

Realisierung eines Mehrkammer-Depositionssystems zur kontinuierlichen photovoltaischen Beschichtung flexibler Substrate

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
der Universität-Gesamthochschule Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Markus Scholz

I. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Böhm

II. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. Weiß

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. D. Ehrhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Dezember 1999

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	1
Abstract	3
1. Einleitung	5
1.1 Photovoltaischer Hintergrund	5
1.2 Rahmenbedingungen	7
1.3 Aufgabenstellung	7
1.4 Solarzellen aus Silizium	8
1.4.1 Das Bändermodell	9
1.4.2 Optische Eigenschaften	10
1.4.3 Solarzellenaufbau	11
1.5 Solarmodule aus Silizium	14
1.5.1 Kristalline Solarmodule	14
1.5.2 a-Si:H Solarmodule auf Glas	15
1.5.2 a-Si:H Solarmodule auf Stahl	16
1.6 Fertigungsverfahren	17
2. Aufbau des Depositionssystems	19
2.1 Depositionssystem	19
2.2 Vakuumprozeßkammer	20
2.3 Vakuumwickelkammer	22
2.4 Kammeraufhängung	23
2.5 Substratheizung	25
2.6 Vakuumerzeugung	26
2.7 Charakterisierung des Vakuumsystems	28
2.8 Prozeßdruckregelung	29
2.8.1 Regelung mittels Drosselklappe	29
2.8.2 Druckregelung über Gaseinlaß	30
2.9 Charakterisierung der Zwischenstücke	31
2.10 Zusammenfassung	34

3. Herstellung transparenter leitfähiger Schichten.....	35
3.1 Der Sputterprozeß	35
3.2 Experimenteller Aufbau	36
3.3 Elektrische Messungen	37
3.4 Optische Messungen	38
3.5 Optimierung	42
3.5.1 Einfluß der Substrattemperatur	43
3.5.2 Einfluß der Evakuierungsdauer	43
3.5.3 Einfluß des Basisdruckes	44
3.5.4 Einfluß des Prozeßdruckes	45
3.5.5 Einfluß des Abstandes von Substrat und Target	47
3.5.6 Einfluß der Sputterleistung	50
3.5.7 Einfluß der Depositionsdauer	53
3.6 Zusammenfassung	55
4. Herstellung von a-Si:H-Schichten.....	57
4.1 Der PECVD-Prozeß	57
4.2 Experimenteller Aufbau des Reaktors	58
4.3 Optimierung der Reaktorgeometrie	60
4.4 Einkammerdeposition	63
4.5 Untersuchungen zur Dotiergasverschleppung	64
4.6 Zusammenfassung	71
5. Laserstrukturierung.....	72
5.1 Laserschneiden	72
5.2 Aufbau des Lasersystems	73
5.3 Strukturierungsergebnisse	76
5.4 Zusammenfassung	78
6. Bandanlagenprozeß.....	79
6.1 Paralleles Prozessieren	79
6.2 Substratauswahl	80
6.3 Parallel prozessierte Solarzellen	81
6.4 Zusammenfassung	87

7. Ausblick	88
8. Anhang	90
8.1 Danksagung	90
8.2 Veröffentlichungen	91
8.3 Symbolverzeichnis	92
8.4 Abkürzungen	94
8.5 Literaturverzeichnis	95
9. Technischer Anhang	100
9.1 Rahmengestell	100
9.2 Prozeßgaszuführung	100
9.3 Prozeßgassteuerung	103
9.4 Kabelbelegung zur Prozeßdruckregelung	105
9.5 Transportsystem	105
9.5.1 Wickeltrommeln	106
9.5.2 Drehdurchführungen	107
9.5.3 Antrieb	108
9.5.4 Steuerung	109

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde im Labormaßstab eine Depositionsanlage zur Herstellung von amorphen hydrogenisierten Silizium (a-Si:H) Solarzellen auf einem kontinuierlichen Stahlband geplant, entworfen und aufgebaut. Die Anlage besteht aus fünf Prozeßkammern und zwei Substratauf- bzw. Abwickelkammern, die durch spezielle Zwischenstücke miteinander verbunden sind. Die Einzelkammern werden so zu einer langen Vakuumdepositionsanlage kombiniert, die für die benötigten Prozesse geeignete Depositionszonen bereitstellt. Zwei Kammern/Depositionszonen dienen der Herstellung von metallischen- bzw. TCO- (*Transparent Conductive Oxide*) Schichten durch einen Sputterprozeß, zwei weitere Kammern werden zur Herstellung des a-Si:H Schichtsystemes benötigt. Die verbleibende Kammer ist zur Einkopplung eines Laserstrukturierungssystemes vorgesehen, welches zur selektiven Strukturierung der deponierten Schichten zur integrierten Serienschaltung benötigt wird. An dieser Anlage wurden Untersuchungen zur umfassenden Charakterisierung des Vakuumsystemes durchgeführt. Zur Vorvakuumherzeugung kommt ein zentraler trocken verdichtender Vorpumpenstand zum Einsatz. Die Regelung der erforderlichen Drücke beim Sputter- und beim PECVD- (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*) Prozeß im Kammersystem wurde erfolgreich erprobt. Die Zwischenstücke erlauben Druckverhältnisse von mehr als 1:1000 zwischen benachbarten Depositionszonen. Für die angestrebte parallele Prozeßführung ist die kritische Separation der Depositionszonen unter Prozeßbedingungen ohne Sperrschieber unabdingbar. Anhand des spezifischen Widerstandes von deponierten intrinsischen Schichten wird detailliert die Dotiergasverschleppung nachgewiesen. Dabei fließen die Dotiergase Phosphin und Diboran parallel in benachbarten Depositionszonen. Durch geeignete Maßnahmen kann diese Verschleppung minimiert werden, so daß sie praktisch keinen Einfluß auf den spezifischen Widerstand der i-Schicht hat. Dies wird ohne zusätzliche Druckstufe oder Einsatz von Spülgasen erreicht.

Die einzelnen Depositionsverfahren wurden zunächst separat erprobt und optimiert. Der am Institut neu eingeführte Sputterprozeß wird sowohl für die Metalle Aluminium und Chrom als auch für die beiden TCO Materialien ZnO und ITO erfolgreich durchgeführt. Die Optimierungen an ca. 100 Proben bei den TCOs, die als Sintertargets vorlagen und nicht reaktiv gesputtert wurden, führten zu Schichtwiderständen von $R_{sq}=9\pm 2\Omega$ (ITO) und $R_{sq}=13\pm 7\Omega$ (ZnO) auf einem 9.9cm^2 Glassubstrat bei einer mittleren Transmission von 84% (450nm-850nm).

Das PECVD Depositionssystem wurde zunächst bezüglich Elektrodengeometrie und Plasmaverhalten optimiert. Ziel ist, eine möglichst große Fläche homogen mit qualitativ

hochwertigem a-Si:H zu beschichten. Der Bereich inhomogener Deposition im Randfeld der Elektrode konnte auf einen Kreisring von 6mm Breite reduziert werden. Die sichere Plasmazündung unterstützt ein Piezozündsystem. In den separat betriebenen PECVD Kammern wurden in Einkammerdepositionen Solarzellen mit 5% ($A=2,54\text{cm}^2$) Anfangswirkungsgrad hergestellt.

Das Lasersystem wurde auf seine Eignung zur Schichtstrukturierung an Metall, TCO und a-Si:H Schichten erprobt. Erste Versuche zur selektiven Strukturierung wurden an a-Si:H Schichten auf einer Chromschicht durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeit, diese Art der Strukturierung erfolgreich zur integrierten Serienverschaltung von Solarmodulen zu nutzen.

Nach der weitgehend separaten Erprobungsphase wurde das Zusammenspiel aller Einzelkomponenten als Laborbandfertigungsanlage erprobt. Auf einem kontinuierlichen, während der Deposition beweglichen Edelstahlband von 9cm Breite und ca. 75m Länge wurden in einem parallelen Depositionsprozeß einfache a-Si:H Solarzellen hergestellt. Erstmals wurden Sputter- und PECVD-Prozesse sowohl zur Deposition intrinsischer Schichten als auch dotierter Schichten zeitgleich in einer Vakuumkammer durchgeführt. Dieses parallele Prozessieren ermöglicht die Massenproduktion von Solarzellen im *reel to reel* Verfahren auf kontinuierlich bewegten langen flexiblen Substraten. Aus räumlichen und finanziellen Gründen muß in der Laborfertigungsanlage auf die kontinuierliche Bewegung des Substratbandes während der Deposition verzichtet werden, da die Depositionszonen in ihrer Ausdehnung begrenzt sind. Der resultierende *stop and go* Betrieb läßt sich jedoch ohne Einschränkungen auf ein bewegtes Substrat übertragen, da er die Substratbeweglichkeit nicht behindert. Die Anfangswirkungsgrade der in einem parallelen Depositionsprozeß hergestellten Solarzellen sind gegenüber den in separaten Depositionen hergestellten Zellen zunächst unverändert und konnten sogar durch intensive Optimierung auf über 6,7% ($A=0,785\text{cm}^2$) gesteigert werden.

Abstract

In the course of the work presented a deposition system on laboratory scale for the fabrication of amorphous hydrogenated silicon (a-Si:H) solar cells has been designed and constructed. The system consists of seven metal sealed UHV stainless steel chambers which are linked by pressure stages. Thus the single chambers result in a long vacuum deposition system which provides the suitable deposition zones for the processes needed. In the first two zones TCO (Transparent Conductive Oxide) and metal contacts are deposited by rf magnetron sputtering whereas two of the other zones are used for the deposition of the a-Si:H layers. In the fifth zone a laser patterning system can be coupled in. The Nd:YAG laser system is necessary to fabricate integrated series connected solar modules. Intensive investigation with regard to a thorough characterization of the vacuum system has been carried out. For the initiation of a pre-vacuum, one central dry operating pump has been installed. The regulation of the necessary pressures in the sputtering zones and the PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) zones has been examined successfully. The pressure stages between the deposition zones allow pressure gradients of more than 1:1000 between adjacent chambers. For the intended simultaneous processing a critical separation of the chambers under process conditions and without gate valves is indispensable. By means of the specific resistance of the deposited intrinsic layers the cross contamination of the doping gas phosphine as well as diborane, which flow simultaneously in neighboring deposition zones, has been proved in detail. However, the cross contamination has been minimized by appropriate measures. Thus the cross contamination practically lost its influence on the specific resistance of the i-layer. This has been reached without any further chambers or the application of purge gas.

The different deposition processes have been tested and optimized separately. The recently introduced sputtering process is implemented for aluminum as well as chromium and the two TCOs namely zinc oxide (ZnO) and indium tin oxide (ITO). The optimization of approximately 100 TCO film samples results in sheet resistances from $R_{sq}=9\pm 2\Omega$ (ITO) and $R_{sq}=13\pm 7\Omega$ (ZnO) on a 9 by 9cm² glass substrate with an average transmission of 84% within the spectral range of 450nm-850nm.

In addition, the PECVD deposition system has been optimized with regard to both electrode geometry and plasma behavior. It had been intended to reach a large homogeneous area with high quality a-Si:H. Inhomogeneous deposition could be reduced to a 6mm area at the rim of the electrode. The reliable ignition of the plasma is supported by a piezo igniter. A single chamber solar cell deposition shows an efficiency of 5% ($A=2.54\text{cm}^2$).

The laser scribing system has been assessed with regard to its suitability for the patterning of metal, TCO and a-Si:H films. First experiments for the selective patterning intended have been performed on a-Si:H layers deposited on chromium coated substrates. Results clearly show the possibility to use such patterning for the production of integrated series connected solar modules.

Subsequent to the test phase of all single components they are examined as a whole system. A-Si:H solar cells are produced on continuous flexible metal tapes (75m by 0.09m). For the first time it became possible to handle sputter and PECVD processes simultaneously as well as the parallel deposition of doped and intrinsic a-Si:H layers in one single vacuum chamber. This parallel processing allows the mass production of solar cells in a reel to reel in line system on long continuous tapes. Due to spatial and financial restrictions the process had to refrain from a continuous movement of the substrate during the deposition. The resulting stop and go mode can easily be applied to a continuous movement since the substrate is not fixed. Only extensions of the plasma zones according to film thickness and deposition rate are necessary. In competition to solar cells produced by separate deposition the initial efficiencies of solar cells obtained by parallel processing constantly range at over 6.7% ($A=0.785\text{cm}^2$).

1. Einleitung

1.1 Photovoltaischer Hintergrund

Weltweit wird es immer schwieriger, den Energiebedarf der anwachsenden Weltbevölkerung zu decken. Schwellenländer entdecken die Annehmlichkeiten des modernen Lebens, die zwangsläufig mit einem erhöhten pro Kopf Energieverbrauch einhergehen. Neue Dimensionen in Unterhaltungs-, Kommunikationselektronik, Mobilität usw. werden erschlossen. Die dafür benötigte Primärenergie stammt weltweit mit ca. 90% zum größten Teil aus fossilen Brennstoffen [For,1992]. Diese Brennstoffe hat die Erde über Jahrmillionen ihrer Entstehungsgeschichte mit Hilfe von Pflanzen und Microorganismen gebildet. Durch Photosynthese wurden von diesen mittels Sonnenlicht große Mengen Kohlendioxid aufgespalten und der entstehende Kohlenstoff eingelagert. Seit Beginn der Industriellen Revolution im endenden 18. Jahrhundert bedient sich die Menschheit hemmungslos aus den angelegten Vorräten und wird sie vermutlich innerhalb weniger Jahrhunderte aufbrauchen. Neben das Wissen um die Erschöpflichkeit dieser Ressourcen ist seit einiger Zeit der Umweltgedanke in das Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Es wird befürchtet, daß das Kohlendioxid, welches bei der Verbrennung großer Mengen fossiler Energieträger frei wird, Auswirkungen auf das Weltklima hat [Mei,1993]. Die daraus resultierenden ökologischen Störungen könnten das höhere Leben auf unserem Planeten bedrohen. Die Steigerung des Nutzungspotentials der erneuerbaren Energien bietet eine Lösung des Problems an. Die erneuerbaren Energien sind frei von Kohlendioxid, zumindest aber Kohlendioxid neutral und stehen, wie der Name sagt, immer wieder zur Verfügung. Sie erschöpfen sich innerhalb menschlicher Zeiträume nicht. Im Gegensatz zur Nutzung der Kernenergie bergen sie außerdem kein globales Gefahrenpotential oder ein Entsorgungsrisiko für kommende Generationen.

Der größte Teil der Primärenergie wird veredelt und dem Verbraucher in Form von Endenergie zugeführt. Einen großen Anteil dieser vom Verbraucher genutzten Endenergie stellt der elektrische Strom dar. Strom, mit seiner leichten Verteilbarkeit und den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, gilt als die edelste aller Energieformen. In herkömmlichen thermischen Kraftwerken wird Strom unter großem Aufwand mit einem Wirkungsgrad von 35-42% erzeugt. Anschließend wird der Strom dem Verbraucher unter Inkaufnahme von mehr oder weniger großen Verlusten zugeführt. Speziell bei großen Entfernungen und geringem Strombedarf entstehen neben hohen Kosten für die Infrastruktur hohe Energieverluste. Durch den gezielten Einsatz von Photovoltaik, das heißt, der direkten Wandlung von Sonnenlicht in Strom, kann dieser erneuerbare Energieträger wirtschaftlich eingesetzt werden.

Bereits 1839 entdeckte Bequerel, daß einige Materialien, sobald sie dem Licht ausgesetzt werden, einen elektrischen Strom erzeugen, den photovoltaischen Effekt

[Wen,1994]. In den Bell Laboratories wurde 1954 die erste kristalline Silizium-Solarzelle hergestellt. 1975 folgte die erste Solarzelle auf Basis des von Chittick 1969 erstmals hergestellten amorphen Siliziums [Chi,1969]. Das amorphe Silizium weist gegenüber dem kristallinen Silizium einige Vorzüge auf. Während kristalline Zellen aus dünnen (0,2mm-0,5mm) Einkristallscheiben bestehen und sich nur durch zusätzliche Verfahrensschritte zu Modulen höherer Spannung und Leistung zusammenfassen lassen, genügt bei der amorphen Zelle eine 1/1000mm dicke Schicht, die auf einem Substrat in beliebiger Form abgeschieden wird. Es besteht die Möglichkeit, schon bei der Herstellung der Zellen durch integrierte Serienschaltung die Ausgangsspannung zu erhöhen. Den weiteren Vorteilen der amorphen Solarzelle, wie geringer Materialbedarf, Ungiftigkeit (im Gegensatz zu CIS/CdTe/GaAs), geringer Herstellungsenergieaufwand (schnelle Energieamortisation), großflächige Herstellbarkeit [Pet,1999], große Auswahl an Substraten, Flexibilität, günstiges Temperaturverhalten, die Möglichkeit der Herstellung von Tandemzellen usw., steht der Nachteil des geringen Wirkungsgrades entgegen. Während kristalline Siliziumsolarzellen Rekordwirkungsgrade von 26,8% erreichen und sogar noch von Galliumantimonzellen (34,2%) übertroffen werden, erzielen Zellen aus amorphem Silizium Wirkungsgrade von maximal 12,7%. [Gus,1997]. Neben diesem Wirkungsgraddefizit unterliegen amorphe Siliziumzellen einer Alterung (Degradation), die den Wirkungsgrad nochmals absenkt [Sta,1977]. Dennoch sind Zellen aus amorphem Silizium eine wirtschaftliche Alternative, wenn der geringe Wirkungsgrad durch die Nutzung größerer Flächen kompensiert werden kann [Wage,1998]. Der weiten Verbreitung dieser Form von Energiegewinnung stehen geringe Fertigungskapazitäten und die damit verbundenen hohen Modulkosten entgegen. Bei der Produktion von kristallinen Zellen besteht ein Engpaß in der Bereitstellung der Einkristallscheiben (*wafer*). Das sonst verwendete Ausschußkontingent der Halbleiterindustrie reicht für eine Massenproduktion nicht aus, und die Verwendung der günstiger herzustellenden polykristallinen Wafer verschlechtert den Wirkungsgrad. Zellen aus Cadmiumtellurid, Indiumdiselenid usw. stoßen neben dem vorhandenen Entsorgungsproblem der toxischen Zellen bald an Ressourcengrenzen. Das amorphe Silizium wird größtenteils auf Glasplatten abgeschieden. Diese verteuern die Zelle und erlauben nur Einzelprozessierungen. Die Möglichkeit, Zellen und Module auf Billigsubstraten herzustellen, wird derzeit weltweit nur von wenigen Firmen genutzt. Ziel zukünftiger Entwicklungen auf dem Gebiet der Photovoltaik sollte die Entwicklung einer preiswerten Fertigungsmethode zur Herstellung von Solarzellen und Modulen sein. Dabei sollte die absolut produzierte jährliche Modulleistung im Mittelpunkt und der Wirkungsgrad der Zelle nur an zweiter Stelle stehen.

1.2 Rahmenbedingungen

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer Kooperation des Institutes für Halbleiterelektronik (IHE) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. M. Böhm, der Arbeitsgemeinschaft Solar Nordrhein-Westfalen und der Hoesch Siegerlandwerke GmbH (inzwischen Thyssen Krupp Stahl AG). Titel des Gemeinschaftsprojektes ist: *Conti-Bandfertigung integrierter Solarmodule auf Stahl*. Im Rahmen des Projektes wurde eine Laborfertigungsanlage entwickelt, die auf einem kontinuierlichen Substrat (Stahlband) eine Solarzelle produziert. Durch zwei bereits am IHE durchgeführte Projekte, die sich mit der Entwicklung eines PV-Dünnschichtmodules aus amorphem Silizium auf metallischer Trägerschicht und den Stromtransportmechanismen an Grenzschichtübergängen in Solarmodulen aus amorphem Silizium beschäftigt haben, war bereits das Fundament für die Bewältigung dieser komplexen Aufgabenstellung gelegt.

Für das Institut stellt dies den Einstieg in die Eigenentwicklung von Dünnschichtanlagentechnologie für amorphes Silizium dar. Am Projektbeginn standen daher umfangreiche Planungen der zu entwickelnden Anlage, um die bereitgestellten Ressourcen optimal zu nutzen. Aus der Themenstellung, nämlich dem Aufbau und der Charakterisierung der Bandfertigungsanlage, resultiert die stark experimentelle Prägung dieser Arbeit. Projektziel ist ein Laborprototyp einer möglichen späteren Pilotfertigungsanlage für Solarmodule, der ein paralleles Prozessieren auf einem beweglichen Substrat ohne Trennung der Einzelprozesse (z.B. durch Sperrschieber) voneinander ermöglicht. Durch diese anspruchsvolle Zielsetzung entstand eine umfassende Industriekooperation, die immer eng an den anwendungsbezogenen Zielen verlief. Die breitgefächerte Aufgabenstellung beinhaltet einige hochinteressante Teilaspekte, die jedoch aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht in aller Ausführlichkeit behandelt werden können.

1.3 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit umfaßt die Entwicklung und den Aufbau einer Laborfertigungsanlage für Solarzellen aus amorphem Silizium auf einem beweglichen "endlosen" Substrat. Die Anlage soll dazu dienen, unter dem Gesichtspunkt einer möglichen späteren Hochskalierung zu einer Pilotfertigungsanlage die mit einer kontinuierlichen Fertigung auf einem bewegten Substrat einhergehenden Problemstellungen zu untersuchen. Da bedingt durch die begrenzten finanziellen Mittel und den Platzbedarf kein kontinuierlicher Prozeß im Labormaßstab möglich ist - alleine die Kammer zur Deposition der intrinsischen Schicht aus amorphem Silizium würde sich über mehrere Meter erstrecken - soll sich die Laboranlage auf einen *stop and go* Prozeß beschränken, bei dem das Substrat beweglich, aber während der Deposition unbewegt ist. Alle zur Herstellung einer Solarzelle aus amorphem

Silizium notwendigen Prozesse, beginnend auf einem gereinigten Substrat bis hin zur fertigen Zelle, welche bereit ist zur Kontaktierung und Verkapselung, sollen integriert werden. Dies beinhaltet das Aufbringen eines Rückseitenreflektors, der Deposition der aktiven n- bzw. p-Schichten und der dazwischenliegenden i-Schicht sowie eines aus TCO bestehenden durchsichtigen Frontkontaktes. Da der Frontkontakt zuletzt abgeschieden wird, darf er während der Deposition die darunterliegenden Schichten weder durch zu hohe Temperaturen (max. 200°C) noch durch das Abscheideverfahren schädigen.

Besonders kritisch sind neben den bei jeder Anlagenneuentwicklung auftretenden Problemen die Aspekte des parallelen Prozessierens. Durch das kontinuierlich bewegliche Substrat können die Depositionszonen der Einzelprozesse nicht durch Sperrschieber voneinander getrennt werden. Das damit einhergehende Problem der Verschleppung der verwendeten Dotiergase und speziell ihr Einbau in die photoelektrisch aktive i-Schicht soll untersucht und gelöst werden. Ferner ist es notwendig, bedingt durch unterschiedliche Depositionsverfahren (Sputtern und PECVD), innerhalb der Laborfertigungsanlage unterschiedliche Prozeßdrücke einzustellen und aufrechtzuerhalten, die mehrere Größenordnungen auseinander liegen. Der dann mögliche, jedoch durch die verwendeten giftigen bzw. leicht entzündlichen Prozeßgase brisante Parallelbetrieb von Sputtern und PECVD soll erprobt werden. Da sich weltweit nur wenige Institutionen mit dieser hochinteressanten Möglichkeit der rationellen Fertigung von Dünnschichtsolarzellen beschäftigen, werden die interessanten wissenschaftlichen Aspekte eines solchen Verfahrens in der Literatur kaum diskutiert. Resultierend aus anlagentechnischen Gesichtspunkten über depositionsspezifische und halbleitertechnologische Optimierungsprozeduren bis hin zur Solarzelle, ergibt sich der überwiegend experimentell geprägte Charakter dieser Arbeit.

1.4 Solarzellen aus Silizium

Die meisten der heute hergestellten Solarzellen bestehen aus kristallinem Silizium. Dieses kristalline Material (*wafers*) ist in der Regel das bei der Herstellung von Halbleiterwafern (*electronic grade silicon*) anfallende "zweite Wahl Silizium" bzw. nur teilgereinigtes Silizium (*solar grade silicon*) [Wage,1998]. Die aufwendige Herstellung des Rohmaterials als Einkristall sowie die anschließende Zellenherstellung in einem Waferprozeß tragen nicht unwesentlich zum hohen Preis des Endproduktes bei.

Das ebenfalls für die Solarzellenherstellung verwendete amorphe Silizium wird aus geeigneten Gasen durch eine Niederdruck- und Niedertemperatur-Glimmentladung auf ein fast beliebiges Substrat abgeschieden. Das amorphe Aufwachsen der Schicht wird durch eine schnelle Kondensation erreicht. Die niedrige Temperatur und damit geringe Energie der Atome sowie das nicht dem Gitter des abgeschiedenen Materials entsprechende Substrat unterstützen das amorphe Wachstum [Gie,1991]. Dieser Prozeß ist erheblich preiswerter und

energiesparender als die Herstellung kristalliner Zellen und birgt ein bislang nicht voll ausgeschöpftes Rationalisierungspotential bei der Zellenherstellung. Die unterschiedliche Herstellung führt zu verschiedenen Erscheinungsformen ein und desselben Elements, die in einigen gravierenden Unterschieden seiner Eigenschaften resultieren.

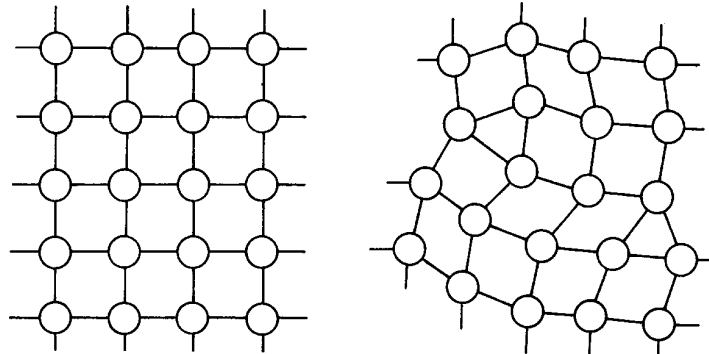


Abb. 1.4.1: Ideale Gitterstrukturen von kristallinem (links) und amorphem (rechts) Silizium mit bestehender Nahordnung [Hey,1984]

Betrachtet man zunächst das Atomgitter (Abb. 1.4.1) so besteht neben der bei beiden Materialien vorhandenen Nahordnung beim kristallinen Silizium auch eine Fernordnung der Einzelatome. Grundsätzlich ist es möglich, ein Gitter unter Aufrechterhaltung aller Bindungserfordernisse der Einzelatome herzustellen und keine Fernordnung zu erzeugen. Ein solches Gitter wäre ideal amorph, alle Bindungen sind abgesättigt. In der Praxis entstehen beim Aufwachsen der amorphen Schicht zahlreiche nicht abgesättigte Bindungen (*dangling bonds*), die als Hauptdefektart eine zentrale Rolle für das quantitative Verständnis dieses Halbleiters spielen.

1.4.1 Das Bändermodell

Während im kristallinen Silizium Valenz- und Leitungsband durch scharfe Grenzen getrennt sind, gestattet im amorphen Silizium eine durch die Unordnung hervorgerufene Potentialfluktuation, die die Si-Si-Bindungen schwächt, die Ausbildung von Bandausläufern (*tails*) [Mei,1993]. Die dadurch im verbotenen Band entstehenden Zustände (*tail states*) werden von tiefen Energiezuständen (*dangling bonds*), welche aus Gitterdefekten, Spannungen usw. resultieren, überlagert. Der einfachste und häufigste Defekt sind die bereits angesprochenen freien Valenzen, die im undotierten Material als paramagnetischer Zustand in der Mitte der Energielücke liegen (Abb. 1.4.1.1). Während die Zustände in den Bändern ausgedehnt sind (*extended states*), bestehen die Zustände in den Bandausläufern in ortsfesten Zuständen (*localized states*). Der Ladungsträger (Elektron oder Defektelektron) kann sich dort nicht frei bewegen, sondern erreicht räumlich entfernte Zustände durch Tunneln. Die *tail*

states sind für den zeitlich begrenzten Ladungsträgereinfang, die *dangling bonds* für die Rekombination der Ladungsträger verantwortlich.

Um die Zustände, die als Rekombinationszentren fungieren, zu verringern, müssen die freien Valenzen abgesättigt werden. 1972 gelang es Spear und Le Comber [Spe,1975] durch ihr Präparationsverfahren, diese mit Wasserstoff zu besetzen ($a\text{-Si:H}$). Die Zustände verschwinden dadurch nicht, liegen aber nun innerhalb der Bänder, in denen die Zustandsdichte sowieso hoch ist und sie kaum ins Gewicht fallen. Die Zustandsdichte in der Bandlücke sinkt so um etwa drei Größenordnungen. Der Wasserstoffanteil der deponierten Schicht liegt dabei üblicherweise bei 10Atom% und macht amorphes Silizium elektronisch brauchbar. Durch die nun abgesenkte Zustandsdichte in der Bandlücke ist eine Verschiebung des Fermi-niveaus durch den Einbau von Dotieratomen erst möglich.

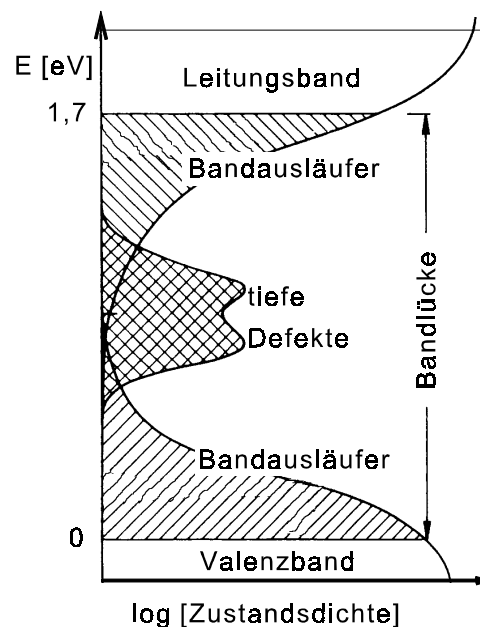


Abb. 1.4.1.1: Bändermodell des amorphen Siliziums ($a\text{-Si:H}$) mit den charakteristischen Bandausläufern

1.4.2 Optische Eigenschaften

Silizium ist ein indirekter Halbleiter und absorbiert deshalb das Licht bei der Photonenenergie, die der Energielücke entspricht (1,1eV), bedingt durch die notwendige Impulsänderung nur schwach. Für die Anwendung in kristallinen Solarzellen bedeutet das eine große Eindringtiefe des Lichtes. Um trotzdem die generierten Ladungsträger zu nutzen, muß deren Diffusionslänge (ca. $350\mu\text{m}$) in ähnlicher Größenordnung wie die Eindringtiefe liegen. Dies kann nur durch eine hohe Materialqualität gewährleistet werden. Amorphes Silizium verliert durch seine Unordnung den Charakter des indirekten Halbleiters, und die Absorption im Bereich der Energielücke steigt erheblich an (Abb. 1.4.2.1). Die Band- bzw.

Energielücke beträgt je nach Herstellung etwa 1,7eV-1,8eV [Woo,1991]. Die spezifische Eindringtiefe des Sonnenlichtes wird von über 100 μ m beim kristallinen Silizium auf ca. 1 μ m beim amorphen Silizium verringert. Diese hohe Absorption ist Voraussetzung für eine Dünnschichtzelle aus amorphem Silizium, da die elektronischen Eigenschaften naturgemäß nicht die des kristallinen Materials erreichen können.

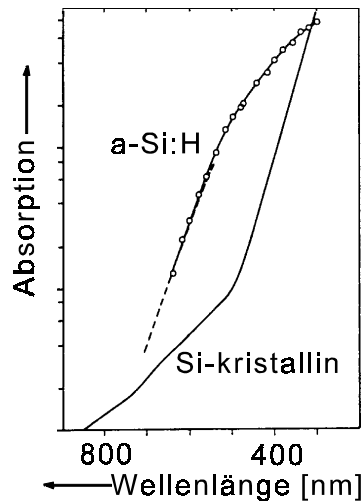


Abb. 1.4.2.1: Absorptionsspektren amorphen und kristallinen Siliziums [Mei,1993]

1.4.3 Solarzellenaufbau

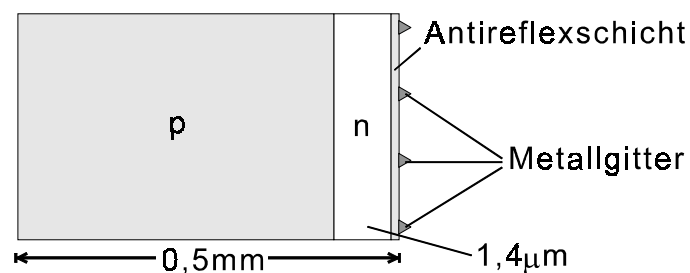


Abb. 1.4.3.1: Aufbau einer Solarzelle aus kristallinem Silizium

Die kristalline Solarzelle besteht typischerweise aus einem p/n-Übergang. Dazu wird in eine p-leitende Waferscheibe einseitig Phosphor eindiffundiert (Abb. 1.4.3.1). Das elektrische Feld des entstehenden p/n-Überganges trennt die durch Lichtabsorption generierten Ladungsträgerpaare. Elektronen bewegen sich zum n-Gebiet, Defektelektronen zum p-Gebiet. Da beide Ladungsträgerarten aus der Raumladungszone abfließen und zum äußeren Stromfluß beitragen, bleibt der Halbleiter neutral. Wird der äußere Stromfluß unterbrochen, kommt die Ladungsträgertrennung durch das von den Ladungsträgern aufgebaute Gegenfeld zum Erliegen.

Wie bereits beschrieben, findet die Lichtabsorption bei kristallinem Silizium durch die geringe Absorption zum größten Teil außerhalb der nur ca. $1\mu\text{m}$ breiten Raumladungszone statt. Die dennoch hohen Wirkungsgrade der kristallinen Siliziumzellen erklären sich daher aus einem weiteren Mechanismus, der Diffusion der Minoritätsträger. Wie Abbildung 1.4.3.2 zeigt, gelten im stromlosen Zustand die gestrichelten Verläufe für die Ladungsträger. Die durch Lichtabsorption erzeugte Generationsrate hebt die Ladungsträgerkonzentrationen an. Aufgrund der paarweisen optischen Generation fällt die Konzentrationsanhebung bei den Majoritätsträgern, bedingt durch die Dotierung, nicht ins Gewicht, bei den Minoritätsträgern allerdings bedeutet sie eine Anhebung um mehrere Größenordnungen. Da das Feld der Raumladungszone die Ladungsträgerkonzentration dort durch die erwähnte Pumpwirkung gering hält, entsteht ein Konzentrationsgradient, der die Diffusion der Minoritätsträger verursacht. Der Strom im feldfreien Bereich besteht ausschließlich aus Diffusionsströmen.

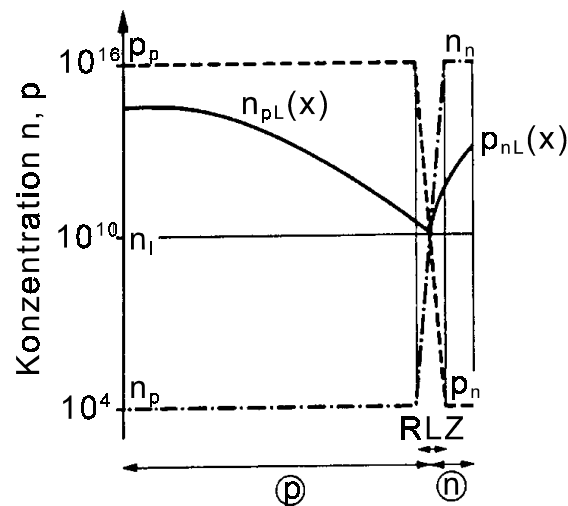


Abb. 1.4.3.2: Konzentrationsverteilungen in der kristallinen Solarzelle im Dunkeln (-----) und bei Beleuchtung (——) [Mei,1993]

Solarzellen aus amorphem Silizium verfügen wegen ihrer hohen Defektdichte nicht über die Möglichkeit, diese Diffusionsströme zu nutzen, da die Diffusionslängen zu gering sind. Amorphe Zellen bedienen sich daher nicht einer einfachen pn-Struktur, sondern bestehen im wesentlichen aus einer undotierten intrinsischen Schicht, die zwischen zwei hochdotierten dünnen p- und n-Schichten liegt (pin-Struktur). Die hochdotierten Schichten spannen über der i-Schicht ein elektrisches Feld auf. Dieses Feld trennt die in der aktiven Schicht durch Licht generierten Ladungsträger. Aufgrund der niedrigen Beweglichkeit und der kurzen Lebensdauer der Ladungsträger ist die Diffusionslänge geringer als die Länge der i-Schicht, eine Unterstützung des Ladungstransportes durch eine eingebaute Feldstärke ist also zwingend erforderlich (Abb. 1.4.3.3).

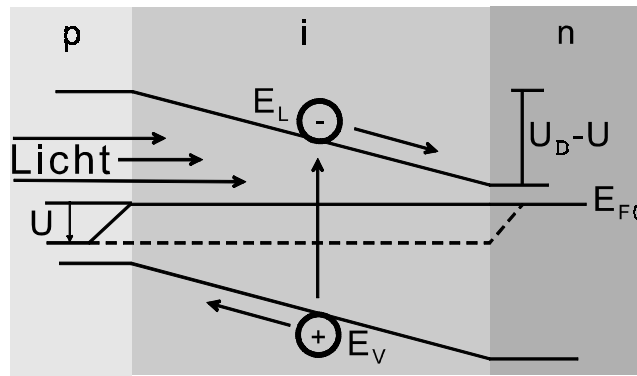


Abb. 1.4.3.3: Bänderdiagramm einer pin-Solarzelle im Durchlaßbetrieb

Die Qualität aller Solarzellen wird über einige Kenndaten definiert. Neben dem Wirkungsgrad η sind weiterhin der Füllfaktor FF, der Kurzschlußstrom I_K und die Leerlaufspannung U_L von besonderer Bedeutung. Der Wirkungsgrad ist als Quotient der eingestrahnten optischen Leistung und der Leistung der bestrahlten Solarzelle im MPP (Maximum Power Point) definiert. Der Füllfaktor stellt das Verhältnis von maximaler Leistung und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom dar.

$$FF = \frac{|I_{MPP}| \cdot U_{MPP}}{|I_K| \cdot U_L} = \frac{P_{MPP}}{|I_K| \cdot U_L} \quad (1.1)$$

Der Wirkungsgrad definiert sich also folgendermaßen:

$$\eta = \frac{|I_K| \cdot U_L \cdot FF}{P_{optisch}} = \frac{P_{MPP}}{P_{optisch}} \quad (1.2)$$

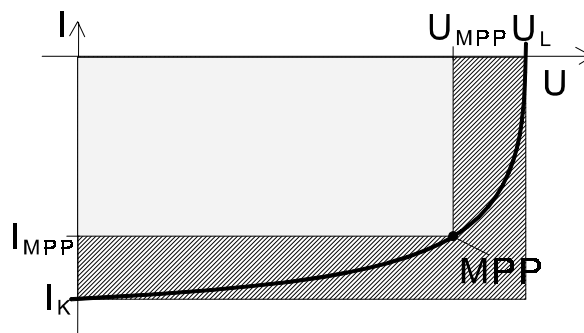


Abb. 1.4.3.4: typische I/U-Kennlinie einer Solarzelle im aktiven Quadranten mit den charakteristischen Kenngrößen

In Abbildung 1.4.3.4 sind alle Kenndaten in eine typische Solarzellenkennlinie eingetragen. Die Kennlinie wird unter definierten Bedingungen (IEC 904-3) [IEC] aufgenommen, um einen aussagekräftigen reproduzierbaren Vergleich zu gewährleisten. Die Standardtestbedingungen (STC: *Standard Test Conditions*) schreiben eine Bestrahlung mit AM1.5-Spektrum und einer Leistungsdichte von 1000W/m^2 vor, wobei die Probertemperatur $25\pm 2^\circ\text{C}$ betragen muß.

