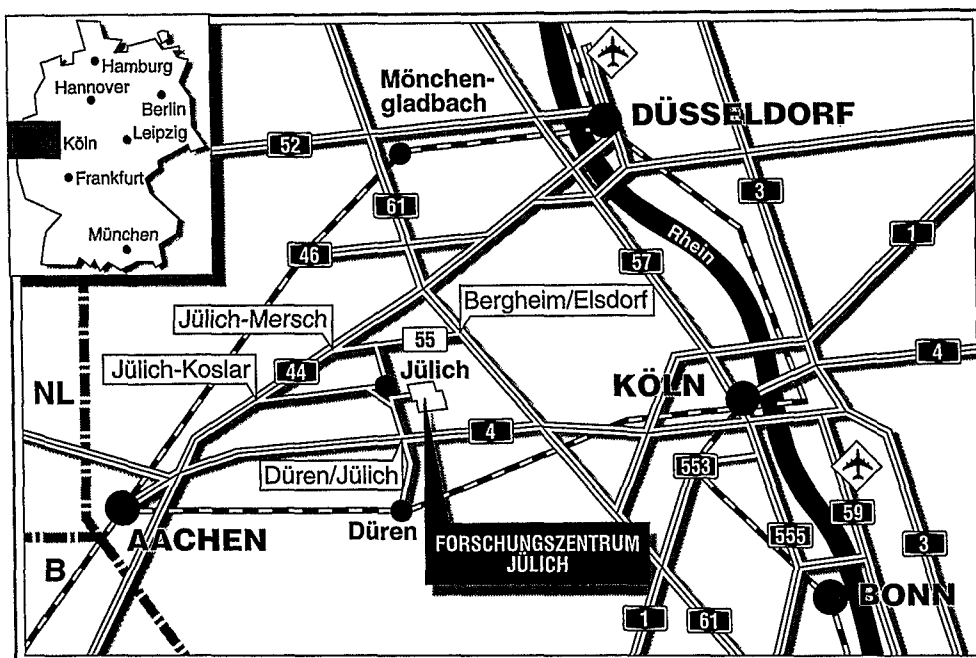


Institut für Schicht- und Ionentechnik

**Aufbau eines LBIC-(Light Beam
Induced Current) Meßplatzes für
amorphe Siliziumsolarzellen**

Thomas Kulesa



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2545

ISSN 0366-0885

Institut für Schicht- und Ionentechnik Jül-2545

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
Postfach 1913 · D-5170 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

Aufbau eines LBIC-(Light Beam Induced Current) Meßplatzes für amorphe Siliziumsolarzellen

Thomas Kulesa

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt den Aufbau eines LBIC- (Light Beam Induced Current) Meßplatzes für orts aufgelöste Empfindlichkeitsmessungen an amorphen Siliziumsolarzellen durch rasterförmige Abtastung der Probe mit einem fein gebündelten Lichtstrahl.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die verfügbaren Unterlagen im Hinblick auf mögliche Prinziplösungen für dieses Meßverfahren ausgewertet. Unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen in diesem Fall, wie relativ niedrige Rastergeschwindigkeiten, die Durchführung wellenlängenabhängiger Messungen und Probengrößen bis 100 mm x 100 mm, wurde eine Anordnung zur Verschiebung der Probe bei ortsfestem Strahl gewählt. Zur Probenpositionierung wurden zwei Linearversteller eingesetzt, die montiert auf einer Gewinderasterplatte und kombiniert mit einem Kippversteller, eine exakte Justierung der Solarzelle gewährleisten.

Für die Strahlerzeugung wurde eine 150 W Xenon-Kurzbogenlampe als Lichtquelle gewählt, deren Lichtbogen zuerst auf eine Blende und dann mittels verschiedener Linsen und Mikroskopobjektive, zur Erzielung unterschiedlicher Strahldurchmesser, auf die Probenoberfläche abgebildet wird. Um eine visuelle Kontrolle des Strahls zu ermöglichen, wird der Abtaststrahl in den Strahlengang eines monokularen Mikroskoptubus eingespiegelt. Zur freien Justierung des Meßstrahls wurde eine Halterung mit 3achsiger Verstellbarkeit konstruiert.

Um eine weitgehende Automation des Meßverfahrens zu erreichen, wird zur Steuerung und Meßdatenerfassung ein PC in Verbindung mit einem modularen Steuerungssystem und dem Einsatz der Lock-In Technik verwendet. Außerdem wurde hierzu ein Steuerprogramm in der Programmiersprache HT-Basic geschrieben.

Die ersten Messungen an einer kommerziellen amorphen Solarzelle zeigten lokale Schwankungen des Kurzschlußstroms bzw. Schwankungen bei der Ladungsträgererzeugung von bis zu 25 % auf einer Zelle, wobei die größten Stromstärkeabnahmen zu den Randbereichen der Zelle hin beobachtet werden konnten. Aber auch innerhalb einzelner Zellensektoren konnten Bereiche mit erniedrigter Intensität festgestellt werden. Außerdem variierten die gemessenen Durchschnittswerte der Ströme von Zellensektor zu Zellensektor.

Gliederung

	Seite
1. Einleitung	2
1.1 Geschichte	5
2. Physikalische Grundlagen	7
2.1 Der photovoltaische Effekt	7
2.2 Elektrische Eigenschaften	9
2.2.1 Ein Ersatzschaltbild realer Solarzellen	11
2.3 Die Ausnutzung des Lichtes	13
3. Solarzellen	16
3.1 Die verschiedenen Solarzellentypen	16
3.2 Dünnschichtzellen	16
3.2.1 Solarzellen aus amorphem Silizium	17
3.2.2 Herstellung amorpher Solarzellen	19
4. Meßverfahren zur Solarzellencharakterisierung	22
5. Das Light Beam Induced Current-Meßverfahren	23
6. Aufgabenstellung	25
7. Aufbau der Meßapparatur	27
7.1 Auswertung des Anforderungsprofils	27
7.2 Auswahl einer Lichtquelle	29
7.3 Auswahl einer Probenpositionierung	31
7.4 Optischer Aufbau	34
7.5 Konstruktion des Tubusträgers	42
8. Steuerung des Meßplatzes	44
9. Software	47
9.1 Das Steuerprogramm für den LBIC-Meßplatz	47
9.1.1 Der Eingabeeditor	48
9.1.2 Berechnung weiterer Daten	49
9.1.3 Die Erfassung der Meßwerte	49
9.1.4 Durchführung von Sektormessungen	50
9.1.5 Abspeicherung der Meßdaten	50
10. Erste Meßergebnisse	51
11. Ausblick	54
12. Referenzen	56
13. Anhang	58

1. Einleitung /1,2,3,4/

Die zunehmende Verknappung der fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle, eine zunehmend stärker belastete Umwelt und die immer noch problematische, risikoreiche und umstrittene Nutzung der Kernenergie haben in den letzten Jahren verstärkt zur Erforschung der Nutzungsmöglichkeiten für umweltfreundliche regenerative Energiequellen geführt. Ebenso macht der gefürchtete Treibhauseffekt die Einführung und Nutzung neuer, umweltschonender Energiesysteme um so dringlicher. Das Angebot an regenerativer Primärenergie, daß heißt in erster Linie die eingestrahlte Sonnenenergie, die auf der Erde zur Verfügung steht, ist so groß, daß ein Bruchteil zur Deckung des globalen Energieverbrauchs ausreichen würde.

Weitere regenerative Primärenergiequellen sind die geothermische Energie, die durch Isotopenzerfall im Erdinnern entsteht und die aus der Planetenbewegung resultierende Gezeitenenergie.

Die direkten Nutzungsmöglichkeiten für Solarenergie liegen in der photovoltaischen Umwandlung der Sonnenstrahlung in elektrischen Strom durch Solarzellen und der solarthermischen Wandlung der Sonnenstrahlung in Wärme.

Indirekt kann solare Energie aus der Nutzung von Wind- und Wasserkraft, sowie aus der Biomasseproduktion gewonnen werden.

Zur photovoltaischen Umsetzung des Sonnenlichtes kommen in erster Linie Solarzellen aus kristallinem, polykristallinem und amorphem Silizium, sowie verschiedene andere Dünnschichtzellen zum Einsatz. Um die photovoltaische Energiegewinnung zu einer echten Alternative zur Ausbeutung der fossilen Brennstoffe zu machen, ist man bestrebt, den Wirkungsgrad der Zellen und Module zu erhöhen und ihren Preis zu senken.

Gerade im Hinblick auf die forcierte Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der photovoltaischen Stromerzeugung kommt den Analyse- und Testverfahren sowie deren Verfeinerung und Weiterentwicklung eine zunehmende Bedeutung zu. Denn nur durch eine genaue Bestimmung der Zellenparameter und ihrer Güte sind gezielte Eingriffe im Herstellungsprozeß zu ihrer weiteren Verbesserung möglich. Eine Methode, die einen Beitrag zur Charakterisierung der Solarzelleneigenschaften leisten soll, ist das in dieser Arbeit beschriebene LBIC- (Light Beam Induced Current) Meßverfahren.

Die von der Sonne abgegebene elektromagnetische Strahlung überdeckt den gesamten Frequenzbereich eines nahezu schwarzen Strahlers bei einer Temperatur T_s von etwa 5800 K. Hiervon erreicht entsprechend der Entfernung Sonne - Erde nur ein geringer Teil die Atmosphäre der Erde, jedoch nur ein bestimmter ausgeblendeter Teil die Erdoberfläche, da die Atmosphäre für den größten Teil der Strahlung undurchlässig ist.

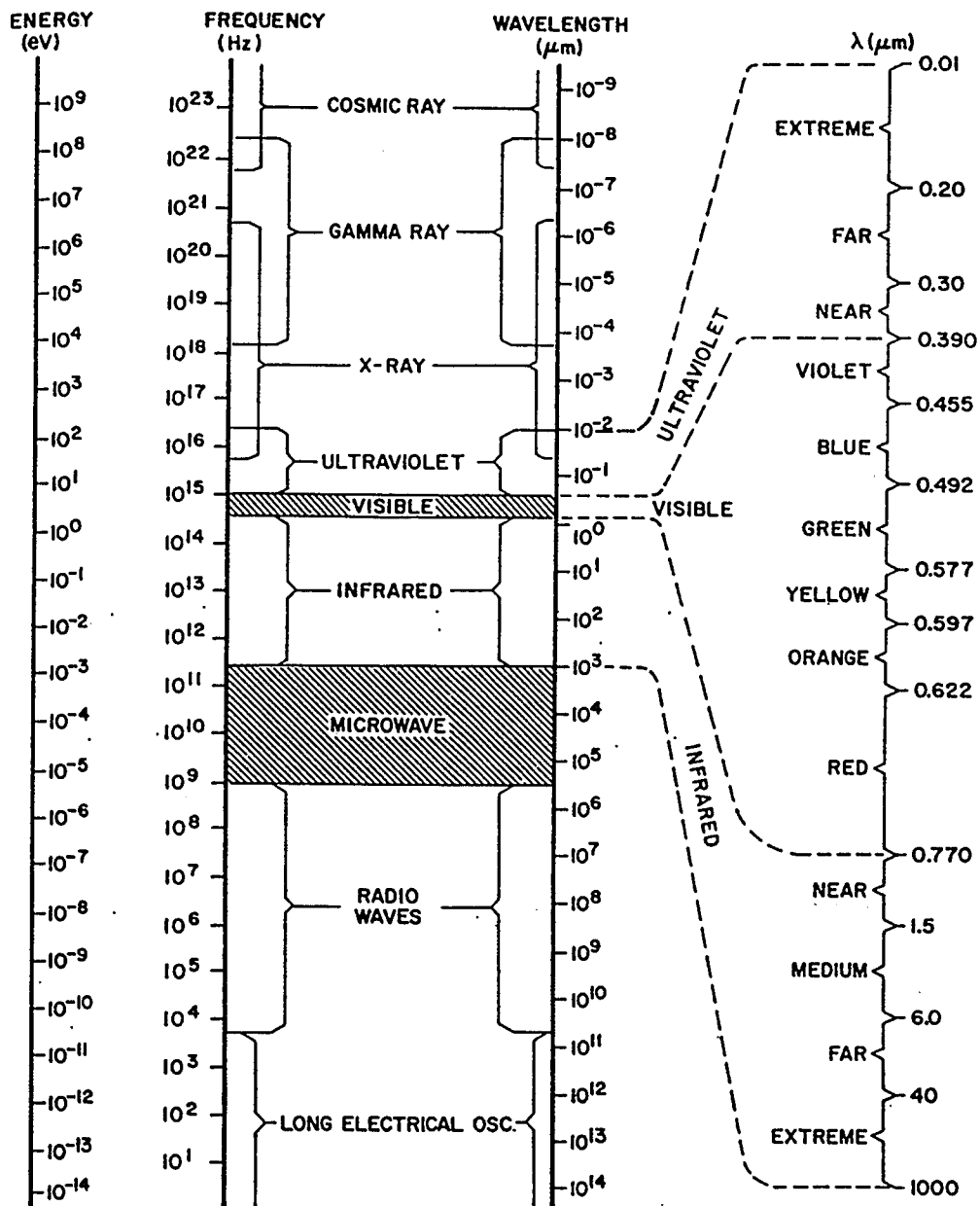


Abb. 1.1 Darstellung des elektromagnetischen Spektrums

Die Atmosphäre der Erde weist zwei "Strahlungsfenster" auf, eins im optischen- (sichtbaren-) Bereich und eins im Radiowellenbereich.

Für die energetische Nutzung ist jedoch nur das erste Fenster aufgrund der wesentlich größeren Energiedichte der Strahlung, im Vergleich zum zweiten Fenster, von Bedeutung.

Die Strahlungsintensität im Weltraum in einer Entfernung von der Sonne, die dem durchschnittlichen Abstand zwischen Erde und Sonne entspricht, beträgt:

$$I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$$

Dieser Wert wird als Solarkonstante bezeichnet.

Die Solarkonstante gibt die Strahlungsleistung senkrecht auf eine Einheitsfläche im erdnahen Weltraum an.

Durch Absorptions- und Deflektionsvorgänge (Rayleigh-Streuung an den Molekülen, Mie-Streuung am Aerosol) in der Atmosphäre erfolgt eine weitere Abnahme der Energiedichte bis zum Erreichen der Erdoberfläche.

Die auf die Erde eingestrahlte Energie fällt zu 90 % im Spektralbereich zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $1,5 \mu\text{m}$ an.

Die mittlere extraterrestrische Bestrahlungsstärke ergibt sich unter Berücksichtigung von Tageszeit, Jahreszeit und Erdoberfläche zu:

$$I_{0\text{eff}} = 349 \text{ W/m}^2$$

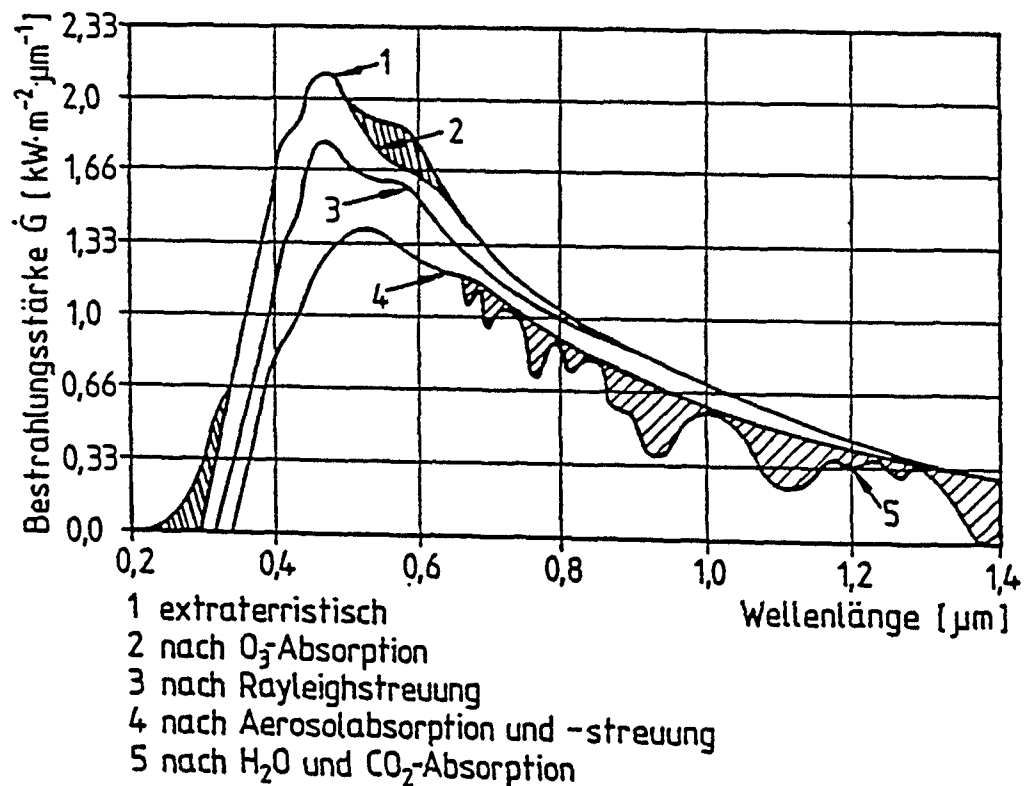


Abb. 1.2 Spektrale Verteilung der direkten Sonnenstrahlung

Betrachtet man den derzeitigen jährlichen globalen Energiebedarf und setzt man voraus, daß man einen großen Teil der auf die Erde einfallenden Sonnenenergie nutzbar machen könnte, so wäre die Energieversorgung, ohne die fortschreitende Ausbeutung der fossilen Energieträger, auf lange Zeit gesichert.

Argumente für die Nutzung der Sonnenenergie sind:

- Sonnenenergie ist fast überall auf der Erde unbegrenzt verfügbar
- Sonnenenergie macht unabhängig von politischen und wirtschaftlichen Krisen
- Sonnenenergie ist umweltfreundlich
- Sonnenenergienutzung spart wertvolle Rohstoffe

Die Schwierigkeiten bei der Nutzung der Sonnenenergie liegen in der Abhängigkeit des Nutzungsgrades von der geographischen Lage, vom Klima, der Luftverschmutzung und der Jahreszeit. Hinzu kommt, daß die Hauptnutzungsmöglichkeiten für Solarenergie sich oftmals in Gebieten mit niedrigem Energiebedarf (z. B. Äquatorialbereiche) ergeben. In den gemäßigten Zonen ist eine effiziente Nutzung fast nur in den Sommermonaten möglich.

Außerdem sind bei der Sonnenenergienutzung der große Flächenbedarf und die Kosten für Module bzw. Anlagen, die gerade bei dezentraler Anwendung sehr hoch sind, zu berücksichtigen.

Diese Faktoren führen dazu, daß Sonnenenergie immer noch teurer ist, als die Verwendung fossiler Brennstoffe, wenn man die Langzeitwirkungen, z. B. die Belastung der Atmosphäre, vernachlässigt.

Das Ziel der zur Zeit laufenden Forschungen und Entwicklungen auf diesem Gebiet ist in erster Linie die Verbesserung der Energiewandlungstechniken, daß heißt, eine Erhöhung der Wirkungsgrade und eine Kostenreduzierung, um die Anwendung regenerativer Energiequellen zu einer echten Alternative gegenüber fossilen Brennstoffen werden zu lassen.

1.1 Geschichte

Solarzellen sind Halbleiterbauelemente, die Lichtenergie in elektrische Energie, die begehrteste und hochwertigste Energieform, auf elegantestem Wege umwandeln.

Die Messung der Abnahme des elektrischen Widerstandes als Folge einer Anregung der im Kristall gebundenen Ladungsträger bei Belichtung, auch als innerer Photoeffekt bezeichnet, wurde erstmals am Selen von Smith im Jahre 1873 beobachtet und von W. v. Siemens im Jahre 1875 in einem Selenphotometer als erstem objektivem Lichtmessgerät ausgenutzt.

Bis zur Entwicklung der Siliziumtechnologie war jedoch wegen der geringen Umwandlungswirkungsgrade an eine technische Nutzung zur Energiegewinnung nicht zu denken. 1954 wurde aber dann die erste Siliziumsolarzelle mit einem Wirkungsgrad größer 5 % vorgestellt. Schnell eroberte diese Form der Energiebereitstellung den Weltraum, aber für terrestrische Anwendungen wurde diese Technologie wegen der hohen Kosten, die mit der hochreinen Siliziumherstellung verbunden waren, nicht rentabel.

Erst 1973 mit der Energieversorgungskrise wurden neue Anstöße für den Einsatz von Solarzellen zur Energiegewinnung gegeben. Seit dieser Zeit kann ein stetig steigender Marktanteil bei der Energieversorgung durch die Photovoltaik festgestellt werden.

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Der photovoltaische Effekt

Als inneren Photoeffekt bezeichnet man die Anregung von Elektronen durch elektromagnetische Strahlung, die das Material nicht verlassen, sondern in ihm freie Elektronen bilden. Dieser Effekt tritt vor allen Dingen in Halbleitern auf, deren Hauptcharakteristikum die besondere Energielücke ist, um die herum sich die entscheidenden Vorgänge eines lichtempfindlichen Bauelementes abspielen.

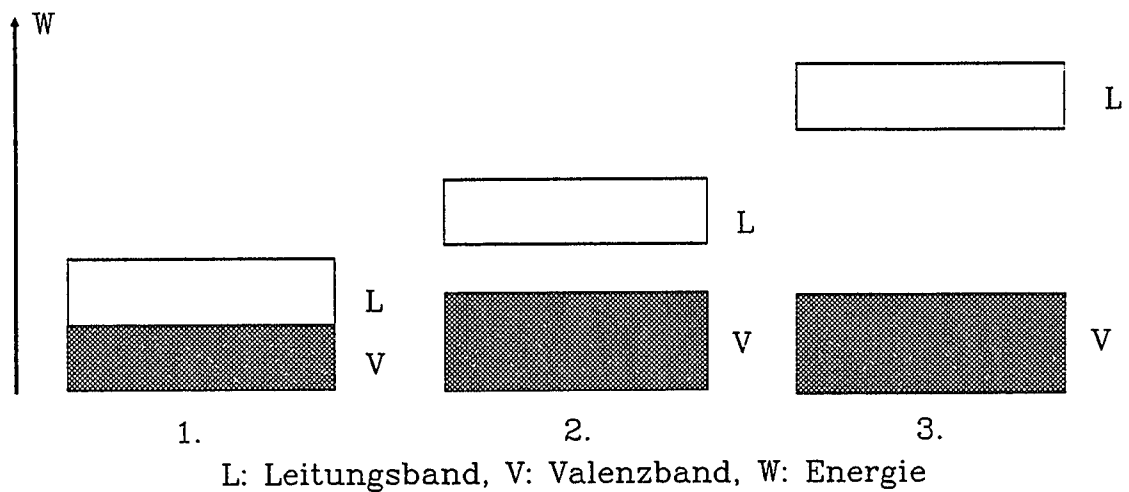


Abb. 2.1 Festkörper-Bändermodelle für 1. Metalle,
2. Halbleiter, 3 Isolatoren /12/

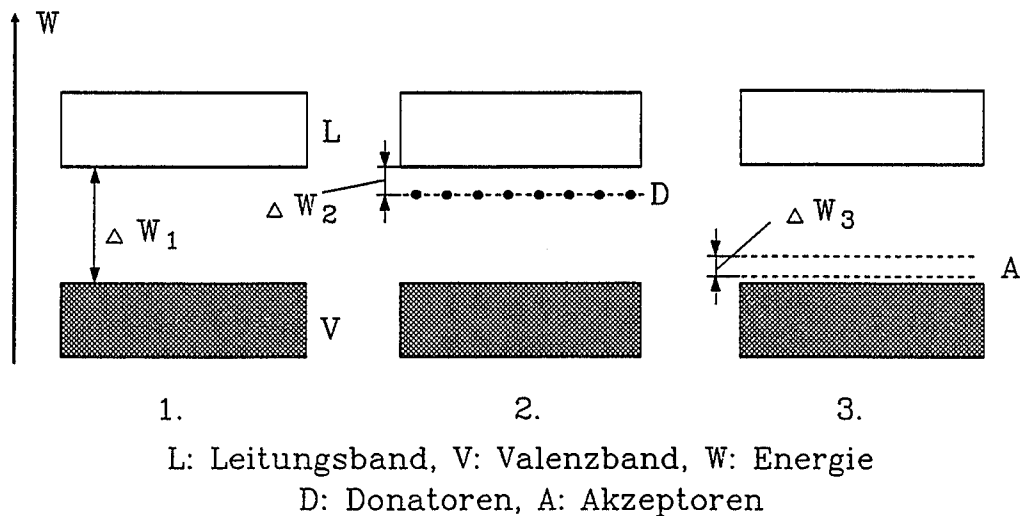


Abb. 2.2 Bändermodelle für 1. den reinen Halbleiterkristall,
2. den mit Donatoren dotierten Kristall,
3. den mit Akzeptoren dotierten Kristall /12/

In Festkörpern werden die in Atomen und Molekülen vorhandenen Energieniveaus zu Energiebändern verbreitert. Kovalent (Elektronenpaarbindung) gebundene Festkörper, wie Silizium oder Germanium (typische Halbleiter), sind durch eine Energielücke im Energieschema für Ladungsträger gekennzeichnet, einem Bereich verbotener Zustände, der Valenzband und Leitungsband trennt.

Diese Energielücke macht einen Energiebetrag ihrer Größe für die Überführung von Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband erforderlich.

Die Energielücke eines Halbleiters ist materialabhängig und beträgt für Silizium 1,1 eV zwischen dem vollen Band, das die Valenzelektronen enthält und dem nächsthöheren leeren Band.

Wird ein Elektron im Valenzband eines Halbleiters angeregt, so besetzt es einen Zustand im Leitungsband und hinterläßt damit einen unbesetzten Zustand im Valenzband, der auch als Loch bezeichnet wird. Diesen Effekt kann man ausnutzen, wenn man den Halbleiter in ein elektrisches Feld bringt oder in ihm ein elektrisches Feld aufbaut, so daß es zu einer Trennung der Ladungsträger kommt. Die Realisierung einer solchen elektrischen Feldzone kann durch einen sogenannten pn-Übergang erreicht werden. Hierbei stößt eine p-Schicht, eine mit dreiwertigen Elementen dotierte Siliziumschicht, an eine n-Schicht, die durch die Dotierung des Siliziums mit fünfwertigen Elementen entsteht.

