-Übergang einer Solarzelle lassen sich mit dem bisher beschriebenen Messmodus nur schlecht untersuchen. Da das Magnetfeld im wesentlichen durch die Kontaktstruktur bestimmt ist, kann man Unregelmäßigkeiten in der Stromverteilung zwischen den Fingern kaum messen. Dazu wäre eine noch höhere Ortsauflösung notwendig, die mit dieser Messanlage nicht zu realisieren war.

Es wurde daher versucht, den pn-Übergang direkt zu untersuchen, ohne darüberliegenden Kontakte. In diesem Fall kann ein licht-generierter Strom nicht mehr abgeleitet werden, und muss innerhalb der Zelle zur Rückseite fließen. Inhomogenitäten im pn-Übergang müssten sich dann sowohl bei der Stromgeneration als auch bei der Rekombination in einer inhomogenen Stromverteilung widerspiegeln. Um diese Möglichkeit näher zu untersuchen, wurden im Auftrag verschiedene pn - Übergänge aus der Fertigungskette von Solarzellen hergestellt und vermessen, um die Ursachen für die Inhomogenitäten zu ermitteln.

2.4 Untersuchung der Stromverteilungen in pn – Übergängen

Um zunächst einen Überblick über die an pn-Übergängen auftretenden Phänomene zu bekommen, wurden diffundierte mono- und multikristalline Wafer unter homogener Beleuchtung untersucht. Abbildung 8 zeigt zwei typische Beispiele. Der monokristalline Wafer zeigt über weite Bereiche eine sehr homogenes Magnetfeld, das nur am Rande stärker ist. Dies zeigt, dass der Strom hier weitgehend gleichmäßig über die Fläche generiert wird und nur einige lokale Kurzschlüsse am Rande vorliegen. An diesen Stellen werden die mono-Wafer mechanisch markiert, so dass hier vermutlich eine mechanische Beschädigung die Ursache dafür ist. Der pn-Übergang selber ist aber weitgehend homogen in seinen Eigenschaften.