1.5 Solarmodule aus Silizium

Durch Reihenschaltung mehrerer Einzelzellen geringer und technisch kaum verwertbarer Spannung erhält man ein Solarmodul. Die Parallelschaltung wird selten angewendet, da durch den hohen Strom die Verluste stark ansteigen. Diese Module in unterschiedlichen Größen sind für den Einsatz in energieautarken Systemen (z.B. Uhren, Taschenrechnern, Parkscheinautomaten, Wochenendhäusern, usw.) oder netzgekoppelten Anwendungen (Solarkraftwerke, Energiesparhäuser, usw.) optimiert. Dies bezieht sich sowohl auf die elektrischen Kenndaten als auch auf die Form und die Art des Modules. Je nach Einsatzart und Ort sind die Module bruch-, tritt-, wetter-, kratzfest, flexibel sowie wasserdicht. (Abb. 1.5.1).

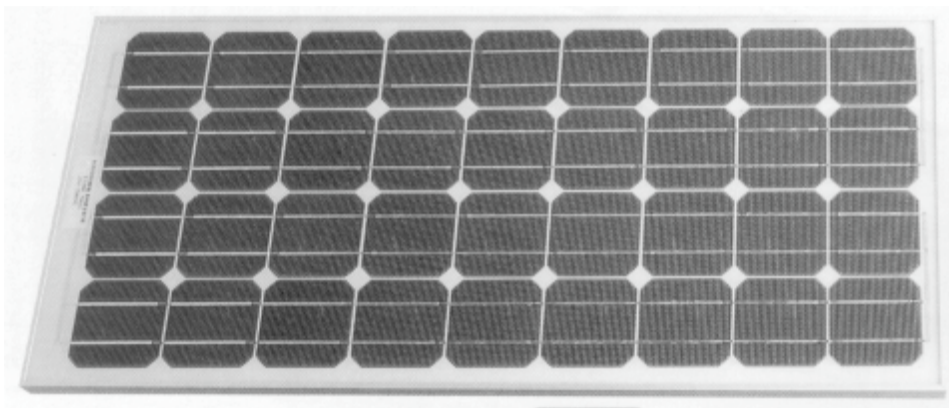


Abb. 1.5.1: *Handelsübliches Solarmodul aus kristallinen Solarzellen*

1.5.1 Kristalline Solarmodule

Kernstück jeden Solarmodules ist neben den Einzelzellen die Serienschaltung. Bei kristallinen Einzelzellen werden die kreisförmigen Wafer zunächst auf ein mehr oder weniger quadratisches Format gebracht (Abb. 1.5.1). Polykristalline Zellen sind in der Regel bereits im Rohzustand quadratisch. Dies ist in Hinsicht auf eine gute Flächenausnutzung des Modules unbedingt erforderlich, um den Gesamtwirkungsgrad nicht zu stark abzusenken. Durch

Kontaktieren und Verlöten der Einzelzellen werden diese dann zu Modulen beliebiger Größe verschaltet. Dieser Prozeß ist verhältnismäßig aufwendig und wird häufig noch manuell durchgeführt. Zum Schluß wird das Modul auf einen Träger (Glas) aufgebracht und nach Bedarf eingehäust und verkapselt.

1.5.2 a-Si:H Solarmodule auf Glas

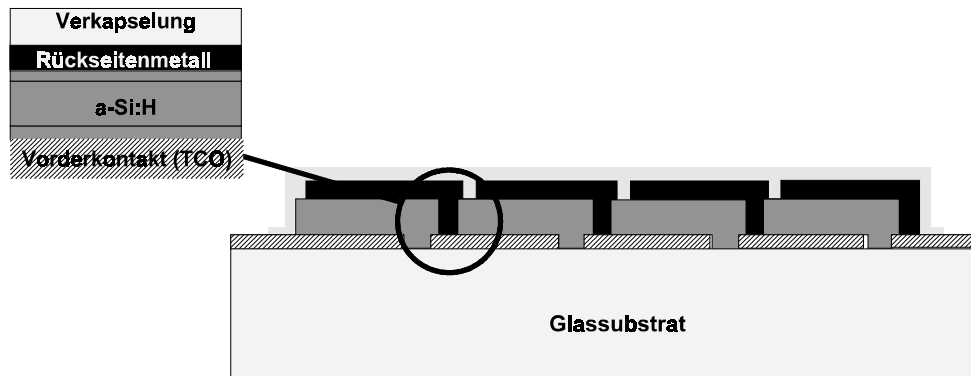


Abb. 1.5.2.1: Schematische Darstellung eines integriert serienverschalteten Solarmodules auf einem transparenten Substrat. Die Beleuchtung erfolgt durch das Substrat.

Solarmodule aus a-Si:H, die auf ein Glassubstrat abgeschieden werden, sind integriert serienverschaltet. Die integrierte Serienverschaltung basiert auf einer gezielten Strukturierung der Einzelschichten bereits während des Zellenaufbaues (Abb. 1.5.2.1). So wird die Modulstruktur bereits bei dem auf das Glas aufbrachten transparenten Vorderkontakt durch gezielte Unterbrechungen festgelegt. Das nachfolgend deponierte a-Si:H Schichtsystem überdeckt die Strukturierungsgräben und wird nach der Deposition ebenfalls strukturiert. Das heißt, es werden Gräben für die Verschaltung von Front und Rückkontakt geschaffen. Der nun deponierte, normalerweise nicht transparente, hochreflektierende, metallische Rückkontakt erzeugt in den Gräben durch seinen gezielten Kontakt zum Vorderkontakt die Reihenschaltung der Zellen. Einen Kurzschluß über das a-Si:H Schichtsystem verhindert dessen geringe Querleitfähigkeit. Die komplette Serienverschaltung benötigt je nach Breite der einzelnen Strukturierungsschnitte nur eine Gesamtbreite von einigen 1/10mm, die sich im Flächenverlust für das ganze Modul kaum auswirkt. Die so hergestellten Module können nach der Verkapselung und Endkontaktierung direkt eingesetzt werden. Die Doppelfunktion des Glases als Modulträger und optimale Versiegelung der Front gegen Umwelteinflüsse ist hier besonders hervorzuheben.

1.5.3 a-Si:H Solarmodule auf Stahl

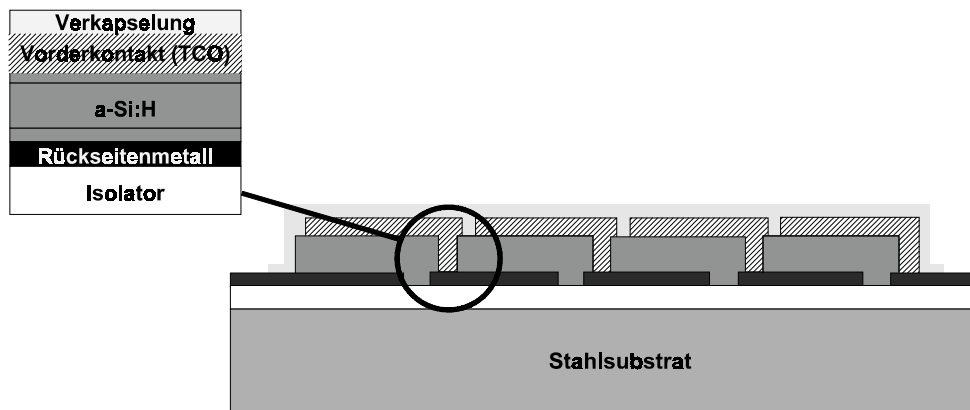


Abb. 1.5.3.1: Schematische Darstellung eines integriert serienverschalteten Solarmodules auf einem nicht transparenten Substrat

Bei der Deposition von a-Si:H Solarzellen auf nichttransparenten Substraten (z. B. Stahl, Keramik, Kunststoff) besteht ebenfalls die Möglichkeit der integrierten Serienverschaltung, die bedauerlicherweise aus prozeßtechnischen Gründen (z.B. Herstellung und Strukturierung des transparenten Frontkontaktes auf der fertigen Zelle) bisher nur wenig genutzt wurde. Auf das leitfähige Substrat wird zunächst ein Isolator aufgebracht, der die Einzelzellen vom Potential des Trägermaterials elektrisch entkoppelt (Abb. 1.5.3.1). Anschließend wird ein hoch-reflektierender Rückkontakt deponiert und strukturiert. Wie beim Glassubstrat folgt nun das a-Si:H-Schichtsystem, welches anschließend mit Kontaktgräben für die Verschaltung von Front- und Rückkontakt versehen wird. Den Vorderkontakt bildet ein in einem Niedertemperaturprozeß hergestellter transparenter Frontkontakt, der ebenfalls strukturiert wird. Den Abschluß bildet eine wetterfeste Verkapselung. Die so hergestellten Module sind durch die eingesetzten dünnen Stahlsubstrate flexibel und leicht (Abb. 1.5.3.2).

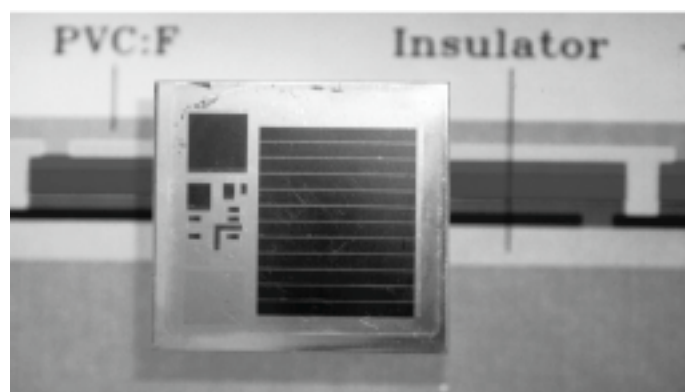


Abb. 1.5.3.2: Bild eines am Institut für Halbleiterelektronik hergestellten integriert serienverschalteten Solarmodules auf Edelstahlblech

1.6 Fertigungsverfahren für a-Si:H Solarzellen

Weit verbreitet ist die Abscheidung von a-Si:H-Solarzellen auf Glasplatten verschiedener Größe (Phototronics Solartechnik, Intersolar Group). Dabei werden die Glassubstrate einzeln oder in Kassetten ähnlich wie bei einer kristallinen Waferproduktion verarbeitet. Prozesse, wie z. B. das Aufbringen des Frontkontaktes oder die Deposition des amorphen Dünnschichtsystems, finden in räumlich getrennten separaten Anlagen statt. Der Durchsatz und damit die Produktionskapazität sind entsprechend gering. Die Produktionskosten der Zellen und Module sind relativ hoch.

Neben der Deposition auf Glas wird auch auf alternativen Substraten produziert. Dies sind Stahl und in neuerer Zeit auch Kunststoffe. Die Möglichkeit, diese Substrate sehr dünn auszuführen und ihre Flexibilität auszunutzen, ermöglicht die Verwendung von sehr langen Substraten auf Rollen. Dadurch entfällt ein aufwendiges Handling von bruchgefährdeten Einzelsubstraten. Die auf den Rollen befindlichen Substrate werden in den jeweiligen Prozeß geladen und dann kontinuierlich prozessiert. Qualitätsverluste, z.B. durch Plasmazündungen, werden so vermieden. Üblicherweise trennt man die Einzelprozesse voneinander, so daß ein Umladen von Substratspulen notwendig ist. Insbesondere der PECVD-Prozeß wird von den übrigen Prozessen separiert. Existierende Anlagen von z.B. Canon oder United Solar Systems produzieren Einzelzellen die anschließend ähnlich wie kristalline Solarzellen in Serie geschaltet werden [Can,1997]. Die Depositionssysteme für das amorphe Schichtsystem bestehen aus Einzelkammern für die p-, i-, und n-Schichtdepositionen, die durch Spalte ($H \approx 3\text{mm}$, $L \approx 150\text{mm}$) zur Substratdurchführung miteinander verbunden sind. Eine Dotiergasverschleppung wird durch den Einlaß von großen Mengen Spülgas (H_2 , Ar) in die Verbindungsstücke unterbunden. Die bei der integrierten Serienverschaltung gewährleistete Stabilität des Modules durch die erhalten gebliebene Trägerfunktion des Substrates muß durch entsprechende Maßnahmen bei der Verkapselung dieser zusammengesetzten Module erreicht werden. Bei der Verwendung von Kunststoffsubstraten hat sich die integrierte Serienverschaltung im *roll to roll* Prozeß durchgesetzt. Die Firma Fuji Electric Corporate Research and Development produziert auf einem 0,05mm dicken und 50cm breiten hitzebeständigen Plastiksubstrat [Fuj,1995]. Bedingt durch eine besondere Art der Serienverschaltung SCAF (*Series Connection through Apertures formed on Film*) sind fünf separate *roll to roll* Anlagen notwendig, um die Module herzustellen. Die Deposition des amorphen Schichtsystemes erfolgt im SR-Prozeß (*Stepping Roll*), allerdings diskontinuierlich. Das heißt, die in einer gemeinsamen Kammer befindlichen Prozeßkammern für die p-, i- und n-Schichten besitzen oben eine elastomergedichtete Öffnung, über die das Substrat gezogen wird. Während des Depositionsprozesses stoppt das Substratband, wird von einem beweglichen Deckel auf die Kammer gepreßt und verschließt diese. Das Problem der Dotiergasverschleppung ist so nicht vorhanden, da es sich zum Prozeßzeitpunkt um ein Einzelkammersystem handelt [Ich,1999]. Einen anderen Weg geht die Firma Iowa Thin Film

Technologies, die ebenfalls ein 0,05mm dickes Kunststoffsubstrat aus Polyimid benutzt. Das 33cm breite und bis zu 732m lange Substrat wird in sieben separaten *roll to roll* Prozeßschritten mit dem integriert serienverschalteten Solarmodul beschichtet (Tandemzelle). Hierbei handelt es sich in jedem Prozeßschritt um einen kontinuierlichen Prozeß. Für die p-, i-, n-Schichtdepositionen werden bis auf die Substratein- und -ausführung geschlossene Kammern ($P_{\text{Proz.}} \approx 0,5 \text{ Torr}$) verwendet, die sich in einer gemeinsamen Vakuumkammer befinden. Die mögliche Dotiergasverschleppung wird durch ein gutes Vakuum ($\approx 15 \text{ mTorr}$) der Mantelkammer verhindert [Jef,1999].

Untersuchungen zeigen, daß ein durchaus realistisches Wachstum des Photovoltaikmarktes um 22,5% p.a. zu einem dominierenden Marktanteil der Dünnschichtsolarzellen führt. Selbst wenn es den Chalkopyrit- oder den Cadmiumtelluridzellen gelänge, einen größeren Anteil am Photovoltaikmarkt zu erobern (derzeit ca. 2%), so würde aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Indium und Tellur dieser bald zusammenbrechen [Schr,1998]. Durch die fast unbegrenzten Ressourcen gibt es für die amorphe Dünnschichttechnologie fast keine Wachstumsgrenzen, vorausgesetzt, es werden weitere hocheffektive Fertigungsmöglichkeiten entwickelt und in die Praxis umgesetzt. Das nachfolgend vorgestellte neue Depositionssystem ist ein weiterer Schritt in diese Richtung.

2. Aufbau des Depositionssystemes

2.1 Depositionssystem



Abb. 2.1.1: Ansicht der Banddepositionsanlage

Grundlage dieser Arbeit sind Entwicklung, Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Labordepositionssystemes zur Abscheidung von a-Si:H Dünnschichtsystemen, z.B. Solarzellen und Module oder makroelektronische Dünnschichtbauelemente, auf einem kontinuierlichen beweglichen Substrat mit dem Ziel der Erhöhung der Produktivität (Abb. 2.1.1). Die Herstellung auf einem kontinuierlichen bewegten Substrat birgt erhebliches wirtschaftliches Potential gegenüber der heute weit verbreiteten Verwendung von Einzelsubstraten mit aufwendigen Handlingsystemen [Ich,1999]. Auf dem Substrat soll im Rahmen der Aufgabenstellung eine Solarzelle aus a-Si:H abgeschieden werden. Das Depositionssystem muß dazu Prozeßschritte wie Rückseitenmetallisierung, Aufbringen der photoempfindlichen a-Si:H Schichten und Deposition eines transparenten Vorderkontaktes, ermöglichen.

Die Besonderheit des Systems ist zweifellos das sich durch die komplette Anlage ziehende kontinuierliche Substrat. Es erlaubt keine Trennung der Einzelprozeßzonen durch herkömmliche Sperrschieber voneinander und ist auch während der Abscheidung frei beweglich. Um diese Beweglichkeit voll ausnutzen zu können, ist es im Hinblick auf eine spätere Produktionsanlage wichtig, Prozesse wie Sputtern, PECVD und Laserstrukturierung parallel zu betreiben. Dieses Parallelprozessieren birgt aufgrund der Brisanz der verwendeten Gasmische und der erforderlichen Reinheit (i-Schicht) einige Risiken und stellt eine

wissenschaftliche, wie auch technische Herausforderung dar. Die Interferenzen der unterschiedlichen Prozesse müssen dabei minimiert werden, die Beweglichkeit des Substrates darf jedoch nicht eingeschränkt werden.

Die Depositionsanlage besteht aus mehreren Einzelkammern, wobei zwei dazu dienen, die Substratwickel aufzunehmen. Als Substrat wird exemplarisch ein Edelstahlband verwendet, aber auch andere Materialien, z.B. Glasfolie oder Kunststoffolien, sind möglich. Die Rückseitenmetallisierung und der transparente Vorderkontakt werden in je einer Kammer aufgesputtert. Das a-Si:H Schichtsystem besteht aus dotierten und undotierten Schichten, die ebenfalls in je einer Kammer deponiert werden. Eine weitere Kammer ist bereits für die Einkopplung eines Lasers zur Strukturierung vorgesehen. Mit dieser Kammer kann z.B. auf einem isolierten Substrat durch selektive Strukturierung der Einzelschichten ein integriert serienverschaltetes Solarmodul hergestellt werden. Die Ausführungen zeigen bereits die Vielseitigkeit des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Depositionssystems, mit dem auch andere Bauelemente aus amorphen Dünnschichtsystemen hergestellt werden können. Die hier aufgebaute Labordepositionsanlage mit den vorgestellten Ergebnissen stellt die Ausgangsbasis für die Realisierung einer Pilotanlage dar.

2.2 Vakuumprozeßkammer

In der Vakuumprozeßkammer muß der jeweilige Depositionsprozeß (PECVD, Sputtern) durchgeführt werden können. Für den a-Si:H Halbleiterprozeß zur Solarzellenherstellung ist eine hohe Reinheit obligatorisch, um niedrige Defektraten durch geringen Fremdatomeinbau (z.B. O₂) zu erzielen. Die Kammer wird dazu bei Prozeßbeginn weit in den UHV-Bereich (UHV < 10⁻⁷ mbar nach DIN 28400) hinein evakuiert, damit Fremdatome weitestgehend entfernt werden. Um schnell ein gutes Endvakuum bei rationeller Pumpleistung zu erreichen, dürfen das Kammervolumen, welches die Vorpumpensaugleistung wesentlich beeinflusst, und die Kammeroberflächen nicht zu groß werden. Die Desorptionsraten der Oberflächen und die Leckrate der Kammer und der Flanschverbindungen bestimmen im Zusammenspiel mit der Saugleistung der Turbopumpe den Enddruck und müssen minimiert werden. Die Kammer muß trotzdem allen zum Depositionsprozeß erforderlichen Einbauten ausreichend Platz bieten. Alle Flanschverbindungen sollen gut zugänglich und mit normalem Werkzeug montierbar sein. Zuletzt spielen auch wirtschaftliche Erwägungen eine Rolle, die auf Stückzahlen abzielen.

Die Vakuumprozeßkammer ist für alle fünf Prozeßkammern auf derselben Grundkammer aufgebaut. Um die Desorptionsrate klein zu halten, besteht die Kammer aus kugelgestrahltem Edelstahl (Werkstoffnummer 1.4301) und ist vakuumgeglüht [Eve,1999]. Die Desorptionsrate kann durch diese Maßnahmen auf unter 10⁻¹⁰ mbar·l/s·cm²(4h) gesenkt werden [Bal]. Durch Variation der Einbauten wird diese Kammer dem jeweiligen

Verwendungszweck angepaßt. Die Grundkammer ist wie ein CF100 Doppelkreuz ausgelegt, dessen Hals verlängert ist und neben den M12 Aufhängungsbolzen vier orthogonal, aber gegenüber dem Hauptkreuz um 45° versetzt angeordnet, ein 8 VCR-male, ein CF16 und zwei CF40 Anschlüsse trägt. Dort werden die Druckaufnehmer und die optionale Zündeinrichtung angeflanscht. Die Auswahl von CF-Flanschen erlaubt Verbindungen, die neben hoher Temperaturbeständigkeit (450°C) auch geringste Leckraten ($<10^{-9}$ mbar·l/s) aufweisen. Der hintere CF100 Flansch ist durch ein vertikales CF40 Kreuz ersetzt, welches neben einem Sichtfenster Anschlußmöglichkeiten für Drosselklappenventil und Massenspektrometer bereitstellt. Das Zentrum des Doppelkreuzes bildet eine Kugel von 150mmØ. Bei allen Kammern ist am vorderen CF100 Flansch der Heizflansch mit Substratträger und Gaseinlaß 8VCR-male eingebaut. Die beiden seitlichen CF100 Flansche dienen der Verbindung mit den Nachbarkammern über spezielle Zwischenstücke. Um eine gute Zugänglichkeit zum variablen Kammerinnenleben (Elektroden, Prozeßgasführung, Substrat, usw.) zu realisieren und die wartungsarmen Anbauteile (Sperrschieber, Turbopumpe, Kühlung, Kabel, usw.) aus dem Sichtbereich zu verbannen, wird trotz prozeßbedingter Nachteile (Partikel) der Prozeßkammerentwurf für eine Deposition auf der Substratoberseite ausgelegt. Eine Einschränkung der gewonnenen Ergebnisse ist damit nicht verbunden. Die mit dieser Kammer und Ihren Einbauten erreichten Enddrücke liegen etwa bei $3 \cdot 10^{-9}$ mbar (70°C, S=210l/s).

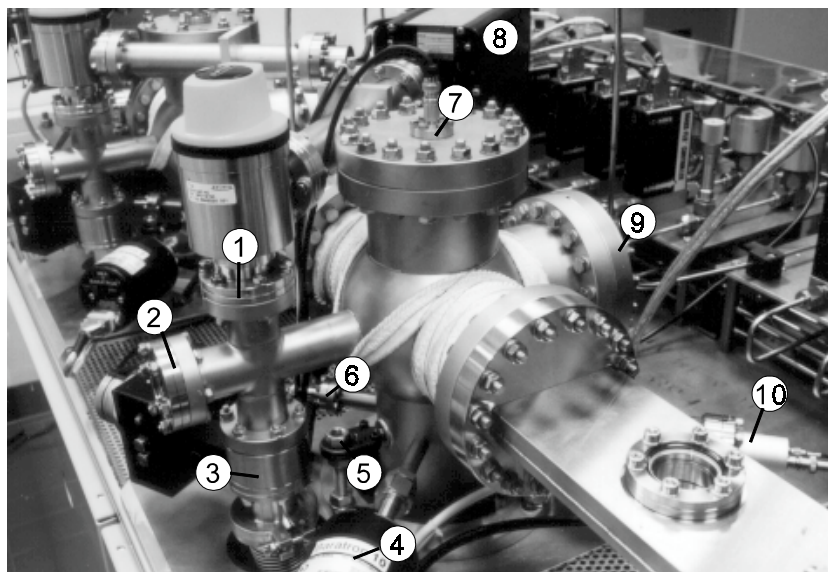


Abb. 2.2.1: Ansicht der Vakuumprozeßkammer, 1-Massenspektrometerabsperrentil, 2-Sichtfenster, 3-Drosselklappenventil, 4-Baratron, 5-Kugelgelenk, 6-Zündeinrichtung, 7-HF-Einführung, 8-Massenspektrometer, 9-Heizflansch, 10-Kaltkathode

2.3 Vakuumwickelkammer

Für die Vakuumwickelkammer gelten ähnliche vakuumtechnische Randbedingungen wie für die Prozeßkammern. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt jedoch auf der Wickeleinrichtung. Der Einleitung der Bandführungs- und Zugkräfte sowie des erforderlichen Drehmomentes muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

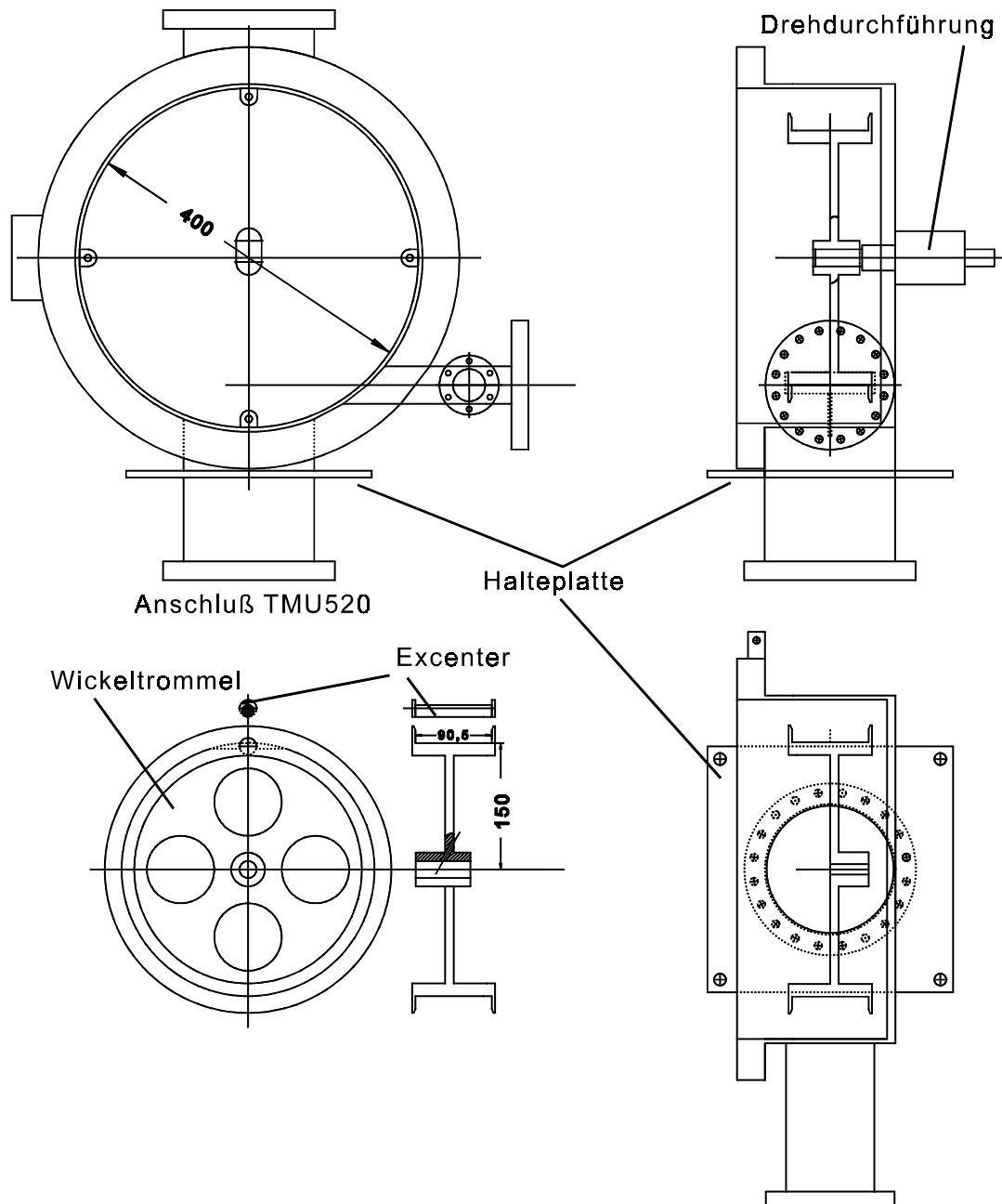


Abb. 2.3.1: Vakuumwickelkammer mit Wickeltrommel

Die Vakuumwickelkammer besteht aus einem zylindrischen Grundkörper von 400mmØ, der die Wickeltrommel mit dem Stahlband aufnimmt. Der große Radius verhindert unzulässig hohe Spannungen in den deponierten Schichten, die zur Ablösung führen können (siehe Kap. 6.2). Den Kammerhals bildet ein DN160 Rohr, an welches die Halteplatte angeschweißt ist und von einem CF160 Flansch für die Turbopumpe abgeschlossen wird. Tangential zur in der Höhe verstellbaren Wickeltrommel ist der Aus- bzw. Einlaß für das Stahlsubstrat angeordnet (Abb. 2.3.1). Die Höhenverstellung der Wickeltrommel erlaubt die Anpassung der unterschiedlichen Wickelradien an die schmalen Substratein- und -ausführungen. Ein unkontrolliertes Schleifen der beschichteten Sustrateite kann so verhindert werden. Das Beladen der Kammer erfolgt über einen aufschwenkbaren Deckel mit Vitondichtring. Neben den Dichtungen der Butterflyventile ist dies die einzige Elastomerdichtung im Hochvakuumteil der Anlage. Die bereits erwähnten Bandkräfte werden von einer Drehdurchführung mit durchgängiger Welle aufgenommen, die mit der entsprechend dimensionierten Kammerwand verschraubt ist. Die Abdichtung erfolgt durch eine partikelgefüllte hochviskose Flüssigkeit (siehe Kap. 9.5.2). Ein Durchblasen wird aufgrund eines Permanentmagnetfeldes, das die Partikel ausrichtet und festhält, verhindert. Mit und ohne Substrat werden Enddrücke $<10^{-8}$ mbar (20°C, S=500l/s) erreicht.

2.4 Kammeraufhängung

Zur Kammeraufhängung reicht es nicht aus, diese fest mit dem im Anhang (siehe Kap. 9.1) beschriebenen Rahmengestell zu verbinden. Vielmehr müssen die Kammern um alle Achsen beweglich sein und eine Ausrichtung der zahlreichen Dichtflächen während der Montage erlauben. Des weiteren muß durch diese Aufhängung und ihre komplexen Einstellmöglichkeiten die Lage aller fünf Prozeßkammern und der zwei Wickelkammern zueinander so einzustellen sein, daß das Stahlband optimal eingefädelt und transportiert werden kann. Die empfindlichen, nur 1/1000mm dicken Schichten an seiner Oberseite dürfen dabei nicht beschädigt werden. Die Justage der 5m langen Anlage muß aufgrund der Zwischenstückabmessungen in der Vertikalen auf 1/10mm genau erfolgen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde die folgend beschriebene Anordnung entworfen und realisiert.

Alle Prozeßkammern ruhen mit zwei M12 Gewindebolzen, die am verstärkten Kammerhals angeschweißt sind, in Schwerlastgelenkköpfen, wie sie normalerweise bei Hydraulikzylindern zur Kraftübertragung verwendet werden. Diese arretierbaren Gelenke erlauben neben einer seitlichen Justage eine Schwenkbewegung der Kammer um die Längs- und Querachse. Dabei nehmen sie das volle Kammergewicht inklusive aller Ein- und Anbauten (Kathode, Sperrschieber, Druckmessung, Turbopumpe usw.) auf. Durch die Augen der Gelenkköpfe führt jeweils eine M12 Gewindestange, mittels derer sich die Kammer

sowohl in ihrer Höhe über der Grundplatte als auch in ihrer Seitenneigung verstellen läßt. Den bei Seitenneigung entstehenden Winkelfehler gleichen die Kugeln der Gelenkköpfe aus. Die Gewindestangen ihrerseits ruhen in einem Aluminiumtragring, der in der verschiebbaren Grundplatte drehbar gelagert ist und der Kammer eine Rotation um die Hochachse erlaubt. Durch drei Muttern M12 kann der Ring in seiner Lage fixiert werden (Abb. 2.4.1).

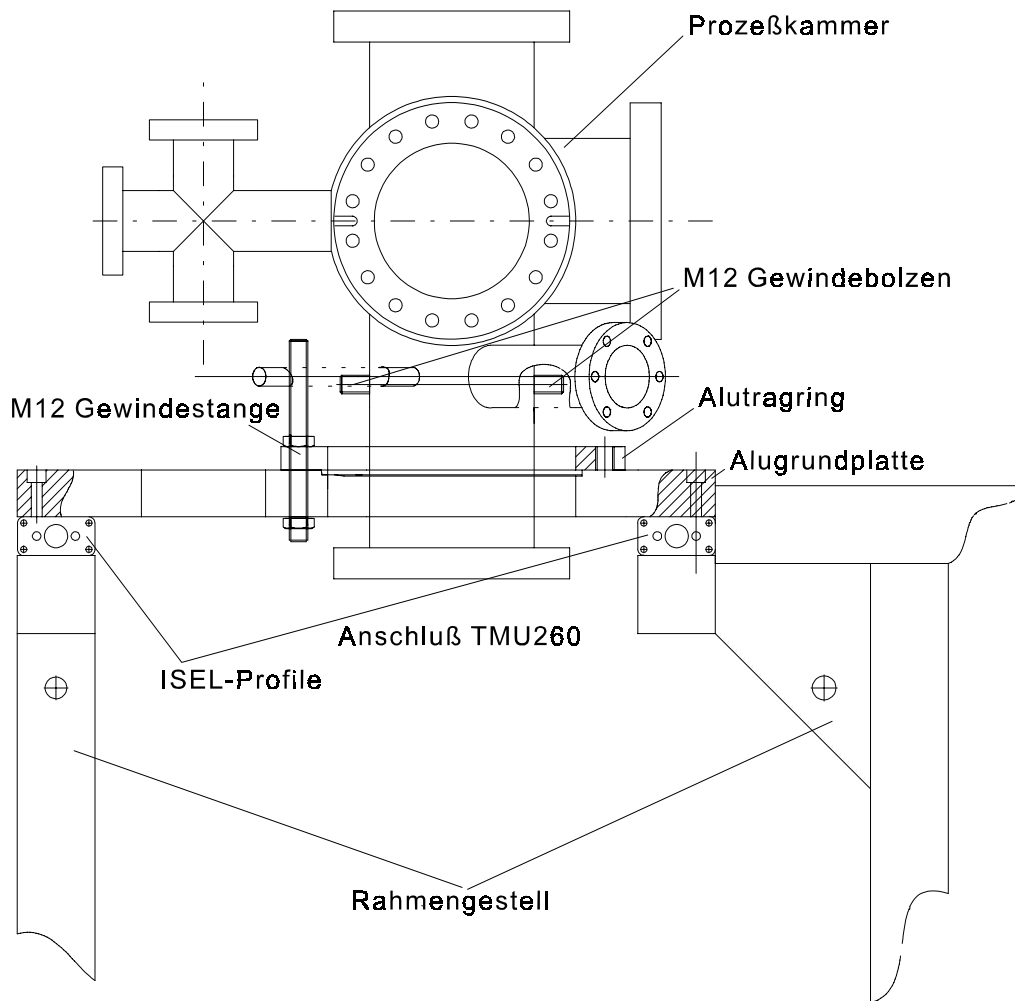


Abb. 2.4.1: Ansicht der Prozeßkammeraufhängung

Die Wickelkammern tragen an ihrem Hals eine angeschweißte Edelstahlplatte mit vier im Quadrat angeordneten Bohrungen. Auf ihrer jeweiligen 30mm starken verschiebbaren Aluträgerplatte befinden sich vier senkrechte M12 Gewindestifte, die durch die Bohrungen greifen. Die großzügig bemessene Toleranz Bohrung/Gewindestange erlaubt neben einer Korrektur der Kammerlage in der senkrechten auch eine Drehung und Verschiebung der Kammer in der horizontalen Ebene.

2.5 Substratheizung

Die Heizung des Substrates erfolgt im Gegensatz zu anderen marktüblichen Systemen direkt. Das Substrat befindet sich in direktem Kontakt zu einer geheizten Metallplatte und wird über die ständige Straffung des Metallbandes angepreßt. Bei üblichen indirekten Heizsystemen erwärmt eine Halogenlampe oder eine heiße Metallplatte das in geringer Entfernung befindliche Substrat. Da sich zwischen Substrat und Heizer ein Vakuum befindet, erfolgt der Wärmeübergang ausschließlich durch Strahlung und die Substrattemperatur wird durch in der Nähe angebrachte Temperaturfühler durch Versuche ermittelt. Bei der direkten Heizung liegt ein Kontakt von Metall auf Metall vor, dessen Wärmeleitfähigkeit mit $100\text{-}210\text{kJ/mh}^\circ\text{C}$ sehr gut ist. Der entsprechend geringe Temperaturgradient erlaubt eine exakte Bestimmung der Substrattemperatur durch den Temperaturfühler. Die Aufheizzeit des Substrates reduziert sich im Gegensatz zum indirekten Heizsystem von Stunden auf wenige Minuten.

Die Substratheizung erfolgt über ein Erhitzen des Substratträgers, auf dem das Substratband aufliegt und welcher an einen CF100 Flansch angeschweißt ist (Abb. 2.5.1). Dieser Flansch wird für die beiden PECVD-Kammern und die TCO-Sputterkammer mit drei Heizpatronen mit je 535W und einem PT100 Temperatursensor bestückt. Die Regelung erfolgt über ein handelsübliches Steuergerät mit selbsteinstellendem PID-Regler und nachgeschaltetem Leistungsschutz. Durch die gewählte Form ist der Wärmeeintrag in die Kammerwände gering, so daß bei 200°C Substrathaltertemperatur die Kammer nur handwarm wird.