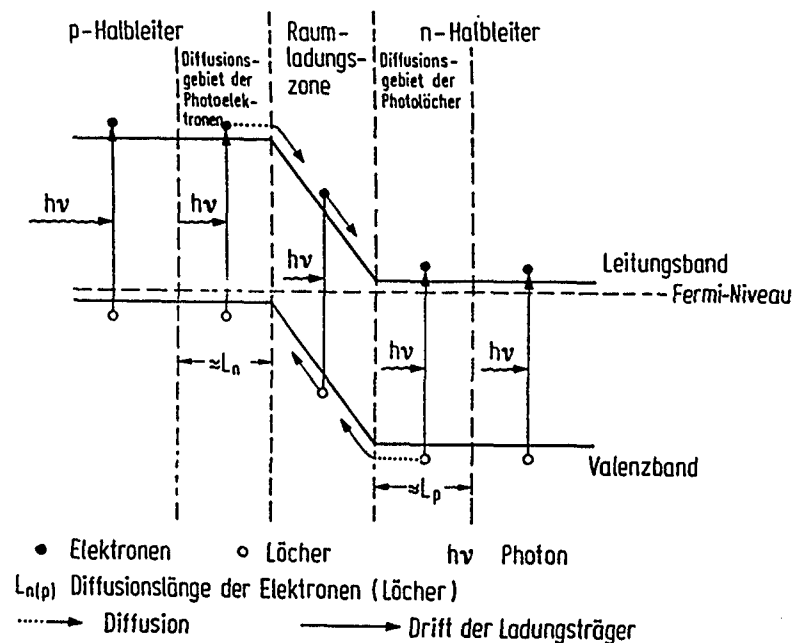


Abb. 2.3 Sperrschicht-Photoeffekt in einer pn-Diode im Kurzschlußfall /4/

Für eine Sammlung kommen die in der Raumladungszone durch Lichteinfall generierten Ladungsträger und die innerhalb eines Gebiets von der Größenordnung der Diffusionslänge von Elektronen und Löchern vom pn-Übergang an generierten Ladungsträger in Betracht.

Durch eine Kontaktierung der beiden Schichten (p- und n- Schicht) und einem fortgesetzten Lichteinfall, d. h. einer ständigen Erzeugung von Ladungsträgern, kann ein Stromfluß durch einen angeschlossenen Verbraucher erreicht werden.

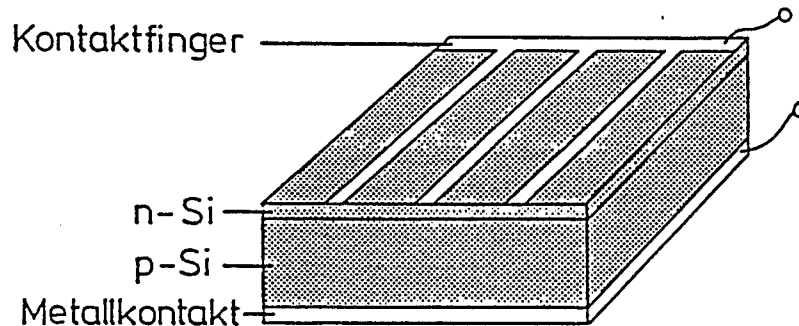


Abb. 2.4 Aufbau einer pn-Solarzelle /5/

Die Größe des fließenden Stroms ist unter anderem sehr stark von der Lebensdauer der Ladungsträger und damit von der Reinheit des Halbleitermaterials abhängig, weil durch Verunreinigungen bzw. Defekte rekombinierte Ladungsträger nicht zu einem Stromfluß beitragen können.

2.2 Elektrische Eigenschaften

Solarzellen sind vom Prinzip her großflächige lichtempfindliche Dioden und haben eine entsprechende nichtlineare Dunkelkennlinie.

Die Dunkelkennlinie einer idealen Diode wird durch die Gleichung

$$I_D = I_S (e^{(qU/kT)} - 1) \quad /5/$$

beschrieben, wobei I_S der "Sperrstrom", der bei höherer Spannung in Rückwärtsrichtung fließende Reststrom ist. Bei Beleuchtung wird zusätzlich der "Photostrom" erzeugt, und man erhält im idealen Fall die entsprechende Kennlinie (Hellkurve) durch Addition dieses in Sperrrichtung fließenden Stroms in jedem Punkt der Dunkelkennlinie.

$$I_{\text{ges}} = I_D - I_{\text{ph}}$$

Die Hellkennlinie kann grob durch die folgenden Werte gekennzeichnet werden:

- die Leerlaufspannung U_0 oder U_{OC} (Open Circuit Voltage) bei Bestrahlung der Zelle ohne Belastung, d. h. der Widerstand im Stromkreis geht gegen ∞

- den Kurzschlußstrom I_K oder I_{SC} (Short Circuit Current),
d. h. der Widerstand im Stromkreis geht gegen Null,

sowie den Punkt maximaler Leistung, an dem das Produkt aus I und U maximal wird (maximale Leistung der Zelle bei angepaßtem Verbraucher).

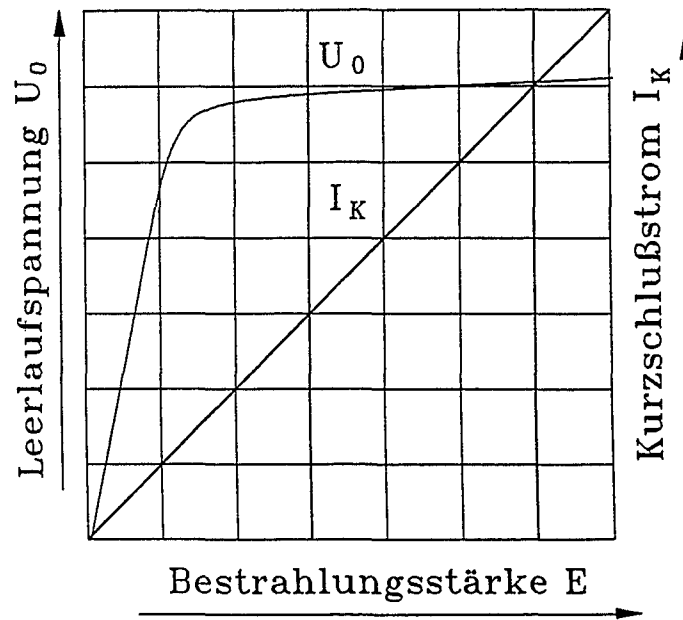


Abb. 2.5 Solarzellenkennlinien

Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom weisen unterschiedliche Abhängigkeiten von der Bestrahlungsstärke auf. Der Kurzschlußstrom I_K nimmt linear mit der Strahlungsintensität zu, hingegen folgt die Leerlaufspannung U_0 etwa einer logarithmischen Funktion.

$$I_K \sim E$$

$$U_0 = E_g/q - kT/q \cdot \ln(I_{S0}/I_K)$$

Die Leerlaufspannung und der Kurzschlußstrom hängen neben dem Bandabstand und der Temperatur auch noch von Eigenschaften des Halbleitermaterials und den Verlustmechanismen der Zelle ab.

Für die maximale Leistung der Solarzelle gilt:

Je kleiner der Krümmungsradius der Kennlinie ist, desto größer ist die Leistung der Solarzelle.

Aufgrund von Materialeigenschaften nimmt der Innenwiderstand der Solarzelle bei höherer Bestrahlung ab.

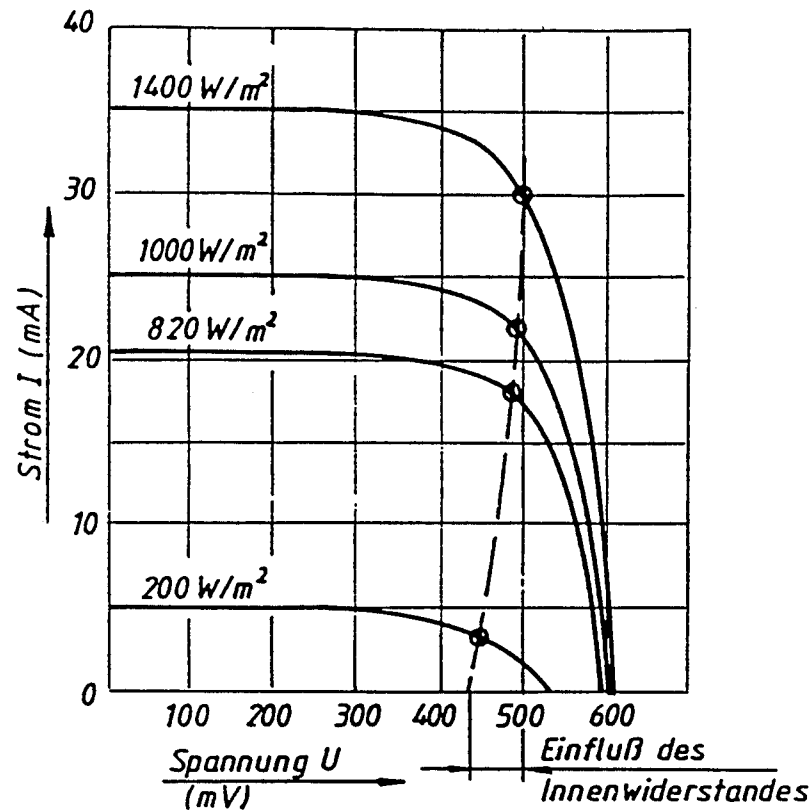


Abb. 2.6 U-I Kennlinie einer Solarzelle mit ca. 1 cm^2 Fläche
(o) Maximale Leistungspunkte für verschiedene Bestrahlungsstärken

Eine Kurzcharakterisierung der "Güte" einer Solarzelle gibt der Füllfaktor F, der wie folgt definiert ist:

$$F = (U_{\max} \cdot I_{\max}) / (U_0 \cdot I_K)$$

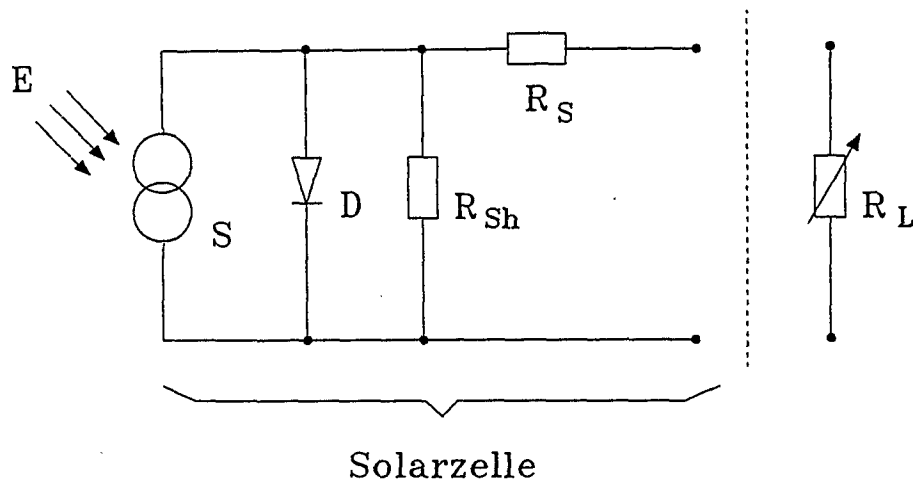
$U_{\max}$, $I_{\max}$ Werte für Strom und Spannung am max. Betriebspunkt

2.2.1 Ein Ersatzschaltbild realer Solarzellen

Ohne Bestrahlung stellt die Solarzelle eine normale Halbleiterdiode dar, deren Wirkung auch bei Lichteinfall erhalten bleibt, daher ist im Ersatzschaltbild parallel zur Stromquelle eine Diode geschaltet.

Zur Beschreibung des Wechselstromverhaltens der Solarzelle müßte in das Ersatzschaltbild noch eine variable Kapazität eingezeichnet werden.

Reale Solarzellen lassen sich wie im folgenden Ersatzschaltbild gezeigt darstellen:



E Strahlungsquelle
S Konstantstromgenerator
D Diodenverhalten in der Grenzschicht

R_s Serienwiderstand
 R_L einstellbarer Lastwiderstand
 R_{sh} Shuntwiderstand

Abb. 2.7 Ersatzschaltbild realer Solarzellen

Serien- und Shuntwiderstände haben einen erheblichen Einfluß auf den Wirkungsgrad der Zelle.

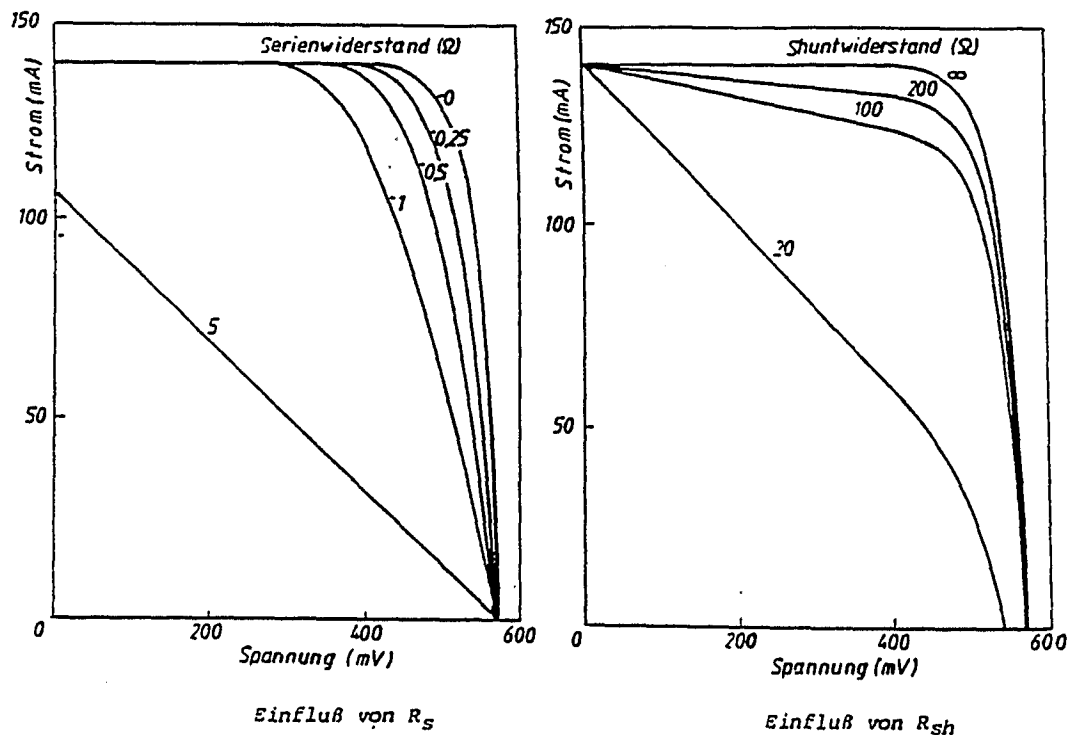


Abb. 2.8 Einfluß von Serien- und Shuntwiderstand

Shuntwiderstände sind elektrisch leitende Bereiche zwischen den beiden Kontaktflächen der Solarzelle. Sie stellen einen unerwünschten internen Verbraucher dar und vernichten einen Teil der in der Zelle erzeugten Leistung in Form von Wärme. Gute einkristalline Zellen zeigen praktisch keine Shunts, aber bei polykristallinen Zellen oder Dünnschichtzellen können Shunts, hervorgerufen durch Materialdefekte (z. B. Durchbrüche) in den Schichten, eine wesentliche Rolle spielen. Shunts sind in der Dunkelkurve durch eine von Null verschiedene Steigung bei $U = 0$ zu erkennen.

Der Serienwiderstand R_S setzt sich aus dem Innenwiderstand der Solarzelle, Kontakten und den Zuleitungswiderständen zusammen. Der Innenwiderstand entsteht hauptsächlich in der Diffusionsschicht bzw. durch unzureichende Dotierung der Bahnbereiche, d. h. des Grundmaterials der Dioden außerhalb der Verarmungsrandschichten. Insbesondere bei Dünnschichtzellen kann der Serienwiderstand bei Belichtung reduziert werden, weil durch die Photoleitung nicht ausreichend dotierte Teilschichten niederohmiger werden /5/.

2.3 Die Ausnutzung des Lichtes

Eine weitere charakteristische Größe für die "Güte" der Solarzelle ist neben dem Füllfaktor F der Wirkungsgrad η , der ein Maß für die Ausnutzung des einfallenden Sonnenlichtes durch die Solarzelle ist.

Der Wirkungsgrad ist definiert als

$$\eta = I_{\max} \cdot U_{\max} / E \cdot A$$

mit A Fläche der Solarzelle
 E Bestrahlungsstärke

Setzt man die Gleichung für den Füllfaktor ein, ergibt sich

$$\eta = F \cdot U_0 \cdot I_K / E \cdot A$$

Setzt man jetzt noch die Gleichungen für I_K und U_0 entsprechend dem Ersatzschaltbild für ideale Dioden ein, erhält man für den Wirkungsgrad η

$$\eta = F \cdot (M/A) \cdot [E_g/q - kT/q \cdot \ln(I_{S0}/I_K)]$$

Hiernach zeigt der Wirkungsgrad η , ebenso wie die Leerlaufspannung U_0 , eine logarithmische Abhängigkeit. Bis zu einer gewissen Schwelle steigt der Wirkungsgrad sehr stark, dann jedoch nur noch sehr langsam. Die Gleichung zeigt ebenfalls, daß der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperatur sinkt.

Für die praktische Anwendung wird in unseren Breiten zur Bestimmung des Wirkungsgrades η mit einer Bestrahlungsstärke entsprechend AM (Air Mass) 1,5 = 844 W/m² gearbeitet. Dies entspricht der Sonneneinstrahlung auf dem Erdboden bei einem Sonnenstand von 45° über dem Horizont.

Die entsprechende Rolle für die Ausnutzung der einfallenden Sonnenstrahlung spielt die Energielücke des Halbleiters. Ein Halbleiter mit einer Energielücke E_g kann alle Lichtquanten mit $h\nu \geq E_g$ absorbieren. Demnach können Halbleiter mit kleinem Bandabstand den überwiegenden Teil des Spektralbereichs der Solarstrahlung absorbieren und dadurch einen großen Photostrom liefern. Dieser nimmt mit zunehmendem Bandabstand ab, da ein immer kleiner werdender Teil des Sonnenspektrums absorbiert wird. Werden Lichtquanten mit einer Energie $> E_g$ absorbiert, so wird der Überschußbetrag, den die Elektronen bei der Anregung über die Energielücke hinaus erhalten, als Wärme an das Kristallgitter abgegeben.

Obwohl, wie bereits erwähnt, ein kleiner Bandabstand zu einer großen Absorption der Strahlung führt, ist hiermit nicht automatisch ein hoher Wirkungsgrad der Solarzelle verbunden. Dies rührt daher, daß die Potentialbarriere des pn-Übergangs nicht größer sein kann als die Energielücke des Halbleiters, was dazu führt, daß eine kleinere Energielücke auch eine kleinere Leerlaufspannung zur Folge hat. Hieraus folgt, daß sowohl Zellen mit kleiner Energielücke als auch Zellen mit sehr großer Energielücke keinen großen Wirkungsgrad aufweisen können /5/.

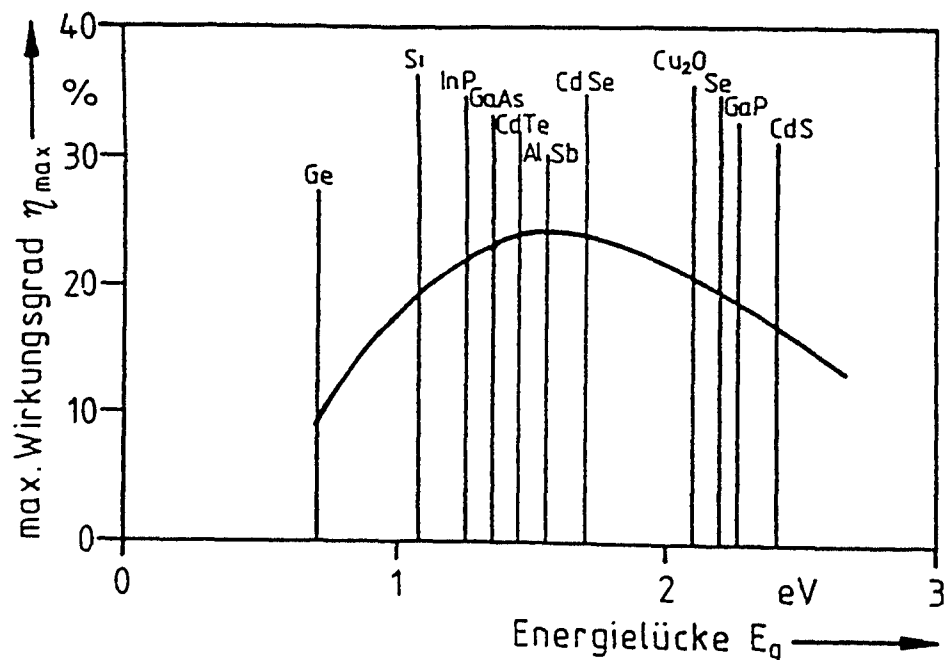


Abb. 2.9 Theoretische Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen

Unter dem oben genannten Aspekt lassen sich die theoretischen maximalen Wirkungsgrade für verschiedene Materialien berechnen und es zeigt sich, daß das Wirkungsgradmaximum einer Energielücke von etwa 1,5 eV entspricht.

Die Lichtabsorption wird für Photonenenergien oberhalb der Bandlücke von der Größe des Absorptionskoeffizienten des jeweiligen Halbleitermaterials mitbestimmt. Hier gilt, daß für "indirekte" Halbleiter wie kristallines Silizium der Absorptionskoeffizient nur langsam mit der Quantenenergie ansteigt. Das bedeutet, daß ein großer Teil des Sonnenlichtes erst nach weiten Lichtwegen absorbiert wird, bei kristallinem Silizium erst nach 100 μm bis 200 μm . Da die Ausdehnung der Feldzone des pn-Übergangs aber weniger als 1 μm beträgt, können bei den zum Teil langen Diffusionswegen der Ladungsträger durch Gitterstörungen und Verunreinigungen Rekombinationen auftreten, so daß diese Ladungsträger nicht mehr zum Photostrom beitragen. Im Gegensatz dazu steigt bei "direkten" Halbleitern, z. B. GaAs oder amorphem Silizium (a-Si), der Absorptionskoeffizient sehr schnell an, so daß das Licht praktisch vollständig in einer Schichtdicke von etwa 1 μm absorbiert werden kann /5/.

Zusammenfassend kann man die Verlustmechanismen hier am Beispiel einer Silizium-solarzelle darstellen:

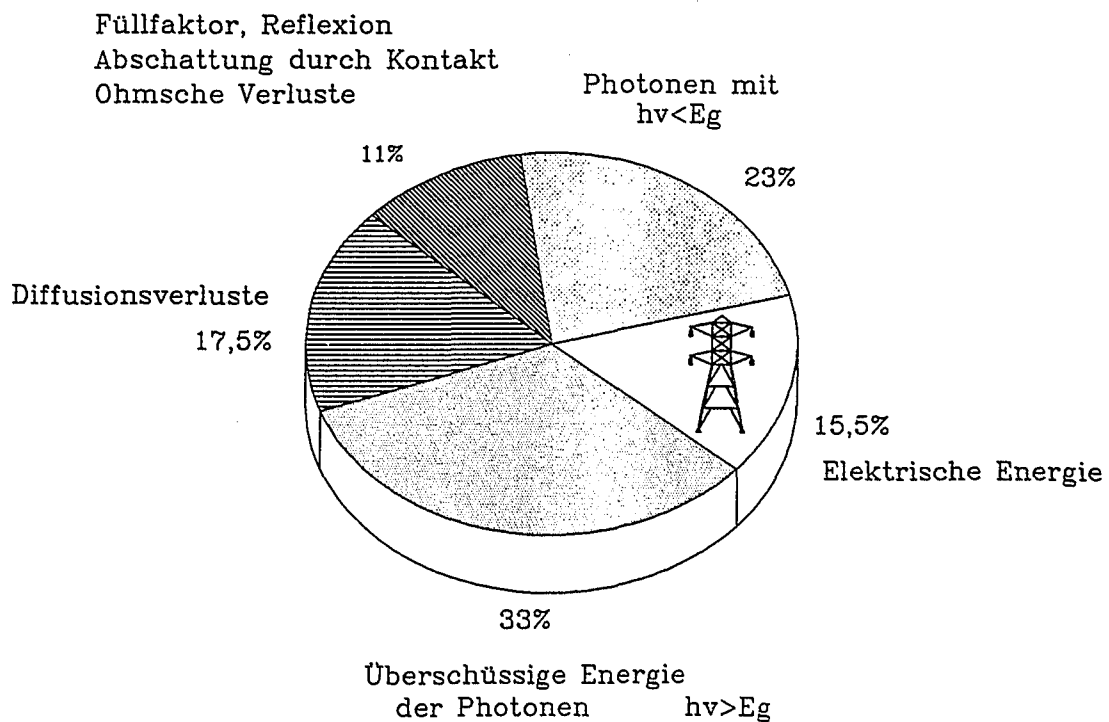


Abb. 2.10 Verlustmechanismen einer Solarzelle

3. Solarzellen

3.1 Die verschiedenen Solarzellentypen

Die älteste und auch am weitesten entwickelte Solarzelle ist die einkristalline Silizium-solarzelle. Das Ausgangsmaterial für diese Zellen wird im allgemeinen nach dem traditionellen Tiegelziehverfahren nach Czochralski hergestellt.

Hierzu wird ein Keimkristall, der sogenannte Impfling, in gewünschter Orientierung an einer Zugspindel befestigt und in die Schmelze aus gereinigtem Halbleitermaterial, das mit einer genau bemessenen Menge des Dotanten versehen ist, eingetaucht und angeschmolzen. Bei entgegengesetzter Bewegung von Zugspindel und Tiegel wird der wachsende Kristall langsam aus der Schmelze gezogen. Die entstehenden Einkristalle haben z. T. Durchmesser > 100 mm und werden zur weiteren Bearbeitung in dünne Scheiben gesägt, deren Oberflächen noch weiter bearbeitet werden. Danach erfolgt die Erzeugung der pn-Sperrschicht durch Diffusions- oder Epitaxieverfahren. Der abschließende Fertigungsschritt ist das Aufbringen der Stromabnahmegitter und der Rückseitenmetallisierung durch Aufdampfen. Da Silizium eine Reflexionszahl von 30 % hat, wird üblicherweise eine Antireflexionsschicht (TiO_2) aufgebracht.

Die Nachteile bei der Herstellung von kristallinen Siliziumsolarzellen sind hohe Herstellungskosten, da sehr reines Ausgangsmaterial gefordert ist, die große erforderliche Schichtdicke aufgrund des Absorptionskoeffizienten und der damit verbundene hohe Materialverbrauch. Dafür lassen sich hohe Wirkungsgrade, die bei einkristallinen Laborzellen zur Zeit bei 23,2 % /6/ liegen, erreichen.

