

**Bau einer Apparatur zur Messung winkelabhängiger  
Licht-Streuung an anisotropen Medien**

**Diplomarbeit**

**vorgelegt von  
Peter Apian-Bennewitz  
aus Hamburg  
im April 1990**

**Fakultät für Physik der  
Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau**

**Fraunhofer Institut für  
solare Energiesysteme  
Freiburg im Breisgau**

Übersicht

**Bau einer Apparatur zur Messung winkelabhängiger  
Licht-Streuung an anisotropen Medien**

1. Einleitung	4
2. Theorie	5
2.1 Streuung allgemein	6
2.2 Streuung an TWD-Material	6
2.3 Dipol-Strahlungsgesetze	9
2.4 Rayleigh-Streuung	11
2.5 Photoakustische Grundlagen	12
2.6 Photoakustische Messtechnik für TWD	14
2.7 Einaches Modell für TWD-Wandmessungen	17
3. Vorüberlegungen zur Detektorwahl	21
3.1 Abschätzungen der Meßgröße	21
3.2 Lichtquellen-Verfahren	23
3.3 Detektor-Verfahren	25
3.4 Mögliche Anordnungen der Detektoren zur Messung	25
4. Realisation mit einem Detektorwahlmodell	26
4.1 Design-Überblick	26
4.2 Schaltungs- und Verdrahtungsplan	28
4.3 Details Probenhalter	26
4.4 Details Probenheizung	35
4.5 Details Detektorhalter	36
4.6 Steuerungslogik	36
4.7 Zusammenbau und Funktion	38
5. Apparatur-Steuerung und Meßwertverarbeitung	37
5.1 Die CCD-Kamera	37
5.2 Anschlüsse für Objektiv-Licht	37
5.3 UNIX-Verketzung und YMF-Blockierung	37
5.4 UNIX-Verketzung und YMF-Blockierung	38
5.5 Motor- und Lampen-Steuerung	38
5.6 Meßwertverarbeitung	39
5.7 Meßwertverarbeitung	41
5.8 Meßwertverarbeitung	42
5.9 Meßwertverarbeitung	43
5.10 Meßwertverarbeitung	44
5.11 Meßwertverarbeitung	45
5.12 Meßwertverarbeitung	46
5.13 Meßwertverarbeitung	47
5.14 Meßwertverarbeitung	48
5.15 Meßwertverarbeitung	49
5.16 Meßwertverarbeitung	50
5.17 Meßwertverarbeitung	51
5.18 Meßwertverarbeitung	52
5.19 Meßwertverarbeitung	53
5.20 Meßwertverarbeitung	54
5.21 Meßwertverarbeitung	55
5.22 Meßwertverarbeitung	56
5.23 Meßwertverarbeitung	57
5.24 Meßwertverarbeitung	58
5.25 Meßwertverarbeitung	59
5.26 Meßwertverarbeitung	60
5.27 Meßwertverarbeitung	61
5.28 Meßwertverarbeitung	62
5.29 Meßwertverarbeitung	63
5.30 Meßwertverarbeitung	64
5.31 Meßwertverarbeitung	65
5.32 Meßwertverarbeitung	66
5.33 Meßwertverarbeitung	67
5.34 Meßwertverarbeitung	68
5.35 Meßwertverarbeitung	69
5.36 Meßwertverarbeitung	70
5.37 Meßwertverarbeitung	71
5.38 Meßwertverarbeitung	72
5.39 Meßwertverarbeitung	73
5.40 Meßwertverarbeitung	74
5.41 Meßwertverarbeitung	75
5.42 Meßwertverarbeitung	76
5.43 Meßwertverarbeitung	77
5.44 Meßwertverarbeitung	78
5.45 Meßwertverarbeitung	79
5.46 Meßwertverarbeitung	80
5.47 Meßwertverarbeitung	81
5.48 Meßwertverarbeitung	82
5.49 Meßwertverarbeitung	83
5.50 Meßwertverarbeitung	84
5.51 Meßwertverarbeitung	85
5.52 Meßwertverarbeitung	86
5.53 Meßwertverarbeitung	87
5.54 Meßwertverarbeitung	88
5.55 Meßwertverarbeitung	89
5.56 Meßwertverarbeitung	90
5.57 Meßwertverarbeitung	91
5.58 Meßwertverarbeitung	92
5.59 Meßwertverarbeitung	93
5.60 Meßwertverarbeitung	94
5.61 Meßwertverarbeitung	95
5.62 Meßwertverarbeitung	96
5.63 Meßwertverarbeitung	97
5.64 Meßwertverarbeitung	98
5.65 Meßwertverarbeitung	99
5.66 Meßwertverarbeitung	100
5.67 Meßwertverarbeitung	101
5.68 Meßwertverarbeitung	102
5.69 Meßwertverarbeitung	103
5.70 Meßwertverarbeitung	104
5.71 Meßwertverarbeitung	105
5.72 Meßwertverarbeitung	106
5.73 Meßwertverarbeitung	107
5.74 Meßwertverarbeitung	108
5.75 Meßwertverarbeitung	109
5.76 Meßwertverarbeitung	110
5.77 Meßwertverarbeitung	111
5.78 Meßwertverarbeitung	112
5.79 Meßwertverarbeitung	113
5.80 Meßwertverarbeitung	114
5.81 Meßwertverarbeitung	115
5.82 Meßwertverarbeitung	116
5.83 Meßwertverarbeitung	117
5.84 Meßwertverarbeitung	118
5.85 Meßwertverarbeitung	119
5.86 Meßwertverarbeitung	120
5.87 Meßwertverarbeitung	121
5.88 Meßwertverarbeitung	122
5.89 Meßwertverarbeitung	123
5.90 Meßwertverarbeitung	124
5.91 Meßwertverarbeitung	125
5.92 Meßwertverarbeitung	126
5.93 Meßwertverarbeitung	127
5.94 Meßwertverarbeitung	128
5.95 Meßwertverarbeitung	129
5.96 Meßwertverarbeitung	130
5.97 Meßwertverarbeitung	131
5.98 Meßwertverarbeitung	132
5.99 Meßwertverarbeitung	133
5.100 Meßwertverarbeitung	134



**Diplomarbeit**

**vorgelegt von  
Peter Apian-Bennewitz  
aus Hamburg  
im April 1990**

**Fakultät für Physik der  
Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau**

**Fraunhofer Institut für  
solare Energiesysteme  
Freiburg im Breisgau**

7. Meß-Ergebnisse	50
<b>Übersicht</b>	<b>4</b>
7.1 Messungen mit 2 Freiheitsgraden, Achromat	54
7.2 Messungen zum Einfluß eines TWD-Wahlers, achromat	54
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
7.3.1 Transmission	58
<b>2 Theorie</b>	<b>6</b>
2.1 Streuung allgemein	6
2.2 Streuung an TWD-Material	6
2.3 Dipol-Strahlungsfelder	9
2.4 Rayleigh-Streuung	11
2.5 Photometrische Grundlagen	12
2.6 Photometrische Methoden für TWD	14
2.7 Einfaches Modell für TWD-Wabenstruktur	17
<b>3 Vorüberlegungen zur Detektor-Geometrie</b>	<b>21</b>
3.1 Abschätzungen der Meßzeit	21
3.2 Lichtquellen-Varianten	22
3.3 Detektor-Varianten	23
3.4 Mögliche Anordnungen der Schwenkachsen mit einem Detektor	23
<b>4 Realisation mit einem Detektor und zwei Lampen</b>	<b>26</b>
4.1 Design-Übersicht	26
4.2 Schrittmotor- und Getriebe-Auslegung	28
4.3 Details Parabolspiegel	30
4.4 Details Probenhalterung	30
4.5 Details Detektorhalterung	32
4.6 Steuerungselektronik	33
4.7 Zusammenbau und Justierung	35
<b>5 Apparatur-Steuerung und Meßwert-Erfassung</b>	<b>37</b>
5.1 Die CCD-Kamera	37
5.2 Abschätzungen für Computer-Leistung	37
5.3 UNIX-Workstation und VME-Bus, Hardware	37
5.4 UNIX-Workstation und VME-Bus, Software	38
5.4.1 Motor- und Lampen-Steuerung	39
5.4.1.1 Assembler-Programm für die SAC700 Prozessoren	39
5.4.1.2 Die Unterprogramme zur Motorsteuerung auf der UNIX Seite	41
5.5 Das Meßprogramm und der Meßablauf	42
5.6 Meßwert-Verarbeitung	44
<b>6 Verwendung der Meßwerte und Anforderung an die Darstellung</b>	<b>45</b>
6.1 Roh-Daten, Darstellung von $f(x,y)$ mit Gitternetz (DISSPLA-Programm)	45
6.2 Daten im Probensystem, Darstellung von $f(x,y)$ durch Triangulation	46

---

<b>7 Meß-Ergebnisse</b>	<b>50</b>
7.1 Messungen mit 2 Freiheitsgraden, Aerogel	51
7.2 Messungen zum Fit eines TWD-Wabenmodells	54
7.3 Messungen mit 4 Freiheitsgraden	56
7.3.1 Transmission	56
7.3.2 Reflexion	60
<b>8 Fehler</b>	<b>62</b>
8.1 Justierfehler der Mechanik	62
8.2 Genauigkeit der mechanischen Position	62
8.3 Meßgenauigkeit mit Keithley-Pico-Amperemeter	63
<b>9 Zusammenfassung</b>	<b>65</b>
<b>Anhang</b>	
1. 3D Interpolation von Meßwerten	66
2. Winkelcodierung einer Achse ( Beispiel Detektor Schwenkachse)	67
3. Gründe für TWD-Modell	68
<b>Literatur</b>	<b>69</b>

## Übersicht

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Aufbau einer Apparatur zur optischen Charakterisierung von streuenden, inhomogenen, anisotropen Medien. Gemessen werden Transmission und Reflexion in Abhängigkeit von 2 Ausfalls- und 2 Einfallswinkeln, integral über den Wellenlängenbereich 400-800nm. Die Probengröße ist 40x40x10 cm. Neben Transmissions- und Reflexionsgrad können Streu-Charakteristika und Absorption bestimmt werden.

Schwerpunkte der Beschreibung sind das Design der Mechanik, die Meßwert-Erfassung und die Darstellung der Meßwerte. Auf die Steuerung der Apparatur mit einer UNIX-Workstation und VME-Bus wird näher eingegangen.

Im Theorie-Teil wird ein einfaches Modell für die verwendeten Medien angegeben.

Parameter	Bestimmung
1. $n$ -Wert	Messung der Winkelabhängigkeit der Reflexionskoeffizienten Einzelmessungen
2. $k$ -Wert	Winkelabhängigkeit der Reflexionskoeffizienten Einzelmessungen
3. Transmission	Integral über Wellenlänge und Winkel der Transmission Einzelmessungen
4. Transmission IV	Integral über Wellenlänge und Winkel der Transmission Einzelmessungen

- zum Vergleich verschiedener Medien
- zur Berechnung der Streu-Charakteristika  $S_{11}$  und  $S_{22}$  im Falle der TWD bei beliebigen Einfallswinkeln (genau) und Winkelabhängigkeit
- zur Bestimmung der Absorption  $k$
- zur Simulation der Streu-Charakteristika  $S_{11}$  und  $S_{22}$  im Falle der TWD bei beliebigen Einfallswinkeln

Der Einfallswinkel wird durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung gegeben. Bei TWD ist der Einfallswinkel durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung bestimmt. Es wird angenommen, dass der Einfallswinkel durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung bestimmt ist. Die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung wird durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung bestimmt.

Die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung wird durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung bestimmt. Die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung wird durch die Ausrichtung des Strahls zwischen Nennstrahl und Einfallrichtung bestimmt.

## 1 Einleitung

Seit einigen Jahren wird eine neue Klasse von Wärmedämmstoffen untersucht: Transparente-Wärme-Dämmung (TWD). Diese Materialklasse vereint einen  $k$ -Wert von  $0.8-1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  mit einer Transmission von  $60\%-80\%$  im sichtbaren Bereich. Einsatzgebiete der TWD sind Wärmedämmung an Hauswänden, Isolation von Sonnenkollektoren sowie im steigenden Maße die Beleuchtung von Innenräumen (daylighting). Eine aktuelle Übersicht und ein ausführliches Literaturverzeichnis gibt [PLATZER&WITTEW 89].

Einige Material-Typen werden bereits kommerziell angewendet, andere sind gegenwärtig noch in der Entwicklung. Die am meisten verwendeten sind TWD-Wabenstrukturen und Aerogel. Aerogel ist ein extrem poröses Material aus  $\text{SiO}_2$ . Die luftgefüllten Poren haben eine Kammergröße, die kleiner ist als die mittlere freie Weglänge eines Luftmoleküls bei 1 Bar. Zusammen mit einer kleinen Dichte ergibt sich daraus die geringe Wärmeleitung von kleiner  $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  [RUBIN&LAMBERT 83]. Massive Aerogel-Scheiben erscheinen fast transparent, wohingegen Schüttungen aus Granulat opak wirken. TWD-Wabenstrukturen aus verschiedenen transparenten Kunststoffen sind durchscheinend bis opak und zeigen bei direkter Beleuchtung in Transmission einen typischen Lichtring. Neben theoretischen Arbeiten über TWD werden am Institut folgende TWD-Parameter in Routine-Messungen ermittelt:

Parameter	Meßmethode
1. $k$ -Wert	Messung des Wärmestroms zwischen 2 Platten unterschiedlicher Temperatur [PFLÜGER 84]
2. $g$ -Wert	Wärmestrom zwischen TWD und einer Platte konstanter Temperatur bei Bestrahlung der TWD von der Vorderseite [JACOBS 89]
3. Transmission	integral über Wellenlänge und Winkel mit einer Ulbrichtkugel [PLATZER 87], [PLATZER 90]
4. Transmission	UV,VIS,IR Spektrometer (spektrale, direkte und diffuse Transmission)

Bisher war es nicht möglich, die winkelabhängige Transmission und Reflexion zu messen. Dies ist aus vier Gründen von Interesse, von denen die ersten beiden den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden:

1. zum Vergleich verschiedener Materialien
2. zur Berechnung der Helligkeitsverteilung auf beliebigen Flächen hinter der TWD bei beliebigen Einstrahlungsbedingungen (vor allem direkte Sonneneinstrahlung)
2. zur Bestimmung der Absorption im Material
3. für Simulationsprogramme, die TWD-Mehrschichtsysteme simulieren [PAPAMICHAEL 86]

Der Einfallswinkel wurde bisher bei Messungen als Winkel zwischen Flächennormale und Einfallrichtung angegeben. Bei TWD Materialien, die nicht rotations-symmetrisch um ihre Flächennormale sind, wird die Einfallrichtung dagegen durch zwei Winkel bestimmt ( $\theta$  und  $\varphi$ ). Es wurde somit eine Apparatur benötigt, die die Transmission/Reflexion der TWD-Probe für jeden Einfalls- / Ausfallswinkel (d.h. insgesamt 4 Parameter) messen kann. Ziel dieser Arbeit war der Entwurf und Bau einer Meßapparatur, die flexibel, robust und genau ist.

Bereits früher wurde am Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) ein ähnlicher Meßstand benutzt [PAPAMICHAEL 88], der ursprünglich zur Messung der Lichtverteilung von Lampen gebaut worden war [SPITZGLAS 84]. Der im folgende beschriebene Aufbau unterscheidet sich vom LBL "large scanning radiometer" u.a. durch eine andere Detektorgeometrie.

## 2 Theorie

### 2.1 Streuung allgemein

Unter Streuung versteht man die Ablenkung von Wellen oder Partikeln durch Inhomogenitäten des Ausbreitungsmediums. Dabei können der Energiebereich der Partikel (der Welle) und die räumlichen Dimensionen der Inhomogenitäten (Streuzentren) in einem weiten Bereich variieren: An Elementarteilchen, Kernen, Atomen, Kristallgittern, TWD-Material oder Fernsehantennen können z.B. Photonen (vom Röntgen- bis zum Radiowellenbereich), Elementarteilchen oder Elektronen gestreut werden. Im folgenden reicht es aus, alle Streumechanismen klassisch zu betrachten, da die Anregung diskreter Energieniveaus in den Streuzentren unberücksichtigt bleiben kann. In allen Energiebereichen wird die Beschreibung der Streuung schwieriger, wenn die Dimension der Streuzentren ungefähr gleich der Wellenlänge  $\lambda$  der einfallenden Strahlung ist.

Für den sichtbaren Bereich ( $\lambda = 300\text{-}800\text{nm}$ ) unterscheiden sich drei Bereiche in den Methoden zur Beschreibung des Streuverhaltens:

$\lambda \gg d$ : jedes Streuzentrum der Größe  $d$ , das hinreichend weit von anderen Streuzentren entfernt ist, wird als strahlender elektrischer Dipol betrachtet (Rayleigh-Streuung).

$\lambda \approx d$ : jedes Streuzentrum wird ein Multipol-Strahler, für den die höheren Multipolstrahlungs-Terme nicht mehr vernachlässigbar sind (Mie-Streuung).

$\lambda \ll d$ : die Streuung ergibt sich aus geometrischen Überlegungen

Das Material ist normalerweise aus vielen einzelnen Streuzentren aufgebaut, deren Strahlungsanteile sich zur gesamten Streuamplitude überlagern. Abhängig von der Kohärenzlänge des einfallenden Lichts, des Abstands und der geometrischen Anordnung der Streuzentren (z.B. Kristall-Gitter) geschieht dies kohärent oder als Summe der einzelnen Intensitäten.

### 2.2 Streuung an TWD-Material

In diesem Fall werden elektromagnetische Wellen mit  $\lambda = 300\text{-}800\text{nm}$  an Objekten mit typischen Dimensionen im Meter-Bereich und internen Strukturen der Größenordnung  $d$  gestreut. Die einfallende Strahlung ist parallel, inkohärent und unpolarisiert. Der Detektor mittelt über alle Polarisations-Ebenen.

Die beiden TWD-Gruppen (Aerogel und Wabenstrukturen) zeigen unterschiedliche Streumechanismen:

Aerogel besteht aus Poren mit einem Durchmesser kleiner als  $\lambda$ . Außerdem treten in massiven Aerogel-Scheiben Dichteschwankungen auf, deren räumliche Ausdehnung im Bereich der Wellenlänge liegt. Aerogel zeigt deshalb Rayleigh- und Mie-Streuung. Die Streuzentren liegen dicht, weshalb Mehrfach-Streuung auftritt, die von der Rayleigh Theorie eigentlich nicht erfaßt wird. Trotzdem läßt sich das Verhalten vieler Aerogel-Proben mit Rayleigh-Streuung erklären, besonders bei "guten" massiven TWD-Scheiben, deren Dichteschwankungen klein sind [HUNT 83]. Die Größe der Streuzentren ist  $d = 8\text{-}10\text{nm}$  [RUBIN&LAMBERT 83], die Abweichung der Streuung von der Rayleigh-Theorie wird in [HUNT&BERDAHL 85] beschrieben. In Kapitel 2.3 wird das Strahlungsfeld eines Dipols aus den Maxwell-Gleichungen hergeleitet und in Kapitel 2.4 für den differentielle Wirkungsquerschnitt der Rayleigh-Streuung verwendet.

Eine quantitative Verifizierung der Rayleigh- und Mie-Streuung an massiven Aerogelscheiben wurde mit der hier beschriebenen Apparatur nicht durchgeführt, da die Messungen von Wabenmaterial im Vordergrund standen. In Kapitel 7.1 wird die Streuung von massiven Aerogelscheiben und an Schüttungen von Aerogel-Kügelchen verglichen.

Den typischen Strahlverlauf im Wabenmaterial (Wabendurchmesser ca. 4mm) zeigt Bild 2.1. Jede Wabenwand zerlegt den auftreffenden Strahl in zwei Teile. Diffuse Streuung (Punkt A) und Absorption in den Wabenwänden kennzeichnen die Gesamttransmission genauso wie zufällige Unebenheiten der Wabenwände, die den idealen Strahlverlauf stören. In Kapitel 2.7 wird ein einfaches Modell für das Streuverhalten der Wabenstrukturen beschrieben.

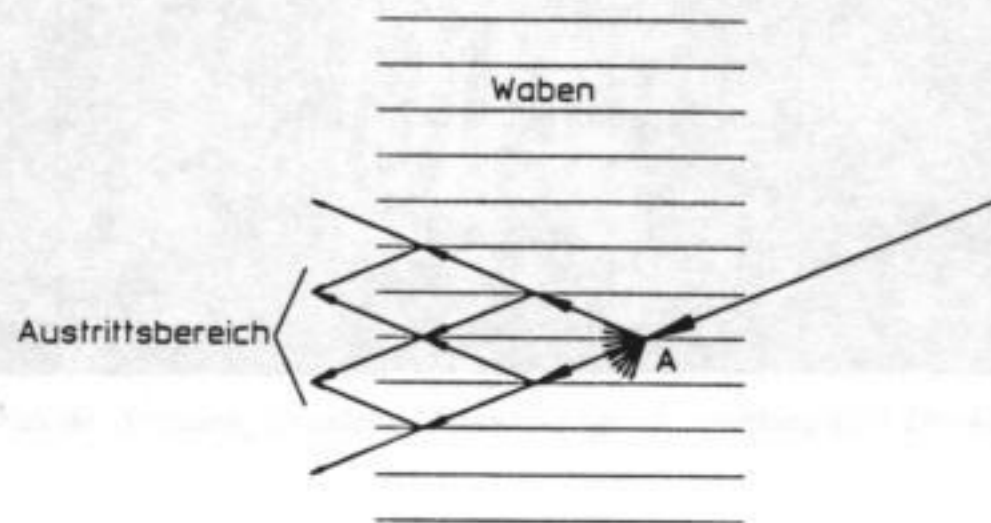


Bild 2.1 Streumechanismen im Wabenmaterial

Der allgemein einfachste Fall der Streuung ist "parallel ein/parallel aus", d.h., eine Probe wird mit parallelem Licht beleuchtet, und der Abstand zwischen Detektor und Probenmitte ist wesentlich größer als die Dimension der Probe (Bild 2.2). Dieser Strahlverlauf wird zur Herleitung der Rayleigh-Streuung angenommen. Diese Geometrie ist auch gegeben, wenn bei größerer Probe vor dem Detektor eine Linse mit dem Durchmesser der Probe angeordnet wird, gleich der Meßanordnung für Fraunhofer-Beugung am Gitter. Am LBL-Radiometer wird der Einbau eines Parabolspiegels am Detektor erwogen, um genauere Daten für Mehrschicht-Simulationsprogramme zu erhalten [KLEMS 89].

In der Praxis, bei TWD-Daylighting-Anwendungen, ist dieser einfache Fall nicht gegeben (Bild 2.3): Die Probengröße beträgt entweder einige Quadratmeter beim Einbau in eine Fassade oder  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  in der Meßapparatur. In beiden Fällen ist der Abstand zwischen Probenmitte und dem Flächenelement hinter der TWD (bzw. der Abstand zum Detektor) in der gleichen Größenordnung wie der Durchmesser der Fläche selbst. Das einfallende Licht ist allerdings auch in der Praxis parallel (direkte Sonnenstrahlung, bzw. spezielle Beleuchtung in der Meßapparatur).

In Kapitel 2.6 wird beschrieben, wie man mit dieser Streugeometrie und photometrischen Methoden (Kap. 2.5) sowohl die Materialkonstanten wie auch die Lichtverteilung hinter TWD-Fassaden für Daylighting Anwendung messen und berechnen kann.



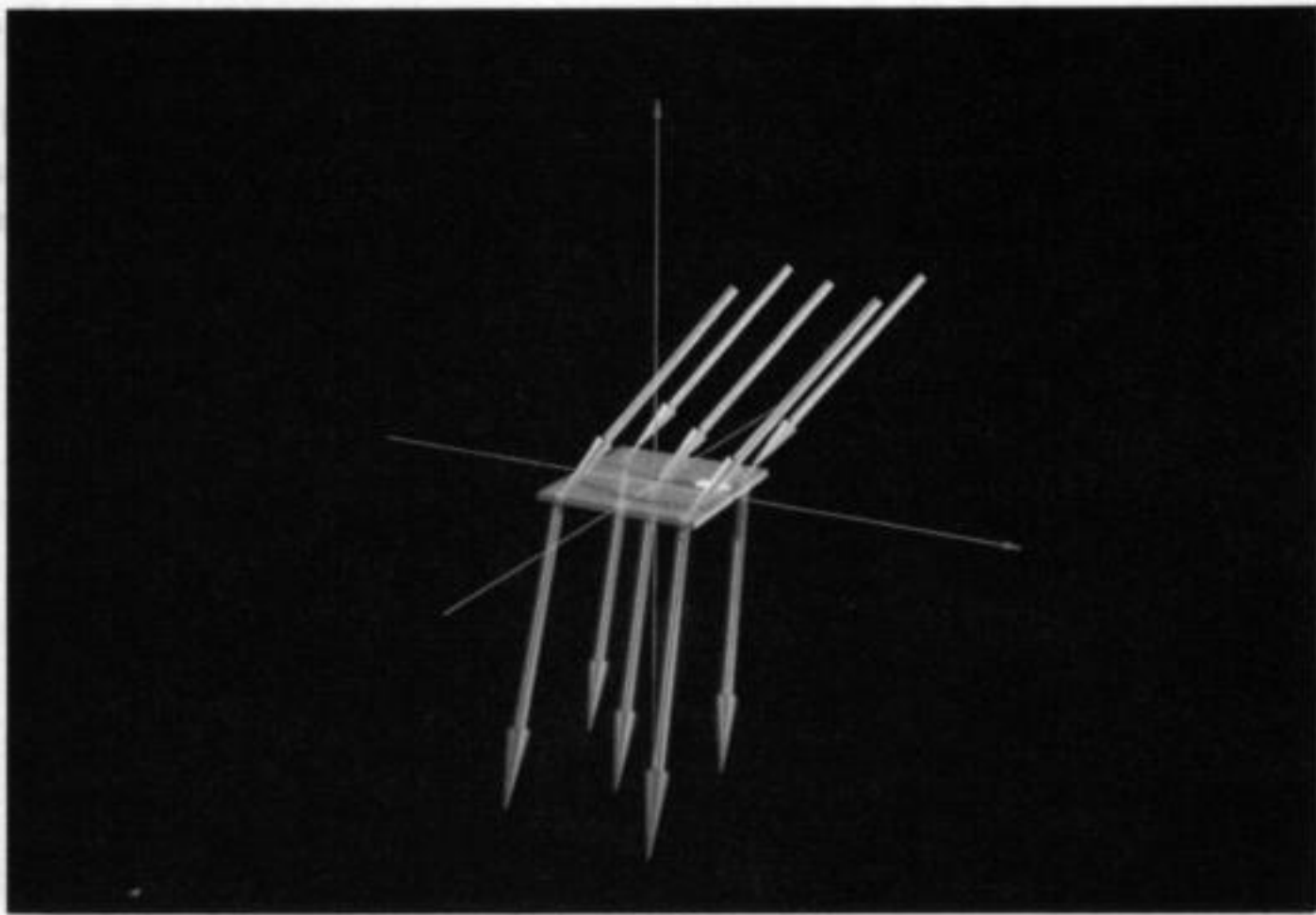


Bild 2.2, Einfachster Fall der Streuung: einfallende Strahlung (gelb), Strahlung zum Detektor (blau) und Probe (grau)

Die Lösung von  $A$  und  $\Phi$  ergibt sich bei bekanntem  $J$ ,  $\rho$  und ohne vorgegeben Randwerte aus:

$$A(x,t) = \frac{1}{c} \iint J(x',t') \frac{\delta(t - t' - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x' dt' \quad (2.6)$$

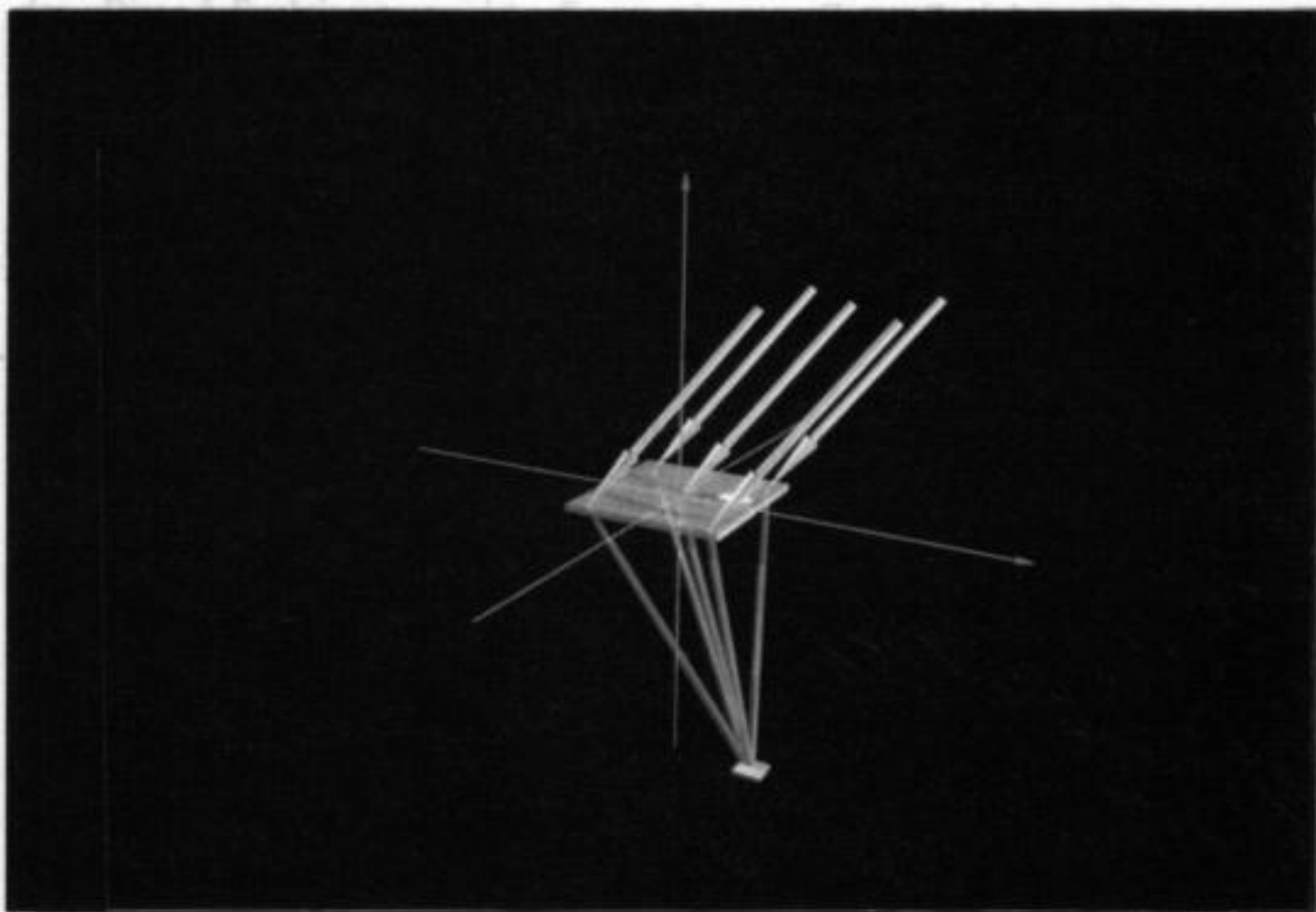


Bild 2.3, Real auftretender Streufall: die auf den nicht unendlich weit entfernten Detektor treffende Strahlung ist nicht parallel.

<sup>a</sup> Vektoren werden in Kapitel 2.3 und 2.4 durch Fettdruck gekennzeichnet.