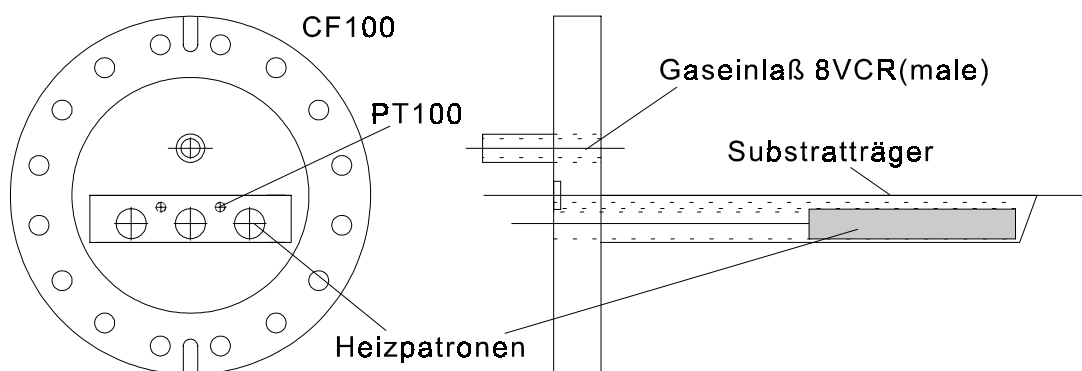


Abb. 2.5.1: Heizflansch mit Substratträger

2.6 Vakuumerzeugung

Das Vakuumsystem der Bandanlage besteht bei jeder Kammer generell aus einer separaten Turbomolekular Drag Pumpe und einem gemeinsamen Vorpumpstand. Die Turbopumpen der Baureihe TMU260 der Firma Pfeiffer Vakuum für die Prozeßkammern und die Turbopumpen der Baureihe TMU520 für die Wickelkammern sind unterhalb der Kammerhalterungen angeflanscht. Die Turbopumpen der Prozeßkammern sind über Sperrschieber von den Kammern zu isolieren, bei den Wickelkammern wurde auf diese Möglichkeit verzichtet. Die Ausgänge aller Turbopumpen münden über Wellschläuche direkt in eine zentrale Vorvakuumleitung, die als Bussystem 14 über Kugelhäne absperrbare Anschlußmöglichkeiten bereitstellt. Die Anschlüsse sind über die Anlagenlänge gleichmäßig verteilt und werden nach Bedarf genutzt. Die als DN-100-ISO-F ausgeführte Vorvakuumleitung mündet in einen trockenverdichtenden Vorpumpstand der Firma Pfeiffer Vakuum. Dieser besteht aus einer dreistufigen Klauenläuferpumpe Typ UNI-DRY-050 und einem angeflanschten Rootsgebläse Typ WKP-1000. Das in Abbildung 2.6.1 dargestellte Saugvermögen des Pumpstandes reicht aus, um unter allen denkbaren Prozeßbedingungen in der Vorvakuumleitung ein ausreichendes Vakuum und eine Saugleistungsreserve bereitzustellen. Die Kurve Nr. 1 stellt das Saugvermögen der UNI-DRY ohne Rootsgebläse bei 60Hz dar. Beim Zuschalten des Rootsgebläses (70Hz) ergibt sich als "Summenkurve" Kurve Nr. 2. In der Praxis wird der Pumpstand mit einer maximal 10m langen Rohrleitung mit 100mm \varnothing und einer Gasgrundlast betrieben. Die Kurven Nr. 3 und Nr. 4 ergeben sich bei vorgenannten Bedingungen und einer Gaslast von 1000sccm (Nr. 3) bzw. 2000sccm (Nr. 4) am Ende dieser Leitung. Bei Bedarf, z.B. durch eine Anlagenerweiterung, kann die Saugleistung durch eine Drehzahlerhöhung mittels Frequenzumrichter bis auf 75Hz noch gesteigert werden (Abb. 2.6.1).

Alle Pumpen, mit Ausnahme des Rootsgebläses, sind wassergekühlt und an die Klimaanlage des Gebäudes angeschlossen. Die Pumpen erreichen dadurch ihre vollen Betriebsleistungen auch im Dauerbetrieb. Die Kühlwasserversorgung der Turbopumpen ist als Kühlwasserbus aufgebaut, an dem die Pumpen parallelgeschaltet sind. Den Vorpumpstand (Abb. 2.6.2) versorgt eine Stichleitung, die über einen Thermostat auch bei geringem Verlustwärmeanfall die Aggregattemperatur konstant hält. Dies verhindert eine aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnung mögliche Berührung der Wälzkörper.

Die Geräuscentwicklung des Vorpumpenstandes wird durch den Einsatz einer Schallschutzhaube wirkungsvoll unterdrückt. Die auch thermisch isolierende Haube wird zur Vermeidung eines Hitzestauens über die "Abluft nichttoxisch" abgesaugt. Der Einsatz der im Gebäude bereitgestellten Wasserkühlung und der Schallschutzhaube verhindert eine unnötige Erwärmung und Geräuscentwicklung im Laborraum wirkungsvoll und erlaubt eine höhere Luftreinheit als die optionale Zwangsluftkühlung mittels Gebläse.

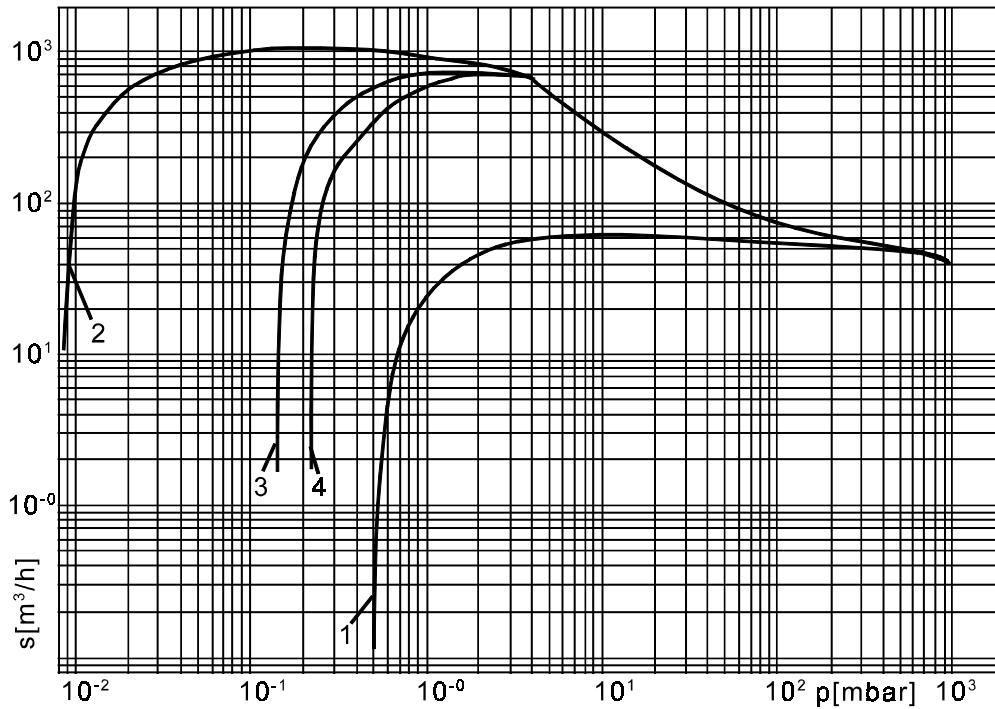


Abb. 2.6.1: Saugvermögen des Vorpumpenstandes und seiner Einzelkomponenten unter verschiedenen Betriebszuständen, 1-UNI-DRY-050 (60Hz), 2-UNI-DRY-050 (60Hz) und WKP-1000 (70Hz), 3-UNI-DRY-050 (60Hz) und WKP-1000 (70Hz) mit 10m Vorkakuumleitung von 100mmØ und Gaslast 1000scm, 4-wie 3 jedoch Gaslast 2000scm



Abb. 2.6.2: Ansicht des Vorpumpenstandes und seiner Einzelkomponenten im geöffneten Schallschutzgehäuse

2.7 Charakterisierung des Vakuumsystems

Um in der Anlage sicher und reproduzierbar prozessieren zu können, ist es notwendig, die prozeßspezifischen Drücke und Gasflüsse aufrechtzuhalten. Besondere Anforderungen werden dabei an das Vorvakuum gestellt. Die Banddepositionsanlage arbeitet mit einem zentralen Vorpumpstand. Dies ist im Hinblick auf konventionelle Systeme, die jede Vakuumkammer mit einer separaten Vorpumplinie evakuieren, die teilweise auch zusätzliche Pumplinien mit Rootsgebläsen für die PECVD-Prozeßdruckregelungen einsetzen, eine erhebliche Einsparung. An der Laborfertigungsanlage wurden so sieben wartungsintensive Einzelvorpumpen mit ihren individuellen Ansteuer- und Überwachungseinrichtungen durch einen einzigen Pumpstand ersetzt. Des weiteren ist dieser Vorpumpstand trockenverdichtend, er arbeitet ohne Öl im Schöpfraum. Eine Rückdiffusion von Pumpenöl, die bei "nassen" Pumpen durch Spülgas unterbunden werden muß, kann so nicht auftreten. Dies garantiert ein kohlenwasserstofffreies Vakuum, welches für den angestrebten Prozeß wünschenswert ist, verschlechtert aber andererseits durch die fehlende Feinstabdichtung den erreichbaren Vorvakuumenddruck. Bedingt durch den zentralen Vorvakuumdruck muß dieser unter allen Prozeßbedingungen innerhalb des geforderten Betriebsfensters aller angeschlossenen Komponenten sein. Die Bemessung des Fördervolumens des zentralen Vorpumpstandes muß ausreichen, um den Druck in der Vakuumbusleitung immer weit unter dem PECVD-Prozeßdruck zu halten. Dies ist unbedingt erforderlich, da die Regelung über ein Drosselklappenventil eine ausreichende Druckdifferenz zwischen Kammer und Saugleitung benötigt.

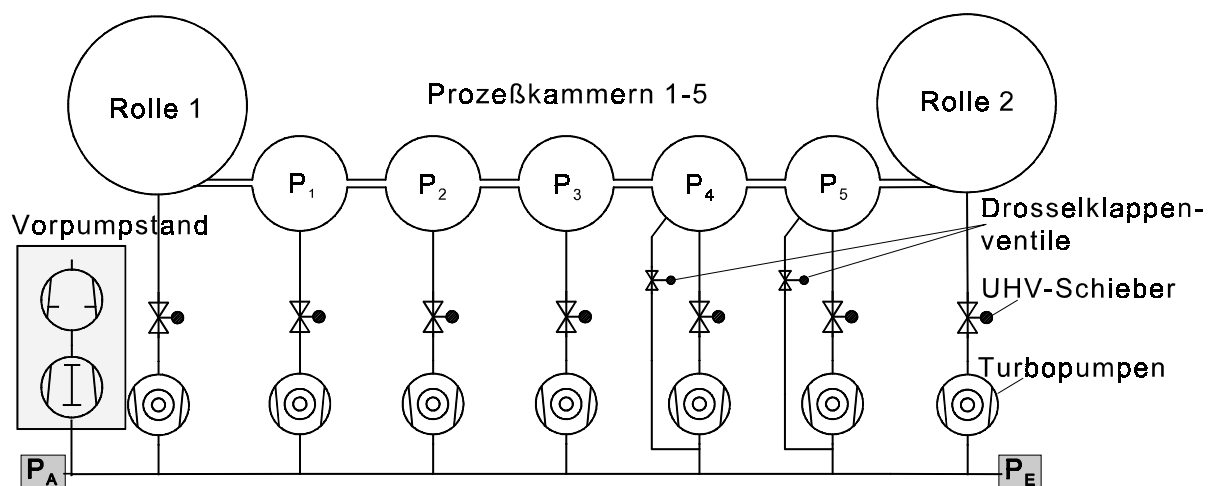


Abb. 2.7.1: Schematische Darstellung des Vakuumsystems

Das Vorvakuumssystem wurde dahingehend untersucht, ob unter allen denkbaren Prozeßbedingungen die erforderlichen Sputter- und PECVD-Drücke in weiten Bereichen variabel realisiert werden können. Die Abhängigkeit der Vorvakuumdrücke (P_A, P_E, siehe

Abb. 2.7.1) vom Gaseinlaß ist in der Tabelle 2.7.1 angegeben. Die maximalen Gasflüsse sind dabei als *worst case* anzusehen. Hierbei sind die Kammerdrücke (P_1 , P_2 , P_4 , P_5) konstant gehalten worden. Die Werte für die Kammerdrücke sind typische Sputter- bzw. PECVD-Prozeßdrücke. Der Gasfluß in die Kammern Nr. 1 und Nr. 2 lag jeweils bei ca. 10sccm, während der Argonfluß in die Kammern Nr. 4 und Nr. 5 variiert wurde.

Tab. 2.7.1: *Abhängigkeit des Vorvakuumdruckes (P_1 , P_2) vom Gaseinlaß*

Σ_{4+5} Argon (sccm)	P_A (mbar)	P_E (mbar)	P_4, P_5 (mbar)	P_1, P_2 (mbar)
100	0,030	0,055	1	0,05
200	0,040	0,075	1	0,05
300	0,050	0,092	1	0,05
400	0,060	0,110	1	0,05

Deutlich ist zu erkennen, daß auch bei sehr hohen Gasflüssen der Vorvakuumdruck gering bleibt. Probleme für die Druckregelung in den PECVD Kammern ergeben sich daher nicht. Der Druckgradient in der ca. 8m langen Vakuumbusleitung ist gering, aber schon deutlich meßbar. Die Messungen bestätigen die erfolgreiche Dimensionierung der Vakuumkomponenten.

2.8 Prozeßdruckregelung

Die Prozeßdruckregelung erfolgt je nach erforderlichem Druckregelbereich unterschiedlich. Für die PECVD- und die Laserkammern sind Drücke im Bereich von 0,3mbar-10mbar erforderlich, während der Druck beim Sputtern üblicherweise 0,002mbar-0,1mbar beträgt. Um diesen unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, werden zwei prinzipiell verschiedene Regelmechanismen eingesetzt.

2.8.1 Regelung mittels Drosselklappe

Die Regelung mittels Drosselklappe erfolgt bei dem für PECVD Prozesse typischen konstanten Gaseinlaß durch eine Variation der Saugleistung an der Kammer. Durch den erforderlichen Druckbereich ist es notwendig, die Turbomolekularpumpe von der Kammer zu trennen, da zum einen die hohe Saugleistung nicht erwünscht ist und die Pumpe sich zum anderen durch die angesaugte Gasmenge beim Verdichten stark aufheizt. Die Abkoppelung erfolgt über den eingebauten Sperrschieber. Um die einströmenden Gase abzupumpen, wird

am unteren Anschluß des CF40 Prozeßkammerkreuzstückes ein Drosselklappenventil angeflanscht, dessen Ausgang über einen Wellenschlauch direkt in die Vorvakuumleitung geführt wird. Das Betriebsgerät des Drosselklappenventils erhält über einen kapazitiven Druckaufnehmer eine dem Kammerdruck proportionale Spannung und steuert über einen PID-Regler die Drosselkappe. Die Parameter des PID-Reglers sind selbsteinstellend und passen sich der Regelstrecke im Lernmodus automatisch an. Der minimal erreichbare Druck liegt bedingt durch die Strömungswiderstände des Wellenschlauches und des Ventils etwa um den Faktor drei höher als der Druck in der Vorvakuumleitung. Der Druckbereich wird nach oben durch den Meßbereich des Druckaufnehmers auf 10mbar begrenzt. Zur schnellen Prozeßdruckauswahl stehen fünf Speicherplätze zur Verfügung.

2.8.2 Druckregelung über Gaseinlaß

Bei dieser Art der Regelung wird zwecks Minimierung des Gasverbrauches die Saugleistung der Turbopumpe an der Kammer gedrosselt, bleibt aber dann konstant. Die Regelung erfolgt nun über den Gaszufluß. Die Drosselung übernimmt ein Dreistellungsschieber, dessen Zwischenstellung variabel ist. Die Druckmessung an der Kammer erfolgt über einen kapazitiven Präzisionsdruckaufnehmer, der von einem Anzeigegerät PR4000 der Firma MKS versorgt und ausgelesen wird. Den Gasfluß steuert ein Massenflußregler TYP 1179, ebenfalls von MKS. Um ein weiteres Massenflußreglersteuer- und Druckregelgerät einzusparen, wird zur eigentlichen Druckregelung der PID-Regler des Massenflußreglers benutzt. Die erforderlichen Betriebsspannungen und Steuergrößen für den Massenflußregler werden über ein speziell angefertigtes Adapterkabel abgezweigt (siehe Kap. 9.4). Die Sollwertvorgabe erfolgt über den einstellbaren *setpoint* des PR4000, der per Tastendruck dem Massenflußregler als Sollwert bereitgestellt wird. Der tatsächliche Durchfluß kann über eine zusätzlich angebrachte Buchse als Spannungswert bezogen auf den Maximaldurchfluß des Massenflußreglers abgelesen werden. Diese Art der Regelung erlaubt in der eingesetzten Konfiguration die präzise Regelung von Drücken im für Sputterprozesse günstigen Bereich von 0,002mbar-0,1mbar. Der Druckbereich wird nach oben durch die minimal einstellbare Saugleistung bzw. den maximalen Gaseinlaß und den Einlaßdruck der Turbopumpe begrenzt. Nach unten bestimmen der minimal einstellbare Gaseinlaß, ca. 2% des Endwertes des Massenflußreglers und das maximale Saugvermögen der Turbopumpe sowie der Meßbereich des eingesetzten Druckaufnehmers den stabilen Regelbereich.

2.9 Charakterisierung der Zwischenstücke

Um in der Bandanlage parallel zu prozessieren, ist es von entscheidender Bedeutung, in den verbundenen Kammern die prozeßindividuellen Optimaldrücke einzustellen. Da durch die immer vorhandene Verbindung der Kammern speziell bei großen Druckdifferenzen, wie sie bei Sputter- (Bereich 10^{-3} mbar) und PECVD-Prozessen (Bereich 1 mbar) zwangsläufig auftreten, eine gegenseitige Beeinflussung durch überströmendes Gas stattfindet, ist das Ziel der Optimierung, diese so gering wie möglich zu halten. Der Einsatz von als Druckstufen fungierenden Extrakammern verbietet sich sowohl aus räumlichen als auch, im Hinblick auf eine spätere Pilotanlage, aus finanziellen Gründen. Bei der Bandanlage wird ein neues Konzept verfolgt. Zwischenstücke mit geringem Strömungsleitwert, durch die das Substrat geführt wird, werden zwischen die Prozeßkammern eingebaut. Die Dimensionierung der Zwischenstücke wird anhand der folgenden Berechnungen festgelegt.

Zunächst muß der Leitwert des Zwischenstückes näherungsweise berechnet werden. Dazu wird überprüft, ob sich die Anordnung im viskosen oder im molekularen Strömungsbereich befindet. Bei einer viskosen Strömung herrschen Stöße der Gasmoleküle untereinander vor, während bei molekularen Strömungsverhältnissen die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle gegenüber der Vakuumleitung groß ist und Stöße mit der Leitungswand vorherrschen. Betrachtet man das Zwischenstück zunächst als Rohr mit dem Durchmesser d , so ergibt sich folgende Bedingung für eine molekulare Strömung:

$$p \cdot d < 10^{-2} \text{ [mbar} \cdot \text{cm]} \quad (2.1)$$

Diese Bedingung ist bei den vorherrschenden Prozeßdrücken p von 0,5 mbar (PECVD) und 0,005 mbar (Sputtern) für Durchmesser d von 0,02 cm-2 cm erfüllt. Der Gesamtleitwert L einer Leitung bei Molekularströmung beträgt:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{\text{ö}}} + \frac{1}{L_L} \quad (2.2)$$

Der Leitwert setzt sich aus dem Öffnungsleitwert $L_{\text{ö}}$ am engsten Querschnitt im Verlauf des Zwischenstückes und dem Strömungsleitwert L_L des gesamten Zwischenstückes zusammen und wird in $1/s$ gemessen. Der Öffnungsleitwert berechnet sich aus der mittleren Teilchengeschwindigkeit c und der Querschnittsfläche A wie folgt:

$$L_{\text{ö}} = \frac{c}{4} \cdot A \quad (2.3)$$

Der Strömungsleitwert berechnet sich aus:

$$L_L = \frac{4 \cdot c \cdot A^2}{3l \cdot u} \quad (2.4)$$

Aus diesen Formeln folgt, daß der Leitwert geringer wird, wenn die Länge groß und der Quotient aus Querschnitt und Umfang klein ist. Zur Optimierung des Zwischenstückes wurden mehrere Ausführungen simuliert, um eine geeignete Geometrie zu entwickeln. Zunächst wurde eine große Anzahl von Schlitzblenden hintereinandergeschaltet, so daß der Gesamtleitwert im wesentlichen aus der Summe der Öffnungsleitwerte der Einzelblenden besteht. Auf der Grundlage der Saugleistung der verwendeten Turbomolekular Drag Pumpe und des Leitwertes der Prozeßkammer wurden unter Variation der Blendenhöhe h Simulationen durchgeführt.

Das Ergebnis der Simulation bei einer konstanten Breite der Blenden von 9cm zeigt Abbildung 2.9.2. Die Blenden ermöglichen schon bei einer recht großen Durchlaßhöhe von 1mm fast Druckverhältnisse von 1/1000 bei nur ca. 50 Blenden. Da aufgrund der geringen Bandstärke und der präzisen Bandführung die Durchlaßhöhe auf ca. 0,5mm reduziert werden kann, wurde auch eine Simulation eines glatten Zwischenstückes mit gleichen Randbedingungen erstellt. Die Abbildung 2.9.3 zeigt, daß diese Anordnung für große Spalthöhen deutlich schlechtere Druckverhältnisse erreicht, aber im angestrebten Bereich von 0,5mm und schmäler der aufwendigen Blendenkonstruktion gleichkommt und diese dann sogar übertrifft.

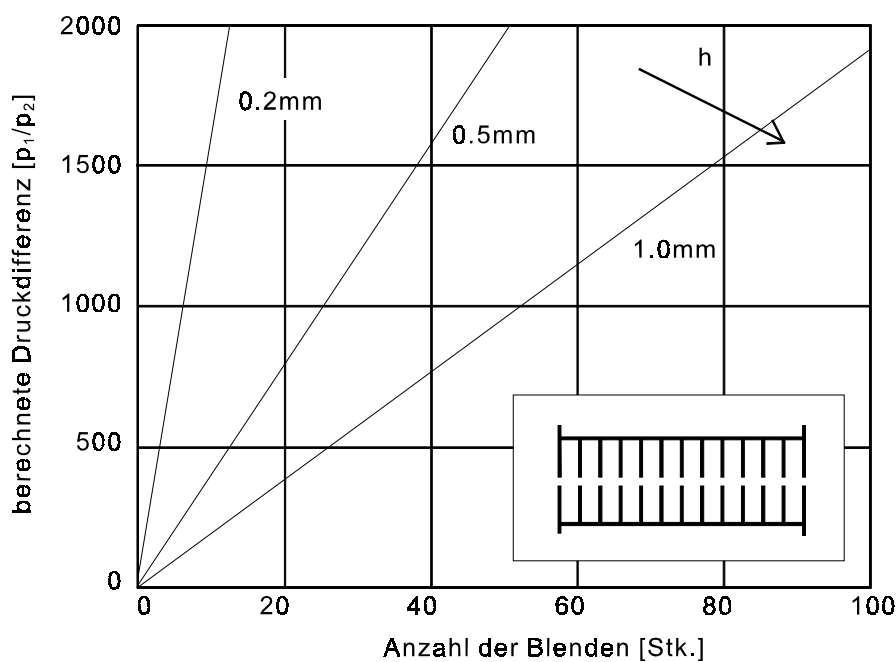


Abb. 2.9.2: Berechnete Druckdifferenz über ein mit Blenden bestücktes Zwischenstück

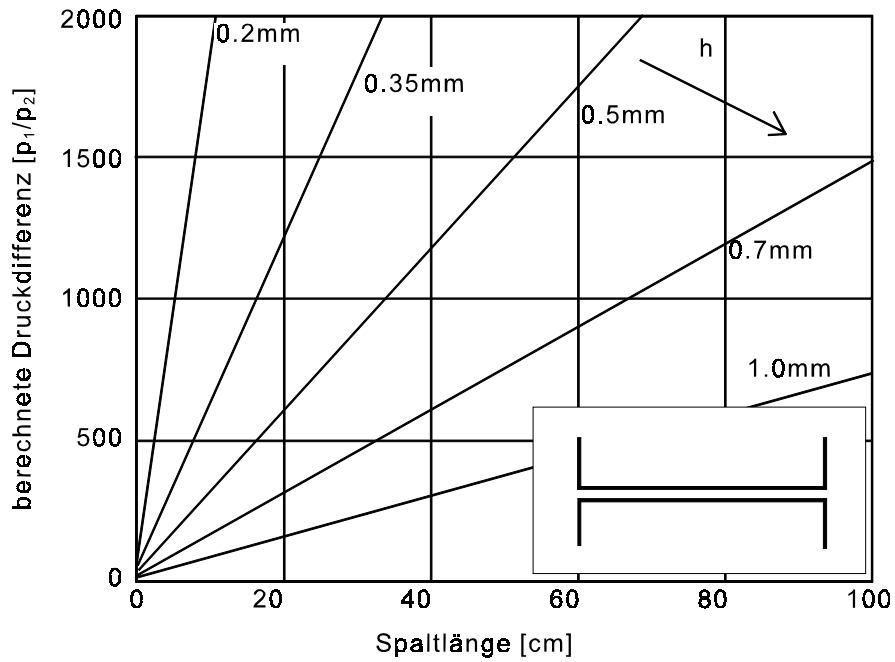


Abb. 2.9.3: Berechnete Druckdifferenz über ein glattes Zwischenstück

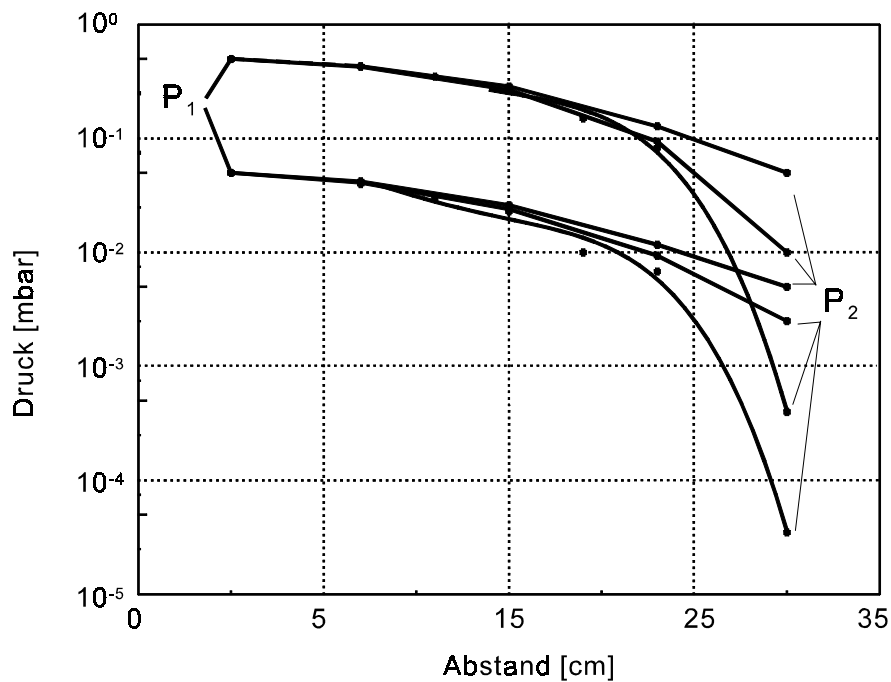


Abb. 2.9.4: Druckverläufe zwischen zwei benachbarten Kammern

Da die Länge der Zwischenstücke aufgrund der begrenzten Ausdehnung der Anlage und der Laborräume auf ein Minimum begrenzt werden muß, scheint ein Zwischenstück mit Blenden zunächst günstiger. Da solche Zwischenstücke nur aufwendig herzustellen und entsprechend kostspielig sind und durch die zwischen den Blendenlamellen befindlichen

Gasmengen sowie die großen verwinkelten Oberflächen sich in Bezug auf Auspumpzeit und Desorptionsrate sehr ungünstig verhalten, wird der Lösung mit einem glatten Spalt von $300 \times 100 \times 0,5 \text{ mm}^3$ (LxBxH) der Vorzug gegeben. Diese Abmessungen erfüllen nicht vollständig die Bedingungen für eine Molekularströmung. Man befindet sich teilweise im Übergangsbereich zwischen viskoser und laminarer Strömung, der Knudsen-Strömung. Die nachfolgenden experimentellen Ergebnisse bestätigen jedoch mit hinreichender Genauigkeit die vorangegangenen Abschätzungen. Die mittels eines besonderen Meßspaltes experimentell bestimmten Druckgefälle über die Verbindungslänge sind in Abbildung 2.9.4 exemplarisch für die Kammern Nr. 1 und Nr. 2 dargestellt. Der Druck P1 wurde konstant gehalten während der Druck P2 in weiten Grenzen variiert wurde.

2.10 Zusammenfassung

Das als komplette Eigenentwicklung entstandene Depositionssystem zur kontinuierlichen photovoltaischen Beschichtung langer, flexibler Substrate wurde erfolgreich aufgebaut. Das Kammerdesign sowohl der Prozeßkammern als auch der Wickelkammern wurde unter wirtschaftlichen und funktionellen Gesichtspunkten optimiert. Durch eine komplexe Aufhängung, die eine Bewegung mit sechs Freiheitsgraden zuläßt, ist es möglich, die einzelnen Kammern hochpräzise zu justieren und durch CF-Flansche zu verbinden. Das so entstandene Vakuumanlagensystem mit fünf Prozeßzonen wird unter Verwendung eines zentralen trockenverdichtenden Vorpumpstandes, einer Neuerung in diesem Anlagenbereich, und Turbomolekularpumpen auf Enddrücke $\leq 3 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$ evakuiert (Wickelkammern $\leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$). In das System integrierte hochvakuumtaugliche Substratheizplatten stehen in direktem Kontakt zum Substrat und heizen dieses minutenschnell auf. Die Substrattemperatur wird dabei präzise angezeigt. Neben der bewährten Prozeßdruckregelung durch Drosselklappenventile wird eine Druckregelung über einen gesteuerten Gaseinlaß an der Grenze zwischen Fein- und Hochvakuum (10^{-2} mbar - 10^{-4} mbar) erfolgreich aufgebaut und eingesetzt. Die zwischen den Depositionszonen montierten Zwischenstücke, die eine Trennung der Einzelprozesse ohne den Einsatz mechanischer Sperrelemente gewährleisten sollen, wurden erfolgreich dimensioniert. Es wurde gezeigt, daß mit dem vorhandenen Pumpsystem und der ausgewählten Geometrien der Druckstufen ein Druckabfall um etwa drei Größenordnungen generiert werden kann. Da die Messungen ohne eingezogenes Stahlsubstrat durchgeführt wurden, ist durch die weitere Querschnittsreduzierung eine Verbesserung des Ergebnisses in der Praxis zu erwarten. Es kann daher eine effektive Trennung der Depositionszonendruckregelung, z.B. der des Sputterprozesses und des PECVD Prozesses, realisiert werden.

3. Herstellung transparenter leitfähiger Schichten

3.1 Der Sputterprozeß

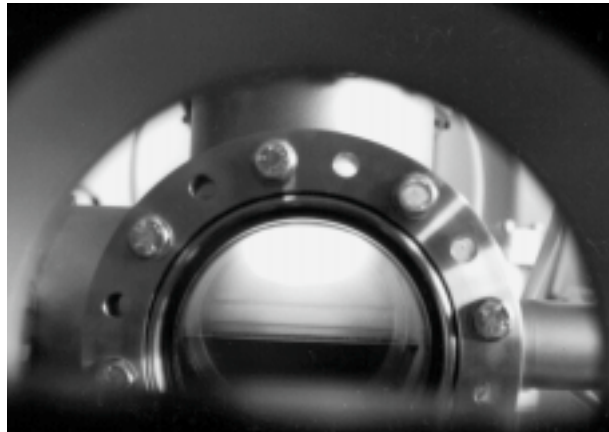


Abb. 3.1.1: Ansicht eines Sputterplasmas in einer Prozeßkammer

Da das Licht auf einer Seite in die Solarzelle einfallen und der erzeugte Strom abgeleitet werden muß, ist ein transparentes und gut leitfähiges Kontaktmaterial erforderlich. Für den Bandanlagenprozeß kommen TCOs zum Einsatz. Das Aufbringen eines TCOs geschieht durch ein PVD (*Physical Vapor Deposition*) Verfahren, das Sputtern, auch Kathodenzerstäubung genannt (Abb. 3.1.1). Das ebenfalls mögliche APCVD (*Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition*) Verfahren ist im vorliegenden Fall ungeeignet, da zum einen der hohe Druck, zum anderen die erforderlichen Temperaturen nicht ins Anlagenkonzept passen [Ada,1991]. Da sich das a-Si:H Schichtsystem, bedingt durch das nicht transparente Substrat, zum Depositionszeitpunkt des TCOs bereits auf dem Substrat befindet, muß ein Niedertemperaturprozeß verwendet werden. Beim Sputtern wird das als Target vorliegende Material mit positiven Gasionen (meist Argon) beschossen, die das abzuschneidende Material aus dem Target lösen. Dazu wird in einem Rezipienten ein Gasplasma unter geringem Druck durch Hochfrequenz oder Gleichspannung angeregt [Adv,1999]. Die positiv geladenen Gasionen werden beschleunigt und schlagen Material aus dem Target. Im Unterschied zu den Gasionen, die im elektrischen Feld hohe Energien (ca. 1keV) aufnehmen bevor sie aufs Target treffen, sind die herausgeschlagenen Moleküle niederenergetisch (einige eV). Die Emission der Moleküle vom Target kann durch eine Cosinus-Winkelverteilung über dem Ort beschrieben werden. Auf dem Substrat, welches auf der Anode liegt, schlägt sich eine Schicht nieder, die in ihrer Zusammensetzung dem Target entspricht. Im Gegensatz zum Aufdampfen ist die Schichtzusammensetzung gut kontrollierbar, und es wird eine sehr gute Kantenbedeckung erreicht.

Um auch Isolatoren sputtern zu können, benutzt man meist die Hochfrequenzanregung des Plasmas, da so eine Gegenaufladung des Targets oder Substrats keine Rolle spielt. Um die Sputterraten zu erhöhen, können durch den Einsatz von Magneten die vom Target emittierten Sekundärelektronen, die ohne Magnetfeld zur Anode beschleunigt werden, auf zycloidischen Bahnen vor dem Target gehalten werden. Dies erhöht die Stoßwahrscheinlichkeit zur Erzeugung zusätzlicher Gasionen. Die Argonionenstromdichte kann so um das 10-100fache auf ca. $100\text{mA}/\text{cm}^2$ gesteigert werden. Die Sputterraten werden dadurch ebenfalls gesteigert [Wid,1996]. Bei ferromagnetischen Targetmaterialien wird das Magnetfeld geschwächt, und die Sputterratensteigerung ist entsprechend geringer. Während normalerweise das Sputtergas nur als Werkzeug dient, wird beim reaktiven Sputtern ein Gasgemisch verwendet, welches mit den abgesputterten Molekülen reagiert. So ist es möglich, z.B. Oxide aus nichtoxidischen Targets unter Zugabe von Sauerstoff zu sputtern.

3.2 Experimenteller Aufbau

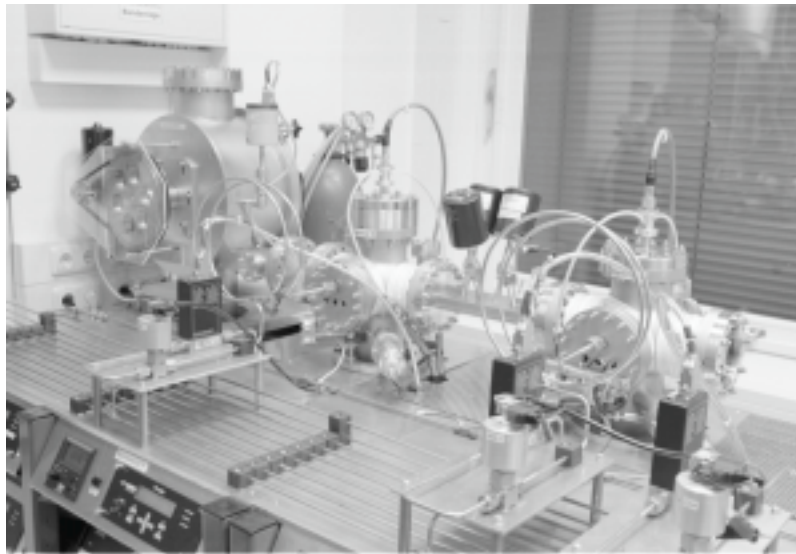


Abb. 3.2.1: Ansicht der Sputterkammern mit Gaszuführung

In der Bandanlage wird eine Magnetronsputterquelle für 3“-Targets verwendet. Die Plasmaanregung erfolgt durch einen Hochfrequenzgenerator mit nachgeschaltetem automatischem Anpaßnetzwerk. Die Kathode ist wassergekühlt, hat einen Außendurchmesser von nur 85mm und wird von oben in den Standardrezipienten eingebaut. Es stehen oxidische Targets aus ITO (*Indium Tin Oxide*) mit 90 Gewichts% Indiumoxid und 10 Gewichts% Zinnoxid sowie ZnO (Zinkoxid), dotiert mit 2 Gewichts% Al_2O_3 (Aluminiumoxid), zur Verfügung. Diese Oxide sind heiß gepreßt (gesintert) und zur besseren Wärmeableitung mit einer Kupferrückplatte verklebt. Das Substrat befindet sich wie beim PECVD Prozeß auf einer

beheizbaren und geerdeten Substrathalteplatte. Der Abstand zwischen Target und Substrat beträgt 50mm und kann über CF100 Distanzringe von 20mm und 40mm Dicke vergrößert werden. Der Prozeßgaseinlaß erfolgt seitlich über ein 8mm Edelstahlrohr oberhalb der Substrathalteplatte. Die Absaugung des Gases unterhalb der Substrathalteplatte erfolgt am Kammerhals über einen Dreistellungsschieber und die Turbopumpe. Die Druckregelung erfolgt über Variation des Gaseinlasses (siehe Kap 2.7.2). Eine Ansicht der beiden Sputterkammern zeigt Abbildung 3.2.1. Die Ermittlung der optimalen Parameter zur Deposition zielt auf eine TCO-Schicht ab, welche über die gesamte Fläche einen möglichst gleichmäßig verteilten niedrigen Widerstand hat. Außerdem wird eine gleichmäßig hohe Transmission über den gesamten aktiven Spektralbereich (450nm-850nm) angestrebt. Die Schicht soll im Bereich der notwendigen Schichtdicke ausreichend haftfähig sein und sich im Laufe der Zeit in ihren optischen und elektrischen Eigenschaften nicht wesentlich verändern.

Für Untersuchungszwecke eignet sich ein Substrat in Originalgröße einer Solarzelle, jedoch nicht das später für die Solarmodule zu verwendende Trägermaterial Stahl, da dieses die notwendige elektrische Messung verfälschen und die optischen Messungen nicht ermöglichen würde. Deshalb wird als Substrat Glas der Größe 90x90x2,5mm³ verwendet.

3.3 Elektrische Messungen

Zur elektrischen Charakterisierung gehört der Flächenwiderstand R_{sq} . Die diskreten Werte sind ein Maß für die Homogenität der Leitfähigkeit. Der in Probenmitte gemessene Flächenwiderstandswert in Verbindung mit der an derselben Stelle gemessenen Schichtdicke dient zur Ermittlung des spezifischen Widerstandes ρ .

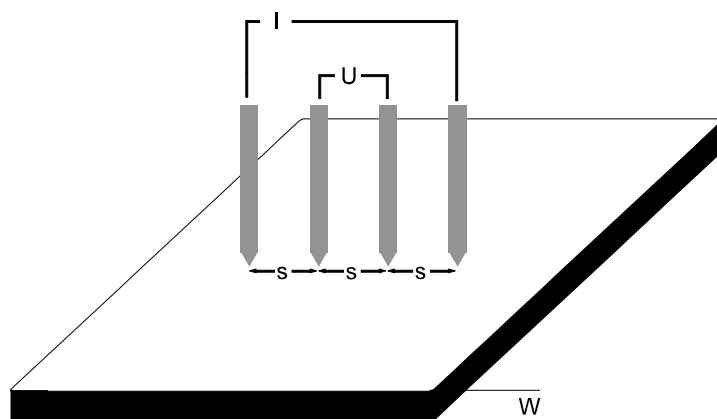


Abb. 3.3.1: Vierspitzen Meßanordnung

Der Flächenwiderstand R_{sq} und der spezifische Widerstand ρ wurden über die Vierspitzenmeßmethode ermittelt. Zur Erläuterung wird die Anordnung aus Abbildung 3.3.1 herangezogen. In die Probe wird mittels einer Stromquelle ein konstanter Strom über die beiden äußeren leitfähigen Spitzen der Apparatur eingepreßt. Nun fällt über den Bereich des fließenden Stroms eine Spannung ab, welche man über die Strecke s der beiden inneren Meßspitzen leistungslos abgreifen kann. Strom und Spannung führen zum spezifischen Widerstand ρ über die allgemeine Beziehung:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot W \cdot \frac{\pi}{\ln 2} \cdot F\left(\frac{W}{s}\right) = R_{sq} \cdot W \quad (3.1)$$

Die Funktion $F(W/s)$ kann für das gegebene Verhältnis Schichtdicke zu Maßspitzenabstand $W/s \ll 1$ gleich 1 gesetzt werden. Für die Berechnung des Flächenwiderstandes R_{sq} erübrigt sich die Kenntnis der Schichtdicke, und man ermittelt diesen aus der Gleichung:

$$R_{sq} = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi}{\ln 2} \quad (3.2)$$

Um Aussagen über die Homogenität machen zu können, wurden an 16 gleichmäßig über die ganze Probe verteilten Punkten Messungen durchgeführt. Der Durchschnitt aus den sechzehn R_{sq} -Werten ergibt das durchschnittliche R_{sq} der Probe.