3.2 Dünnschichtzellen

Dünnschichtzellen lassen sich in zwei Halbleiterklassen unterteilen, in amorphe Zellen und in polykristalline Zellen.

Alle hierfür untersuchten Materialien zählen zu den direkten Halbleitern mit steiler spektraler Absorptionskante, so daß sie sich für die Herstellung extrem dünner Schichten, bei denen innerhalb weniger μm praktisch das gesamte Licht absorbiert wird, grundsätzlich eignen.

Alle Dünnschichtzellen brauchen wegen der geringen Schichtdicken ein Substrat zur mechanischen Stabilisierung, auf dem sie abgeschieden werden.

Zur Herstellung polykristalliner Solarzellen werden vor allen Dingen Halbleiterverbindungen wie CdTe , CdSe , CuInSe_2 , Cu_2S und GaAs sowie verwandte Substanzen und Mischungen untersucht /5/.

Die amorphen Halbleiter werden durch das amorphe Silizium und amorphe Germanium vertreten. Dünnschichtsolarzellen werden durch die verschiedensten Abscheidetechniken, die an dieser Stelle nicht näher erläutert werden, hergestellt.

Dünnschichtzellen haben die Vorteile von geringem Materialverbrauch (etwa 10g/m^2), einer relativ einfachen Herstellungsweise und flexibler, anpassungsfähiger Formgebung, aber sie haben auch den Nachteil relativ geringer Wirkungsgrade, abgesehen von GaAs, speziellen Zellen wie GaAs auf Si und Tandemzellen.

3.2.1 Solarzellen aus amorphem Silizium (a-Si:H)

Bei amorphen Festkörpern sind die Atombausteine nicht wie in einem Kristall regelmäßig und periodisch angeordnet, sondern die Anordnung der Atome erfolgt ungeordnet. Kristallines Material besitzt eine Fernordnung. Bei kristallinem Silizium z. B. ist jedes Atom von vier nächsten Nachbarn umgeben. Aufgrund der streng periodischen Anordnung dieser "Kleinstbaugruppe" ergibt sich eine Korrelation des Atomgefüges über makroskopische Entfernungen hinweg, die Fernordnung.

Amorphe Stoffe weisen jedoch keine völlige Unordnung auf. Sie besitzen eine Nahordnung. Da hier aber geringfügige Schwankungen der Bindungswinkel und Bindungsabstände auftreten (von maximal 10 %) /5/, kommt es zu keiner Fernordnung, sondern es entsteht ein ungeordnetes Netzwerk der "Kleinstbaugruppen", die zur Nahordnung gehören.

Diese ungleichmäßige Anordnung, vor allem die unterschiedlichen Abstände der Atome untereinander, führt zu großen mechanischen Spannungen im Gefüge, so daß Bindungen offen bleiben und nicht abgesättigt werden können. Diese nicht abgesättigten freien Si-Bindungen (dangling bonds) sind die wichtigsten Defekte im amorphen Silizium. Ihre Zahl wirkt sich begrenzend auf die Ladungsträgerlebensdauer und damit auf den Wirkungsgrad der Solarzelle aus.

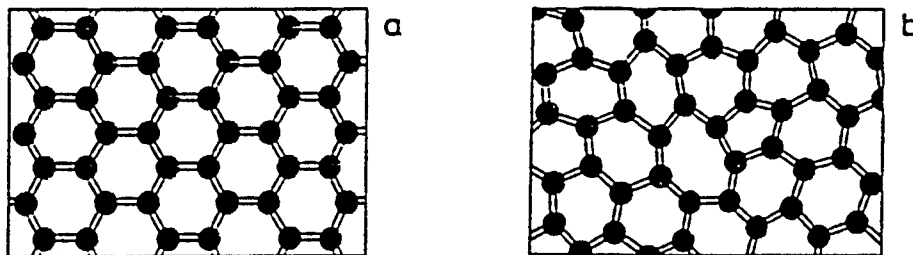


Abb. 3.1 Struktur von kristallinen (a) und amorphen (b) Festkörpern /5/

Eine Möglichkeit, die freien Bindungen weitgehend zu passivieren, besteht in ihrer Absättigung durch Wasserstoff, was bei der heute meist angewendeten Herstellung von amorphen Siliziumschichten durch Plasmazersetzung von Silan (SiH_4) automatisch geschieht /9/.

Ein weiterer Vorteil der Passivierung durch Wasserstoff ist die nun mögliche Dotierung der Schichten durch gezielten Einbau von Fremdatomen (P,B). Durch die Dotierung werden die p- und n- Schichten erzeugt, durch die die Feldzone gebildet wird, in der die Ladungsträgertrennung erfolgt.

Die Struktur des amorphen Siliziums verursacht eine Beweglichkeitslücke E_g von 1,7 eV (etwa 1,6 eV bis 1,8 eV) /10/, was eine bessere Anpassung an das Sonnenspektrum bedeutet, als die von kristallinem Silizium, das eine Energielücke von nur 1,1 eV besitzt. Wie bereits oben erwähnt ist eines der Herstellungsverfahren für amorphes Silizium die Plasmadeposition.

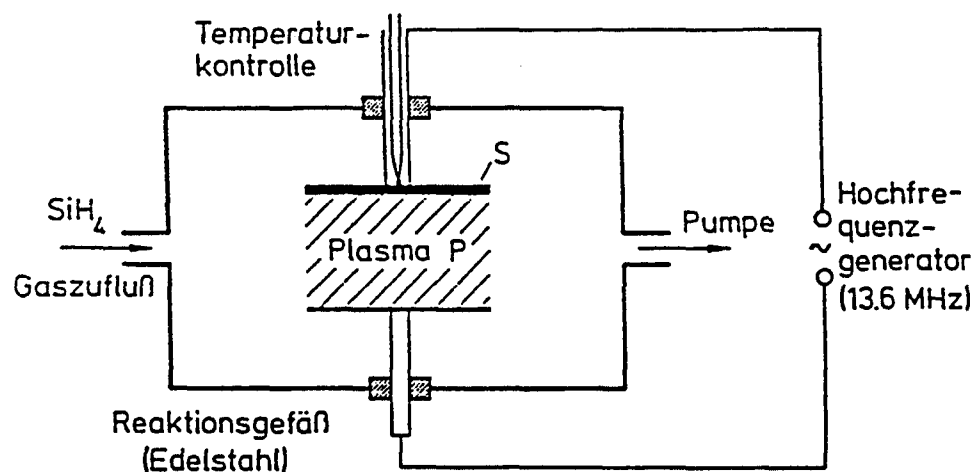


Abb. 3.2 Schematische Darstellung einer Anordnung zur Herstellung von amorphem Silizium durch Plasmadeposition /10/

Neben der Plasmadeposition, die sich aufgrund der hierbei erzielbaren geringen Defektdichte weitgehend durchgesetzt hat, werden im wesentlichen noch folgende Verfahren zur Darstellung amorphen Siliziums angewendet:

- thermisches Verdampfen
- Sputtern
- thermische Zersetzung von Silanen (CVD)
- photothermische Zersetzung von Silanen (Photo-CVD)

3.2.2 Herstellung von amorphen Siliziumsolarzellen

Die von kristallinen Zellen bekannte pn-Struktur kann für amorphe Solarzellen wegen der niedrigen Beweglichkeit und der kurzen Lebensdauer der Ladungsträger nicht angewendet werden. Man verwendet hier eine Anordnung aus einem undotierten a-Si:H-Film, der i-Schicht, eingeschlossen von dünnen hochdotierten p- und n-leitenden Filmen, die sogenannte pin-Struktur.

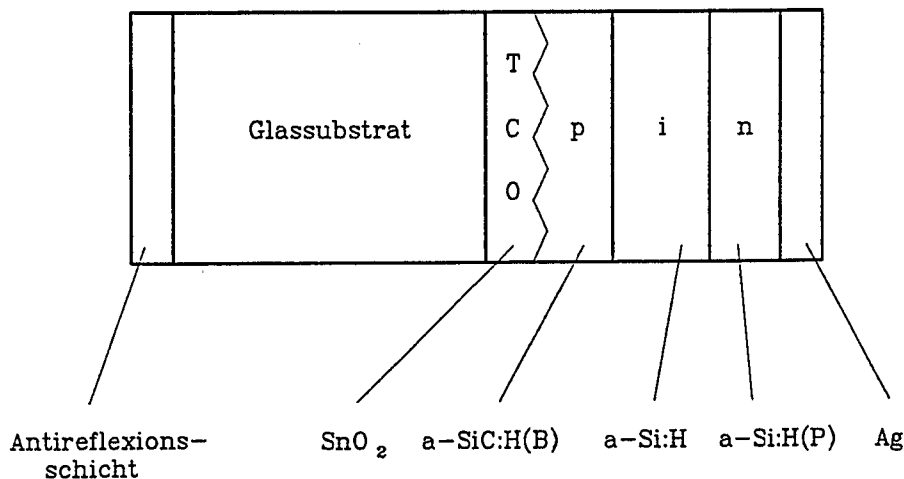


Abb. 3.3 Prinzipieller Aufbau einer amorphen Siliziumsolarzelle /5/

Die einzelnen Schichten werden aufgrund ihrer geringen Dicke von insgesamt etwa $1\ \mu\text{m}$ auf z. B. einem Glassubstrat (Dicke: 0,7 mm bis 1,1 mm) /6/ aufgebracht, das auf der lichtzugewandten Seite mit einer Antireflexionsschicht und auf der gegenüberliegenden Seite mit einer leitenden transparenten Oxidschicht versehen ist. Die Oxidschicht (TCO), im allgemeinen Zinnoxid (SnO_2), stellt den vorderen elektrischen Kontakt der Zelle dar und ist zum besseren Lichteinfall häufig texturiert (Lichtfallen). Ein Metallgitter (Grid), wie es bei kristallinen und polykristallinen Zellen zur Stromabnahme verwendet wird, müßte bei amorphem Silizium aufgrund der kleineren Diffusionslängen der photoinduzierten Ladungsträger so engmaschig ausgeführt werden, daß ein großer Teil der Zellenoberfläche abgeschattet werden würde.

Auf die Kontaktierungsschicht wird zuerst eine p-dotierte, mit Kohlenstoff angereicherte a-Si:H Schicht abgeschieden. Die Kohlenstoffanreicherung dient zur Verschiebung der Absorptionskante zu höherer Energie, um die ungewollte Lichtabsorption in der p-Schicht zu verringern.

Die folgende Schicht ist die undotierte i-Schicht aus a-Si:H. Sie ist die aktive Absorptionszone der Solarzelle, in der die Ladungsträger generiert werden.

Als nächstes wird die n-dotierte Schicht aufgebracht, die den Abschluß der eigentlichen pin-Struktur darstellt. Zuletzt wird noch die Rückseitenmetallisierung, z. B. in Form einer dünnen Silberschicht, aufgedampft. Der Rückseitenkontakt dient zur Ableitung der Ladungsträger und zur Reflexion noch nicht absorbiert langwelliger Strahlung in die i-Schicht.

Die Ladungsträgerauslösung findet bei amorphem Silizium in der Feldzone, der i-Schicht, statt, so daß die Ladungsträger durch das elektrische Feld zwischen p- und n-Schicht "abgesaugt" werden, während die Ladungsträger im Gegensatz hierzu bei einer pn-Zelle erst in die Feldzone diffundieren müssen.

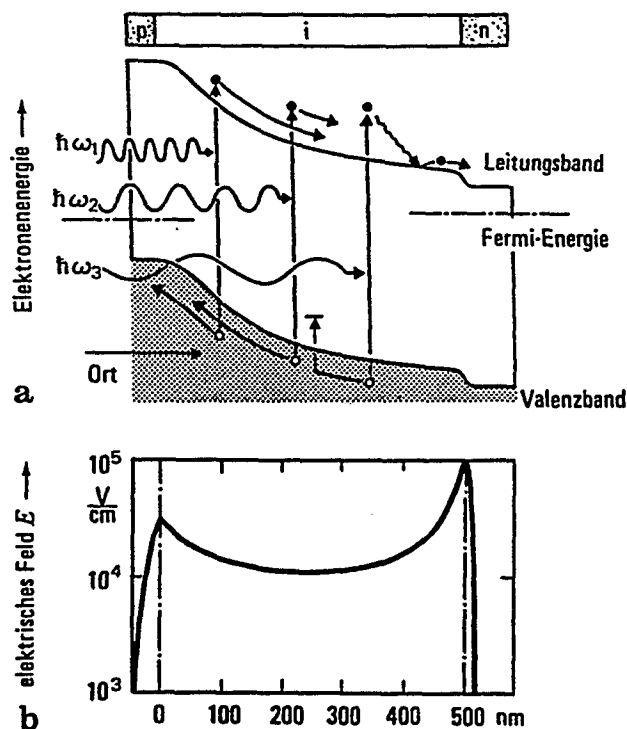


Abb. 3.4 Shema des Ladungstransports photogenerierter Elektronen (•) und Löcher(o) im Bändermodell eines pin-Übergangs und Verlauf des durch Raumladung erzeugten elektrischen Feldes (Leerlauf) in einem pin-Übergang aus amorphem Silizium /6/

Zur Herstellung von Dünnschichtzellen werden seit einiger Zeit Mehrkammeranlagen angewendet, weil sie eine Verschleppung von Dotiergasen, wie es in Einkammeranlagen häufig vorkommt, vermeiden helfen, da die Deposition der einzelnen Schichten in der Mehrkammeranlage in verschiedenen Reaktoren erfolgt. Zusätzlich haben sie den Vorteil, daß sie leicht automatisiert werden können und für die Massenproduktion mit hohem Durchsatz geeignet sind.

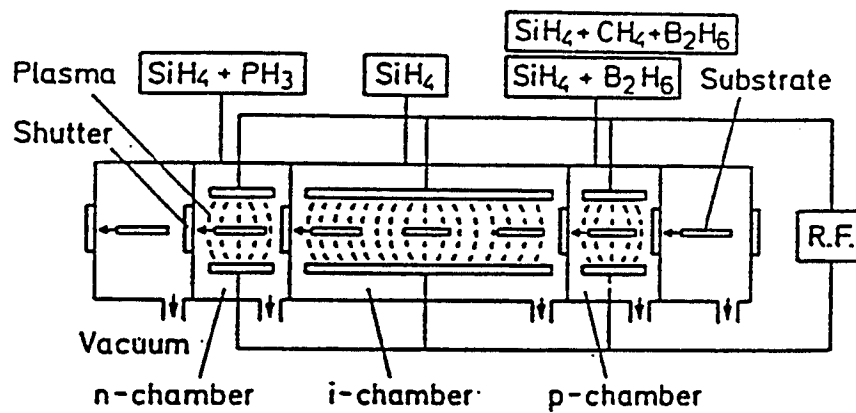


Abb. 3.4 Prinzip einer Mehrkammeranlage zur Deposition von pin-Solarzellen

Solarzellen aus amorphem Silizium sind aufgrund ihrer Beweglichkeitslücke von etwa 1,7 eV für Photonen mit einer Energie unterhalb von 1,6 eV (Wellenlänge etwa 770 nm) weitgehend transparent.

4. Meßverfahren zur Solarzellencharakterisierung

Um die Leistungsmerkmale neu entwickelter Solarzellen überprüfen zu können, wurden parallel zur immer weiter fortschreitenden Entwicklung der Solarzellen auch die Meßverfahren verbessert, und neue kamen hinzu.

Solche Meßverfahren dienen jedoch nicht ausschließlich dem Zweck, die Güte einer neu entwickelten Zelle zu überprüfen, sondern auch dazu, die z. T. komplexen Mechanismen der Energieumwandlung in der Zelle zu untersuchen und besser zu verstehen. Aber auch hier beschränken sich die vielfältigen Analysen nicht nur auf die Betrachtung der Vorgänge und Merkmale der fertigen Zellen. Vielmehr können hier bereits Messungen an Rohmaterialien, Substraten oder einzelnen Schichten, dotiert oder undotiert, bzw. an Schichtsystemen wichtige Aufschlüsse für die weitere Entwicklung geben.

Hieraus wird ersichtlich, und dies trifft besonders für die Entwicklung von Dünnschicht-halbleitersystemen zu, daß eine Vielzahl von Meßverfahren zur Erfassung aller wichtigen Einflußgrößen und zur Entwicklung neuer Zellen und Halbleitermaterialien sowie zur Verbesserung und Optimierung bereits bestehender Systeme erforderlich ist. Die Ziele, die bei der Solarzellenherstellung in erster Linie verfolgt werden, sind einfach ausgedrückt die "Wirkungsgradmaximierung bei gleichzeitiger Minimierung der Herstellungskosten".

Die Beschreibung aller zur Anwendung kommender Meßverfahren würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, so daß hier nur die wichtigsten Methoden und Verfahren kurz genannt werden.

Die an der fertigen Solarzelle sicherlich wichtigste Messung ist die Erfassung ihres Wirkungsgrades η , in den hauptsächlich der Füllfaktor F sowie Leerlaufspannung U_0 und Kurzschlußstrom I_K bei gegebener Bestrahlung und Zellenfläche eingehen. Um die charakteristischen Größen zu ermitteln, werden unter realistischen Bedingungen, d. h. möglichst sonnenähnlicher Bestrahlung, die Kennlinien der Solarzelle aufgenommen.

Weitere Rückschlüsse auf die Qualität der Zelle erhält man durch die Messung der spektralen Empfindlichkeit, durch Reflexions- und Photolumineszenzmessungen, sowie durch Messungen an Korngrenzen (polykristalline Zellen), Messung von Diffusionslängen, Ladungsträgerbeweglichkeit, Energielücke usw.

Eine besondere Bedeutung in der Entwicklungsphase kommt der Untersuchung der Schichtstrukturen zu. Hier werden besonders Schichtdicken, Homogenität der Schichten sowie Aufwachs- und Diffusionseffekte untersucht.

Ein bisher nicht genanntes und auch weniger bekanntes Verfahren ist das LBIC- (Light Beam Induced Current) Meßverfahren, dessen Aufbau das Thema dieser Arbeit ist und das im folgenden näher beschrieben wird.

5. Das LBIC- (Light Beam Induced Current) Meßverfahren

LBIC - Light Beam Induced Current bedeutet soviel wie die Erzeugung eines Stroms durch einen Lichtstrahl.

Konkret bedeutet dies, daß ein punkt- oder strichförmiger Lichtstrahl über die Oberfläche einer Solarzelle geführt wird. Der resultierende Photostrom wird als Funktion des Ortes aufgezeichnet, so daß sich ein Bild der lokal aufgelösten Empfindlichkeit der Zelle ergibt.

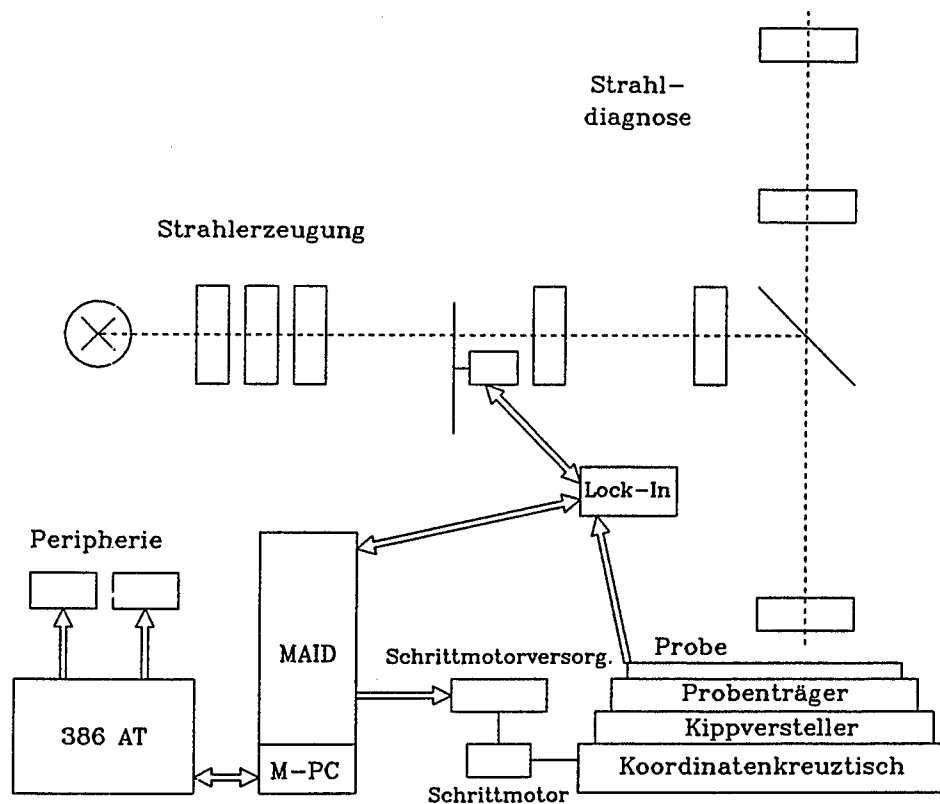


Abb. 5.1 Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus

Die Erzielung orts aufgelöster Ergebnisse von spektraler Empfindlichkeit, Homogenität und Diffusionslängen sind im Gegensatz zu den sonst nur integralen Meßergebnissen von größtem Interesse, da hier bei einigen Größen sehr stark ortsabhängige Schwankungen beobachtet werden können.

Hier muß jedoch erwähnt werden, daß LBIC kein einheitliches Meßsystem ist, sondern lediglich die Methodik der Meßverfahren beschreibt. Bei den Realisationen des Verfahrens zeigen sich die unterschiedlichsten apparativen Varianten, die nach Zielsetzung und Anwendung ziemlich stark differieren.

Beispielhaft sollen hier einige Anwendungen vorgestellt werden:

So beschreibt S. Damaskinos z. B. die Verwendung einer Laser-Scanner-Apparatur zur Untersuchung von $\text{CuInSe}_2/(\text{CdZn})\text{S}$ Zellen /13/. In diesem Fall wird ein Laserstrahl durch Spiegelablenkung über eine unbeweglich montierte Testzelle geführt. Das Ziel ist die Auffindung von Inhomogenitäten und der Versuch, verschiedene Unregelmäßigkeiten mit z. T. gleichem Erscheinungsbild zu unterscheiden, in dem zusätzlich noch das von der Zelloberfläche reflektierte Licht und auch transmittiertes Licht mit in die Auswertung der Defektstellen eingeht.

Das alleinige Auffinden einer Defektstelle sagt nämlich noch nichts über ihre Ursache aus, da es sich sowohl um eine Stelle handeln kann, an der einfach weniger Ladungsträger erzeugt werden, als auch um eine Stelle, an der zwar eine genügende Anzahl an Ladungsträgern erzeugt wird, die aber nicht zum Stromfluß beitragen können, da hier möglicherweise eine Stelle mit hoher Fehlstellendichte vorliegt, an denen die erzeugten Ladungsträger sofort wieder rekombinieren.

S. Damaskinos erachtet die Auffindung und Charakterisierung von lokalen Defektstellen als sehr wichtig, da lokale Unregelmäßigkeiten das Verhalten der ganzen Zelle beeinflussen. Ihre Charakterisierung soll ihre Elimination im Herstellungsprozeß ermöglichen /13/.

Eine größere Zahl von Arbeiten zum Thema LBIC befassen sich mit der Untersuchung von Korngrenzen /14/ und Diffusionslängen, Rekombinationsgeschwindigkeiten bzw. Ladungsträgerlebensdauern in vorwiegend polykristallinen Materialien sowie mit dem Vergleich von EBIC- (Electron Beam Induced Current), Photolumineszenz- und LBIC-Messungen /15/. Bei manchen Anlagen werden zur Rasterung die Proben verschoben, bei anderen wird der Lichtstrahl durch eine Spiegelablenkung über die Solarzelle geführt.

Die am häufigsten zur Strahlerzeugung angewendeten Lichtquellen sind Laser, Laserdioden, Kurzbogenlampen und Halogenlampen in Verbindung mit mikroskopähnlichen Aufbauten oder Lichtwellenleitern. Häufig werden die Proben auch unter einer Bias-Be-strahlung (zusätzliche Bestrahlung der Probe zur Festlegung eines bestimmten Arbeitspunktes), die entweder in den Strahlengang eingekoppelt oder separat aufgebracht wird, vermessen. Die Darstellungen der Meßergebnisse reichen von Einzel-Scans über eine 3D-ähnliche Darstellung durch Überlagerung von Einzel-Scans bis hin zu in Grautönen abgestuften oder farbigen 2D Fehlfarbandarstellungen von Zellen bzw. Sektoren.

Im Gegensatz zu den oben genannten Anwendungen sind Messungen an amorphen Proben, sicher auch durch die erst in letzter Zeit häufigeren Anwendungen des amorphen Siliziums, noch recht selten.

6. Aufgabenstellung

Zur Spezifizierung der Aufgabenstellung wurde für den Anlagenaufbau ein Anforderungsprofil erstellt.

Hiernach ergeben sich die folgenden Anforderungen an den Meßplatz:

Die Größe der zu untersuchenden Zellen wird maximal bei einer Kantenlänge von 100 mm x 100 mm liegen. Die Form der Proben wird im allgemeinen rechteckig bzw. quadratisch sein, jedoch vermutlich mit veränderlichen Abmessungen (Kantenlängen). Hierbei ist es wichtig, daß die Größe und Lage der untersuchten Fläche variabel gewählt werden kann. Das heißt, es ist unter Umständen wünschenswert, von einer beliebig großen Zelle nur einen begrenzten Ausschnitt von beispielsweise 1 cm² zu untersuchen.

Der Abstand der einzelnen Meßpunkte ist, da hier weder Korngrenzen noch Diffusionslängen der Ladungsträger untersucht werden sollen, sondern es auf die Erfassung der Homogenität der gesamten Zelle ankommt, sinnvoll an die maximal vorkommende Zellengröße anzupassen.

Auch der abtastende punktförmige Lichtstrahl sollte auf der Probenoberfläche eine dem Punktabstand vergleichbare Größe haben, um eine lückenlose Analyse der Proben zu gewährleisten. Wobei hier geringe Überlappungen oder Zwischenräume toleriert werden können.

Bei Rasteranwendungen wird üblicherweise mit Auflösungen von 100 x 100 bis 500 x 500 Meßpunkten gearbeitet. Eine gute Auflösung bei angemessenen Datenmengen erreicht man bereits bei 250 bis 300 Werten für eine Rasterrichtung.