### 2.3 Dipol-Strahlungsfelder

Die Herleitung der Strahlungsfelder eines harmonisch schwingenden Dipols folgt im wesentlichen den Kapiteln 6, 9 und 16 in [JACKSON]. Die vier Maxwell Gleichungen lassen sich mit dem Vektorpotential  $\mathbf{A}$  und dem skalaren Potential  $\Phi$  im Vakuum schreiben als<sup>\*</sup>:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = - \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} \quad [2.1]$$

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = - 4\pi \rho \quad [2.2]$$

$$\nabla \mathbf{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad \text{Lorentz-Eichung} \quad [2.3]$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad [2.4]$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad [2.5]$$

Mit:  $\mathbf{J}$  Stromdichte,  $\rho$  Ladungsdichte

Die Lösung von  $\mathbf{A}$  und  $\Phi$  ergibt sich bei bekanntem  $\mathbf{J}$ ,  $\rho$  und ohne vorgegeben Randwerte aus:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c} \iint \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') \frac{\delta(t' - [t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c])}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x' dt' \quad [2.6]$$

der Dirac- $\delta$ -Funktionsterm ist die verzögerte Green-Funktion, die einen kausalen Zusammenhang zwischen  $\mathbf{J}$  und  $\mathbf{A}$  sicherstellt.

Mit einer harmonischen Zeitabhängigkeit für  $\rho, \mathbf{J}$

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{x}, t) &= \rho(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \\ \mathbf{J}(\mathbf{x}, t) &= \mathbf{J}(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad [2.7]$$

ist  $\mathbf{A}$  gegeben als:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c} e^{-i\omega t} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') \frac{e^{ik|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x' \quad [2.8]$$

mit  $k = \omega/c$ .  $\Phi$  folgt analog aus  $\rho$ .  $\Phi$  und  $\mathbf{A}$  sind harmonisch zeitabhängig.

Eine Entwicklung des e-Terms in [2.8] nach Vektor-Kugelflächen-Funktionen ergibt:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi ik}{c} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} h_1^{(1)}(kr) Y_{lm}(\vartheta, \varphi) \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') j_l(kr') Y_{lm}^*(\vartheta', \varphi') d^3x' \quad [2.9]$$

$h_1^{(1)}$  Hankelfunktion,  $j_l$  sphärische Besselfunktion,  $Y_{lm}$  Kugelflächenfunktion. Für  $l=0$  gilt:

$$h_0^{(1)} = \frac{e^{ix}}{ix} \quad Y_{00} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \quad j_0 = \frac{\sin x}{x}$$

\* Vektoren werden in Kapitel 2.3 und 2.4 durch Fettdruck gekennzeichnet.

für  $kr' \rightarrow 0$  (Dimension der Quelle wesentlich kleiner als die Wellenlänge) wird der  $l=0$  Teil der Summe in [2.9] (Kugel-Welle):

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{e^{ikr}}{cr} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') d^3x' \quad [2.10]$$

für eine lokalisierte Ladungsverteilung folgt mit der Kontinuitätsgleichung  $i\omega\rho = \nabla \cdot \mathbf{J}$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = -ik \mathbf{p} \frac{e^{ikr}}{r} \quad [2.11]$$

worin  $r$  der Abstand zum Beobachtungsort ist und das Dipolmoment  $\mathbf{p}$  definiert ist durch:

$$\mathbf{p} = \int \mathbf{x}' \rho(\mathbf{x}') d^3x'$$

Für  $\mathbf{B}$  und  $\mathbf{E}$  gilt:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{Definition von } \mathbf{A})$$

$$\mathbf{E} = -\frac{i}{k} \nabla \times \mathbf{B} \quad (\text{ausserhalb der Quellen, harmonisches } \Phi, \mathbf{A} \text{ und Lorentz-Eichung})$$

letzteres folgt aus [2.5] unter Zuhilfenahme von:

$$-\nabla \cdot \Phi = \frac{i}{k} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) \quad \text{aus der Definition der Lorentz-Eichung} \quad [2.16]$$

$$-\frac{\partial \mathbf{A}}{c \partial t} = \frac{-i}{k} \nabla^2 \mathbf{A} \quad \text{aus [2.1] und der Quellenfreiheit } \mathbf{J}=0$$

damit folgt für die  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{B}$  Felder eines harmonisch schwingenden Dipols:

$$\mathbf{B} = k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr}\right) \quad [2.12]$$

$$\mathbf{E} = k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} + [3 \mathbf{n} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}] \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2}\right) e^{ikr} \quad [2.13]$$

in der Nahzone ( $kr \ll 1$ ) geht  $\mathbf{E}$  über in das Feld eines statischen Dipols multipliziert mit  $e^{i\omega t}$ . In der Strahlungszone ( $kr \gg 1$ ) gilt:

$$\mathbf{B} = k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \frac{e^{ikr}}{r} \quad [2.14]$$

$$\mathbf{E} = k^2 (\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \times \mathbf{n} \frac{e^{ikr}}{r} = \mathbf{B} \times \mathbf{n} \quad [2.15]$$

Dies ist das gesuchte Ergebnis.

## 2.4 Rayleigh-Streuung

Die Herleitung der Rayleigh-Formel stützt sich auf folgende Annahmen: 1. die einfallende EM-Welle induziert im Material Multipole. 2. Die Wellenlänge der EM-Welle ist wesentlich größer als die Dimension der Streuzentren, es genügt die Betrachtung der Dipolterme in der Multipolentwicklung. Die einfallende EM-Welle wird zur Vereinfachung als eben und monochromatisch angenommen:

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \mathbf{e}_0 E_0 e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} e^{i\omega t} \quad k = \omega/c \quad [2.16]$$

$$\mathbf{B}_{\text{in}} = \mathbf{n}_0 \times \mathbf{E}_{\text{in}}$$

mit Polarisationsrichtung  $\mathbf{e}_0$  und Ausbreitungsrichtung  $\mathbf{n}_0$

Der differentielle Wirkungsquerschnitt ist die Leistung, die in einen Einheitsraumwinkel in Richtung  $\mathbf{n}$  mit Polarisationsebene  $\mathbf{e}$  abgestrahlt wird, pro einfallenden Fluß in Richtung  $\mathbf{n}_0$  mit Polarisation  $\mathbf{e}_0$ :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\mathbf{n}, \mathbf{e}, \mathbf{n}_0, \mathbf{e}_0) = \frac{r^2 |\mathbf{e}^* \mathbf{E}_{\text{sc}}|^2}{|\mathbf{e}_0^* \mathbf{E}_{\text{in}}|^2} \quad [2.17]$$

dabei kennzeichnet der Index sc die gestreute Strahlung. Mit [2.14], [2.15] und [2.16] ergibt sich der differentielle Wirkungsquerschnitt als:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\mathbf{n}, \mathbf{e}, \mathbf{n}_0, \mathbf{e}_0) = \frac{k^4}{E_0^2} |\mathbf{e}^* \mathbf{p} + (\mathbf{n} \times \mathbf{e}^*) \mathbf{m}|^2 \quad [2.18]$$

dabei ist neben dem elektrischen- auch ein möglicher magnetischer Dipol angenommen.  $\mathbf{e}_0$  und  $\mathbf{n}_0$  ist indirekt in  $\mathbf{p}$  und  $\mathbf{m}$  enthalten. Typisch für Rayleigh-Streuung ist der  $k^4$  Term. Im nächsten Schritt wird eine dielektrische Kugel als Streuzentrum angenommen (Radius  $a$ , Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$ ). Das einfallende Feld induziert einen elektrischen Dipol mit:

$$\mathbf{p} = \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} a^3 \mathbf{E}_{\text{in}} \quad \text{und} \quad \mathbf{m} = 0 \quad [2.19]$$

damit ist der differentielle Wirkungsquerschnitt (dWq):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = k^4 a^6 \frac{|\epsilon-1|^2}{|\epsilon+2|^2} |\mathbf{e}^* \mathbf{e}_0|^2 \quad [2.20]$$

durch Mittelung über alle  $\mathbf{e}_0$  und Addition aller  $\mathbf{e}$  ergibt sich der dWq für die Streuung einer unpolarisierten, ebenen, monochromatischen Welle an einem elektrischen Dipol:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = k^4 a^6 \frac{|\epsilon-1|^2}{|\epsilon+2|^2} 0.5 (1 + \cos^2\theta) \quad [2.21]$$

$\theta$  ist der Winkel zwischen  $\mathbf{n}$  und  $\mathbf{n}_0$ .

Für mehrere Dipole ergibt sich das gestreute EM-Feld als kohärente Überlagerung der einzelnen Dipolfelder. Ist der Abstand zwischen den Streuzentren wesentlich größer als die Wellenlänge, addieren sich die Dipolfelder inkohärent (fehlende Mehrfachstreuung und unabhängige Anregungen der einzelnen Dipole).

Aus [2.21] kann bei bekanntem  $\epsilon$  die Größe  $a$  der Streuzentren bestimmt werden [RUBIN&LAMBERT 83].

## 2.5 Photometrische Grundlagen

Ein Flächenelement  $dA$  strahlt in das Raumwinkelwinkелеlement  $d\Omega$  in der Raumrichtung  $\vartheta$  die Leistung  $dP$ , integral über alle Wellenlängen. Die grundlegende Größe  $I$  gibt die Winkelabhängigkeit der abgestrahlten Leistung an:

$$dP = I(\vartheta) \cdot \cos \vartheta \cdot dA \cdot d\Omega \quad [2.22]$$

Der  $\cos \vartheta$  Term wird eingeführt, damit  $I(\vartheta) = \text{const.}$  für schwarze Strahler gilt,  $I(\vartheta)$  ist somit Energie pro Zeiteinheit pro Raumwinkeleinheit pro projizierte Flächeneinheit, integriert über alle Wellenlängen (siehe Bild 2.4).

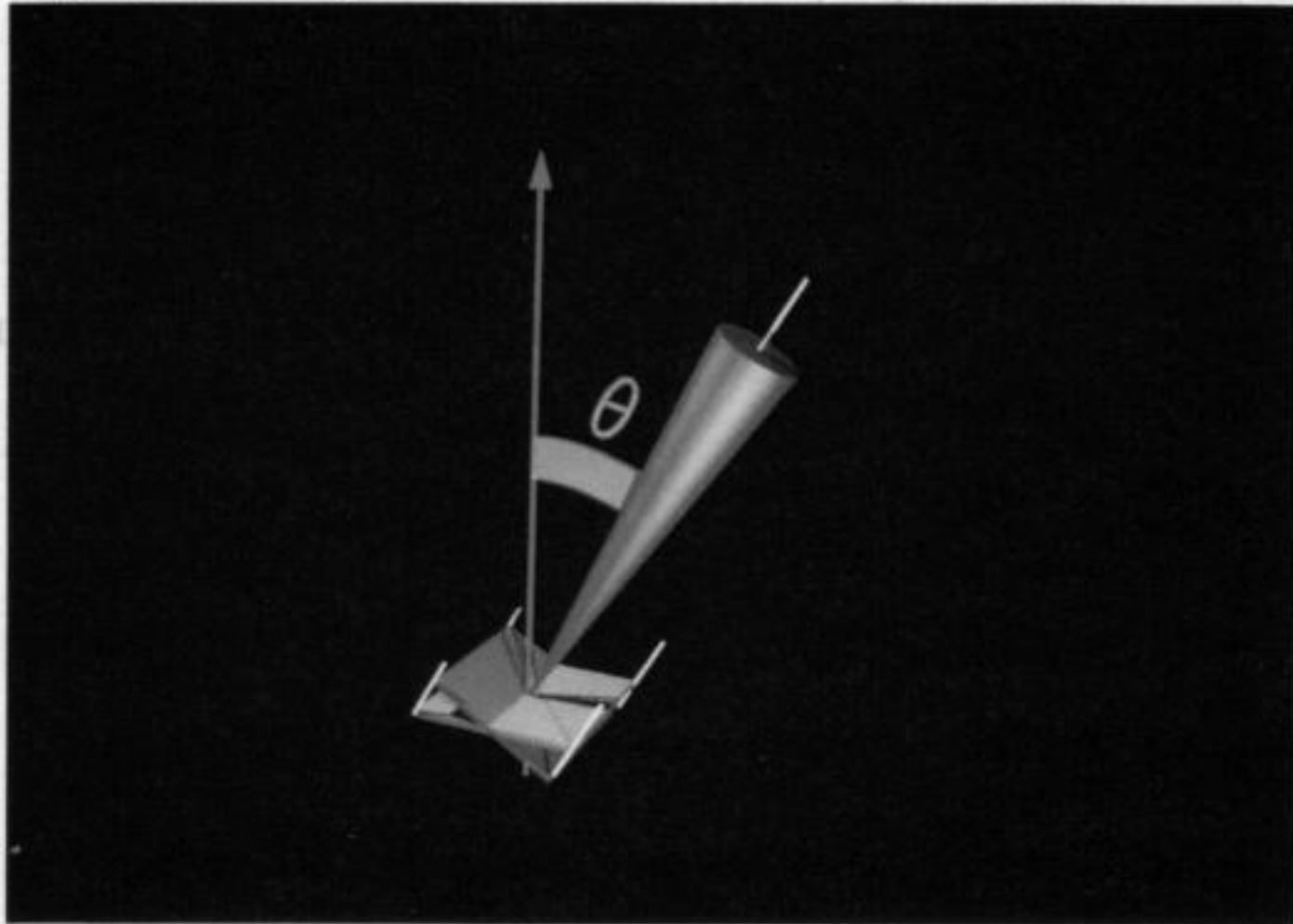


Bild 2.4, Die photometrischen Grundgrößen: Ein Flächenelement  $dA$  (graue Fläche) strahlt in ein Raumwinkelwinkелеlement  $d\Omega$  (blauer Konus) eine Leistung  $dP$ . Die Ausfallsrichtung ist  $\vartheta$  und das projizierte Flächenelement (blaue Fläche) steht senkrecht auf der Ausfallsrichtung.

Für "graue" Volumenstrahler mit starker Selbstabsorption ist  $I$  ebenfalls konstant [HOTTEL&SAROFIM SEITE 22 FF], die Oberfläche eines solchen Materials wird als Lambert-Strahler (diffuser Strahler) bezeichnet. Ein Material ist "grau", wenn seine Absorptions- und Emissionskoeffizienten unabhängig von der Wellenlänge sind. Die Bezeichnung für  $I(\vartheta)$  ist in der Literatur unterschiedlich: Intensity [SIEGEL&HOWELL] [HOTTEL&SAROFIM], Strahldichte [BERGMANN&SCHÄFER], radiance [MALACARA], photometric brightness [BORN&WOLF].

Allgemein ist  $I$  eine Funktion  $I(\vartheta, \varphi, \eta, \zeta)$ , wobei  $\vartheta, \varphi$  die Raumrichtung festlegen und  $\eta, \zeta$  die Koordinaten von  $dA$  auf der Oberfläche  $A$  sind. Mit  $dP_{\text{Halbkugel}}$  wird die von einem Flächenelement  $dA$  in den Halbraum auf einer Seite des Flächenelements abgestrahlte Leistung angegeben:

$$dP_{\text{Halbkugel}} = \iint_{\vartheta, \varphi \text{ Halbkugel}} dP$$

\* In Kapitel 2.5 und 2.6 wird Fettdruck zur Kennzeichnung wichtiger skalarer Größen verwendet.

Im Abstand  $r$  und in der Raumrichtung  $\vartheta_1, \varphi_1$  vom strahlenden Flächenelement  $dA_1$  befindet sich ein Flächenelement  $dA_2$  mit dem Winkel  $\vartheta_2$  zwischen seiner Flächennormalen und der Verbindungslinie  $dA_1-dA_2$ . Von  $dA_1$  aus gesehen erscheint  $dA_2$  unter dem Raumwinkelement

$$d\Omega = dA_2 \cdot \cos \vartheta_2 \cdot 1/r^2$$

somit ist die auf  $dA_2$  einfallende Leistung:

$$dP = I(\vartheta_1, \varphi_1, \eta_1, \zeta_1) \cdot \cos \vartheta_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \vartheta_2 \cdot dA_2 \cdot 1/r^2 \quad [2.23]$$

Sind die Dimensionen einer Fläche  $A_2$  klein gegenüber  $r$ , dann ist  $dP$  praktisch konstant auf der Fläche und die von einer strahlenden Fläche  $A_1$  auf  $A_2$  einfallende Gesamtleistung ist:

$$P = A_2 \cdot \iint_{\zeta, \eta, A_1} I(\vartheta_1, \varphi_1, \eta_1, \zeta_1) \cdot \cos \vartheta_1 \cdot \cos \vartheta_2 \cdot 1/r^2 \cdot dA_1 \quad [2.24]$$

$$\text{mit } \vartheta_1 = \vartheta_1(\zeta, \eta), \varphi_1 = \varphi_1(\zeta, \eta), \vartheta_2 = \vartheta_2(\zeta, \eta), r = r(\zeta, \eta)$$

Diese Formel bildet die Grundlage für die beiden folgenden Kapitel.

## 2.6 Photometrische Methoden für TWD

In diesem Kapitel wird zuerst die Meßapparatur näher beschrieben. Das Koordinatensystem der Probe zeigt Bild 2.5 \*

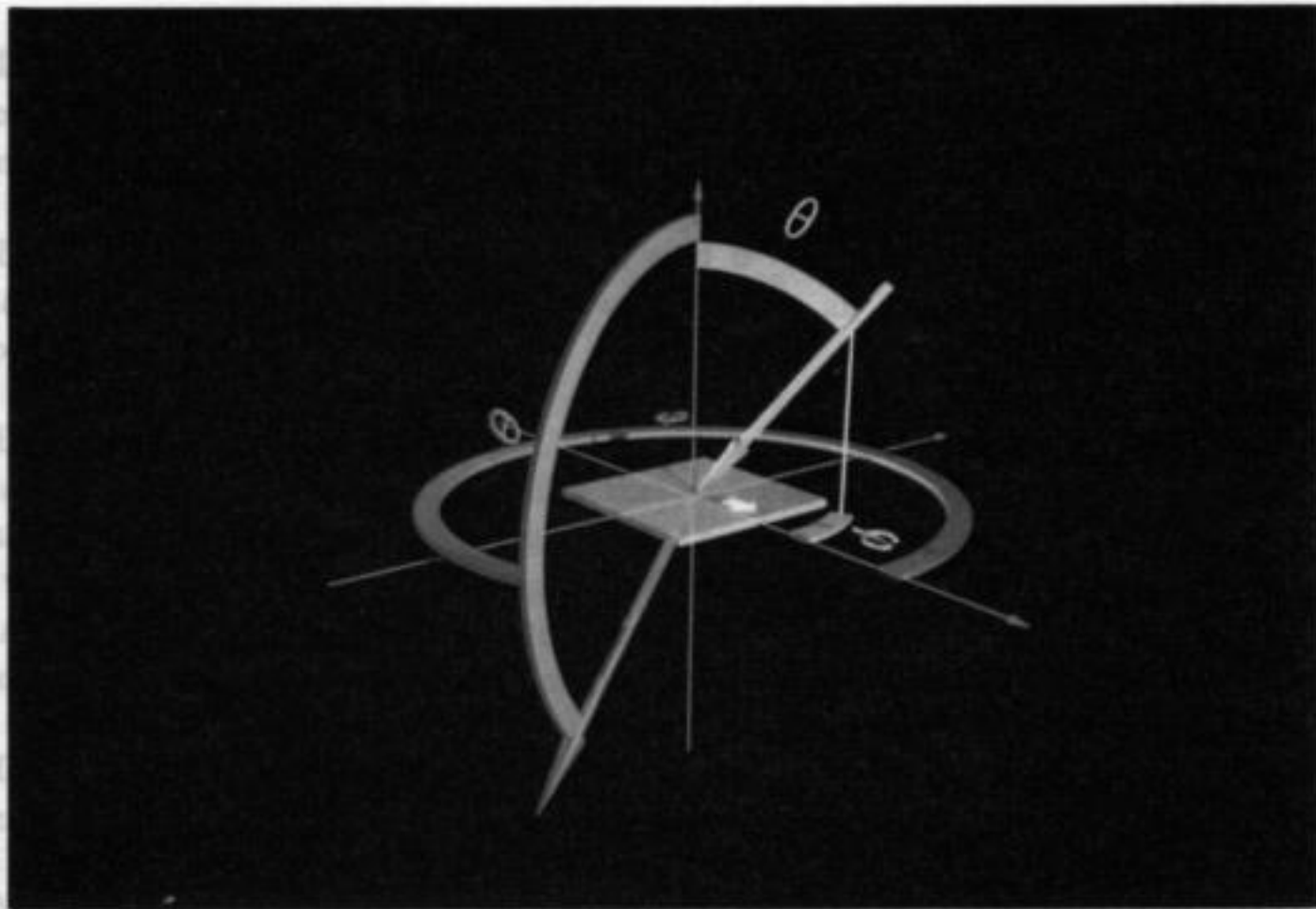


Bild 2.5, Einfallswinkel  $\theta_{in}$  (gelb) und Ausfallswinkel  $\theta_{out}$  (blau) im Proben-Koordinatensystem. Die x-Achse verläuft von links nach rechts, die y-Achse von vorn nach hinten und die z-Achse von unten nach oben. Die Probe ist nicht rotationsymmetrisch um ihre Flächennormale (Vorzugsrichtung symbolisiert durch weißen Pfeil).

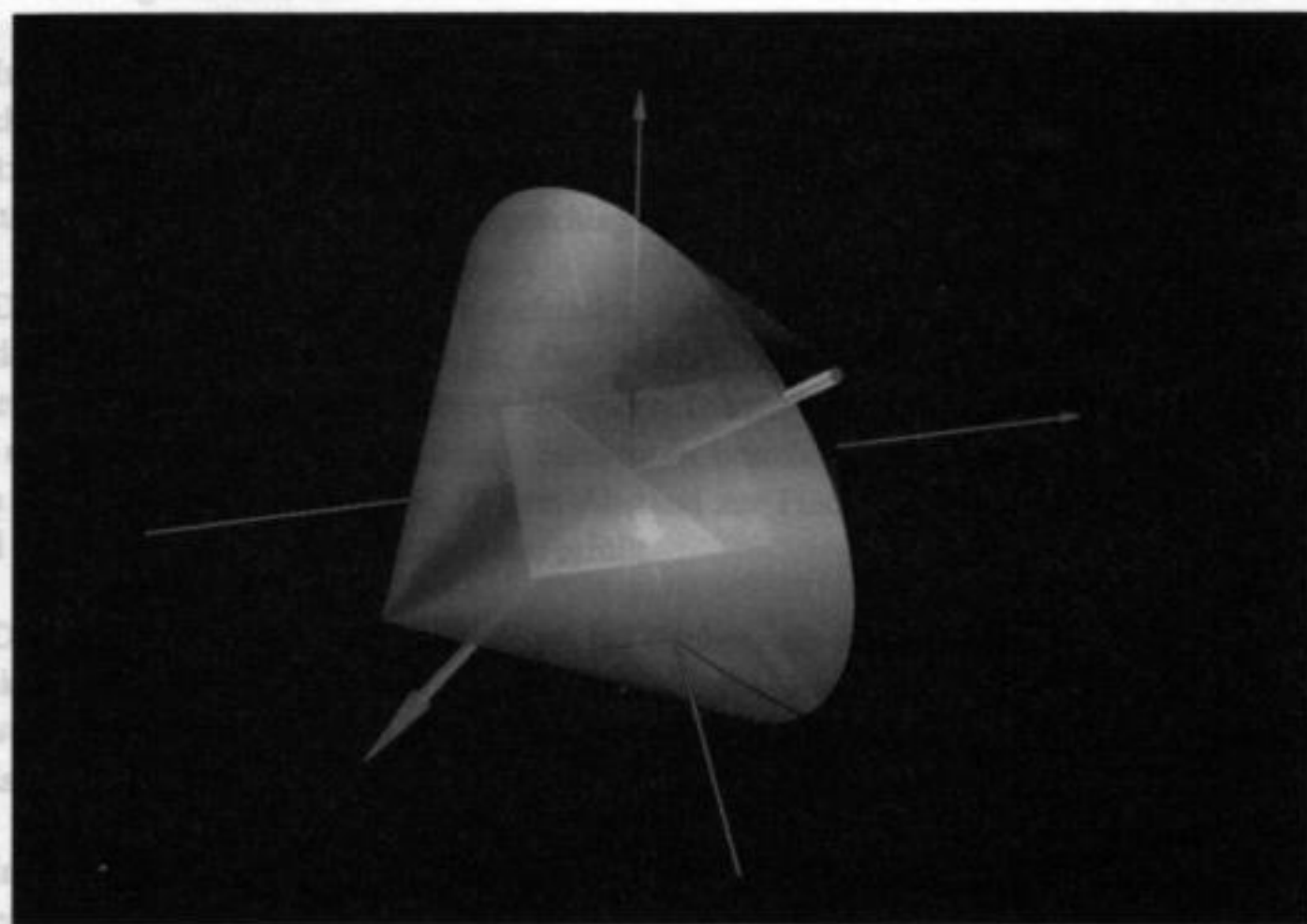


Bild 2.6, Die Oberfläche  $S_2$  (grünblau), auf der der Detektor bewegt wird, maßstäblich zur Probe (hellgraue Fläche)

\* In der Meßapparatur sind die Kanten der  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  Probe verspiegelt, um für den Strahlungsfluß zwischen den Waben eine größere TWD-Fläche zu simulieren.  
In der Graphik wurde  $\theta$  anstelle von  $\vartheta$  verwendet

Der Detektor wird auf einer geschlossenen Oberfläche  $S_2$  um die Probe bewegt. Die Fläche  $S_2$  ist im einfachsten Fall eine Kugeloberfläche. In unserem Fall ist sie durch konstruktive Gründe aus zwei Kegelmänteln zusammengesetzt (Bild 2.6). Um qualitative Aussagen zu vereinfachen, werden alle Meßwerte mit dem Quadrat des Abstandes zwischen Detektor und Probenmittelpunkt multipliziert.

Die Energiebilanz in der Probe ist von theoretischem Interesse und wertvoll für Modelle der inneren Strahlungsvorgänge. Zur Charakterisierung der Probe reicht es aus, nur die von der Lampe abgewandte Seite der Probe als selbstleuchtenden Flächenstrahler zu betrachten.

Die Koordinaten der Detektor Position sind  $\vartheta_{out}$  und  $\varphi_{out}$ , der Meßwert ist die auf den Detektor treffende Leistung  $P$ . Die Meßwerte werden an festgelegten, äquidistanten  $\vartheta_{out}/\varphi_{out}$  Koordinaten aufgenommen.

Die Berechnung der Absorption ist einfach: Aus allen Meßwerten mit  $\vartheta_{out} = [0..90]$  Grad, der Detektorfläche und den Winkelabständen zum nächsten Meßwert kann die gesamte reflektierte Leistung ermittelt werden. Analog ergibt sich die gesamte Transmission aus allen Meßpunkten mit  $\vartheta_{out} = [90..180]$  Grad. Eine Messung ohne Probe liefert die eingestrahelte Leistung, woraus sich die Absorption der Probe ergibt. Aus technischen Gründen werden z.Z. noch keine Absolutwerte für die Transmission/Reflexion gemessen (siehe Kap. 6).

Der Vergleich verschiedener Materialien ist ein Vergleich der Intensitätsverteilung auf der Oberfläche  $S_2$ . Die Ergebnisse werden in Kap. 7.3 präsentiert.

Mit der Simulation der Lichtverteilung eines Innenraums, der durch eine TWD-Fassade beleuchtet wird, ergibt sich eine interessante Verwendung der Meßwerte (Daylighting). Bisher war die Simulation nur für bewölkten Himmel möglich, da dann die Einstrahlung auf die TWD diffus ist und die Innenseite der TWD näherungsweise als Lambert-Strahler aufgefaßt werden kann. Mit den Meßwerten ist auch die Helligkeitsverteilung bei direkter Sonnen-Einstrahlung berechenbar geworden.

In diesem Fall ist die TWD-Fläche größer als die vermessene  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  Probe\*, und die Fläche, auf der die Intensitätsverteilung berechnet werden soll, ist nicht gleich der Oberfläche  $S_2$ . Trotzdem sollen die auf  $S_2$  gemessenen Werte als Grundlage für die Rechnung verwendet werden. Dazu werden zwei Möglichkeiten vorgeschlagen:

Die erste Methode besteht im Aufstellen eines Modells für die Probe und dem Fit dieses Modells an die gemessenen Werte. Das Modells kann auch auf die größere TWD-Fläche angewandt werden, und das Problem ist gelöst. Dieses Modell funktioniert nur, wenn die TWD aus regelmäßig angeordneten kleinen Strukturen besteht, deren Dimension klein ist gegenüber dem Abstand zum Detektor und zu dem Abstand zur Fläche hinter der TWD. Diese Bedingung wird von den meisten TWD-Materialien erfüllt.

Die zweite Methode funktioniert auch bei Proben, die keine regelmäßige oder eine zu grobe Struktur aufweisen (z.B. Glasbausteine, Abschattungselemente). Allerdings ist die Messung aufwendiger: Es ist dafür ein spezieller Detektor nötig, die benötigte Rechenleistung während der Messung ist höher und die Daten brauchen wesentlich mehr Speicherplatz.

Im folgenden werden die beiden Methoden mit den photometrischen Grundlagen aus Kap. 2.5 näher beschrieben:

\* In der Meßapparatur sind die Kanten der  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  Probe verspiegelt, um für den Strahlungsfluß zwischen den Waben eine größere TWD-Fläche zu simulieren.



Um die von einer großen Fläche  $A_1$  auf eine kleine Fläche  $A_2$  treffende Leistung zu berechnen, muss  $I$  auf  $A_1$  bekannt sein (siehe [2.24]).  $A_1$  ist dabei die von der Lichtquelle abgewandte Seite der TWD. Alternativ kann  $I$  auch auf einer gedachten, die leuchtende Probe umschließenden geschlossenen Fläche  $S_2$  definiert sein. In diesem Fall wird  $S_2$  selbst als Flächenstrahler betrachtet, und für jeden Punkt außerhalb von  $S_2$  wird  $P$  analog berechnet.

Die erste Methode stellt für jedes Strukturelement der TWD ein physikalisch sinnvolles Modell mit  $I(\theta, \varphi, \eta, \zeta) = I(\theta, \varphi)$  auf. Das mit 4-8 Parametern versehene Modell berechnet die auf einen "normalen" Detektor einfallende Leistung abhängig von der Detektorposition (typischerweise 80-800 verschiedene). Diese berechneten Werte werden an gemessene angefügt (siehe Kap. 2.7). Ein "normaler" Detektor ist dabei ein über alle Einfallswinkel integrierender, z.B. eine Solarzelle.

Ein Modell für  $I$  ermöglicht ferner, die Streuung bei nicht gemessene Einfallswinkeln zu berechnen (bisher wurde nicht erwähnt, daß  $I$  auch von der Probenbeleuchtung abhängt), zum Preis, daß für jede neue Probe zuerst ein physikalisch sinnvolles Modell gefunden werden muß.

Die zweite Methode mißt  $I(\theta, \varphi, \eta, \zeta)$  auf der Oberfläche  $S_2$  an festgelegten Stellen  $\theta_{out}, \varphi_{out}$ . Diese Winkel sind somit die Koordinaten  $\zeta, \eta$  auf  $S_2$ . Die große TWD Fläche kann dann aus kleinen  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  großen Proben zusammengesetzt werden, jede mit ihrer  $S_2$  Fläche. Die Gesamtintensität ist die Summe der Anteile aller strahlenden Flächenelemente auf allen  $S_2$  Oberflächen.

Die Messung von  $I$  auf  $S_2$  benötigt einen Detektor, der die auf ihn einfallende Leistung abhängig vom Einfallswinkel messen kann. Dies sollte durch eine CCD-Kamera möglich sein. Wie genau die Helligkeitsverteilung auf jeder beliebigen Fläche hinter der TWD aus den (nicht beliebig dicht liegenden) Meßpunkten berechnet werden kann, ist Gegenstand weiterer Arbeiten. Die Mechanik zur Bewegung des Detektors ist dieselbe wie für die erste Methode. Somit ist ein späterer Ausbau der Apparatur mit einer CCD Kamera möglich, falls sich die Notwendigkeit (entsprechende Materialien) ergibt. Vorversuche mit einer CCD-Kamera ergaben mögliche Schwierigkeiten mit der Eichung der Pixel, der Blendensteuerung und der relativ hohen benötigten Rechenleistung während der Messung.