3.4 Optische Messungen

Die optische Charakterisierung bezieht sich auf zwei Meßgrößen. Diese sind Transmission und Reflexion, aus denen sich die Schichtdicke bestimmen läßt. Die Schichtdicke wird, wie bereits beschrieben, zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes benötigt und ergibt außerdem, durch die Abscheidungszeit dividiert, die Abscheidungsrate. Der Meßbereich für die spektrale Transmission erstreckt sich von 350nm bis 850nm. Durch die Intensität I_0 des einfallenden und die Intensität I des transmittierten Lichtes, bzw durch den Absorptionskoeffizient a , ist die optische Transmission formal wie folgt definiert:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-ad} \quad (3.3)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, daß das Glassubstrat an der Ein- und Austrittsfläche jeweils Reflexionsverluste des einfallenden Lichtes von ca. 4% aufweist und demnach eine Transmission von 92% als mögliches Maximum angesehen werden muß. Der Vergleich der Proben hinsichtlich der Transmission erfolgte über die Mittelung der Einzelmeßwerte unter Berücksichtigung der Transmissionsverluste des Substrats, so daß sich die angegebenen Transmissionswerte direkt auf die Schicht beziehen. Die Schichtdicke errechnet sich aus dem spektralen Verlauf der Transmission und der Reflexion, welcher in einer weiteren Messung zusätzlich aufgenommen wird. Für diese Verläufe wurde ein Meßbereich von 400nm bis 1030nm benutzt. Beispielphaft ist in Abbildung 3.4.1 der spektrale Verlauf von Transmission, Reflexion und der Summe aus beiden von einer repräsentativen Probe abgebildet. Subtrahiert man die Summe aus beiden von eins, so erhält man die Absorption.

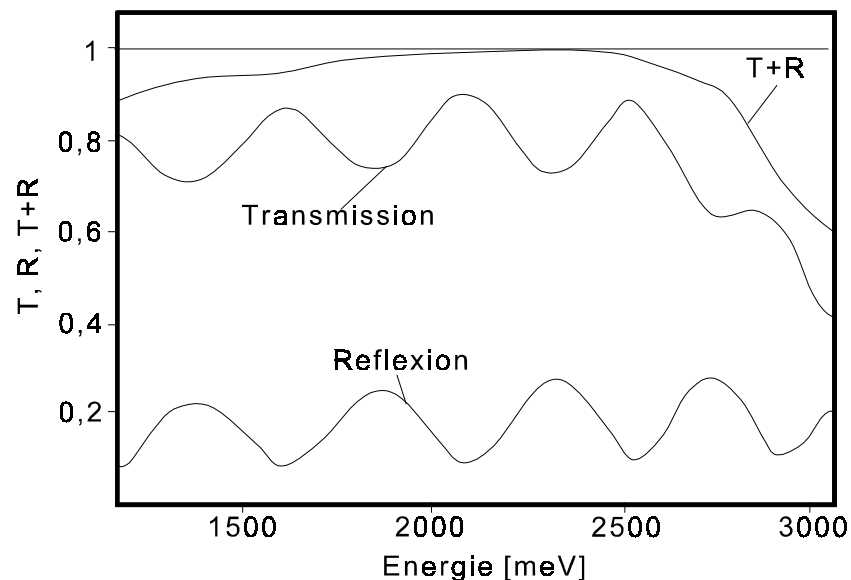


Abb. 3.4.1: Transmission, Reflexion und deren Summe am Beispiel der Probe Nr. 66

Es gilt die Beziehung $T(\text{ransmission})+R(\text{eflexion})+A(\text{bsorption})=1$. Sehr gut erkennt man die interferenzbedingten Extrema, welche zur Schichtdickenbestimmung herangezogen werden. Im Bereich möglichst geringer Absorption nimmt man wenigstens zwei Abszissenwerte der Ordnung $m_i=1, 2, \dots$ der Transmissionsminima und ihrer korrelativ gegenüberliegenden Reflexionsmaxima auf. Idealerweise nimmt man an, daß die Differenz $l_{m+1}-l_m$ zwischen verschiedenen benachbarten Extrema immer gleich ist. Nun wird die Schichtdicke aus dem bekannten durchschnittlichen Brechungsindex n über die Größe der jeweiligen Transmissionsminima ermittelt. Es gilt:

$$n \cdot d = m_i \cdot \frac{\lambda_1}{2} \quad \text{und} \quad n \cdot d = m_{i+1} \cdot \frac{\lambda_2}{2} \quad (3.4)$$

Durch geeignete Umformung ergibt sich die Dicke d [Bro,1989]:

$$m_{i+1} - m_i = 2nd \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (3.5)$$

$$d = \frac{m_{i+1} - m_i}{2n} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (3.6)$$

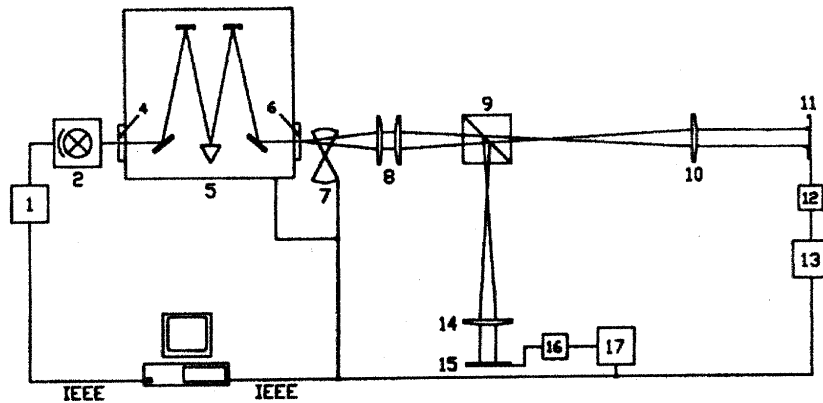


Abb. 3.4.2: Schematische Zeichnung des optischen Meßplatzes

Für die Messung stand ein optischer Meßplatz zur Verfügung (Abb. 3.4.2). Eine von einem Netzteil (1) gespeiste Lichtquelle (2) beleuchtet den Eintrittsspalt eines Monochromators (5). Dieser fungiert im Prinzip als optisches Filter, wobei aus dem gesamten einfallenden Spektrum ein schmales λ -Band weitergeleitet wird und am Monochromatorausgang (6) austritt. Von dort aus trifft das nun monochromatische Licht auf ein Chopperrad (7), um dort zur Verwertbarkeit für die Lock-in-Verstärker (13 und 17) zu Wechselimpulsen geformt zu werden. Das Chopperrad in Form eines Schlitzscheibenrades wird von einem drehzahlgeregelten Motor angetrieben. Zusätzlich gibt die Regelung die Frequenz als Referenzsignal an die Lock-in-Verstärker weiter. Das gechoppte Licht erreicht über eine Optik (8) einen Strahlteilerwürfel (9), von wo es zum einen in den Referenzkanal und zum anderen in den Meßkanal tritt. Dort geht es jeweils über eine Optik (10,14) und erreicht schließlich die entsprechenden Photozellen (11,15) der Kanäle. Im Falle der Kalibrierung befindet sich kein Meßobjekt im Meßkanal, bei der Vermessung eines Objektes steht dieses im Meßkanal zwischen Optik und Photozelle. Der von den beiden Zellen generierte Strom fließt in je einen Vorverstärker (12,16). Das generierte Spannungssignal wird nun den beiden Lock-in-Verstärkern zugeführt. Diese stellen prinzipiell einen schmalbandigen Filter hoher Güte dar und haben somit die Eigenschaft, ein periodisches, symmetrisches Meßsignal einer bekannten

Frequenz aus dem Rauschen selektiv herauszufiltern. Sie wirken auf das Meßsignal wie ein phasenempfindlicher, linearer Gleichrichter, wobei das Eingangssignal mit dem Referenzsignal multipliziert wird und darauf das so gewonnene Ausgangssignal einen Tiefpaßfilter mit wählbarer Zeitkonstante t durchläuft. Die erreichte Güte Q ist sowohl von der Referenzfrequenz f_R als auch von der Zeitkonstante τ abhängig:

$$Q = \pi \cdot \tau \cdot f_R \quad (3.7)$$

Wie aus Abbildung 3.4.2 ersichtlich ist, werden sowohl das Netzteil, der Chopper, der Monochromator, als auch die Lock-in-Verstärker vom Rechner programmgesteuert. Die Verstärker geben die ermittelten Werte an den Rechner zur Verarbeitung weiter [Som,1992]. Wie beschrieben erfolgt bei der Messung eine gleichzeitige Erfassung von Werten in einem Referenz- und einem Meßkanal, wobei diese nach Erfassung durch Lock-In Verstärker zueinander in Bezug gesetzt werden. Der Vorteil dieser Meßmethode liegt in der relativen Messung, so daß keine Kenntnis der absoluten Lichtleistung notwendig ist, als auch darin, daß zeitweilige Intensitätsschwankungen der Lichtquelle das Meßergebnis kaum beeinflussen.

3.5 Optimierung

Es wurden ca. 100 TCO-Proben hergestellt und untersucht [Grü,1999]. Ausgangsposition für die Optimierung waren Prozeßparameter, die in Tabelle 3.5.1 festgehalten sind. Variiert wurden diverse Abscheidungsparameter:

Systemparameter

- Evakuierungszeit
- Belüftungszeit
- Systembasisdruck

Prozeßparameter

- Substrattemperatur
- Prozeßdruck
- Kathodenabstand
- Depositionsdauer
- Plasmaleistung

Es zeigte sich, daß die Optimierung der Depositionsparameter für ITO und ZnO getrennt vorgenommen werden muß, da diese nicht nur anlagenspezifisch, sondern bei einigen Parametern auch materialabhängig sind. Da beide Materialien unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, sind auch direkte Vergleiche der absoluten Meßwerte schlecht möglich. In den folgenden Betrachtungen werden daher nur relative Änderungen bewertet.

Tab. 3.5.1: Startparameter der Optimierung

Material Sputtertarget	ITO / ZnO
Basisdruck [mbar]	ca. $1,0 \times 10^{-5}$
Prozeßdruck [mbar]	0,005
Depositionsdauer [min]	30
Plasmaleistung [W]	50
Substrat <-> Target [cm]	5
Substrattemperatur [°C]	20

3.5.1 Einfluß der Substrattemperatur

Die Substrattemperatur wurde zwischen 20°C und 200°C variiert. Temperaturen oberhalb von 200°C wurden im Hinblick auf die später auf dem Substrat befindlichen temperaturempfindlichen a-Si:H Schichten nicht erprobt. In diesem Temperaturbereich konnte weder bei ITO noch bei ZnO ein meßbarer Einfluß auf Leitfähigkeit, Transmission und Homogenität dieser Parameter festgestellt werden. Aus diesem Grund fanden alle folgenden Abscheidungen bei 20°C statt.

3.5.2 Einfluß der Belüftungs- und Evakuierungsdauer

Die Tatsache, daß es sich um hochporöse Sintertargets handelt, läßt vermuten, daß diese sich beim Beladen des Rezipienten mangels einer Beladeschleuse mit Atmosphärenbestandteilen vollsaugen. Diese gasen dann beim Evakuieren mehr oder weniger schnell aus, der Rest wird beim Zünden des Plasmas teilweise aus dem Target gelöst und in die Schicht eingebaut. Um den Einfluß dieses zeitabhängigen Prozesses besonders im Hinblick auf den späteren Bandprozeß zu überprüfen, wurden die Evakuierungsdauer im Bereich 1,5h-120h und die Belüftungszeit von 6min-42min variiert. Um den Einfluß der Belüftungsdauer auf den Evakuierungsprozeß der Versuchsanordnung zu untersuchen, wurden zunächst einige Druckverläufe aufgenommen (Abb. 3.5.2.1).

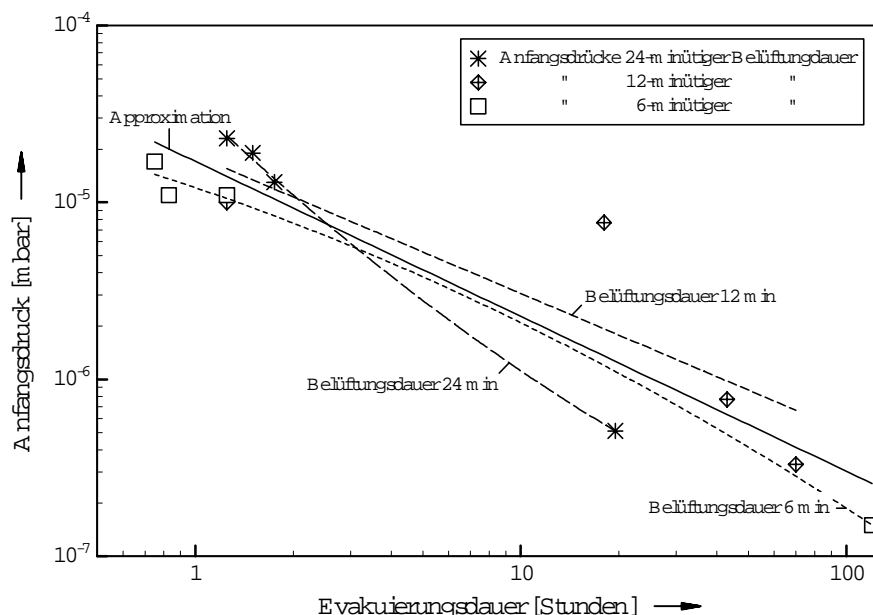


Abb. 3.5.2.1: Einfluß der Belüftungszeit auf das Evakuierungsverhalten (Approximation ohne Berücksichtigung der Belüftungszeit)

Aus den sich schneidenden Kurven ist zu erkennen, daß unterhalb eines Druckes von $1 \cdot 10^{-5}$ mbar die Belüftungszeit keinen Einfluß auf das Evakuierungsverhalten hat. Die Variation der Evakuierungsdauer wurde daher bei Basisdrücken unterhalb $1 \cdot 10^{-5}$ mbar durchgeführt, wo keine Korrelation zwischen Druck und Belüftungszeit besteht, die Variation der Belüftungsdauer dagegen oberhalb dieser Grenze. Während sich bei der Variation der Evakuierungsdauer für keinen der Optimierungsparameter eine Abhängigkeit ergab, zeigte sich bei der Variation der Belüftungsdauer eine geringe Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von ca. 20%. Als Anfangsdruck für diese Messungen wurde aus oben genannten Gründen ein Wert von ca. $1,5 \cdot 10^{-5}$ mbar ausgewählt.

3.5.3 Einfluß des Basisdruckes

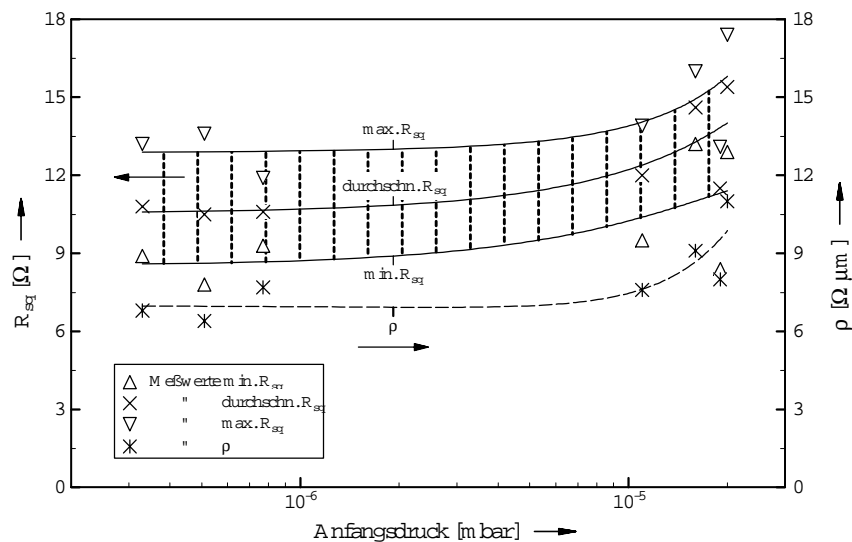


Abb. 3.5.3.1: Einfluß der Basisdruckvariation auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ITO

Als nächstes wurde der Einfluß des Systembasisdruckes auf die Schichtqualität untersucht. Der Systembasisdruck wurde von $3,3 \cdot 10^{-7}$ mbar bis $2 \cdot 10^{-5}$ mbar variiert. Dabei ergaben sich für die elektrischen Eigenschaften bis zu einem Druck von $5 \cdot 10^{-6}$ mbar keine Beeinflussungen. Oberhalb dieses Wertes stiegen die Widerstandswerte an, wie in Abbildung 3.5.3.1 exemplarisch für ITO ersichtlich. Aus den in Abbildung 3.5.3.2 dargestellten optischen Messungen ist ersichtlich, daß die Schichtdicke konstant bleibt, die Transmission jedoch leicht zunimmt. Die Messungen lassen einen Einfluß des Basisdruckes auf die Schichten erkennen. Der Reaktor beinhaltet bei einem Prozeßdruck von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar (bei vereinfachenderweise angenommener gleicher Dichte der Atmosphärenbestandteile) und

einem Basisdruck von $5 \cdot 10^{-7}$ mbar ca. 0,01% Restgas- und Desorptionsanteil. Bei einem Basisdruck von $5 \cdot 10^{-5}$ mbar steigt dieser Anteil auf 1%. Es scheint, daß dies bereits nicht mehr zu vernachlässigen ist und einen merkbaren Einfluß auf die erreichbare Schichtqualität hat.

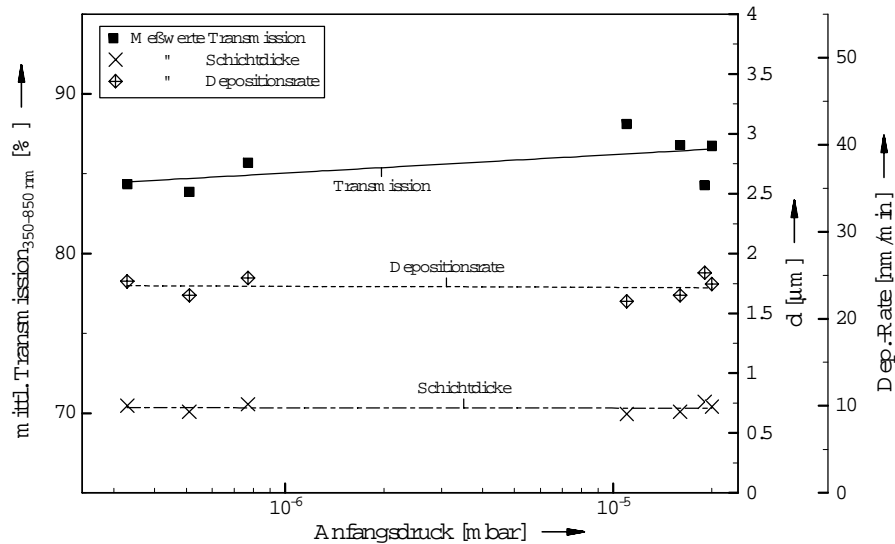


Abb. 3.5.3.2: Einfluß der Basisdruckvariation auf die Transmission für das Sputtern von ITO

3.5.4 Einfluß des Prozeßdruckes

Nachdem nun die Prozeßvorbereitungen ausreichend charakterisiert sind, erfolgt die Variation der eigentlichen Prozeßgrößen. Der Einfluß des Prozeßdruckes auf die Schichten ist für ITO und ZnO getrennt untersucht worden. Die Prozeßparameter sind in Tabelle 3.5.4.1 zusammengefaßt. Der Prozeßdruck wurde von 0,0025mbar bis 0,01mbar variiert. Für die elektrischen Eigenschaften von ITO ergaben sich die in Abbildung 3.5.4.1 dokumentierten Zusammenhänge. Der spezifische Widerstand bleibt bis zu einem Prozeßdruck von 0,0075mbar fast konstant niedrig, um dann exponentiell stark anzusteigen.

Tab. 3.5.4.1: Prozeßparameter bei variablem Prozeßdruck

Material Sputtertarget	ZnO:Al ₂ O ₃	In ₂ O ₃ :SnO ₂
Anfangsdruck [mbar]	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Depositionsdauer [min]	70	30
Sputterleistung [W]	75	50
Substrat <-> Target [cm]	5	5
Prozeßdruck [mbar]	variabel	

Die in Abbildung 3.5.4.2 für ZnO dokumentierten elektrischen Eigenschaften zeigen ebenfalls einen Anstieg des spezifischen Widerstandes, der sich jedoch über den untersuchten Druckbereich linear verhält. Beide Abbildungen zeigen einen signifikanten Unterschied in der Variation des Flächenwiderstandes. Bei ITO nehmen die Inhomogenitäten im untersuchten Druckbereich mit steigendem Druck zu, während sie sich beim ZnO über den gesamten Druckbereich zeigten. Des weiteren läßt die elektrische Qualität des ITO im Bereich von 0,0075mbar-0,01mbar, wie durch den steigenden spezifischen Widerstand belegt, stark nach. Beim ZnO erfolgt der Anstieg der spezifischen Widerstandes wiederum gleichmäßig über den untersuchten Druckbereich.

Die optischen Eigenschaften der Schichten sind in Abbildung 3.5.4.3 für beide Materialien zusammengefaßt. Die Schichtdicke nimmt mit steigendem Druck für beide Materialien etwas ab. Die Transmission von ZnO zeigt erwartungsgemäß eine mit sinkender Schichtdicke erhöhte Transparenz. ITO hingegen verhält sich umgekehrt. Die bei geringem Druck abgeschiedenen dicken Schichten sind transparenter als die bei höherem Druck abgeschiedenen dünnen Schichten.

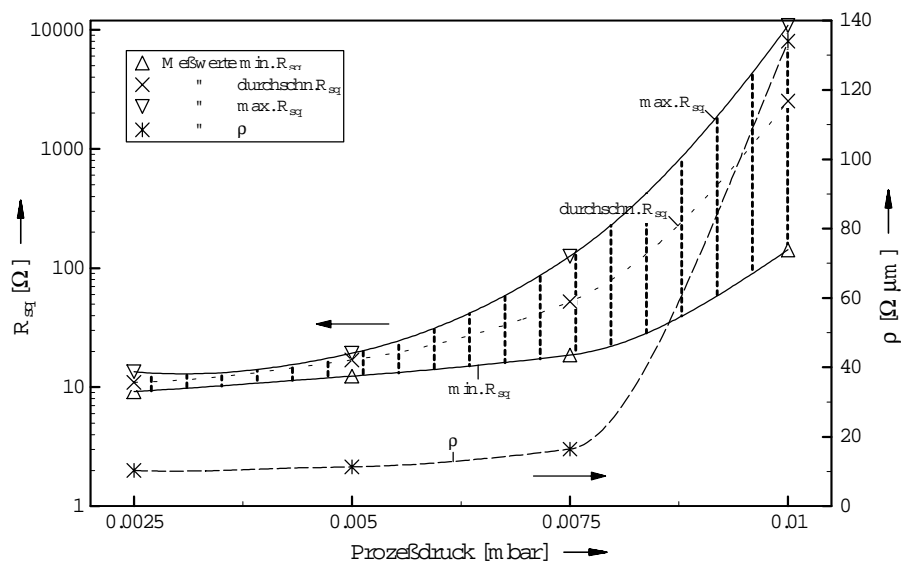


Abb. 3.5.4.1: Einfluß der Prozeßdruckvariation auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ITO

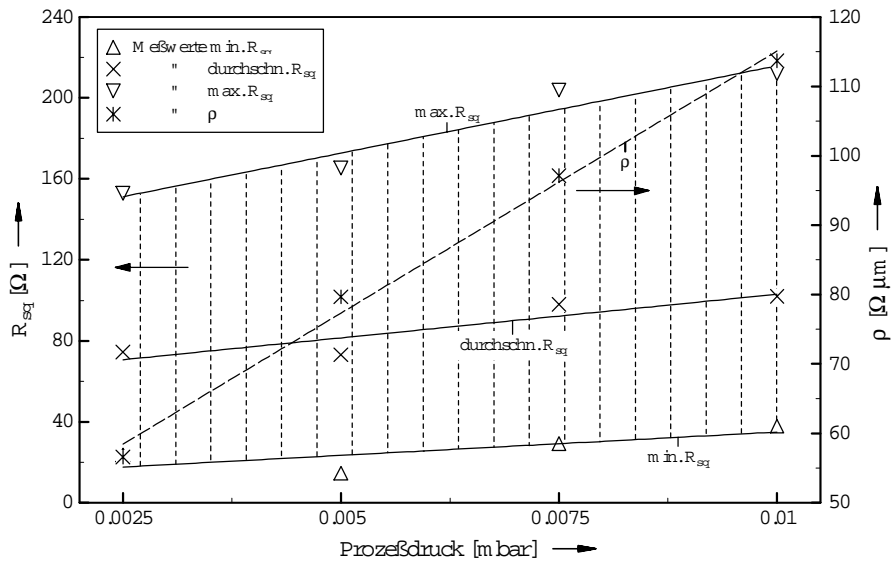


Abb. 3.5.4.2: Einfluß der Prozeßdruckvariation auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ZnO

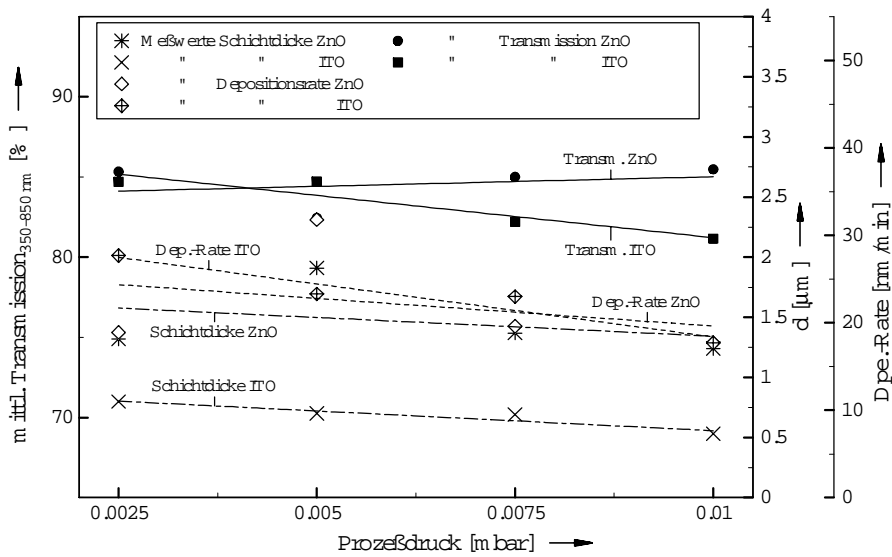


Abb. 3.5.4.3: Einfluß der Prozeßdruckvariation auf die Transmission für das Sputtern von ITO und ZnO

3.5.5 Einfluß des Abstandes von Substrat und Target

Als nächster Prozeßparameter wird der Abstand vom Target zum Substrat variiert. In Tabelle 3.5.5.1 sind die Startbedingungen der Versuchsreihe zusammengefaßt. Sowohl ITO als auch ZnO weisen ähnliche Abhängigkeiten der elektrischen Eigenschaften vom Abstand von Substrat und Target auf. Die in den Abbildungen 3.5.5.1 für ITO und 3.5.5.2 für ZnO gezeigten Kurven verzeichnen mit zunehmendem Abstand einen exponentiellen Anstieg. Die

Homogenität wird durch die Abstandsänderung kaum beeinflusst. Die optischen Eigenschaften der Schichten sind in Abbildung 3.5.5.3 für beide Materialien zusammengefaßt. Erwartungsgemäß nimmt die Schichtdicke mit steigendem Abstand ab. Das zerstäubte Material schlägt sich auf einer größeren Fläche nieder oder wird mit dem Arbeitsgas über die Turbopumpe abgesaugt. Dieser Einfluß ist beim ZnO sehr stark ausgeprägt und beim ITO kaum vorhanden. Wie auch bei der Variation des Prozeßdruckes, korrelieren beim ZnO Schichtdicke und Transmission. Beim ITO sind keine Transmissionsänderungen zu beobachten.

Tab. 3.5.5.1: Prozeßparameter bei variablem Substratabstand

Material Sputtertarget	ZnO:Al ₂ O ₃			In ₂ O ₃ :SnO ₂		
Anfangsdruck [mbar]	<1,1x10 ⁻⁵			<1,0x10 ⁻⁵		
Prozeßdruck [mbar]	0,005			0,005		
Depositionsdauer [min]	60			30		
Sputterleistung [W]	75			50		
Substrat <-> Target [cm]	4	5	7	5	7	9

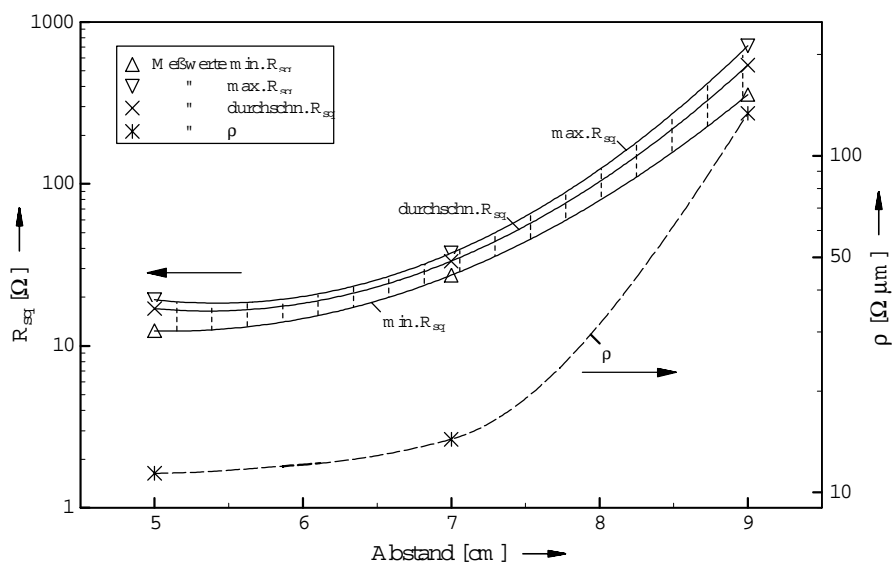


Abb. 3.5.5.1: Einfluß des Kathodenabstandes auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ITO

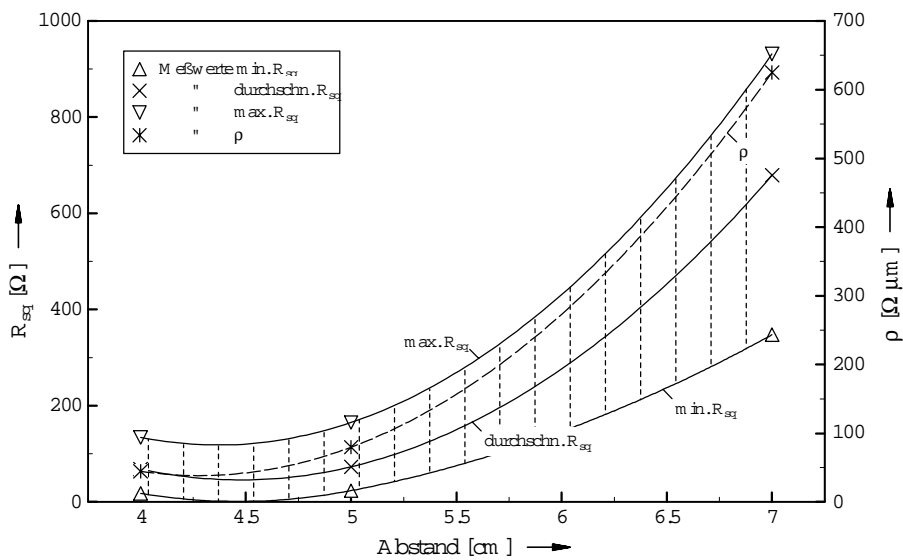


Abb. 3.5.5.2: Einfluß des Kathodenabstandes auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ZnO

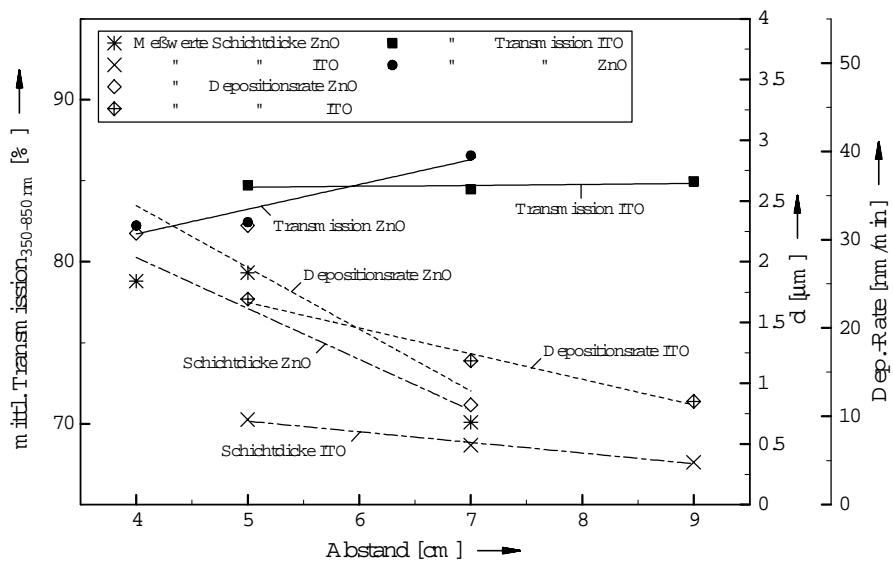


Abb. 3.5.5.3: Einfluß des Kathodenabstandes auf die Transmission für das Sputtern von ITO und ZnO

3.5.6 Einfluß der Sputterleistung

Da auch die in das Argonplasma eingebrachte HF-Leistung einen Einfluß auf die Schichtqualität hat, wird dieser ebenfalls untersucht. Tabelle 3.5.6.1 zeigt die Parameter dieser Meßreihe.

Tab. 3.5.6.1: Prozeßparameter bei variabler Sputterleistung

Material Sputtertarget	ZnO:Al ₂ O ₃			In ₂ O ₃ :SnO ₂		
Anfangsdruck [mbar]	<1,0x10 ⁻⁵			<1,0x10 ⁻⁵		
Prozeßdruck [mbar]	0,005			0,005		
Depositionsdauer [min]	90			30		
Substrat <-> Target [cm]	5			5		
Sputterleistung [W]	35	50	65	25	50	75

Die Menge des gesputterten Materials ist proportional zur Plasmaleistung. Die Schichtdicke beider Materialien steigt an, und der Flächenwiderstand sinkt. Da der spezifische Widerstand ebenfalls sinkt, tritt auch eine Verbesserung der elektrischen Schichtqualität auf. Wie bereits bei der Variation des Prozeßdruckes sind die Abhängigkeiten für ITO exponentiell und streben bei 70W ein Minimum an, während sie bei ZnO linear sind. Die Abbildungen 3.5.6.1 und 3.5.6.2 zeigen die elektrischen Meßwerte, die Abbildung 3.5.6.3 zeigt die zugehörigen optischen Meßwerte. Neben der bei beiden Materialien mit zunehmender Leistung sinkenden Transmission zeigt sich hier, daß die Sputterrate von ITO ca. zweimal höher ist als die von ZnO. Durch die gewählten Depositionszeiten ist die Schichtdicke des ZnO höher als die des ITO. Die dünne ITO Schicht ist jedoch nicht so transparent wie die dicke ZnO Schicht. Um diesen Effekt näher zu beleuchten, wurde aus allen Depositionen die mittlere Transmission über der Schichtdicke aufgetragen und in Abbildung 3.5.6.4 dargestellt. Hier zeigt sich aus den extrapolierten Kurven neben dem bereits erwarteten exponentiellen Verlauf die bei gleicher Transmission fast doppelt so große Schichtdicke des ZnO gegenüber der des ITO. Aus der Darstellung läßt sich außerdem für ITO eine größere Abhängigkeit der Transmission von den Prozeßparametern feststellen, da die Streuung der Meßwerte höher ist als die von ZnO.