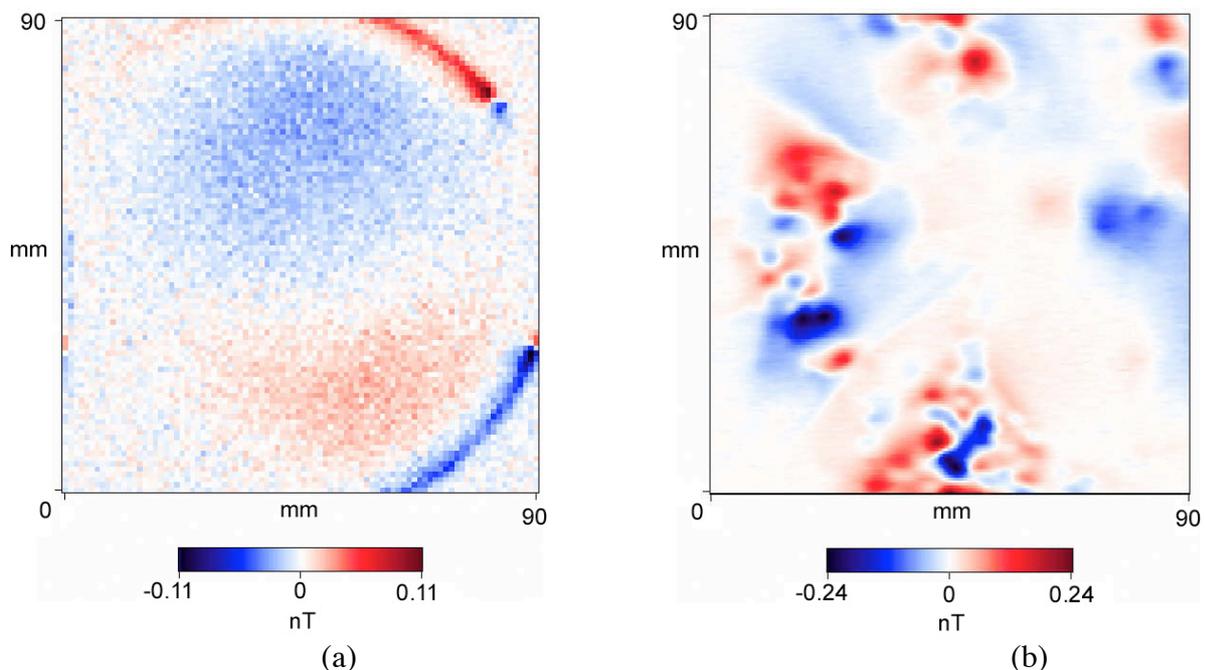


Abbildung 8 Topographische Messung der z-Komponente des Magnetfeldes über zwei beleuchteten pn – Übergängen in einem (a) monokristallinen Cz - Wafer, (b) multikristallinen Wafer. Die Scheiben sind nicht kontaktiert und werden gleichmäßig beleuchtet.

Im Gegensatz dazu zeigen die multikristallinen Wafer eine sehr inhomogene Stromverteilung. Eine direkte Interpretation der Magnetfeldtopogramme im Hinblick auf die zu Grunde liegende Stromverteilung ist aber hier nicht so ohne weiteres möglich. Aus diesem Grunde wurden die Untersuchungen in zwei Richtungen weiter betrieben. Zum einen wurden Untersuchungen an definierten, künstlich erzeugten Defektstrukturen durchgeführt. Zum anderen wurde ein numerisches Simulationsverfahren entwickelt, um die Stromverteilung zu berechnen. Dies war in diesem Fall besonders gut möglich, da das Magnetfeld hier nur von der Stromverteilung im Emitter erzeugt wird, also die Voraussetzung des zweidimensionalen Falls gegeben ist. In Abbildung 9 gibt dies eine schematische Darstellung der Stromverhältnisse in einer Solarzelle noch einmal wieder.

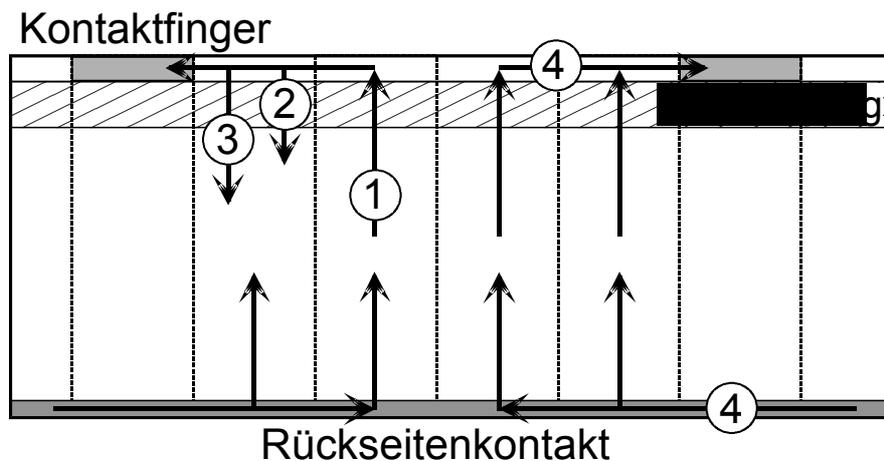


Abbildung 9 Schematische Darstellung einer Solarzelle im Querschnitt und die verschiedenen Strompfade. (1) generierter Lichtstrom, (2) Sperrstrom, (3) Kurzschlussstrom, (4) Kontaktströme.

2.5 Berechnung der Stromverteilung und numerische Simulation

In dem Projekt war ursprünglich vorgesehen, mit Hilfe des kommerziellen DESSIS Programms die Stromverteilung für die jeweiligen Solarzellentypen zu berechnen und daraus dann das resultierende Magnetfeld. Durch den Vergleich mit den Messungen sollte dann in einem iterativen Anpassungsprozess an die Messungen die zu Grunde liegende Stromverteilung ermittelt werden. Dieses Verfahren setzt voraus, dass man die Geometrie und Herstellungsparameter der jeweiligen Solarzellen kennt, was nicht immer vollständig der Fall ist.