Der Detektor vermißt die Probe normalerweise in einem festgelegten, äquidistanten  $\theta_{out}/\varphi_{out}$ -Netz, d.h. der Weg des Detektors ist von der Probe unabhängig. Dies ist bei Proben mit stark gerichteter Transmission oder Reflexion nicht optimal: Winkelbereiche mit diffuser Transmission können in größeren Winkelschritten gemessen werden, während "Glanzlichter" eine feinere Winkelauflösung erfordern. Dazu wäre ein schneller "Prescan" nötig, der zwischen Winkelbereichen mit diffusem "Background" und solchen mit starken Schwankungen unterscheidet. Der dafür erforderliche bessere mechanische Antrieb ist bereits eingebaut, die Programme zur Steuerung sind noch in der Entwicklung.

## 2.7 Einfaches Modell für TWD-Wabenstruktur

Dieses Kapitel beschreibt ein Modell für Waben- und Kapillarstrukturen, deren Streuverhalten unabhängig vom Auffallswinkel  $\varphi_{\text{out}}$  ist.

Die Probe wird in ein "Schachbrettmuster" eingeteilt (20x20 Felder) und  $I$  für jedes Feld als konstant angenommen (Bild 2.7). Die Summe über die auf die Detektorfläche  $A_2$  von jedem Feld abgestrahlte Leistung ergibt die vom Detektor gemessene Gesamtleistung nach [2.24]. Der Detektor-Mittelpunkt  $P$  wird auf einer 45 Grad geneigten Gerade geführt, der Winkel zwischen der Probenormalen und dem Detektor heißt  $\theta$ .

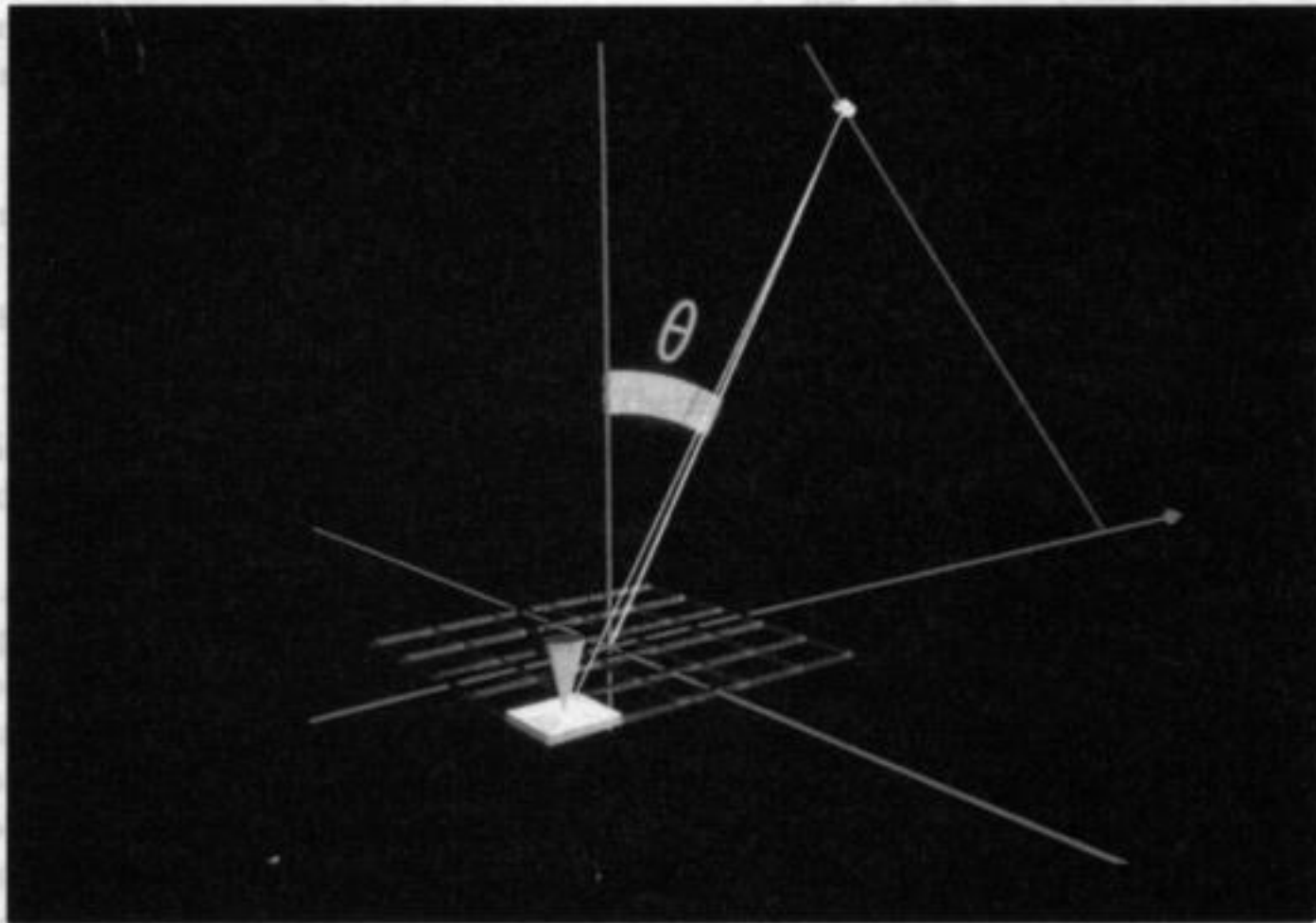


Bild 2.7, Die mastabliche Geometrie von Probe und Detektor für die Modellrechnungen. Das Raster ist für die Rechnungen feiner.

$I$  wird mit  $I(\vartheta, \varphi, \eta, \zeta) = I(\vartheta)$  für jedes Feld als Gaußverteilung plus Konstante angenommen:

$$I_{\text{Feld}}(\vartheta) = \text{scale} \left( \frac{1}{\vartheta_{\text{width}} \sqrt{2\pi}} e^{-0.5 \cdot ((\vartheta - \vartheta_{\text{max}}) / \vartheta_{\text{width}})^2} + \text{Lambert-Offset} \right)$$

"Scale" skaliert die Strahlungsleistung,  $\vartheta_{\text{max}}$  und  $\vartheta_{\text{width}}$  charakterisieren die kegelförmige Abstrahlung jeder Wabe und die Variable "Lambert-Offset" gibt einen diffusen Untergrund an.

Die auf den Detektor treffende Gesamtleistung, skaliert mit dem Abstand zwischen Probenmitte und Detektor, ist gegeben mit (siehe [2.24]):

$$I_{\text{Gesamt}}(\theta) = \frac{R(\theta)^2}{R_{\text{max}}^2} \sum_{\text{Felder}} I_{\text{Feld}}(\vartheta_{\text{Feld}}) \cos(\vartheta_{\text{Feld}}) A_{\text{Feld}} \frac{1}{r^2} \cos(\vartheta_{\text{Det}}) A_{\text{Det}}$$

$R$  Abstand zwischen Detektor und Probenmitte bei  $\theta = 0$  Grad

$R(\theta)$  momentaner Abstand zwischen Detektor und Probenmitte

$\vartheta_{\text{Det}}$  Winkel zwischen Detektornormale und Feld-Detektor-Richtung

$\vartheta_{\text{Feld}}$  Winkel zwischen Feldnormalen und Feld-Detektor-Richtung

$A_{\text{Feld}}$  Feldfläche

$A_{\text{Det}}$  Detektorfläche

$r$  Abstand Feldmittelpunkt-Detektor

$\vartheta_{\max}$  hängt von der Einfallrichtung des Lichts ab, mit dem die TWD beleuchtet wird. Zur Motivation zeigt Bild 2.8 einen Schnitt durch die Wabenstruktur und den vereinfachten Strahlengang, wobei die Wabenwände als ideal spiegelnd angenommen wurden. Eine ideale Wabe strahlt abhängig vom Einfallswinkel in zwei Richtungen. Durch zufällige Unregelmäßigkeiten der Wände in jeder Wabe und einer Lichteinfallrichtung, die nicht parallel zu einer Wabenwand ist, entsteht eine kegelförmige Abstrahlung jeder einzelnen Wabe. Durch die zufällige Natur der Mehrfach-Reflexionen liegt eine Gaußverteilung für die winkelabhängige Abstrahlung nahe, die mit  $\vartheta_{\max} = \vartheta_{\text{einfall}}$  angesetzt wird (siehe auch Bild 2.1).

Durch einen zweiten Fit, der hier nicht beschrieben wird, kann die funktionale Abhängigkeit (evt. ein einfaches Polynom) der Parameter scale,  $\vartheta_{\max}$ ,  $\vartheta_{\text{width}}$  und offset von  $\vartheta_{\text{in}}$  angegeben werden. Dadurch wird es möglich, die Streuung auch für Einfallswinkel zu berechnen, für die keine Messungen gemacht wurden.

In Zukunft soll dieses Modell erweitert werden, um  $\varphi_{\text{in}}$  und  $\varphi_{\text{out}}$  mit zu berücksichtigen und damit auch asymmetrische Proben zu beschreiben. Die Rechenzeit für einen Fit liegt im Moment auf einer SUN SPARC-STATION-1 bei ca 6 min und wird durch die Erweiterung entsprechend länger.

Vorläufige Messungen mit einer IR Thermokamera bei  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  zeigten einen weniger gleichmäßigeren Ring und zwei ausgeprägte Maxima. Dies verstärkt die Vermutung, daß die Bildung eines Ringes auf zufälligen Strukturen im  $\mu\text{m}/\text{mm}$ -Bereich beruht.

Abhängig von  $\theta$  ergibt sich das in Bild 2.9 dargestellte Diagramm der vom Detektor empfangenen Leistung, die bereits mit dem Quadrat des Abstandes zwischen Detektor und Probenmittelpunkt multipliziert wurde. Ist  $\vartheta_{\text{width}}$  klein (1 Grad) (siehe Kurven  $\equiv \bullet$ ), strahlt die gesamte Probe Licht in Form eines Kegelmantels ab, dessen Manteldicke von der Größe der Probe und vom Abstrahlungswinkel abhängt. Der "Peak" wird breiter mit zunehmender Probengröße und schmaler mit zunehmendem Abstand Detektor-Probenmitte oder größerem Abstrahlungswinkel. Für große  $\vartheta_{\text{width}}$  ( $\circ$ ) strahlt die Probe praktisch wie ein Lambert-Strahler, die Leistung folgt  $\cos \theta$ .

Für zwei Wabenarten (Material wa3101 und wa0301) wurden die Parameter  $\vartheta_{\max}$ ,  $\vartheta_{\text{width}}$ , "Lambert-Offset" und "Scale" mittels Levenberg-Marquardt Methode (Anpassung eines nichtlinearen Modells) [NUM REC SEITE 542 FF] an Meßwerte gefittet: Im Vergleich zwischen Meßwerten und Theorie fallen folgende Merkmale auf (Bilder 2.10 und 2.11):

1. das Maximum der Kurven liegt für wa3101 bei kleineren Winkeln als erwartet: Die Probe wurde mit  $\vartheta_{\text{in}} = 20, 30$  und  $40$  Grad beleuchtet und die Maxima treten bei  $18, 27$  und  $36$  Grad auf.  
Im Falle des Materials wa0301 liegen die Maxima dagegen immer bei größeren Werten als erwartet:  $y = 22, 32$  und  $42$  Grad. Diese Asymmetrien sind noch nicht verstanden.
2. Der diffuse Anteil ("Lambert-Offset") nimmt für wachsendes  $\vartheta_{\text{in}}$  zu.  
Dies kann durch eine stärkere Streuung im Material erklärt werden.
3. Die Maxima werden breiter und niedriger für steigendes  $\vartheta_{\text{in}}$ . (siehe auch 7.3)
4. Die Fits zeigen eine typische Abweichung (breiter und niedriger), die Streumechanismen sind anscheinend noch nicht völlig durch das Modell beschrieben.
5. Das Material wa0301 zeigt einen höheren diffusen Anteil und ist insgesamt weniger transparent
6. Das Modell beschreibt die diffusere Streuung besser

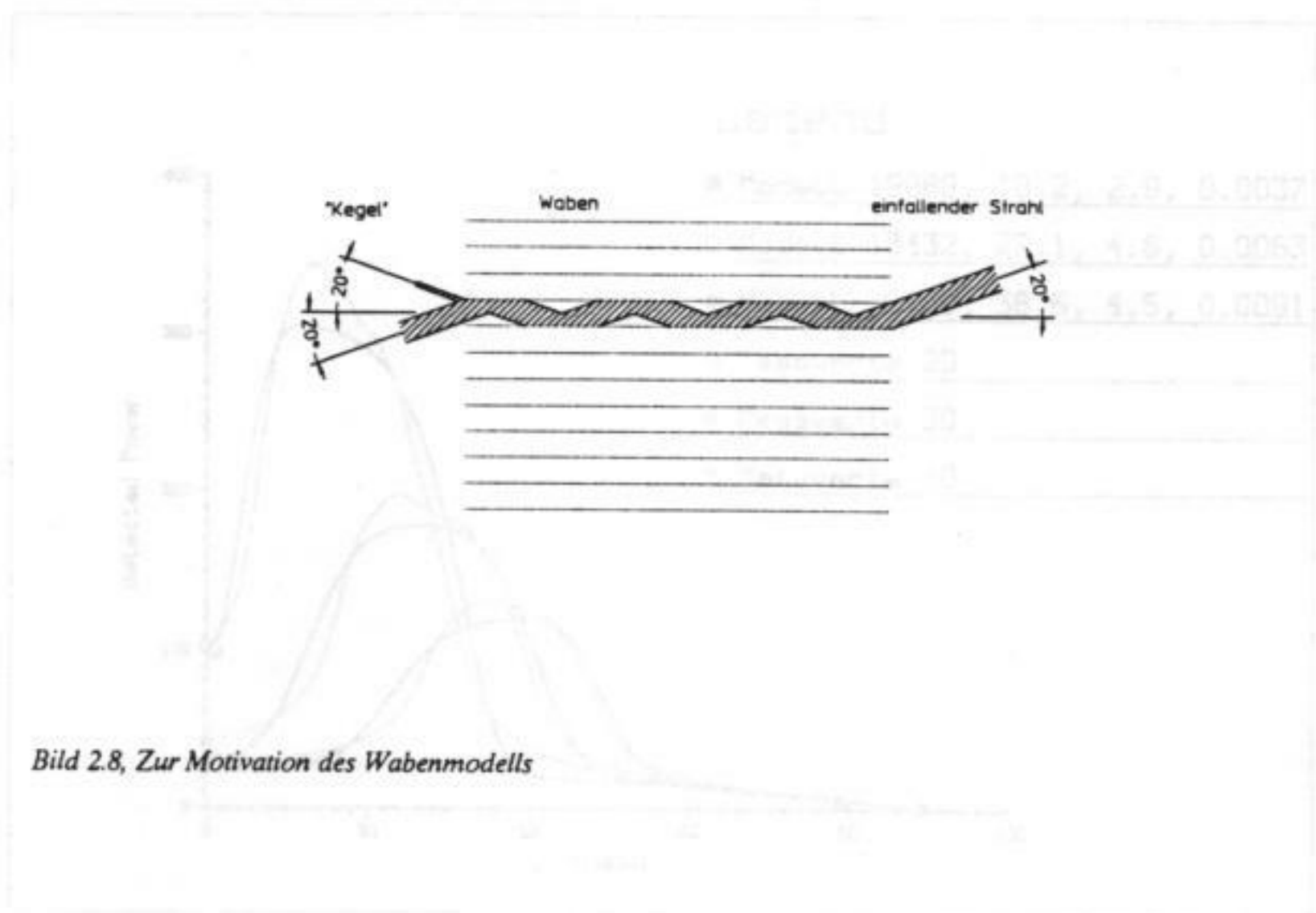


Bild 2.8, Zur Motivation des Wabenmodells

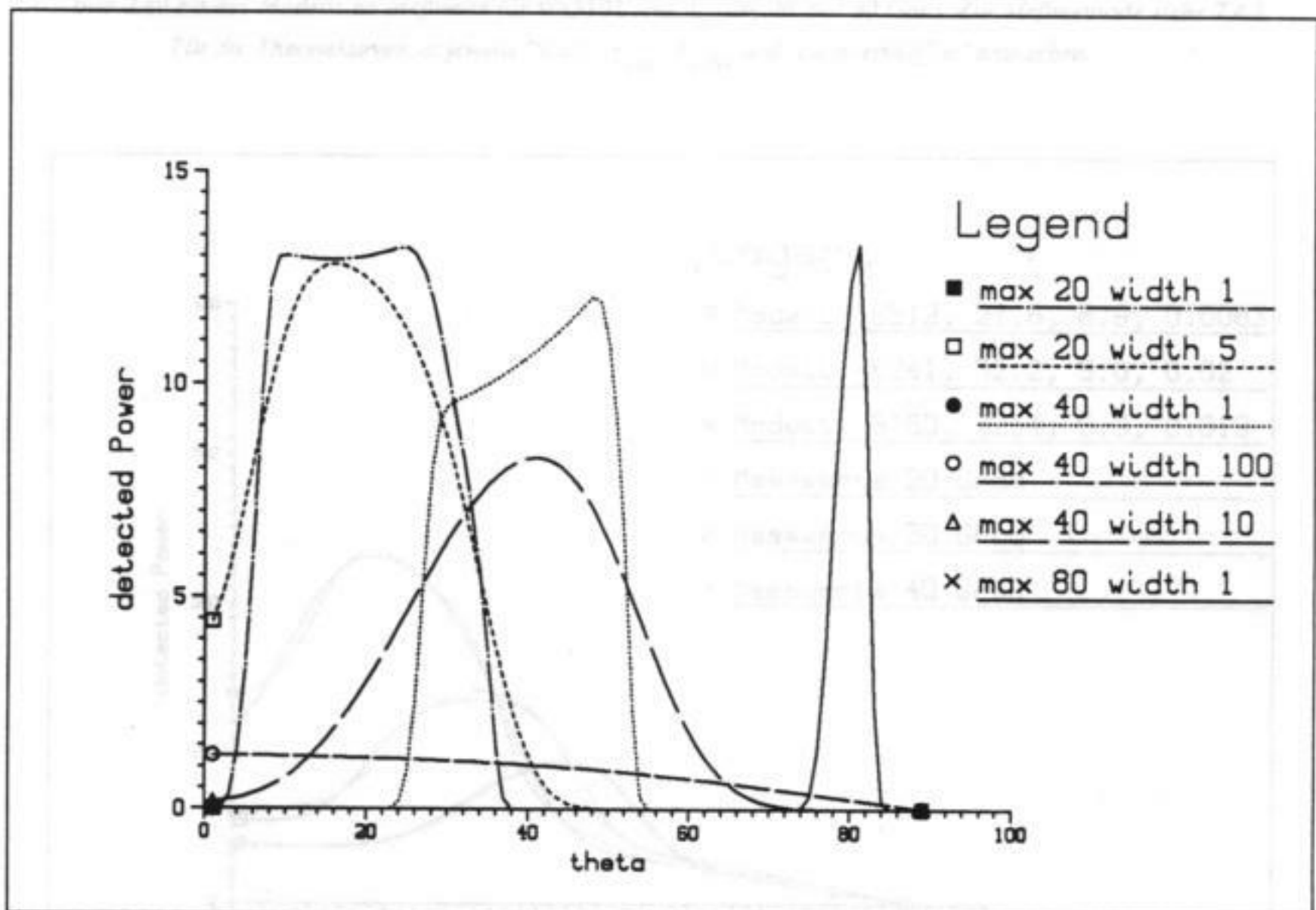


Bild 2.9, Theoretisch auf den Detektor treffende Leistung abhängig von  $\theta$  für verschiedene  $\theta_{max}$  und  $\theta_{width}$  bei "Lambert-Offset" = 0 und "Scale" = 1000.

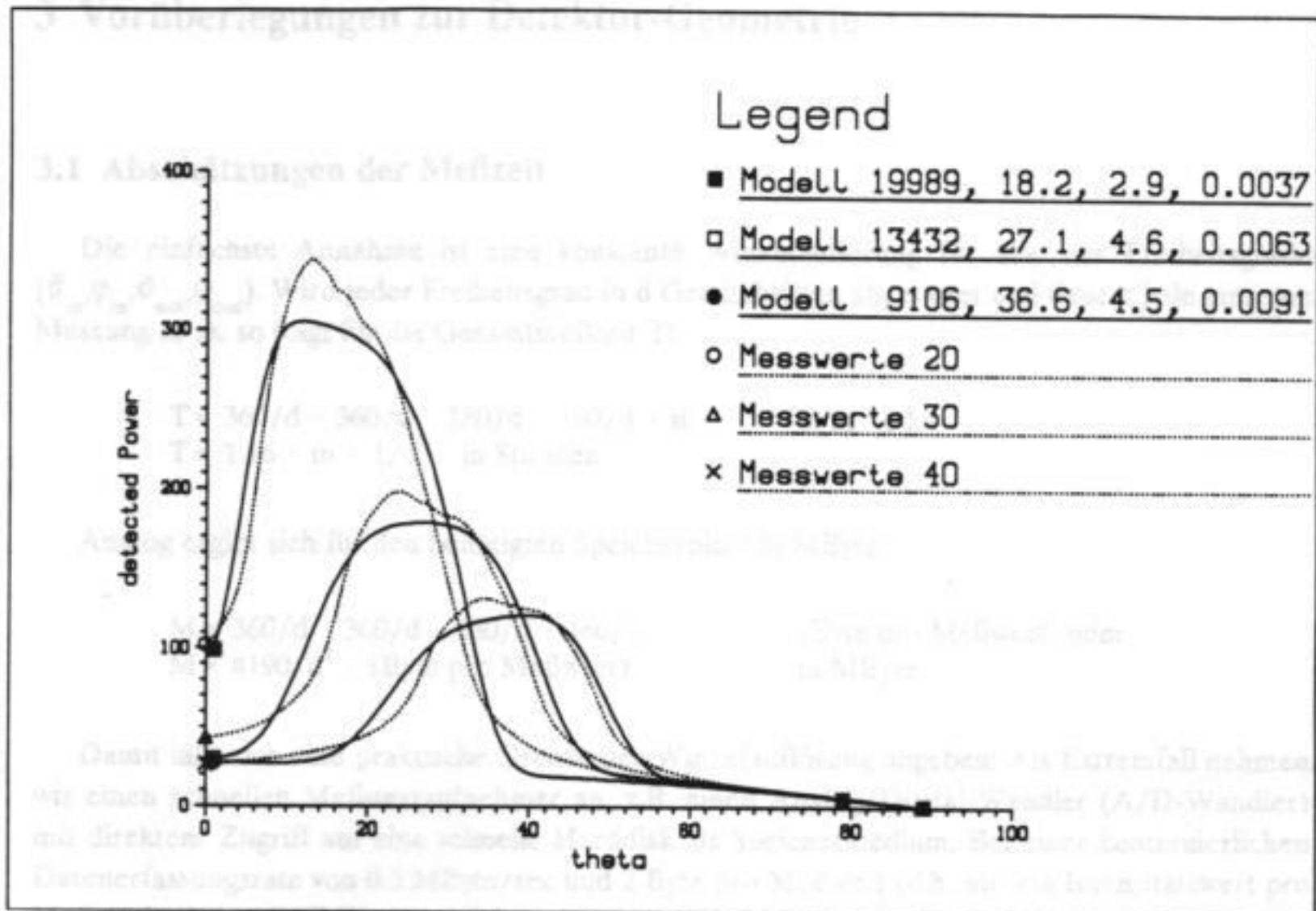


Bild 2.10 Fit des Modells an Meßwerte für wa3101 und  $\theta_{in}$ : 20, 30 und 40 Grad. Zur Meßmethode siehe 7.4.2. Für die Theoriekurven ist jeweils "Scale",  $\theta_{max}$ ,  $\theta_{width}$  und "Lambert-Offset" angegeben.

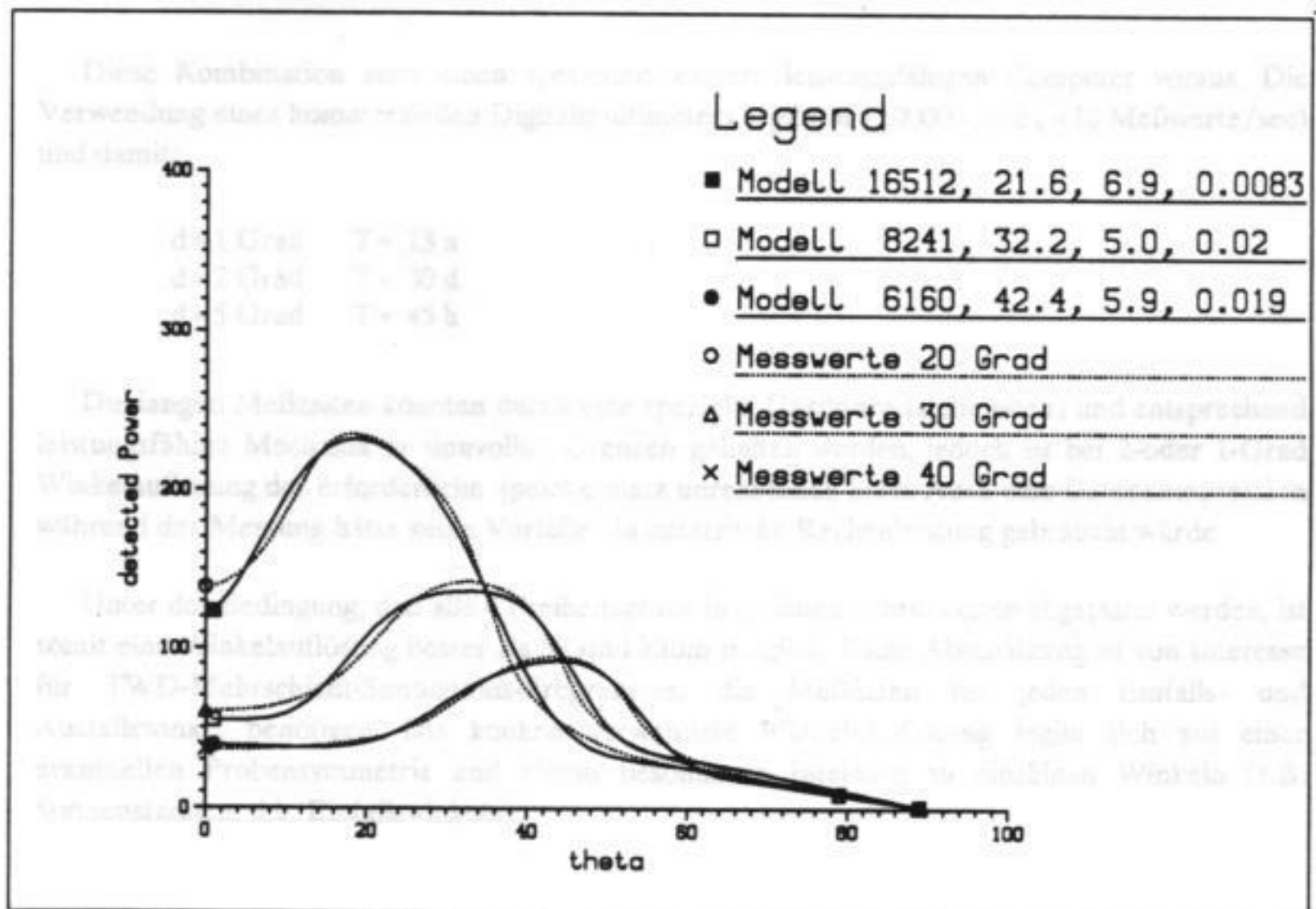


Bild 2.11 Fit des Modells an Meßwerte für wa0301 und  $\theta_{in}$ : 20, 30 und 40 Grad.

### 3 Vorüberlegungen zur Detektor-Geometrie

#### 3.1 Abschätzungen der Meßzeit

Die einfachste Annahme ist eine konstante Winkelauflösung für alle vier Freiheitsgrade ( $\vartheta_{in}, \varphi_{in}, \vartheta_{out}, \varphi_{out}$ ). Wird jeder Freiheitsgrad in  $d$  Gradschritten abgetastet und dauert jede einzelne Messung  $m$   $\mu$ s, so folgt für die Gesamtmeßzeit  $T$ :

$$T = 360/d \cdot 360/d \cdot 180/d \cdot 180/d \cdot m \quad \text{in } \mu\text{s} \quad \text{oder} \\ T = 1.16 \cdot m \cdot 1/d^4 \quad \text{in Stunden}$$

Analog ergibt sich für den benötigten Speicherplatz in MByte:

$$M = 360/d \cdot 360/d \cdot 180/d \cdot 180/d \cdot (\text{Byte pro Meßwert}) \quad \text{oder} \\ M = 4190/d^4 \cdot (\text{Byte pro Meßwert}) \quad \text{in MByte}$$

Damit läßt sich eine praktische Grenze der Winkelauflösung angeben: Als Extremfall nehmen wir einen schnellen Meßwertaufnehmer an, z.B. einen Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) mit direktem Zugriff auf eine schnelle Harddisk als Speichermedium. Bei einer kontinuierlichen Datenerfassungsrate von 0.5 MByte/sec und 2 Byte pro Meßwert (d.h. nur ein Intensitätswert pro Meßpunkt, keine CCD-Kamera) folgt  $m = 4$   $\mu$ sec und abhängig von  $d$ :

$d = 1$ Grad	$T = 4$ h	$M = 8$ GByte
$d = 2$ Grad	$T = 16$ min	$M = 524$ MByte
$d = 5$ Grad	$T = 1$ min	$M = 32$ MByte

Diese Kombination setzt einen speziellen, extrem leistungsfähigen Computer voraus. Die Verwendung eines kommerziellen Digitalmultimeters ergibt  $m = 100000$   $\mu$ sec (= 10 Meßwerte/sec) und damit:

$d = 1$ Grad	$T = 13$ a
$d = 2$ Grad	$T = 30$ d
$d = 5$ Grad	$T = 45$ h

Die langen Meßzeiten könnten durch eine spezielle Hardware (siehe oben) und entsprechend leistungsfähige Mechanik in sinnvollen Grenzen gehalten werden, jedoch ist bei 2- oder 1-Grad Winkelauflösung der erforderliche Speicherplatz unrealistisch hoch. Auch eine Datenkompression während der Messung hätte keine Vorteile, da zusätzliche Rechenleistung gebraucht würde.

Unter der Bedingung, daß alle 4 Freiheitsgrade in gleichen Schrittweiten abgetastet werden, ist somit eine Winkelauflösung besser als 5 Grad kaum möglich. Diese Abschätzung ist von Interesse für TWD-Mehrschicht-Simulations-Programme, die Meßdaten für jeden Einfallswinkel und Ausfallswinkel benötigen. Die konkret verwendete Winkel-Auflösung ergibt sich aus einer eventuellen Probensymmetrie und einem besonderen Interesse an einzelnen Winkeln (z.B. Sonnenständen, d.h. Einfallswinkeln).

### 3.2 Lichtquellen-Varianten

Die einfallende Strahlung soll parallel und homogen über einer Fläche von 400 x 400 mm sein. Um dies bei kompakter Bauform der Lichtquelle zu erreichen, bieten sich Parabolspiegel an.

Ideal sind Offaxis-Parabolspiegel, sie ermöglichen eine völlig gleichmäßige Ausleuchtung der Fläche ohne Abschattung durch die Lampenhalterung. Diesem Vorteil steht der hohe Preis eines 40x40cm Offaxis-Parabolspiegels als Sonderanfertigung entgegen, zumal nicht deutlich ist, daß die Qualität anderer Teile des Beleuchtungssystems, wie Punktförmigkeit und isotrope Abstrahlung der Lichtquelle, eine derartige Präzision beim Spiegel rechtfertigen würde.

Als geeignet für unsere Zwecke erwies sich ein konzentrischer Parabolspiegel mit 61cm Durchmesser, 20 cm Brennweite, Al/SiO<sub>2</sub> Beschichtung und für Beleuchtungszwecke ausreichender Oberflächen-Genauigkeit (Spiegel für Leuchttürme).