Die einzelnen Messungen sollten zudem bei unterschiedlichen Wellenlängen durchgeführt werden können. Weiterhin sind die Optionen, mit Chopper und Lock-In Verstärker zu arbeiten, offenzuhalten und zu prüfen.

Ein weiterer Punkt ist die Vermeidung von Fremd- oder Streulichteinfall auf die Probe bei gleichzeitiger Schaffung der Voraussetzungen für eine Bias-Bestrahlung.

Zusätzlich sind folgende Punkte bei der Planung der Apparatur zu berücksichtigen: Der Probenträger soll eine unkomplizierte Befestigung der Proben und eine einfache Kontaktierung ermöglichen, außerdem muß er so justiert werden können, daß der Lichtstrahl an jeder Stelle der Probe den gleichen Strahldurchmesser erzeugt, da im anderen Fall scheinbar inhomogene Meßwerte durch einen ortsabhängig veränderlichen Strahldurchmesser auftreten können. Die Erfüllung dieses Punktes erfordert eine präzise Einstellmöglichkeit für zwei kippbare Achsen sowie für eine hierzu senkrechte Höhenverstellung.

Je nach eingesetzter Lichtquelle, Strahldurchmesser und Strahlintensität kann zur Erfassung des Meßsignals die Verwendung eines Vorverstärkers erforderlich sein, der zur Minimierung von Rauscheffekten möglichst nahe der Probe am Probenträger untergebracht werden müßte.

Ansonsten waren der Gestaltung des experimentellen Aufbaus keine weiteren wesentlichen Beschränkungen auferlegt, so daß prinzipiell große Freiheiten in der Realisierung bestanden.

Die Tätigkeiten, die im Hinblick auf die Lösung der Aufgabenstellung durchgeführt wurden, lassen sich im wesentlichen in 5 Abschnitte gliedern.

1. Beschaffung und Auswertung des verfügbaren Materials und der Unterlagen im Hinblick auf die Themenstellung dieser Arbeit.
2. Auffinden und Ausarbeiten einer aufgabenspezifischen Lösung entsprechend den an die Anlage gestellten Anforderungen durch Beurteilung verschiedener Lösungsansätze.
3. Auswahl, Konstruktion und Beschaffung der für die gefundene Lösung geeigneten Komponenten und Aufbau der Anlage.
4. Erstellen der zu einem automatisierten Meßablauf erforderlichen Steuerungssoftware.
5. "Einfahren" der Anlage und Durchführung erster Testmessungen.

7. Aufbau der Meßapparatur

7.1 Ausarbeitung des Anforderungsprofils

Die beiden wichtigsten Fragen, die zu Beginn geklärt werden mußten, waren die Fragen nach der Form der Rasterung und die Auswahl einer geeigneten Lichtquelle, weil dies für die weitere Ausführung der Anlage die bestimmenden Größen sind.

Zur Durchführung orts aufgelöster Empfindlichkeitsmessungen an Solarzellen bieten sich prinzipiell mehrere Rasterarten an:

Bei der ersten wird die Probe an einem festen Ort positioniert und der abtastende Strahl wird über die Probenoberfläche bewegt; bei der zweiten Möglichkeit bleibt der Strahl in fester definierter Position und die Probe wird relativ zum Strahl bewegt.

Für welches Verfahren man sich entscheidet, hängt vor allem von der erforderlichen Scan- (Raster-) Geschwindigkeit, der Wahl der Lichtquelle sowie der Probengröße ab. Bei kleinen Proben und Verwendung eines Lasers als Lichtquelle bietet sich eine Ablenkung des Laserlichtstrahls über die Probe durch Spiegelverstellung an, da bei kleinen Flächen (etwa 1 cm^2), die bei der Rasterung veränderlichen Lichteinfallswinkel des Strahls nur vernachlässigbare Effekte erzeugen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß bei entsprechend schneller Spiegelverstellung sehr hohe Scan-Geschwindigkeiten möglich sind.

Kommen hingegen andere Lichtquellen, z. B. Kurzbogenlampen oder Halogenlampen zum Einsatz, so ist die Erzeugung eines für die Spiegelablenkung geeigneten Strahls, verursacht durch die großen Strahldurchmesser und Strahldivergenzen dieser Lichtquellen, mit großen Schwierigkeiten verbunden. In diesen Fällen wird fast immer die Methode des ortsfesten Strahls und der verschiebbaren Probe gewählt.

Bei Anwendung der Spiegelablenkung für große Proben ($> 1 \text{ cm}^2$) können Schwierigkeiten entstehen, weil an den Randbereichen der Zelle im Gegensatz zu der Stelle, an der der Strahl senkrecht auf die Probe trifft, sich nicht nur der Durchmesser und damit die Intensität des Lichtpunktes auf der Probe und der Lichtweg durch die Zelle ändert, sondern ein variabler Einfallswinkel führt auch zu verändertem Absorptions- und Reflexionsverhalten der Solarzelle.

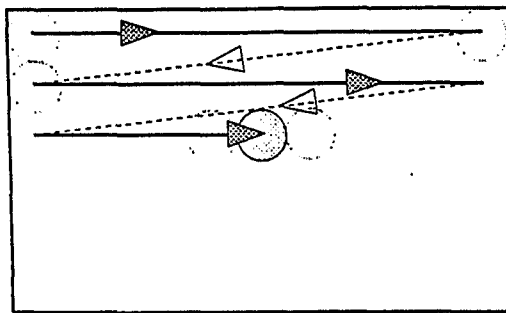
Befindet sich der Strahl aber in unveränderlicher Position, so kann die Abtastung der Probe auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Die Beispiele hierfür sind zeilenweise Rasterung, ähnlich wie bei einem Drucker bzw. die spiralförmige durch Drehung der Probe erzeugte Abtastung wie bei einer Schallplatte oder einer CD.

Die zeilenweise Rasterung läßt sich wiederum in zwei Varianten unterteilen:

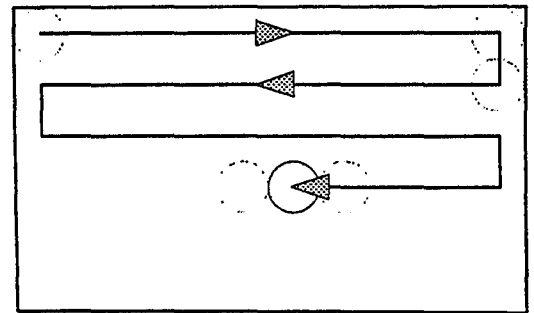
Erstens, die Probe wird unidirektional gerastert, d. h. nach dem Durchfahren einer Zeile liegt der Anfangspunkt für die nächste Zeile unter dem Ausgangspunkt für die vorhergehende Zeile. Dieses Verfahren bietet den Vorteil einer größeren Positioniergenauigkeit, ist jedoch verglichen mit dem nachstehend beschriebenen Verfahren zeitaufwendiger, da die Zelle für jede Meßzeile zweimal überquert werden muß.

Beim zweiten Verfahren liegt der Ausgangspunkt der jeweils folgenden Zeile unter dem Endpunkt der vorhergehenden. Es werden in beiden Bewegungsrichtungen Meßwerte aufgenommen.

Dieses Verfahren sollte nur angewendet werden, wenn das Umkehrspiel der Verstellelemente wesentlich kleiner als der Abstand der Meßpunkte voneinander ist, bzw. wenn ein Versatz der Meßpunkte in Kauf genommen werden kann.



1



2

Abb. 7.1 (1) uni- und (2) bidirektionale Rasterung

Vom Bewegungsablauf eleganter und auch schneller als die beiden oben vorgestellten Methoden ist die spiralförmige Abtastung der Probe, kommt aber eigentlich nur für kreisförmige Zellen in Betracht und ist in ihrer Realisierung insofern aufwendig, als daß die Zelle sowohl eine rotatorische als auch eine translatorische Bewegung ausführen muß. Außerdem erschwert dieses Verfahren die nicht unempfindliche Kontaktierung der Proben und die Analyse einzelner Sektoren erheblich.

Eine interessante Variante würde auch eine Kombination aus einer Strahlablenkung und einer Probentranslation darstellen, da hier kleine Sektoren der Zelle durch Strahlablenkung sehr schnell vermessen werden könnten und die Probe dann um einen Sektor weiterbewegt werden könnte.

In Erweiterung der genannten Methoden sollte noch darauf hingewiesen werden, daß auch die Möglichkeit besteht, den Abtaststrahl durch einen bewegten Lichtwellenleiter auf die Probenoberfläche zu übertragen. Hier liegt der Vorteil darin, daß die Probe nicht bewegt zu werden braucht und der Lichtstrahl nicht mit veränderlichen Einfallswinkeln auf die Probe trifft. Es darf aber nicht vergessen werden, daß die Faseroptik durch die vielen notwendigen Bewegungszyklen einer hohen dynamischen Beanspruchung ausgesetzt ist, was zu einer raschen Alterung des Materials und somit zu einer temporären Änderung des Scan-Strahls führt. Außerdem ändern sich die Übertragungseigenschaften eines Lichtwellenleiters bei unterschiedlichen Biegeradien, was inkonsistente Strahlintensitäten während einer Messung zur Folge hätte.

7.2 Auswahl der Lichtquelle

Wichtigstes Kriterium für die Auswahl der Lichtquelle des LBIC-Aufbaus ist, daß das emittierte Licht eine Wellenlänge und damit eine Quantenenergie der Photonen zur Verfügung stellt, die größer gleich der Beweglichkeitslücke von amorphem Silizium von 1,6 eV bis 1,8 eV ist, bzw. daß das Spektrum der Lichtquelle eine dem sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums ähnliche Wellenlängenverteilung aufweist.

Die hiernach in Frage kommenden Lichtquellen sind Laser mit Linien der entsprechenden Wellenlänge im sichtbaren Bereich bzw. Laserdioden oder auch Farbstofflaser, bei denen sich in bestimmten Grenzen verschiedene Wellenlängen erzeugen lassen. Ebenfalls können aus Gründen der hohen Lichtintensität Kurzbogen- und Halogenlampen als Lichtquellen eingesetzt werden.

Laser und Laserdioden haben den Vorteil, daß sie vergleichsweise einfach zu handhaben sind und der parallele, homogene Strahl für Rasteranwendungen durch Spiegelverstellung hervorragend geeignet ist. Der Strahl kann ohne großen Aufwand an zusätzlichen optischen Komponenten durch die Reflexion an Kippspiegeln mit hoher Geschwindigkeit an jeden beliebigen Ort der Probe gelenkt werden. Nachteilig ist, daß für die Solarzellenanalyse jeweils nur eine Wellenlänge zur Verfügung steht und daß bei Bedarf der gesamte Laser ausgetauscht werden muß, um eine Messung mit anderer Wellenlänge durchzuführen. Bei Verwendung von Laserlicht ist aufgrund der oft sehr hohen Bestrahlungsstärke darauf zu achten, daß zu große thermische Belastungen der Probe ausgeschlossen sind.

Eine Alternative stellt hier der Farbstofflaser dar, der innerhalb eines bestimmten Bereichs eine Variation der Wellenlänge zuläßt. Jedoch ist der apparative Aufwand zur Realisierung eines solchen Systems und die damit verbundenen Kosten derartig hoch, daß im Rahmen dieser Arbeit und für diesen Meßplatz von einer Applikation eines Farbstofflasers abgesehen wird.

Eine weitere Möglichkeit stellt sich in der Anwendung eines HeNe-Multilinen-Lasers dar, aber für die Untersuchungen von amorphem Silizium sind die erzeugbaren Wellenlängen eigentlich zu groß und der Variationsbereich ist zu klein.

Um der Anforderung, wellenlängenabhängige Messungen durchführen zu können, gerecht zu werden, erscheint die Verwendung einer Lichtquelle mit breiterem Spektrum, aus dem die gewünschten Wellenlängen mittels Monochromator oder Filtern herausselektiert werden, wesentlich sinnvoller. Die beiden Lampentypen, die die gestellten Anforderungen am ehesten erfüllen, sind die Xenon- (Xe-) Kurzbogenlampe und die Halogenlampen. Xe-Kurzbogenlampen erzeugen ein kontinuierliches Spektrum von 190 nm bis 2 600 nm mit einigen intensiven Linien im Bereich von 800 nm bis 1 000 nm. Sie sind ausgezeichnet geeignet als Lichtquellen für die UV-Spektroskopie, Sonnensimulationen und für die Dermatologie /8/.

Besonders interessant im Rahmen der LBIC-Untersuchungen an amorphem Silizium dürfte der Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und etwa 770 nm sein, der bis auf einen schmalen Bereich bei 450 nm bis 500 nm eine sehr homogene Intensitätsverteilung aufweist.

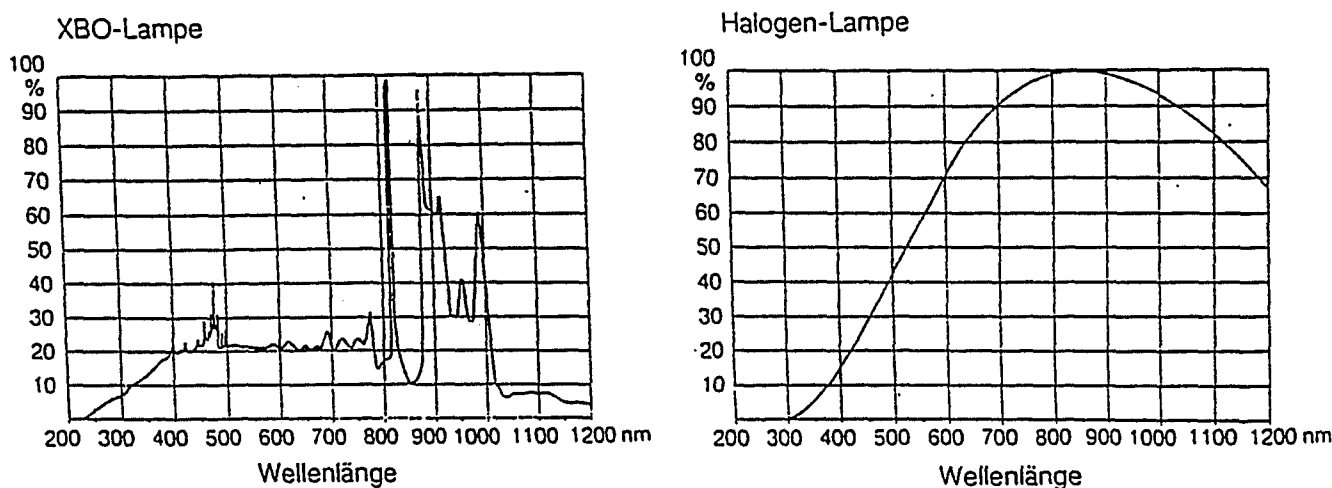


Abb. 7.2 Intensitätsverteilungen bei Xenon- und Halogenlampen

Im Gegensatz zur Xe-Kurzbogenlampe hat die Halogenlampe ein linienloses Spektrum, das bei einer Wellenlänge von 320 nm beginnt und deren Intensität dann sehr stark bis zu einer Wellenlänge von 850 nm ansteigt, um dann im Infrarotbereich wieder abzufallen. Da die Halogenstrahlung erst oberhalb 400 nm eine verwertbare Intensität liefert, die im interessierenden Bereich des Spektrums auch sehr stark variiert sowie über einen sehr großen "Rotanteil" verfügt, der lediglich zu einer Wärmebelastung für opt. Bauteile und Proben führt und die meisten Lampen eine geringe Lebensdauer mit deutlichen Alterungserscheinungen haben, ist die Entscheidung für die Lichtquelle der LBIC-Apparatur auf eine Xe-Kurzbogenlampe mit einer Leistung von 150 W gefallen. Diese Lampe stellt eine hohe Leuchtdichte bei, verglichen mit Lampen höherer Leistung, relativ kleinem Lichtbogen zu Verfügung.

Die Brennspannung dieser Lampe liegt bei 20 V und entsprechend fließt ein Lampenstrom von 7,5 A. Der Lichtbogen hat eine Abmessung (bxh) von 0,5 mm x 2,2 mm /8/. Zur Steigerung der Lichtleistung ist im Lampengehäuse ein Vorderflächen-Hohlspiegel eingebaut, der eine um 30 % höhere Ausbeute bringt. Zur genauen Justierung von Lampe und Spiegel können diese mittels Mikrometerschraubenantrieben auch während des Betriebs in zwei orthogonal zueinander stehenden Ebenen verstellt werden. Das Lampengehäuse ist mit einem Kondensor mit einer Brennweite f von 40 mm bei einer Öffnung von 49,2 mm ausgerüstet. Er ist für einen Spektralbereich von 300 nm bis 2 900 nm geeignet und ist von 150 mm bis ∞ fokussierbar /8/.

7.3 Auswahl einer Probenpositionierung

Um einen soliden einfachen Aufbau der Anlage zu ermöglichen, die Einzelkomponenten in einen festen mechanischen Bezug zu bringen und ihre Montage und Justierung zu erleichtern, wurde die Grundkonzeption beim Aufbau ähnlicher Anlagen übernommen und ein massiver Unterbau, vergleichbar mit einem optischen Tisch, verwendet. Hierzu wurde ein stabiles verwindungssteifes Tischuntergestell konstruiert, welches aus 40 mm Vierkantrohr zusammengeschweißt wurde. Dieses Gestell wurde so vorbereitet, daß die Tischplatte fest mit ihm verschraubt werden konnte.

Als Tischplatte wurde eine 19 mm Aluminiumplatte mit einer Länge von 180 cm und einer Tiefe von 80 cm gewählt. Diese Platte wurde zur Montage der verschiedenen Komponenten mit einem M6-Gewinderaster von 100 mm x 100 mm versehen. Bei Bedarf kann der beschriebene Tisch ohne Schwierigkeiten mit Schwingungsdämpfern nachgerüstet werden.

Nachdem die Auswahl einer Lichtquelle erfolgt ist und damit eine Strahlführung durch Spiegelablenkung und ortsfester Probe nicht mehr in Frage kommt, ist als nächstes die Aufgabe der Probenpositionierung zu lösen.

Da die zu untersuchenden Solarzellen eine rechteckige bzw. quadratische Form haben werden, scheidet eine drehbare Probenpositionierung von vornherein aus. Zur zeilenweisen Rasterung sind zwei voneinander unabhängige, rechtwinklig zueinander verlaufende Translationsfreiheitsgrade erforderlich.

Zur Realisierung bietet der Markt eine Fülle an Positioniereinrichtungen an, die von piezoelektrisch betriebenen Mikrostellkomponenten über elektromechanisch angetriebene Kreuzzische bzw. Vorschubeinheiten, die um 90° versetzt aufeinander montiert werden können und so eine zweiachsige Translation erlauben, bis hin zu pneumatischen oder hydraulischen Verstellelementen.

Die Piezo-Feineinstellungen zeichnen sich zwar durch eine ausgezeichnete Genauigkeit aus, die Einstellempfindlichkeiten liegen bei $0,1 \mu\text{m}/\text{V}$, jedoch sind die maximal erreichbaren Stellwege auch entsprechend klein. Sie liegen bei etwa $25 \mu\text{m}$. Dies macht sie für eine Verwendung am LBIC-Meßplatz, für den ein Verstellweg von 100 mm für jede Achse gefordert ist, ungeeignet. Ebenso sind hydraulisch bzw. pneumatisch betriebene Verstellelemente wegen ihres sehr aufwendigen apparativen Aufbaus und der unzureichenden Genauigkeiten nicht für eine Probenpositionierung geeignet.

Bleiben also die elektromechanisch angetriebenen Verstellelemente, die zwar alle im Verstellwegbereich von 25 mm bis etwa 1 000 mm einen prinzipiell ähnlichen Aufbau zeigen, sich in ihren Ausführungen und Leistungen jedoch sehr stark unterscheiden.

In fast allen Fällen werden diese Versteller durch Schritt- oder Gleichstrommotoren in Verbindung mit einer Kugelumlaufspindel angetrieben. Die beweglichen Schlitten werden über spielfrei eingestellte Lager geführt.

Die hauptsächlichsten Unterschiede ergeben sich aus der Schrittauflösung der Motoren (200 o. 500 bzw. im Halbschrittverfahren bis 1 000 Schritte pro Umdrehung) bzw. bei Gleichstrommotoren aus der Encoderauflösung, den Steigungen der Antriebsspindeln, den verwendeten Materialien, der konstruktiven Stabilität und nicht zuletzt dem Preis.

Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl eines Systems waren die Kompatibilität des Antriebs zu einer bereits vorhandenen Schrittmotorsteuerung und ein Verstellweg pro Achse bzw. je Vorschubeinheit von min. 100 mm (jedoch auch nicht wesentlich mehr). Weiterhin wird eine Positioniergenauigkeit gefordert, die deutlich unterhalb des kleinsten zur Anwendung kommenden Strahldurchmessers von 40 μm (siehe Kap. 7.4 Optischer Aufbau) liegt, also möglichst < 10 μm ist, sowie eine möglichst hohe Verfahrensgeschwindigkeit, um die Meßzeit von mechanischer Seite her gering halten zu können. Außerdem sollten die Positioniereinheiten der Positionieraufgabe angemessene Abmessungen und Gewicht (keine Überdimensionierung), eine modulare Bauweise, flexible Montagemöglichkeiten und einen angemessenen Preis aufweisen. In die nähere Auswahl kamen die in Abb. 7.3 zusammengefaßten Produkte.

Hersteller	Spindler & Hoyer	isel automation	Physik Instrumente	Schneeberger Kreutztisch	Schneeberger Vorschubeinh.
Verstellweg x Verstellweg y	50 – 100 mm 50 – 100 mm	Option 50 – 1250 mm	100/200 mm 100/200 mm	100 mm 100 mm	100 mm 100 mm
Antrieb / Motor Typ	Gleichstrommot. mit Encoder	Schrittmotor 2 Phasen	Schrittmotor 5 Phasen	Schrittmotor	Schrittmotor 2 Phasen K+S
Genauigkeit Fuehrungsg. Schrittauflösung Positionsreprod. Umkehrspiel	10 μm 1 μm	< 1/100 mm < 1/100 mm/m +/- 1/100 mm	1 – 3 μm bzw. 1 – 5 μm 0,3 – 1,4 μm	5 – 10 μm	– 6 μm rechtwinklig 10 μm
Verfahrensgeschw.	1,5 mm/s	– 200 mm/s	12 – 60 mm/s	– 30 mm/s	– 150 mm/s
modul. Bauweise	X	X	X	–	X
Steuerung	IEEE 488	RS 232	IEEE 488	IEEE 488	IEEE 488
Abmessungen o. Motor (l*b*h)	326 – 426 mm	Hub + 250 mm	352 – 489 mm	350 * 350 mm	417 * 155 mm
ø Fuehrungss. ø Spindel		12 mm	10/16 mm 8/10 mm	8 mm	8 mm
Preis o. Steuer. pro Einh. o. M.	4060 DM	1000 DM	5000 DM	9000 DM	4500 DM
Bemerkungen	höchst genau sehr langsam			sehr schwer flache Bauweise	sehr schwer flache Bauweise

Abb. 7.3 Vergleich verschiedener Positioniereinheiten

Die beste Erfüllung der Anforderungen erreichte der Linearversteller M-414 der Firma Physik Instrumente (PI), der durch Verbindung von zwei Elementen mit jeweils 3 mm Spindelsteigung eine genaue X-Y Positionierung bei kompakter Bauweise ermöglicht.

Die Verstelleinheiten werden mit einer Aluminium-Adapterplatte auf der Gewindera-sterplatte des Tisches montiert.

Die 5phasigen Schrittmotoren, die für den Antrieb der Linearversteller von PI vorgese-hen waren, konnten, da die vorhandene Steuerung nur für 2phasige Schrittmotoren ge-eignet ist, nicht eingesetzt werden. Für den Antrieb wurden zwei 2phasige Schrittmotore der Firma K + S, mit einer Auflösung von 500 Schritten pro Umdrehung ausgesucht, deren Anschlußflansch durch Aufbohren der Befestigungslöcher und Einsetzen von Buchsen an die Antriebseinheit der Verstellelemente adaptiert werden konnten.

Die geringe Anzahl der Motorschritte (max. 66) von Meßpunkt zu Meßpunkt erlauben keine großen Motordrehzahlen, da der Motor aufgrund seines Massenträgheitsmo-mentes nicht bei beliebig großen Startfrequenzen anlaufen kann, da es sonst zu Schritt-fehlern kommt. Um eine Steigerung der Drehzahl zu erreichen, muß diese von der Start-frequenz aus in mehreren Schritten bzw. mit einem bestimmten Beschleunigungsfaktor erhöht werden. Da das gleiche auch für den Abbremsvorgang gilt, lohnt sich eine Dreh-zahlerhöhung erst ab einer gewissen Anzahl von Motorschritten. Um eine genügend große Reserve zu sichern, ist die Schrittfrequenz auf der Motorsteuerkarte bei 1 000 Hz eingestellt, die maximale Startfrequenz für die verwendeten Motoren liegt bei 1 600 Hz.

Zur Erreichung eines weichen Drehmomentenverlaufs arbeitet die Steuerung der Schrittmotoren im Halbschrittverfahren. Jedoch werden als kleinste Einheit beim Halb-schrittverfahren immer 2 Schritte durchgeführt, um das volle Haltemoment zur Verfü-gung zu stellen. Hierdurch drehen sich die Motoren trotz der eingestellten Frequenz nur einmal pro Sekunde.

Durch die Änderung des komplexen Widerstands der Motorwicklungen bei steigender Frequenz ist der Motorstrom drehzahlabhängig. Deswegen arbeitet die Schrittmotor-steuerung mit einer Stromregelung um eine Überlastung des Antriebs im Ruhezustand bzw. beim Auftreten einer Fehlfunktion auszuschließen.

Als Stromversorgung für die Schrittmotoren dient ein geregeltes Labor-Netzgerät mit einer Spannung von 0 bis 30 V und einem Strom von 0 bis 5 A.

Die Linearversteller M-414 werden serienmäßig mit je zwei Endschaltern geliefert, die vom beweglichen Schlitten kurz vor Erreichen der Stellwegendpositionen betätigt wer-den. Um eine Beschädigung der Linearversteller bzw. der Antriebe durch auftretende Fehler oder Fehlbedienung zu vermeiden, ist eine einfache Schaltung entwickelt wor-den, die zwischen Netzgerät und Motoren eingefügt wurde, welche die Stromzufuhr der Motoren bei Betätigung einer der Endschalter unterbricht. Hierzu werden die Endschal-ter der beiden Positioniereinrichtungen in Reihe geschaltet und lösen bei Betätigung ein Relais mit eigener Stromversorgung aus, wodurch der Motorstromkreis unterbrochen wird. Um einen betätigten Endschalter durch Zurückfahren des Schlittens wieder zu schließen, können die Endschalter überbrückt werden.