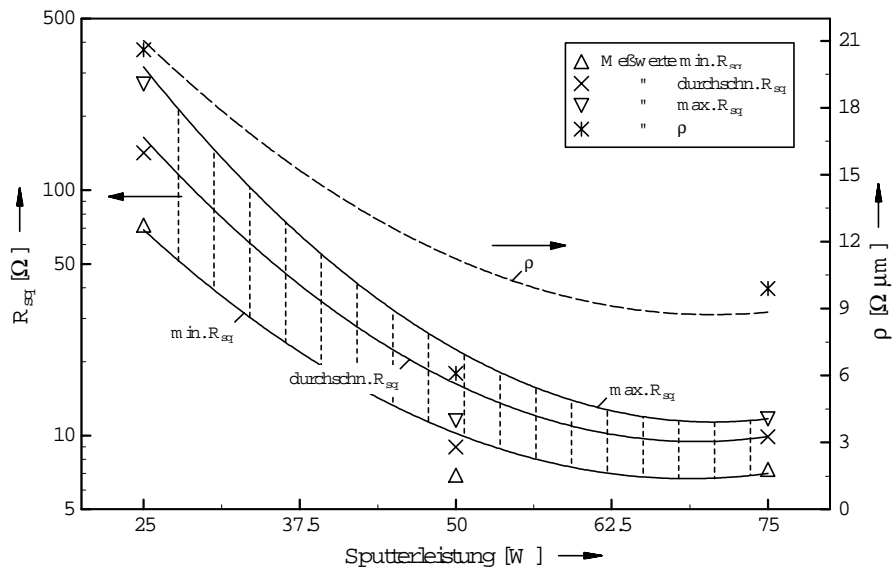


Abb. 3.5.6.1: Einfluß der Sputterleistung auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ITO

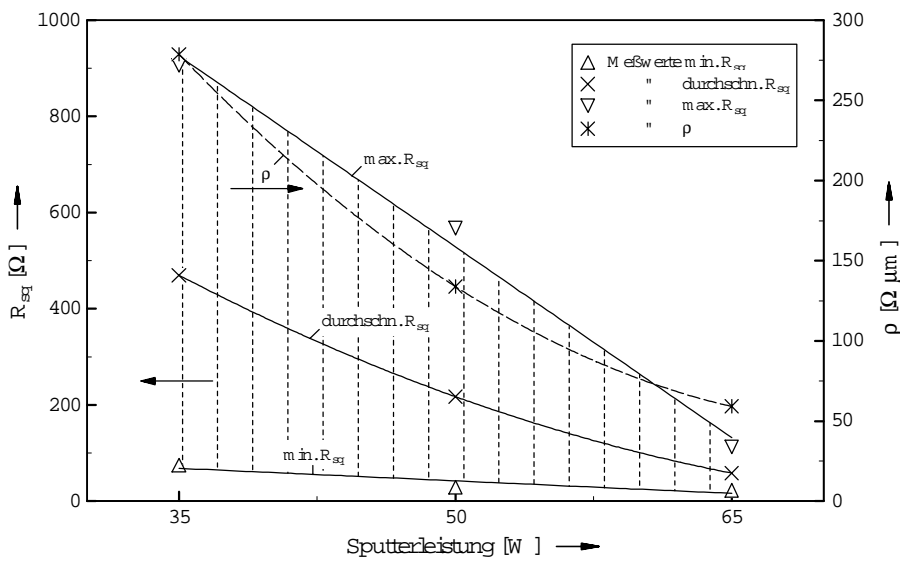


Abb. 3.5.6.2: Einfluß der Sputterleistung auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ZnO

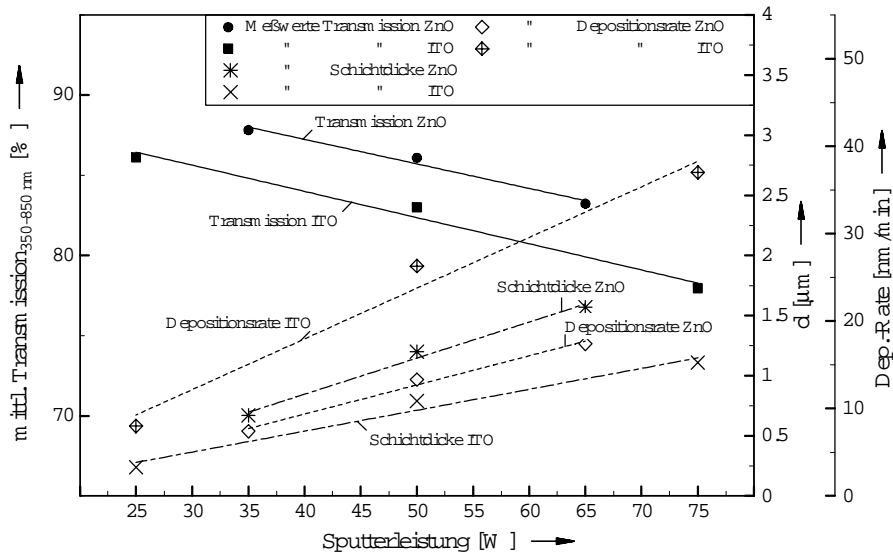


Abb. 3.5.6.3: Einfluß der Sputterleistung auf die Transmission für das Sputtern von ITO und ZnO

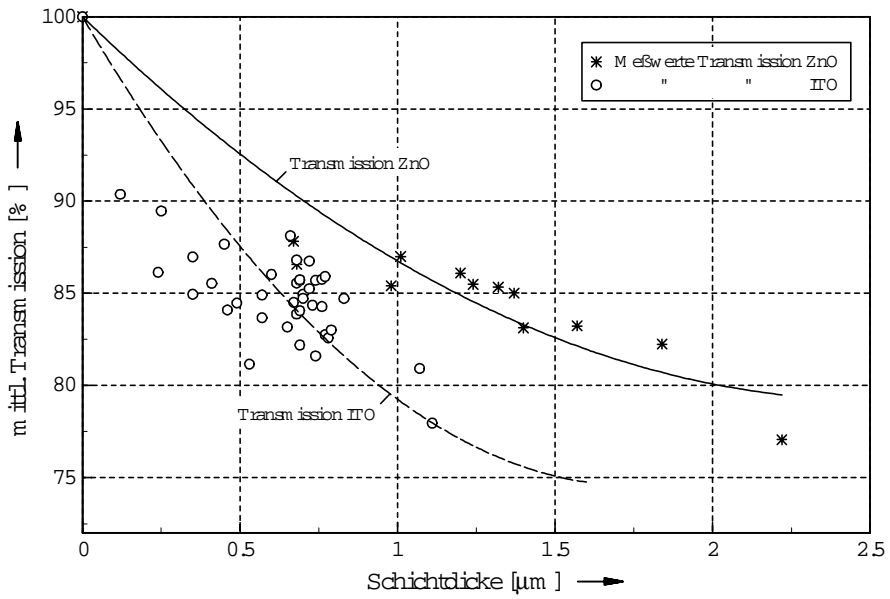


Abb. 3.5.6.4: Mittlere Transmission aller Proben in Abhängigkeit von der Schichtdicke von ZnO und ITO

3.5.7 Einfluß der Depositionsdauer

Zum Ende der Optimierung wurde der Einfluß der Depositionsdauer auf die Schichten untersucht. In Tabelle 3.5.7.1 sind die Prozeßparameter zusammengefaßt.

Tab. 3.5.7.1: Prozeßparameter bei variabler Depositionsdauer

Material Sputtertarget	ZnO:Al ₂ O ₃				In ₂ O ₃ :SnO ₂			
Anfangsdruck [mbar]	ca. 7,5x10 ⁻⁶				ca. 2,8x10 ⁻⁵			
Prozeßdruck [mbar]	0,0015				0,005			
Sputterleistung [W]	85				50			
Substrat <-> Target [cm]	4				5			
Depositionsdauer [min]	30	45	60	75	10	15	20	30

Die ZnO Prozeßparameter sind bereits weitgehend optimiert und unterscheiden sich erheblich von den Startparametern. Die in Abbildung 3.5.7.1 für ITO und 3.5.7.2 für ZnO dargestellten elektrischen Eigenschaften zeigen eine über die Abscheidungsdauer konstante spezifische Leitfähigkeit. Der Flächenwiderstand wird kleiner, da, wie aus Abbildung 3.5.7.3 zu entnehmen ist, die Schichtdicke linear ansteigt. Die Transmission nimmt bei beiden Materialien mit zunehmender Schichtdicke ab.

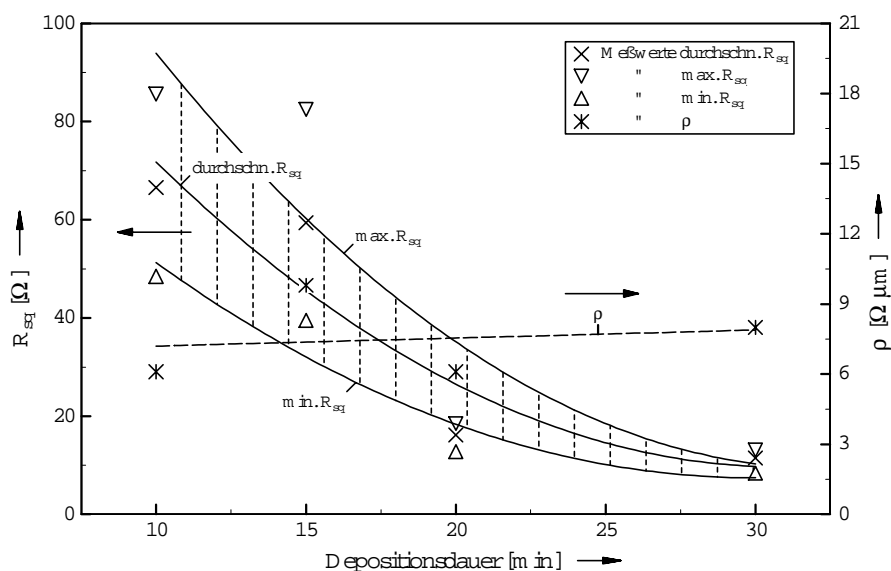


Abb. 3.5.7.1: Einfluß der Depositionsdauer auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ITO

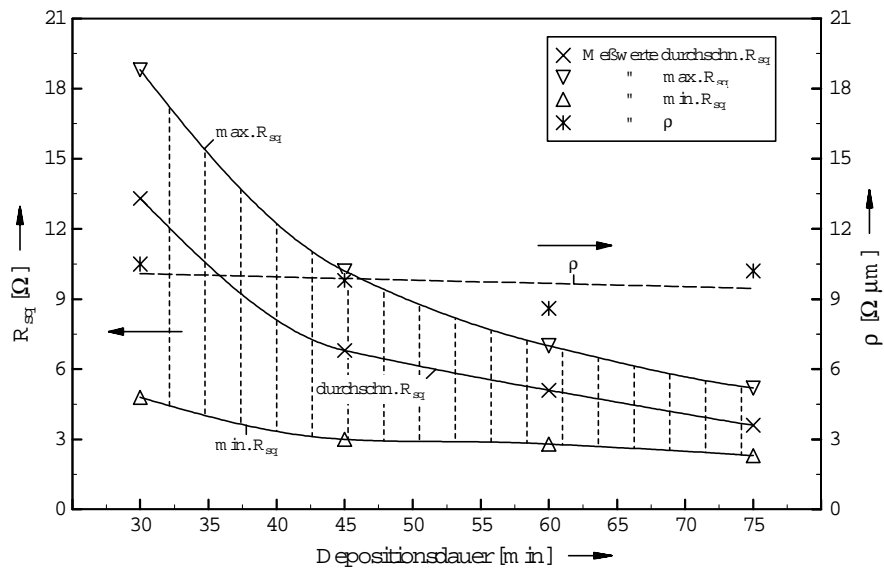


Abb. 3.5.7.2: Einfluß der Depositionsdauer auf den Flächenwiderstand für das Sputtern von ZnO

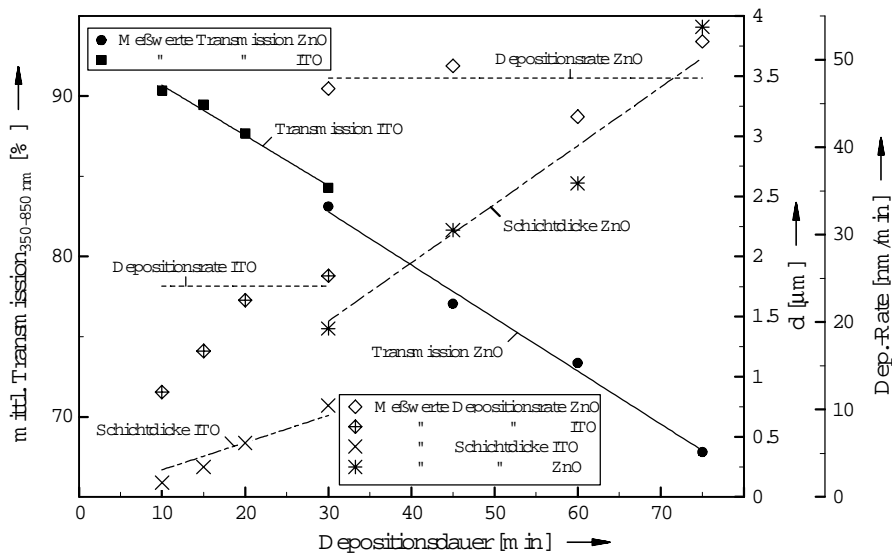


Abb. 3.5.7.3: Einfluß der Depositionsdauer auf die Transmission für das Sputtern von ITO und ZnO

3.6 Zusammenfassung

Um eine hochtransparente und gut leitende TCO-Schicht zu erhalten, wurden mögliche relevante System- und Prozeßparameter untersucht. Nachdem der Einfluß einiger Systemparameter wie Substrattemperatur, Evakuierungszeit, Belüftungszeit und Systembasisdruck auf die Schichteigenschaften untersucht worden war, konnten ohne Beeinflussung durch das Depositionssystem die Prozeßparameter für ITO und ZnO analysiert werden. Um beim vorliegenden System reproduzierbare Startbedingungen zu schaffen, muß der Systembasisdruck unterhalb von $1 \cdot 10^{-5}$ mbar liegen, da dann der Einfluß der Belüftungszeit, die im Interesse einer kurzen Pumpzeit nicht zu lang sein sollte (ca. 10min), keine Rolle spielt. Für beide Materialien gilt, je dicker, desto leitfähiger, desto geringere Transmission. Die Schichtdicke läßt sich nur begrenzt steigern, da es sonst zur Ablösung vom Glassubstrat kam. Die Grenze lag für ITO bei ca. $0,8 \mu\text{m}$, für ZnO bei ca. $4,5 \mu\text{m}$.

Tab. 3.6.1: *Prozeßparameter, optische und elektrische Werte optimierter Proben*

Sputtermaterial	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$	$\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$
Belüftungszeit [min]	12	6
Anfangsdruck [mbar]	1×10^{-5}	$1,2 \times 10^{-5}$
Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,0015
Sputterleistung [W/3“-Kathode]	50	85
Substrat <-> Target [cm]	5	4
Depositionsdauer [min]	30	30
durchschn. Flächenwiderstand R_{sq} [Ω]	9,5	13,3
spezifischer Widerstand ρ [$\Omega \mu\text{m}$]	6,3	10,5
mittlere Transmission (Mitte) [%]	85,8	83,1
mittlere Transmission (Rand) [%]	86,1	85,3
Schichtdicke [μm]	0,76	1,4

Die Versuche zeigen, daß die spezifische Leitfähigkeit im Gegensatz zur Transmission sehr stark von den Prozeßparametern abhängt. Während die Transmission innerhalb der Versuchsreihen um maximal 20% schwankte, lag die Bandbreite beim spezifischen Widerstand bei mehreren Größenordnungen. Aus den widersprüchlichen Bedingungen für Leitfähigkeit und Transmission folgt, daß der elektrischen Qualität der Schichten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß. Ein geringer spezifischer Widerstand läßt sich durch einen geringen Prozeßdruck unterhalb von 0,0025mbar, einen geringen Abstand von Substrat und Target von 4cm-5cm und eine hohe Plasmaleistung erreichen. Der Leistungssteigerung des Plasmas sind durch die Temperaturgradienten am Target, die Targetverklebung und dem

später verwendeten bereits mit a-Si:H Schichten versehenen Substrat etwa bei 2-2,5W/cm² (100W bei 3“) Grenzen gesetzt. Die erzielten Sputterraten von 0,6nm/s (75W) bei ITO liegen damit etwa um den Faktor fünf niedriger als bei industriellen Sputterprozessen [Perr,1999]. In der Tabelle 3.6.1 sind die Prozeßparameter von zwei der Zielsetzung entsprechenden Proben mit ihren elektrischen und optischen Eigenschaften dargestellt. Beide Proben haben einen Flächenwiderstand von ca. 10Ω_□ und eine Transmission von deutlich über 80%. Während die Transmission auch am Rand der Proben kaum höher ist, zeigt die Abbildung 3.6.1 beim Flächenwiderstand starke Inhomogenitäten. Die Inhomogenitäten sind beim ZnO, wo der Flächenwiderstand von Probenmitte zum Probenrand fast um den Faktor 4 variiert, sehr ausgeprägt. ITO verhält sich mit einer Streuung um ca. 30% günstiger. Diese Homogenitäten werden auf einer Fläche von 90x90mm² mit einem Target von nur 75mmØ erreicht. Im Bezug auf Schichtdicke und Transmission stellt man fest, daß ZnO transparenter ist als ITO. Dieser Effekt ist auf den unterschiedlichen Bandabstand der Materialien zurückzuführen. Die hohe Schichtdicke des ZnO kann sich in Bezug auf die Kantenbedeckung einer späteren integrierten Serienschaltung der Solarzellen positiv auswirken. Optische Messungen an den optimierten Schichten auf Glas zeigten eine starke Zunahme der Absorption unterhalb von 450nm und von 450nm-850nm eine konstant hohe Transmission von über 80% (incl. Glassubstrat). Die erzielten Ergebnisse liegen trotz der systembedingten Einschränkungen bezüglich der Temperatur und im Hinblick auf den nicht reaktivem Sputterprozeß im Vergleich mit international publizierten Ergebnissen auf höchstem Niveau [Den,1998; And,1998; Baí,1997; Löf,1997].

ITO				ZnO			
10,1	9,8	10,4	10,4	15,3	15,7	16,5	18,8
9,8	7,7	7,7	9,8	15,7	6,7	8,7	14,1
9,4	8,3	9,4	9,4	15,7	4,8	9,8	16,8
10,1	9,7	9,8	9,8	12,2	14,5	13,3	14,7

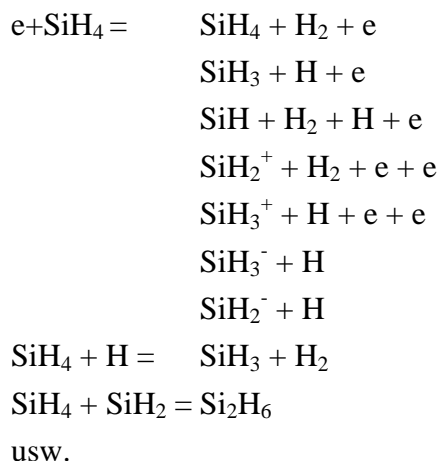
Abb. 3.6.1: Verteilung des Flächenwiderstandes R_{sq} [Ω_□] der optimierten Schichten

4. Herstellung von a-Si:H Schichten

4.1 Der PECVD-Prozeß

Der PECVD-Prozeß ist eine Weiterentwicklung des CVD (*Chemical Vapour Deposition*) Prozesses, bei dem instabile wasserstoffhaltige Gase (z. B. Silan, Diboran, Phosphin, Methan usw.) durch Hitze zersetzt werden und sich als dünne Schichten niederschlagen. Dies bedingt in der Regel eine Temperatur von mindestens 550°C, die zum einen vergleichsweise viel Energie benötigt und zum anderen die Substratauswahl beschränkt. Um diese Nachteile auszuschalten, wurde die Reaktortemperatur für a-Si:H auf üblicherweise ≈200°C abgesenkt und die Gaszersetzung durch ein Niederdruckplasma unterstützt. Die Plasmen zur Abscheidung von a-Si:H sind in der Regel nur schwach ionisiert, d. h., der Ionisationsgrad liegt bei ca. 10^{-4} bis 10^{-6} . Das Plasma befindet sich aufgrund verschiedener Beweglichkeiten nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Die Elektronen sind ca. 100mal heißer als die langsamen Ionen, deren Temperatur ca. 500K beträgt. Aufgrund dieser geringen Temperatur spricht man von einem kalten Plasma [Kro,1995]. Die Farbe des Silanplasmas ist dunkelblau. Auf den Elektrodenflächen und den darauf befindlichen Substraten wächst eine wasserstoffhaltige (ca. 10Atom%) Schicht auf. Da die Kondensation an den Substraten sehr rasch erfolgt, sind die entstehenden Schichten amorph (ohne Fernordnung). Man spricht vom amorphen hydrogenisierten Silizium (a-Si:H), welches elektrisch verwertbar und dotierfähig ist [Hey,1984].

Die Deposition erfolgt durch Stöße der hochenergetischen Elektronen mit den Gasteilchen und der Gasteilchen untereinander, wobei die Reaktionen bei Silan sehr artenreich sind. Einige Beispiele für sind:



Für qualitativ hochwertige a-Si:H Schichten sollten neutrale Radikale die Abscheidung dominieren. Dem SiH₃ wird dabei eine große Rolle zugeschrieben. Durch Messungen wurde belegt, daß der SiH₃-Gehalt des Plasmas proportional zur Depositionsrate ist [Luf,1993].

Da das Plasma dauernd Energie "verliert", muß Energie von außen zugeführt werden. Dies erfolgt üblicherweise elektrisch durch eine Gleich- oder Wechselspannung. Diese wird an zwei parallele Platten, die vom Gas durchströmt werden, angelegt, wo sie ein möglichst homogenes elektrisches Feld erzeugt. Beim Einsatz von Gleichspannung ergibt sich bei isolierenden Substraten (z. B. Glas) nach kurzer Depositionszeit das Problem einer Gegenaufladung der deponierten Schicht, die den Stromfluß behindert und schließlich zum Erliegen bringt. Um dieses Problem auszuschalten, benutzt man heute meistens Wechselspannungen mit der Industriefrequenz von 13,56MHz. Der resultierende Strom besteht größtenteils aus kapazitiven Verschiebestömen, die durch eingebrachte Dielektrika kaum gestört werden. Die Hochfrequenz bringt allerdings bei der Einkopplung in den Reaktor einige Probleme mit sich [Adv,1992]. Die induktive Einkopplung über Spulen hat praktisch keine Bedeutung mehr. Durchgesetzt hat sich vielmehr die kapazitive Einkopplung. Unabhängig von der Art der Einkopplung ist ein Anpaßnetzwerk notwendig, um die individuelle Impedanz des Reaktors an die üblicherweise 50Ω Impedanz des Generators anzupassen. Bei schlechter Anpassung tritt eine zuweilen erhebliche Reflexion der eingekoppelten Leistung auf, die neben einem hohen Energieeinsatz zur Zerstörung des Generators führen kann.

4.2 Experimenteller Aufbau des Reaktors

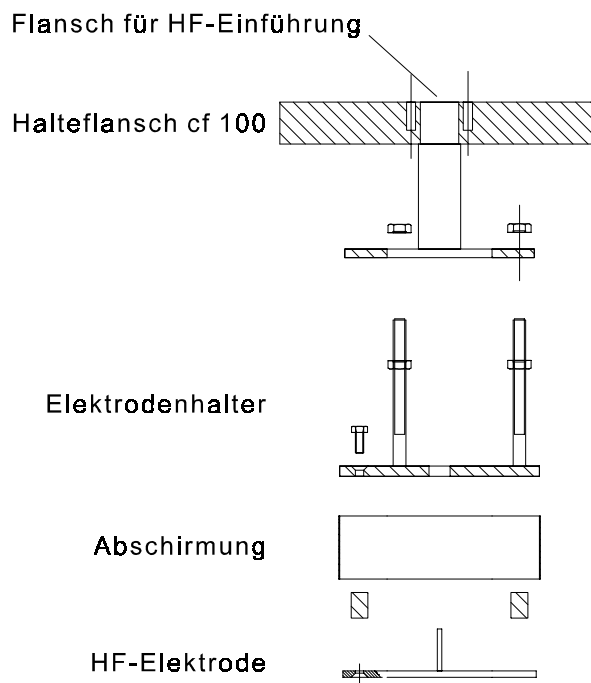


Abb. 4.2.1: Detailzeichnung der PECVD-Elektrode

Für den Einsatz als PECVD-Abscheidereaktor werden in der vorliegenden Anlagenentwicklung zwei Kammern ausgerüstet. Neben der erprobten Druckregelung mittels Drosselklappenventil im Bypass und der bereits beschriebenen direkten Substratheizung wird eine HF-Elektrode in die Kammer eingebaut. Die Elektrode ist am oberen CF100 Kammerdeckel angebracht und in ihrem Abstand und ihrer Ausrichtung zum Substratträger einstellbar. Bedingt durch das aus finanziellen Gründen einheitlich gewählte Kammerdesign beträgt der maximale Durchmesser der eigentlichen HF-Elektrode 91mm. Da die Lage des Substrates im Abstand und in der Breite durch das Anlagenprinzip festgelegt ist, wird der Elektrodenabstand durch Höhenverstellung der HF-Elektrode eingestellt (Abb. 4.2.1). Die festgelegten Geometrien erschweren eine homogene Beschichtung des Bandes bei konstant hoher Schichtqualität. Der Plattenabstand bestimmt die Zündeigenschaften/-Spannung des Plasmas und den Weg, den die Radikale zurücklegen müssen, bis sie zur Deposition beitragen. Das Paschengesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Produkt aus Abstand d und Depositionsdruck P und der Zünd- und Brennspannung des Plasmas [Luf,1993]. Ein Depositionsbetrieb qualitativ hochwertiger a-Si:H Schichten sollte an der unteren Grenze der Plasmabrennspannung etwas links vom Minimum der Paschenkurve stattfinden (Abb. 4.2.2).

Da mit steigendem Depositionsdruck auch die Neigung zur Pulverbildung steigt, strebt man einen niedrigen Depositionsdruck an. Dies ist für die gewählte Anordnung besonders wichtig, da das entstehende Pulver sich schwerkraftbedingt auf dem Substrat niederschlägt und die Schichtqualität und -haftung erheblich beeinträchtigt.

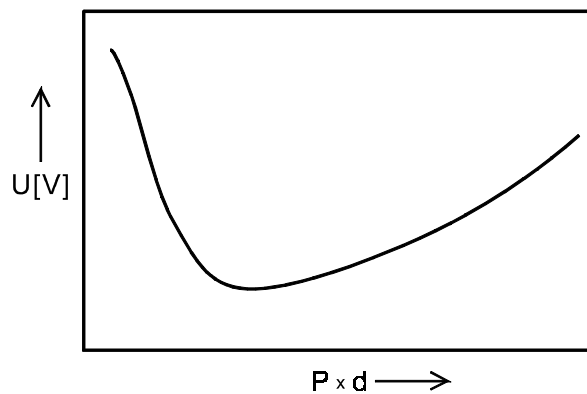


Abb. 4.2.2: Schematische Darstellung des Paschengesetzes [Luf,1993]

4.3 Optimierung der Reaktorgeometrie

Die Gasverteilung und das elektrische Feld in der Plasmazone müssen mit großer Sorgfalt ausgelegt werden. Es darf weder zur Verarmung durch behinderten Nachschub an Frischgas noch zu Druckerhöhungen etwa durch Verwirbelungen kommen. Da das System Kammer, Gaseinlaß, Elektrode, usw. sehr komplex ist und man sich im Übergangsbereich von Laminar- zur Molekularströmung befindet, sind Berechnungen der Stömungen sehr aufwendig und ungenau. In der vorliegenden Arbeit wurde daher die Reaktorgeometrie und die Gasverteilung weitgehend experimentell optimiert. Die Kriterien der Optimierung sind:

- großflächige homogene Deposition
- gute Zündeigenschaften des Plasmas
- niedrige Plasmaleistung ($<20\text{mW/cm}^2$)

Zunächst wurde das Elektrodendesign variiert, um ein möglichst ausgedehntes homogenes Plasma zu erzeugen. Plane Elektroden mit geringen Kantenradien kombiniert mit variabel überstehenden Abschirmbechern ergeben ebenso wie Elektroden ohne Abschirmung in der Elektrodenmitte ein homogenes Feld. Zum Elektrodenrand steigt die Feldstärke jedoch stark an, und die deponierten Schichten sind dort dicker. Dieser Effekt beruht auf der Verschiebungsflußerhöhung und der damit verbundenen Feldstärkeerhöhung an kleinen Elektrodenradien. Um die Feldstärkeerhöhung am Elektrodenrand zu verhindern und gleichmäßig abzubauen, wurden auch profilierte Elektrodenformen eingesetzt. Die Verhältnisse in der gewünschten Plasmazone stellen einen Plattenkondensator dar, dessen eine Platte das Substrat bildet. Eine gleichförmige Feldstärke erhält man, indem man als Elektrodenform eine geeignete Äquipotentiallinie auswählt. Im Randfeld des Plattenkondensators mit dem Plattenabstand d kann nach Rogowski [Küch,1996] eine Äquipotentiallinie gefunden werden, die der Forderung nach kontinuierlich sinkender Feldstärke genügt [Bey,1986]. Diese Feldline entspricht geometrisch zweidimensional folgender Gleichung:

$$F(x) = \frac{d}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + e^{x \frac{\pi}{d}} \right) \quad (4.1)$$

Aus naheliegenden Gründen kann die durch das Substrat gebildete Kondensatorplatte in ihrer Form nicht verändert werden, die Form der HF-Elektrode dagegen ist in engen Grenzen variabel. Wie aus Abbildung 4.3.1 ersichtlich, kann auch eine plane Gegenelektrode großer Ausdehnung der Bedingung genügen. Die aus der sich kreuzenden Substrathalteplatte und dem durch die Anlage geführten Metallband gebildeten Kondensatorplatte kommt der

Anforderung nach großer Ausdehnung gegenüber der HF-Elektrode nahe. Der Abstand d aus Gleichung 4.1 muß dann jedoch halbiert werden [Rot,1965; Hilg,1992]. Die Berechnung für einen als minimal anzusehenden Elektrodenabstand von 10mm ergibt ein homogenes Feld von 45mm \varnothing . Nachdem die berechnete Elektrodenform nach einer Schablone aus Metall angefertigt worden war, stellte sich im berechneten Bereich eine gleichmäßige Schichtdicke ein, die nach außen durch die reduzierte Feldstärke abnahm. Bedingt durch die Verknüpfung von Plattenabstand und Krümmungsradius verbleibt bei dem erforderlichen Elektrodenabstand zu wenig homogenes Nutzfeld.

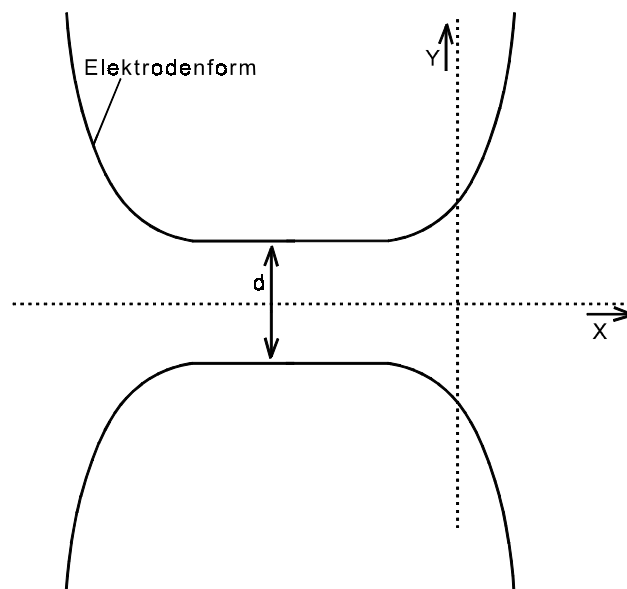


Abb. 4.3.1: *Besonders geformte Kanten am Plattenkondensator zur Vermeidung der Feldstärkeerhöhung*

Als gut geeignet erwies sich nach zahlreichen Versuchen folgende Anordnung. Eine Edelstahl Plattenelektrode von 91mm \varnothing und 6mm Stärke wird am Rand der plazmazugewandten Seite mit einem Kantenradius von 3mm versehen. Eine Dunkelraumabschirmung, ebenfalls aus Edelstahl, umschließt die HF-Elektrode im Abstand von 2mm und steht gegenüber dieser um ca. 4mm zurück. Der Abstand zum Substrat beträgt 17mm. Mit dieser Anordnung wurden größerflächige Depositionen erzielt, die jedoch im Gasein- bzw. Gasauslaßbereich Abnormitäten zeigten (Abb. 4.3.2). Die Gaszuführung wurde daher ebenfalls optimiert.

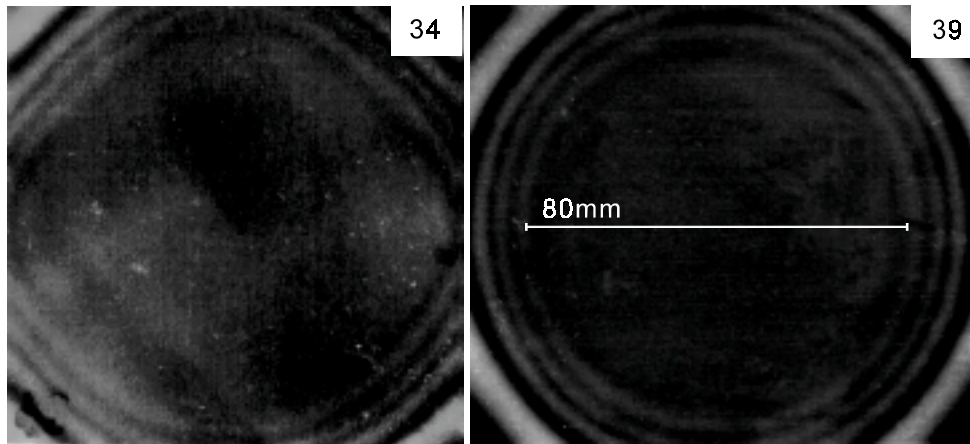


Abb. 4.3.2: Scannerbild einer a -Si:H Deposition auf Stahlband vor (34) und nach (39) der Optimierung (Elektrorendurchmesser 91mm)

Das Prozeßgas strömt oberhalb der beheizbaren Substrathalteplatte durch ein Edelstahlrohr von 8mm \varnothing in einen Expansionsraum ein. Dieser wird durch den 100mm \varnothing Rohrstutzen und einer auf der Substrathalteplatte verschiebbaren runden Aluminiumplatte gebildet. Die Platte hat 98mm \varnothing und 29 Gaseinlaßbohrungen mit 3mm \varnothing oberhalb des Substrathalters. Sie verteilen sich über die ganze Substrathalteplattenbreite und sorgen für einen gleichmäßigen Gaszustrom. Die zurückgezogene Abschirmung der Elektrode behindert den Gasfluß nicht. Ihre gewählte Geometrie verhindert trotzdem eine Plasmazündung im Dunkelraum bzw. eine ungewünschte Ausdehnung der Plasmazone über das Substrat hinaus. An der dem Gaseinlaß gegenüberliegenden Reaktorseite wird das Prozeßgas über ein 40mm \varnothing Rohr mit angeflanschem Drosselklappenventil abgesaugt. Um den Ansaugquerschnitt auf die ganze Plasmazonenbreite auszudehnen, wird auch hier ein Diffusor verwendet. Dieser besteht aus einem abgekanteten Edelstahlblech, welches vor dem Saugrohr montiert wird. Die Form der Diffusoren beeinflusst sowohl den Gasstrom als auch die Geometrie des elektrischen Feldes, so daß auch kleine Veränderungen Auswirkungen auf die deponierte Schicht haben.

Trotz aller Bemühungen zündet das Plasma aufgrund der niedrigen eingekoppelten HF-Leistung von ca. 1W nicht immer sofort. Um auf eine Erhöhung der Leistung zum Zünden des Plasmas verzichten zu können, wurde eine zusätzliche Zündeinrichtung eingebaut. Diese besteht aus einer an die Plasmazone heranreichenden Metallnadel, die über eine Isolierdurchführung von außen mittels eines Piezozünders kurzzeitig auf hohes Potential gebracht werden kann. Dies führt zur Initialionisation der Gasteilchen an der Nadelspitze, die sich durch die bereits anliegende HF-Spannung sofort zwischen den Elektrodenflächen ausbreitet.

4.4 Einzelkammerdeposition

Um bereits ohne Transportsystem im PECVD-Anlagenteil versuchsweise zu deponieren und die gewählte Anordnung auf ihre Tauglichkeit für die Solarzellen- und Modulherstellung zu testen, wurden Einzelkammerabscheidungen von Solarzellen durchgeführt. Die Abscheidungen erfolgten in der Prozeßkammer Nr. 5, die mit der Prozeßkammer Nr. 4 (2. PECVD-Kammer) aus Stabilitätsgründen verbunden ist.

Tab. 4.4.1: *Typische Depositionsparameter der Einzelkammerdepositionen*

n-Schicht:	Probennummer:	32	89
	Leistung [W]	1	1
	Temperatur [°C]	200	200
	Dauer [sec.]	120	120
	Prozeßdruck [mbar]	0,7	0,4
	Silanfluß (Kam.4/5) [sccm]	4/4	15/2,5
	Phosphinfluß [sccm]	3	7,5
i-Schicht:	Leistung [W]	1	1
	Temperatur [°C]	200	200
	Dauer [min.]	50	50
	Prozeßdruck [mbar]	0,7	0,4
	Silanfluß (Kam. 4/5)[sccm]	5	15/0
p-Schicht:	Leistung [W]	1	1
	Temperatur [°C]	200	200
	Dauer [sec.]	20	10
	Prozeßdruck [mbar]	0,7	0,4
	Silanfluß (Kam.4/5) [sccm]	4/4	15/2,5
	Diboranfluß [sccm]	3	7,5

Als Substrat wurde gereinigtes Edelstahlblech von 90x100x0,1mm³ verwendet. Auf die Aufbringung einer Reflexionsschicht wurde zunächst verzichtet. Das Substrat wurde direkt auf den Substrathalter gelegt und im Vakuum auf 200°C aufgeheizt. Die Depositionsparameter des a-Si:H Schichtsystems sind in Tabelle 4.4.1 festgehalten. Durch vorherige Abscheidungen an bereits am Institut vorhandenen Systemen standen grundlegende Parameter der Abscheidung bereits zur Verfügung und wurden an das neue System angepaßt [Wag,1996]. Zwischen der n- und der i-Schichtdeposition wurde 12h Hochvakuum gepumpt, um den Rezipienten von Dotiergasresten weitgehend zu reinigen. Nach der

Deposition der aktiven Schichten wurde das Substrat in die bereits erprobte Sputterkammer umgeladen und dort mit ITO beschichtet. Um ohne weitere Strukturierung definierte Zellen herzustellen, wurde das Substrat mit einer Lochmaske aus Stahlblech abgedeckt. Die entstehenden Einzelzellen von 10mmØ bzw. 18mmØ wurden anschließend unter Standardtestbedingungen (siehe Kap. 1.4.3) vermessen. Als vorläufiges Resultat einer langen Reihe von Optimierungen ist exemplarisch eine Kennlinie in Abbildung 4.4.1 dargestellt.

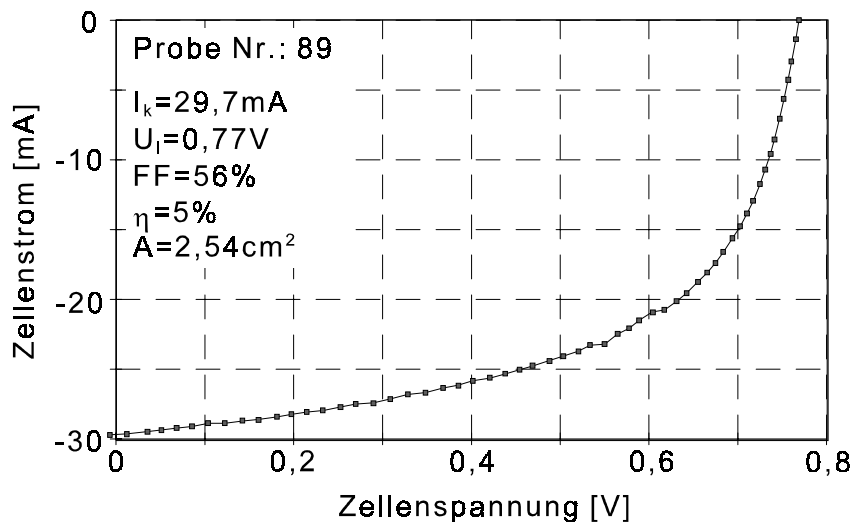


Abb. 4.4.1: Kennlinie einer einkammerdeponierten Solarzelle

4.5 Untersuchungen zur Dotiergasverschleppung

Der Bandanlagenprozeß auf kontinuierlichem Substrat erzwingt ein sogenanntes paralleles Prozessieren in verbundenen Kammern. Besonders kritisch ist dabei die Nachbarschaft der Kammer, in der die intrinsischen Schichten hergestellt werden und der Kammer, in der die dotierten Schichten hergestellt werden. Schon geringste Mengen Dotiergas führen bei der empfindlichen i-Schicht zu Qualitätsverlusten, die das Material für die meisten Anwendungen unbrauchbar machen. Aus diesem Grund muß eine Verschleppung der Dotiergase zwischen den Kammern verhindert werden.

Um die Güte der Kammerseparation der benachbarten PECVD Prozeßkammern zu untersuchen, wird der Einfluß des Einbaus von Dotiergasen in die i-Schicht anhand seiner Auswirkung auf die spezifische Leitfähigkeit bewertet. In Prozeßkammer Nr. 4 werden ausschließlich intrinsische Schichten aus a-Si:H hergestellt, während in der Prozeßkammer Nr. 5 sowohl p-a-Si:H Schichten (Boreinbau) als auch n-a-Si:H Schichten (Phosphoreinbau) hergestellt werden. Beide Kammern sind zwecks späterer Banddurchführung durch ein spaltförmiges Zwischenstück miteinander verbunden, durch das die Prozeßgase hindurchdiffundieren. Da zur Deposition intrinsischer a-Si:H Schichten nur Silan notwendig ist, welches auch zur Deposition der dotierten Schichten benötigt wird, ist die Diffusion von

Silan von untergeordneter Bedeutung. Die Diffusion von Dotiergasen in die Prozeßkammer Nr. 4 ist jedoch von großem Einfluß auf die Qualität der entstehenden i-Schichten. Wie Abbildung 4.5.1 am Beispiel der spezifischen Leitfähigkeit der i-Schichten zeigt, verändern selbst geringste Mengen Dotiergas diese um mehrere Größenordnungen. Zunächst wird überprüft, welches der verwendeten Dotiergase sich in Bezug auf die zu untersuchende Problematik kritischer verhält.