Eine 5cm Bohrung am Scheitelpunkt erlaubt 2 Anordnungen für die Lichtquelle: Entweder eine Lampe direkt im Brennpunkt des Parabolspiegels oder ein zweiter Hilfsspiegel, montiert in einer Anordnung wie bei astronomischen Fernrohren nach Cassegrain oder Gregory.

Erstere Bauweise ist einfacher zu justieren, letztere erlaubt beliebig große Lampengehäuse. Als Lichtquellen wurden erwogen: Xe-Blitzlampe, Xe-Kurzbogen- oder Halogen-Lampe. Ihrer schwierigeren Justierung wegen wurde eine Blitzlampe zunächst nicht verwendet. Sie böte Möglichkeiten, die in 7.1 "CCD-Kamera" kurz beschrieben werden.

Kriterien für die Auswahl zwischen Xe-Kurzbogenlampen und Halogen Lampen sind:

	Xe	Halogen Niedervolt
Größe des Brennflecks	1.1x2.8mm(XBO1000W/HS)	6mm
Winkelbereich der Abstrahlung	90 Grad (XBO1000W/HS)	120 Grad
Leistung	150W-1KW	60W
Lebensdauer	1000h	3000h
Intervallbetrieb	nein	ja
Montage im Brennpunkt	nein	ja

Eine Montage der Xe-Lampe direkt im Brennpunkt scheidet aus, da die Xe-Lampe nicht den ganzen Parabolspiegel ausleuchtet. Die Explosionsgefahr eines Xe-Hochdruck-Kolbens erfordert außerdem die Montage eines störenden Schutzgehäuses.

Abschätzungen der Detektor-Empfindlichkeit und daraus der benötigten Lichtstärke zeigten, daß eine 60W Niedervolt-Halogenlampe ausreicht. Die Möglichkeit, eine Halogenlampe ohne Wartezeit an- und auszuschalten und die Vermeidung von Problemen durch das Linienspektrum der Xe-Lampe, waren weitere Vorteile der Halogen-Lampe.

Durch die Größe und das Gewicht des Parabolspiegels ist die Lichtquelle ortsfest.

### 3.4 Mögliche Anordnungen der Scheitelpunkte zu einem Detektor

Um die Probe als Punkt der Detektor zu sehen, muß die Probe im Brennpunkt (ungefähr 4 mm) platziert werden, wobei die Winkelbereiche der Abstrahlung berücksichtigt werden müssen, daß alle Lichtstrahlen auf den Detektor treffen und nicht durch die Halogenlampe verloren gehen. Der Abstand der Lichtquelle zum Detektor muß zur Vermeidung von Problemen durch das Linienspektrum der Xe-Lampe, die Probe im Brennpunkt des Parabolspiegels platziert werden (Brennpunkt des Parabolspiegels).

Die Halogenlampe ist im Brennpunkt des Parabolspiegels zu platzieren, um die Probe im Brennpunkt des Detektors zu sehen.

### 3.3 Detektor-Varianten

Für die Wahl des Detektors ergibt sich aus Vortests mit einem typischen TWD-Material:  $\theta$  und  $\varphi$  des Ausfallswinkels sollten in nicht größeren Schritten als 5 Grad gemessen werden, um nicht Details der Transmission zu übersehen. Zwei Detektor-Möglichkeiten wurden in Erwägung gezogen:

Entweder eine Anordnung von vielen kleinen Detektoren an festen Orten im Raum, die eine extrem schnelle Messung ermöglicht oder eine "klassische" Anordnung mit einem beweglichen Detektor.

Ein Anordnung mit festen Detektoren läßt sich z.B. verwirklichen, indem kleine Solarzellen in festen Abständen mit der lichtempfindlichen Seite nach innen in eine Plexiglas Hohlkugel geklebt werden. Das einfallende Licht wird dabei zum Teil durch die Solarzellen abgeschattet. Alle Ausfallswinkel könnten ohne mechanische Bewegung praktisch gleichzeitig gemessen werden, so daß die untere Grenze der Meßzeit (siehe oben) in greifbare Nähe rückt. Mechanisch gekippt werden müßte die ganze Hohlkugel nur zur Änderung der Einfallswinkel.

Als Beispiel werden 5x5mm Solarzellen in einem 5x5 Grad Raster auf einer Hohlkugel mit 0.5m Radius angenommen: Bei einer Umsetzung dieser Idee in die Praxis stellen sowohl die Verkabelung von 2592 Solarzellen als auch das Multiplexen der analogen Signale Probleme dar. Als Ausblick ist denkbar, bereits jede Solarzelle mit einem A/D Wandler und einer Buslogik zu versehen, so daß die Mini-Detektoren untereinander nur durch Stromversorgung und seriellen, digitalen Bus verbunden sind. Ähnliche Ansätze existieren bereits beim Bau von Teilchen-Detektoren in der Hochenergiephysik [TRITSCH 90].

Eine andere Lösung besteht in der Verwendung von Lichtleitfasern statt einzelner Solarzellen, wobei alle Fasern auf einem CCD-Chip enden. Die Verwendung "sortierter" Lichtleiter-Büschel, die schon optisch mit einem CCD-Chip verbunden sind, ist zwar möglich, bringt aber ähnliche Kabelprobleme wie ein Solarzellen-Array. Außerdem müßten die Fasern mit einem optisch undurchlässigen Mantel umgeben werden, um Einkopplungen zu verhindern, andererseits aber dünn sein, um die Abschattung des einfallenden Lichtes zu minimieren.

Endgültig verworfen wurde eine Multi-Detektor-Anordnung durch die mögliche Verwendung einer CCD-Kamera. Eine Raster-Anordnung mit kleinen Kameras würde selbst bei kompakter Bauform der Kamera zuviel Schatten werfen.

### 3.4 Mögliche Anordnungen der Schwenkachsen mit einem Detektor

Sowohl die Probe als auch der Detektor sind um 2 Achsen schwenkbar (insgesamt 4 Freiheitsgrade), wobei die Winkelbereiche für jede Achse so ausgelegt werden müssen, daß alle Einfallswinkel und Ausfallswinkel einstellbar sind. Damit unmittelbar verbunden ist die notwendige Anzahl der Lichtquellen. Im folgenden wird zur Vereinfachung angenommen, daß der Detektor mit konstantem Abstand um die Probenmitte geführt wird (Bewegung auf einer Kugeloberfläche).

Bild 3.1 zeigt das "Labor"-Koordinatensystem, in dem die Winkel zum Einstellen der Motoren angegeben werden:



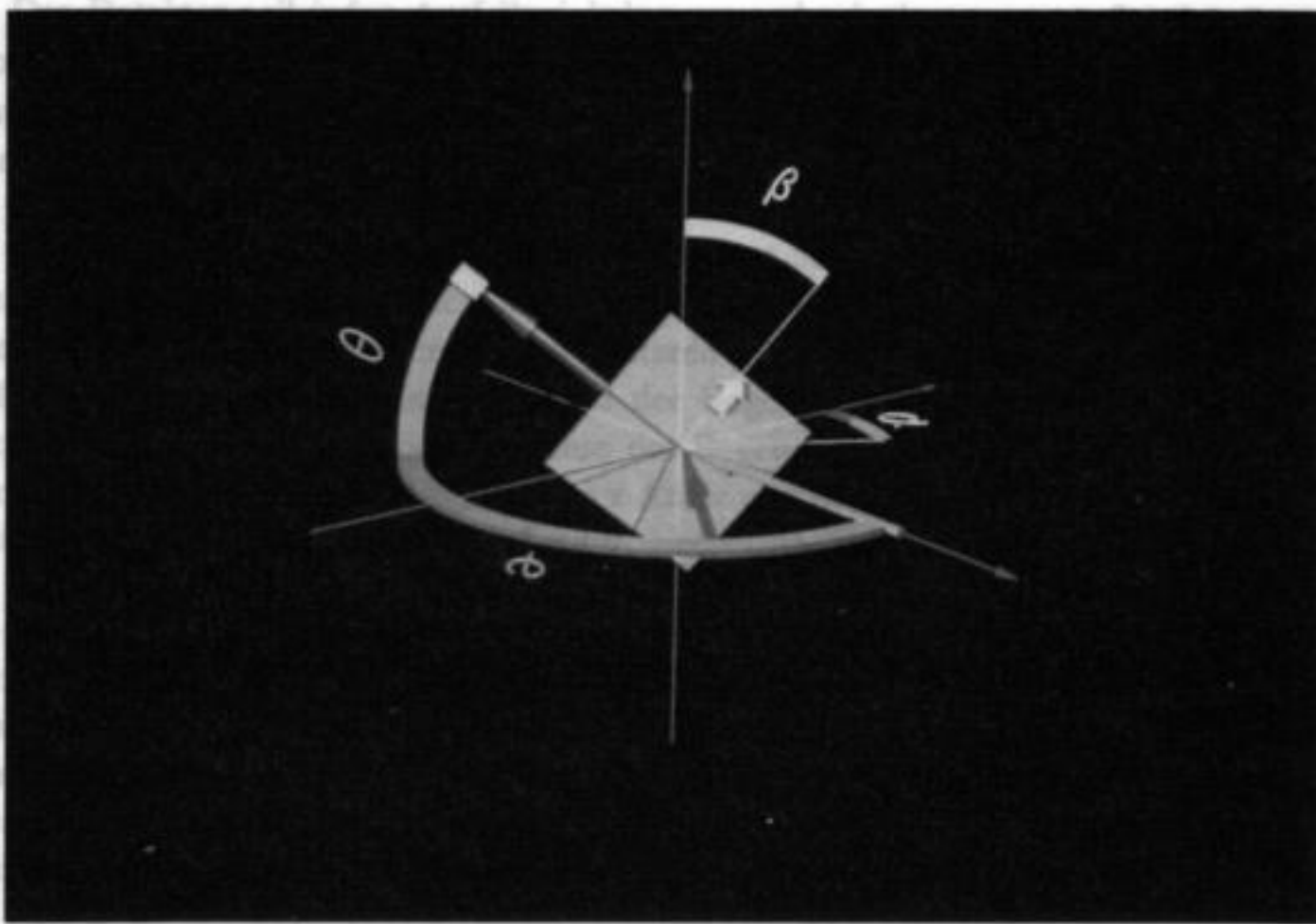


Bild 3.1, Die Anordnung von Probe (graue Fläche), Detektor (graue Box) und Lichtquelle (gelber Pfeil) im Laborsystem. Die  $x$ -Achse verläuft von links nach rechts, die  $y$ -Achse von vorn nach hinten und die  $z$ -Achse von unten nach oben. Auch enthalten sind die Definitionen für  $\alpha, \beta, \vartheta$  und  $\varphi_{Det}$ .

Für die Schwenkachsen der Probe und des Detektors gäbe es mehrere Möglichkeiten. Im folgenden wird beschrieben, warum sich gerade diese als günstig herausstellt:

In einem rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem, in dem die  $xy$ -Ebene horizontal liegt, ist eine Lichtquelle auf der positiven  $x$  Achse auf den Ursprung scheinend angebracht.

Auf Grund der Rotationsymmetrie der Beleuchtung um die  $x$ -Achse darf die äußere Drehachse der Probenhalterung nicht in  $x$  Richtung zeigen, es bleibt eine Drehachse in vertikaler  $z$ -Richtung oder in horizontaler  $y$ -Richtung. Damit lassen sich bereits alle Winkel  $\vartheta$  zwischen der Einfallsrichtung des Lichts und der Probenormalen einstellen. Der Schwenkwinkel ( $\alpha$ ) um diese Drehachse muß mindestens 180 Grad betragen. Die Achse wird im weiteren als parallel zur  $z$ -Achse angenommen, weil sich dies später als technisch einfacher herausstellen wird.

Auf dieser steht die zweite, innere Drehachse senkrecht. Naheliegender ist eine kardanische Aufhängung wie in einem Kreiselkompaß, nur hätten die notwendigen Bügel zwischen den Lagern der Achsen eine Abschattung der Probe zur Folge. Eine Anordnung mit drei Freiheitsgraden ist in [DAVIS 86] beschrieben.

Um Proben zu messen, die nicht rotationssymmetrisch um ihre Normale sind, wird die Probe daher drehbar um ihre Normale in der Probenhalterung gelagert. Der Drehwinkel zwischen der "up"-Richtung der Probe und dem Lot wird im folgenden mit  $\beta$  bezeichnet.

Alle Einfallsrichtungen werden erreicht mit  $\alpha=[0..180]$ ,  $\beta=[0..360]$  oder  $\alpha=[0..360]$ ,  $\beta=[0..180]$ . Im weiteren wird jedoch  $\alpha=[0..360]$  und  $\beta=[0..360]$  vorausgesetzt. Dadurch wird bereits mit einer Lichtquelle zweimal die gleiche Einfallsbedingung bei unterschiedlichem  $\alpha, \beta$  erreicht. Dies beeinflusst das Design des Detektors:

Der Detektor soll jeden Ausfallswinkel messen, das bedeutet, er muß jeden Punkt auf der Oberfläche einer Kugel, deren Zentrum die Probenmitte ist, erreichen können, den sogenannten Scan-Bereich. Dadurch, daß jeder Einfallswinkel zweimal eingestellt werden kann, halbiert sich der notwendige Scan-Bereich auf eine Halbkugel. Für ihre Lage gibt es 3 Möglichkeiten:

#### 4.1 Detektor-Übersicht

Der Fall Symmetrie-Achse der Halbkugel = x-Achse fällt weg, da es keine Einstellung des Detektors für Transmissions-Messungen gäbe. Verbleiben die Fälle: der Detektor bewegt sich auf der "oberen", "unteren", "vorderen" oder "hinteren" Halbkugel. Der Detektor wird dabei beweglich auf einem Halbkreisbogen befestigt, und der Bogen an beiden Enden drehbar gelagert. Aus technischen Gründen wird die Drehachse des Bogens senkrecht stehen, der Detektor scant die vordere Halbkugel. Der Winkel zwischen x-Achse und Bogen heißt  $\varphi_{\text{Det}}$ , der Winkel zwischen der Horizontalen und dem Detektor wird mit  $\vartheta_{\text{Det}}$  bezeichnet.

Damit ist die Standard-Anordnung bei Verwendung einer Lichtquelle gegeben: Probenhalterung und Detektorbogen schwenken um eine vertikale Achse, die Probe ist zusätzlich um ihre Normale drehbar und der Detektor wird durch die Bewegung auf dem Bogen um eine horizontale Achse gekippt. Die Winkelbereiche sind für die Probe jeweils 360 Grad, und 180 Grad für  $\varphi_{\text{Det}}$  und  $\vartheta_{\text{Det}}$ . In dieser Konfiguration ist jede Einfalls-Ausfallswinkel-Kombination genau einmal einstellbar (Konfiguration des LBL "large scanning radiometer").

Mehrere Lichtquellen können auf verschiedene Weise angeordnet werden und ergeben eine Reduzierung der Winkelbereiche, entweder für  $\alpha, \beta$  oder für den Scan-Bereich des Detektors. Es ist aus technischen Gründen angestrebt, den Scan-Bereich so klein wie möglich zu machen.

Bei Verwendung zweier Lampen wird die zweite Lichtquelle auf der negativen x-Achse plaziert. Es gibt somit bei  $\alpha = [0..360]$   $\beta = [0..360]$  vier Möglichkeiten, denselben Einfallswinkel einzustellen. Analog reduziert sich der Scan-Bereich auf eine Viertel-Kugel. Für einen um eine senkrechte Achse drehbaren Detektorbogen heißt dies:

$$\text{entweder } \varphi_{\text{Det}} = [0..90], \vartheta_{\text{Det}} = [0..180] \text{ oder } \varphi_{\text{Det}} = [0..180], \vartheta_{\text{Det}} = [0..90].$$

Letzteres bedeutet das Scannen der oberen, vorderen Viertel-Kugel. Diese Geometrie wurde in der vorliegenden Arbeit verwirklicht. Der Scan-Bereich ( $\pi$  sr Raumwinkel) wird weiterhin mit Viertel-Kugel bezeichnet, auch wenn der Detektor sich auf einem Kegelmantel bewegt (siehe 6.5). Jede Einfalls- / Ausfallswinkelkombination läßt sich angeben als:  $\vartheta_{\text{in}}, \varphi_{\text{in}}, \vartheta_{\text{out}}, \varphi_{\text{out}}$  im Koordinatensystem der Probe oder als  $\alpha, \beta, \vartheta_{\text{det}}, \varphi_{\text{det}}$ , n im "Labor"-Koordinatensystem (n = 1,2 gibt an, welche Lampe "an" ist).

Zum Abschluß sei die Erweiterung auf 4 und mehr Lichtquellen erwähnt: Zwei weitere Lichtquellen können auf der positiven und negativen y Achse plaziert werden, dadurch verringert sich der Scan-Bereich auf eine Achtel-Kugel. Bei Verwendung von 72 Lichtquellen, die auf einem Kreis um den Nullpunkt in 5 Grad Abständen befestigt werden, ist eine Bewegung des Bogens nicht nötig, wenn der Ausfallswinkel in 5 Grad Schritten gemessen werden soll. Durch die Verwendung von Blitzlampen in Verbindung mit einem geeigneten Detektor ist dadurch eine Erhöhung der Meßgeschwindigkeit möglich, allerdings bedingt die Größe der Beleuchtungsspiegel eine große Aufstellungsfläche für die Meßapparatur.

## 4 Realisation mit einem Detektor und zwei Lampen

### 4.1 Design-Übersicht

Die Apparatur besteht aus 3 Teilen, die weitgehend unabhängig von einander entworfen und gebaut werden konnten: Probenhalterung, Parabolspiegel-Lampen-Halterungen und der Detektorschwenkarm.

Bild 4.1 zeigt den schematischen Gesamtplan der Apparatur: Die Motoren sind mit M0 bis M4 bezeichnet:

- M0 vertikale Achse Probenhalter
- M1 horizontale Achse Probenhalter, Drehung um die Probennormale
- M2 vertikale Achse Detektor Schwenkarm
- M3 Aufzugsmotor für Detektorschlitten
- M4 Kippmotor für Detektor

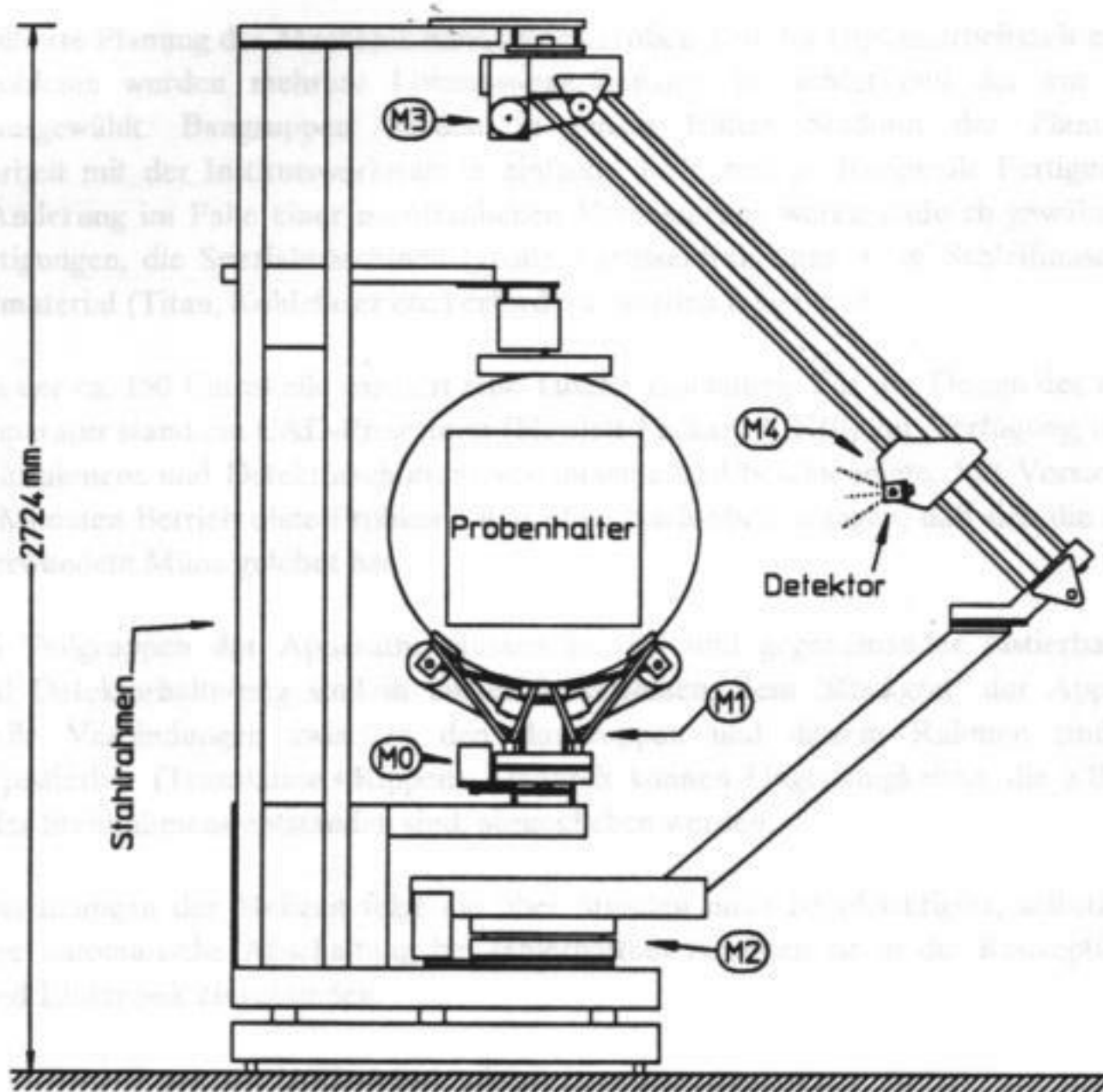


Bild 4.1, Gesamtplan, Motorbezeichnung M0 bis M4 im Text

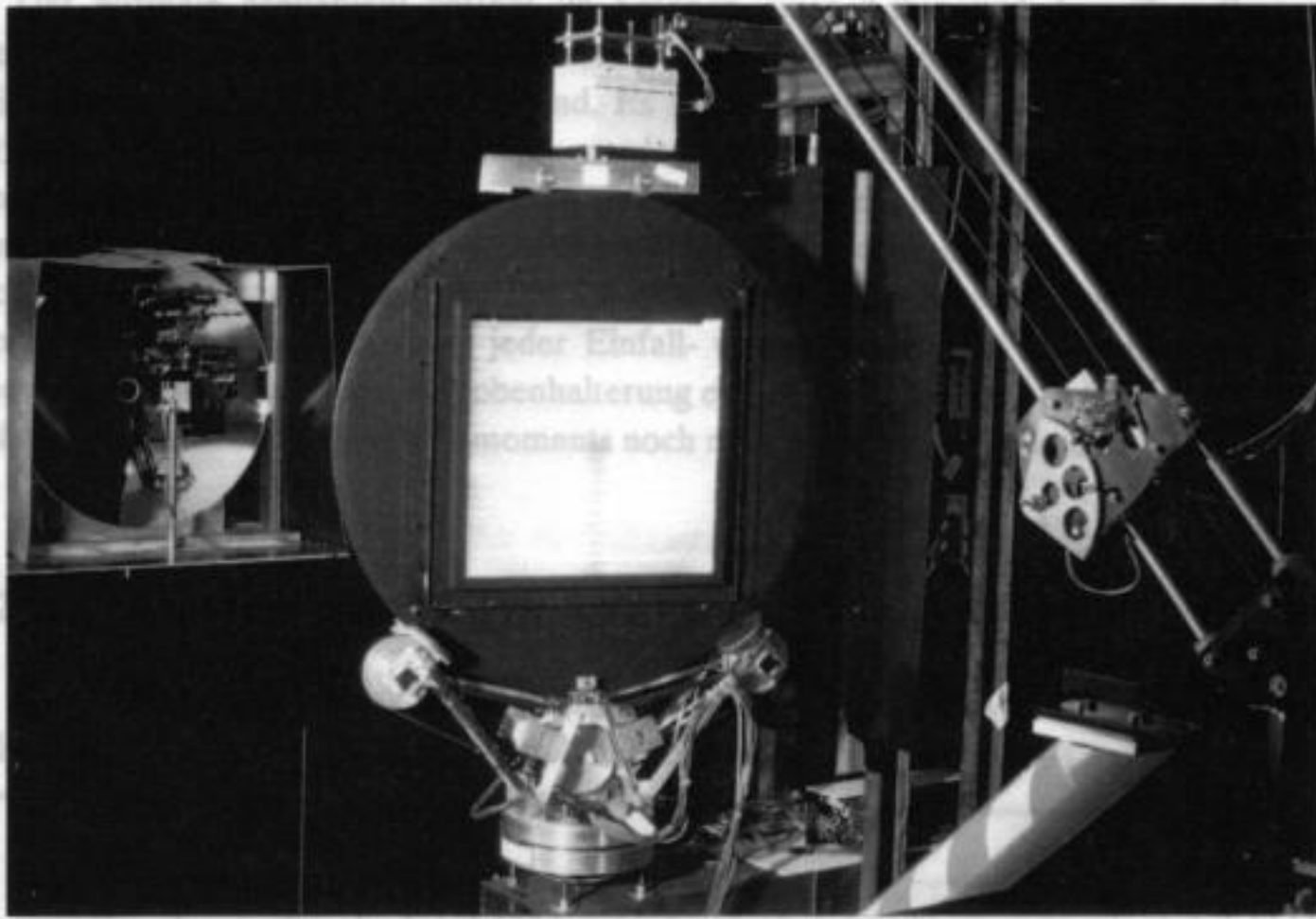


Bild 4.2, Foto des Gesamtaufbaus: rechts der Detektor, in der Mitte die Probenhalterung und links ein Parabolspiegel mit angeschalteter Lampe

Die detaillierte Planung der Mechanik nahm einen großen Teil der Diplomarbeitszeit ein: Für einzelne Probleme wurden mehrere Lösungswege genauer betrachtet und der am besten geeignete ausgewählt. Baugruppen wurden in einem frühen Stadium der Planung in Zusammenarbeit mit der Institutswerkstatt in einfache Teile zerlegt. Rationelle Fertigung und einfachere Änderung im Falle einer nachträglichen Verbesserung waren dadurch gewährleistet. Sonderanfertigungen, die Spezialmaschinen (große Karusseldrehbänke, CNC-Schleifmaschinen) oder Spezialmaterial (Titan, Kohlefaser etc.) erfordern, wurden umgangen.

Für jedes der ca. 150 Einzelteile existiert eine Tusche-Zeichnung. Für das Design des zweiten Teils der Apparatur stand ein CAD-Programm (Hewlett-Packard ME10) zur Verfügung, das den Bau des Stahlrahmens und Detektorschlittens vereinfachte und beschleunigte. Mit Vorsicht läßt sich nach 2 Monaten Betrieb ohne Probleme und ohne Nacharbeiten sagen, daß sich die auf die Mechanik verwendete Mühe gelohnt hat.

Die drei Teilgruppen der Apparatur müssen in sich und gegeneinander justierbar sein. Proben- und Detektorhalterung sind in einem Stahlrahmen, dem "Rückgrat" der Apparatur, montiert. Alle Verbindungen zwischen den Baugruppen und diesem Rahmen sind in 6 Richtungen justierbar (Translation+Kippen). Dadurch können Ungenauigkeiten, die z.B. beim Schweißen des Stahlrahmens entstanden sind, ausgeglichen werden.

Aus Abschätzungen der Meßzeit folgt ein über Stunden nicht beaufsichtigtes, selbständiges Messen. Eine automatische Abschaltung bei fehlerhaftem Arbeiten ist in die Konzeption der Mechanik und Elektronik eingebunden.

Die kritische Umdrehungsgeschwindigkeit steigt mit höherer Versorgungsspannung und liegt für 5-Phasen-Motoren ungefähr bei 5 Umdrehungen/sec ( $U_{\text{Motorspannung}} = 40 \text{ Volt}$ ).

Für eine genaue Bewegung der Achsen sollte die Untersetzung zwischen Motorwelle und anstreibender Achse möglichst groß sein. Da die Umdrehungsgeschwindigkeit der Motorwelle begrenzt ist, ist bei vorgegebener Zustellgeschwindigkeit der angetriebenen Achse auch die Untersetzung zwischen Motorwelle und angetriebener Achse begrenzt.

Der normale Meßablauf besteht im Scannen einer Achse und dem Zustellen einer oder mehrerer anderer Achsen nach jedem Scan. Dieser Prozeß wiederholt sich, bis alle zu messenden Winkel-Kombinationen aufgetreten sind. Es sollte in Zukunft aber auch ein zweites Verfahren möglich sein: zwei oder mehr Achsen werden während einer Messung gleichzeitig bewegt, um einzelne Winkelbereiche mit höherer Auflösung zu messen. Ein Antrieb mit langsamer, nur für eine einfache Scan-Bewegung ausreichender Winkelgeschwindigkeit, ließe diese Erweiterung nicht zu. Daher wurden die Antriebe auf eine schnelle Zustellbewegung der Achsen ausgelegt: innerhalb von 8 Sekunden sollte jeder Einfall- und Ausfallswinkel angefahren werden können. Diese Richtlinie wurde für die Probenhalterung erfüllt, lediglich beim Detektorschwenkarm ist sie auf Grund des höheren Trägheitsmoments noch nicht erreicht (15 Sekunden für 180 Grad).

## 4.2 Schrittmotor- und Getriebe-Auslegung

Das Drehmoment eines Schrittmotors ist bis zur kritischen Umdrehungsgeschwindigkeit nahezu konstant und fällt dann steil ab (Bild 4.3):

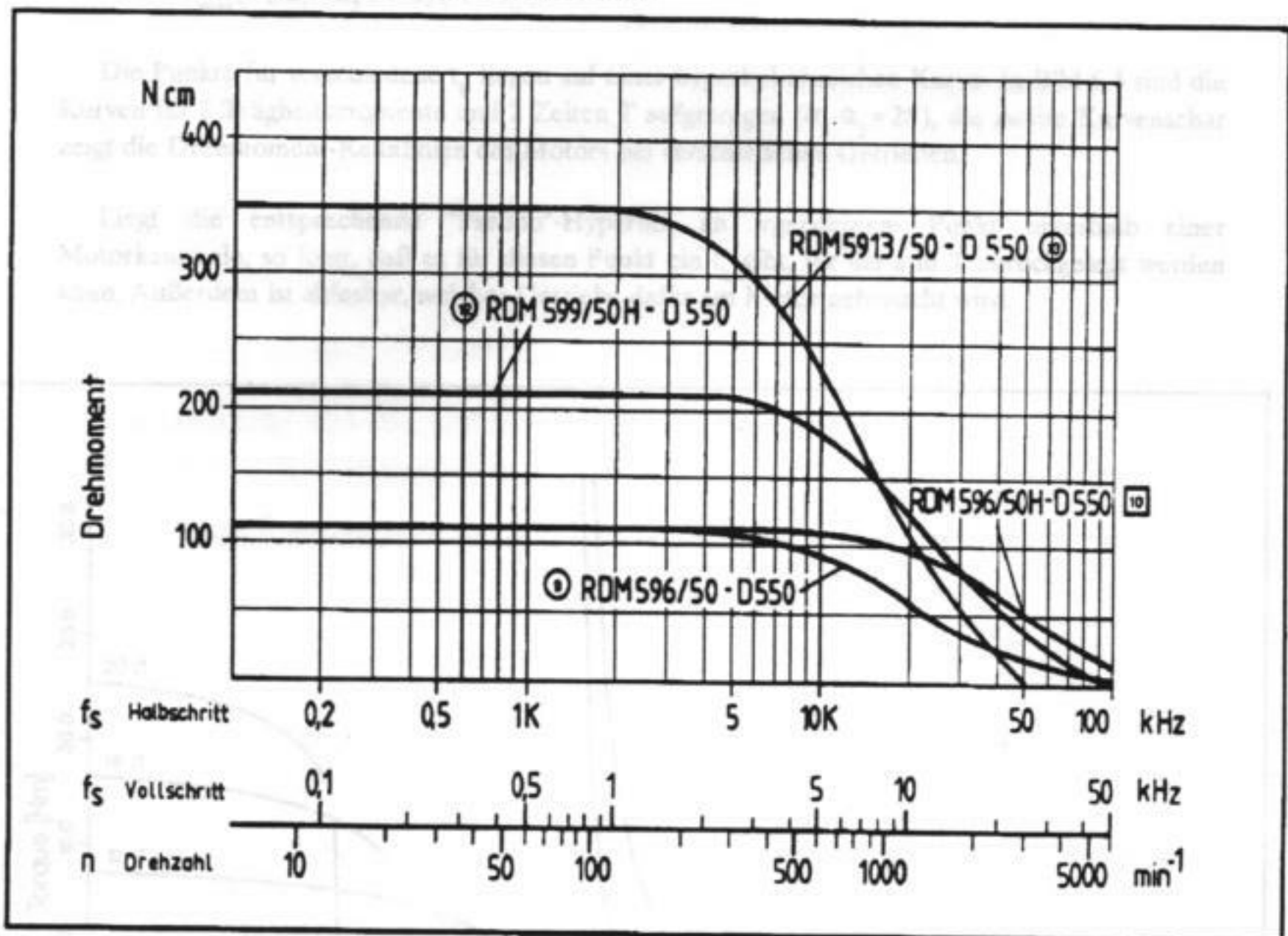


Bild 4.3, Drehmoment versus Umdrehungsgeschwindigkeit der Motorwelle und Frequenz der Schritimpulse. Verwendet wurde der Motortyp RDM599 (Kurve 12). Quelle: [BERGER]

Die kritischen Umdrehungsgeschwindigkeit steigt mit höherer Versorgungsspannung und liegt für 5-Phasen-Motoren ungefähr bei 5 Umdrehungen/sec ( $U_{\text{Motorspannung}} = 40 \text{ Volt}$ ).