Auf Grund der guten Qualität der funktionierenden SQUIDs und der besseren Ortsauflösung des gesamten neuen Systems konnten bei der numerischen Berechnung der Stromverteilung aus dem Magnetfeld neue Wege beschritten werden. Mit Hilfe eines schnellen numerischen Algorithmus, der von uns entwickelt wurde, ist jetzt eine direkte Berechnung der Stromverteilung möglich. Damit konnte teilweise auf die Simulationen mit Hilfe des DESSIS Programms verzichtet werden, die allerdings in einzelnen Fällen zum Vergleich herangezogen wurde.

Die theoretische Grundlage für die Berechnungen ist das Biot-Savart-Gesetz, das die Berechnung des Magnetfeldes $B(r)$ für eine beliebige Stromverteilung $j(r)$ erlaubt.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{j} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3r' \quad (1)$$

Bei einer zweidimensionalen Stromverteilung ergibt sich zum Beispiel für die B_z Komponente senkrecht zur Oberfläche

$$B_z(x, y, z_o) = \frac{\mu_0 d}{4\pi} \iint \frac{J_x(x', y')(y - y') - J_y(x', y')(x - x')}{((x - x')^2 + (y - y')^2 + z_o^2)^{3/2}} dx' dy' \quad (2)$$

Hierbei ist d die Dicke des stromführenden Emitters und z_o der Abstand zum SQUID. Die B_z Komponente hängt zwar von zwei Stromkomponenten ab, bei einer zweidimensionalen Stromanordnung sind diese beiden Komponenten jedoch durch die Kontinuitätsgleichung verbunden und nicht unabhängig voneinander. Durch eine Fouriertransformation dieser Komponentengleichungen in den reziproken Raum lassen sich die beiden transformierten Stromkomponenten durch eine einfache algebraische Operation berechnen. Es gilt für die transformierte Feldkomponente $b_z(k_x, k_y, z_o)$ durch Anwendung des Konvolutionstheorems

$$b_z(k_x, k_y, z_o) = \frac{i\mu_0 d}{2} e^{-\mu_0 z_o \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \left(\frac{k_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \tilde{j}_x(k_x, k_y) - \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \tilde{j}_y(k_x, k_y) \right) \quad (3)$$

Hierbei sind $\tilde{j}_x(k_x, k_y)$ und $\tilde{j}_y(k_x, k_y)$ die entsprechenden Fouriertransformierten der Stromdichtenkomponenten, und k_x, k_y die reziproken Wellenzahlen. Die transformierte Kontinuitätsgleichung lautet

$$0 = ik_x \tilde{j}_x(k_x, k_y) - ik_y \tilde{j}_y(k_x, k_y) \quad (4)$$

Damit lassen sich die beiden $\tilde{j}_x(k_x, k_y)$ und $\tilde{j}_y(k_x, k_y)$ aus Gleichung 3 berechnen. Durch Rücktransformation erhält man dann die Stromkomponenten j_x und j_y . Bei einer endlichen, diskreten Zahl von Messpunkten berechnen sich die reziproken Wellenzahlen aus

$$k_x = n \frac{2\pi}{L_x} \quad n = 0, \dots, N_x$$

$$k_y = n \frac{2\pi}{L_y} \quad n = 0, \dots, N_y$$

wobei L_x, L_y die Längenausdehnungen des Messfeldes sind und N_x, N_y die Zahl der Messpunkte in den beiden Richtungen.

Dieses Berechnungsverfahren ist vergleichsweise schnell und mit mittelgroßem Rechenaufwand auf einem PC möglich. Die numerische Umsetzung erfordert jedoch wegen der diskreten und endlichen Zahl von Messpunkten eine Korrektur beziehungsweise Filterung der transformierten Daten. Hierzu mussten umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt werden, um zu einer möglichst genauen Berechnung zu kommen.