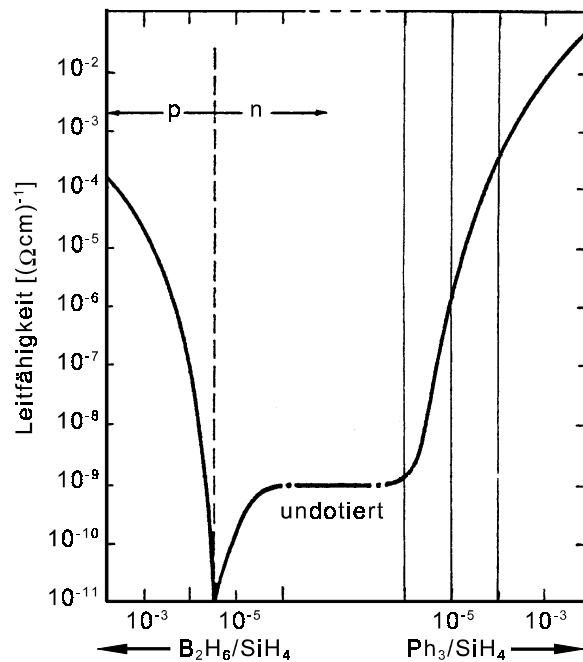


Abb. 4.5.1: Spezifische Leitfähigkeit von *a*-Si:H unter dosierter Zugabe von Dotiergasen [Hey,1984]

Für den Gasaustausch (Diffusion) zwischen den Kammern ist die mittlere Teilchengeschwindigkeit der Gase von Bedeutung [Smi,1931], da der Leitwert einer gegebenen Anordnung proportional zur Teilchengeschwindigkeit ist (Gleichung 2.3/2.4). Die mittlere Teilchengeschwindigkeit \bar{c} berechnet sich wie folgt.

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \text{ [m/s]} \quad (4.2)$$

Mit der allgemeinen Gaskonstante $R=8314\text{J/kmol}\cdot\text{K}$ ergibt sich für Diboran (B_2H_6) mit der molaren Masse $M=27,67\text{kg/mol}$ ein Wert von 473m/s , für Phosphin (PH_3) mit der molaren Masse $M=33,998\text{kg/mol}$ ein Wert von 427m/s ($T=293,14^\circ\text{K}$). Die Gasgeschwindigkeiten sind nahezu gleich, weswegen im folgenden für die Versuchsreihen zunächst exemplarisch Phosphin verwendet wird. Da die Zunahme der Leitfähigkeit infolge der natürlichen n-Leitung undotierter Schichten stetig ist, sind die Ergebnisse eindeutig interpretierbar. Die

Geschwindigkeiten der eingesetzten Verdünnungsgase H₂ (1762m/s) und He (1246m/s) sind deutlich höher, der Einfluß auf die Schichtqualität bei den verwendeten Mengen jedoch gering. H₂ entsteht u.a. beim Zerfall von Silan und führt in größerer Konzentration zu einer geringeren Aufwachsrate und einer Neigung zur Bildung μ -kristallinen Siliziums [Han,1987]. He reduziert die Neigung zur Pulverbildung [Pat,1986] und steigert in hohen Konzentrationen die Dunkelleitfähigkeit [Luf,1993].

Für die Messungen wurde zunächst ohne Dotiergasfluß eine intrinsische Schicht in der Prozeßkammer Nr. 4 hergestellt und vermessen. Da dabei kein Dotiergas in Prozeßkammer Nr. 5 eingelassen wird, kann es nicht zum Dotiergaseinbau kommen, und die Schicht dient als Referenz. Durch mehrtägiges Evakuieren und dem daraus resultierenden guten Startvakuum ($4 \cdot 10^{-9}$ mbar) konnte ein spezifischer Widerstand von mehr als $2 \cdot 10^9 \Omega \text{cm}$ (ca. $4 \cdot 10^{-10} \Omega \text{cm}^{-1}$) erreicht werden. Die folgenden Depositionen finden unter Prozeßbedingungen statt, d. h., mit Silan/Dotiergasgemisch in Kammer Nr. 5 unter Prozeßdruck. Der Prozeßdruck in der Depositionskammer Nr. 4 wird variiert, um eine gerichtete Strömung im Spalt zu erzeugen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.5.1 zusammengefaßt.

Tab. 4.5.1: Spezifischer Widerstand bei Variation der Kammerdrücke von zwei durch einen Spalt verbundenen Kammern

Probe Nr.:	66	68	67
Kammerdruck Nr.4 [mbar]	0,4	0,4	0,7
Kammerdruck Nr.5 [mbar]	0,3	0,3	0,3
Dotiergasgemisch SiH ₄ /2% PH ₃ in H ₂ [sccm]	3/2	3/2	3/2
Stahlsubstrat eingezogen	O	X	X
Spezifischer Widerstand [Ωcm]	$1 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$

Am spezifischen Widerstand der Proben ist deutlich zu erkennen, daß der Dotiergasanteil nicht zu vernachlässigen ist und eine Separation der Kammern auch mit eingezogenem Edelstahlsubstrat, welches die Schlitzhöhe verringert und den Leitwert so nochmals absenkt, nicht vollständig gelingt. Die Nettodotierung liegt zwischen 10^{-3} PH₃/SiH₄ und 10^{-4} PH₃/SiH₄. Eine Steigerung der Druckdifferenz zwischen den Kammern verspricht eine tendenzielle Besserung (Probe 67), kann aber mit Rücksicht auf die erzielbare Schichtqualität und die Plasmaerzeugung nicht weiter ausgeschöpft werden. Außerdem soll der Kammerdruck gemäß der Zielsetzung als Prozeßparameter trotz parallelen Prozessierens weiterhin frei wählbar sein. Um diese Zielsetzung zu erreichen, wurden einige Vorüberlegungen angestellt.

Der Spalt kann als eindimensionales System beschrieben werden, in dem Silan gerichtet strömt. Entgegen dieser Strömung diffundiert Phosphin, welches gemäß Einsteinbeziehung nach einer Zeit t eine mittlere Eindringtiefe $\overline{\Delta x}$ gemäß folgender Gleichung erreicht (D Diffusionskoeffizient):

$$\overline{\Delta x^2} = 2Dt \quad (4.3)$$

Unter Normalbedingungen liegt diese im Bereich Millimeter bis zu einigen Zentimetern pro Sekunde. Aufgrund der durch den geringeren Druck verringerten Stoßwahrscheinlichkeit vergrößert sich die Eindringtiefe bzw. die Diffusionsgeschwindigkeit. Daraus folgt, daß die Strömungsgeschwindigkeit des Silan, die der Diffusion entgegenwirkt, erhöht werden muß. Erreicht die Strömungsgeschwindigkeit den Betrag der mittleren Diffusionsgeschwindigkeit, so gelingt es bereits der Hälfte der Phosphinteilchen nicht mehr, den Spalt zu durchqueren. Da die Geschwindigkeit der Gasteilchen, wie bereits 1929 durch Lammert [Bar,1984; Moe,1970; Jos,1973] experimentell nachgewiesen, einer Maxwell/Boltzmann Verteilung entspricht, ist die maximale Diffusionsgeschwindigkeit einiger Teilchen erheblich größer als der bereits berechnete Mittelwert. Das heißt, daß trotz beliebig hoher Strömungsgeschwindigkeiten ein Durchqueren des Spaltes nicht für alle Teilchen verhindert werden kann.

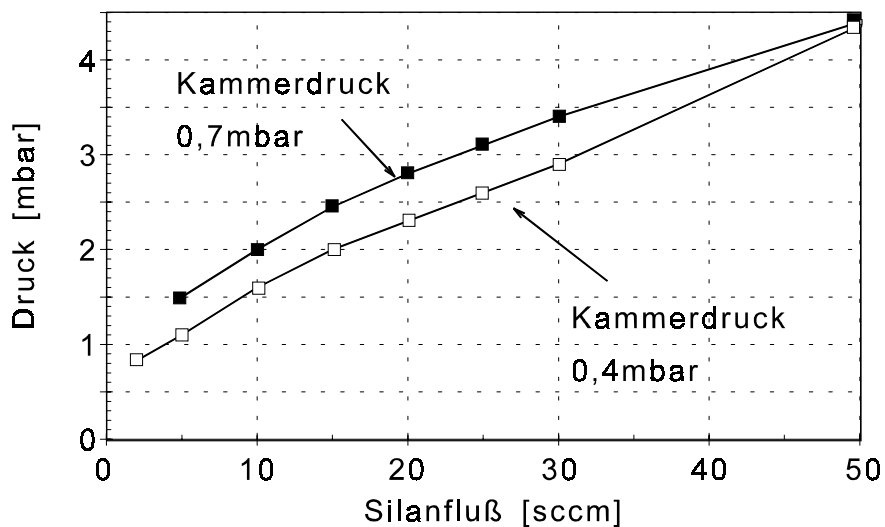


Abb. 4.5.2: *Druck in Spaltmitte bei Variation des Silanzuflusses an dieser Stelle; der Kammerdruck in beiden Prozeßkammern ist jeweils gleich*

Um die Gasgeschwindigkeiten im Spalt zu erhöhen, wurde der Gaseinlaß der Kammer Nr. 4 in die Spaltmitte verlegt. Dort wird unverdünntes Silan eingelassen und strömt, wie durch die gleichen Drosselklappenwinkel der Drosselklappenventile der Kammern Nr. 4 und Nr. 5 belegt, zu gleichen Teilen in Kammer Nr. 4 und Nr. 5. In der Dotierkammer Nr. 5 wird dann Dotiergas eingelassen, welches sich mit dem Silan vermischt. Der Druck an der

Einlaßstelle für den oberen und unteren sinnvollen Kammerdruck (Nr. 4 und Nr. 5 gleich) ist in Abbildung 4.5.2 dokumentiert.

Zunächst wird der Einfluß des Silanflusses auf den spezifischen Widerstand der i-Schicht untersucht. Dazu wird bei konstantem Phosphineinlaß (3% PH₃ in H₂) von 2sccm in Kammer Nr. 5 und bei variablem Silaneinlaß im Spalt in Kammer Nr. 4 die i-Schicht abgeschieden (Abb. 4.5.3).

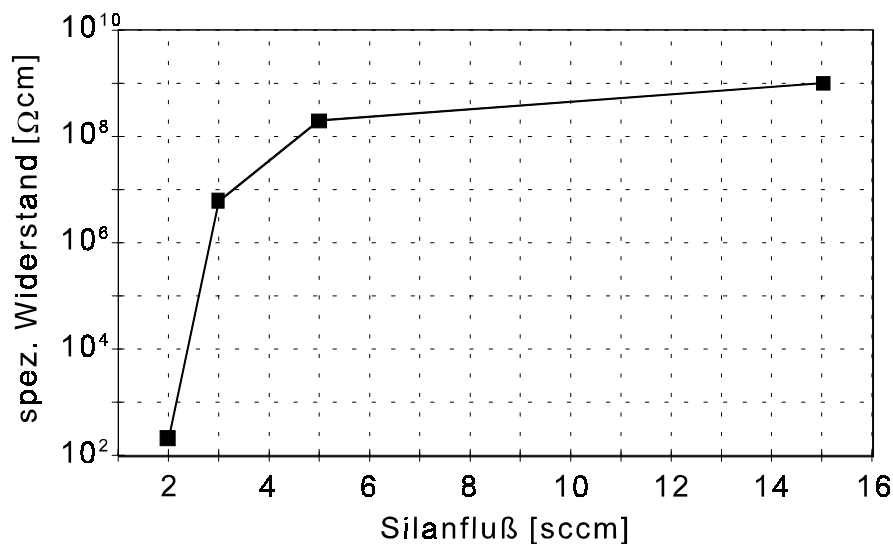


Abb. 4.5.3: Spezifischer Widerstand bei Variation des Silanflusses und konstantem Phosphinfluß in die Dotierkammer

Gut zu erkennen ist die hohe Dotiergasverschleppung bei geringen Gasgeschwindigkeiten im Spalt. Bei 2sccm Silan beträgt die Gasgeschwindigkeit nur ca. 0,15m/s. Dies ist vergleichbar mit der Gasgeschwindigkeit im Spalt, verursacht durch eine Kammerdruckdifferenz von 0,3mbar. Erwartungsgemäß liegt der spezifische Widerstand in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Proben Nr. 66-67. Die Erhöhung der Gasgeschwindigkeit um den Faktor drei erzeugt einen Anstieg des spezifischen Widerstandes um sechs Größenordnungen. Die mittlere Diffusionsgeschwindigkeit des Phosphins ist offensichtlich weit überschritten.

Eine Erhöhung auf über 1m/s (15sccm ≈ ca. 1,15m/s) erzeugt keinen signifikanten Anstieg des spezifischen Widerstandes. Aufgrund der ausgewählten Spaltabmessungen lassen sich die erforderlichen Gasgeschwindigkeiten bereits durch geringe Gasmengen erzeugen. Um die Separation der Kammern im Hinblick auf frei wählbare Prozeßdrücke zu überprüfen, wurde der Kammerdruck der Dotierkammer Nr. 5 variiert (Abb. 4.5.4).

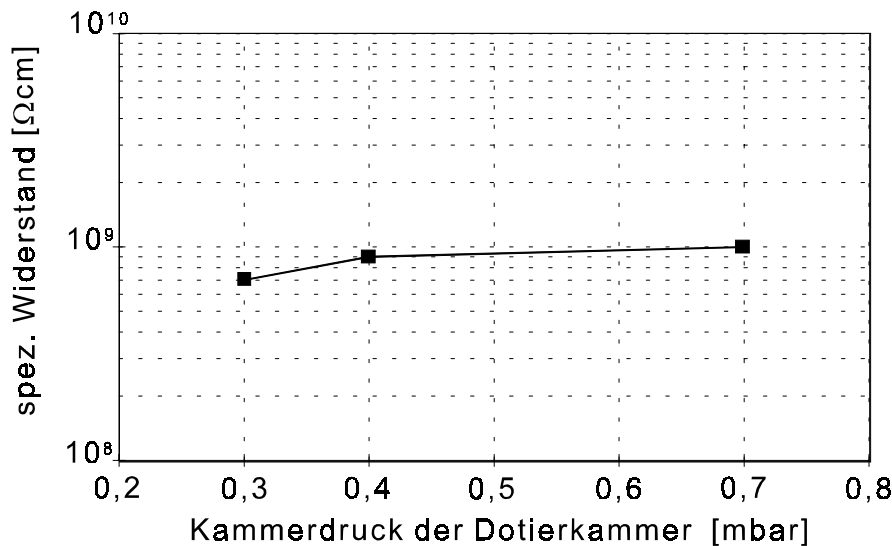


Abb. 4.5.4: Spezifischer Widerstand bei Variation des Kammerdruckes in der Dotierkammer bei konstanten Gasflüssen und einem konstanten Kammerdruck von 0,4mbar in der i-Kammer

Wie zu erkennen, ist der spezifische Widerstand der deponierten Schichten von der Druckdifferenz zwischen den Kammern unabhängig. Trotz der diffusionsfördernden Druckdifferenz von 0,3mbar ist der spezifische Widerstand unverändert hoch. Die geringe Variation des spezifischen Widerstandes ist auf unterschiedliche Prozeßbedingungen zurückzuführen, die sich bei einer im Versuchsbetrieb befindlichen und ohne Schleuse betriebenen Anlage zwangsläufig ergeben. Die Messungen zeigen, daß eine wirkungsvolle Separation der Prozeßkammern erreicht ist. Eine Variation des Phosphinflusses in Kammer Nr. 5 sollte daher keine Auswirkungen auf die deponierte i-Schicht in Kammer Nr. 4 zeigen. Erwartungsgemäß ist, trotz Erhöhung des Phosphinflusses um den Faktor fünf, keine Änderung des spezifischen Widerstandes erkennbar (Abb. 4.5.5). Die Separation der Kammern wird nun auch für das Dotiergas Diboran untersucht. Wie Abbildung 4.5.1 zeigt, wird zunächst die leichte n-Leitung der undotierten Schicht durch den Einbau von geringsten Mengen Bor kompensiert. Das Material wird gegendotiert und der spezifische Widerstand steigt zunächst an. Die Versuchsreihen mit Phosphin zeigen, daß bei der Kammerseparation Dotiergas-mengen in ähnlicher Größenordnung nicht an der Diffusion gehindert werden können. Um dies experimentell zu überprüfen, wird bei konstantem Diboraneinlaß (3% B_2H_6 in He) von 2sccm in Kammer Nr. 5 und variablem Silaneinlaß im Spalt in Kammer Nr. 4 die i-Schicht abgeschieden (Abb. 4.5.6).

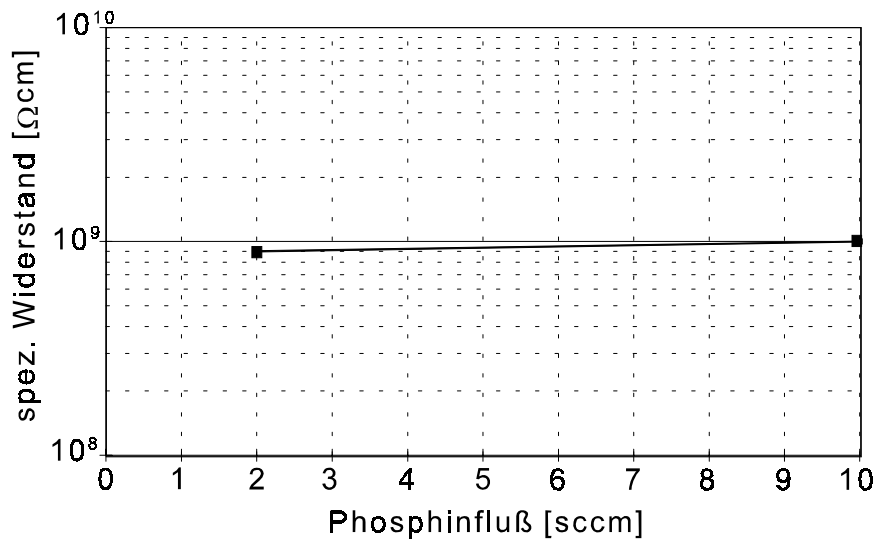


Abb. 4.5.5: Spezifischer Widerstand bei Variation des Phosphinflusses und konstantem Silanfluß

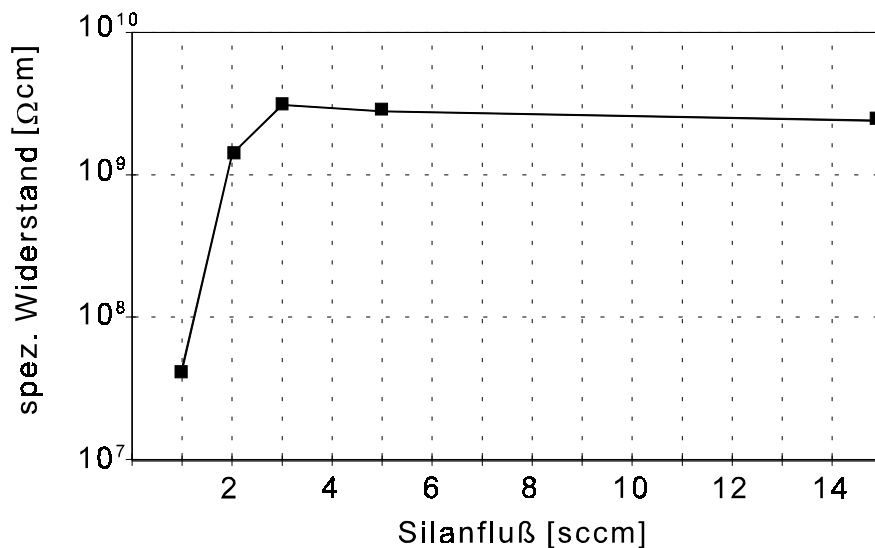


Abb. 4.5.6: Spezifischer Widerstand bei Variation des Silanflusses und konstantem Diboranfluß

Deutlich erkennbar ist der gegenüber der undotierten Schicht höhere spezifische Widerstand. Dieser bleibt trotz sinkendem Silanfluß und damit einhergehender Verschlechterung der Kammerseparation unverändert hoch. Erst bei Flußraten unterhalb von 3sccm sinkt der spezifische Widerstand deutlich. Die Kurve knickt jedoch später ab, als aus den vorangegangenen Ergebnissen mit Phosphin erwartet. Dies ist auf die ähnlichen Gasgeschwindigkeiten und die identischen Depositionsbedingungen auf die unterschiedlichen Verdünnungsgase zurückzuführen. Die Geschwindigkeiten von Wasserstoff und Helium verhalten sich wie 3/2. Offensichtlich verstopft das "langsame" Helium den Spalt für die

Diboranmoleküle und behindert so zusätzlich die Diffusion. Bei dem im "schnellen" Wasserstoff gelösten Phosphin ist dieser Effekt geringer.

4.6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Aufgabenstellung wurde ein PECVD System entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen. Durch konstruktive Maßnahmen sind Plasma und Reaktorgeometrie optimiert worden. Eine Piezozündeinrichtung zur Unterstützung der Plasmazündung wurde erfolgreich erprobt. Einkammerdepositionen mit Wirkungsgraden um 5% auf unbehandeltem Stahlband wurden erfolgreich durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des Systems bezüglich des Einsatzzweckes zu überprüfen. Die Verschleppung von Dotiergas beim parallelen Betrieb von zwei Kammern in die i-Schicht wurde durch die Verringerung der spezifischen Leitfähigkeit nachgewiesen. Ebenfalls wurde gezeigt, daß durch geeignete Änderungen am Depositionssystem die Kammern ohne Einfluß auf die Beweglichkeit des kontinuierlichen Substrates bezüglich der Dotiergasverschleppung quasi voneinander isoliert werden können. Dies wurde sowohl für Phosphin als auch für Diboran nachgewiesen. Die Möglichkeit, die Gasmischungen und Prozeßdrücke in den Kammern unabhängig einzustellen, wird durch diese Isolierung nicht beeinträchtigt. Der spezifische Widerstand der deponierten undotierten i-Schichten liegt im Testbetrieb der Bandanlage ohne Schleuse bei deutlich über $10^9 \Omega\text{cm}$. Durch gezielte Gegendotierung mit Diboran bei reduzierter Separation konnte der Widerstand noch gesteigert werden.

5. Laserstrukturierung

5.1 Laserschneiden

Nachdem auf Grundlage der bereits 1917 als Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Materie von Einstein beschriebenen stimulierten Emission 1954 der erste MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) entstand, wurde dieses Prinzip auch für das kurzwellige Licht angewendet. 1960 baute T. Maiman den ersten LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), der als Rubin Festkörperlaser ausgeführt war. In der Folgezeit wurden viele verschiedene Lasertypen entwickelt. Typisch für diese kurzwelligen (337nm-N₂ Laser bis 10,6µm-CO₂-Laser) Energiequellen sind die hohe spektrale Energiedichte, Monochromasie, große räumliche und zeitliche Kohärenz, vollständige Amplitudenstabilität (stationärer Betrieb) und die Möglichkeit, kürzeste Energieimpulse zu erzeugen. Aufgrund dieser einzigartigen Eigenschaften ist seine Anwendung in der Technik, wo er z.B. zum Messen, Bohren, Schweißen usw. eingesetzt wird, nicht mehr wegzudenken. Für die Anwendung in der Solarzellenfertigung wird der Laser zum Dotieren [Gri,1998], Rekristallisieren und als Schneidwerkzeug benutzt [Per,1998]. In der vorliegenden Arbeit soll der Laser als Schneidwerkzeug eingesetzt werden, um die integrierte Serienverschaltung zu erzeugen.

Der Schneidprozeß basiert auf einer Verdampfung und Absprengung von Oberflächenmaterial. Durch die hohen Intensitäten des Laserstrahles gelten andere Gesetzmäßigkeiten als bei normalen Lichtquellen. Speziell bei gepulsten Lasern ist die horizontale Tiefe der Absorptionsschicht geringer als 1µm. Durch die kurze Einwirkzeit ist ein Wärmetransport in tiefere Schichten nicht möglich, und es entstehen Temperaturgradienten von 10⁸K/s-10¹⁰K/s. Auch bei Materialien, die normalerweise schlecht absorbieren, tritt bei den vorhandenen Leistungsdichten als Folge nichtlinearer Wechselwirkungen eine anomale Absorption auf. Bei Überschreiten einer Intensitätsschwelle werden selbst absorptionsfreie Werkstoffe in den absorbierenden Zustand überführt. Der gewünschte Materialabtrag wird durch eine flüssige und eine dampfförmige Phase erreicht. Die Verdampfung des Materials tritt unmittelbar unter der eigentlichen Werkstückoberfläche (ca. 0,05µm-0,1µm) auf. Dabei entsteht ein Innendruck von bis zu 1000bar, der das umgebende schmelzflüssige Material absprengt [Bru,1989]. Die entstehende Dampfwolke wirkt für den durchdringenden Laserstrahl als Streulinse mit zeitabhängiger Brennweite im mm-Bereich und beeinflußt die notwendige Fokussierung unkontrollierbar. Durch geeignete Maßnahmen (Impulsdauer, Absaugen, Wegblasen) kann dieser Einfluß minimiert werden. Zum gezielten Abtragen dünner Schichten ist der Einsatz eines gepulsten Lasers im TM₀₀-Mode zu empfehlen. Unkontrollierte Multimodelaser führen zu dreidimensional unscharfen Bearbeitungen. Durch gezielte kurze Einzelimpulse wird kontrolliert Schichtmaterial

verdampft und eine Wärmeleitung in tiefere Schichten verhindert. Beim Einsatz von kontinuierlicher Laserstrahlung treten unerwünschte Schmelzeffekte auf, die sich besonders bei schlechten Wärmeleitern negativ auswirken.

Eine besondere Eigenschaft des Lasers ist der räumliche Abstand des Systems zum Werkstück. Dies prädestiniert ihn zum Einsatz in einer Inline Vakuumanlage, da das Schneidsystem außerhalb der Vakuumanlage angeordnet werden kann. Die Einkopplung über ein Sichtfenster verlangt nur ein Minimum an UHV-tauglichen Bauteilen. Das umgebende Vakuum sorgt für einen Abtransport der entstehenden Dämpfe.

5.2 Aufbau des Lasersystemes

Die Anforderungen an das Lasersystem für die vorliegende Anwendung sind vielfältig. So soll das Lasersystem vollständig in die Bandfertigungsanlage integriert werden und die selektive Strukturierung der Solarmodule ermöglichen. Die Wellenlänge soll an die zu schneidenden Schichten angepaßt sein und einen Betrieb sowohl im CW- als auch im Q-Switch (pulsen) Modus ermöglichen. Eine Strahlableitung soll das Modullayout variabel und mit hoher Wiederholgenauigkeit auf das beschichtete Stahlband übertragen. Eine zweidimensionale Ablenkung ist aufgrund der Substratträgeit unbedingt erforderlich. Der selektive Materialabtrag muß durch umfangreiche Parametervariationen einstellbar sein.

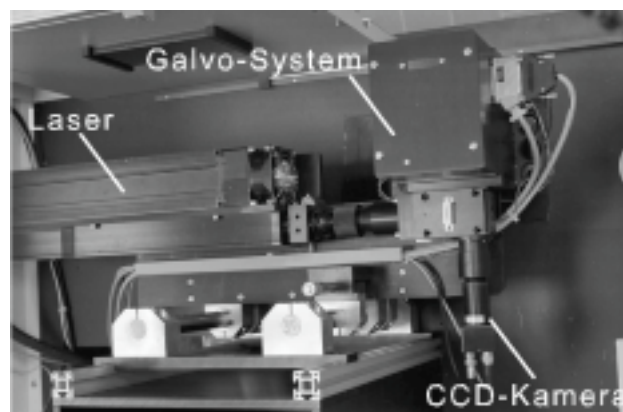


Abb. 5.2.1: Ansicht des Laserschneidsystems

Diese Vorbedingungen werden vom eingesetzten System (Abb. 5.2.1) voll erfüllt. Um den Einbau in die Bandfertigungsanlage zu ermöglichen, wurde ein diodengepumpter Nd-YAG Festkörperlaser ausgewählt. Dieser wichtigste Festkörperlasertyp hat sich in der Fein- und Feinstbearbeitung (z. B. Diamant Drahtziehsteine, Widerstandstrimmen, usw.) bereits bewährt. Durch den Nd-YAG Kristall, der aus einem mit 0,5-3,5% Nd³⁺ dotierten Yttrium-Aluminium-Granat (Y₃Al₅O₁₂) besteht, entfallen aufwendige Gasführungssysteme, die bei

anderen Hochleistungslasern benötigt werden (CO₂-Laser). Durch die Anregung mittels Diodenarray werden wartungsintensive Blitzlampen abgelöst. Der hohe Wirkungsgrad (ca. 4%) ermöglicht eine raumsparende Luftkühlung. Die Abmessungen und das Gewicht des Systemes fallen durch diese Maßnahmen sehr gering aus.

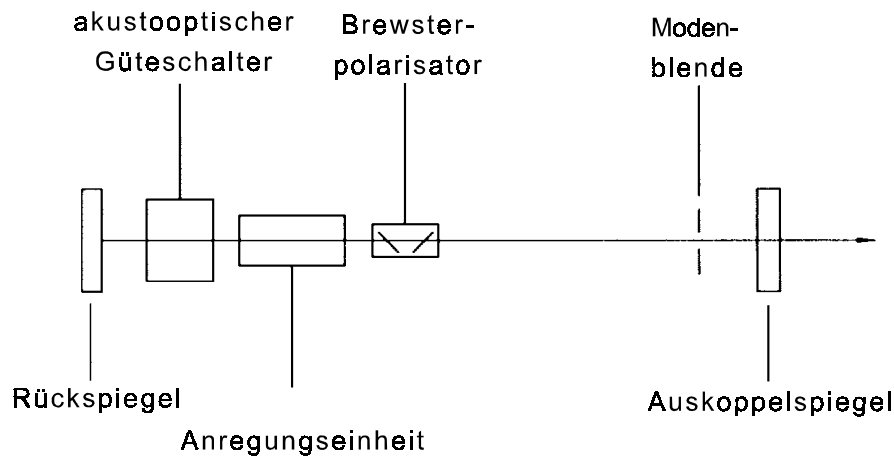


Abb. 5.2.2: Schematischer Aufbau eines gütegeschalteten cw-gepumpten Nd-YAG Lasers [Kol,1993]

Durch einen akustooptischen Güteschalter innerhalb des Laserresonators kann der Laser gepulst werden (Abb. 5.2.2). Durch diesen Schalter wird die Laseroszillation solange verhindert, bis die durch die Pumpstrahlung erzeugte Besetzungsinversion ihr Maximum erreicht hat. Dieses liegt weit oberhalb des Schwellwertes, bei dem normalerweise bereits die Laseroszillation beginnt (CW-Betrieb). Wird dann die Oszillation durch Freigabe des Resonators gestartet, setzt die Laserschwingung ein und baut die Besetzungsinversion ab. Die erreichbaren Intensitäten und Pulslängen hängen von der Schnelligkeit des Schaltens ab (Q-Switch). Ein nichtlinearer Kristall im Strahlengang des Lasers ermöglicht eine Verdoppelung der Laserfrequenz zur Anpassung an schichtspezifische Absorptionen, wobei die nichtbenötigte Wellenlänge durch einen Filter ausgeblendet wird. Die weiteren technischen Daten sind in Tabelle 5.2.1 zusammengefasst.

Tab. 5.2.1: Technische Daten des Laserresonators

Wellenlänge	523/1046nm
Pulsleistung	7kW
Pulsenergie	120μJ (<17ns)
Divergenz	1,3mrad
Mode	TM ₀₀

Um den Laserstrahl weiterzuleiten, wird dieser zunächst durch eine nach dem Galileiprinzip arbeitende 6-fach Strahlaufweitung in seiner Intensität abgeschwächt. Die Ablenkung des Laserstrahles erfolgt dann durch zwei Galvanometer Drehspiegel, welche in einem geschlossenen Lageregelkreis arbeiten und aktiv temperaturstabilisiert sind. Die geringen bewegten Massen garantieren eine hohe Ablenkgeschwindigkeit (bis 3m/s) und eine präzise Bahngenaugigkeit. Die bei normaler Fokussierung entstehende Kugelsektoroberfläche der Brennpunktlage wird durch den Einsatz einer Planfeldlinse hinter dem Ablenkensystem vermieden. Diese Linse fokussiert den Strahl in die Arbeitsebene. Eine leistungsstarke Software zur Spiegelsteuerung erlaubt sowohl eine Korrektur der Kissen-/Tonnenverzerrung als auch eine präzise Steuerung des Strahles im Bearbeitungsfeld (Tab. 5.2.2).

Tab. 5.2.2: Technische Daten des Galvanometersystems

Feldgröße	100mm x 100mm
Auflösung	<6 μ m
Positioniergeschwindigkeit	8m/s
Verfahrgeschwindigkeit	3m/s
Arbeitsabstand	200mm
Fokustiefe	<1mm
Spotdurchmesser	<50 μ m

Um die erforderlichen Strukturierungsmaßnahmen an verschiedenen Schichten räumlich zu koordinieren, ist in den Strahlengang des Lasers ein CCD-Kamerasystem eingekoppelt. Das Kamerabild ist als Inlay auf dem Computermonitor sichtbar und erlaubt durch seine 15-fache Vergrößerung eine präzise Justage und Reproduktion der Laserschnitte. Eine schmalbandige Beleuchtung des Arbeitsfeldes sorgt für ausreichende Helligkeit.

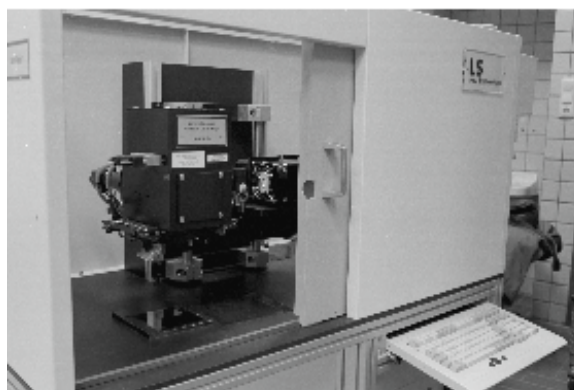


Abb. 5.2.3: Ansicht des Lasersystemes im separaten Gehäuse

Im Erprobungsbetrieb ist das komplette Lasersystem als separates Gerät aufgebaut (Abb. 5.2.3). Die selektive Strukturierung der Einzelschichten kann so zeitlich parallel zum Aufbau und zur Erprobung der Bandfertigungsanlage erfolgen. Der Einbau des Lasersystems in die Bandanlage erfolgt nach Abschluß aller Einzelsubstrat-Untersuchungen. Die erforderlichen Halterungen für den Laser und Rackvolumen für die Versorgungs- und Steuerungsgeräte sind bereits vorhanden. Der Steuerungs-PC wird für das Massenspektrometer mitbenutzt.

5.3 Strukturierungsergebnisse

Die selektive Trennung von folgenden Schichtsystemen ist zur integrierten Serienschaltung notwendig:

- I. Strukturierung des Rückkontaktes ohne Beschädigung der Isolierschicht
- II. Strukturierung des a-Si:H Schichtsystemes ohne Beschädigung des Rückkontaktes
- III. Strukturierung des TCO Vorderkontaktes mit geringer Beschädigung des a-Si:H Schichtsystemes

Die Untersuchungen zu den Punkten I. und III. beschränken sich auf die grundsätzliche Eignung des Lasersystemes zur Bearbeitung der Einzelschichten. So wurden Aluminium-, Chrom-, ITO- und ZnO Schichten verschiedener Dicke einzeln auf Glas strukturiert. Während die Schichten aus Metall erwartungsgemäß problemlos zu strukturieren waren, erwiesen sich die transparenten TCO Schichten aufgrund ihrer geringen Absorption als deutlich widerstandsfähiger. Durch die Auswahl geeigneter Parameter konnten auch diese Schichten strukturiert werden. Weiterhin wurden erste Untersuchungen zur selektiven a-Si:H Strukturierung gemacht. Auf einer Glasplatte wurde zunächst Chrom dann 500nm a-Si:H deponiert. Die so vorbereiteten Proben wurden unter Variation folgender Parameter vom Laserstrahl strukturiert:

- Wellenlänge
- Schnittgeschwindigkeit
- Pulsfrequenz
- Leistung
- Fokustiefe

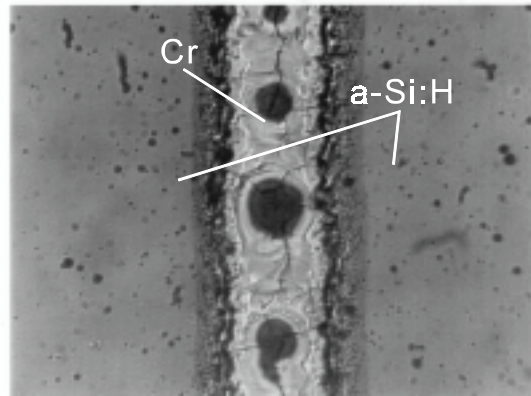


Abb. 5.3.1: Laserschnitt in a-Si:H auf Chrom mit angegriffener Chromschicht

Wie die beiden Abbildungen 5.3.1 und 5.3.2 zeigen, ist es möglich, das a-Si:H zu trennen. Während bei Abbildung 5.3.1 auch die Chromschicht angegriffen wird (Löcher), konnte dies, wie Abbildung 5.3.2 zeigt, durch geeignete Parameterwahl verhindert werden. Die Risse in der Chromschicht sind unbedenklich, da eine Leitwertveränderung nicht festgestellt werden konnte. Durch die im Produktionsprozeß anschließend aufgebrachte TCO Schicht würden außerdem entstehende Trennungen wieder kurzgeschlossen. Ausgehend von der kaum beschädigten Chromschicht kann auf eine Unversehrtheit des darunter befindlichen Isolators geschlossen werden.

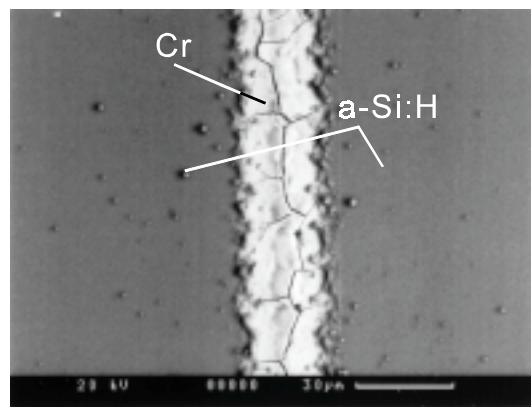


Abb. 5.3.2: Laserschnitt in a-Si:H auf Chrom (523nm, 20mm/s, 2KHz, P=40%)

5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die selektive Strukturierung eines Chrom/a-Si:H Schichtsystemes gelungen ist. Die a-Si:H Schicht kann strukturiert werden, ohne an der Chromschicht unerwünschte Strukturungserscheinungen hervorzurufen. Das Lasersystem wurde weiterhin auf seine Eignung bezüglich der Strukturierung von Einzelschichten aus Chrom, Aluminium und TCO (ZnO, ITO) überprüft.