Für eine genaue Bewegung der Achsen sollte die Untersetzung zwischen Motorwelle und anzutreibender Achse möglichst groß sein. Da die Umdrehungsgeschwindigkeit der Motorwelle begrenzt ist, ist bei vorgegebener Zustellgeschwindigkeit der angetriebenen Achse auch die Untersetzung zwischen Motorwelle und angetriebener Achse begrenzt.

Die Motoren werden mit konstanter Beschleunigung auf die jeweilige maximale Winkelgeschwindigkeit hochgefahren und bremsen rechtzeitig wieder ab, um die Sollposition zu erreichen, ohne das maximale Drehmoment zu überschreiten. Dabei sind verschiedene Geschwindigkeits-Profile "fahrbar", die alle innerhalb eines Zeitintervalls  $T$  von Winkelposition  $\alpha_1$  nach  $\alpha_2$  führen: Entweder mit starker Anfahr- und Bremsbeschleunigung und niedriger maximaler Geschwindigkeit, oder mit sanfterer Beschleunigung, die länger dauert und damit eine höhere maximale Geschwindigkeit bedingt. Der erste Fall ergibt ein Getriebe geringer Untersetzung, der zweite eins mit höherer. Der Parameter für diese verschiedenen Profile ist die Beschleunigungsdauer  $t_b$ . Aus einer dafür entwickelten Grafik ist ablesbar, ob für gegebenes  $T, s$  eine Kombination aus Untersetzung und  $t_b$  existiert.

Aus dem Trägheitsmoment  $\theta$  der zu drehenden Probe, dem zurückzulegenden Weg  $s$  und der Zeit  $T$  ergibt sich für jedes  $t_b$  eine Beschleunigung  $\tau_{\max}$  und eine maximal Geschwindigkeit  $\omega_{\max}$ :

$$\tau_{\max} = \theta (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot 1 / (t_b \cdot (T - t_b))$$

$$\omega_{\max} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot 1 / (T - t_b)$$

Die Punkte für verschiedene  $t_b$  liegen auf einer hyperbel-ähnlichen Kurve. In Bild 6.4 sind die Kurven für 2 Trägheitsmomente und 2 Zeiten  $T$  aufgetragen ( $\alpha_2 - \alpha_1 = 2\pi$ ), die zweite Kurvenschar zeigt die Drehmoment-Kennlinien des Motors bei verschiedenen Getrieben.

Liegt die entsprechende "Pseudo"-Hyperbel an irgendeinem Punkt unterhalb einer Motorkennlinie, so folgt, daß es für diesen Punkt ein  $t_b$  gibt, für die  $s$  in  $T$  zurückgelegt werden kann. Außerdem ist ablesbar, welches Getriebe dafür am Motor gebraucht wird.

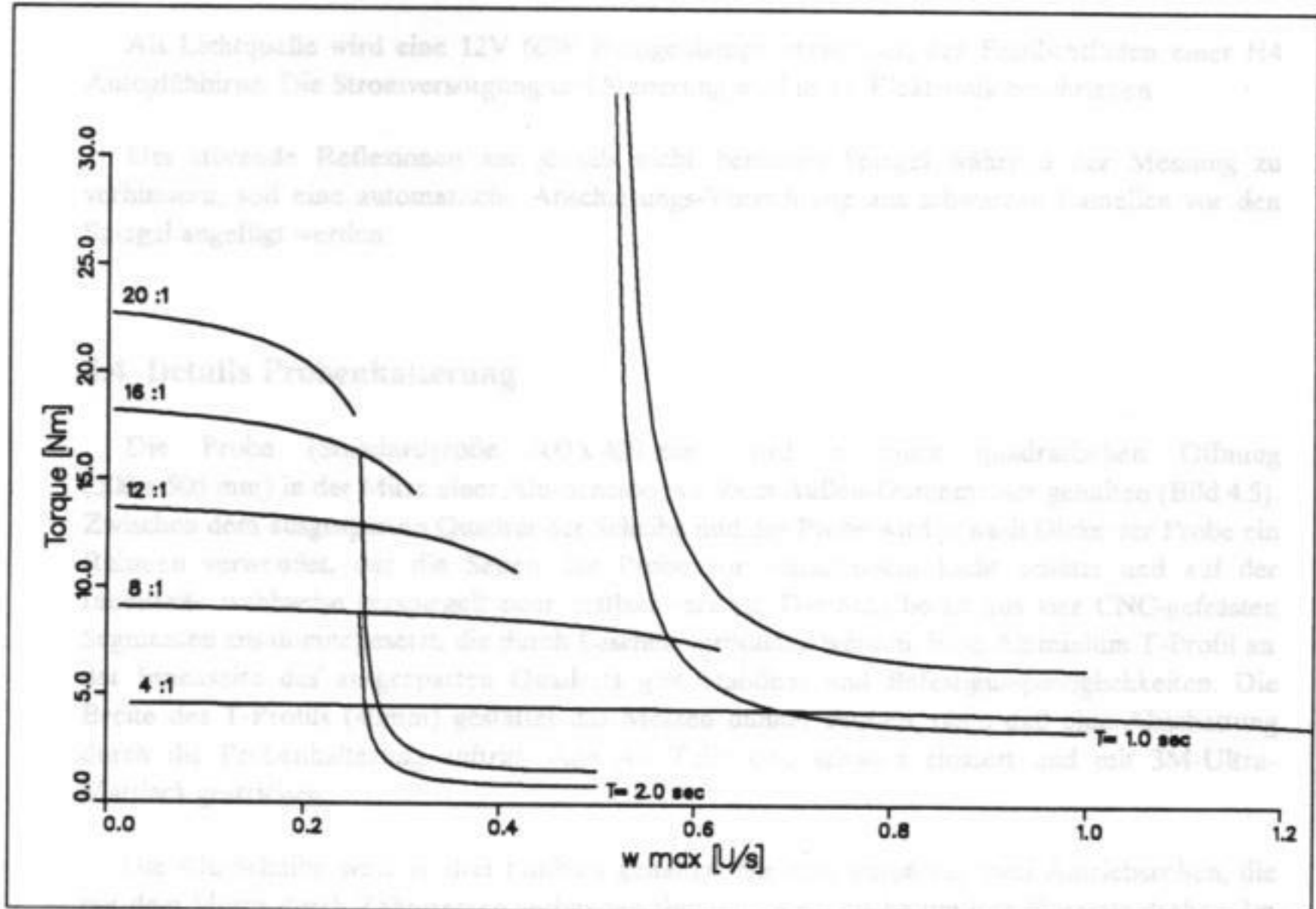


Bild 4.4, Diagramm zur Bestimmung der möglichen Getriebe-Untersetzungen. Aufgetragen ist  $\tau_{\max}$  versus  $\omega_{\max}$  und  $\tau_{\text{Motor}}$  versus  $\omega_{\text{Motor}}$  bei verschiedenen Untersetzungen (links im Bild)

Aus Bild 4.4 ist abzulesen: Für  $T = 2$  sec sind alle Untersetzungen zwischen 16:1 und 4:1 verwendbar. Die beiden Kurven für  $T = 2$  sec unterscheiden sich in  $\theta$ . Für  $T = 1$  gibt es für  $\theta_2$  keine Antriebsmöglichkeit,  $\theta_1$  läßt sich nur mit einer 4:1 oder 8:1 Untersetzung in der vorgegeben Zeit bewegen. Diese Graphik war ein nützlicher Leitfaden für den Entwurf der Mechanik.

Zur Verwirklichung der Ergebnisse: Mit handelsüblichen Zahnrädern und Zahnriemen erreicht man maximal eine Untersetzung von 1:10, darüber können Schneckenräder oder Zahnrad-Sonderanfertigungen verwendet werden. Schneckengetriebe wurden wegen der erforderlichen sehr exakten Justierung und der im Betrieb nötigen kontinuierlichen Schmierung nicht eingesetzt. Alle in dieser Arbeit beschriebenen Untersetzungen wurden mit Zahnriemen verwirklicht.

### 4.3 Details Parabolspiegel

Der Bau der Parabolspiegel-Halterungen ist unproblematisch: sie sind rein statisch, haben keine Gewichtsbeschränkungen, alle Toleranzen liegen im 1/10 mm Bereich, und nur die Lampenhalterung muß auf minimalen Schattenwurf optimiert sein. Vorerst besteht diese aus einer 18mm massiven Messingstange, die eine in den Ergebnissen nachweisbare Abschattung verursacht. Eine Aufhängung der Lampe an gespannten Stahldrähten wird dieses Problem wahrscheinlich lösen. Der untere Teil des Spiegels ruht in einer CNC-gefrästen und dem Profil des Spiegelrandes angepassten Nut, die mit 5mm starkem Kork ausgelegt ist. Um Temperaturschwankungen auszugleichen und den Spiegel-Einbau zu vereinfachen, liegt Kork auch zwischen den seitlichen Halterungen und dem Glasrand des Spiegels. Spiegel- und Lampenhalterung sind auf einer 1x1m großen Aluminium-Tischplatte aufgebaut, die von einer geschweißten Stahlrohr-Unterkonstruktion getragen wird.

Als Lichtquelle wird eine 12V 60W Halogenlampe verwendet, der Fernlichtfaden einer H4 Autoglühbirne. Die Stromversorgung und Steuerung wird in 4.6 Elektronik beschrieben.

Um störende Reflexionen am jeweils nicht benutzen Spiegel während der Messung zu verhindern, soll eine automatische Abschattungs-Vorrichtung aus schwarzen Lamellen vor den Spiegel angefügt werden.

### 4.4 Details Probenhalterung

Die Probe (Standardgröße 400 x 400 mm) wird in einer quadratischen Öffnung (500 x 500 mm) in der Mitte einer Alu-Scheibe mit 80cm Außen-Durchmesser gehalten (Bild 4.5). Zwischen dem ausgesparten Quadrat der Scheibe und der Probe wird je nach Dicke der Probe ein Rahmen verwendet, der die Seiten der Probe vor einfallendem Licht schützt und auf der Innenseite wahlweise verspiegelt oder mattschwarz ist. Die Scheibe ist aus vier CNC-gefrästen Segmenten zusammengesetzt, die durch Laschen verbunden werden. Eine Aluminium T-Profil an der Innenseite des ausgesparten Quadrats gibt Stabilität und Befestigungsmöglichkeiten. Die Breite des T-Profils (40mm) gestattet das Messen dünner Proben, ohne daß eine Abschattung durch die Probenhalterung auftritt. Alle Alu-Teile sind schwarz eloxiert und mit 3M-Ultra-Mattlack gestrichen.

Die Alu-Scheibe wird an drei Punkten gehalten: Sie ruht unten auf zwei Antriebsrollen, die mit dem Motor durch Zahnriemen verbunden sind und die Scheibe um ihre Normale drehen. Im oberen Punkt halten Führungsrollen die Scheibe lotrecht. Ein Abgleiten von den unteren Antriebsrollen wird durch vier Führungsrollen verhindert.

Beim Tragwerk, das die Antriebsrollen verbindet und das Gewicht von Probe und Scheibe sowie die Zugspannung im Zahnriemen aufnimmt, ist durch Verwendung verstreifter Aluprofile (I- und L-Querschnitt) eine leichte, verwindungssteife und belastbare Bauweise erreicht.

Das Tragwerk steht auf einem Lager mit lotrechter Achse, das die Probe um die Vertikale schwenkt. Dieses Lager besteht aus zwei Alu-"Torten"-Scheiben mit zwei Kegelrollenlagern.

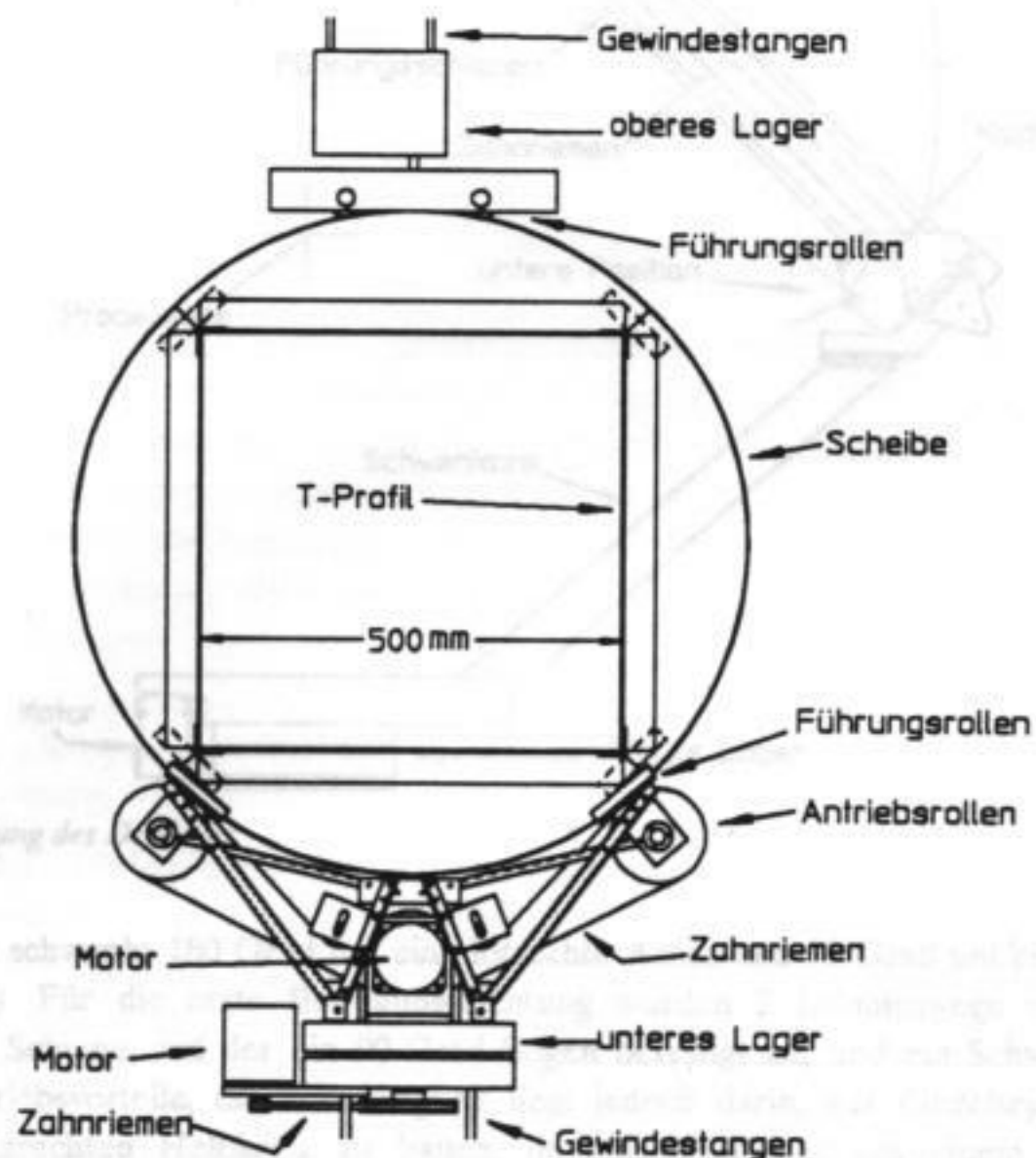


Bild 4.5, Der Probenhalter

Die elektrischen Zuleitungen zum Motor, der die Scheibe um ihre Normale dreht, beschränken die Drehung der Probe um die Vertikale. Daher muß der Motor zum Antrieb des Vertikal-Schwenks im Falle einer Fehlansteuerung durch den Computer abschalten, bevor die Kabel überbeansprucht werden: Eine Nockenwelle unterbricht die Stromzufuhr bei Überschreiten des zulässigen Bereiches. Es ist möglich, volle 360 Grad zu schwenken, aber nicht mehr als ca. 5 Grad darüber hinaus. Damit sind alle Einfallswinkel ohne Einschränkung einstellbar.



### 4.5 Details Detektorhalterung

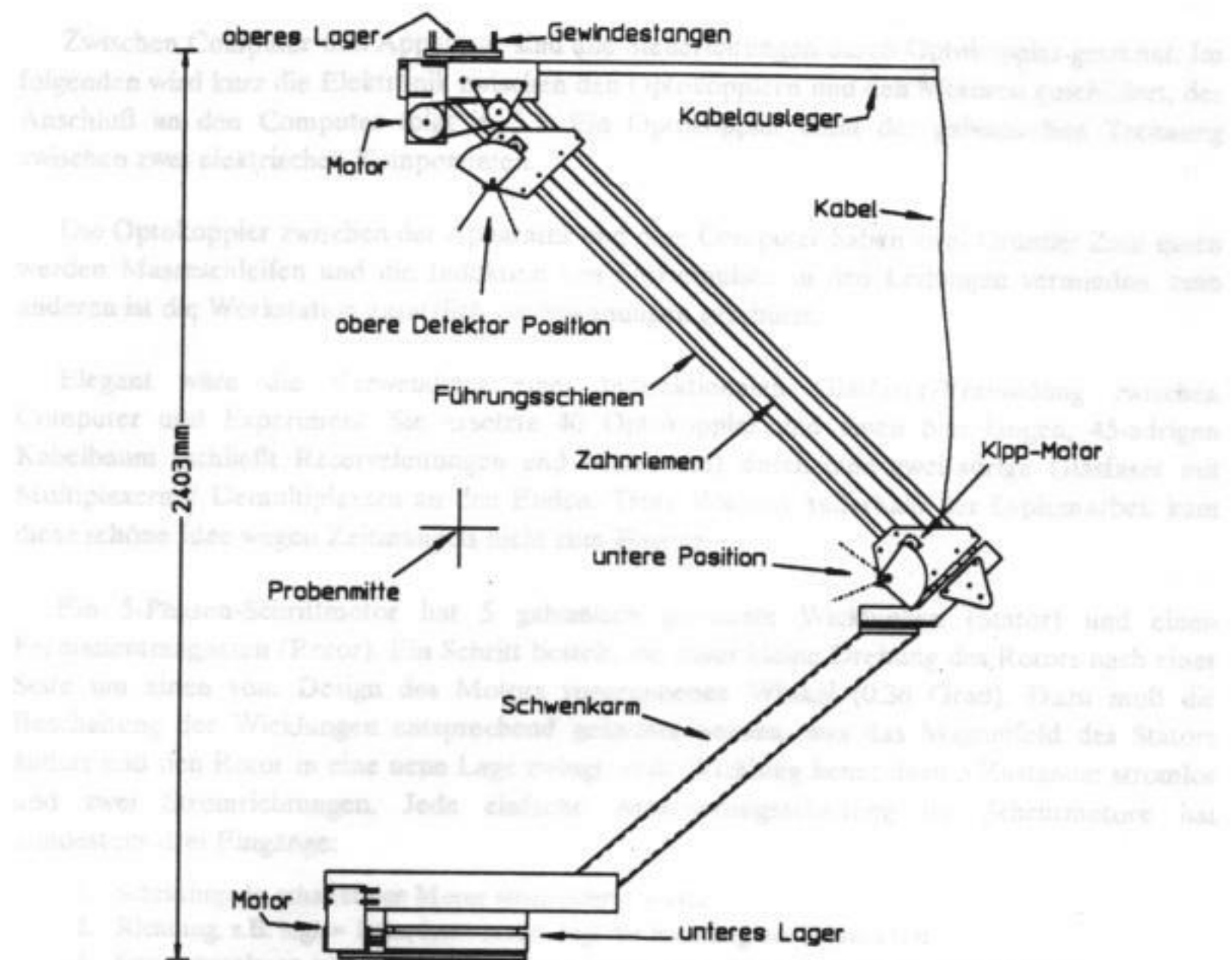


Bild 4.6, Die Halterung des Detektors

Der Detektor schwenkt 180 Grad um eine lotrechte Achse und 90 Grad um eine horizontale Achse (Bild 4.6). Für die erste Bewegungsrichtung wurden 2 Lösungswege erwogen: Eine halbkreisförmige Schiene, auf der ein 90-Grad-Bogen befestigt ist, und ein Schwenkarm. Eine Schiene hat Antriebsvorteile, die Schwierigkeit liegt jedoch darin, aus Einzelsegmenten einen planen und waagrechten Halbkreis zu bauen, da eine Fertigung aus einem Stück in der Institutswerkstatt nicht möglich ist. Deshalb wurde ein 45 Grad schräg nach oben stehender Schwenkarm gebaut, der unten durch ein groß dimensioniertes Lager gehalten wird. An diesem Lager ist ein Schrittmotor mit 1:10 Untersetzung angebaut.

Der Detektor sollte im einfachsten Fall auf einem vertikalen 90 Grad Bogensegment gleiten. Ein solches Segment mit 1 m Radius wäre eine Sonderanfertigung, die zusätzlich teuer würde, da die Kanten dieses Segments geschliffen und gehärtet werden müßten, um als Führungsbahnen für einen Schlitten zu dienen. Verstrebungen wären erforderlich, um Stabilität zu erreichen (u. a. um die Zugspannungen im Zahnriemenantrieb für den Schlitten aufzunehmen). Dies führt wiederum zu größerer Abschattung der Lichtquelle, wenn der Detektor vor der Probe steht.

Deshalb wurde das Kreissegment durch eine Linearführung ersetzt. Diese hat als Serienprodukt eine gute Zuverlässigkeit bei hoher Stabilität (geschliffene und gehärtete 20mm VA-Hohlwellen als Führungsschienen).

Dadurch bewegt sich der Detektor nicht auf der Oberfläche einer Kugel, sondern auf einem Kegelmantel. Der Detektor wird durch einen fünften Schrittmotor gekippt, damit er in jeder Stellung zur Probenmitte zeigt.

## 4.6 Steuerungselektronik

Zwischen Computer und Apparatur sind alle Steuerleitungen durch Optokoppler getrennt. Im folgenden wird kurz die Elektronik zwischen den Optokopplern und den Motoren geschildert, der Anschluß an den Computer folgt in 5.3. Ein Optokoppler dient der galvanischen Trennung zwischen zwei elektrischen Komponenten.

Die Optokoppler zwischen der Apparatur und dem Computer haben zwei Gründe: Zum einen werden Masseschleifen und die Induktion von Störimpulsen in den Leitungen vermieden, zum anderen ist die Workstation zusätzlich vor Spannungen geschützt.

Elegant wäre die Verwendung einer bidirektionalen Glasfaser-Verbindung zwischen Computer und Experiment: Sie ersetzt 40 Optokoppler und einen 6 m langen, 45-adrigen Kabelbaum (schließt Reserveleitungen und Masse ein) durch eine zwei-adrige Glasfaser mit Multiplexern / Demultiplexern an den Enden. Trotz Vortests außerhalb der Diplomarbeit kam diese schöne Idee wegen Zeitmangels nicht zum Einsatz.

Ein 5-Phasen-Schrittmotor hat 5 galvanisch getrennte Wicklungen (Stator) und einen Permanentmagneten (Rotor). Ein Schritt besteht aus einer kleinen Drehung des Rotors nach einer Seite um einen vom Design des Motors vorgegebenen Winkel (0.36 Grad). Dazu muß die Beschaltung der Wicklungen entsprechend geändert werden, was das Magnetfeld des Stators ändert und den Rotor in eine neue Lage zwingt. Jede Wicklung kennt dazu 3 Zustände: stromlos und zwei Stromrichtungen. Jede einfache Ansteuerungsschaltung für Schrittmotore hat mindestens drei Eingänge:

1. Schrittipuls, schaltet den Motor einen Schritt weiter
2. Richtung, z.B. high = links, low = rechts, legt die Richtung des Schritts fest
3. Stromabsenkung, verringert bei Stillstand des Motors ohne Last die Wärmeentwicklung

Außerhalb der Diplomarbeit wurde eine eigene Leistungsansteuerung für 5-Phasen-Schrittmotore entwickelt und davon 8 Stück gebaut. Die kommerziell erhältlichen Steuerungen haben durch die Verwendung von bis zu 120V Motorspannung ein größeres Drehmoment im oberen Drehzahlbereich (Lenzsche Regel), aber das Drehmoment bis 4 Umdrehungen/sec ist gleich dem bei 40V Versorgungsspannung und für den Antrieb der Apparatur ausreichend.

Nach dem Anschalten der Schrittmotoren ist ein Initialisierungs-Prozeß notwendig, da der Computer keine Information über die aktuelle Position der Mechanik hat. An jeder Achse müssen entweder absolute Winkelcodierer angebracht werden, oder jede Achse hat eine elektronisch lesbare Nullmarke. Letzteres ist einfacher und genauer.

Dazu werden eine Gabellichtschranke und eine Metallzunge an jeder Achse angeordnet. Die Gabellichtschranke befindet sich dabei nicht an der Motorwelle, sondern an dem zu bewegenden Teil, nach den Untersetzungen.

Diese Nullmarke muß weder einer absoluten Nullposition (0 Grad Einfallswinkel o.ä.) noch einer Endposition entsprechen, die Gabellichtschranke sollte sogar in der Mitte des Bewegungsbereiches befestigt sein. Durch eine Kalibrierung wird festgestellt, wo Absolut-Null relativ zur Nullmarke liegt.

Beim Suchen nach der Nullmarke muß gewährleistet sein, daß der Computer in der eingeschlagenen Such-Richtung die Gabel-Lichtschranke findet. Eine aus zwei Reflexionslichtschranken aufgebaute Winkelcodierung liefert eine grobe Positionsangabe der Achse, auf Grund derer der Computer entscheidet, ob die Nullmarke rechts oder links seiner momentanen Position (nach dem Anschalten) liegt.

## 4.7 Zusammenbau und Justierung

Ein Drehstromtransformator mit Gleichrichtung und Glättung liefert 40V zum Motorantrieb, seine Auslegung für 480W Dauerleistung (bei einem Innenwiderstand von  $R_i=0.4 \text{ Ohm}$ ) garantiert gleichzeitiges Anfahren aller Motoren ohne Spannungseinbruch. Eine Leitung mit TTL-Pegel (logisch Null = 0 Volt, logisch Eins = 5 Volt) zeigt dem Computer an, ob die 40 Volt vorhanden sind.

Bereits im Netzteil integriert ist eine Not-Aus-Schaltung: Durch einen Leistungstransistor (Power-MOS-FET) werden die 40 V unterbrochen, wenn eine Signalleitung geöffnet wird. Dies wird ausgelöst beim Überschreiten des zulässigen Schwenkbereichs an den vertikalen Achsen oder durch einen manuellen Not-Aus-Schalter.

Die 12V/60W Lampen werden normalerweise durch Autoakkumulatoren (63 Ah) und Ladegeräte im Pufferbetrieb versorgt. Alternativ ist ein Betrieb der Lampen direkt am Akkumulator (ohne Ladegerät) und damit ohne Restwelligkeit in der Versorgungsspannung (50 Hz) vorgesehen. Dadurch werden Schwebungen bei zukünftigen Messungen mit der CCD-Kamera (25 Hz Abtastfrequenz) vermieden. Die Lampen werden durch Power-MOS-FETs geschaltet, die durch Optokoppler TTL-Pegel Eingänge besitzen.

Alle Signale vom und zum Computer zeigt Bild 4.7: Links die direkt mit dem 40V Netzteil verbundene Not-Aus-Signalleitung, daneben jeweils ein Kästchen für Motor und Leistungsansteuerung, in der Mitte die "rawpos" und "zero" Lichtschranken und rechts die Lampensteuerung.

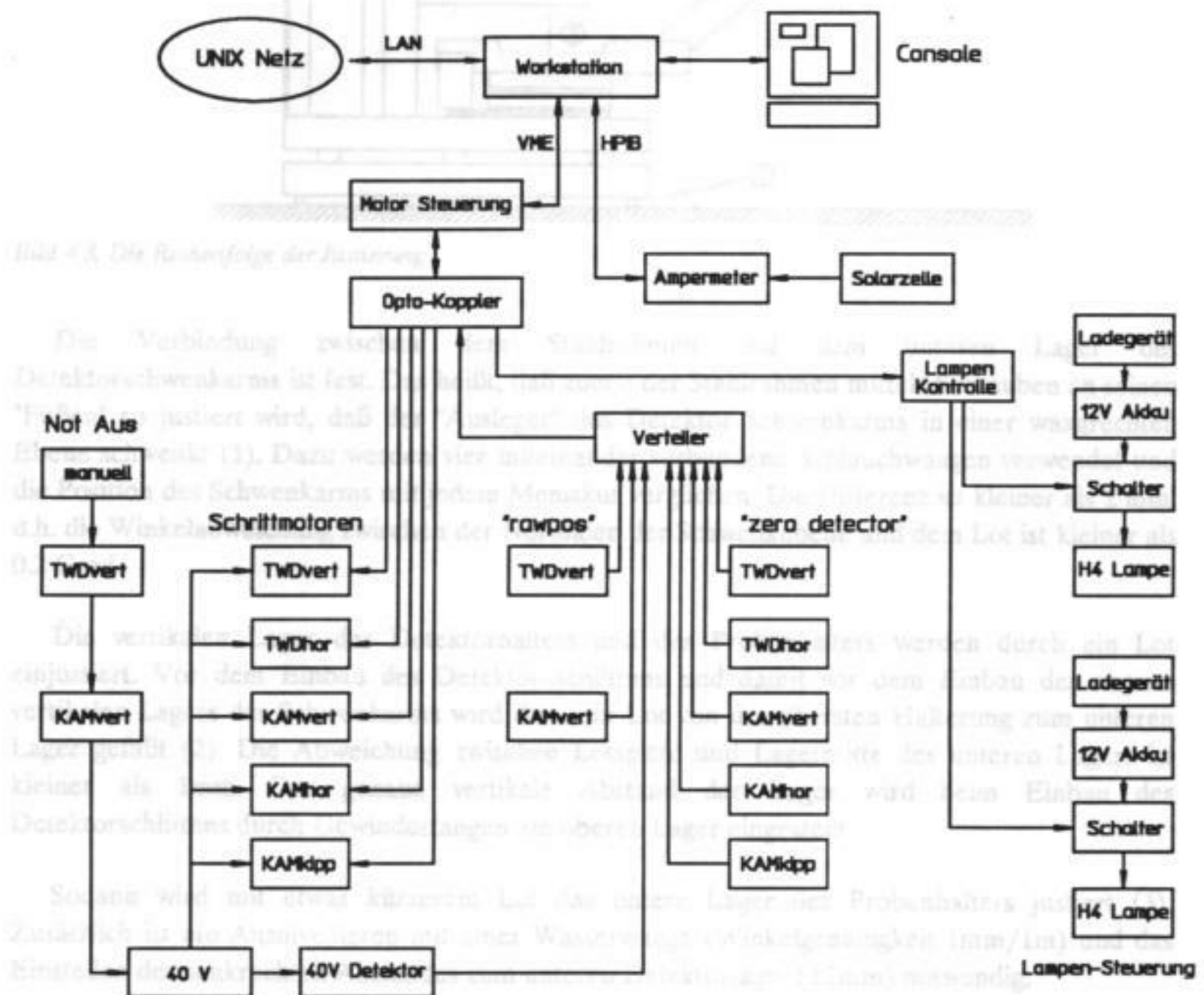


Bild 4.7, Schematischer Schaltplan. Nicht eingezeichnet sind die 5 und 12 Volt Versorgungsleitungen.