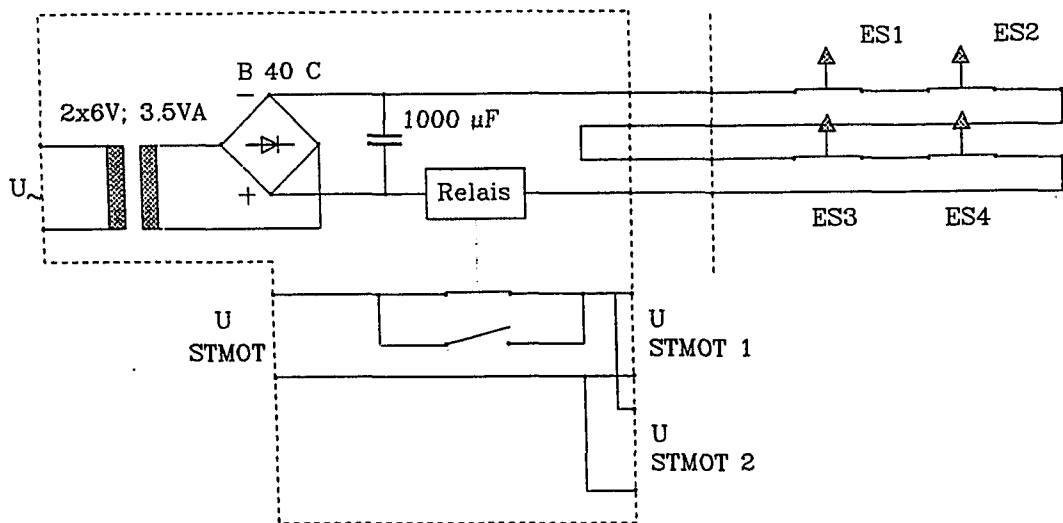


Abb. 7.4 Schaltskizze der Schrittmotorendabschaltung

Um einen homogenen Durchmesser des Meßstrahls auf der Solarzellenoberfläche zu gewährleisten, muß diese genau waagrecht unter dem senkrecht einfallenden Strahl positioniert werden.

Um dies zu erreichen, wird auf den oberen Linearversteller ein Kippversteller montiert, der eine Verkippung des Probenträgers um einige Grad mittels Mikrometerschrauben in zwei unabhängigen Ebenen erlaubt.

7.4 Optischer Aufbau

Um das orts aufgelöste Bild der Empfindlichkeit einer Solarzelle zu erhalten, muß man ein feines Netzwerk oder ein Raster über die Oberfläche der Zelle legen und an jeder Masche den Wert für die lokale Empfindlichkeit durch Induzierung eines Stroms oder einer Spannung durch einen fein gebündelten Lichtstrahl an dieser Stelle aufnehmen. Je feiner das Meßwertraster über der Zelle ist, desto größer ist auch die Auflösung der Empfindlichkeitsverteilung. Jedoch macht es keinen Sinn, die Zahl der Meßwerte beliebig zu erhöhen, weil ab einer bestimmten Auflösung, immer im Hinblick auf das Ziel der Untersuchung, die Datenmengen unüberschaubar werden, sich aber aus ihnen fast keine neuen Informationen gewinnen lassen.

Für eine vorläufig festgelegte Auflösung von etwa 250 x 250 Meßpunkten, bedeutet dies, daß bei einer vorgegebenen Solarzellengröße von 100 mm x 100 mm ein Raster mit Gitterabständen (Abstände der einzelnen Meßpunkte) von 0,4 mm entstehen würde.

Sinnvollerweise wählt man nun auch den Durchmesser des Meßstrahls in der Größe der Abstände der Meßpunkte, damit eine nahtlose Untersuchung der gesamten Fläche gewährleistet ist. Die Anlage soll aber nicht nur die Möglichkeit bieten, Zellen von 100 mm x 100 mm zu analysieren, sondern auch wesentlich kleinere Zellen oder Sektoren (Abschnitte) größerer Zellen.

So z. B., wenn bei der Vermessung einer Zelle eine lokale Inhomogenität aufgetreten ist, kann es wünschenswert und nützlich sein, zur Charakterisierung dieser Defektstelle diesen Bereich nochmals, jedoch mit höherer Auflösung, sprich kleinerem Strahldurchmesser bei enger liegenden Meßpunkten, zu untersuchen.

Sinnvoll erscheint zunächst der Einsatz dreier verschiedener wahlweise verwendbarer Strahldurchmesser:

1. Strahldurchmesser 0,4 mm für Zellen von 25 mm bis 100 mm Kantenlänge
2. Strahldurchmesser 0,1 mm für Zellen oder Sektoren mit 10 mm bis 25 mm Kantenlänge
3. Strahldurchmesser 0,04 mm für Zellen oder Sektoren bis 10 mm Kantenlänge.

Diese Aufteilung ergibt jeweils etwa 250 Meßpunkte in einer Zeile bei jeweils größter Kantenlänge. Die Festlegung des Strahldurchmessers bei rechteckigen Zellen erfolgt entsprechend der größeren Kantenlänge.

Um den Strahl auf der Probe kontrollieren zu können und um die Probe waagrecht zum Strahl ausrichten zu können, ist neben der Strahlerzeugung auch eine visuelle Kontrolle des Spots (Lichtpunkt) in vergrößerter Form notwendig.

Zu den gesamten Anforderungen erkennt man gewisse Ähnlichkeiten, wenn man sie mit dem Prinzip des Auflichtmikroskops vergleicht. Beim Auflichtmikroskop wird kein Lichtpunkt erzeugt, der dann durch das Okular vergrößert betrachtet wird, sondern hier geht es viel mehr um eine gleichmäßige Ausleuchtung des Gesichtsfeldes.

Durch ein Mikroskop werden kleine im Nahbereich liegende Objekte in zwei Stufen vergrößert betrachtet. Hierbei wird das Objekt vom Objektiv vergrößert und das entstehende Zwischenbild wird durch das Okular nachvergrößert.

Prinzipiell unterscheidet man Durch- und Auflichtmikroskope. Beim Durchlichtmikroskop fällt das Licht durch die Probe hindurch. Deswegen eignet es sich besonders für organische Substanzen und sonstige transparente Stoffe. Beim Auflichtmikroskop wird das Licht zur Erhellung der Probe in den Strahlengang eingespiegelt. Aus diesem Grund wird es hauptsächlich zur Untersuchung von nicht transparenten Stoffen mit reflektierenden Oberflächen eingesetzt. Die Einspiegelung der Auflichtbeleuchtung wird durch Verwendung eines Objektivs mit unendlicher Bildweite sehr erleichtert, weil hierbei eine (in bestimmten Grenzen) beliebig große Tubuslänge verwendet werden kann. In diesem Fall ist allerdings die Anbringung einer Tubuslinse vor dem Okular notwendig. Die Einspiegelung erfolgt im telezentrischen Strahlengang zwischen Objektiv und Tubuslinse.

In der speziellen Anwendung für die LBIC-Methode kann die Strahlanalyse direkt mit der Strahlerzeugung gekoppelt werden. Das bedeutet z. B., daß der Durchmesser des Scanstrahls visuell an mehreren Stellen der Probe überprüft bzw. eingestellt werden kann.

Natürlich gibt es auch andere Möglichkeiten, den Strahldurchmesser zu überprüfen bzw. einzustellen. Eine Alternative wäre z. B. die Anwendung eines CCD-Arrays (lichtempfindlicher, ortsauflösender Detektor). Allerdings fehlt hier der Bezug zur Probe, denn man hat keine Möglichkeit, die wirklich rechtwinklige Ausrichtung der Probe zum Meßstrahl zu kontrollieren, außerdem muß die Probe sich auf exakt der gleichen Höhe wie das CCD-Array befinden, da die Strahlerzeugung über Mikroskopobjektive einen stark kegelförmigen Strahl und damit geringe Schärfentiefe mit sich bringt, so daß gerade bei großflächigen Proben eine visuelle Strahlkontrolle vorzuziehen ist.

Diese Überlegungen haben für die Strahlerzeugung die Anwendung des Prinzips des Auflichtmikroskops als sinnvoll erscheinen lassen, bei dem das Prinzip der Köhlerschen Beleuchtung durch eine einfachere Anordnung zur Projektion eines Lichtpunktes ersetzt wird. Jedoch führten einige anlagenspezifische Besonderheiten dazu, daß in diesem Fall kein handelsübliches Mikroskop zum Einsatz kommen konnte, sondern daß der für die Strahlerzeugung erforderliche Aufbau aus einzelnen Komponenten selbst zusammengestellt wurde. Handelsübliche Auflichtmikroskope bieten in den meisten Fällen unter dem Objektivrevolver nicht genügend Freiraum zum Aufbau der Linearversteller, des Kippverstellers und des Probenträgers, außerdem ließe sich eine Implementierung der ausgewählten 150 W Xe-Lichtquelle nicht ohne weiteres realisieren. Weitere kritische Punkte wären die Unterbringung eines Strahlchoppers und eines Interferenzfilterrades bzw. eines Monochromators zur Durchführung wellenlängenabhängiger Messungen im Strahlengang. Außerdem soll lediglich ein punktförmiger Lichtfleck auf die Oberfläche der Solarzelle projiziert werden, so daß ein monokularer Aufbau den Anforderungen in jedem Fall genügt.

Im folgenden soll der aufgrund oben genannter Entscheidungen realisierte optische Aufbau erläutert werden. (Detaillierter Strahlengang siehe Anhang)

Der Abbildungsstrahlengang im zusammengesetzten Mikroskop bei Mikroskopobjektiven mit unendlicher Bildweite zeigt die folgende Abbildung:

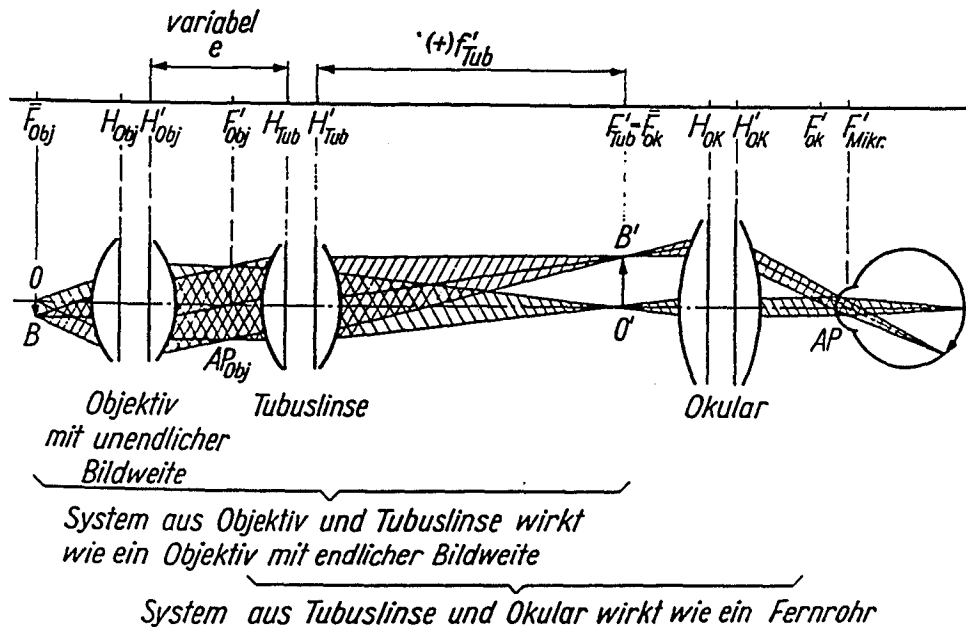


Abb. 7.5 Abbildungsstrahlengang im zusammengesetzten Mikroskop /7/

Ein Objektiv mit unendlicher Bildweite bzw. ein Objektiv, bei dem sich das Objekt in der vorderen Brennebene befindet, erzeugt zwischen Objektiv und Tubuslinse einen Bereich parallelen Strahlengangs, d. h. für jeden Objektpunkt ist das abbildende Strahlenbündel parallel. Hierdurch wird, wie bereits erwähnt, der Abstand zwischen Objektiv und Tubuslinse mit gewissen Beschränkungen frei wählbar, ohne hierdurch die Lage des Zwischenbildes oder seiner Größe zu beeinflussen. Die Tubuslinse wird so angeordnet, daß das vom Objekt erzeugte Zwischenbild im vorderen Brennpunkt des Okulars liegt.

Dieses Zwischenbild wird dann vom Auge durch das Okular vergrößert betrachtet. Zur Errechnung der Mikroskopvergrößerung bzw. des Abbildungsmaßstabs können die Gleichungen, die für Mikroskope mit Objektiven mit endlicher Bildweite gelten, umgewandelt werden, indem man den Abbildungsmaßstab des Objektivs mit endlicher Bildweite M_{Obj} durch M_{Sys} ersetzt, wobei M_{Sys} der Abbildungsmaßstab aus Objektiv mit unendlicher Bildweite und Tubuslinse mit der folgenden Beziehung ist: /7/

$$M_{Sys} = -f'_{Tub}/f'_{Obj}$$

oder
$$M_{Sys} = -v_{Obj} \cdot f'_{Tub}/250 \text{ mm}$$

oder $M_{\text{SYS}} = -V_{\text{Obj}} \cdot q_{\infty} \quad q_{\infty} = f'_{\text{Tub}}/250 \text{ mm}$

wobei f'_{Tub} Brennweite der Tubuslinse
 V_{Obj} Vergrößerung des Objektivs
 f'_{Obj} Brennweite des Objektivs
 q_{∞} Tubusfaktor

Die Gesamtbrennweite des Mikroskops ist jetzt durch die Gleichung:

$$f'_{\text{Mikr}} = -f'_{\text{Obj}} \cdot f'_{\text{Ok}}/f'_{\text{Tub}} \quad \text{gegeben.}$$

mit f'_{Ok} Brennweite des Okulars

Daraus folgt für die Gesamtvergrößerung des Mikroskops:

$$V_{\text{Mikr}} = 250 \text{ mm}/f'_{\text{Mikr}} = -250 \text{ mm} \cdot f'_{\text{Tub}}/f'_{\text{Obj}} \cdot f'_{\text{Ok}}$$

somit $V_{\text{Mikr}} = -V_{\text{Obj}} \cdot q_{\infty} \cdot V_{\text{Ok}} \quad /7/$

Die Einspiegelung des Beleuchtungsstrahlengangs erfolgt im Bereich des parallelen Strahlengangs zwischen Objektiv und Okular.

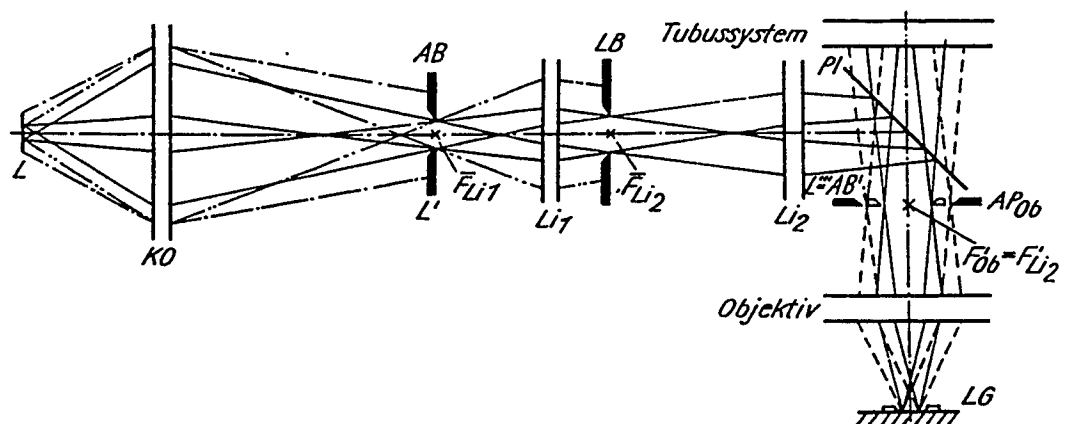


Abb. 7.6 Einspiegelung des Beleuchtungsstrahlengangs am Beispiel des Köhlerschen Beleuchtungsprinzips /7/

Die zu Beginn erwähnten Besonderheiten haben zu der im folgenden Schema gezeigten Realisierung des optischen Aufbaus geführt (Strahlengang, siehe Anhang).

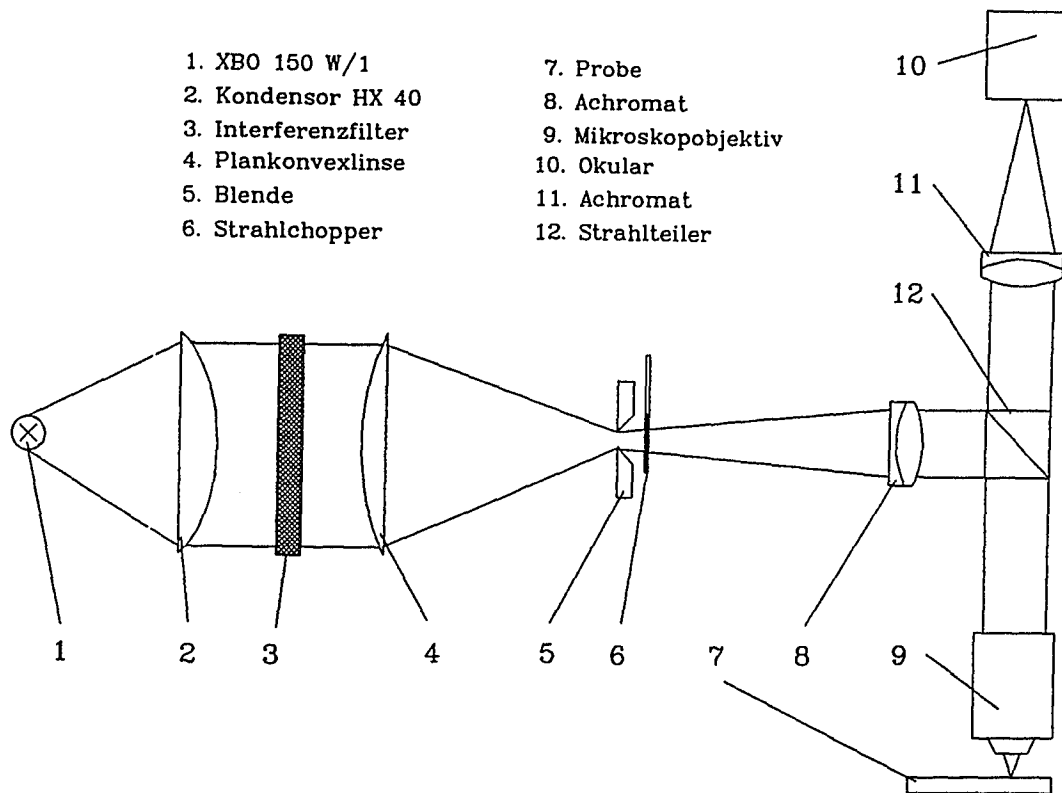


Abb. 7.7 Schematische Darstellung der Strahlerzeugung

Der Kondensor der Lichtquelle wird so justiert, daß der Lichtbogen der Lampe ins Unendliche abgebildet wird, man also ein, bis auf die Divergenz, die von der endlichen Ausdehnung des Lichtbogens herrührt, paralleles Strahlenbündel (Durchm. 49 mm) erhält. Dieser Bereich paralleler Strahlen dient der Anordnung der zur Durchführung wellenlängenabhängiger Messung benötigter Interferenzfilter. Zur Selektierung bestimmter Wellenlängen wurden mehrere Interferenzfilter ausgesucht, die eine ungefähre Abdeckung des sichtbaren Spektrums in folgenden Schritten erlauben: 405 nm, 488 nm, 546 nm, 589 nm, 650 nm, 694 nm, 768 nm.

Hinter dem Interferenzfilter ist eine Plankonvexlinse mit einer Brennweite von 150 mm mit der Aufgabe angeordnet, den Lichtbogen der Xe-Lampe auf eine Blende mit 1 mm Öffnung abzubilden. Um einen homogenen Strahl zu erhalten, sollte die Blendenöffnung gut ausgeleuchtet werden, ohne daß diese einen zu großen Durchmesser bezogen auf das Leuchtfeld der Lampe haben sollte. Auch eine wesentlich kleinere Blende sollte, um zu großen Intensitätsverlust zu vermeiden, nicht eingesetzt werden.

Aus der Anwendung einfacher Abbildungsgleichungen für Linsensysteme erhält man für die Objekthöhen:

$$h_1 \cdot f'_2 = h_2 \cdot f'_1$$

mit h_1, h_2 Objekt- und Bildhöhe
 f'_1, f'_2 Brennweiten der abbildenden Linsen

aus der sich die unbekannte Objekthöhe leicht bestimmen läßt:

$$h_2 = h_1 \cdot f'_2 / f'_1$$

Bei einer Leuchtfeldgröße der Xe-Lampe von 0,5 mm x 2,2 mm ergibt sich bei 40 mm Brennweite des Kondensors und 150 mm Brennweite der Plankonvexlinse eine Ausleuchtung der Blendenöffnung von 8,25 mm x 1,875 mm. Die Abbildung des unsymmetrischen Lichtbogens der Lampe auf die Blende erzeugt so einen kreisrunden Lichtpunkt, der durch geeignete Linsen und Mikroskopobjektive auf die Zellenoberfläche abgebildet werden kann.

Zu beachten ist, daß hinter der Blende die Anordnung eines Choppers zur "Zerhackung" des Lichtstrahls möglich sein muß, da bei diesem Meßverfahren aufgrund der zu erwartenden kleinen Meßwerte der Einsatz der Lock-In Technik sinnvoll bzw. notwendig ist. Der sich hinter der Blende aufweitende Strahl muß zur Einspiegelung in den parallelen Strahlengang zwischen Objektiv und Tubuslinse ebenfalls parallelisiert werden. Hierzu wird die Blende durch einen Achromaten, zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften, ins Unendliche abgebildet. Durch den Strahlteiler wird das Strahlenbündel rechtwinklig in das Mikroskopobjektiv abgelenkt, durch das das Bild der Blende dann auf die Probe projiziert wird. Durch das Okular kann der Lichtpunkt auf der Zelle vergrößert betrachtet werden. Das Abbildungsverhältnis für das Bild der Blende wird durch die Brennweite der Linsen und des Mikroskopobjektivs bestimmt, da sich das Objekt, die Solarzelle, in der Brennebene des Mikroskopobjektivs befindet.

Bei der Auswahl der Linse, zur Abbildung der Blende, ist darauf zu achten, daß ihre Brennweite aus Platzgründen und aus Gründen des sonst zu großen Intensitätsverlustes durch die Strahlaufweitung nicht größer als 200 mm und wegen der Chopperanordnung auch nicht kleiner als 100 mm sein darf. Für das Mikroskopobjektiv gilt, daß ein möglichst großer Arbeitsabstand und damit eine große Schärfentiefe angestrebt ist. Die Vergrößerungen der angebotenen Objektive liegen bei 4fach, 10fach, 20fach usw. mit Brennweiten von 30,98 mm, 16,85 mm und 8,15 mm. Die gewünschten Strahldurchmesser sollen 0,4 mm, 0,1 mm und 0,04 mm betragen.

Die Achromate können mit Abstufungen in den Brennweiten von 100 mm, 140 mm, 160 mm und 200 mm geliefert werden.

Die erzeugbaren Strahldurchmesser können auch hier durch Einsetzen in die einfache Abbildungsformel abgeschätzt werden:

Blende:	ϕ 1 mm
Achromat:	$f = 100$ mm
Objektiv:	4x, $f = 30,98$ mm
= > Strahldurchmesser:	309,8 μ m

Durch Verwendung einer Blende mit einem Durchmesser von 1,3 mm kann der Strahldurchmesser auf 403 μ m gesteigert werden.

Blende:	ϕ 1 mm
Achromat:	$f = 200$ mm
Objektiv:	10x, $f = 16,85$ mm
= > Strahldurchmesser:	84,25 μ m

Mit einer Blende ϕ 1,2 mm kann der Strahldurchmesser genau auf 101,1 μ m eingestellt werden. Oder:

Blende:	ϕ 0,7 mm
Achromat:	$f = 200$ mm
Objektiv:	4x, $f = 30,98$ mm
= > Strahldurchmesser:	108 μ m

Folgende Komponenten werden zur Erzeugung des kleinsten Strahldurchmessers eingesetzt:

Blende:	ϕ 1 mm
Achromat:	$f = 200$ mm
Objektiv:	20x, $f = 8,15$ mm
= > Strahldurchmesser:	40,75 μ m

Die Blende mit 1 mm Durchmesser war im Lieferprogramm des Herstellers enthalten, die anderen oben aufgeführten Blenden müssen zur genaueren Einstellung der Strahldurchmesser erst in der Werkstatt gefertigt werden.

Die weiteren Elemente des optischen Aufbaus sind ein Strahlteilerwürfel, eine Tubuslinse (Achromat) und ein Okular mit 10facher Vergrößerung sowie einer 10 mm Strichteilung in 100 Teilen.

Alle Komponenten, die zum Aufbau des Mikroskoptubus erforderlich sind, also Mikroskopobjektiv, Strahlteiler, Tubuslinse sowie der zweite Achromat zur Abbildung der Blende sind, um einen modularen, stabilen und selbsttragenden Aufbau zu gewährleisten, im Mikrobank-System der Firma Spindler & Hoyer integriert.

Dieses System wird im wesentlichen durch vier parallele Führungsstangen (ϕ 6 mm), mit einem Abstand von je 30 mm zueinander aufgebaut. Die einzelnen Stangen werden durch entsprechend gestaltete Halter miteinander verbunden und fixiert. In den verschiedenen Haltern und Würfeln dieses Systems können unter Verwendung weiterer Bauelemente fast alle beliebigen optischen Komponenten untergebracht werden. So ist z. B. die Aufnahmeplatte für die Mikroskopobjektive an einem speziell für dieses System entwickelten Stellelement mit Mikrometerantrieb (Hub etwa 8 mm) befestigt, um den Lichtstrahl genau auf der Probe fokussieren zu können. Der Einsatz des Strahlteilerwürfels mit einer Kantenlänge von 20 mm und einem Transmissionsgrad von 50 : 50 hat gegenüber einer Strahlteilerplatte den Vorteil, daß es beim Strahldurchgang durch den Würfel nicht zu einem achsparallelen Strahlversatz kommt. Der Strahlteilerwürfel wird auf einem justierbaren Prismenträger befestigt und in den in der Mitte des Tubus angeordneten Multifunktionswürfel montiert. Die Linsen für den Einbau ins Mikrobank-System haben einen Durchmesser von 30 mm und werden komplett montiert in einer Aufnahmeplatte geliefert, so daß sie einfach zu justieren und leicht in den Aufbau zu integrieren sind.