Die selektive Strukturierung von TCO-/a-Si:H Schichtsystemen bzw. Chrom-/ Isolator Schichtsystemen würde den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit sprengen. Sicherlich ergeben sich in weiterführenden Projekten Möglichkeiten, die bereits erarbeiteten Ergebnisse in der selektiven Laserstrukturierung zu vertiefen und auf die Herstellung von Solarmodulen auszuweiten. Grundsätzlich wurde die Möglichkeit einer schichtselektiven Laserstrukturierung aufgezeigt, die beim Einsatz in einer Bandfertigungsanlage neue Maßstäbe bezüglich der anwenderorientierten Modulherstellung setzt. Durch den Wegfall starrer Strukturierungssysteme (Masken) und deren Ersatz durch ein softwaregesteuertes Laserwerkzeug ist die Umschaltung von Zellenzahl, Modulform, Zellenform, Anschlußkonfiguration usw. problemlos möglich und verursacht keine weiteren Hardwarekosten.

6. Bandanlagenprozeß

6.1 Paralleles Prozessieren

Den hier vorgestellten und in dieser Form einmaligen Bandanlagenprozeß kennzeichnet die parallele Durchführung aller Prozeßschritte, die zur Herstellung einer Solarzelle notwendig sind, in einer geschlossenen Depositionsanlage. Dazu sind alle Prozeßzonen mit einem durchgehenden Zwischenstück (siehe Kap. 2.8) verbunden, also auch die Sputter- mit den PECVD-Zonen. Dies ermöglicht die Prozessierung endlos langer Substrate, da keine mechanische Trennung zwischen den Einzelprozeßzonen erfolgt. Grundsätzlich steht in einer solchen Anlage einer kontinuierlichen Bewegung des Substratbandes nichts im Wege. Diese ist hinsichtlich einer hohen Produktivität wünschenswert. Voraussetzung dafür sind jedoch Depositionszonen verschieden großer räumlicher Ausdehnung. Durch die Bewegung ist die Depositionszeit an die Depositionszonendurchlaufzeit gekoppelt, wobei sich für die i-Schichtdeposition und die TCO-Deposition große Depositionszonenlängen ergeben. Die Bandgeschwindigkeit v , Depositionszonenlänge L und die Depositionszeit t unterliegen folgender Abhängigkeit:

$$L_{\text{Depositionszone}} [m] = t_{\text{Deposition}} [s] \cdot v_{\text{Substrat}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6.1)$$

Wie man leicht erkennt, ergeben sich schon bei moderaten Produktionsgeschwindigkeiten (10m/h) für die Depositionszone der i-Schicht (ca. 45min) Kammerlängen von einigen Metern. Dies fällt bei einer Produktionsanlage im Industriemaßstab kaum ins Gewicht, würde aber den Rahmen einer Laboranlage bei weitem sprengen, da bei herunterskalierter Substratgeschwindigkeit die Depositionszonen der n- und insbesondere der p-Schicht aufgrund von Inhomogenitäten im Randbereich nicht beliebig kurz ausgeführt werden können. Die Laborfertigungsanlage wird deshalb in einem *stop and go* Modus betrieben, dessen Resultate sich ohne Einschränkungen auf eine Pilotanlage mit ausgedehnten Produktionszonen übertragen lassen. Durch diesen Betrieb wird auch eine zweite Dotierkammer sowie in einer weiteren Ausbaustufe die Verwendung mehrerer Lasersysteme zur Strukturierung eingespart. Bei Bedarf können diese Einrichtungen, sofern einmal vorhanden, durch Umkehren der Transportrichtung erneut angefahren werden (siehe Kap. 9.5).

6.2 Substratauswahl

Das Substrat, welches in der Anlage veredelt werden kann, muß einigen Anforderungen genügen. Zunächst sind die Bedingungen zur Deposition von diversen Schichten zu erfüllen. Kritisch sind dabei die Desorption, die den Prozeß verunreinigt, und die Temperaturbeständigkeit. Weiterhin ist die Oberflächenbeschaffenheit von großer Bedeutung, da eine gute Haftung des Schichtsystemes erforderlich ist. Speziell für eine Bandfertigungsanlage gewinnen weitere Kriterien an Bedeutung. Das Substrat muß der mechanischen Beanspruchung beim Transport (Zugkräfte) gewachsen sein und darf mit seiner Längendehnung keine unzulässigen Spannungen in den in dieser Richtung verhältnismäßig unelastischen a-Si:H- und TCO-Schichten hervorrufen. Die vorgenannten Eigenschaften bedingen des weiteren eine möglichst geringe Dicke des Substrates, da beim Aufwickeln durch die Biegung des Substrates das deponierte Schichtsystem entweder gestaucht oder gedehnt wird, da die neutrale Faser immer im Substrat liegt. Nur durch eine geringe Substratstärke läßt sich auch bei geringen Aufwickelradien eine unzulässig hohe Spannung im deponierten Schichtsystem vermeiden. Prozeßbedingt muß das Substrat als Band geringer Dicke, definierter Breite und beliebig großer Länge verfügbar sein. Für einen Industrieprozess wäre eine einfache vakuumtaugliche Verbindungstechnik wünschenswert, die beim Wechsel der Substratbänder ein Verbinden des Endes des einen- mit dem Anfang des anderen Bandes vollautomatisch unter Vakuum ermöglicht (z.B. Punktschweißen). Als mögliche Substrate kommen neben diversen Metallen (Edelstahl, Aluminium) auch Kunststoffe (Polyimid, Kapton) oder dünnes Glas (Corning 0211) in Frage [Gle,1995].

Für die Laborbandfertigungsanlage wird ein 0,1mm dickes und 90mm breites Edelstahlband aus dem Werkstoff 1.4310 verwendet. Die Oberfläche ist blank, kaltgewalzt und bedingt durch den Fertigungsprozeß eingefettet. Nach den erforderlichen Reinigungsmaßnahmen in Methanol/Ethanol mittels eines Ultraschallbades, werden 75m des Stahlbandes in die Anlage eingefädelt. Dazu werden die einzelnen Kammern der Bandanlage exakt in Längsrichtung ausgerichtet ($x:\pm 0,2\text{mm}$, $y:\pm 0,2\text{mm}$). Die Verbindung durch die Zwischenstücke ist so durch die parallelen präzise justierten CF-Flansche problemlos möglich. Nach dem Verschrauben aller sieben Prozeßkammern mit den jeweiligen Zwischenstücken wird die Laborfertigungsanlage leicht konvex vorgespannt. Dazu werden die Prozeßkammern so angehoben, daß sich ein Kreissektor ergibt. Die mittlere, für die Einkopplung des Lasersystemes vorgesehene Kammer, wird gegenüber den Wickelkammern um insgesamt 12mm angehoben. Durch diese Maßnahme wird ein planes Aufliegen des Substrates an den beheizten Substrathalteplatten gewährleistet. Nachdem das Band eingefädelt ist und seine korrekte Lage durch Ausrichten der beiden Wickeltrommeln sichergestellt ist, steht dem Betrieb nichts mehr im Wege.

6.3 Parallel prozessierte Solarzellen

Um in der Laborfertigungsanlage Solarzellen herzustellen, wurden zunächst die bereits in Kap. 4.4 beschriebenen Einkammerabscheidungen durchgeführt. Nach der Verbindung des gesamten Systemes und der Verwendung von einem Substratband wurden dann Einzelprozesse in der komplett verbundenen Anlage durchgeführt, ohne dass parallel weitere Prozesse parallel abliefen. So wurde ein Teil des Substratbandes in einen Sputterprozeß mit Chrom beschichtet. Anschließend wurde dieser Teil des Substrates in die Dotierkammer bewegt und dort mit der n-Schicht aus a-Si:H versehen. Daraufhin folgte die Bewegung des Schichtsystemes in die i-Kammer zur i-Schicht Deposition und der Rücktransport in die Dotierkammer zur Fertigstellung des a-Si:H Teiles der Solarzelle (p-Schicht). Zum Schluß erfolgte in der TCO Sputterkammer der letzte Depositionsschritt. Die so hergestellte Solarzelle wird aus der Laborfertigungsanlage entnommen, indem das System belüftet und ein Stück Substratband entnommen wird, auf dem sich die Probe befindet. Die Depositionsparameter einer solchen Zelle sind in Tabelle 6.3.1 aufgelistet. Die Abbildungen 6.3.1 und 6.3.2 zeigen typische Kennlinien.

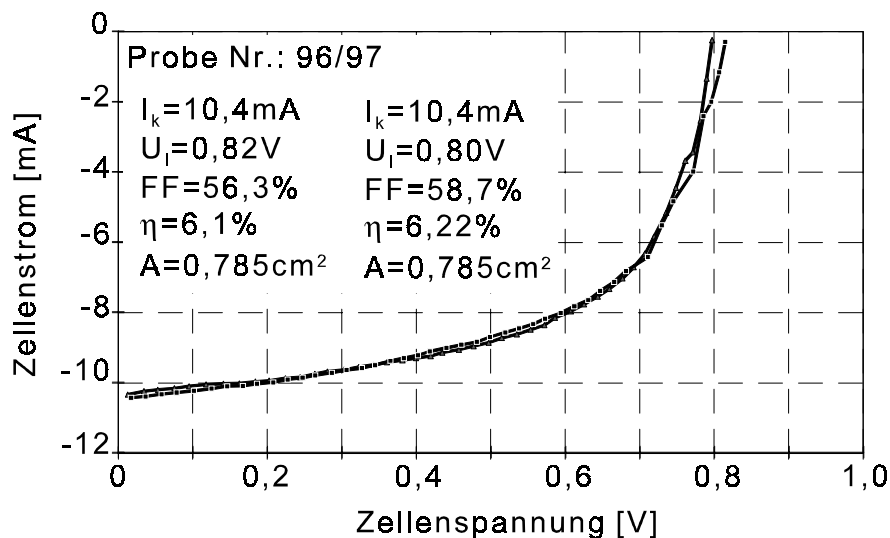


Abb. 6.3.1: Kennlinie von Solarzellen, die als Einzelprozeß in der Bandanlage hergestellt wurden

Tab. 6.3.1: *Depositionsdaten von Solarzellen, die als Einzelprozeß in der Bandanlage hergestellt wurden*

Chrom	Probennummer:	96	97
	Leistung [W]	100	
	Temperatur [°C]	--	
	Depositionsdauer [sec.]	150	
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	
	Gas	Argon	
n-Schicht	Leistung [W]	1	
	Temperatur [°C]	200	
	Depositionsdauer [sec.]	120	
	Prozeßdruck [mbar]	0,4	
	Silanfluß (Kam. 4/5) [sccm]	15/2,5	
	Phosphinfluß [sccm]	7,5	
i-Schicht	Leistung [W]	1	
	Temperatur [°C]	200	
	Depositionsdauer [min.]	60	50
	Prozeßdruck [mbar]	0,4	
	Silanfluß (Kam. 4/5) [sccm]	15/-	
	Dotiergasfluß [sccm]	--	
p-Schicht	Leistung [W]	1	
	Temperatur [°C]	200	
	Depositionsdauer [sec.]	10	
	Prozeßdruck [mbar]	0,4	
	Silanfluß (Kam. 4/5) [sccm]	15/2,5	
	Diboranfluß [sccm]	7,5	
ITO	Leistung [W]	50	47
	Temperatur [°C]	100	
	Depositionsdauer [min.]	30	27
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	
	Gas	Argon	

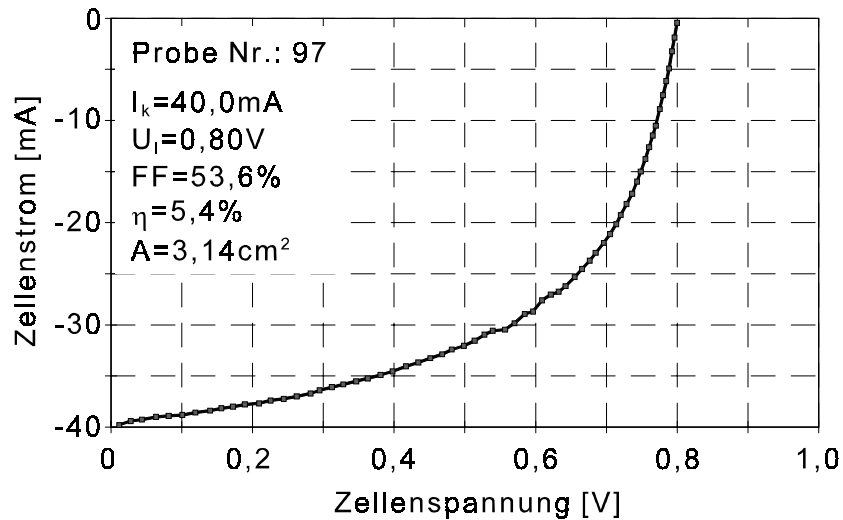


Abb. 6.3.2: Kennlinie einer Solarzelle mit $2\text{cm}\varnothing$, die als Einzelprozeß in der Bandanlage hergestellt wurde

Nach diesen Vorversuchen wurden zunächst Depositionen mit parallelem PECVD Prozeß durchgeführt. Dazu wird während der Deposition der i-Schicht das Dotiergasgemisch weiter in die benachbarte Prozeßkammer eingelassen. Nach der Deposition der n-Schicht wird das beschichtete Substratstück sofort in die i-Depositionszone bewegt und dort weiterbeschichtet. Das Plasma muß dazu in der n-Depositionszone gelöscht und in der i-Zone neu gezündet werden, da nur ein HF-Generator zur Verfügung steht. Das Dotiergasgemisch fließt jedoch weiter unter Prozeßbedingungen in die Dotierschichtdepositionszone. Nach etwa der Hälfte der i-Schichtdepositionszeit wird das Dotiergas gewechselt und das Gemisch für die p-Schicht eingestellt. Nach Abschluß der i-Schichtdeposition ist so nach dem Transfer des beschichteten Substratstückes eine sofortige Deposition der p-Schicht möglich. Auch hier muß das Plasma erneut gezündet werden. Die Kennlinie einer so hergestellten Solarzelle zeigt Abbildung 6.3.3, die weiteren Depositionsparameter sind mit denen des Vorversuches identisch (Tab. 6.3.2). Die verbleibenden Kammern pumpen jeweils Hochvakuum. Das Resultat der bisherigen Depositionen erlaubt die Ausweitung der parallelen Deposition auf den Sputterprozeß. Da nur ein HF-Generator zum Betrieb der Sputterquellen zur Verfügung steht, wird die der i-Schichtdepositionszone am nächsten liegende in Betrieb genommen. Die Abscheidung der Solarzelle gestaltet sich dann folgendermaßen:

Zuerst wird in der Metallsputterzone als Einzelprozeß Chrom deponiert, da dort keine negativen Auswirkungen durch parallel ablaufende Prozesse zu erwarten sind. Nach dem Transfer des beschichteten Substratstückes in die PECVD Dotierzone wird der Depositionsprozeß des a-Si:H Schichtsystemes wie bereits bei der parallelen PECVD-Deposition durchgeführt. Zusätzlich werden in den Sputterzonen typische Prozeßbedingungen eingestellt und in der TCO-Zone ein Plasma gezündet. Die für die Einkopplung des

Tab. 6.3.2: *Depositionsdaten einer Solarzelle, die im parallelen PECVD-Betrieb in der Bandanlage hergestellt wurde*

	Probennummer: 91	Zone 1: Metall	Zone 2: TCO	Zone 4 i-Schicht	Zone 5: p/n-Sch.
Chrom	Leistung [W]	100	--	--	--
	Temperatur [°C]	--	100	--	--
	Depositionsdauer [sec.]	150	--	--	--
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	--	--
	Gas	Argon	Argon	--	--
n-Schicht	Leistung [W]	--	--	--	1
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [sec.]	--	--	--	120
	Prozeßdruck [mbar]	--	--	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Phosphinfluß [sccm]	--	--	--	7,5
i-Schicht	Leistung [W]	--	--	1	--
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [min.]	--	--	50	--
	Prozeßdruck [mbar]	--	--	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Dotiergasfluß [sccm]	--	--	--	7,5
p-Schicht	Leistung [W]	--	--	--	1
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [sec.]	--	--	--	10
	Prozeßdruck [mbar]	--	--	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Diboranfluß [sccm]	--	--	--	7,5
ITO	Leistung [W]	--	50	--	--
	Temperatur [°C]	--	100	--	--
	Depositionsdauer [min.]	--	30	--	--
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	--	--
	Gas	Argon	Argon	--	--

Lasersystemes vorgesehene Zone pumpt über die Turbopumpe Hochvakuum, wobei der Kammerdruck etwa $2 \cdot 10^{-4}$ mbar erreicht. Spülgase werden während der Deposition der Anlage nicht verwendet. Ausschließlich in der Vorvakuumleitung und zwischen den Einzelstufen des Vorpumpstandes wird das abgepumpte Gasgemisch mit Stickstoff verdünnt, bevor es dem Gaswäscher zugeführt wird. Nach der a-Si:H Schichtdeposition erfolgt der Abschluß der Zelle durch den im Einzelprozeß aufgesputterten ITO-Frontkontakt. Die Kennlinie einer so hergestellten Solarzelle zeigt Abbildung 6.3.4, die Depositionsparameter sind in Tabelle 6.3.3 aufgelistet.

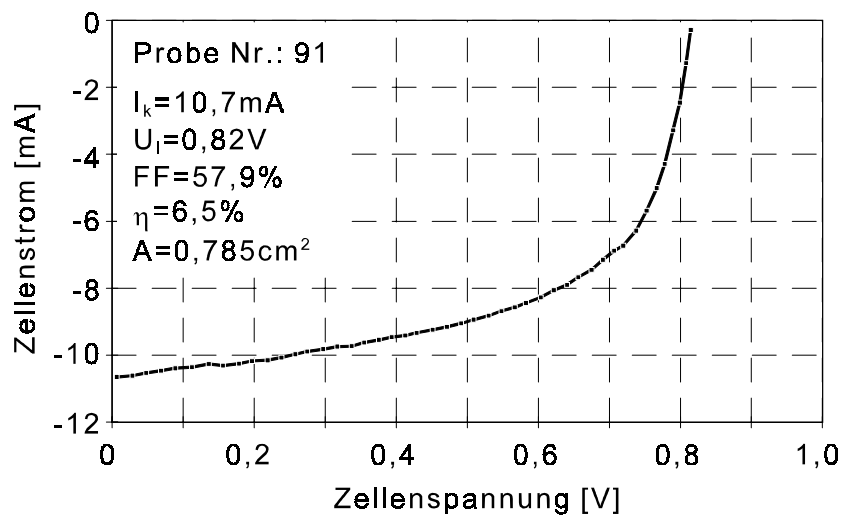


Abb. 6.3.3: Kennlinie einer Solarzelle, die in einem parallelen PECVD-Prozeß in der Bandanlage hergestellt wurde

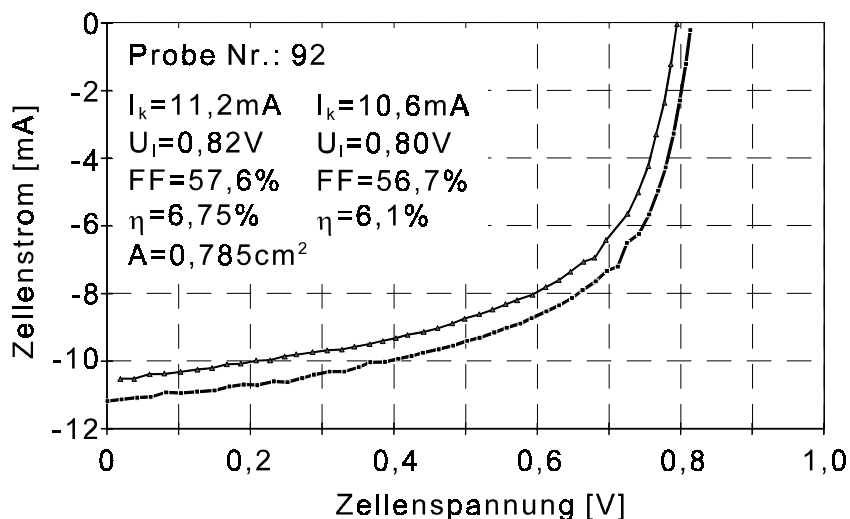


Abb. 6.3.4: Kennlinien von zwei Solarzellen, die in einem parallelen PECVD- und Sputterprozeß in der Bandanlage hergestellt wurden

Tab. 6.3.3: *Depositionsdaten von Solarzellen, die im voll parallelen Betrieb in der Bandanlage hergestellt wurden*

	Probennummer: 92	Zone 1: Metall	Zone 2: TCO	Zone 4: i-Schicht	Zone 5: p/n-Sch.
Chrom	Leistung [W]	100	--	--	--
	Temperatur [°C]	--	100	--	--
	Depositionsdauer [sec.]	150	--	--	--
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	--	--
	Gas	Argon	Argon	--	--
n-Schicht	Leistung [W]	--	--	--	1
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [sec.]	--	--	--	120
	Prozeßdruck [mbar]	--	--	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Phosphinfluß [sccm]	--	--	--	7,5
i-Schicht	Leistung [W]	--	20	1	--
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [min.]	--	50	50	--
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Dotiergasfluß [sccm]	--	--	--	7,5
p-Schicht	Leistung [W]	--	--	--	1
	Temperatur [°C]	--	100	200	200
	Depositionsdauer [sec.]	--	--	--	10
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	0,4	0,4
	Silanfluß [sccm]	--	--	15	2,5
	Diboranfluß [sccm]	--	--	--	7,5
ITO	Leistung [W]	--	50	--	--
	Temperatur [°C]	--	100	--	--
	Depositionsdauer [min.]	--	30	--	--
	Prozeßdruck [mbar]	0,005	0,005	--	--
	Gas	Argon	Argon	--	--

6.4 Zusammenfassung

Ein elementarer Teil dieser Dissertation ist die Herstellung von Solarzellen aus a-Si:H in einem parallelen Abscheideprozeß. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in der eigens dafür konzipierten Laborbandfertigungsanlage zunächst in separaten Depositionsprozessen Solarzellen hergestellt. Diese im Einzelprozeß hergestellten Zellen dienten als Referenz für die anschließenden parallelen Prozesse. Unter Berücksichtigung der, zum einen durch die Desorption der Substratoberfläche von ca. 13,5m² freigesetzten und zum anderen durch das zur Probenentnahme notwendige Belüften der Anlage eingeschleppten Verunreinigungen, werden bereits beachtliche Anfangswirkungsgrade von über 6,2% erreicht. Nachdem die grundsätzliche Eignung der Bandfertigungsanlage zur Solarzellenherstellung nachgewiesen war, wurden zunächst Zellen in einem parallelen PECVD-Prozeß hergestellt. Die so erzielten Anfangswirkungsgrade von 6,5% erlaubten eine Ausweitung des Parallelbetriebes auch auf den Sputterprozeß. Erstmals fand eine Solarzellendeposition statt, in der sowohl PECVD- als auch Sputterprozesse parallel durchgeführt wurden. Die nach sorgfältiger Optimierung erreichten Anfangswirkungsgrade von bis zu 6,75% sowie die erzielten Füllfaktoren sind dabei gegenüber den vorangegangenen Depositionen fast unverändert und keinesfalls schlechter. Sie stehen im Einklang mit bereits am Institut in einer Zweikammer-Load-Lock Depositionsanlage durchgeführten Untersuchungen einer nip-Struktur auf Stahl [Wag,1996]. Insgesamt wurden in der Bandanlage ca. 100 PECVD- und über 400 Sputterschichten erfolgreich deponiert. Dies spiegelt die hohe Funktionalität und Zuverlässigkeit des gesamten Anlagenkonzeptes und seiner Ausführung wieder. Die Resultate zeigen, daß es in einem System mittels spezieller Zwischenstücke verbundenen Prozeßzonen möglich ist, auf einem kontinuierlichen Substrat in einem parallelen Depositionsprozeß sowohl PECVD- als auch Sputterprozesse durchzuführen. Exemplarisch wurde dies anhand von Solarzellen gezeigt, bei denen die Verunreinigung der intrinsischen Schicht besonders kritisch ist. Die Ergebnisse lassen sich jedoch auch auf andere Bauteile (z.B. TFTs (*Thin Film Transistor*)) ausweiten. Das Fehlen von Sperrschiebern zwischen den Prozeßzonen erlaubt weiterhin die Bewegung des Substrates während der Deposition, die in Hinsicht auf eine kontinuierliche *reel to reel* Fertigung unbedingt erforderlich ist. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist somit erreicht.

7. Ausblick

In dieser Arbeit sind Untersuchungen für eine rationelle Fertigung von Solarzellen und Modulen aus amorphem Silizium durchgeführt worden. Der Wirkungsgrad der deponierten Solarzellen kann durch Erweiterung der Anlage und Optimierung der Schichtzusammensetzung gesteigert werden. Die Deposition von Tandem- oder Triplezellen, deren i-Schicht Bandlücken jeweils auf die Wellenlängen des zu absorbierenden Lichtes eingestellt werden, ist in weiterführenden Forschungsaktivitäten ohne Änderungen am Depositionssystem durchzuführen. Die Möglichkeit, in einem parallelen Prozeß nicht nur das a-Si:H Schichtsystem zu deponieren, sondern auch gesputterte Schichten, eröffnet nicht nur neue Wege bei der Solarzellenherstellung. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere verwandte Prozesse, wie z.B. die Herstellung von TFTs oder sogar die Deposition eines Dünnschichtsystems auf einen ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*), wobei das Substratband durch ein endloses Transportband ersetzt werden kann, bietet ein breites Feld für weitere Forschungsaktivitäten.

Ein weiteres Potential birgt die in dieser Arbeit nur am Rande behandelte Strukturierung der Schichten und Schichtsysteme bereits während der Produktion durch ein Lasersystem. Diese elegante Möglichkeit der Gestaltung ohne spezielle, dem Verschleiß unterworfenen Werkzeuge, hochflexibel in der Anwendung auf praktisch alle Materialien, eröffnet beim Einsatz in einer Produktionsanlage völlig neue Möglichkeiten. Integriert serienverschaltete Solarmodule können so in einer Anlage kundenspezifisch ohne Umstellung des Fertigungsprozesses hergestellt werden. Auf einer Anlage können sowohl Großmodule fast beliebiger Ausgangsspannung als auch Spezialanfertigungen, z.B. für Uhren oder Taschenrechner, in Sonderformen produziert werden. Das flexible Layout wird ausschließlich durch Softwareänderungen realisiert. Die chemische Strukturierung würde sich so auf die bei Großmodulen übliche Aufbringung eines Kontaktgitters zur Verringerung des Flächenwiderstandes der TCO Schicht im Siebdruckverfahren beschränken.

Das gewaltige Einsparungspotential eines kontinuierlich beschichteten dünnen Stahlsubstrates gegenüber einzeln prozessierten Glasplatten wurde bereits diskutiert. Auch bei ähnlichen Anwendungsbereichen, z. B. der Herstellung von Hochtemperatur Supraleitern unter Vakuum, werden kontinuierliche Bandprozesse erfolgreich eingesetzt [Ras,1999]. Der Einsatz von andern Substraten, wie z. B. Aluminiumfolie oder Kunststoffe, führt neben einem vorhandenen weiteren Einsparungspotential auch zu neuen Eigenschaften des Endproduktes.

Die Ergebnisse dieser Arbeit und vorangegangener Forschungsaktivitäten ermöglichen den Bau einer Pilotanlage, die das Stadium der Laborstudien endgültig verläßt und die rationelle Massenproduktion von Solarmodulen ermöglichen sollte. Nur der kontinuierliche RTR-Prozeß von a-Si:H Solarmodulen in einer Fertigungsanlage bietet das Rationalisierungspotential, welches die Photovoltaik aus der Energieversorgung für Klein- und Kleinstgeräte zu einer ernstzunehmenden Energiequelle für kommende Generationen werden läßt.

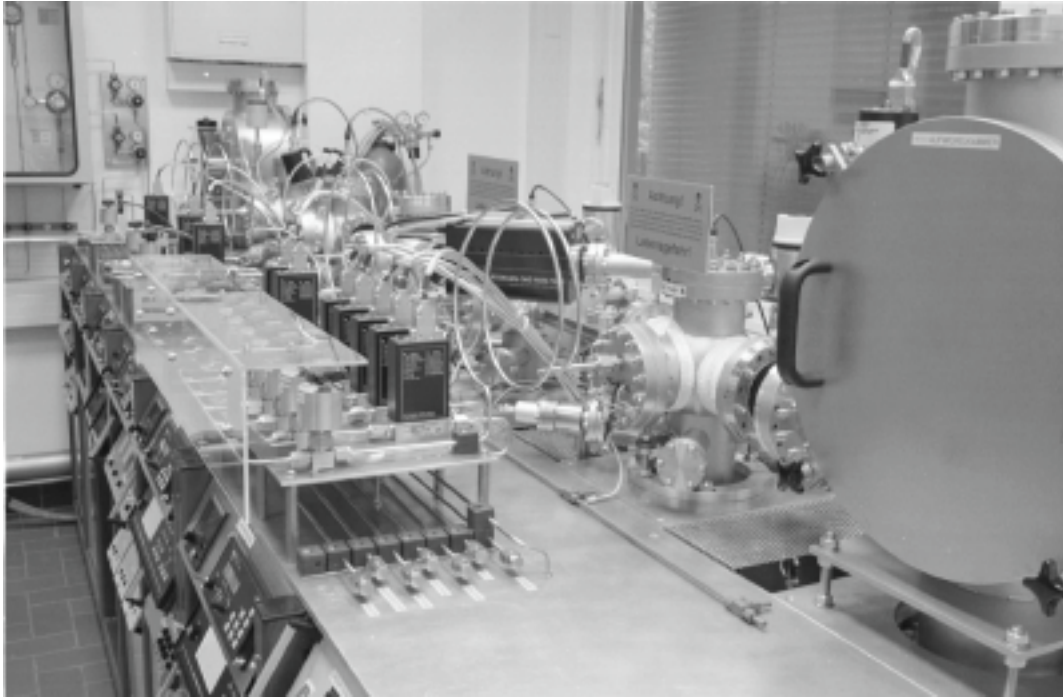


Abb. 7.1: *Ansicht der Laborbandfertigungsanlage*

8. Anhang

8.1 Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Prof. Dr. Böhm für die Aufnahme in seine Forschungsgruppe, und die nicht selbstverständliche Freiheit, das Dissertationsthema nach meinen Vorstellungen zu bearbeiten.

Bei Herrn Prof. Dr. Weiß bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates.

Mein Dank gilt des weiteren Herrn Prof. Dr. Ehrhardt für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei:

Herrn Dr. Wagner, der mich in die Geheimnisse des a-Si:H und dessen Deposition einweihte und immer zum Fachgespräch bereit war.

Herrn Dr. Peros, der Zusammenhänge immer genau hinterfragte und mich zu kritischem Denken anhielt.

Allen Mitarbeitern des Institutes für Halbleiterelektronik, die mich fachlich unterstützt haben und mir ermöglichten in einer sehr angenehmen Atmosphäre zu arbeiten.

Frau A. Winkel-Arndt, die mich neben der Hilfestellung im Sekretariat mit guten Ratschlägen unterstützt hat.

Den Mitarbeitern der Fachbereichswerkstatt, insbesondere Herrn P. Breuer, Herrn K.-G. Hermann und Herrn U. Kurth, die mit der professionellen Anfertigung von Sonderbauteilen den komplexen Aufbau der Bandanlage möglich gemacht haben.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Susanne für die unermüdliche Unterstützung beim Ausformulieren der Arbeit, dem Aufspüren von Fehlern und ihr ermunterndes Verhalten nicht nur in der Zeit dieser Arbeit.

8.2 Veröffentlichungen

1. D. Peros, S. Guse, M. Scholz, M. Wagner, M. Böhm, Qualifizierung und Optimierung von integrierten Dünnschichtsolarmodulen auf Billigsubstraten, Abschlußseminar der Phase 1 der AG-Solar NRW, Oktober 1996, Herausgeber TÜV Rheinland, Köln, ISBN: 3-8249-0368-7
2. M. Wagner, D. Peros, M. Scholz, M. Böhm, Amorphous Silicon Solar Cells and Modules on Metal Substrates, Proc. 14th European Photovoltaik Solar Energy Conference, Barcelona, pp. 521-524, (1997)
3. D. Peros, M. Wagner, M. Scholz, M. Böhm, Interface Degradation in a-Si:H Solar Modules, Proc. 14th European Photovoltaik Solar Energy Conference, Barcelona, pp. 525-528, (1997)
4. M. Scholz, D. Peros, M. Wagner, M. Böhm, Development of Potential Manufacturing Processes for Integrated Series Connected Amorphous Silicon Solar Modules on Metal Substrates, Proc. of the 2nd World Conference on Photovoltaik Solar Energy Conversion, Vienna, pp. 898-901, (1998)
5. M. Scholz, D. Peros, M. Böhm, Deposition of a-Si:H Devices in a RTR-System for Photovoltaic and Microelectronic Applications, presented at the MRS spring meeting, San Francisco, April 5-9, (1999)

8.3 Symbolverzeichnis

a	Absorptionskoeffizient
A	geometrische Fläche
c	mittlere Teilchengeschwindigkeit
d	Schichtdicke oder Rohrdurchmesser
D	Diffusionskoeffizient
eV	Elektronenvolt
f	Frequenz
E_{F0}	Ferminiveau im thermodynamischen Gleichgewicht
E_L	energetisches Niveau der Leitungsbandkante
E_V	energetisches Niveau der Valenzbandkante
FF	Füllfaktor
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	Strom oder Intensität des transmittierten Lichtes
I_0	Intensität des einfallenden Lichtes
I_K	Kurzschlußstrom
l	Leitungslänge
K	absolute Temperatur
M	molare Masse
n	Brechungsindex
N	Kraft
Nm	Drehmoment
P	Leistung oder Druck
Q	Güte
R	elektrischer Widerstand, optische Reflexion oder allgemeine Gaskonstante (8314[J/kmolK])
R_{sq}	Flächenwiderstand
S	Saugleistung
T	optische Transmission
u	Leitungsumfang
U	Spannung
U_D	Diffusionsspannung
U_L	Leerlaufspannung

W	Schichtdicke
x	Ortskoordinate
ν	Frequenz des Lichtes
λ	Wellenlänge
η	Wirkungsgrad
ρ	spezifischer Widerstand
τ	Zeitkonstante
Ω	elektrischer Widerstand

8.4 Abkürzungen

a-Si:H	amorphes hydrogenisiertes Silizium
Al	Aluminium
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
B ₂ H ₆	Diboran
CCD	Charge Coupled Device
Cr	Chrom
HF	High Frequency
ITO	Indiumzinnoxid
IHE	Institut für Halbleiterelektronik
nip	Halbleiterschichtsystem, bestehend aus n-, i- und p-leitenden Schichten, deponiert in dieser Reihenfolge
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PH ₃	Phosphin
sccm	Standard Cubic Centimetre per Minute
STC	Standard Test Conditions
SiH ₄	Silan
TCO	Transparent Conductive Oxide
TFT	Thin Film Transistor
UHV	Ultra High Vacuum
WIG	Wolfram Inertgas (Schweißen)
ZnO	Zinkoxid

8.5 Literaturverzeichnis

- [Ada,1991] K. Adachi, K. Sato, Y. Gotoh, H. Nishimura, ZnO Films Deposited by APCVD, Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Spec. Conf., New York, p. 1385, (1991)
- [Adv,1992] Impedance Matching, TechNote 34, Advanced Energy Industries Inc., (1992)
- [Adv,1999] Advanced Energy, Vacuum Solutions Issue 7, January/February 1999, ISSN1368-0684, CodeN VSOLFP, Warner UK, p.36
- [And,1998] I. Andronic, L. Gagara, L. Gorceac, T. Potlog, D. Sherban, A. Simashkevich, InP Based Radiation Stable Solar Cells, Proc. of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, (1998), pp. 3642-3645
- [Baía,1997] I. Baía, M. Quintela, R. Martins, Electro-Optical Properties of large Area ITO Layers Produced by RF-Magnetron Sputtering, Proc. of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, (1997), pp. 2093-2096
- [Bal] Das Arbeiten mit Turbomolekularpumpen, Balzers Wetzlar
- [Bar,1984] G. M. Barrow, Physikalische Chemie, Bohmann Verlag, (1984)
- [Bei,1983] W. Beitz, K.-H. Küttner, Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, (1983)
- [Bey,1986] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl Hochspannungstechnik, Springer-Verlag, (1986)
- [Böh,1987] E. Böhmer, Elemente der angewandten Elektronik, Vieweg, (1987)
- [Bro,1989] I. N. Bronstein, K. A. Samedjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, (1989)
- [Bru,1989] W. Brunner, K. Junge, Lasertechnik, Hüthing Verlag, (1989)

- [Can,1997] Canon Europa N.V., Solar Cell Promotion Department, Spanish edition PVE003-0697SPA01, (1997)
- [Chi,1969] R. C. Chittick, J. H. Alexander, H. F. Sterling, The Preparation and Properties of Amorphous Silicon, Solid State Science, Vol. 116, No.1, pp. 77-81, January (1969)
- [Con,1993] A. Conrad, O. Ganschow, Comparison of Holweck- and Gaede-pumping stages, Vacuum Vol. 44, (1993)
- [Den,1998] X. Deng, G. Miller, R. Wang, L. Xu, A. D. Compaan, Study of Sputter Deposition of ITO Films for A-Si:H N-I-P Solar Cells, Proc. of the 2nd World Conference on Photovoltaik Solar Energy Conversion, Wien, pp. 700-703, (1998),
- [Eve,1999] H. Everson, D. Woolhouse, From scrap metal to vacuum components, Vacuum Solutions Issue 8, March/April 1999, ISSN1368-0684, CodeN VSOLFP, Warner UK, pp.23-26 (1999)
- [Fis,1978] U. Fischer, R. Lehnert, B. Leopold, W. Röhrer, K. Schilling, Tabellenbuch Metall, Europa-Lehrmittel, (1978)
- [For,1992] Forschungsbericht, Erneuerbare Energien, Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn, (1992)
- [Fuj,1995] S. Fujikake, K. Tabuchi, T. Yoshida, Y. Ichikawa, H. Sanaki, Flexible a-Si Solar Cells with Plastic Film substrate, MRS spring meeting, San Francisco, (1995)
- [Gie,1991] J. Giehl, Ausgewählte Kapitel der Halbleiterelektronik-Photovoltaik, Universität-GH Siegen, (1991)
- [Gle,1995] H. Gleskova, S. Wagner, D. S. Shen, Electronic Patterning of Thin-Film Silicon on Glass Foil, IEEE Electron Device Letters, Vol. 16, No. 10, October 1995
- [Gri,1998] M. L. Grilli, G. Arabito, F. Artuso, V. Barbarossa, M. Belardinelli, U. Besi-Vetrella, F. Ferrazza, G. Ginocchietti, R. Nacci, E. Salza, L. Pirozzi, Screen Printing On Laser Doped Selective Emitters For Large Area Production Silicon Solar Cells, 2nd World Conference on Photovoltaik Solar Energy Conversion, Wien, pp. 1854-1857, (1998)