### 4.7 Zusammenbau und Justierung

Die Justierung der Mechanik ist mit wenigen Hilfsmitteln möglich: benötigt werden Lot, Schlauchwaage, Wasserwaage und Laser. Die Reihenfolge der Justierung zeigt Bild 4.8:

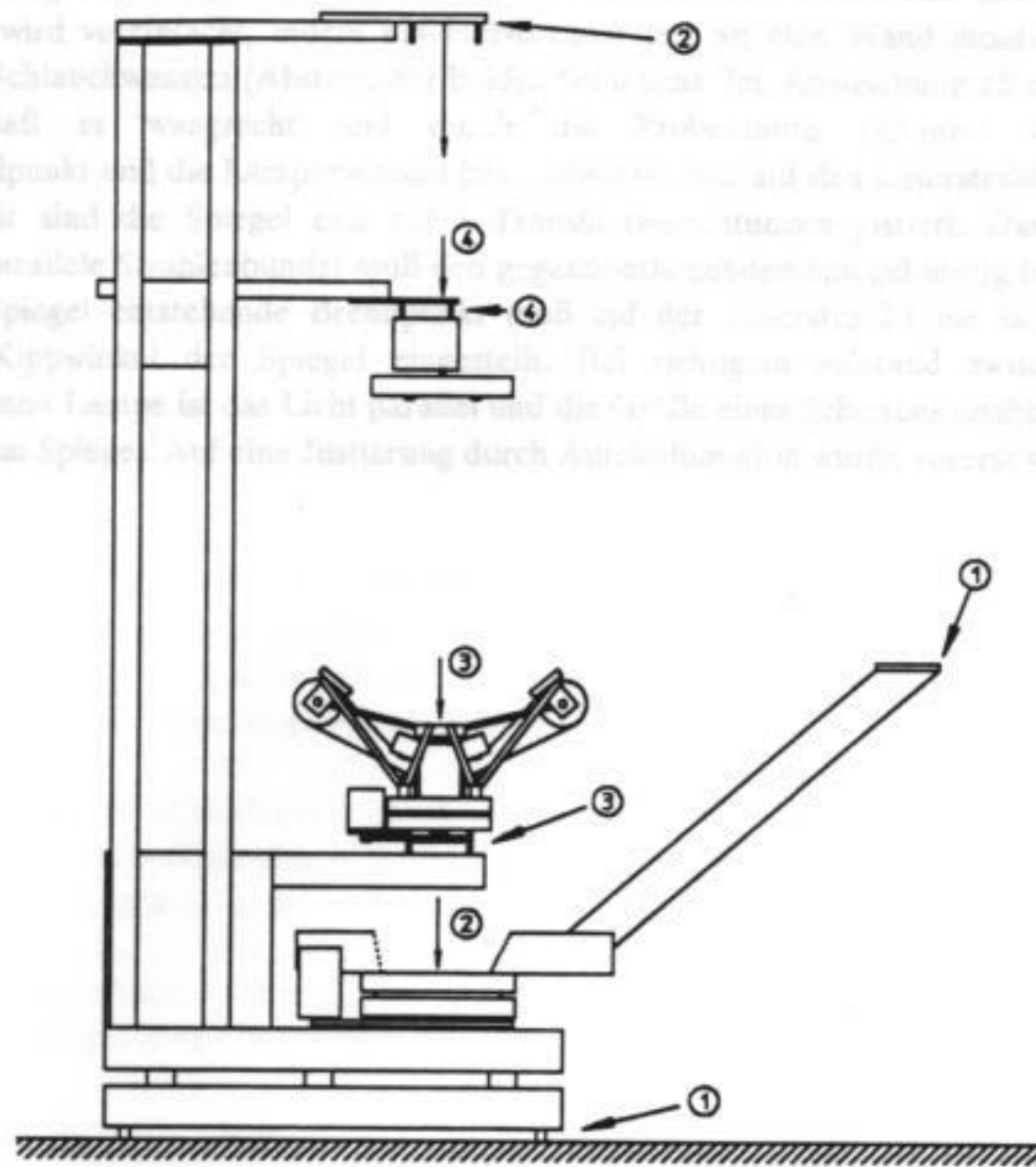


Bild 4.8, Die Reihenfolge der Justierung

Die Verbindung zwischen dem Stahlrahmen und dem unteren Lager des Detektorschwenkarms ist fest. Das heißt, daß zuerst der Stahlrahmen mittels Schrauben an seinen "Füßen" so justiert wird, daß der "Ausleger" des Detektor Schwenkarms in einer waagrecht Ebene schwenkt (1). Dazu werden vier miteinander verbundene Schlauchwaagen verwendet und die Position des Schwenkarms mit jedem Meniskus verglichen. Die Differenz ist kleiner als 2 mm, d.h. die Winkelabweichung zwischen der Normalen der Schwenkebene und dem Lot ist kleiner als 0.2 Grad.

Die vertikalen Lager des Detektorhalters und des Probenhalters werden durch ein Lot einjustiert. Vor dem Einbau des Detektor-Schlittens und damit vor dem Einbau des oberen vertikalen Lagers des Schwenkarms wird dazu ein Lot von der obersten Halterung zum unteren Lager gefällt (2). Die Abweichung zwischen Lotspitze und Lagermitte des unteren Lagers ist kleiner als 1mm. Der genaue vertikale Abstand der Lager wird beim Einbau des Detektorschlittens durch Gewindestangen am oberen Lager eingestellt.

Sodann wird mit etwas kürzerem Lot das untere Lager des Probenhalters justiert (3). Zusätzlich ist ein Ausnivellieren mit einer Wasserwaage (Winkelgenauigkeit 1mm/1m) und das Einstellen des senkrechten Abstandes zum unteren Detektorlager ( $\pm 2\text{mm}$ ) notwendig.



## 5 Apparatur-Steuerung und Meßwert-Erfassung

### 5.1 Die CCD-Kamera

Eine CCD-Kamera hat außer prinzipiellen Gründen (siehe 2.6) auch praktische Vorteile: Ein angeschlossener Monitor erlaubt auf einfacher Weise eine Kontrolle des Meßsignals: Störlicht-Quellen (u. a. Kontroll-Lampen, spiegelnder Klebestreifen an der Probenbefestigung) sind schnell identifizierbar. In der Testphase wurde die CCD-Kamera anstelle der Solarzelle montiert und die Motorsteuerungen einfach kontrolliert: Die markierte Probenmitte mußte an jeder Detektorposition in Bildmitte sein.

Ein Detektor mit Objektiv ist außerdem unempfindlicher gegen Fremdlicht als ein Detektor mit Blende (Güte des Objektivs und wenige Linsen vorausgesetzt).

Zusammen mit einer Xe-Blitzlampe als Lichtquelle ließe sich der Meßablauf beschleunigen: Jedes Bild der CCD-Kamera wird durch den Blitz einer Lampe belichtet (25Hz Wiederholrate). Schaltet man die Lampen abwechselnd, wird eine hohe Datenrate bei niedriger Geschwindigkeit des Detektors erreicht. Bewegungs-Unschärfe wird vermieden. Vor dem Einsatz der CCD-Kamera müssen jedoch folgende Probleme gelöst werden:

1. Der meßbare Intensitätsbereich ist kleiner als angenommen. Der Unterschied zwischen der Herstellerangabe 1:5000 (Datenblatt Fa. Thomson) und dem gemessenen Wert 1:40 bedarf noch weiterer Untersuchungen (u. a. der Verstärkerelektronik).

2. Die Objektivblende ist für Meßzwecke nicht regelbar. Der Ausbau des automatischen Objektivcomputers aus dem Objektivgehäuse scheint notwendig.

### 5.2 Abschätzungen für Computer-Leistung

Die Meßwert-Erfassung erlaubt die Verwendung einer CCD-Kamera. Bei einer Auflösung der CCD-Kamera von 60x60 Pixel (nach Mittelung durch einen Videoprozessor) und 25 Bilder/sec (TV-Norm) müssen 90000 Pixel/sec verarbeitet werden. Auf jedes Pixel würde eine 3x3 Transformationsmatrix angewandt (9 Multiplikationen und 6 Additionen), um die Pixelkoordinate in das Probensystem zu übertragen. Die erforderliche Rechenleistung läge mit 1.4 MFLOPS (mega floatingpoint operations per second) in der Größenordnung einer schnellen Workstation, weshalb ein PC ausgeschlossen wurde.

### 5.3 UNIX-Workstation und VME-Bus, Hardware

Der "VME-Bus" ist eine internationale Hardware-Norm, die es erlaubt, Hardware-Module verschiedener Hersteller zu kombinieren. Der "Host-Computer" ist das Grundgerät mit der nötigen "Infrastruktur": Videokarte, Monitor, Tastatur, Platten und Betriebssystem. Im vorliegenden Fall ist dies eine Hewlett Packard (HP) 9000/360 Workstation (MC68030 Prozessor + MC68882 mathematischer Koprozessor, 25 MHz) mit der Hewlett-Packard UNIX-Implementation (HP-UX). Ein VME-Busexpander (die HP Workstation besitzt ein HP-eigenes Bussystem) ermöglicht den Anschluß von vier VME-Karten. Verwendet werden Karten der Firma Eltec-Elektronik Mainz. Davon sind 2 Karten (SAC700) mit je einem MC68000 kompatiblen Prozessor (68070), 128 KByte RAM, 3 Timerbausteinen und je einem parallelen bzw. seriellen Ausgang bestückt.

Auf diesen universellen CPU-Modulen (CPU: "Central Processing Unit") läuft ein eigenes Assembler-Programm zur Schrittmotor-Steuerung. Jede Karte verwaltet zur Zeit bis zu 3 Motoren, da jeder Motor "seinen" Timer braucht und ohne eigene Zusatzplatine nur 3 Timer pro Karte zur Verfügung stehen.

Die Signale zur Lampensteuerung und alle TTL-Signale von der Apparatur zum Computer laufen ebenfalls über die Prozessoren der Motorsteuerungs-Platine.

Weitere zwei VME-Steckplätze belegt der Video-Digitizer. Ein TV-Signal nach CCIR Norm wird in Echtzeit in einem 744x600 Pixel Raster digitalisiert und in einem on-board 512KByte RAM abgelegt.

Der Zugriff auf VME-Adressen vom Benutzerprogramm ist einfach: Die Adressen der VME Karten werden 1:1 in den Adressraum der HP gespiegelt, wobei durch den 32Bit breiten Adressbus genug Platz im Adressraum für zusätzliche VME-Karten ist.

Ein Anwenderprogramm erhält die VME Adressen auf Anforderung direkt in seinen virtuellen Adressbereich gelegt ( die Memory Management Unit MMU wird entsprechend programmiert), siehe 7.4 Software. Dadurch kann ein unter UNIX laufendes Program auf das RAM der Schrittmotor-Steuerung und das RAM des Videodigitizers zugreifen, ohne daß eigene Software (Device Driver) im Betriebssystem (Kernel) implementiert werden müßten. Zugriffskonflikte zwischen der UNIX Seite und den on-board Prozessoren werden durch Hardware auf den VME-Steckkarten gelöst.

Die HP-Workstation ist mittels Local Area Network (LAN) (Ethernet, TCP/IP) in das Rechnernetz des Instituts integriert.

## 5.4 UNIX-Workstation und VME-Bus, Software

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Software zur Steuerung der Apparatur gliedert sich in 3 Gruppen. Als Anhalt ist die Größe des Sourcecodes in KByte angegeben:

1.	Meßprogramm	8
2.	Unterprogramm Bibliotheken	
	Motorsteuerung auf der UNIX Seite	15
	mathematische Hilfsfunktionen	16
	(u.a. Daten Sortierung in Feldern,min/max)	
	Koordinaten Transformationen	10
	(u.a. Matrix/Vektor Multiplikationen, Drehmatrizen )	
	Daten Interpolation (2D und 1D)	9
	(u.a. lineare Interpolation, Interpolation für 2D Felder )	
	Videodigitizer Steuerung	3
	Pico Amperemeter Keithley 485 Steuerung	1
3.	Das Assembler-Programm	18
	für die Prozessoren auf den SAC700 VME Steckkarten	

Insgesamt entstanden 82 Unterprogramme. Alle Software zur Steuerung der Apparatur wurde in der Sprache C geschrieben und mit dem Revision Control System (RCS) verwaltet, d.h. jede neue Version eines Programs wird zusammen mit einer Beschreibung der Änderungen archiviert. So ist feststellbar, welche Proben mit welchem Stand der Software gemessen wurden, falls später die Meßergebnisse überprüft werden.

## 5.4.1 Motor- und Lampen-Steuerung

### 5.4.1.1 Assembler-Programm für die SAC700 Prozessoren

Das Assembler-Programm generiert eine frequenzmodulierte Pulsfolge für die Schrittmotoren und zwar derart, daß die Motoren mit konstanter Beschleunigung anfahren, abbremesen und die tatsächliche Position der Motorachse nach Beendigung der Bewegung mit der Sollposition übereinstimmt. Bild 5.0 zeigt die Ein- und Ausgänge des Assembler Programms:



Bild 5.0, Die Ein- und Ausgänge einer Standard-Schrittmotorsteuerung

Die "Ist-Position" verändert sich bei einer Bewegung laufend, und zeigt die aktuelle Position der Motorwelle an. Alle Angaben erfolgen in der Einheit "Motorschritt". Steht der Motor z.Z. auf Position 0, so entspricht "Soll" = 500 einer halben, "Soll" = 1000 einer vollen und "Soll" = 2000 zwei vollen Umdrehungen der Motorwelle. (Angaben für 5-Phasen-Motoren im Halbschrittbetrieb).

Die Sollposition steht in einem 2 Byte großen Speicherbereich, so daß die Motorwelle für maximal 65 Umdrehungen programmiert werden kann. Diese Speicherstelle liegt im RAM der SAC700 VME Steckkarte und kann damit auch von UNIX erreicht werden. Die Kommunikation zwischen UNIX Seite und Assembler-Programm ist "write and go": Sobald eine neue Sollposition von UNIX aus in die zwei Byte geschrieben wird (und dies ist durch Word-Zugriff mit "einem Schlag" möglich), läuft der Motor an. Während einer Bewegung wird eine weitere Veränderung der Sollposition vom Assembler Programm ignoriert.

Wird in einem zweiten 2 Byte Speicherbereich von UNIX aus geschrieben, interpretiert dies das Assembler Programm als seine neue "Ist" Position und bewegt den Motor nicht.

Außerdem wurde in das Assemblerprogramm ein "search" Modus eingebaut: ein Motor fährt so lange, bis die Nullmarke ("zero position") erreicht wird. Damit wird eine absolute Positionierung der vom Motor angetriebenen Achse erreicht: Nachdem die Nullmarke gefunden wurde, wird dem Assembler Programm von Unterprogrammen auf der UNIX-Seite die absolute Position mitgeteilt.



Eine Überprüfung der "Ist" Position im normalen Betrieb erlaubt ein "zero feedback" counter: Beim Durchqueren der "zero position"-Lichtschanke startet ein Zähler und zählt jeden Schritt bis zum Ende der Bewegung. Das UNIX Programm kann so überprüfen, ob nach dem Ende der Bewegung der Inhalt des Zählers mit einem aus Sollposition und "zero offset" errechneten Wert übereinstimmt, falls bei der Bewegung die "zero position"-Lichtschanke durchquert wurde.

Beim Beschleunigen und Bremsen wird eine Frequenzrampe durchfahren, die eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung der Motorachse zur Folge hat. Pro Motor steht ein Timer zur Verfügung, der nach Ablauf einer programmierten Zeit einen Impuls an den Schrittmotor gibt. Gleichzeitig informiert er das Assembler Programm, das daraufhin die "Ist" Position um 1 erhöht/erniedrigt und feststellt, ob der Motor beschleunigt oder gebremst werden muß, d.h., ob die nächste Zeit zwischen zwei Impulsen kürzer oder länger ist.

Dafür wird eine Tabelle mit Pulszeiten benötigt. Beim Start einer Bewegung liest das Assemblerprogramm den ersten Eintrag dieser Tabelle und programmiert damit den Timer. Nach dem ersten Impuls und beim Wunsch einer weiteren Beschleunigung wird der zweite Eintrag der Tabelle in den Timer programmiert. Beim Beschleunigen wird so die Tabelle in Richtung aufsteigender Indices durchlaufen (beim Bremsen analog in entgegengesetzter Richtung). Es gibt Tabellen für höhere und niedrigere Beschleunigungen der Motorachse, und für jeden Motor existiert eine eigene Tabelle. Die Werte in der Tabelle ergeben sich wie folgt:

Mit dem Ansatz:

$$\begin{aligned} s_i &= i \cdot \Delta s & s_i & \text{Position nach dem } i\text{-ten Schritt, } \Delta s \text{ Schrittweite} \\ s_i &= 0.5 \cdot a \cdot T_i^2 & T_i & \text{Zeitpunkt des } i\text{-ten Schrittes, } a \text{ (konst. Beschl.)} \end{aligned}$$

folgt:

$$i \cdot \Delta s = 0.5 \cdot a \cdot (\sum_{j=0}^i T_j)^2 \quad \forall i \in \mathbb{N}, j=0..n \quad t_k = T_{k+1} - T_k$$

und damit :

$$t_k = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \cdot 2 \cdot \Delta s / a$$

Dies unter der Bedingung  $v_0=0$ . Das Ergebnis nutzt den Schrittmotor nicht ideal aus, da es eine maximal mögliche Zeitdauer zwischen 2 Schrittimpulsen gibt (16Bit Timer: 65535 · Timereinheit), und der Schrittwinkel des Motors nicht unendlich klein ist.

Der bessere Ansatz:

$$i \cdot \Delta s = v_0 \cdot \sum_{k=0}^i t_k + 0.5 \cdot a \cdot (\sum_{k=0}^i t_k)^2$$

führt auf:

$$t_n = \sqrt{(v/a + \sum_{k=0}^n t_k)^2 + 2 \Delta s / a} - (v_0/a) + \sum_{k=0}^n t_k \quad \text{für beide } \sum : k=0..n-1$$

Für diese rekursive Definition fand sich keine explizite Darstellung. Dies ist auch nicht notwendig, da die Zeiten im Programm ohnehin durch eine Schleife berechnet werden.

$v_0$  wird bestimmt aus:  $t_0 = t_{\max}$ , wobei  $t_{\max}$  die maximal programmierbare Zeitdauer zwischen zwei Impulsen ist. Die damit erzeugten Beschleunigungsrampen führen zu einem sanften Anfahren und Bremsen. Bei durch Zahnriemen angetriebenen Achsen folgt daher ein genaues Anfahren der Sollposition ohne Überschwingen.

Das Assembler-Programm ist in der Lage, beliebig viele Motoren gleichzeitig zu steuern, wobei die maximale Schritt-Frequenz für jeden Motor sinkt, wenn mehrere Motoren zu verwalten sind. Dabei garantiert der verwendete (selbst entwickelte) Algorithmus, daß alle Motoren völlig unabhängig und korrekt gesteuert werden, wenn nicht ein "overrun" auftritt: Dabei wird während der Beschleunigungsphase eine Motorfrequenz erreicht, die das Assemblerprogramm nicht mehr bearbeiten kann. Durch Angabe der maximalen Motorfrequenz läßt sich vermeiden, daß im Betrieb jemals ein "overrun" vorkommt.

Die Begrenzung der Motorfrequenz ist schon deshalb nötig, da die Motoren nur bis zu einer maximalen Frequenz den Schritimpulsen folgen können.

Die auf der UNIX-Seite laufenden Motorsteuerungs-Programme erkennen einen Absturz des Assembler-Programms: Das Assembler Programm setzt alle 10ms eine bestimmte Speicherstelle null ("alive-byte"). Bei einer neuen Motorpositionierung schreibt das auf der UNIX-Seite ablaufende Programm in diese Speicherstelle eine "1". Steht nach 50ms immer noch eine "1" darin, ist das Assembler-Programm abgestürzt und die UNIX Seite würde dies erkennen. Während halbjährigem Betrieb trat kein Absturz auf.

Umgekehrt gibt es die Möglichkeit, vom UNIX aus das Assembler Programm zu stoppen. Die SAC700 Prozessoren gehen in diesem Fall in ein Monitor-Programm, das im EPROM (fest-programmierter Speicherbaustein) von der Firma Eltec mitgeliefert wird und die Fehlersuche erleichtert. Zugang zu den SAC700-Prozessoren erfolgt in diesem Fall durch eine seriellen RS232-Schnittstelle.

Das Assembler-Programm selbst steht im RAM Bereich und wird dorthin vom UNIX aus geladen. Hier ist die Kompatibilität der 68000-Prozessorfamilie angenehm: Ein Assembler Programm wird mit einem HP Assembler auf einer MC68030 Maschine übersetzt ( mit 68010 Option ) und läuft auf einem 68070 Prozessor (68000 Derivat) der Firma Valvo.

#### 5.4.1.2 Die Unterprogramme zur Motorsteuerung auf der UNIX Seite

Die Unterprogramme sind die Schnittstelle zwischen Meßprogramm (UNIX Seite) und Assembler Programm (SAC700). Es sind einfache Aufrufe zur Positionierung der Apparatur, die von den Details der Motorsteuerung unabhängig sind. Die am meisten gebrauchten sind: \*

```
motor_position( <Grad>, <motor>, NO_MOTOR_WAIT)
```

wobei <Grad> die neue Position in Grad angibt, <motor> die Motor Bezeichnung ist und NO\_MOTOR\_WAIT das Unterprogramm zur sofortigen Rückkehr veranlaßt. Es können mehrere Achsen gleichzeitig bewegt werden:

```
motor_position( 20.0, TWD_VERT, NO_MOTOR_WAIT);
motor_position( 45.0, TWD_HOR, NO_MOTOR_WAIT);
motor_wait_to_finish();
```

---

\* Die Schreibweise mit "\_" entspricht den im Programm verwendeten Namen.

Diese Folge von Unterprogrammaufrufen bewirkt eine gleichzeitige Bewegung der vertikalen Probenachse auf 20 Grad und der horizontalen Probenachse auf 45 Grad, mit anschließendem Warten, bis die Motoren zum Stillstand gekommen sind.

Häufig gebrauchte Aufrufe sind außerdem: `read_position( <Achse> )` die jetzige Achsenposition, auch während einer Bewegung `motor_axis_init( <Achse> )` zum Initialisieren einer Achse `motor_init()` zum Initialisieren der SAC700-Prozessoren.

Die zum Initialisieren der SAC700-Prozessoren benötigten Parameter (Motor-Beschleunigung, höchste Schrittfrequenz, Null-Position), stehen in einer Datei, die von `motor_init()` gelesen wird. Status-Meldungen ("AxisFailure" etc.) werden in ein Motor-Logfile geschrieben.

Für Bewegungen mit gleichzeitiger Meßwert-Aufzeichnung läßt sich die Bewegungsgeschwindigkeit der Achsen auf jeden gewünschten Wert einstellen.

## 5.5 Das Meßprogramm und der Meßablauf

Bei allen Messungen läuft während der Meßwert-Aufnahme nur ein Motor. Die Koordinaten des Detektors sind zuerst im Laborsystem angegeben und werden dann ins Koordinatensystem der Probe transformiert. Dies geschieht entweder bereits bei der Messung oder durch ein zweites Programm. Das Meßprogramm legt den Ablauf der Messung fest, korrigiert eventuell die Meßwerte und schreibt die Daten in eine Datei. Zur Zeit gibt es drei Meßmethoden und drei Programme, die auf die obengenannten Libraries (Sammlung von Unterprogrammen) zugreifen:

1. für symmetrische Proben reduziert sich die Messung auf zwei Freiheitsgrade: einen Einfallswinkel und einen Ausfallswinkel. Der Detektor bewegt sich auf einem Kreis um die Probe (Bild 5.1). Der Ausfallswinkel im Probensystem wird vom Meßprogramm berechnet und zusammen mit den Meßwerten in eine Datei geschrieben. Die Darstellung erfolgt durch ein Programm mit `DISSPLA`-Aufrufen (`DISSPLA`: siehe 6.1).

2. Messungen mit einem Freiheitsgrad für den Fit eines speziellen Modells an einen TWD-Wabentyp. Hier werden nur Meßwerte aufgenommen, die auf einer Geraden liegen (Bild 5.2).

3. für nicht symmetrische Proben werden alle Ausfallswinkel bei festem Einfallswinkel gemessen. Der Detektor bewegt sich auf dem in Bild 2.6 gezeigten Kegel. Dieser Standard-Meßablauf wird im folgenden näher beschrieben:

Wie in 3.4 erläutert (siehe dort für die Definition einer Viertel-Kugel, sowie  $\alpha, \beta, \varphi_{det}$  und  $\theta_{det}$ ), gibt es vier verschiedene  $\alpha, \beta$  Kombinationen, die alle den gleichen Einfallswinkel zur Folge haben. Für jede von ihnen scannt der Detektor einen Raumwinkel  $\pi sr$  (Viertel-Kugel) und schreibt die Meßwerte in eine Datei. Der Detektor schwenkt 180 Grad um die vertikale Achse und mißt dabei die Intensität mit 2 Grad Winkel-Auflösung ( $\varphi_{det}$ ). Nach jedem Schwenk wird der Detektor 4 Grad um die horizontale Achse gekippt ( $\theta_{det}$ ). Alle Daten werden dabei im Koordinatensystem der Meßapparatur gespeichert und später in das Koordinatensystem der Probe umgerechnet. Jede Messung einer Viertel-Kugel ist unabhängig von den anderen 3 Messungen reproduzierbar.

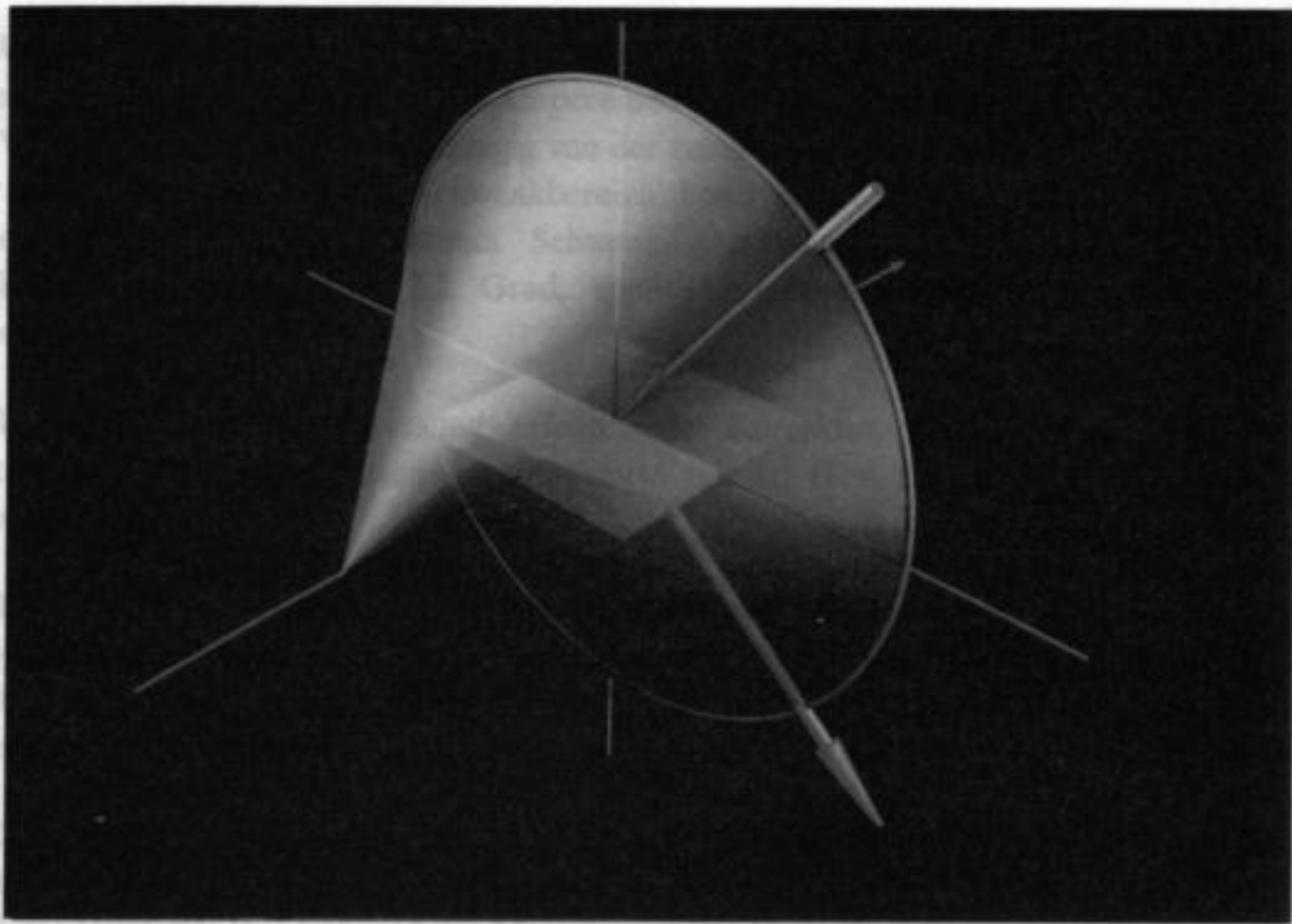


Bild 5.1, Für Proben, die rotationssymmetrisch um ihre Flächennormale sind, wird der Detektor nur auf einem Kreis (grün) bewegt. Alle möglichen Detektorpositionen liegen auf dem grünblauen Kegel.