Die übrigen Komponenten, Interferenzfilter, Plankonvexlinse und Blende, die nicht in direktem mechanischen Kontakt mit dem Tubusaufbau stehen, werden mit Reitern und verstellbaren Säulenstiften auf einer breiten optischen Schiene (Hersteller: PI) montiert, die ihrerseits über Führungsstangen seitlich verschoben werden kann. Die Höhenverstellung der Säulenstifte, sowie die Verschiebbarkeit der Reiter und der Grundschiene, erlauben eine 3achsige Justierung der Komponenten, so daß sie der Tubusposition optimal angepaßt werden können.

Das Lampengehäuse steht zur Höhenanpassung an die übrigen Komponenten bzw. zur Anpassung an die optische Achse auf einer Aluminiumplatte, die einstellbar auf vier Edelstahlsäulen befestigt ist.

7.5 Konstruktion des Tubusträgers

Da der Mikroskoptubus relativ frei über den Linearverstellern angeordnet werden muß, eine mechanische Trennung von den übrigen Komponenten gegeben sein soll und noch kein endgültiger Probenhalter und damit auch noch keine feste Position für den Tubus existiert, war zu seiner Aufnahme die Konstruktion einer den Platzbedarf der Verstell-elemente berücksichtigende, mechanisch stabile und in 3 Achsen justierbaren Vorrichtung erforderlich.

Weil auch der Lichtweg nicht "verbaut" werden durfte, blieb nur die Überbauung der Linearversteller mit einer durch das Lochraster der Basisplatte vorgegebenen Überbau-länge von 500 mm.

Entsprechend den Gegebenheiten wurde so eine Vorrichtung entwickelt, die vom Prinzip her einer Containerverladebrücke ähnelt.

Wichtigstes Teil dieser Konstruktion ist ein Adapter, der an die Abmessungen des Mikrobank-Systems angepaßt ist und die Aufnahme des Mikroskoptubus sowie seine Verstellbarkeit in vertikaler und horizontaler Richtung gewährleisten muß. Die vertikale Verstellbarkeit ist wichtig zur Anpassung der Tubushöhe an die unterschiedlichen Mikroskopobjektivlängen, zum Ausgleich unterschiedlicher Probedicken und zur Anpassung an möglicherweise modifizierte Probenträger. Die horizontale Verstellung ermöglicht die Ausrichtung des Tubus über der Probe und den Wechsel des Mikroskopobjektivs.

Der aus drei Einzelteilen bestehende Adapter ermöglicht eine unabhängige Bewegung und Arretierung in zwei orthogonalen Bewegungsrichtungen. Die Führung für den Tubus-Adapter wird aus zwei in den Überbau integrierten Edelstahlstäben gebildet.

Für den Aufbau der eigentlichen Brücke wurden 15 mm Aluminiumvierkantstreben verwendet, die durch versenkte Inbusschrauben verbunden sind.

Die seitlichen Streben der Brücke sind ebenfalls über Edelstahlführungsstäbe in horizontaler Richtung senkrecht zu den Freiheitsgraden des Adapters verschiebbar. Auch in dieser Richtung ist der Brückenaufbau arretierbar.

Zur Arretierung der einzelnen Elemente wurden die Enden der jeweiligen Bauteile mit Schlitzsen versehen, die durch Verspannung mit einer Schraube das Element auf der Führung durch eine kraftschlüssige Verbindung positionieren. Alle Teile des Tubusträgers bis auf die Edelstahlstäbe sind, um unnötige Lichtreflexionen zu vermeiden, mit einer schwarzen Anodisierung versehen.

(siehe Zeichnungen des Tubusträgers im Anhang.)

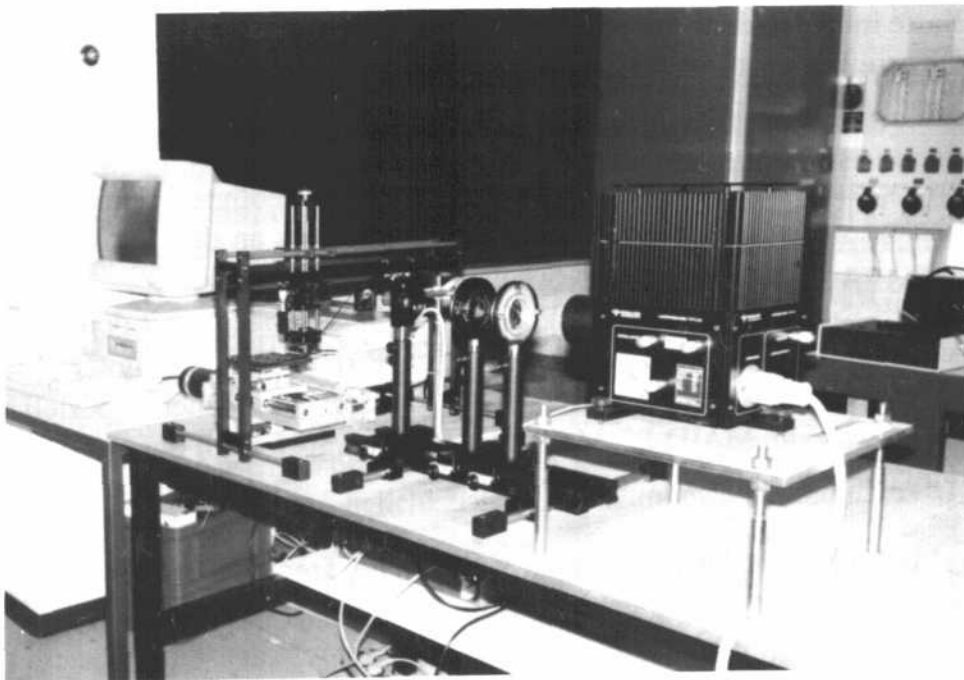


Abb. 7.8 Experimenteller Aufbau

8. Die Steuerung des Meßplatzes

Das Meßverfahren, mit ihm die großen anfallenden Datenmengen und die hiermit verbundene lange Meßdauer, machen einen computergesteuerten, automatisierten Meßvorgang unumgänglich. Die Aufgaben, die der Computer zur Durchführung einer Messung im wesentlichen erfüllen muß, sind die Positionierung der Probe, das Einlesen, Auswerten, Abspeichern und Anzeigen der Meßwerte sowie die Überwachung digitaler Signale und die Ausgabe von Steuerspannungen. Der für diesen Meßplatz (siehe Abb. 5.1 Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus) verwendete Steuerungsrechner ist ein IBM-kompatibler "386er AT" mit mathematischem Coprozessor, VGA-Karte und einem VGA-Farbmonitor. Die zur Erstellung des Steuerprogramms verwendete Programmiersprache ist HT-Basic (siehe hierzu Kap. 9 "Software").

Die entscheidende Schnittstelle, die die Kommunikation des Rechners mit den übrigen Komponenten des experimentellen Aufbaus ermöglicht, ist das MAID- (Modular Acquisition and Instrumentation Device) System, das im Forschungszentrum Jülich, im Institut für Schicht und Ionentechnik, entwickelt wurde und auf die jeweilige Aufgabe abgestimmt, die Steuerung beliebiger Experimentiereinrichtungen erlaubt.

Das System besteht aus folgenden Komponenten, die im allgemeinen in einem 19 Zoll Tischgehäuse mit 3HE (Höhen-Einheiten) untergebracht sind:

1. Gehäuse mit Netzteil und MAID-Bus
2. CPU-Modul zur Verbindung mit dem Steuerungsrechner über IEEE 488 (HP-IP, GP-IB, IEC) Bus oder MAID-PC Karte in Verbindung mit einer PC-Input-Output Karte
3. Diverse Funktionsmodule zur Ankopplung der gewünschten Experimentfunktionen

Das Gehäuse verfügt über 13 Steckplätze, die von den benötigten Funktionsmodulen wahlweise belegt werden können. Zur Ansteuerung können an den Funktionsmodulen Adressen von 1 bis 15 über DIP-Switch-Schalter eingestellt werden.

Im Fall der LBIC-Steuerung wurde zur Verbindung dieses Systems mit dem Steuerungsrechner jedoch keine CPU, die mit verschiedenen Prozessoren und unterschiedlichen Speichern ausgerüstet sein können, verwendet, sondern das neuere speziell für PC-Steuerungen entwickelte MAID-PC Modul. Der Datentransfer mit dem Rechner erfolgt in diesem Fall über eine PC-Bus Steckkarte.

Durch das MAID-PC Modul erfolgt eine galvanische Trennung der Signale zwischen Rechner und MAID-System mittels Opto-Koppler. Opto-Koppler dienen zur optischen Übertragung digitaler Daten. Sie bestehen aus einer Luminiszenzdiode, einem Lichtleiter und einem Lichtempfänger. Der Empfänger besteht aus einem lichtempfindlichen Transistor, der oft mit einem Schmitt-Trigger ergänzt wird, um die Rechteckform der Signale wiederherzustellen. Die Isolation der Opto-Koppler trennt auch Hochspannungskreise bis zu einigen kV und vermeidet den Übertrag von Störungen, insbesondere von Störimpulsen, die häufig die übertragenen Daten verfälschen /17/.

Die zur Experimentsteuerung und zur Datenerfassung ausgewählten Funktions-Ein-schubkarten sind neben dem MAID-PC Interface eine Digital-Analogwandlerkarte DA312 mit 3 Ausgängen und einer Auflösung von 12 bit zur Erzeugung der Lock-In Steuerspannungen für Empfindlichkeit (Sensitivity) und Zeitkonstante (Time Constant). Der Ausgang der DA312 Karte kann Spannungen im Bereich von 0 bis 10 V oder von -10 V bis +10 V liefern. Desweiteren eine Analog-Digitalwandlerkarte AD812 mit 8 Eingängen und den Spannungsbereichen -10 V bis +10 V oder -1 V bis +1 V sowie einer Auflösung von 12 bit. Diese Karte wird zum Einlesen der Meßwerte, die durch den Lock-In verstärkt werden, eingesetzt. Hinzu kommen zwei Schrittmotorkarten STMOT zur Generierung der Schrittmotorimpulse für 2phasige Schrittmotoren, mit einer Programmierbarkeit von 65 000 Schritten für jede Drehrichtung. Außerdem kommt eine Input-Output Karte IO16 zur Anwendung, die einen 16 bit digitalen Input bzw. Output ermöglicht. Mit ihr werden digitale Lock-In Status-Signale überprüft. Ferner steht noch eine 8fach Relais Karte RE8 zur Verfügung, die die Umschaltung zwischen Strom- und Spannungsmessung übernehmen kann.

Die Meßwerte, die mit diesem System erfaßt werden sollen, sind der lichtstrahlinduzierte Kurzschlußstrom bzw. die Leerlaufspannung. Die Meßwerte liegen aufgrund des kleinen Strahldurchmessers des Scan-Strahls in einem entsprechend kleinen Bereich und sind bei möglicher Bias-Bestrahlung mit einem so hohem Untergrundsignal behaftet, daß sie ohne den Einsatz der Lock-In Technik nur schwerlich oder gar nicht gemessen werden könnten. Ein Lock-In Verstärker kann aber durch Erzeugung eines Referenzsignals, in diesem Fall durch "Zerhacken" des Strahls, durch einen optischen Chopper einen möglicherweise hohen Untergrund vom eigentlichen Meßsignal abziehen und gleichzeitig durch Integration über mehrere Meßwerte einen Mittelwert bilden.

Der für diesen Aufbau ausgewählte Lock-In Verstärker der Firma HMS, bezeichnet als DYNATRAC 2Phasen Heterodyn Lock-In Verstärker, läßt sich aus Einzelbausteinen modular entsprechend der gestellten Meßaufgabe zusammenstellen. Hier besteht er aus einem Netzteil, dem eigentlichen Verstärker-Modul und einem Chopper-Modul. Die einzelnen Module werden untereinander mit Modul-Bus-Verbindern zu einer Einheit gekoppelt. Der Lock-In Verstärker ist für einen Frequenzbereich von 2 Hz bis 2 kHz geeignet und verfügt über separate Strom- und Spannungseingänge mit Empfindlichkeiten von $1 V_{\text{eff}}$ bis $1 \mu V_{\text{eff}}$ für den Spannungseingang und $10^{-4} A_{\text{eff}}$ bis $10^{-10} A_{\text{eff}}$ für den Stromeingang. Zur Signalübertragung werden für Ein- und Ausgänge BNC-Leitungen verwendet, wobei beim Anschluß der Probe darauf geachtet wurde, nur möglichst kurze Leitungen (um die Einstrahlungsmöglichkeiten für Störimpulse zu minimieren) für den elektrischen Anschluß zu verwenden.

An den Ausgängen des Lock-In können die verstärkten Signale als 0 bis $\pm 10 V$ für $X(\cos\alpha)$ und 0 bis $\pm 10 V$ für $Y(\sin\alpha)$ oder umschaltbar auf 0 bis $\pm 10 V$ für die Amplitude A und $\pm 180^\circ$ Phase abgegriffen und mit der AD812 Karte eingelesen werden. Außerdem gibt es einen "Overload-" Ausgang, der ein Überschreiten des eingestellten Meßbereichs durch die Meßwerte digital signalisiert. Dieses Signal wird mit der IO16 Karte überprüft.

Die Einstellung bzw. Steuerung des Lock-In kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

1. Manuelle Einstellung von Empfindlichkeit, Phasenlage und der Zeitkonstanten am Verstärker-Modul
2. Steuerung über analoge Signale
3. Steuerung über IEEE 488 und Zusatz-Modul

Da für die vorliegende Anwendung zunächst nur die ferngesteuerte Einstellung für Empfindlichkeit und Zeitkonstante erforderlich ist, wurde die 2. Möglichkeit gewählt. Die Abhängigkeit von der eingestellten Zeitkonstanten und der Empfindlichkeit von den durch die DA312 Karte ausgegebenen Steuerspannungen ist in den folgenden Abbildungen zu sehen:

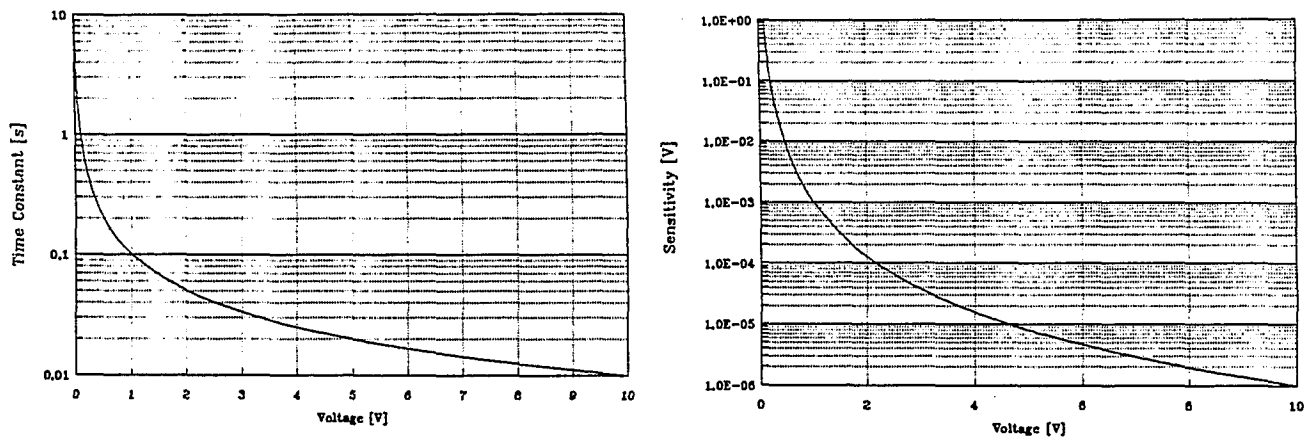


Abb. 8.1 Zeitkonstante und Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Steuerspannung

Das Chopper-Modul zum Antrieb des Choppers und zur Erzeugung des Referenzsignals arbeitet in einem Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 3 kHz je nach gewähltem Chopperblatt. Die Chopperblätter für den gewählten Antriebskopf haben einen Durchmesser von 70 mm und werden von einem 11poligen DC-Präzisionsmotor mit eisenlosem Rotor angetrieben. Die Erzeugung des Referenzsignals erfolgt durch eine Blattablaistung mit einer IR-Gabellichtschranke.

9. Software

Zur automatisierten Durchführung einer Messung ist es notwendig, Vorgänge und Funktionen zu steuern. Um diese Aufgaben zu übernehmen, wurde ein Computerprogramm entwickelt. Die Programmiersprache, die hierzu gewählt wurde, ist das High-Tech-Basic V. 3.1.

HT-Basic emuliert auf DOS-Rechnern, das im technisch-wissenschaftlichen Bereich weit verbreitete und bewährte HP-Basic der Workstations HP 9000 Serie 200/300 /16/. Die Programmiersprache HP-Basic ist ähnlich wie die Programmiersprache PASCAL aufgebaut, jedoch erfolgt der Programmablauf bei Basic zeilennummernorientiert. Auch hier können Variablen und Felder definiert werden. Die PASCAL-Prozeduren sind mit den Basic Unterprogrammen zu vergleichen, und auch die Funktionen sind ähnlich aufgebaut. Genau wie in PASCAL gibt es auch in Basic die verschiedenen Möglichkeiten der Schleifenbildung, Real- und Integerdarstellungen sowie Sprunganweisungen und mathematische Operatoren. Unterschiede bestehen zum Beispiel darin, daß in Basic beliebig große Felder definiert werden können und daß hier sehr leistungsfähige Graphikfunktionen geboten werden, so daß sich diese Programmiersprache für wissenschaftliche Anwendungen sehr gut eignet.

Sie umfaßt den gesamten HP-Basic 5.1 Befehlssatz und fast alle Binärdateien. Im Quellcode vorliegende HP-Basic Programme sind sofort lauffähig.

Dieses Programmpaket bietet sich im Fall des LBIC-Meßplatzes ganz besonders an, weil die Steuerung eines relativ kompakten Meßplatzes durch einen IBM-kompatiblen PC wesentlich kostengünstiger durchzuführen ist, als die Benutzung der HP-Hard- und Software. Die Geschwindigkeitseinbußen bezüglich der Rechenleistung, im Gegensatz zu den HP-Workstations, sind für das LBIC-Experiment unkritisch und durch Verwendung eines mathematischen Coprozessors auch nicht so groß.

Ein weiteres Argument, das für den Einsatz dieser Software spricht, besteht darin, daß für das hier zur Anwendung kommende, modulare Steuerungssystem MAID die Treiber-routinen in ausgereifter Form zur Verfügung standen.

Dieses Treiberprogramm, das die konkrete Ausführung der einzelnen MAID-Funktionen realisiert sowie eine ebenfalls bewährte Routine zur Eingabe (Eingabeeditor) aller für die Messung wichtigen Daten, wurden in das für die Steuerung des LBIC-Meßplatzes erstellte Programm implementiert.

9.1 Das Steuerprogramm für den LBIC-Meßplatz

Die Zielsetzung, die durch dieses Programm erreicht werden sollte, war die automatisierte Durchführung von Messungen an rechteckigen Proben mit beliebigen Abmessungen. Hieraus ergeben sich dann die einzelnen Aufgaben, die das Programm zu erfüllen hat.

Zuerst müssen aus den Meßdaten aus dem Eingabeeditor die für die interne Abwicklung der Messung wichtigen Daten berechnet werden. In einer nächsten Routine wird die Möglichkeit gegeben, die zu messende Probe zu justieren.

Sie muß genau waagerecht unter dem Scan-Strahl positioniert werden, um einen gleichbleibenden Strahldurchmesser während des Meßvorgangs zu gewährleisten. Die Routine bietet die Möglichkeit, die Probe in X- und Y-Richtungen unter Verwendung der Cursor-Steuertasten des Keyboards zu verfahren, um dabei eine Winkeleinstellung der Probe über den Kippversteller und eine Fokussierung des Strahls durch das Mikroskopobjektiv vorzunehmen. Hiernach wird die Probe ebenso in die Startposition für die Messung gebracht. Nach Erreichen der Ausgangsposition läuft eine Routine zur automatischen Einstellung der Lock-In Empfindlichkeit ab. Hierbei werden an mehreren Stellen der Probe Meßwerte aufgenommen und der Meßbereich entsprechend der Größe dieser Werte festgelegt. Hierzu muß die Probe bereits abgedunkelt sein.

Im Anschluß an diese Prozedur kann die eigentliche Messung gestartet werden. Nach dem Start der Messung ist bis zum Abspeichern der Meßwerte kein weiterer Eingriff erforderlich. Das Programm übernimmt selbständig den Vorschub der Meßzelle zum nächsten Meßpunkt, die Aufnahme eines Meßwertes, evtl. bei Datenreduzierung, die Berechnung eines Mittelwertes, die Zuordnung einer entsprechenden Fehlfarbe zum Meß- bzw. Mittelwert und die Darstellung des Meßwertes, entsprechend seiner Position auf der Zelle am Bildschirm. Nach Beendigung einer Messung können die eigentlichen Meßwerte und die für die Messung wichtigen Daten auf einem Speichermedium abgelegt werden. Natürlich bietet das Programm auch die Möglichkeit, einmal abgespeicherte Messungen wieder einzuladen, um sie mit anderen Messungen zu vergleichen, oder um die Meßwerte einmal weiterzuverarbeiten (z. B. farbige 3-D-Grafik). Außerdem beinhaltet das Programm eine wenn auch erst ansatzweise realisierte Routine für eine Sek-tormessung. Hier können Zellenabschnitte mit erhöhter Auflösung nochmals untersucht werden.

9.2 Der Eingabeeditor

Hier werden dem Programm vor einer Messung alle notwendigen Informationen mitgeteilt, die es für die Ausführung bzw. für die Berechnung weiterer wichtiger Daten braucht.

So z. B. die Probenkennung, die später Aufschluß darüber gibt, um welche Art Zelle es sich handelt hat (kristallin, polykristallin, amorph).

Desweiteren werden die Abmessungen der aktuellen Zelle in X- und Y-Richtung entsprechend der Anordnung der Vorschubeinheiten abgefragt.

Als nächstes erfolgt die Eingabe der Chopperfrequenz für den Meßstrahl, die am Lock-In jedoch noch manuell eingestellt werden muß, aber deren korrekte Eingabe unbedingt erforderlich ist. Danach hat der Bediener die Möglichkeit, Wichtungsfaktoren für die Zeitkonstante und die Meßzeit festzulegen. Für die Zeitkonstante bedeutet ein Wichtungsfaktor von 100 % die Mittelwertbildung aus 10 Meßwerten für jeden Meßwert durch den Lock-In, d. h. die Zeitkonstante beträgt 10 mal Chopperfrequenz.

Die Meßzeit legt eine Wartezeit vor der Aufnahme eines neuen Meßwertes fest, die die Einstellzeit auf einen neuen Meßwert an einem neuen Ort auf der Zelle berücksichtigt. Bei 100 % Wichtung der Meßzeit entspricht die Wartezeit zweimal der Zeitkonstanten. Durch die nächste Eingabe wird ein Faktor zur Reduzierung der Meßdaten festgelegt. Je nach Auflösung (Strahldurchmesser) und Zellengröße kann dieser Faktor nicht gleich 1 sein. Dies hängt zur Zeit noch mit den Möglichkeiten der Bildschirmdarstellung zusammen, sollte aber in jedem Fall noch geändert werden. Auf der anderen Seite macht bei feinen Strukturen oder wenigen Meßwerten eine Datenreduzierung keinen Sinn. Mit der letzten Eingabe wird noch festgelegt, ob eine Messung des Kurzschlußstroms oder der Leerlaufspannung durchgeführt werden soll. Hierbei ist zu beachten, daß am Lock-In für die jeweilige Messung ein anderer Eingang gewählt werden muß, der zusätzlich durch einen Wahlschalter bestimmt wird.

Für alle Eingaben werden durch den Eingabeeditor bestimmte Vorgaben gemacht, die beim Aufruf des Editors angezeigt werden. Die Benutzereingaben werden auf ihre "Sinnhaftigkeit" hin überprüft, um Fehlfunktionen zu vermeiden.

9.3 Berechnung weiterer Daten

Wird die Routine zur Probenjustierung bzw. zum Start einer Messung aufgerufen, werden zuerst in einem Berechnungsunterprogramm weitere für die Abwicklung des Meßvorgangs wichtige Daten ausgehend von der Spezifizierung in der Eingabemaske bestimmt.

Anhand der Zellengröße wird z. B. die Anzahl der Motorschritte bis zum nächsten Meßpunkt, die Anzahl der Farbquadrate für die Bildschirmdarstellung usw. berechnet. Diese Werte bekommen die aufrufenden Routinen zur Probenjustierung bzw. zur Messung übergeben.

9.4 Die Erfassung der Meßwerte

Das Unterprogramm "Messung" sorgt für die richtige Positionierung der Proben zum jeweils nächsten Meßpunkt, das Einlesen des aktuellen Meßwertes in ein Meßwertfeld und ruft Routinen zur Farbauswahl und zur graphischen Anzeige auf.

Die Meßroutine (das Meßunterprogramm) ruft nach dem Einlesen und Ablegen des aktuellen Wertes in einem Feld weitere Routinen zur Verarbeitung der Meßwerte auf. Das heißt, dem Meßwert wird eine entsprechende Farbe aus der Farbskala zugeordnet und er wird als Farbquadrat am Bildschirm angezeigt (jedem Meßwert wird eine seinem Wert entsprechende Fehlfarbe zugeordnet).

Durch die Anzeige der einzelnen Meßwerte als Farbquadrate entsteht ein topographisches Bild der orts aufgelösten Empfindlichkeit der Solarzelle.

9.5 Durchführung von Sektormessungen

Diese noch nicht ganz fertiggestellte Routine soll eine (nochmalige) abschnittsweise Untersuchung einer Zelle ermöglichen. Das Ziel hierbei liegt darin, Zellen, die mit grober Auflösung vermessen wurden, an den interessanten Stellen, die z. B. durch besonders hohe oder besonders niedrige Intensität bzw. Stellen, die durch Unregelmäßigkeiten aufgefallen sind, nochmals mit höherer Auflösung (bei gleichem Strahldurchmesser, wenn vorher mehrere Meßwerte zusammengefaßt wurden, ohne Zusammenfassung der Meßwerte) oder bei kleinerem Strahldurchmesser zu vermessen.

Besonders sinnvoll erscheint diese Methode in Verbindung mit mehrmaliger Vermessung des interessierenden Sektors bei veränderlichen Wellenlängen, um detailliertere Informationen über einen Defekt und dessen mögliche Ursachen zu erhalten.