Dieses numerische Verfahren setzt, wie erwähnt, eine zweidimensionale Stromverteilung voraus. An Stellen hoher Kurzschluss- und Rückseitenströme führt es daher zu ungenauen Ergebnissen, da hier diese Voraussetzung nicht gegeben ist. Um die Fehler abschätzen zu können, musste man in diesem Fall weiterhin den eingangs beschriebenen Weg mit Hilfe des DES-SIS Programms anwenden. Einige Ergebnisse für auf diese Weise berechnete Stromverteilungen sind im folgenden dargestellt.

2.6 Kurzschlüsse in pn – Übergängen von monokristallinen Wafern

Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde zuerst direkt untersucht, wie sich mechanische Zerstörungen des pn - Überganges, wie sie bei den Kontakt- und Randshunts an Solarzellen auftreten, auf die Stromverteilung auswirken. Dazu wurden oberflächennahe Kratzer mit einer feinen Nadel in einem monokristallinen Wafer mit diffundiertem pn-Übergang angebracht. Da der pn-Übergang nur etwa $0,2 - 0,4 \mu\text{m}$ unter der Oberfläche liegt und eine Dicke von maximal $0,1 \mu\text{m}$ hat, konnte man davon ausgehen, dass die Kratzer den Übergang stark schädigen. Dies wurde auch sofort in den Magnetfeldtopogrammen deutlich, die man unter Beleuchtung messen konnte (siehe Abbildung 10). Der vorher homogene Cz – Wafer (vergleiche mit Abbildung 8a) zeigt nun eine lokal sehr inhomogene Magnetfeldverteilung. Mit Hilfe der Methode der vorher beschriebenen direkten Stromberechnung ergibt sich für einen Teilbereich das in Abbildung 11 gezeigte Stromverteilungsbild. Es deckt sich unmittelbar mit den Stellen der mechanischen Schädigung und bestätigt damit noch einmal die Ausfallursache.

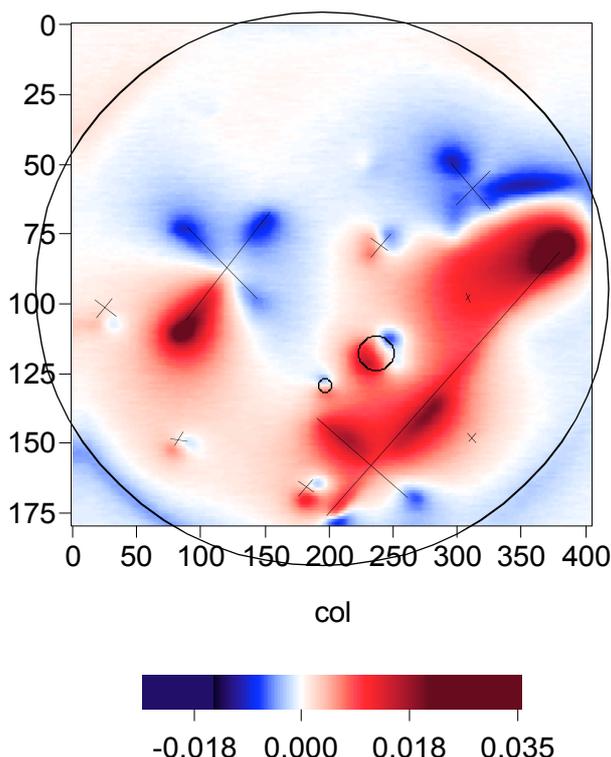


Abbildung 10

B_z – Magnetfeldtopogramm einer diffundierten monokristallinen Cz-Scheibe mit verschiedenen Kratzern. Die Geometrie der Scheibe und die Lage der Kratzer ist eingezeichnet. Die Magnetfeldmessung ist in willkürlichen Einheiten.