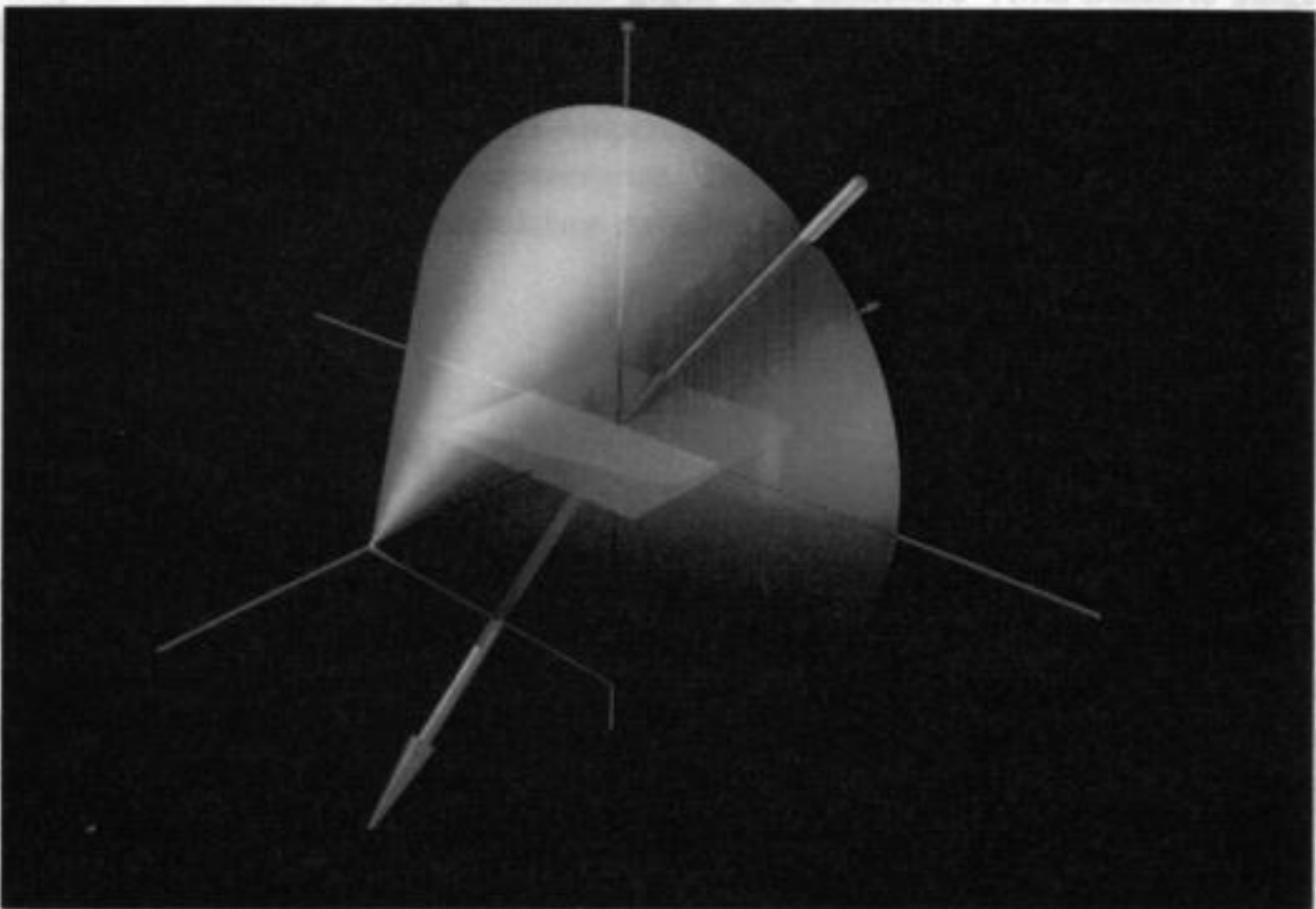


Bild 5.2, Zum Fit eines TWD Wabenmodells scant der Detektor nur auf einer Geraden (grün).  
Vergleiche auch Bild 2.7

Jede Zeile des Files hat die Form

$\langle \theta \rangle \langle \phi \rangle \langle \text{meßwert} \rangle$

$\phi$  und  $\theta$  geben den Ausfallswinkel für genau einen Meßpunkt an. Eine Mittlung geschieht erst später in den Programmen zur Darstellung der Meßwerte.

Während der Detektor fährt, liest das Programm kontinuierlich zwei Werte ein: die auf den Detektor einfallende Leistung (Pico-Amperemeter) und die momentane Position des Detektors. Die Winkelauflösung ist damit abhängig von der zuvor gewählten Schwenkgeschwindigkeit. Da sie aber nicht über den ganzen Schwenkbereich konstant ist (Anfahr- und Bremsrampen der Motoren), werden die bei einem Schwenk gemessenen Daten linear interpoliert. Die Winkelauflösung beträgt ca 2.2 Grad, somit ist ein Interpolieren in 2 Grad Schritten gerechtfertigt.

Bereits während der Messung erfolgt eine Korrektur des variablen Detektor-Proben Abstandes durch Multiplikation der Meßwerte mit  $R^2$  ( $R$  = Abstand zwischen Detektor und Probenmitte).

Bei einem normalen Multitasking Betriebssystem besteht die Möglichkeit, daß das Meßprogramm von anderen gleichzeitig laufenden Programmen verdrängt wird, d.h., daß es kurzfristig (Sekunden) keine CPU-Leistung bekommt. Da die Schwenkbewegung trotzdem weiterlief, bekämen die Daten eine Lücke in der Winkelauflösung.

Daher wird dem Meßprogramm "Real Time Priority" gegeben, d.h., es bekommt CPU-Leistung, wann immer es sie braucht. Unter extremen Bedingungen kann ein Problem auftreten: Wird der IEEE488-Bus während der Messung von einem anderen Programm zur Kommunikation mit einem anderen Gerät (z.B. Plotter) massiv gebraucht (z.B. Plotten im Spool-Betrieb), verzögert dies den Zugriff des Meßprogramms auf das Amperemeter. Im Extremfall sollte die IEEE488-Verbindung zwischen Rechner und Meßwertaufnehmer bei einer noch zeitkritischeren Anwendung über ein separates IEEE488-Interface abgewickelt werden. Dies ist kein ernstes Problem, da das Keithley-Picoamperemeter gegen eine schnellere VME-Buskarte ausgetauscht werden soll.

Bei Verwendung eines Keithley-Pico-Amperemeters wartet das Meßprogramm einen Großteil seiner Zeit auf Antwort vom Amperemeter. Daher wird nur 10% der CPU Zeit vom Meßprogramm verbraucht, ein interaktives Arbeiten ist an der Workstation auch während der Messung möglich.

## 5.6 Meßwert-Verarbeitung

Die vier im Koordinatensystem der Apparatur vorliegenden Datenfiles müssen in das Probensystem transformiert und zusammengesetzt werden. Die Transformation besteht aus vier Drehmatrizen und bestimmt aus der Stellung der Apparatur die Einfalls- und Ausfallsrichtungen im Proben-Koordinatensystem. Die 4 Viertel-Kugeln sollten an ihren Nahtstellen auf Stetigkeit und Differenzierbarkeit überprüft und gegebenenfalls angepaßt werden (z.B. bei unerschiedlicher Helligkeit der beiden Lampen); dies geschieht aber zur Zeit noch nicht. Nach der Transformation in das Probenkoordinatensystem liegen die Daten in einem File mit dem Namen

**< Probename > - < phi > - < theta >**

vor, wobei phi, theta den Einfallswinkel angibt.

Jede Zeile des Files hat die Form

**< theta > < phi > < meßwert >**

phi und theta geben den Ausfallswinkel für genau einen Meßpunkt an. Eine Mittelung geschieht erst später in den Programmen zur Darstellung der Meßwerte.

## 6 Verwendung der Meßwerte und Anforderung an die Darstellung

Folgende Anwendungen sind zur Zeit gegeben und geplant:

	<u>Meßprogramm</u>	<u>Darstellungsprogramm</u>
1. Kontrolle der Apparatur während der Aufbau- und Testphase	o.k.	o.k.
2. qualitative Darstellung zum Vergleich verschiedener Materialien	o.k.	o.k.
3. Darstellung der Lichtverteilung auf beliebigen Flächen	bedingt	bedingt
4. Absorptions-Messungen	bedingt	-
5. Simulation eines "Pakets" verschiedener TWD	nein	-

Die Meßwerte erlauben z.Z. noch keine exakten Absolut-Messungen und daher auch keine genaue Aussage über die Absorption im Material. Die Probleme, die eine quantitative Messung behindern, sind im einzelnen:

- Abschattungen durch den Lampenhalter
- Streulicht durch zweiten Spiegel
- "Peaks" durch am Probenhalter vorbeischeinendes Licht
- Punktförmigkeit der Lichtquelle
- Reflektionen am Probenhalter

Die Lösung dieser Probleme besteht in kleinen Änderungen des Aufbaus (automatische Abschattung des nicht benutzten Spiegels, zusätzliche Anti-Reflex Maßnahmen am Probenhalter) und verfeinerte Methoden zur Handhabung der Meßwerte (halbautomatische Eliminierung der "Peaks" vor dem Aufaddieren der Meßwerte zu winkel-integralen Größen, Verwendung einer Grafik-Workstation zum schnellen Umgang mit komplexen, von mehreren Parametern abhängigen Meßwerten).

Für 1. wird ein kommerzielles Graphik-Paket ("DISSPLA" Revision 10.0 von Computer Associates) verwendet, für 2. erfolgt die Darstellung mit einem Public Domain Program ("rayshade" der Yale University [RAYSHADE]) und eigener Software. Im Rest dieses Kapitels wird auf die Darstellung einer Funktion  $z=z(x,y)$  mit kontinuierlichem Wertebereich für  $x,y$  eingegangen.

### 6.1 Roh-Daten , Darstellung von $f(x,y)$ mit Gitternetz (DISSPLA-Programm)

Die "Rohdaten" können nach jeder Messung einer Viertel-Kugel in einem 3D kartesischen Koordinatensystem aufgetragen werden (Bild 6.1); dies hat zwei Vorteile:

1. Die Intensität ist abhängig von zwei Parametern, deren Werte äquidistant in der  $x-y$  Ebene liegen. Der Wertebereich ist  $\theta=[0..85]$  Grad und  $\varphi=[0..180]$  Grad. Die Intensität wird als  $z$ -Koordinate über jedem  $x-y$  Punkt aufgetragen. Damit ist durch die Punkte ein Gitternetz definiert und jeder Gitterpunkt entspricht genau einem Meßwert.

2. Jeder Meßwert entspricht einer einfach kontrollierbaren Stellung der Apparatur, da die Koordinaten jedes Meßpunktes im "Labor"-System angegeben werden. Tritt z.B. bei einem bestimmten Gitterpunkt ein Peak auf, läßt sich die entsprechende Stellung der Apparatur einfach reproduzieren und die Quelle der Störung feststellen.

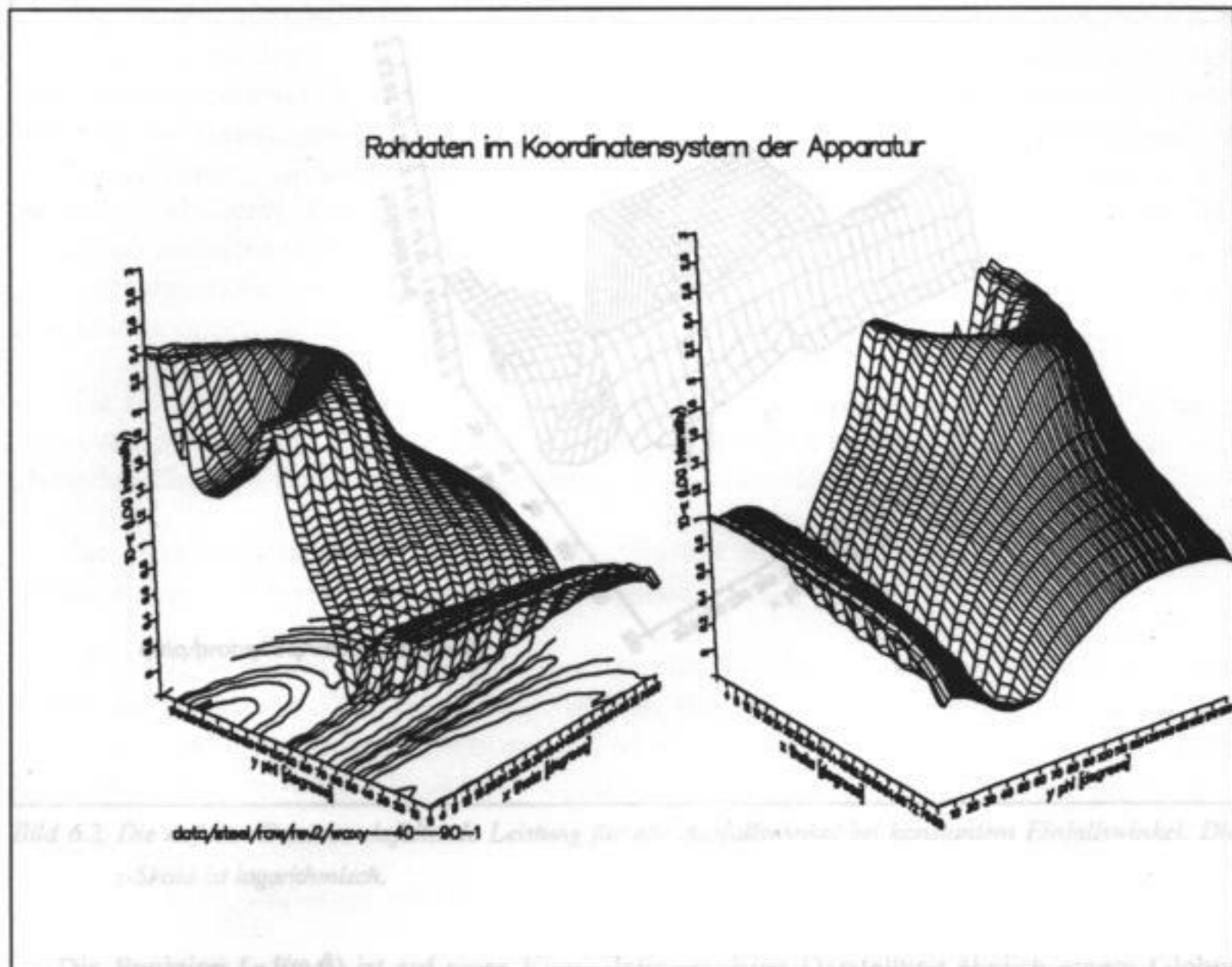


Bild 6.1, Die Meßergebnisse einer Viertel-Kugel (die Hälfte des Transmissions-Ringes und ein Teil der Reflexion) im Labor-System von zwei Seiten aus betrachtet. Diese Zeichnung ist von DIN-A3 Format verkleinert.

Eine 3D-Darstellung mit einem Gitternetz ist nur unter 2 Bedingungen möglich: der Wertebereich von  $x$  und  $y$  macht eine Darstellung in einem kartesischen Koordinatensystem sinnvoll und  $x$ - $y$  liegen äquidistant. Nur dann ist die Oberfläche durch ein Netz darstellbar. Liegen  $x$  und  $y$  nicht äquidistant, treten Probleme auf, die im Anhang 1 erläutert werden.

## 6.2 Daten im Probensystem, Darstellung von $f(x,y)$ durch Triangulation

Unter Triangulation wird in der Computer-Graphik die Zerlegung von beliebigen Oberflächen in Dreiecke verstanden. Diese Oberfläche ist hier einfach durch die Meßwerte gegeben, wobei für jeden  $x$ - $y$ -Wert nur ein  $z$ -Wert existiert. Die dadurch gegebene Verteilung der Dreiecke ist nicht eindeutig (siehe Anhang 1).

Durch die Koordinatentransformation und das Zusammenfügen der Messungen liegen die Meßwerte  $f=f(\varphi,\vartheta)$  nicht mehr äquidistant und der Wertebereich für  $\varphi,\vartheta$  ist größer:  $\varphi=[0..360]$  Grad,  $\vartheta=[0..180]$  Grad. Die Darstellung in einem kartesischen Koordinatensystem ist unanschaulich (Bild 6.2):

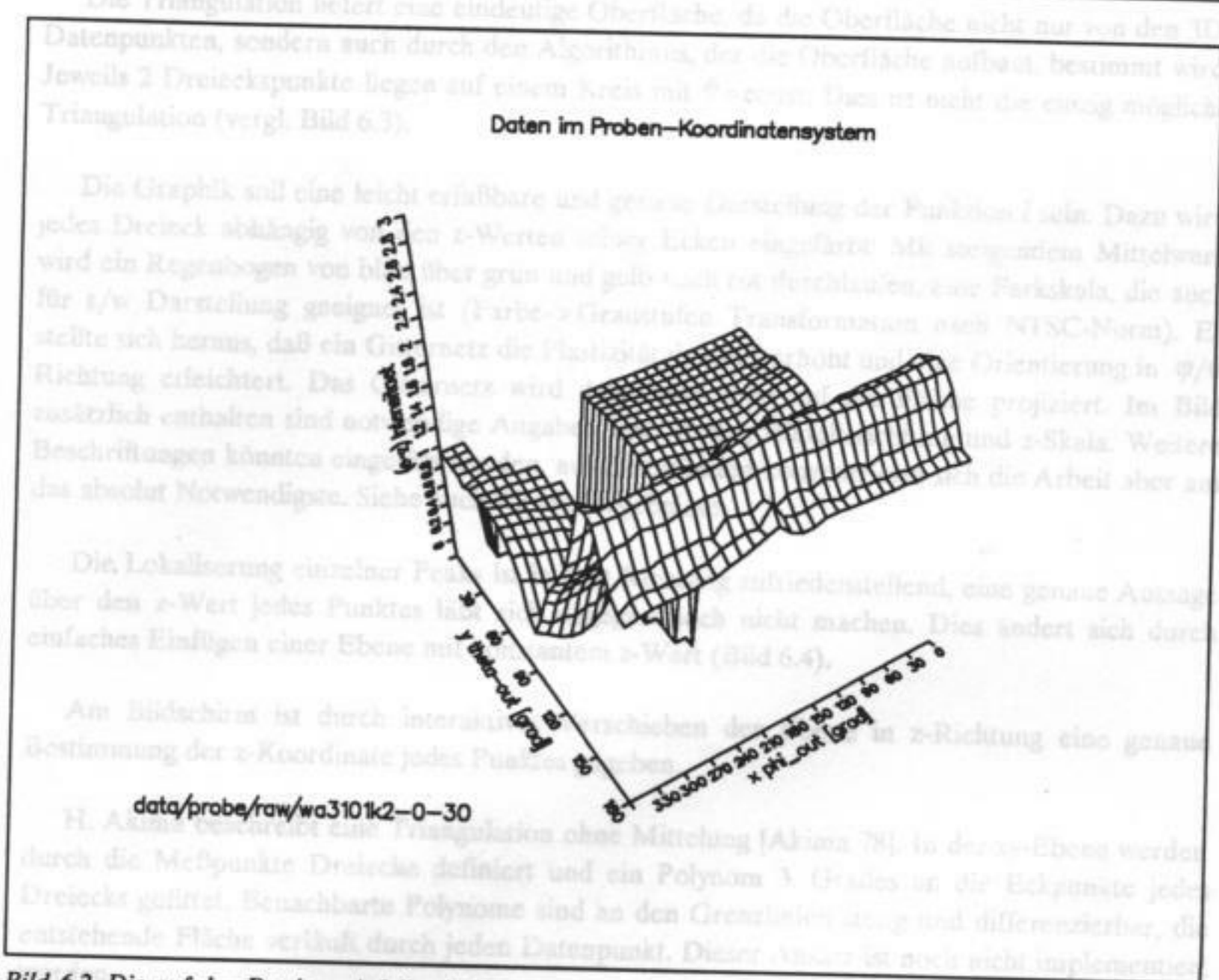


Bild 6.2, Die auf den Detektor einfallende Leistung für alle Ausfallswinkel bei konstantem Einfallswinkel. Die  $z$ -Skala ist logarithmisch.

Die Funktion  $f=f(\varphi, \theta)$  ist auf einer Kugel definiert. Eine Darstellung ähnlich einem Globus mit überhöhten Gebirgen ist nicht einfach genug zu interpretieren. Daher wird eine Halbkugel auf eine Ebene projiziert: polständig azimutal äquidistant, weder flächen- noch winkelgetreu, aber für unsere Zwecke geeignet. Linien mit konstanten  $\varphi$ -Werten bilden Geraden, Linien mit konstanten  $\theta$ -Werten bilden konzentrische Kreise. Der Funktionswert wird als Höhe über der Ebene aufgetragen. Dabei ist die Fläche durch Dreiecke definiert, deren Eckpunkte durch Mittelung der Meßwerte bestimmt werden. Bild 6.3 zeigt die Einzugsbereiche jedes Eckpunktes (Kreise) als schraffierte Fläche und die entstehenden Dreiecke:

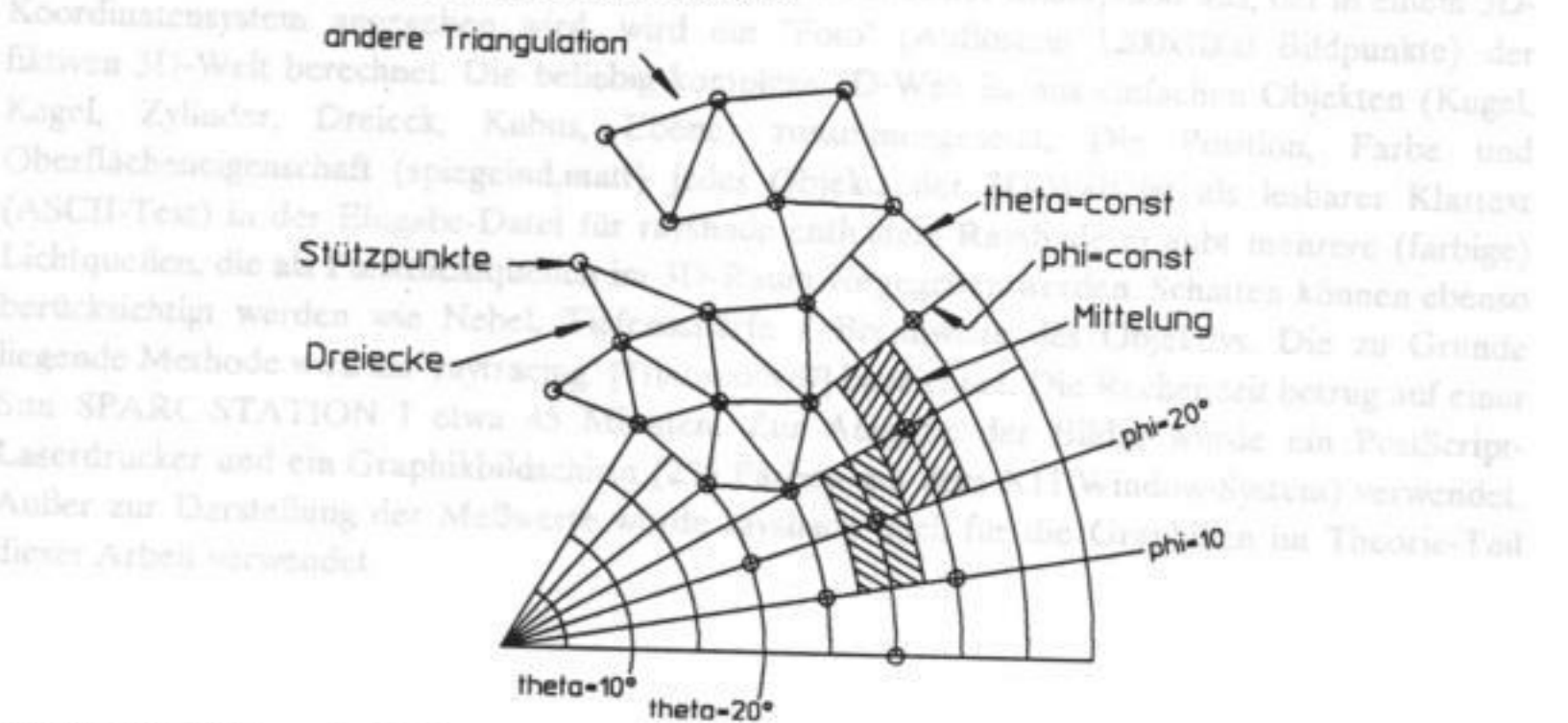


Bild 6.3, Die Mittelung der Meßwerte: Die Ecken der Dreiecke (kleine Kreise), die Einzugsbereiche für die Mittelung (schraffierte Fläche) und die entstehenden Dreiecke (oben)



Die Triangulation liefert eine eindeutige Oberfläche, da die Oberfläche nicht nur von den 3D-Datenpunkten, sondern auch durch den Algorithmus, der die Oberfläche aufbaut, bestimmt wird: Jeweils 2 Dreieckspunkte liegen auf einem Kreis mit  $\vartheta = \text{const.}$  Dies ist nicht die einzig mögliche Triangulation (vergl. Bild 6.3).

Die Graphik soll eine leicht erfaßbare und genaue Darstellung der Funktion  $f$  sein. Dazu wird jedes Dreieck abhängig von den  $z$ -Werten seiner Ecken eingefärbt: Mit steigendem Mittelwert wird ein Regenbogen von blau über grün und gelb nach rot durchlaufen, eine Farbskala, die auch für s/w Darstellung geeignet ist (Farbe- $\rightarrow$  Graustufen Transformation nach NTSC-Norm). Es stellte sich heraus, daß ein Gitternetz die Plastizität deutlich erhöht und eine Orientierung in  $\varphi/\vartheta$  Richtung erleichtert. Das Gitternetz wird dabei von oben auf die Fläche projiziert. Im Bild zusätzlich enthalten sind notwendige Angaben über Probe, Einfallsrichtung und  $z$ -Skala. Weitere Beschriftungen könnten eingefügt werden, aus Zeitgründen konzentrierte sich die Arbeit aber auf das absolut Notwendigste. Siehe auch 7.2 Meßergebnisse.

Die Lokalisierung einzelner Peaks ist in  $\vartheta/\varphi$  Richtung zufriedenstellend, eine genaue Aussage über den  $z$ -Wert jedes Punktes läßt sich dagegen noch nicht machen. Dies ändert sich durch einfaches Einfügen einer Ebene mit konstantem  $z$ -Wert (Bild 6.4).

Am Bildschirm ist durch interaktives Verschieben der Ebene in  $z$ -Richtung eine genaue Bestimmung der  $z$ -Koordinate jedes Punktes gegeben.

H. Akima beschreibt eine Triangulation ohne Mittelung [Akima 78]. In der  $xy$ -Ebene werden durch die Meßpunkte Dreiecke definiert und ein Polynom 3. Grades an die Eckpunkte jedes Dreiecks gefittet. Benachbarte Polynome sind an den Grenzlinien stetig und differenzierbar, die entstehende Fläche verläuft durch jeden Datenpunkt. Dieser Ansatz ist noch nicht implementiert worden.

Jedes Bild wird in einem zweistufigen Prozeß generiert:

Zuerst werden aus den Meßdaten durch die beschriebene Mittelung 3D-Dreiecke erzeugt, und deren Koordinaten zusammen mit einem Rot-Grün-Blau-Tripel (rgb-Wert) in eine Datei geschrieben. Der rgb-Wert gibt die Farbe des Dreiecks an. Desweiteren wird die im Bild sichtbare Schrift aus ca. 200 3D-Zylindern zusammengesetzt. Damit ist das Bild in einem 3D-Koordinatensystem ("3D-Welt") komplett beschrieben.

Im zweiten Schritt wird das Programm "rayshade" [RAYSHADE] verwendet. Diese Software wirkt quasi wie ein Fotoapparat: Von einem bestimmten Beobachter-Standpunkt aus, der in einem 3D-Koordinatensystem angegeben wird, wird ein "Foto" (Auflösung 1200x1000 Bildpunkte) der fiktiven 3D-Welt berechnet. Die beliebig komplexe 3D-Welt ist aus einfachen Objekten (Kugel, Kegel, Zylinder, Dreieck, Kubus, Ebene) zusammengesetzt. Die Position, Farbe und Oberflächeneigenschaft (spiegelnd, matt) jedes Objekts der 3D-Welt ist als lesbarer Klartext (ASCII-Text) in der Eingabe-Datei für rayshade enthalten. Rayshade erlaubt mehrere (farbige) Lichtquellen, die als Punktlichtquellen im 3D-Raum vorgegeben werden. Schatten können ebenso berücksichtigt werden wie Nebel, Tiefenschärfe / Brennweite des Objektivs. Die zu Grunde liegende Methode wird als "raytracing" [THALMANN 87] bezeichnet. Die Rechenzeit betrug auf einer Sun SPARC-STATION I etwa 45 Minuten. Zur Ausgabe der Bilder wurde ein PostScript-Laserdrucker und ein Graphikbildschirm (255 Farben mit dem X11-Window-System) verwendet. Außer zur Darstellung der Meßwerte wurde rayshade auch für die Graphiken im Theorie-Teil dieser Arbeit verwendet.

## 7 Meß-Ergebnisse

Gemessen wurden vier Waben-Materialien, deren Struktur in Bild 7.1 wiedergegeben ist, und zwei Aerogel-Proben:

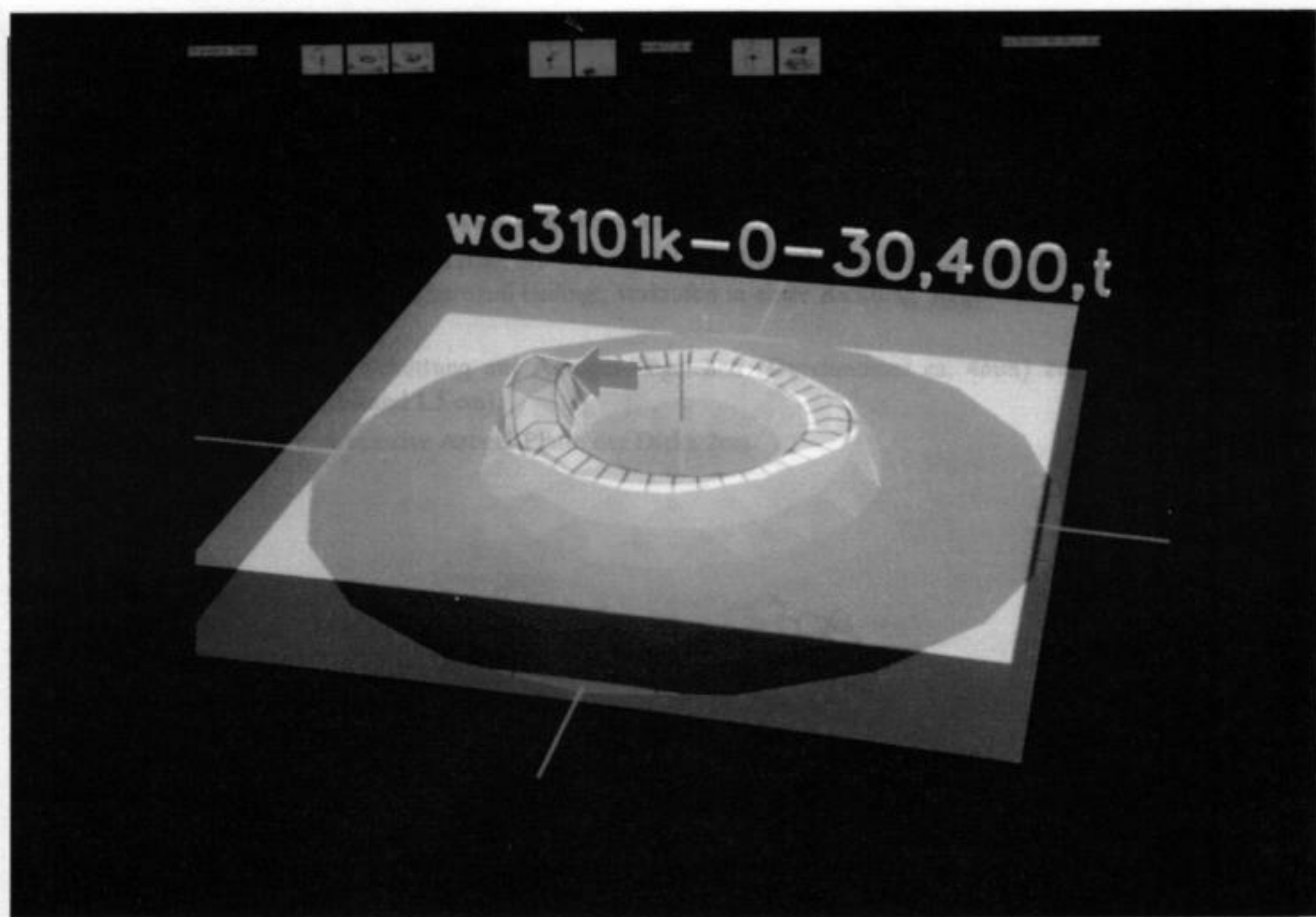


Bild 6.4, Die fertige Grafik mit Ebene  $z = \text{const}$ , die eine genaue Höhenanalyse des Gebirges erlaubt. Der Pfeil demonstriert das einfache Einfügen zusätzlicher Hinweise.