- [Grü,1999] D. Grünberg, Herstellung und Charakterisierung von TCO-Schichten, Studienarbeit, Universität-GH-Siegen, (1999)
- [Gus,1997] S. Guse, Stromtransportmechanismen an Grenzschichtübergängen in Solarmodulen aus amorphem Silizium, Dissertationen, Universität-GH Siegen, (1997)
- [Han,1987] K. Hannaki, T. Hattori, Y. Hamakawa, Characterisation of High-Conductive p-Type a-SiC:H Produced by Highly Hydrogen Dilution, Technical Digest of the Int. PVSEC-3, Tokyo, Japan, pp. 49-52, (1987)
- [Hey,1984] W. Heywang, Amorphe und polykristalline Halbleiter, Springer Verlag, (1984)
- [Hil,1992] G. Hilgarth, Hochspannungstechnik, Teubener, (1992)
- [Hol,1999] J. Holden, Vacuum Solutions Issue 7, January/February 1999, ISSN1368-0684, CodeN VSOLFP, Warner UK, pp. 29-31
- [Ich,1999] Y. Ichikawa, S.Fujikake, K. Tabuchi, T. Sasaki, T. Hama, T. Yosihida, H. Sakai and M. Saga, Flexible a-Si:H Based Solar Cells With Plastic Film Substrate, Mat. Res. Soc. Symp A, San Francisco Spring Meeting, (1999)
- [IEC] International Standard IEC 904-3, Photovoltaic Devices, Part 3
- [Jef,1999] F. R. Jeffrey, President of Iowa Thin Film Technologies, Gesprächsauskunft beim Mat. Res. Soc. Spring Meeting, San Francisco, (1999)
- [Kol,1993] Ch. Kolmeder, C. Baasel, Aufbau und Beurteilung eines Nd-Yag Grundmodelasers, Laser in der Technik-Laser in Engineering, Proc. of the 11th International Congress Laser 93, Springer Verlag, (1993)
- [Kro,1999] U. J. Kroll, VHF-Plasmaabscheidungen von amorphem Silizium: Einfluß der Anregungsfrequenz, der Reaktorgestaltung sowie Schichteigenschaften, Hartung-Gorre Verlag Konstanz, (1995)
- [Küch,1996] A. Küchler, Hochspannungstechnik, VDI-Verlag, (1996)
- [Los,1973] W. Jost, J. Troe, Kurzes Lehrbuch der Pysikalischen Chemie, D. Steinkopf Verlag, (1973)

- [Löf,1997] A. Löfl, S. Wieder, B. Rech, O. Kluth, C. Beneking, H. Wagner, Al-Doped ZnO Films For Thin-Film Solar Cells With Very Low Sheet Resistance And Controlled Texture, Proc. of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, pp. 2089-2092, (1997)
- [Luf,1993] W. Luft, Y. S. Tsuo, Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Processes, Marcel Dekker Inc., (1993)
- [Mei,1993] D. Meissner, Solarzellen, Vieweg, (1993)
- [Moe,1970] E. A. Moelwyn-Hughes, Physikalische Chemie, G. Thieme Verlag, (1970)
- [Pat,1986] R. I. Patel, D. J. Olsen, J. R. Schrick, N. T. Tran, Comparison Studies of Hydrogenated Amorphous Silicon Films Prepared from Silane-Hydrogen and Silane-Helium Mixtures, MRS Symp. Proc., Vol. 70, pp. 55-58, (1986)
- [Per,1998] P. Pernet, M. Goetz, X. Niquille, D. Fischer, A. Shah, H. Althaus, A. Haller, Front Contact And Series Connection Problems Of a-Si:H Solar Cells On Polymer Film Substrates, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, pp. 976-979, (1998)
- [Perr,1999] J. Perrin, Vacuum Solutions Issue 9, May/June 1999, ISSN1368-0684, CodeN VSOLFP, Warner UK, pp. 25-28
- [Pet,1999] A. Petersen, Elektronik Informationen, Nr.7-1999, ISSN0343-6675, AT-Fachverlag GmbH, pp. 84-89
- [Ras,1999] H. Rassam, Vacuum Solutions Issue 9, May/June 1999, ISSN1368-0684, CodeN VSOLFP, Warner UK, pp. 31-35
- [Rit,1988] H. C. Ritchey, Tuner Topics, Advanced Energy Industries Inc., (1988)
- [Rot,1965] A. Roth, Hochspannungstechnik, Springer, (1965)
- [Sai,1998] K. Saito, M. Sano, K. Matuda, T. Kondo, T. Nishimoto, K. Ogawa, I. Kajata, High Efficiency aSi/ μ c-Si Stacked Solar Cell, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, pp. 351-354, (1998)
- [Schr,1998] R. E. I. Schropp, M. Zeman, Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells, Kluwer Academic Publishers, (1998)

- [Smi,1931] A. Smith, J. D'ans, Allgemeine und anorganische Chemie, Verlag G. Braun, (1931)
- [Som,1992] M. Sommer, Aufbau eines optischen Meßplatzes zur spektralen Vermessung von Solarzellen bei Licht- und Spannungsbias, Universität-GH Siegen, (1992)
- [Spe,1975] W. E. Spear, P. G. LeComber, Solid State Communications, Vol. 17 Pergamon Press Ltd., p. 1193, (1973)
- [Sta,1977] D. L. Staebler, C. R. Wronski, Appl. Phys. Lett., Vol. 31, No. 4, p. 292, (1977)
- [Wag,1996] M. Wagner, Optimierung von Dünnschichtszolarzellen auf Glas und Metallsubstraten, Dissertation, Universität-GH Siegen, (1996)
- [Wage,1998] H.-G. Wagemann, A. Schmidt, Grundlagen der optoelektronischen Halbleiterbauelemente, Teubener, (1998)
- [Wen,1994] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, Applied Photovoltaics, ISBN 0 86758 909 4, Centre for Photovoltaic Devices and Systems, (1994)
- [Wid,1996] D. Widmann, H. Mader, H. Friedrich, Technologie hochintegrierter Schaltungen, 2. Auflage, Springer-Verlag, (1996)
- [Woo,1991] J. R. Woodyard, G. A. Landis, Radiation resistance of thin-film solar cells for space photovoltaic power, Solar cells Vol.31, pp. 297-329, (1991)

9. Technischer Anhang

9.1 Rahmengerüst

Das gesamte Vakuumsystem ruht auf einem Stahlrahmen aus 50mm Vierkantmaterial mit 4mm Wandstärke und ist in RAL 7030 schiefergrau pulverbeschichtet. Dieser Rahmen besteht aus drei Teilen, die direkt miteinander verschraubt werden und mittels höhenverstellbarer Füße an Unebenheiten im Boden angepaßt werden. Die Füße reduzieren außerdem die Körperschallübertragung erheblich. Im hinteren Teil des Rahmens werden zwei ISEL-Profilstangen montiert, auf denen das Vakuumsystem verschiebbar angeordnet wird. Um beim Verschieben der Einzelkammern keine Fluchtungsfehler einzuschleppen, werden diese Schienen mittels Wasserwaage und Meßschieber genaustmöglich parallel und waagrecht ausgerichtet. Die Ungenauigkeiten des Rahmens werden durch Unterlage an den Verschraubungsstellen mit Metallplättchen ausgeglichen. Bei der Montage der Schienen konnte eine Parallelität von $\pm 1\text{mm}$ erreicht werden, und eine Abweichung von der Waagerechten war parallel sowie orthogonal zu dem Schienensystem nicht mehr meßbar.

Auf diese Schienen sind mittels Gleitmuttern die aus 30mm starkem Aluminium gefertigten verschiebbaren Grundplatten aufgeschraubt. In der vorderen Kehle der hinteren Gabel wird mittels Sauer-Schellen das 100mm \varnothing Vorvakuumrohr mit den 14 Stück ISO-KF40 Kugelhähnen montiert. Der vordere Teil des Rahmens ist so aufgeteilt, daß die üblichen 19“-Gehäuse eingebaut werden können. Ein modulares Schienensystem im Winkel von 30° erlaubt eine Anpassung an die Höhen der Einzelkomponenten. Durch die Neigung sind die Anzeigeinstrumente zum einen besser ablesbar, zum anderen erlaubt natürliche Konvektion den Verlustwärmeabtransport. Über den vorderen Teil wird als Trägerplatte für die Gasversorgung und das Lasersystem eine 10mm dicke Aluminiumplatte montiert.

9.2 Prozeßgaszuführung

Die für den Bandanlagenprozeß erforderlichen Prozeßgase werden in einem separaten Raum gelagert und überwacht. Aus diesem Raum werden die Gase über ein Bussystem von sieben Edelstahlrohren mit 6mm \varnothing und 1mm Wandstärke zur Bandanlage geleitet. Die Prozeßgase werden zunächst in ein Entnahmetableau geführt, wo sich für jedes Gas ein Absperrventil, ein Druckminderer, ein Rückschlagventil sowie ein 0,003 μm -Partikelfilter befindet (Abb. 9.2.1).

Bandanlage Schaubild Gassystem

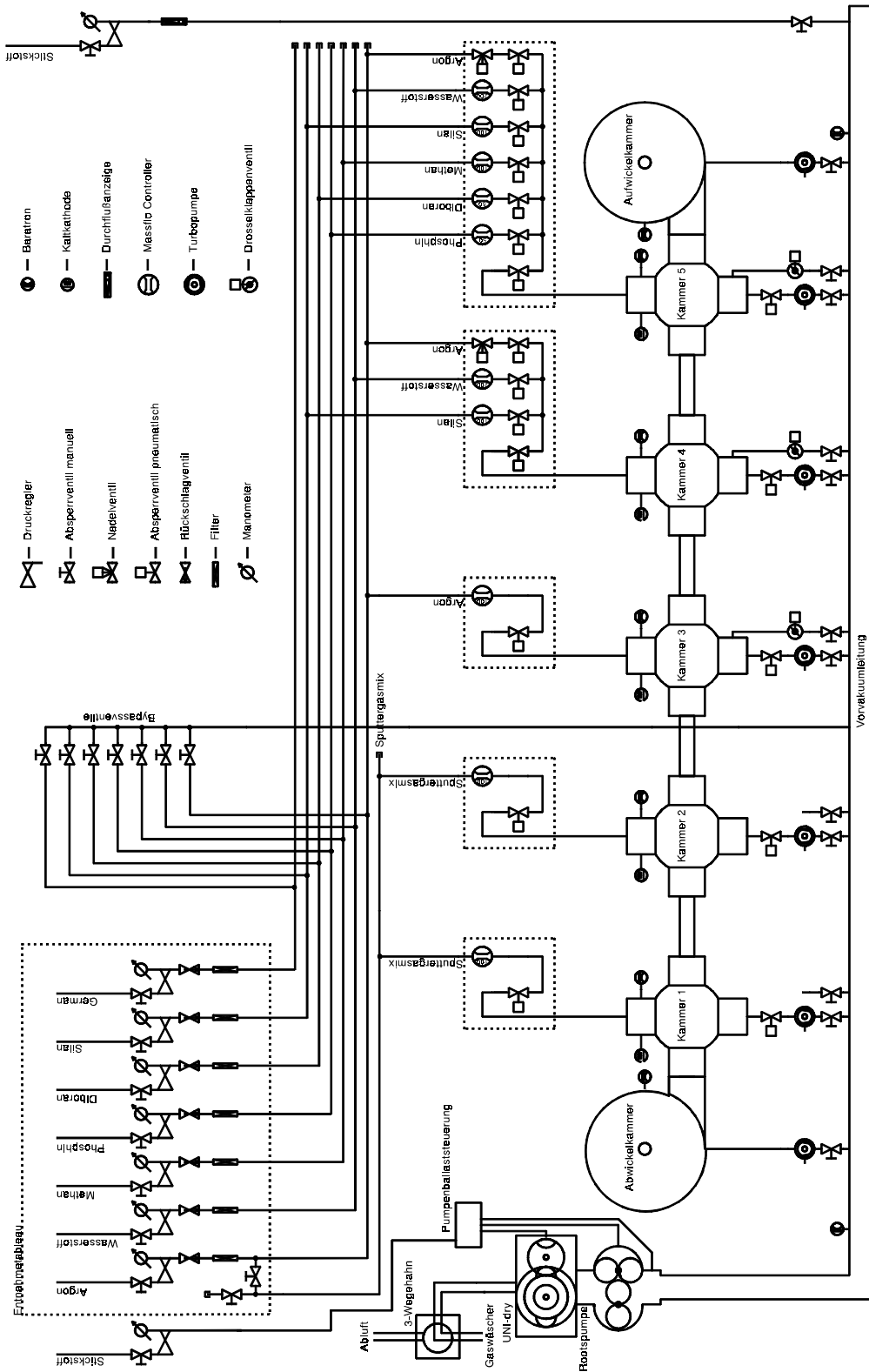


Abb. 9.2.1: Schematische Darstellung der Prozeßgasversorgung der Bandanlage

Von dort führt oberhalb der 19“-Einbauten parallel zum Bandsystem der Gasbus über die Anlage. Von diesem Gasbus zweigen nach Bedarf Stichleitungen zu den Gassteuereinheiten der Prozeßkammern ab. Im Servicefall können, wenn die Evakuierung der Gasleitungen über die Prozeßkammern nicht möglich ist, alle Gasleitungen mittels separater Ventile unterhalb des Entnahmetableaus direkt in die Vorvakuumleitung entleert werden (Abb. 9.2.2).

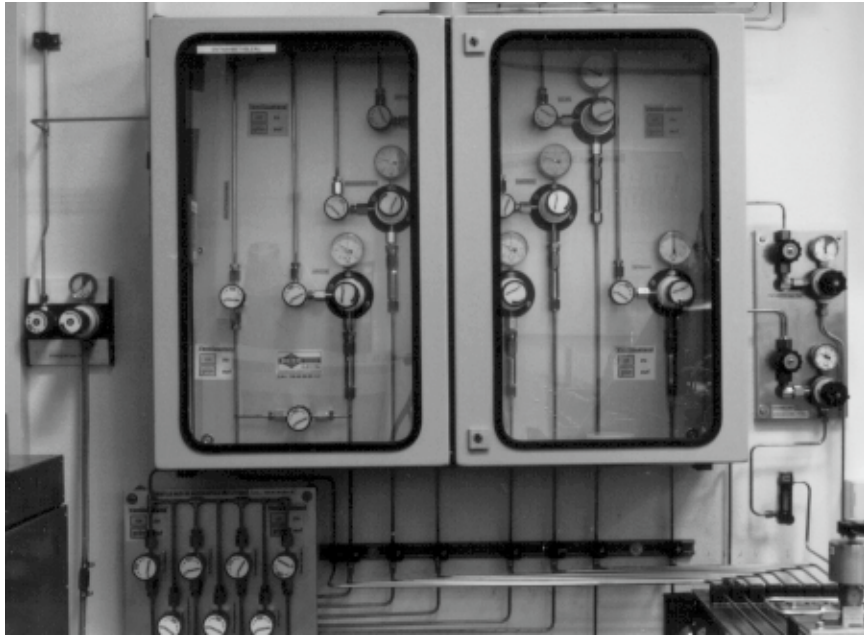


Abb. 9.2.2: Ansicht des Entnahmetableaus für die Prozeßgase

9.3 Prozeßgassteuerung

Die Steuerung der Prozeßgasflüsse erfolgt über separate Tableaus, die aus elektropneumatischen Absperrventilen und Massenflußreglern (MFC: *Mass Flow Controller*) sowie deren Steuergeräten bestehen (Abb. 9.3.1). Die Prozeßgase werden zunächst in einen Massenflußregler geführt, der thermisch über die individuelle spezifische Wärme der durchfließenden Gase den Gasfluß mißt und über ein integriertes Proportionalventil regelt. Da diese Regler den Durchfluß nicht absperren, sondern nur sehr stark drosseln sind unmittelbar hinter jedem MFC elektropneumatische Absperrventile angeordnet. Diese münden bei den beiden PECVD-Kammern Nr. 4 und Nr. 5 in jeweils eine gemeinsame Mischleitung, die zur Prozeßkammer führt und aus Sicherheitsgründen von dieser durch ein weiteres elektropneumatisches Absperrventil getrennt werden kann. Um die Mischleitung und die Prozeßkammern zu spülen, ist an dem der Prozeßkammer gegenüberliegenden Ende der Mischleitung die Argonleitung angeordnet. Die zuströmende Gasmenge wird über ein Nadelventil eingestellt. Bei den Prozeßkammern Nr. 1-Nr. 3, in denen nur Argon verwendet wird, reduziert sich das System auf jeweils einen MFC und ein elektropneumatisches Absperrventil.



Abb. 9.3.1: Prozeßgassteuerung der Bandanlage

Alle Rohrverbindungen sind orbital WIG-geschweißt und die Verbindungen zu Regel-, Absperrorganen, Prozeßkammern, usw. als VCR-Verschraubungen ausgeführt. Dies gewährleistet die erforderliche hohe Reinheit der Gase und garantiert höchste dauerhafte Dichtigkeit. Angesteuert werden die MFCs über ein MKS-647b mit 4- (Prozeßkammer Nr. 4) bzw. 8-Kanälen (Prozeßkammer Nr. 5), an denen die gewünschten Gasgemische vorgewählt und angezeigt werden. Die Ansteuerung der elektropneumatischen Ventile erfolgt über ein

modular in einem 19“-Rack aufgebautes Ventilsteuergerät (Abb. 9.3.2). Diese Eigenentwicklung besteht aus einem Netzteileinschub, der neben dem NOT-AUS auch den UHV-Schieber der jeweiligen Kammer steuert, einem Haupteinschub, der die Nebeneinschübe überwacht und den Gasfluß insgesamt freigibt, und einer variablen Zahl von Nebeneinschüben, an denen die benötigten Gase vorgewählt werden und der Ventilzustand angezeigt wird. Die Ventilsteuerungen sind außerdem in die NOT-AUS-Schleife eingebunden, mittels der die Prozeßgasventile im Fehlerfall sofort gesperrt werden. Als weitere Sicherung wird zusätzlich der Kammerdruck überwacht. Bei Erreichen eines Schwellwertes von 5mbar werden die MFCs vom MKS-647b gesperrt.



Abb. 9.3.2: 19“-Einschübe zur Prozeßsteuerung der Bandanlage

9.4 Kabelbelegung zur Prozeßdruckregelung mit MFC und PR4000

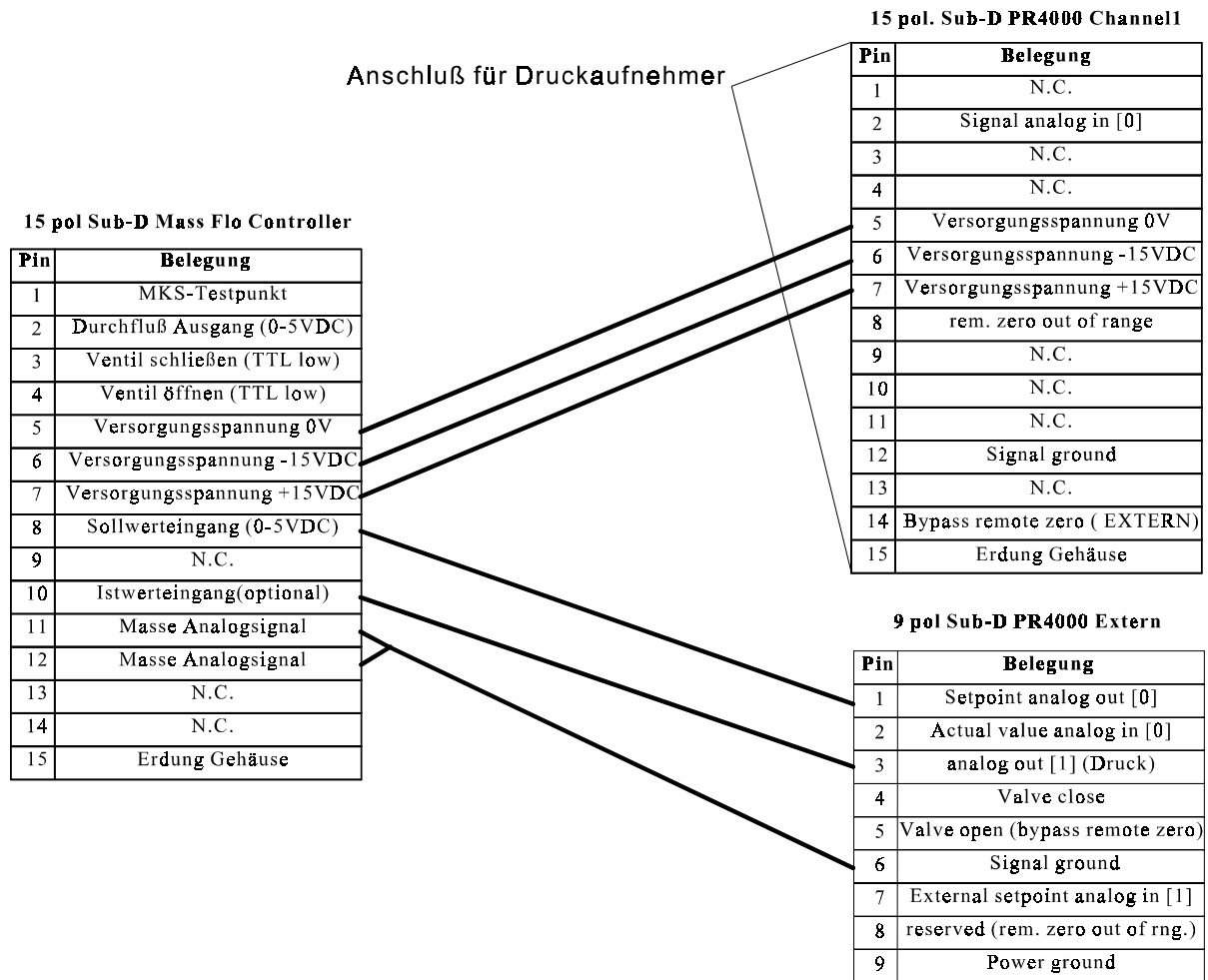


Abb. 9.4.1: Konfiguration der Adapterkabel vom PR4000 zum 1179

9.5 Das Transportsystem

Um kontinuierlich abscheiden zu können, muß das Substrat beweglich sein und bewegt werden. Die konstruktiven Maßnahmen, die ein paralleles Prozessieren erst ermöglichen, stellen an das Transportsystem hohe Anforderungen. Die verwendeten Spalte zur Verbindung der Einzelkammern haben trotz optimaler Ausrichtung der ganzen Anlage von 5m Länge nur eine Durchlaßhöhe von 0,5mm. Bedingt durch die Banddicke von 0,05mm-0,15mm reduziert sich diese auf die verbleibende lichte Weite. Da sich die empfindlichen Schichten nur auf der Bandoberseite befinden, kann ein Schleifen der Bandunterseite toleriert werden. In der Durchlaßbreite ist der Spielraum mit ± 4 mm etwas größer. Da während des Prozessierens auf größtmögliche Reinheit geachtet werden muß, verbietet sich eine aufwendige Bandführungseinrichtung innerhalb der Prozeßkammerzone. Die Bandführung kann ausschließlich durch die Wickelkammern am Anfang und am Ende der Anlage erfolgen.

Damit diese die gestellte Aufgabe erfüllen, muß der Prozeßkammerbereich präzise ausgerichtet werden. Um ein Beulen oder Verwerfen des Substrates zu unterbinden, muß dieses ständig unter Spannung gehalten werden. Die Eigenspannung z.B. des verwendeten Edelstahlbandes und die Reibungsverluste müssen überwunden werden. Die im Laborbetrieb wichtige Positionierung bestimmter Bandabschnitte innerhalb der Beschichtungszonen soll reproduzierbar auf $\pm 1\text{mm}$ erreicht werden.

9.5.1 Die Wickeltrommeln

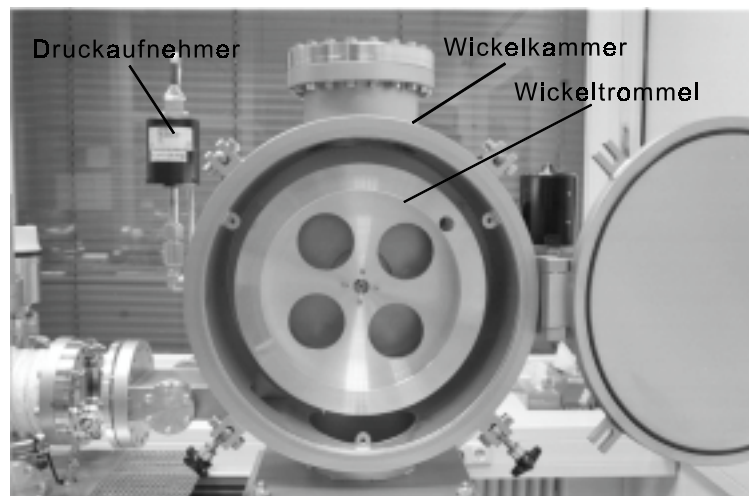


Abb. 8.5.1.1: Ansicht der Wickelkammer mit Wickeltrommel

Das Substrat wird aus Gewichtsgründen auf Aluminiumwickeltrommeln mit $300\text{mm}\varnothing$ aufgespult (Abb. 8.5.1.1). Die Trommeln sind so ausgelegt, daß je nach Substratdicke ca. 100m aufgespult werden können. Dies reduziert die Anzahl der Beladevorgänge erheblich. Beim Ab- bzw. Aufwickeln ändert sich der effektive Durchmesser der Wickeltrommel durch das ab- bzw. aufgewickelte Substrat. Durch die großen Durchmesser ist der Einfluß auf die Bandgeschwindigkeit gering, jedoch in Bezug auf die erforderliche Straffung des Substrates nicht zu vernachlässigen. Die präzise seitliche Bandführung wird durch die Schultern der Wickeltrommel übernommen. Diese sind so toleriert, daß sich das Substrat mit einigen $1/10\text{mm}$ Spiel aufspult. Um bei grober Dejustage ein Auflaufen auf die Trommelschultern zu verhindern, sind diese ab einem Durchmesser größer dem maximalen Aufwickeldurchmesser in einem flachen Winkel konisch erweitert. Um die erforderlichen Zugkräfte bis zum Bandende auf das Substrat zu übertragen, wird im Gegensatz zu Seilwindentrommeln, bei welchen immer einige Umschlingungen des Zugmittels auf dem Trommelkörper aufgespult bleiben, eine Befestigung benötigt, die die volle Zugkraft aufnimmt. Dazu wird eine Klemmung des Substrates mittels Excenter verwendet, die sich nach dem Kniehebelprinzip

bei steigender Zugkraft automatisch fester klemmt. Um die erforderliche Zugkraft in den Trommelkörper einzuleiten, wird, bedingt durch das hohe Drehmoment, eine einfache formschlüssige Verbindung von Welle und Trommel mittels Paßfeder gewählt [Bei,1983]. Da die entstehende Flächenpressung die für Aluminium zulässigen Werte übersteigt, wird eine Stahlnabe mit dem Trommelkörper verschraubt [Fis,1978]. Die ganze Trommel wird durch die verwendete Drehdurchführung präzise geführt.

9.5.2 Drehdurchführung

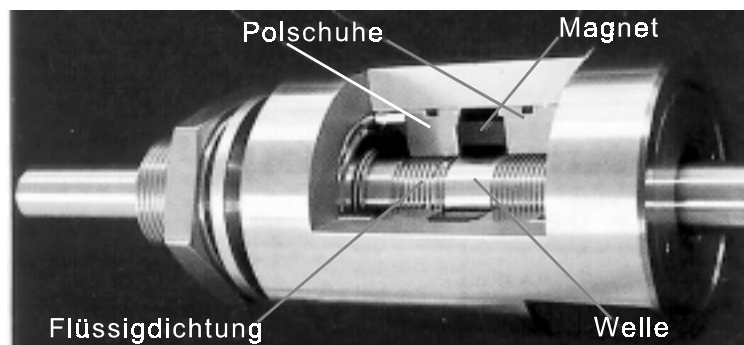


Abb. 9.5.2.1: Schnittbild einer magnetisch/flüssig gedichteten Drehdurchführung [Hol,1999]

Die Drehdurchführung hat die Aufgabe, die Wickeltrommel präzise zu führen (Abb. 9.5.2.1). Die Steifigkeit gegenüber den angreifenden Kräften muß daher groß sein. In vertikaler Richtung muß sie der Gewichtskraft der Trommel incl. Substrat, in horizontaler Richtung der Zugkraft widerstehen. Um die Zugkraft einzuleiten, ist die schlupffreie Übertragung eines hohen Drehmomentes erforderlich. Trotz dieser Anforderungen muß eine Abdichtung gegen Atmosphäre unbedingt auch bei Dauerbetrieb oder langen Stillstandszeiten erhalten bleiben. Ein günstiges *slip stick* Verhalten ist im Hinblick auf einen ruckfreien Transport des Substrates wünschenswert. Diese Randbedingungen führten zur Auswahl einer Durchführung, die auf einer flüssigen Dichtung aufbaut. Eine durchgehende Welle gewährleistet eine hohe Drehmomentfestigkeit. Große Lagerabstände und die verwendeten Wälzlager sorgen für eine große Steifigkeit. Für die Abdichtung sorgt eine mit magnetischen Fe_2O_3 Partikeln von ca. 10nm Größe gefüllte Flüssigkeit (z. B. Perfluorpolyether, Polyphenylether) mit geringem Dampfdruck. Um die Flüssigkeit zu fixieren, wird mittels eines die Welle umschließenden Permanentmagneten und geeigneter Polschuhe ein rotationssymmetrisches Magnetfeld senkrecht zur Wellenachse ausgebildet. Eindrehungen in Welle oder Polschuh sorgen für die Ausbildung flüssiger O-Ringe. Jeder dieser in Serie geschalteten Flüssigabdichtungen widersteht etwa einer Druckdifferenz von 200mbar.

Die Leckrate dieser Dichtung ist nicht meßbar, der Dampfdruck der Flüssigkeit liegt allerdings bei ca. $8 \cdot 10^{-10}$ mbar, und sie ist nicht ausheizbar. Die erreichbaren Enddrücke sind daher begrenzt [Hol,1999]. In der Bandanlage liegen diese bei den Wickelkammern ohne Substrat bei etwa $8 \cdot 10^{-9}$ mbar (20°C).

9.5.3 Antrieb

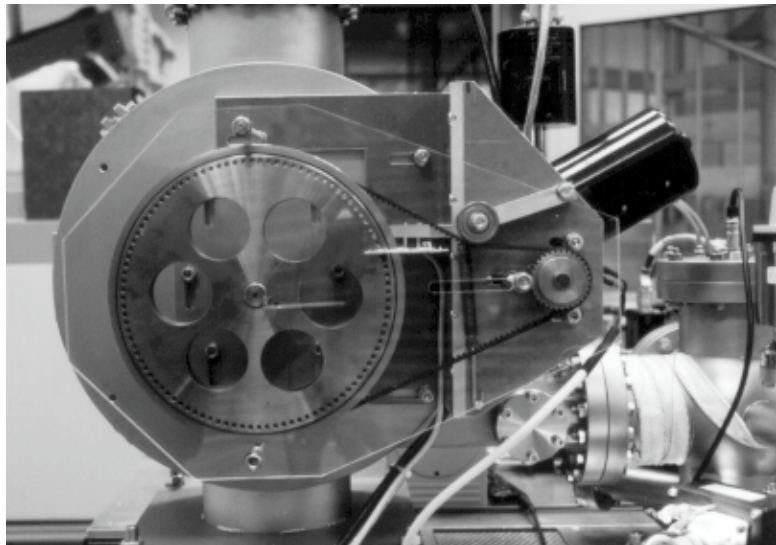


Abb. 9.5.3.1: Ansicht des Antriebes und der Lichtschanke an der Aufwickelkammer

Der Antrieb der Wickeltrommeln muß zunächst das erforderliche Drehmoment aufbringen, um das Substrat zu transportieren. Weiterhin ist es erforderlich, trotz des sich ändernden Wirkdurchmessers der Trommeln, das Substrat kontinuierlich unter einer Vorspannung zu halten. Im Laborbetrieb muß die Transportrichtung mehrfach umgesteuert werden, da einige Kammern mehrfach angefahren werden müssen (z.B. Dotierkammer Nr. 5). Um diese Spezifikationen zu erfüllen, wurde je ein separater Antrieb für jede der beiden Wickeltrommeln vorgesehen. Die Aufrechterhaltung der Vorspannung des Substratbandes auch bei Stromausfall erfordert selbsthemmende Getriebe. Die Selbsthemmung kann einfach durch den Einsatz eines Schneckengetriebes erreicht werden. Das bei diesem Getriebetyp typisch hohe Untersetzungsverhältnis ist erwünscht und spart Getriebestufen, die sonst zur Erzielung hoher Drehmomente erforderlich wären. Als Antriebsmotor wird ein 24V Gleichspannungsmotor mit angeflanschem Schneckengetriebe 80/1 verwendet. Das Schneckengetriebe kann spielfrei eingestellt werden, was im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Vorspannung beim Umsteuern unbedingt erforderlich ist. Das Ausgangsdrehmoment von max. 70Nm wird über ein naturgemäß spielfreies Zahnriemengetriebe mit Untersetzungsverhältnis 150/32 auf über 300Nm erhöht

(Abb. 9.5.3.1). Das Ritzel des Antriebes sitzt direkt auf der Getriebeausgangswelle, das mit Bordscheiben versehene Zahnrad sitzt direkt auf der Drehdurchführung. Beide Welle/Nabe Verbindungen sind als Paßfederverbindung ausgeführt, der Achsenabstand ist variabel. Die maximale Zugkraft dieser Anordnung am Substrat beträgt etwa 1000N. Die Synchronisation beider Antriebe wird mittels einer elektrischen Steuerung erreicht.

9.5.4 Steuerung

Die Steuerung der Gleichstrommotoren muß zum einen ein zügiges Aufspulen des Substrates ermöglichen, zum anderen ist eine geringe Verfahrgeschwindigkeit zur Positionierung bestimmter Substratabschnitte in den Depositionszonen erforderlich. Die Vorspannung des Substratbandes soll unter allen Betriebsbedingungen weitgehend gleich sein. Die erforderliche elektrische Leistung muß ohne Beeinflussung der benachbarten empfindlichen elektrischen Komponenten bereitgestellt werden.

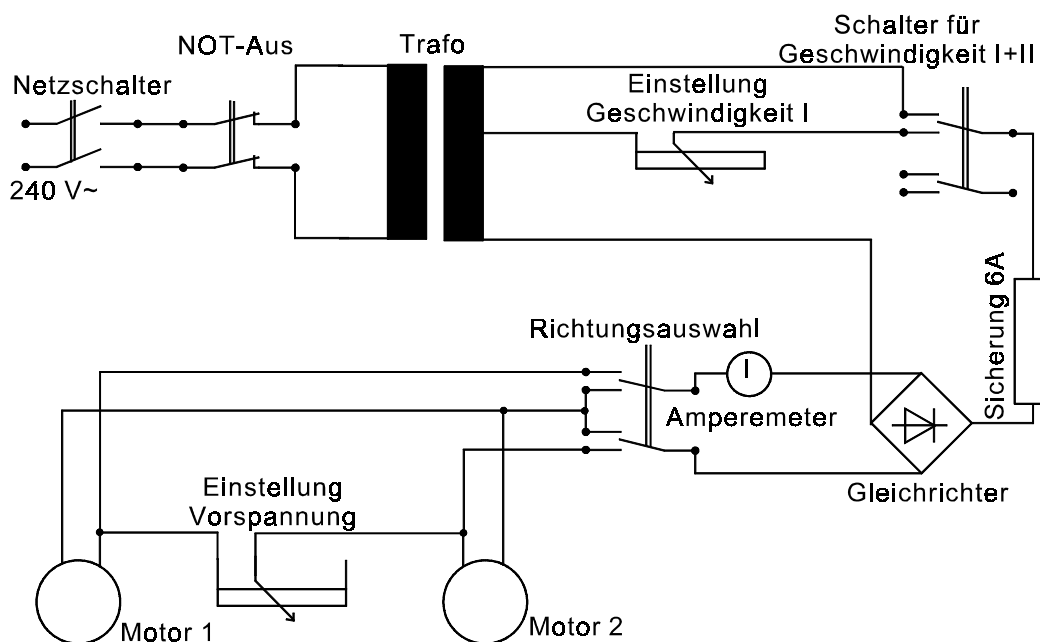


Abb. 9.5.4.1: Prinzipschaltung der elektrischen Motorsteuerung

Abbildung 9.5.4.1 zeigt die Realisierung der Steuerung [Böh,1987]. Der Netzschalter verbindet über eine zweipolige Not-Aus Schaltung die Primärseite des Transformators mit dem Stromnetz. Auf der Sekundärseite des Transformators werden zwei Spannungen abgegriffen, die über einen Wahlschalter mit Mittelstellung und eine Sicherung auf eine Leistungsgleichrichter geschaltet werden. Die für die langsame Verfahrgeschwindigkeit benötigte Spannung kann zusätzlich herabgeregelt werden. Hinter dem Gleichrichter folgt ein Umpoltaster mit Mittelstellung. Die Motoren sind parallel geschaltet, wobei sich in einer der

beiden Leitungen ein einstellbarer Widerstand befindet. Durch betätigen des Richtungsauswahltasters wird automatisch der auf der Zugseite befindliche Motor mit der voreingestellten Betriebsspannung versorgt. Da das Getriebe auf der gezogenen Seite selbsthemmend ist, muß auch dieser Motor anlaufen. Durch die Parallelschaltung ist dies gewährleistet. Um eine Spannung am Substrat zu erzeugen, muß der gezogene Motor "langsamer" laufen als der ziehende. Der eingefügte Widerstand reduziert die Spannung am gezogenen Motor, so daß auch diese Bedingung erfüllt ist. Die Stärke der Vorspannung läßt sich indirekt an der Stromaufnahme der Motoren über das eingebaute Amperemeter kontrollieren. Beim Umschalten der Transportrichtung werden die Verhältnisse automatisch umgekehrt. Die ganze Steuerung findet, wie in Abbildung 9.5.4.2 gezeigt, in einem 19"-Einschub Platz.

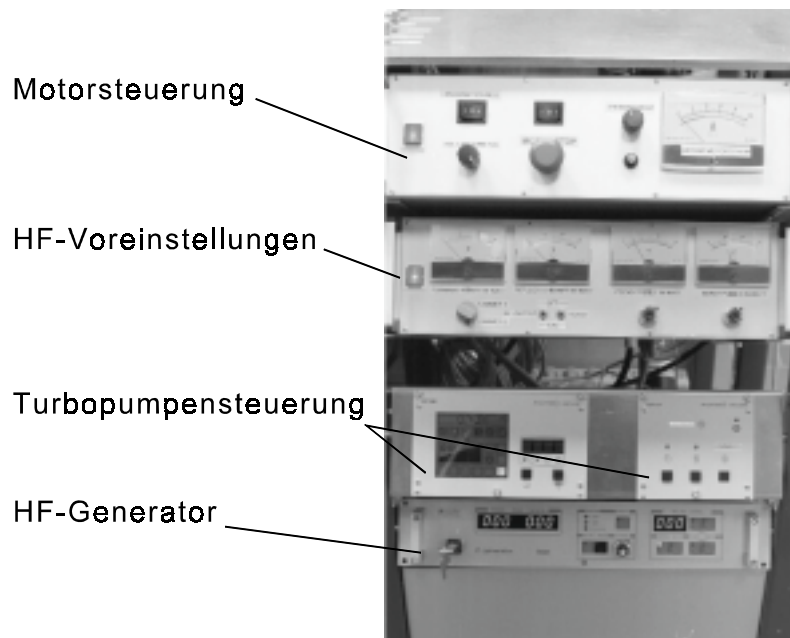


Abb. 9.5.4.2: Ansicht des eingebauten 19"-Einschubes zur Steuerung der Wickelantriebe

Zur reproduzierbaren Positionierung ohne das CCD-Kamerasystem des Laserschneidsystemes wurde eine Zählleinrichtung an die Aufwickeltrommel angeschlossen. Dazu wird über einen optischen Sensor bestehend aus Leuchtdiode und Fototransistor mit nachgeschaltetem Schmitt Trigger ein auf dem Zahnriemenrad angebrachter Lochkreis abgetastet. Die Auflösung beträgt $\pm 10\text{mm} - 1\text{Digit}$ bedingt durch den verwendeten Digitalzähler.