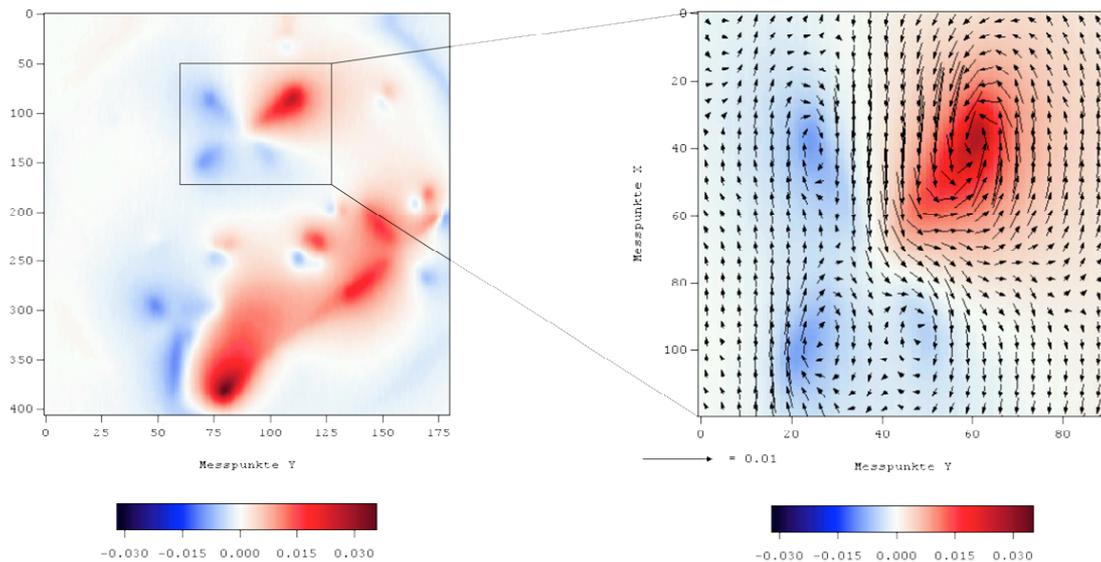


Abbildung 11 Berechnete Stromverteilung zu der Magnetfeldmessung von Abbildung 10. Im Teilausschnitt befindet sich ein kreuzförmiger Kratzer (siehe Abb. 11).

Man erkennt, dass an den Kratzern der Strom konzentriert und dort in das Innere der Zelle abgeführt wird. Es handelt sich also um einen Kurzschluss, der durch mechanische Beschädigung des pn-Übergangs erzeugt wurde. Dieses Ergebnis bestätigt, dass solche Beschädigungen, wie sie auch bei der Prozessierung von Solarzellen am Rand und unter den Kontakten auftreten können, zu Kurzschlüssen führen können. Aus berechneten Stromverteilungen lässt sich auch quantitativ abschätzen wie viel Strom durch einen Kurzschluss dem äußeren Stromkreis und damit der elektrischen Leistung der Solarzelle verloren geht.

2.7 Kurzschlüsse in pn – Übergängen von multikristallinen Wafern

Abbildung 12 zeigt das Magnetfeldtopogramm und die dazugehörige Stromverteilung eines multikristallinen Wafers mit pn-Übergang. Man erkennt zahlreiche Stellen, an denen der Strom konzentriert wird. Dabei kann man Gebiete unterscheiden, in denen mehr Strom generiert wird und andere Stelle, in denen der Strom verschwindet. Betrachtet man die polykristalline Mikrostruktur der Scheibe, so lassen sich in diesen Gebieten zunächst keine Besonderheiten wieder finden. Es gibt keine direkte Korrelation zur Korngrenzenstruktur der Scheibe. Dies ist auch an weiteren multikristallinen Wafern der Fall gewesen. Es ist zu vermuten, dass die elektrischen Eigenschaften des Materials, etwa die Lebensdauer, an diesen Stellen verändert sind. Leider konnten im Rahmen des Projektes aus zeitlichen Gründen keine weiteren Messungen mit anderen Methoden mehr angeschlossen werden, um die Ursachen für dieses Verhalten zu klären. Es ist jedoch zu vermuten, dass die hier vorliegenden Kurzschlüsse weniger lokalisiert sind, und es sich hier mehr um sogenannte großflächige Rekombinations-Shunts handelt.