9.6 Abspeicherung der Meßdaten

Um die Meßdaten zu konservieren, sie mit anderen Messungen vergleichen zu können und um die Meßdaten später weiterverarbeiten zu können, werden die Meßwerte und alle weiteren für die Messung wichtigen Daten auf Massenspeichern, im allgemeinen Disketten, abgelegt. Zur Reduzierung der abgespeicherten Datenmengen werden die Meßwerte aus einem ursprünglich großen Feld mit 125×125 bzw. später 256×256 oder mehr Meßpunkten in ein Feld umgespeichert, das nur die tatsächlichen Meßwerte enthält. Der Dateiname für die aktuell abzuspeichernde Messung wird aus dem Datum, der Tageszeit und Kennbuchstaben generiert.

Ebenso gibt es auch eine Routine, um die abgespeicherten Daten wieder zu laden und sich das Meßergebnis mit den wichtigsten Daten anzeigen zu lassen.

Das Steuerprogramm in seiner jetzigen Form erlaubt die automatisierte Messung von Kurzschlußstrom und Leerlaufspannung für beliebige Zellen bzw. Zellenabschnitte mit variablen Strahldurchmessern und verschiedenen Wellenlängen bis zu einer maximalen Zellengröße von $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, desweiteren die graphische Darstellung und Abspeicherung der Meßwerte.

Da die Anlage in diesem Zustand zunächst einmal funktionsfähig ist, wurde die Entwicklung der Software an dieser Stelle unterbrochen.

10. Erste Meßergebnisse

Nachdem alle für den Aufbau des LBIC-Meßplatzes erforderlichen Komponenten verfügbar, d. h. geliefert oder gefertigt waren, die Tests der Einzelkomponenten bzw. der Funktionsuntergruppen erfolgreich abgeschlossen und diese zur Gesamtanlage verbunden waren, konnten erste Versuchsmessungen an verschiedenen Testzellen durchgeführt werden. Hierbei zeigte sich, daß darauf zu achten ist, daß alle erforderlichen Geräte, speziell der Lock-In Verstärker, sowie MAID und die Xenon-Lampe rechtzeitig vor Beginn einer Messung eingeschaltet werden müssen, damit diese bei Beginn der Messung ihre Betriebstemperatur erreicht haben. Dies gilt besonders für den Lock-In, der in der Erwärmungsphase eine starke Meßwertdrift zeigt.

Bei der Einstellung der unterschiedlichen Strahldurchmesser und bei der Probenpositionierung ist peinlichst genau darauf zu achten, daß die Probe so eingespannt und der Tubus so justiert wird, daß der Probenträger beim Verfahren unter keinen Umständen das Mikroskopobjektiv berühren kann. Besonders wichtig ist dies bei Verwendung des Objektives mit 20facher Vergrößerung, weil es das längste Objektiv und das mit dem kleinsten Arbeitsabstand zur Probe ist.

Weiterhin zeigte sich, daß reproduzierbare Meßwerte nur bei Abdunklung der Probe, z. B. durch Verdunklung des Raumes, erzielt werden konnten. D. h. bei wechselnder Beleuchtung oder Streulichteinfall auf die Solarzelle variieren auch die durch den Lichtstrahl induzierten Ströme und Spannungen, vermutlich aufgrund veränderter Absättigungsverhältnisse bei den Defektstellen.

Für die ersten Messungen wurden eine 100 mm x 100 mm große polykristalline und eine kommerzielle 35 mm x 12 mm große amorphe Siliziumsolarzelle verwendet.

Die polykristalline Zelle besteht aus recht großen Siliziumkristallen, die z. T. Abmessungen von 6 mm bis 8 mm haben.

Die amorphe Probe besteht aus vier in Reihe geschalteten Sektoren, die voneinander isoliert auf demselben Substrat aufgebracht sind.

Der Meßplatz ist, wie die Bezeichnung schon sagt, vor allen Dingen darauf ausgelegt, lichtstrahlinduzierte Kurzschlußströme zu messen. Jedoch bietet die Meßdatenerfassung über den Lock-In Verstärker auch die Möglichkeit die Leerlaufspannung orts aufgelöst zu erfassen.

Da Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom einer Solarzelle unterschiedliche Abhängigkeiten von der Bestrahlungsstärke aufweisen und evtl. auch durch das Vorhandensein von Defektstellen und Korngrenzen unterschiedlich beeinflußt werden, erscheint es durchaus sinnvoll, beide Meßverfahren anzuwenden und die erzielten Ergebnisse zu vergleichen.

Die ersten Messungen an der polykristallinen als auch an der amorphen Zelle zeigten, daß die Solarzellen, deren größter Teil im Dunkeln liegt und von denen nur ein winziges Flächenelement beleuchtet wird, eine recht lange Einstellzeit benötigen, bevor sich die Meßwerte am augenblicklichen Meßort stabilisiert haben.

Dies bedeutet, daß die Chopperfrequenz nicht zu hoch gewählt werden darf und daß die Zelle vor der Aufnahme eines neuen Meßwertes eine gewisse Zeit am momentanen Meßort verharret.

Der oben beschriebene Effekt zeigt sich sowohl bei polykristallinen als auch bei amorphen Zellen sehr deutlich, wenn der Strahl einen Kontaktfinger bzw. einen nichtleitenden Sektorzwischenraum überquert.

Häufig taucht für den ersten Meßwert nach der Überquerung einer oben genannten Stelle kein Farbquadrat in der Anzeige auf, da der Meßwert an dieser Stelle nicht in dem durch die Farbskala abgedeckten Meßintervall liegt, obwohl er dies eigentlich müßte. Dieser Effekt wird durch die zu kurze Einstellzeit für die Zelle nach einer Dunkelphase hervorgerufen. Diese Aussage wird dadurch untermauert, daß die Meßwerte in einer Zeile immer auf der rechten und in der nächsten Zeile immer auf der linken Seite eines Kontaktfingers oder Sektorzwischenraums fehlen, bedingt durch die bidirektionale Rasterung.

Wichtig erscheint hier die Bemerkung, daß der vorgenannte Effekt keine mechanische Hystereseerscheinung sein kann, weil die Genauigkeit der Positioniereinheiten um ein vielfaches besser ist, als die Abstände der Meßpunkte voneinander groß sind.

Außerdem kann man z. T. eine Verschleppung dieses Effektes vom Kontaktgitter in die Zelle beobachten, so daß sich der Meßwert erst nach drei bis vier Schritten (Vorschüben) wieder im angezeigten Meßintervall befindet (siehe hierzu Bilder der Messungen im Anhang).

Die Messungen an der polykristallinen Testzelle wurden bei Chopperfrequenzen zwischen 20 Hz und 30 Hz durchgeführt. Hier zeigt vor allem die Messung des Kurzschlußstroms sehr deutlich die Auswirkungen der einzelnen Kristalle. Je nach ihrer Anordnung und Ausrichtung können innerhalb der Kristallgrenzen relativ homogene Kurzschlußstromverteilungen festgestellt werden, dessen Mittelwert sich aber von Kristall zu Kristall ändert. Auffällig sind an dieser Messung die größeren Bereiche verminderter Intensität am rechten Zellenrand (siehe Abb. 10.4 im Anhang).

Die Messung der Verteilung der Leerlaufspannungen an derselben Zelle liefert im wesentlichen die gleichen Ergebnisse, allerdings streuen die Meßwerte hier wesentlich stärker (siehe Abb. 10.4 im Anhang).

Ganz anders präsentieren sich im Gegensatz hierzu die Meßergebnisse, die an der amorphen Solarzelle erzielt werden konnten. Da amorphes Silizium längere Stromanstiegszeiten aufweist, als polykristallines Material, wurden die Messungen an dieser Zelle nur mit einer Chopperfrequenz von 10 Hz und noch längeren Wartezeiten vor der Aufnahme eines neuen Meßwertes durchgeführt.

Auch hier konnten Homogenitätsschwankungen von etwa 25 % beobachtet werden, jedoch zeigen sich diese (wegen der fehlenden Struktur) in weicheen, kontinuierlichen Farbänderungen der angezeigten Meßwerte.

An dieser Zelle wurden 3 Messungen mit unterschiedlichen Auflösungen der Kurzschlußstromverteilungen durchgeführt.

Zuerst wurde die gesamte Zelle bei einem Strahldurchmesser von 0,4 mm vermessen. Hierbei zeigten sich schon deutliche Schwankungen der lokalen Empfindlichkeit. Bemerkenswert ist, daß hier ein Zellensektor durch besonders niedrige Intensität (verglichen mit den anderen Sektoren) aber recht homogener Empfindlichkeitsverteilung auffällt (siehe Abb. 10.1 im Anhang).

Um die Empfindlichkeitsverteilung innerhalb der einzelnen Sektoren besser erkennen zu können, wurden diese mit höherer Auflösung, also kleinerem Strahldurchmesser (ϕ 0,1 mm) untersucht.

Diese Messungen ergaben sehr detaillierte Informationen über die räumlichen Empfindlichkeiten der einzelnen Sektoren. Die höchsten Empfindlichkeiten weist die Zelle in den inneren Sektorbereichen auf, von denen aus eine relativ gleichmäßige Abnahme des Kurzschlußstroms zu den Randbereichen der Zelle hin zu beobachten ist. Aber auch innerhalb der Sektoren treten z. T. Bereiche geringerer Intensität auf.

Ein weiteres interessantes Ergebnis dieser Messungen ist, daß sich die gemessenen mittleren Stromstärken von Sektor zu Sektor unterscheiden können. Die Meßwerte lagen insgesamt zwischen 17 nA und 25 nA (siehe Abb 10.2 im Anhang).

Bei den oben beschriebenen Einzelsektormessungen konnte auf dem zweiten Zellensektor eine Stelle lokalisiert werden, an der die Empfindlichkeit punktuell so weit absinkt, daß die Meßwerte an dieser Stelle nicht als Farbquadrate angezeigt werden. Zur Überprüfung dieses Effektes und zur genaueren Darstellung wurde dieser Bereich der Zelle nochmals, jetzt mit höchster Auflösung (Strahldurchmesser 40 μ m) vermessen. Auch dieser Effekt, bei dem es sich wahrscheinlich um einen Durchbruch der Schicht handelt, konnte bestätigt werden (siehe Abb. 10.3 im Anhang).

11. Ausblick

Bei den ersten Messungen zeigte sich, daß die Solarzelle bis auf den Meßstrahl abgedunkelt sein muß, um definierte Meßergebnisse zu erhalten.

Um hier eine Verbesserung erzielen zu können, sollte für die Probe eine eigene Streulichtabschirmung mit integrierter Bias-Beleuchtung entwickelt werden. Dies hat erstens den Vorteil, daß die Meßapparatur bei beliebigen äußeren Lichtverhältnissen betrieben werden kann.

Zweitens kann durch eine gleichmäßige, konstante Beleuchtung der Probe ein bestimmter Arbeitspunkt für die Solarzelle eingestellt werden. Durch diese zusätzliche Beleuchtung (z. B. durch direkte Bestrahlung der Probe mit Halogenlampen oder Einkoppeln einer zusätzlichen Beleuchtung in den Strahlengang), werden Ladungsträgerrekombinationszentren abgesättigt, was kürzere Stromanstiegszeiten zur Folge hat und somit kürzere Wartezeiten vor der Aufnahme neuer Meßwerte und evtl. höhere Chopperfrequenzen und damit kürzere Meßzeiten ermöglicht.

Weitere Aufschlüsse über das Absorptionsverhalten einer Solarzelle können Messungen bei verschiedenen Wellenlängen geben. Um solche Messungen auch automatisiert durchführen zu können, ist für die Zukunft die Konstruktion eines schrittmotorgetriebenen Interferenzfilterrades zur Aufnahme von bis zu 5 Interferenzfiltern vorgesehen. Die Einbindung dieser Option macht ferner die Anpassung der Software zur Steuerung des Filterrades und zur zusammenhängenden Aufnahme der entsprechenden Meßwerte notwendig.

Ein weiterer Punkt in bezug auf die Steigerung der Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit des Steuerprogramms ist die Realisierung größerer Freiheiten bei der Wahl der Meßparameter. Aus Gründen der Bildschirmauflösung von 640 x 480 Punkten und der gewählten Darstellungsart der Meßwerte als Farbquadrate ist zur Zeit nur eine Darstellung von 125 Meßwerten in jeder Richtung möglich. Geht die Zahl der Meßwerte über diese Zahl hinaus, müssen die Daten für die Bildschirmdarstellung zusammengefaßt werden.

Zur Erzielung einer höheren Auflösung und auch um größere Zellenflächen mit einem kleinen Strahldurchmesser rastern zu können, ist die Erstellung einer Pixelgraphik erforderlich. Hierbei können mit dem vorhandenen Bildschirm dann bis zu 350 x 350 Meßpunkte angezeigt werden. Noch wesentlich höhere Auflösungen mit noch mehr Meßdaten, erscheinen aus Gründen des hierfür erforderlichen Speicherplatzes nicht sinnvoll. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist eine anschaulichere Visualisierung der Meßergebnisse in einer 3D Darstellung, die evtl. noch farblich unterstützt eine topographische Darstellung der Zellenempfindlichkeit erzeugen könnte.

Eine zusätzliche Möglichkeit für die Erweiterung der Meßapparatur besteht in der Messung des von der Zelle reflektierten Lichtes.

Die Ergebnisse dieser Messungen können Aufschluß darüber geben, ob von Zellenbereichen mit verminderten Kurzschlußstromwerten mehr Licht reflektiert wird als von anderen Bereichen, oder ob es sich um Bereiche mit erhöhter Ladungsträgerrekombination handelt. Auf diese Weise könnten die Ursachen für veränderliche Zelleneigenschaften geklärt werden.

12. Referenzen

1. Paul, R., Optoelektronische Halbleiterbauelemente, B. G. Teubner, Stuttgart, 1985
2. Sze, S. M., Physics of Semiconductor Devices, Second Edition, New York, 1981
3. Heywang, W., Halbleiter-Elektronik Band 18, Amorphe und polykristalline Halbleiter, Springer Verlag, 1984
4. Winstel, G., Weyrich, C., Halbleiter-Elektronik Band 11, Optoelektronik II, Springer Verlag, 1986
5. Bonnet, Dieter, Battelle Institut e.V., Frankfurt a. M., Fuhs, Walter, Universität Marburg, Hoffmann, Winfried, NUKEM GmbH, Hanau, Stromerzeugung durch Solarzellen, Physik - Technologie - Märkte
6. Diplomarbeit v. Carsten Ulrichs, Dynamischer und spektraler Response amorpher Silizium-Solarzellen, Braunschweig 1990
7. Handbuch der Mikroskopie, Beyer, 3. stark bearbeitete Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1988
8. Spindler & Hoyer, Systemelemente, 1990
9. Beyer, W., Wagner, H., Amorphes Silizium für Solarzellen, Sonderdruck aus Grenzflächenforschung und Vakuumphysik, KFA Jülich, 1984
10. Fuhs, W., Dünnschichtsolarzellen aus amorphem Silizium, Philipps-Universität Marburg
11. Orear, Jay, Physik, Carl Hanser Verlag München, 1979
12. Lehr und Übungsbuch Physik, 3. verbesserte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a. M., 1986
13. Damaskinos, S., An improved laser scanning technique for evaluation of solar cells: Application to $\text{CuInSe}_2/(\text{CdZn})\text{S}$ devices, Solar Cells, 26 (1989) 151 - 158
14. Shimokawa, R., Hayashi, Y., Effect of localized grain boundaries in semicrystalline silicon solar cells, Journal of Applied Physics (1. Apr. 1986) vol. 59, no. 7, p. 2571-6

-
15. Ehrhardt, A., et al, Homogeneity evaluation of GaAs LPE solar cells processing by photoluminescence mapping and photoluminescence decay measurements, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Ninth E.C. Photovoltaik Solar Energie Conference, 09.1989
 16. High Tech Basic, User's Guide, 3, 1990
 17. Stöckel, Winterling, Elektrische Meßtechnik, B. G. Teubner Stuttgart, 1987

13. Anhang

1. Messergebnisse

- 1.1 Abb. 10.1 Bild der orts aufgelösten Empfindlichkeit einer 35 mm x 12 mm großen, kommerziellen amorphen Siliziumsolarzelle
- 1.2 Abb. 10.2 Bild der hochorts aufgelösten Empfindlichkeit der in Abb. 10.1 gezeigten amorphen Solarzellen nach Vermessung der einzelnen Sektoren
- 1.3 Abb. 10.3 Bild der höchstorts aufgelösten Empfindlichkeit eines Sektorausschnitts, des 3. Sektors v. o., der in Abb. 10.2 gezeigten Zelle; mit einer Defektstelle mit den Abmessungen $\approx 0,12 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$
- 1.4 Abb. 10.4 Bild der orts aufgelösten Messung von Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom an einer polykristallinen Siliziumsolarzelle

2. Zeichnung des Strahlengangs für einen Strahldurchmesser auf der Probenoberfläche von 0,4 mm

3. Konstruktion des Tubusträgers

3.1 Zeichnung des Tischuntergestells

3.2 Zeichnung der Tisch-Gewinderasterplatte

3.3 Zusammenstellungszeichnung des Tubusträgers in der Vorderansicht

3.4 Zusammenstellungszeichnung des Tubusträgers in der Seitenansicht

3.5 Stückliste Tubusträger

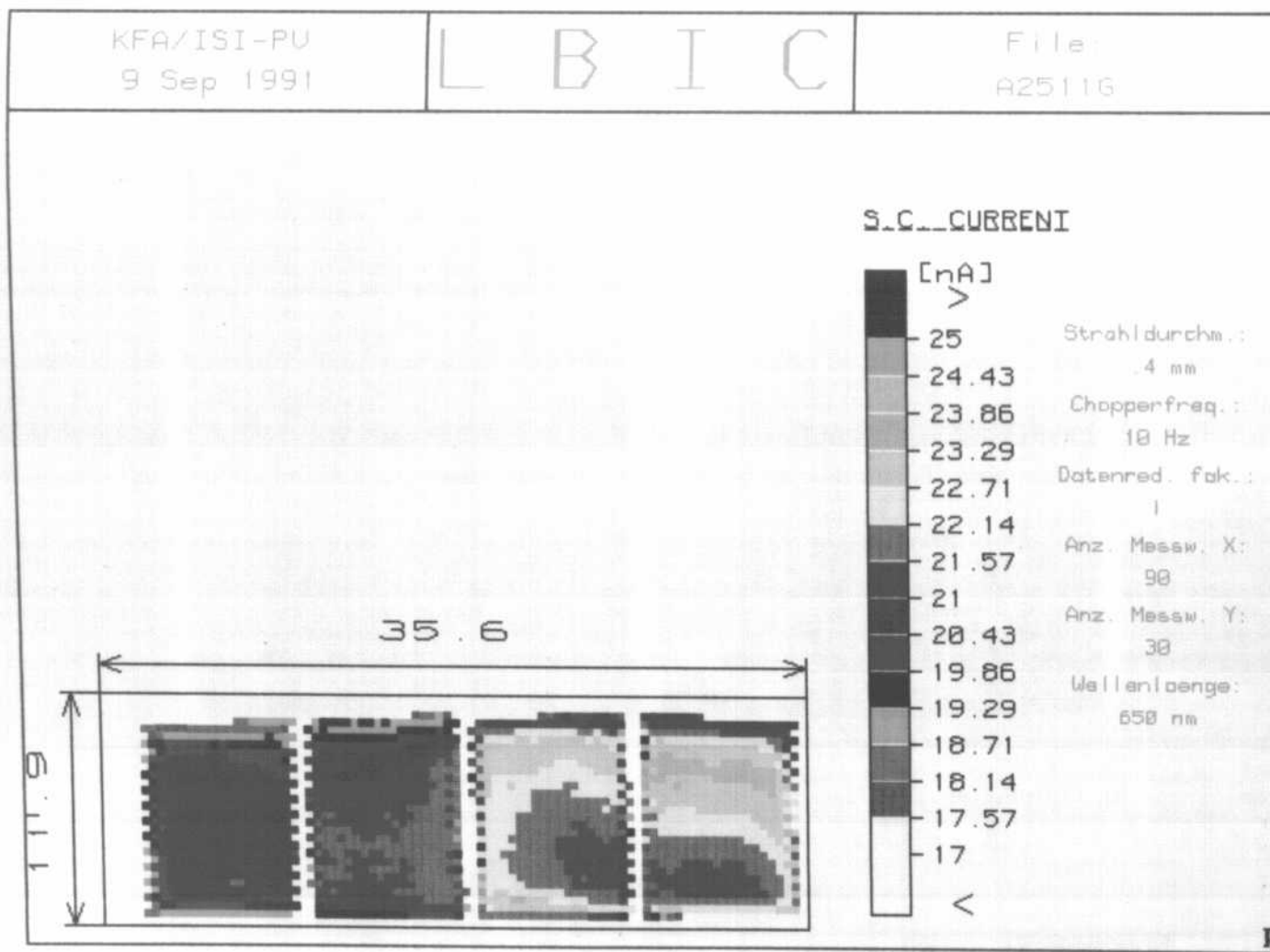


Abb. 10.1 Bild der orts aufgelösten Empfindlichkeit einer 35 mm x 12 mm großen amorphen Siliziumsolarzelle

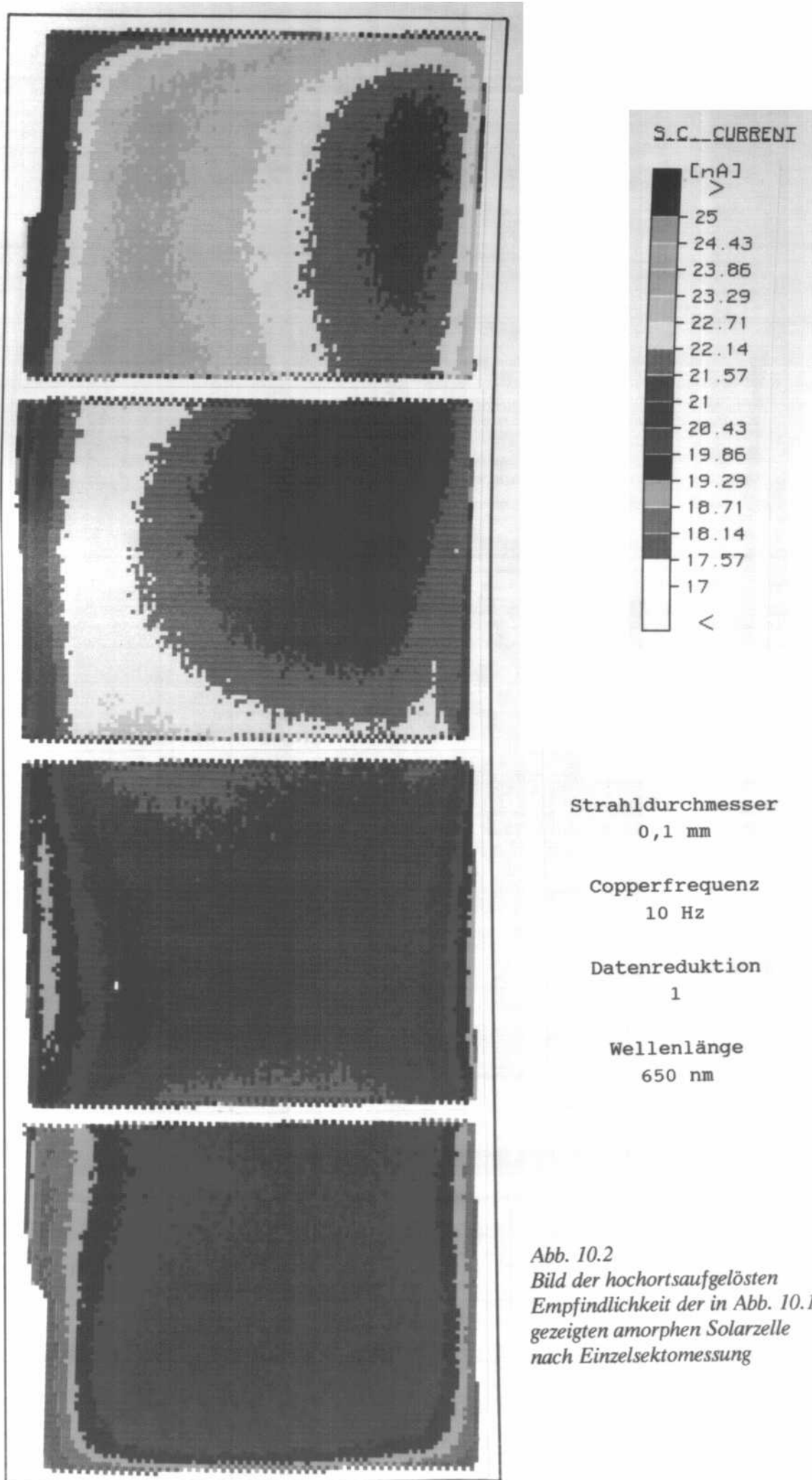


Abb. 10.2
Bild der hochauflösenden
Empfindlichkeit der in Abb. 10.1
gezeigten amorphen Solarzelle
nach Einzelsektommessung