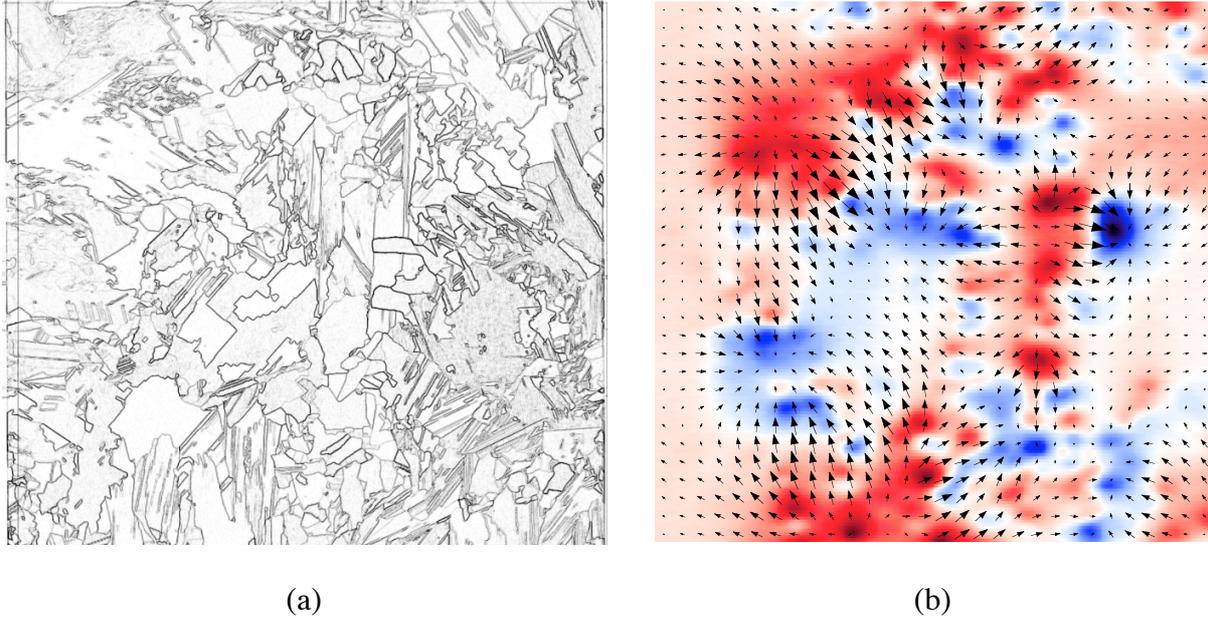


Abbildung 12 B_z - Magnetfeldtopogramm einer multikristallinen Scheibe mit diffundiertem pn-Übergang und berechnete Stromverteilung dazu. Links die polykristalline Mikrostruktur auf der Oberfläche der gleichen Scheibe.

3. Zusammenfassung

In dem Projekt wurde erfolgreich ein Messplatz zur topographischen Messung von Stromverteilungen in beleuchteten Solarzellen und Wafern mit pn-Übergängen (teilprozessierte Solarzellen) aufgebaut. Bei dem Verfahren wird das von der Stromverteilung generierte Magnetfeld orts aufgelöst gemessen. Die laterale Auflösung beträgt dabei ca. $500 \mu\text{m}$. Bei einer Beleuchtungsstärke von etwa einer Sonne (Normalbeleuchtung) liegen die Magnetfelder im Nano-Teslabereich. Diese Magnetfelder können mit dem neu entwickelten rauscharmen Hochtemperatur DC-SQUID gut gemessen werden. Weitere Verbesserungen der Anlage wurden erzielt durch eine neue Kryostatkonstruktion, eine flexiblere Abschirmung, und kürzere Messzeiten. Trotz der Fortschritte ist der Einsatz einer solchen Anlage in einem industriellen Fertigungsprozess noch nicht möglich. Die wesentlichen Probleme sind dabei eine immer noch zu lange Mess- und Auswertzeit, sowie die Instabilität und Empfindlichkeit der SQUIDs.

Die Messanlage ist jedoch geeignet, Einzelmessungen an Wafern liefern, aus denen man bestimmte Prozessschritte überwachen und beurteilen kann. Dazu zählen Kurzschlüsse am Rand und an den Kontakten, die meist durch mechanische Beschädigungen bei der Solarzellenfertigung auftreten. Weiterhin ist es möglich, die Qualität von pn-Übergängen und damit den Phosphordiffusionsschritt in der normalen Fertigung zu überprüfen und mögliche Ausfallursachen zu bestimmen. Dies ist bisher mit keinem anderen Verfahren möglich gewesen und eröffnet ein ganz neues Untersuchungsfeld.

Bei den Kontakt- und Randschädigungen sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen mono- und multikristallinen Wafern gefunden worden. Die Qualität der pn-Übergänge unterscheidet sich jedoch zwischen den beiden Materialien. Multikristalline, diffundierte Wafer

haben inhomogenere Übergänge, was wahrscheinlich mitverantwortlich für den geringeren Wirkungsgrad diese Solarzellen ist.

Ein weiterer Fortschritt wurde bei der numerischen Berechnung der Stromverteilung erzielt. Es konnte ein schnelles und relativ einfaches Verfahren entwickelt werden, das auf einem PC eingesetzt werden kann. Damit sind auch quantitative lokale Strommessungen möglich.

Als Haupteinsatzgebiet eines solchen Messsystems war ursprünglich die schnelle Detektion von Kurzschlüssen in Solarzellen gesehen worden. In der Zwischenzeit ist gezeigt worden, dass man dieses Problem auch mit der Thermographie - Methode an stromdurchflossenen Solarzellen lösen kann. Dieses Verfahren ist weniger aufwendig, und durch Verbesserungen der Messtechnik auch sehr schnell geworden. Damit macht eine industrielle Weiterentwicklung des CASQ – Verfahrens in dieser Richtung keinen Sinn mehr. Die Vorteile liegen jedoch weiterhin bei solchen Untersuchungen, die mit der Thermographie nicht möglich sind, wie die Untersuchung von pn-Übergängen. Die generelle Zielstellung muss jedoch weiterhin sein, das Verfahren weiter zu beschleunigen und die Ortsauflösung zu verbessern, um es für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben noch besser einsetzen können.

4. Nutzen des Verbundprojektes für das Institut

Die Fortschritte bei der Entwicklung des Messverfahrens wären ohne diese Verbundprojekt kaum möglich gewesen. Da wesentliche Teile der Apparatur kommerziell nicht zu erwerben sind, vor allem der Kryostat und SQUID – System, war die Zusammenarbeit mit geeigneten Partner eine wesentliche Voraussetzung. Die Zusammenarbeit mit allen Projektpartner hat darüber hinaus noch viele Anregungen ergeben, die mit in die Entwicklung eingeflossen sind. Es ist vielleicht als Erfolg zu werten, dass auch ohne eine Fortsetzung der Projektförderung die Zusammenarbeit zumindest mit einem Teil der Projektpartner (PTB Berlin) fortgesetzt wird.

5. Veröffentlichungen

5.1 Literaturverzeichnis

[1] B.J.Roth, N.G.Sepulveda, J.P.Wikswow Jr., J. Appl. Phys. **65** (1), 1989, p.361

5.2 Eigene Veröffentlichungen

[2] J. Kabs, H.J. Möller, Proc. of the 14th EPSEC, Barcelona (1997), p. 2381

[3] J. Kabs, H. J. Möller, Proc. 2nd World Conf. PVSEC, Vienna (1998) p. 82

[4] J. Kabs, H. J. Möller, phys. stat. sol. (b) 22, (2000) 337

[5] J. Koriath, H. J. Möller, Proc. of the 15th EPVSEC München (2002)

[6] J. Kabs, H. J. Möller, Freiburger Forschungshefte (2002)

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung für das Projekt durch das BMBF und die Projektbegleitung durch den VDI. Weiterer Dank gilt Herrn Dr. Schurig (PTB Berlin) und seiner Arbeitsgruppe für die Unterstützung bei der Entwicklung des SQUID – Messsystems.