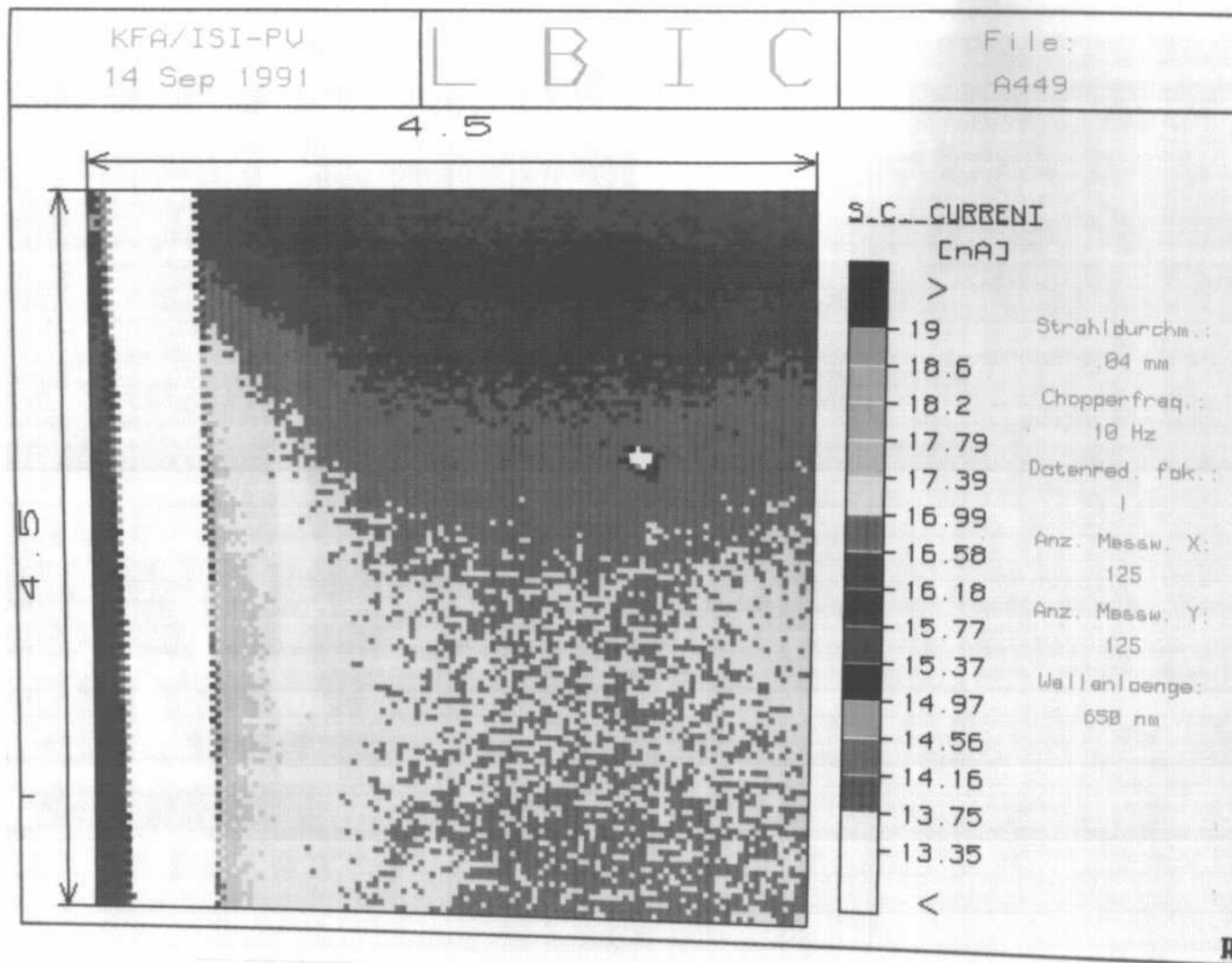


Abb. 10.3 Bild der orts aufgelösten Empfindlichkeit eines Sektorausschnitts, des 3. Sektors v. o., der in Abb 10. 2 gezeigten Zelle; mit Defektstelle ($\approx 0,12 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$)

Q.C. VOLTAGE
[uV]

>

12.4

12.07

11.74

11.41

11.09

10.76

10.43

10.1

9.771

9.443

9.114

8.786

8.457

8.129

7.8

<

Strahldurchm.
.4 mmChopperfreq.
20 HzDatenred. fak
1Anz. Messw. X
125Anz. Messw. Y
125Wellenlänge:
488 nm

S.C. CURRENT

[nA]

>

570

556.4

542.9

529.3

515.7

502.1

488.6

475

461.4

447.9

434.3

420.7

407.1

393.6

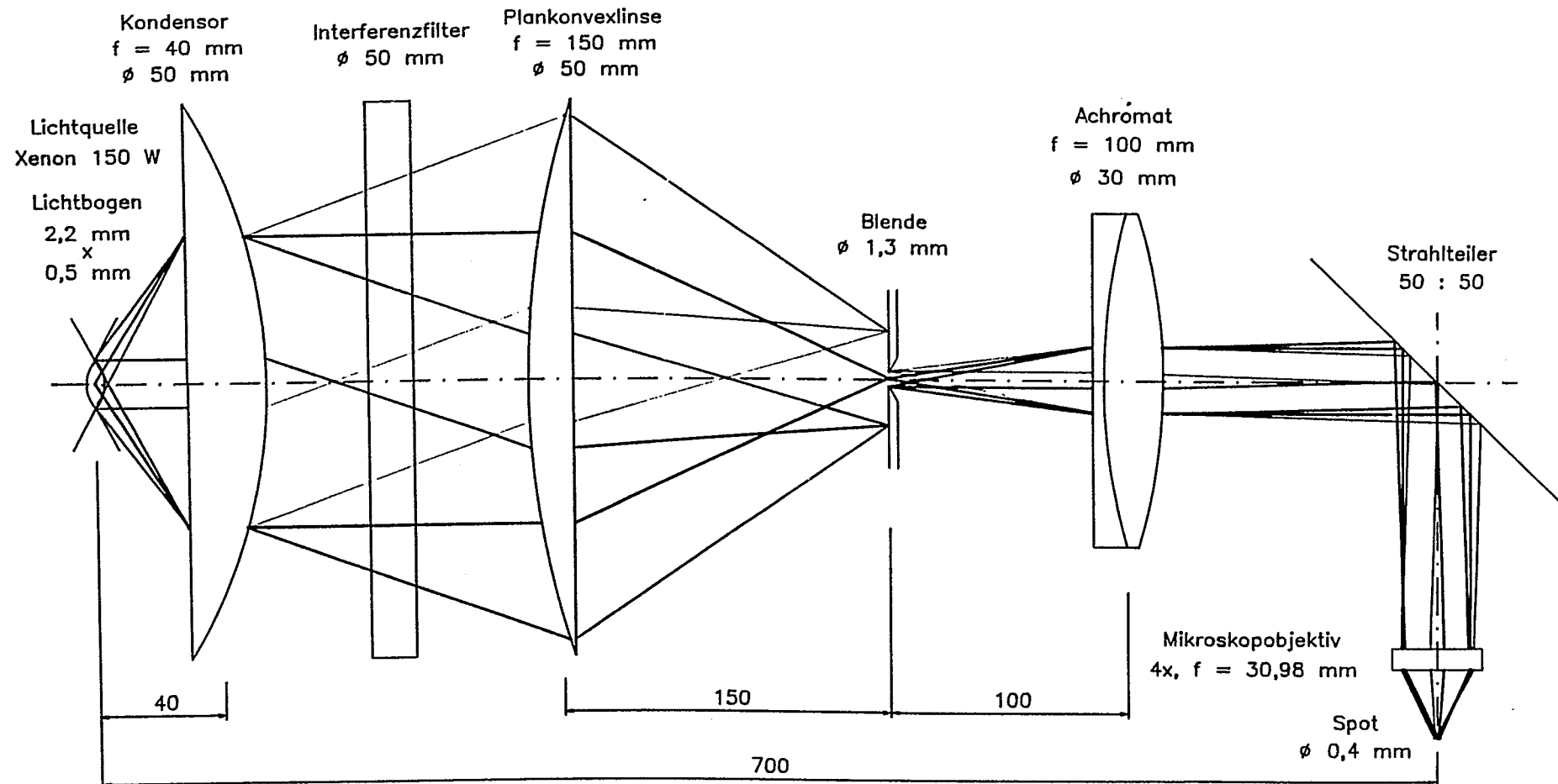
380

<

Strahldurchm.
.4 mmChopperfreq.
30 HzDatenred. fak.
1Anz. Messw. X:
125Anz. Messw. Y:
125Wellenlänge:
488 nm

Abb. 10.4 Bild der orts aufgelösten Empfindlichkeit eines Sektors von 50 mm x 50 mm einer polykristallinen Siliziumsolarzelle
Oben: Messung der Leerlaufspannung
Unten: Messung des Kurzschlußstroms

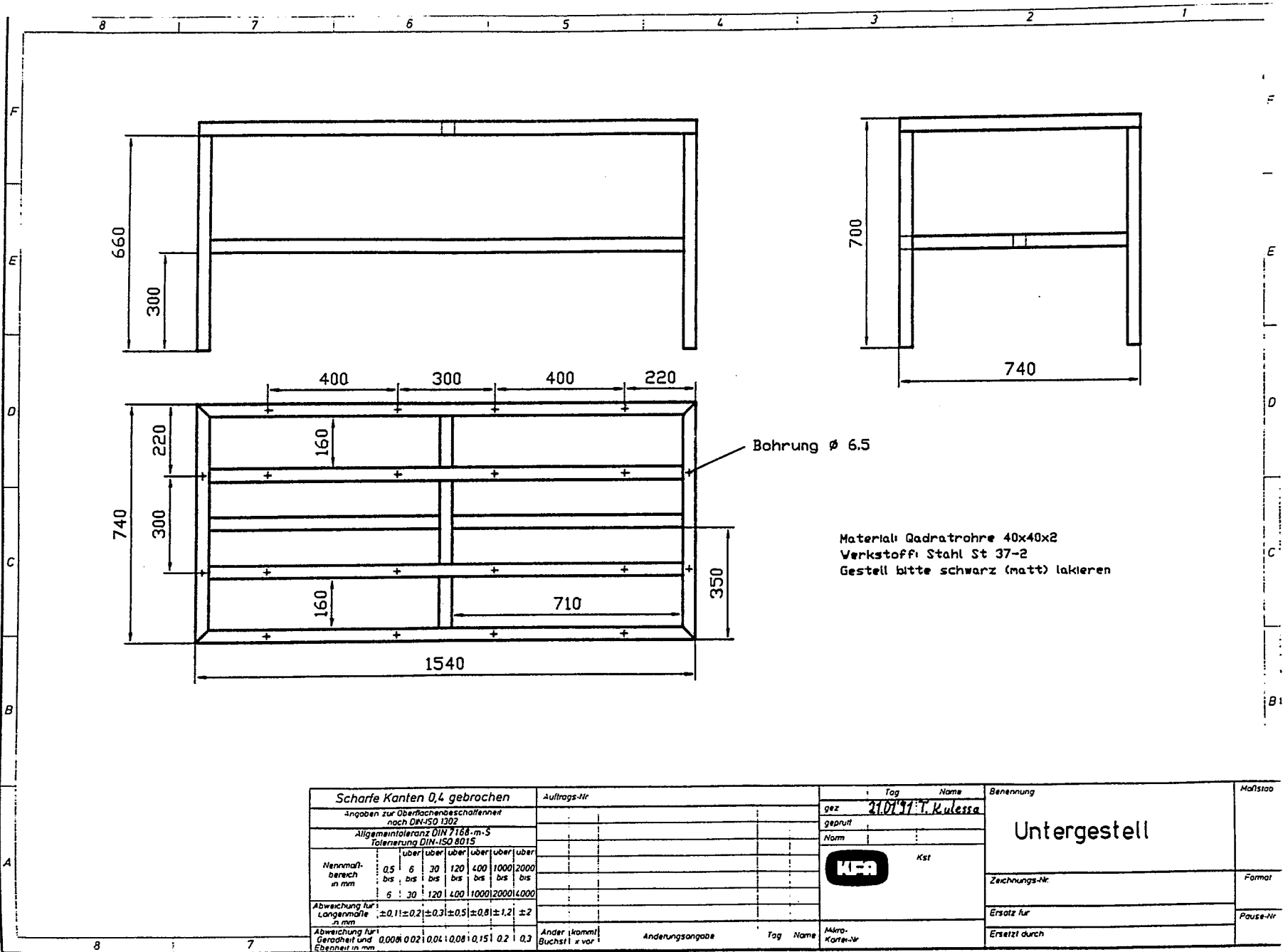
Strahlerzeugung am LBIC-Messplatz



Die Abmessungen senkrecht zur Strahlachse sind um den Faktor 5 gestreckt.

Diese Pause unterliegt nicht dem Änderungsdienst.

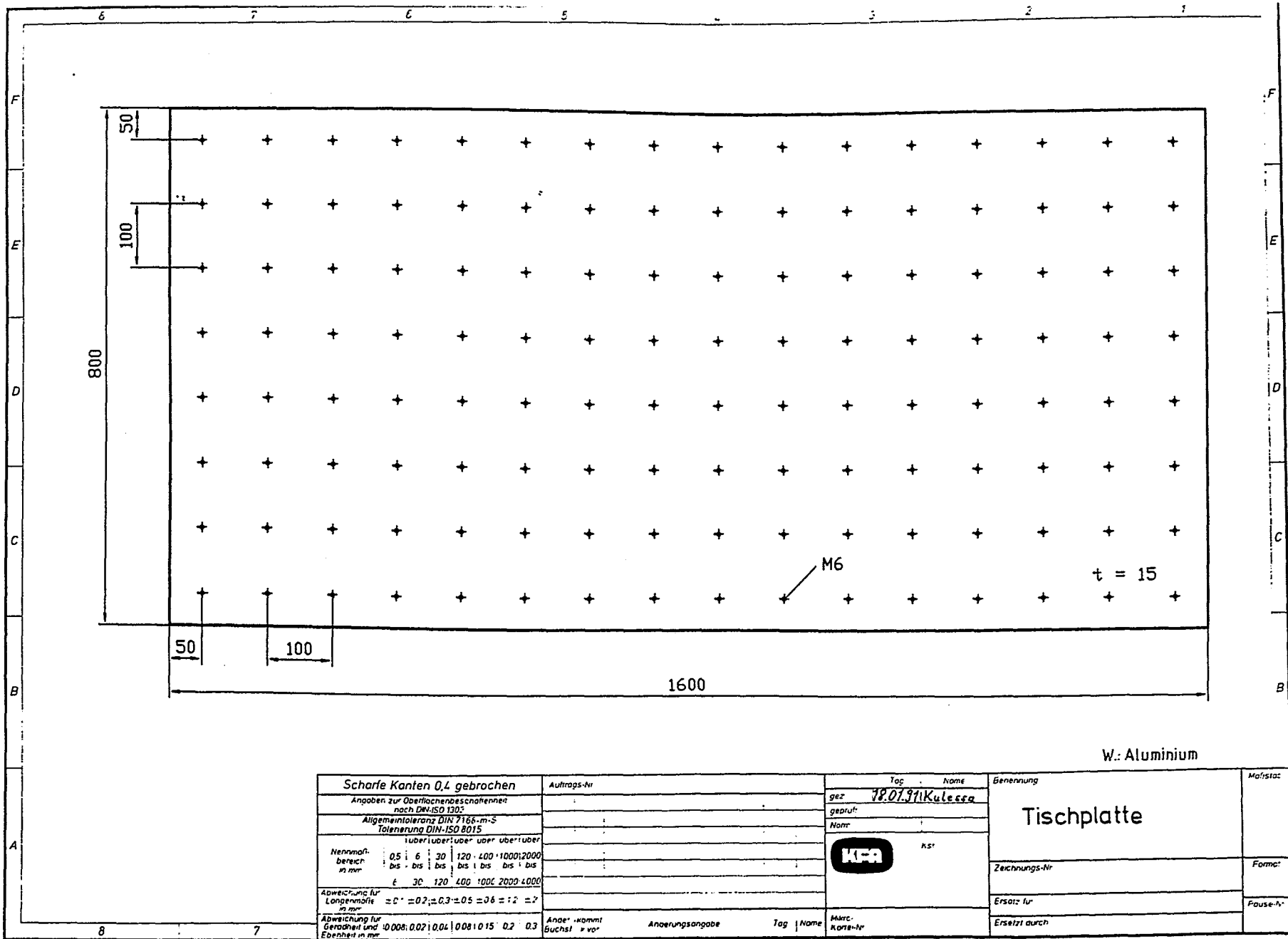
Für diese Zeichnung beanspruchen wir die Urheberrechte an der Konstruktion, Ausführung und Ausführungsmusterherstellung. Vervielfältigung oder Abgabe in Dritte nur nach unserer vorherigen Zustimmung.



Scharfe Kanten 0,4 gebrochen				Auftrags-Nr.		Tag		Name		Benennung	Maßstab
Angaben zur Oberflächeneigenschaft nach DIN-ISO 1302						gez	21.07.97	T. Kulesa		Untergestell	
Allgemeintoleranz DIN 7168-m-S Tolerierung DIN-ISO 8015						geprüft					
Nennmaßbereich in mm						Norm					
Abweichung für Längenmaße in mm						KST				Zeichnungs-Nr.	Format
Abweichung für Geradheit und Ebenheit in mm						Mikro-Karte-Nr.				Ersatz für	Pause-Nr.
Abweichung für Buchst. x vor						Änderungsangabe		Tag	Name	Ersetzt durch	

dem Änderungsdienst.

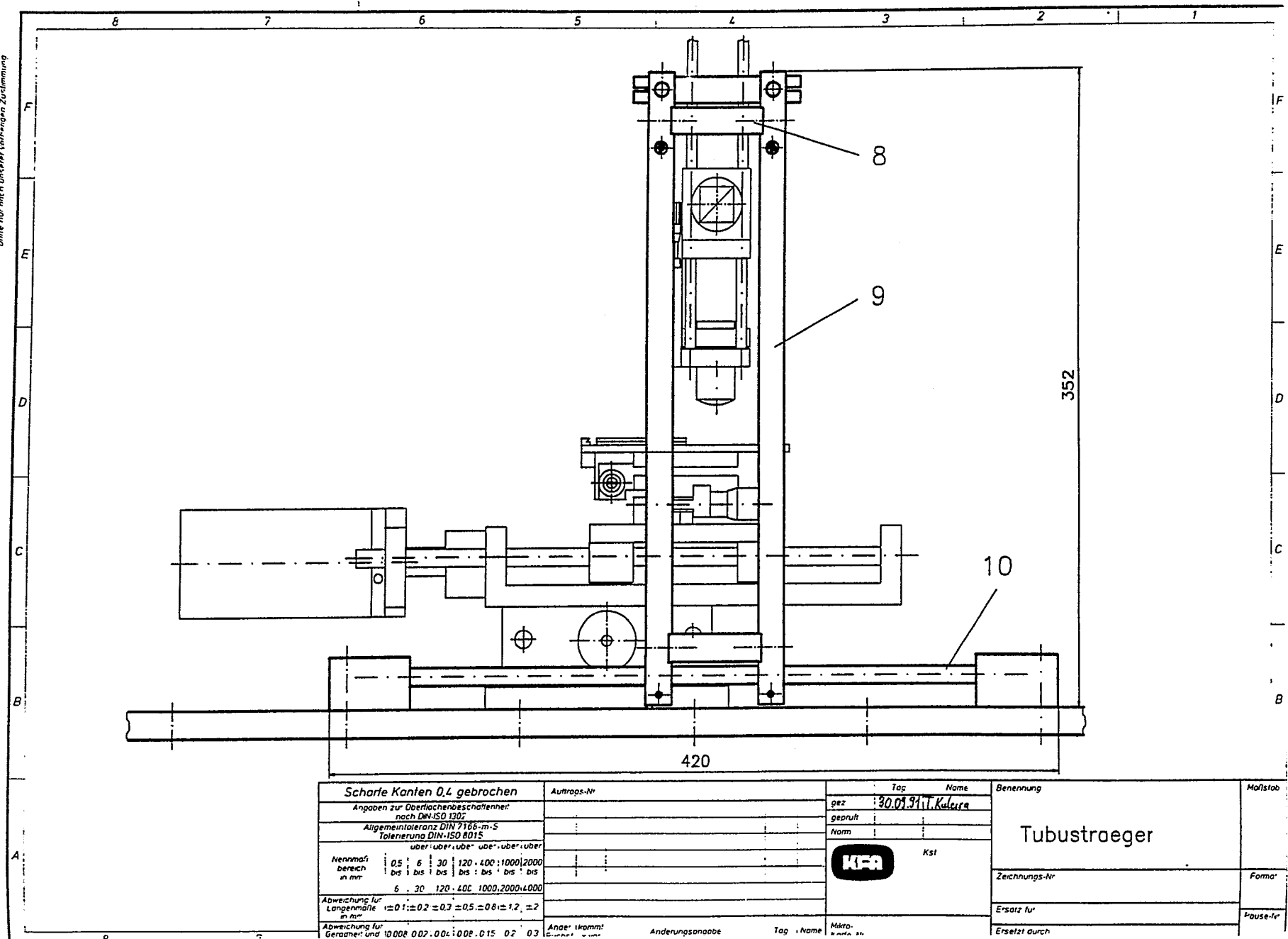
... ausfertigung, Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte, nur nach unserer vorherigen Zustimmung



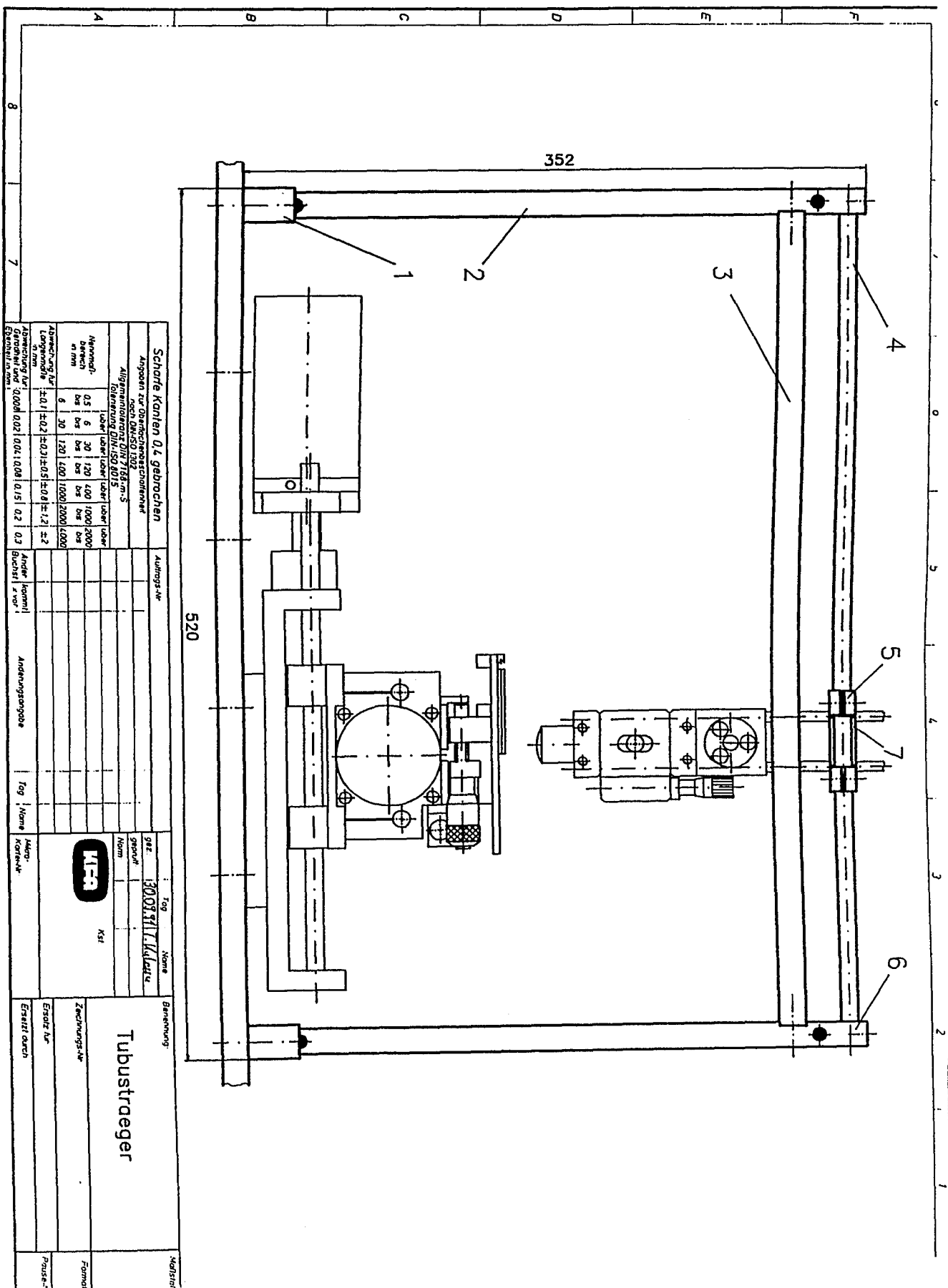
W.: Aluminium

Scharfe Kanten 0,4 gebrochen		Auftrags-Nr.		Tag Name		Benennung		Maßstab	
Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit nach DIN-ISO 1305				gez. 12.07.91 Kuletsa		Tischplatte			
Allgemeintoleranz DIN 7168-m-S Tolerierung DIN-ISO 8015				geprüft:					
Tolerierung DIN-ISO 8015				Name					
Nennmaßbereich in mm		0,5 bis 6 6 bis 30 30 bis 120 120 bis 400 400 bis 1000 1000 bis 2000		KS*					
Abweichung für Längenmaße in mm		±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2		KFA		Zeichnungs-Nr.		Formel	
Abweichung für Geradenheit und Ebenheit in mm		0,008 0,02 0,04 0,08 0,15 0,2 0,3		Anmerkung: Buchst. > vor		Ersatz für		Pause-Nr.	
		Änderungsangabe		Tag Name		Ersetzt durch			

auch für den Fall der Fiktionsmeldung einer weiteren Mustererkennung Vervielfältigung oder Weitergabe in Dritte nur nach unserer vorherigen Zustimmung



*Für die als Zeichnung beanspruchten wir eine Urteilsbefreiung
auch für den Fall der Patentanmeldung oder Gebrauchsmustereintragung Vervielfältigung oder Weitergabe
Unite nur nach unserer vorherigen Zustimmung*



Stückliste Tubusträger

1	2	3	4	5	6
Pos.	Anz.	Einh.	Benennung	Norm-Kurzbezeichnung	Bemerkung
1	4	Stck.	Lagerblock	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
2	2	Stck.	Strebe 1	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
3	2	Stck.	Strebe 2	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
4	2	Stck.	Führungsst. 1	Durchm. 10 mm Edelst.	
5	2	Stck.	Klemmführung	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
6	2	Stck.	Strebe 3	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
7	1	Stck.	Adapter	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
8	4	Stck.	Strebe 4	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
9	2	Stck.	Strebe 5	Alu 15 mm Vierkantst.	schwarz elox.
10	2	Stck.	Führungsst. 2	Durchm. 10 mm Edelst.	
30.09.1991 Thomas Kulesa					

Diese Arbeit wurde im Institut für Schicht- und Ionentechnik (ISI) in der Abteilung Photovoltaik (PV) des Forschungszentrums Jülich GmbH durchgeführt.

Bei Herrn Dr. T. Eickhoff möchte ich mich für die Betreuung dieser Arbeit und für seine Unterstützung bei der Ausarbeitung bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. H. Buck bedanken, der die Betreuung dieser Arbeit innerhalb der Fachhochschule übernahm.

Besonders möchte ich Herrn Dipl. Ing. W. Hilgers für seine jederzeit gewährte Unterstützung sowie für die vielen praktischen Anregungen und klärenden Diskussionen während der Durchführung dieser Arbeit danken.

Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der Gruppe Photovoltaik des Forschungszentrums Jülich, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit behilflich waren.

Jüli-2545
November 1991
ISSN 0366-0885