Bild 7.1, die untersuchten TWD Waben-Materialien maßstäblich in der Ansicht

Jede Messung hat folgende Parameter: Material, Einfallswinkel ( $\psi_{in}$  und  $\theta_{in}$ ) und Ausfallswinkel (nur  $\theta_{out}$  oder  $\theta_{out} / \psi_{out}$ ). Eine Meßreihe besteht aus zwei oder mehr Messungen bei denen ein Parameter variiert wird. Alle Meßreihen sind in folgender Übersicht aufgelistet:

Kapitel	TWD-Typ	gemessenes Ausfallrichtung	variierter Parameter	konstanter Parameter
7.1	Aerogel	$\theta = [0..360]$	Material	Einfallswinkel
7.2	Waben / Modell-Fit	$\theta = [0..90]$	$\theta_{in}$	Material
7.3	Waben / Transmission	$\theta = [90..180]$ $\psi = [0..360]$	$\theta_{in}$	$\psi_{out}$ , Material
	Waben / Transmission	$\theta = [90..180]$ $\psi = [0..360]$	Material	Material
	Waben / Transmission	$\theta = [90..180]$ $\psi = [0..360]$	$\psi_{in}$	$\theta_{out}$ , Material
	Waben / Reflexion	$\theta = [0..90]$ $\psi = [0..360]$	$\theta_{in}$	Material
	Waben / Reflexion	$\theta = [0..90]$ $\psi = [0..360]$	Material	Einfallswinkel

## 7 Meß-Ergebnisse

Gemessen wurden vier Waben-Materialien, deren Struktur in Bild 7.1 wiedergegeben ist, und zwei Aerogel-Proben:

**wa0301** besteht aus Kunststoff-Kapillaren (2 mm Durchmesser, 1,5 cm Länge), die an beiden Oberflächen angeschmolzen wurden, um einen stabilen Block zu bilden.

**waxy** besteht aus unregelmäßig geformten, transparenten kleinen Zylindern (4 mm Durchmesser, 3 cm Länge), die aneinander geklebt sind.

**wa0325** besteht aus Glasröhrchen (2 mm Durchmesser, 4 cm Länge), die zwischen zwei Glasplatten in dichter Packung aufgeschichtet sind.

**wa3101** ist das Standard-Material, die Waben sind quadratisch (4 mm Kantenlänge, 8 cm Länge). Durch den Herstellungsprozeß bedingt, verlaufen in einer Richtung Stege mit einer größeren Schichtdicke.

**Aerogel-I** ist eine Schüttung aus Aerogel-Kügelchen (Durchmesser ca. 4mm) zwischen zwei Glasplatten (Abstand 1,5 cm).

**Aerogel-II** ist eine massive Aerogel-Platte der Dicke 2cm.

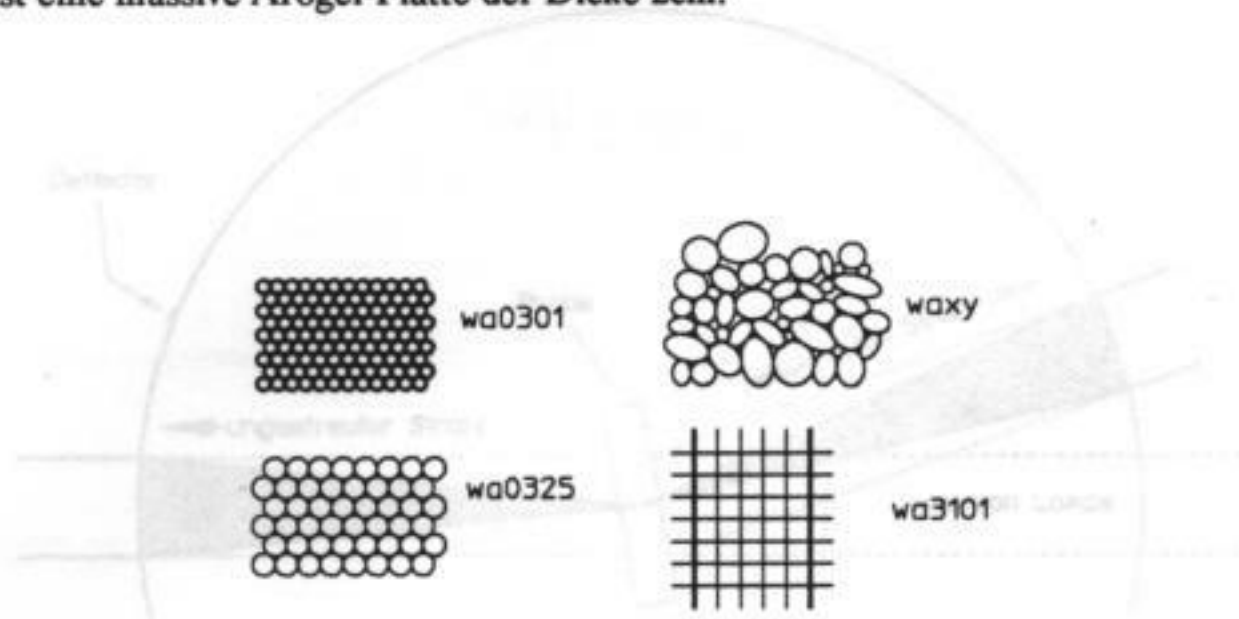


Bild 7.1, die untersuchten TWD Waben-Materialien maßstäblich in der Aufsicht

Jede Messung hat folgende Parameter: Material, Einfallswinkel ( $\varphi_{in}$  und  $\vartheta_{in}$ ) und Ausfallswinkel (nur  $\vartheta_{out}$  oder  $\vartheta_{out} / \varphi_{out}$ ). Eine Meßreihe besteht aus zwei oder mehr Messungen bei denen ein Parameter variiert wird. Alle Meßreihen sind in folgender Übersicht aufgelistet:

Kapitel	TWD-Typ	gemessene Ausfallsrichtung	variierter Parameter	konstanter Parameter
7.1	Aerogel	$\vartheta = [0..360]$	Material	Einfallswinkel
7.2	Waben / Modell-Fit	$\vartheta = [0..90]$	$\vartheta_{in}$	Material
7.3	Waben / Transmission	$\vartheta = [90..180]$ $\varphi = [0..360]$	$\vartheta_{in}$	$\varphi_{in}$ , Material
	Waben / Transmission	$\vartheta = [90..180]$ $\varphi = [0..360]$	Material	Material
	Waben / Transmission	$\vartheta = [90..180]$ $\varphi = [0..360]$	$\varphi_{in}$	$\vartheta_{in}$ , Material
	Waben / Reflexion	$\vartheta = [0..90]$ $\varphi = [0..360]$	$\vartheta_{in}$	Material
	Waben / Reflexion	$\vartheta = [0..90]$ $\varphi = [0..360]$	Material	Einfallswinkel

## 7.1 Messungen mit 2 Freiheitsgraden, Aerogel

Diese Messungen wurden mit **Aerogel-I** und **Aerogel-II** durchgeführt. Die Reflexion an der Glasplatte ist erwartungsgemäß höher als an der Aerogel-Oberfläche und die Schüttung aus Kügelchen streut mehr (Verhältnis Transmission/Reflexion und Keulenform der Transmission). Ersteres liegt an der größeren Dichte der Glasplatte (Aerogel-Dichte 1.02..1.05), letzteres an der Streuung an den Oberflächen der Kügelchen.

Die Breite des Strahlenbündels ist die Ursache für die breiten Peaks des transmittierten und reflektierten Lichts (Bild 7.2). In den Kurven sind zwei Peaks erkennbar, da die Lampenhalterung einen Schatten wirft.

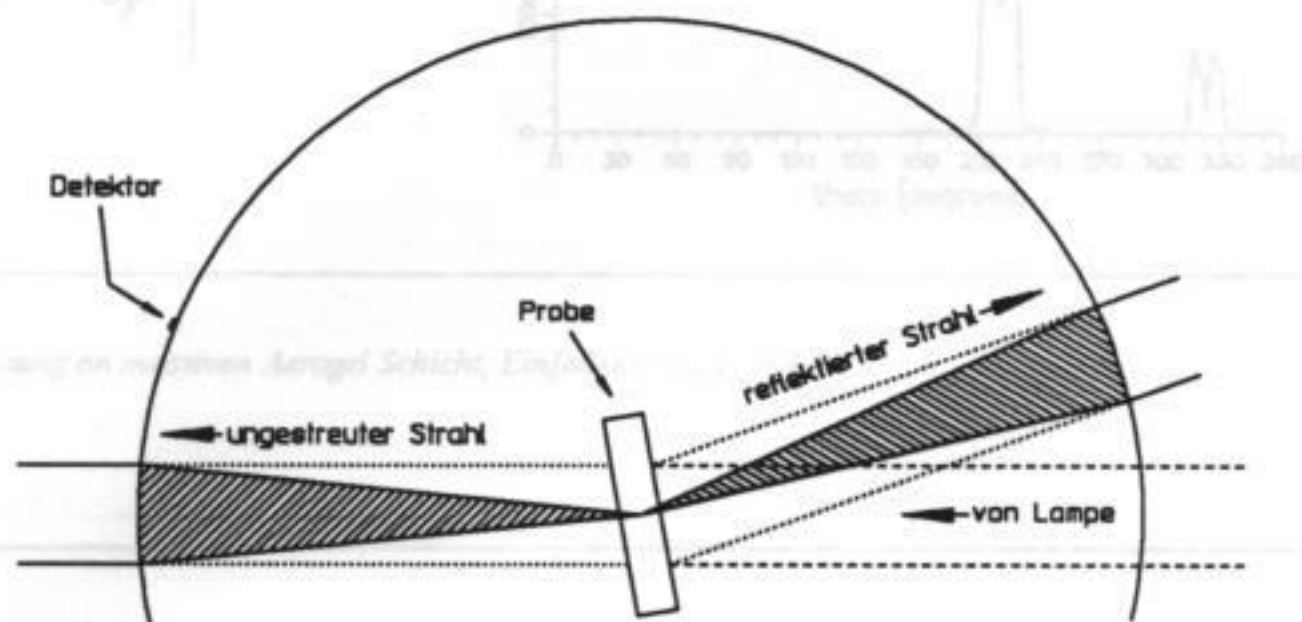


Bild 7.2, Der Detektor empfängt auch bei völlig transparenter Probe Strahlung im schraffierten Winkelbereich. Analog führt auch eine ideale Reflexion zu einem breiten Peak

Durch Vorsatz eines Grün- und Rotfilters (Filter mit Augencurve und Schott Filter RG715) wurde die vermutete Wellenlängen-Abhängigkeit der Streuung gemessen. Mit dem derzeitigen Stand der Apparatur konnte praktisch keine Streuung an massiven Aerogel-Scheiben nachgewiesen werden. Die Streuung an Aerogel Kugel-Schüttungen ist eine Überlagerung von Rayleigh Streuung an den Aerogel-Poren (Rayleigh) und an den Oberflächen der Kugeln (Mie, Vorwärts- und Rückwärtsstreuung nicht symmetrisch). Für kurze Wellenlängen ist besonders die Rückstreuung größer. Die Empfindlichkeit der Solarzelle im langwelligen Bereich bedingt den unterschiedlichen Maßstab der Diagramme (Bild 7.5 und 7.6).

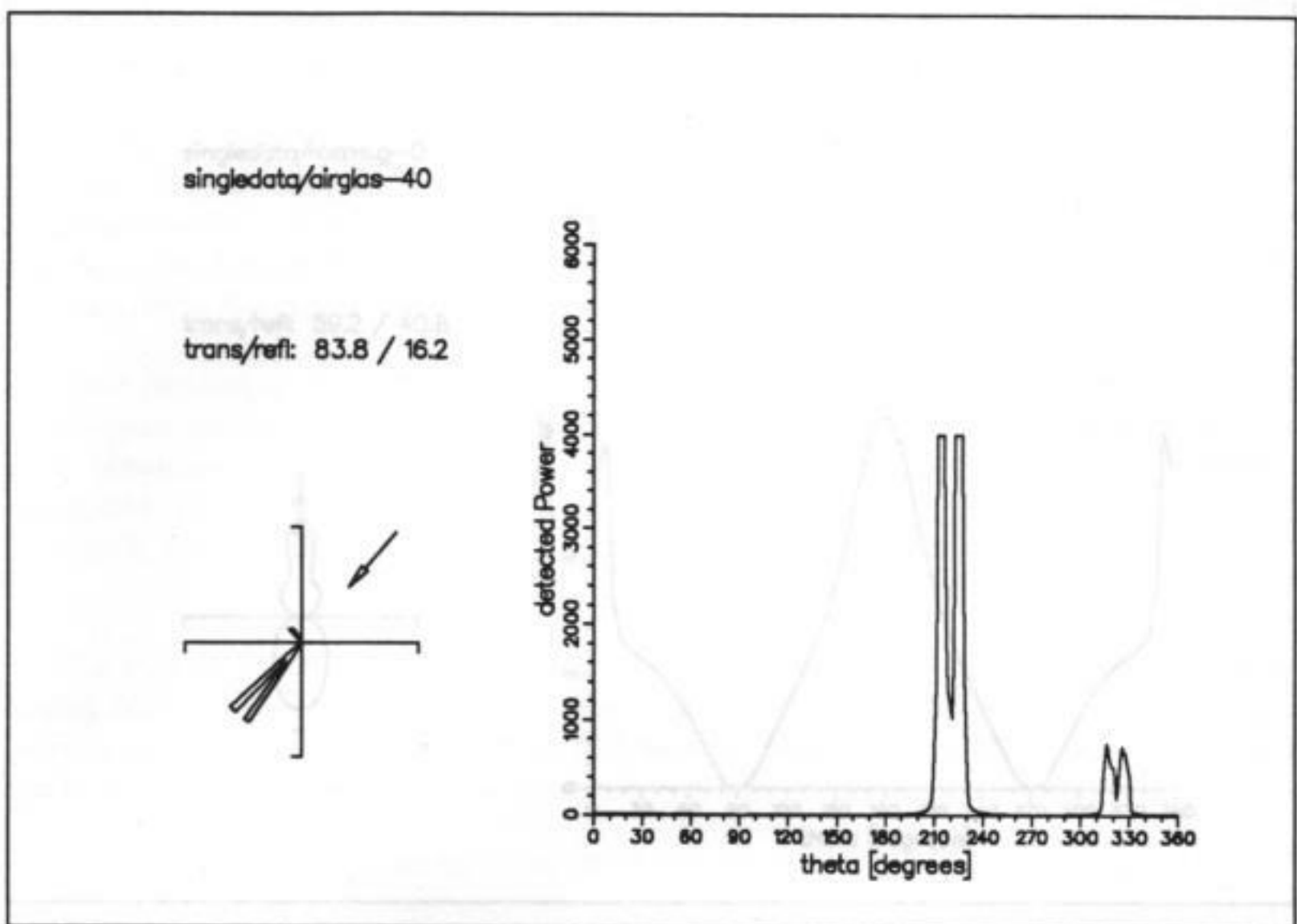


Bild 7.3, Streuung an massiven Aerogel Schicht, Einfallswinkel  $\theta_{in} = 40^\circ$ .

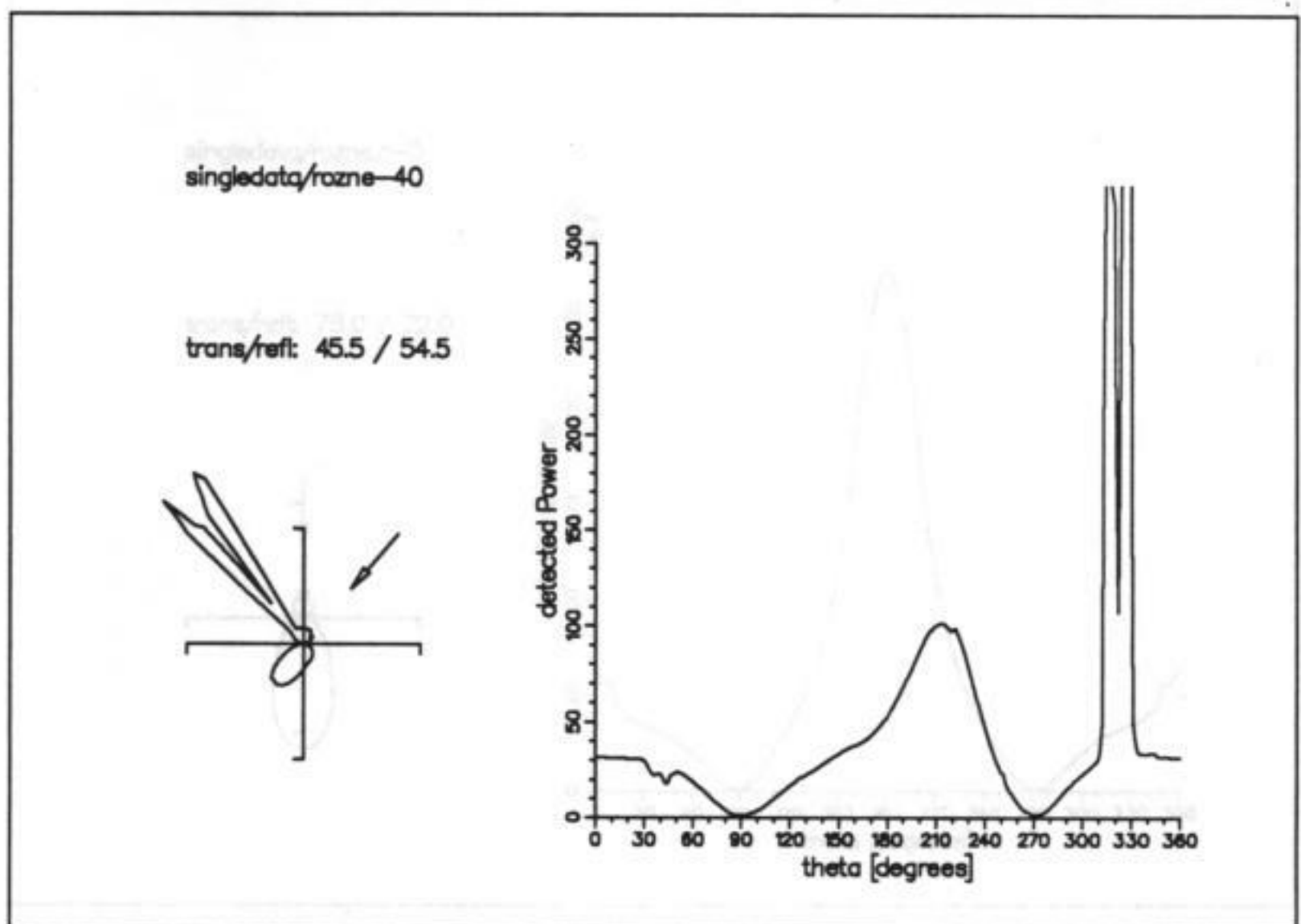


Bild 7.4, Streuung an Aerogel Granulat

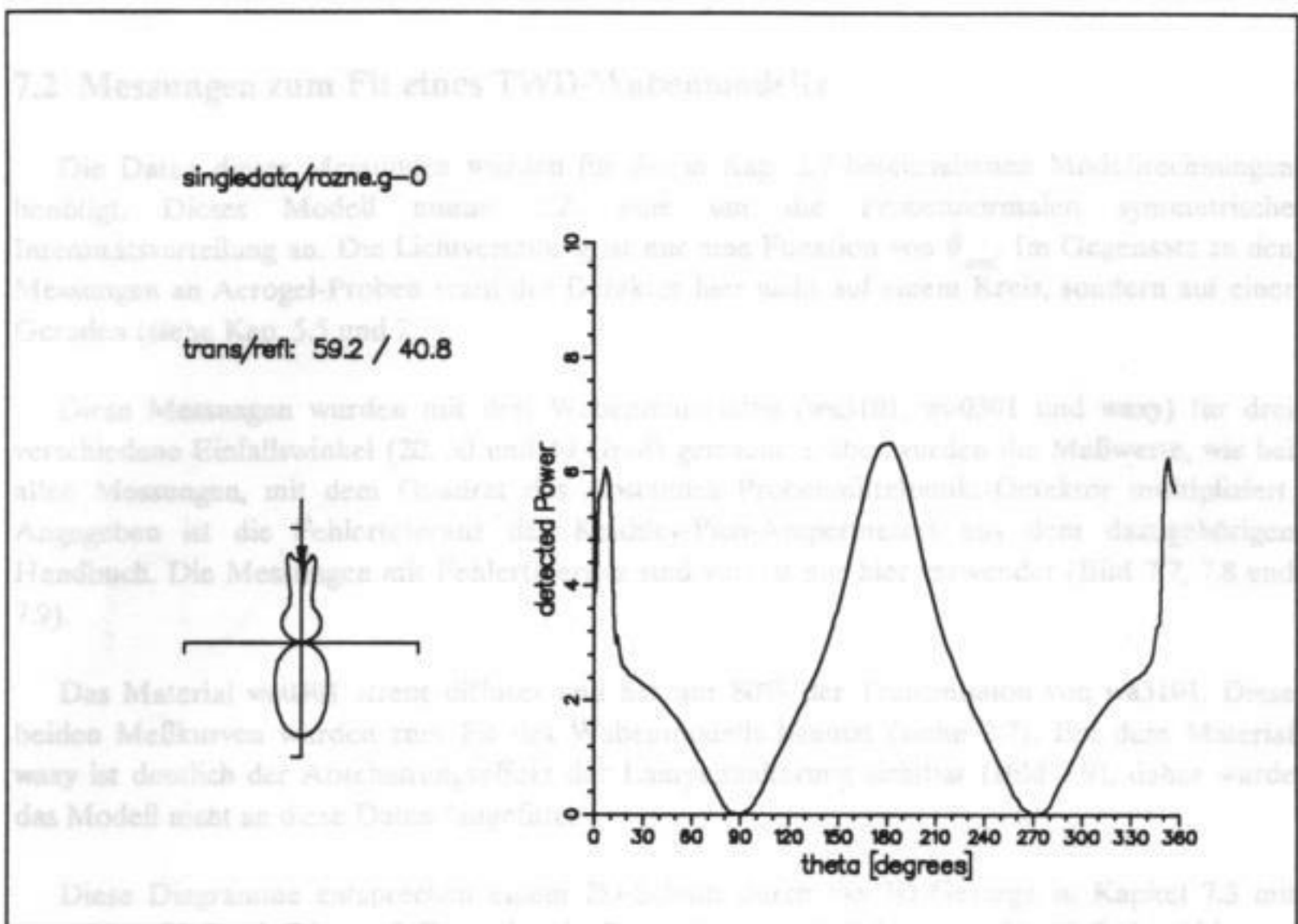


Bild 7.5, Streuung an Aerogel Granulat für kurze Wellenlängen

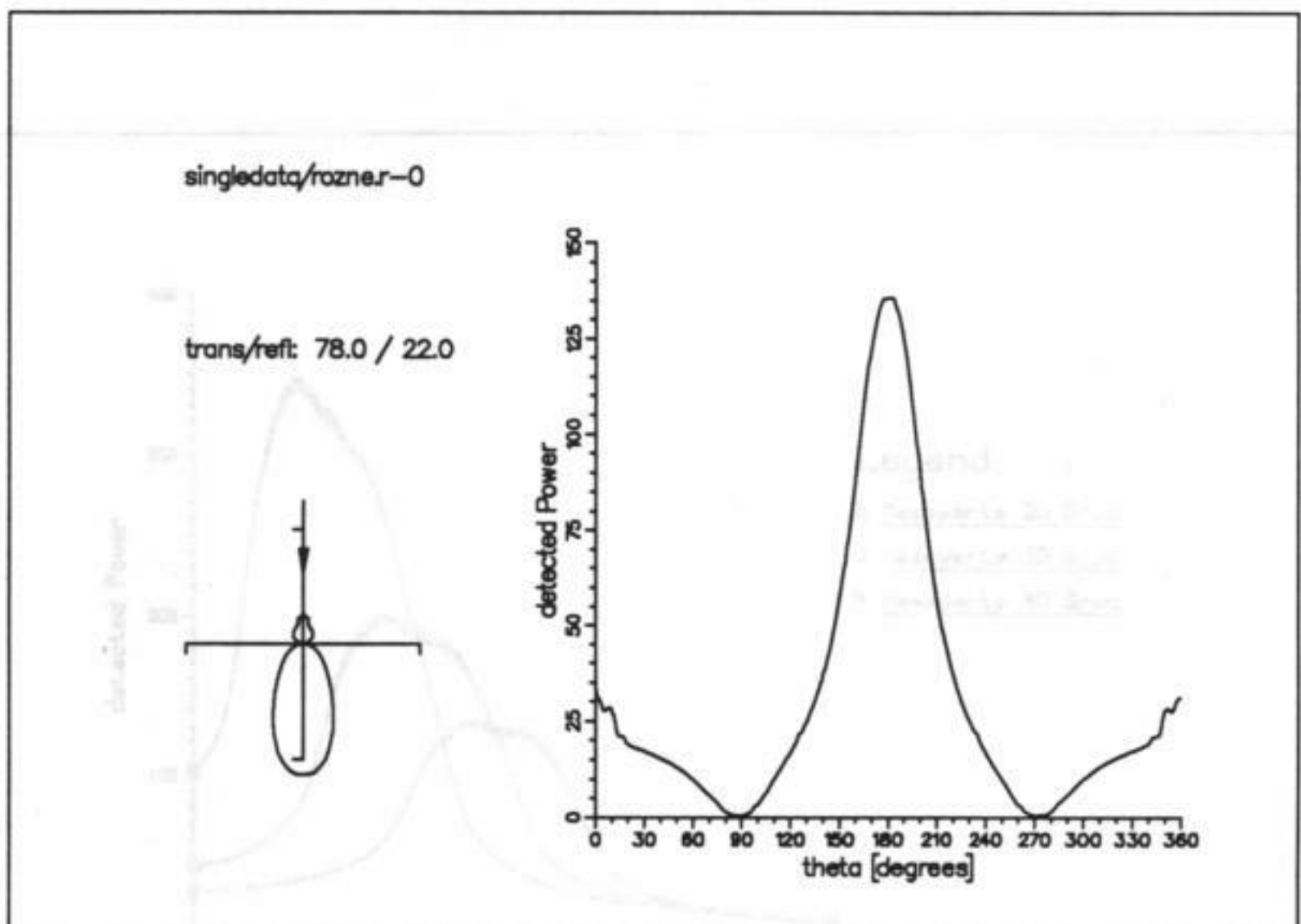


Bild 7.6, Streuung an Aerogel Granulat für  $\lambda > 650\text{nm}$

## 7.2 Messungen zum Fit eines TWD-Wabenmodells

Die Daten dieser Messungen wurden für die in Kap. 2.7 beschriebenen Modellrechnungen benötigt. Dieses Modell nimmt z.Z. eine um die Probennormalen symmetrische Intensitätsverteilung an. Die Lichtverteilung ist nur eine Funktion von  $\theta_{out}$ . Im Gegensatz zu den Messungen an Aerogel-Proben scant der Detektor hier nicht auf einem Kreis, sondern auf einer Geraden (siehe Kap. 5.5 und 2.7).

Diese Messungen wurden mit drei Wabenmaterialien (wa3101, wa0301 und waxy) für drei verschiedene Einfallswinkel (20, 30 und 40 Grad) gemacht. Dabei wurden die Meßwerte, wie bei allen Messungen, mit dem Quadrat des Abstandes Probenmittelpunkt-Detektor multipliziert. Angegeben ist die Fehlertoleranz des Keithley-Pico-Amperimeters aus dem dazugehörigen Handbuch. Die Messungen mit Fehlertoleranz sind vorerst nur hier verwendet (Bild 7.7, 7.8 und 7.9).

Das Material wa0301 streut diffuser und hat nur 80% der Transmission von wa3101. Diese beiden Meßkurven wurden zum Fit des Wabenmodells benutzt (siehe 2.7). Bei dem Material waxy ist deutlich der Abschattungseffekt der Lampenhalterung sichtbar (Bild 7.9), daher wurde das Modell nicht an diese Daten "angefittet".

Diese Diagramme entsprechen einem 2D-Schnitt durch die 3D-Gebirge in Kapitel 7.3 mit  $\varphi = \text{const.} = 90$  Grad. Die zwei-dimensionale Darstellung ermöglicht zwar eine einfache Ablesung der Meßwerte, gibt aber keinen Hinweis auf die Abhängigkeit der Transmission vom Ausfallswinkel  $\varphi$ .

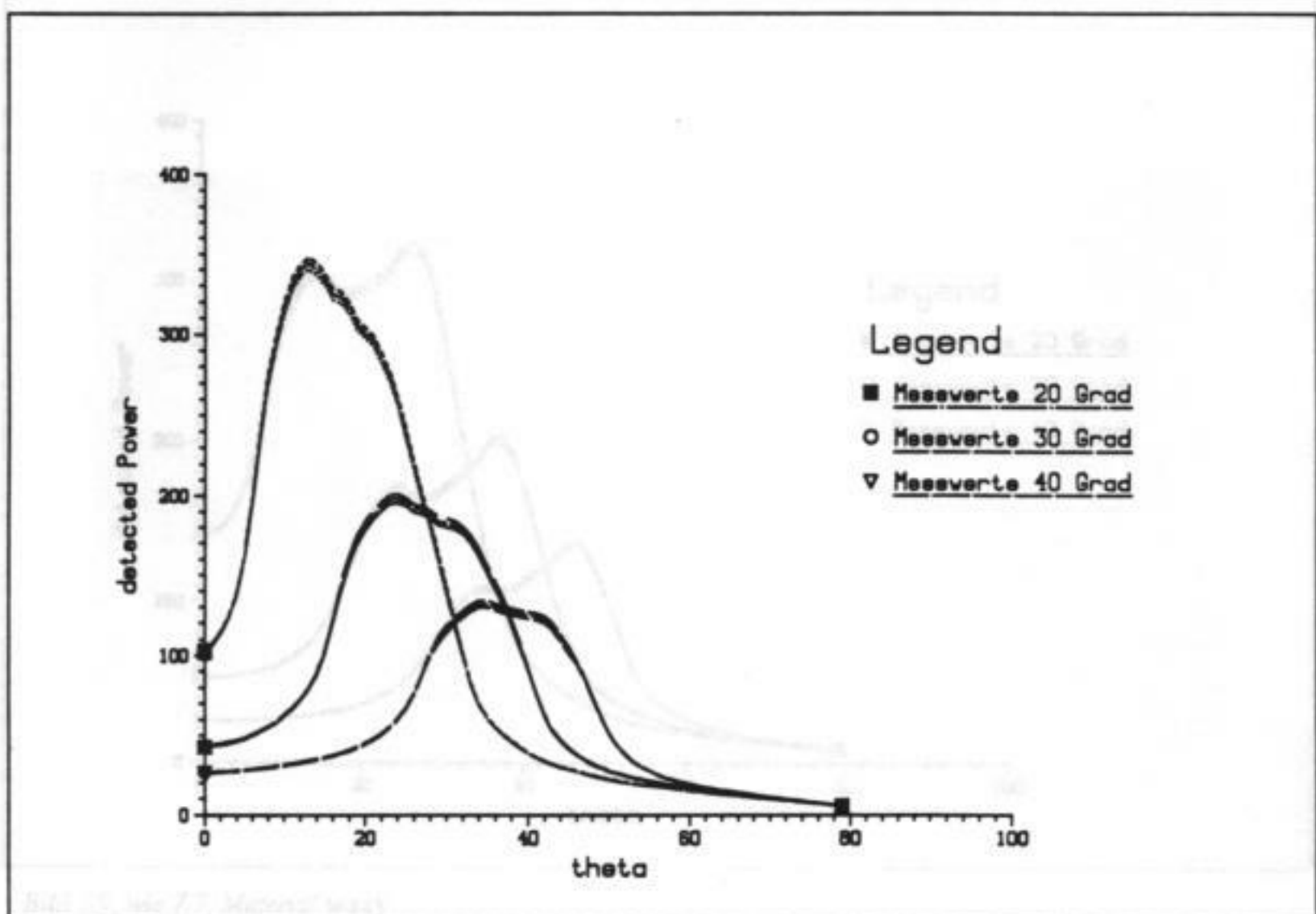


Bild 7.7, Meßergebnisse für verschiedene Einfallswinkel mit Fehlerbreite (siehe auch 8.3), Material wa3101

7.3 Messungen mit 4 Freiheitsgraden

7.3.1 Transmission

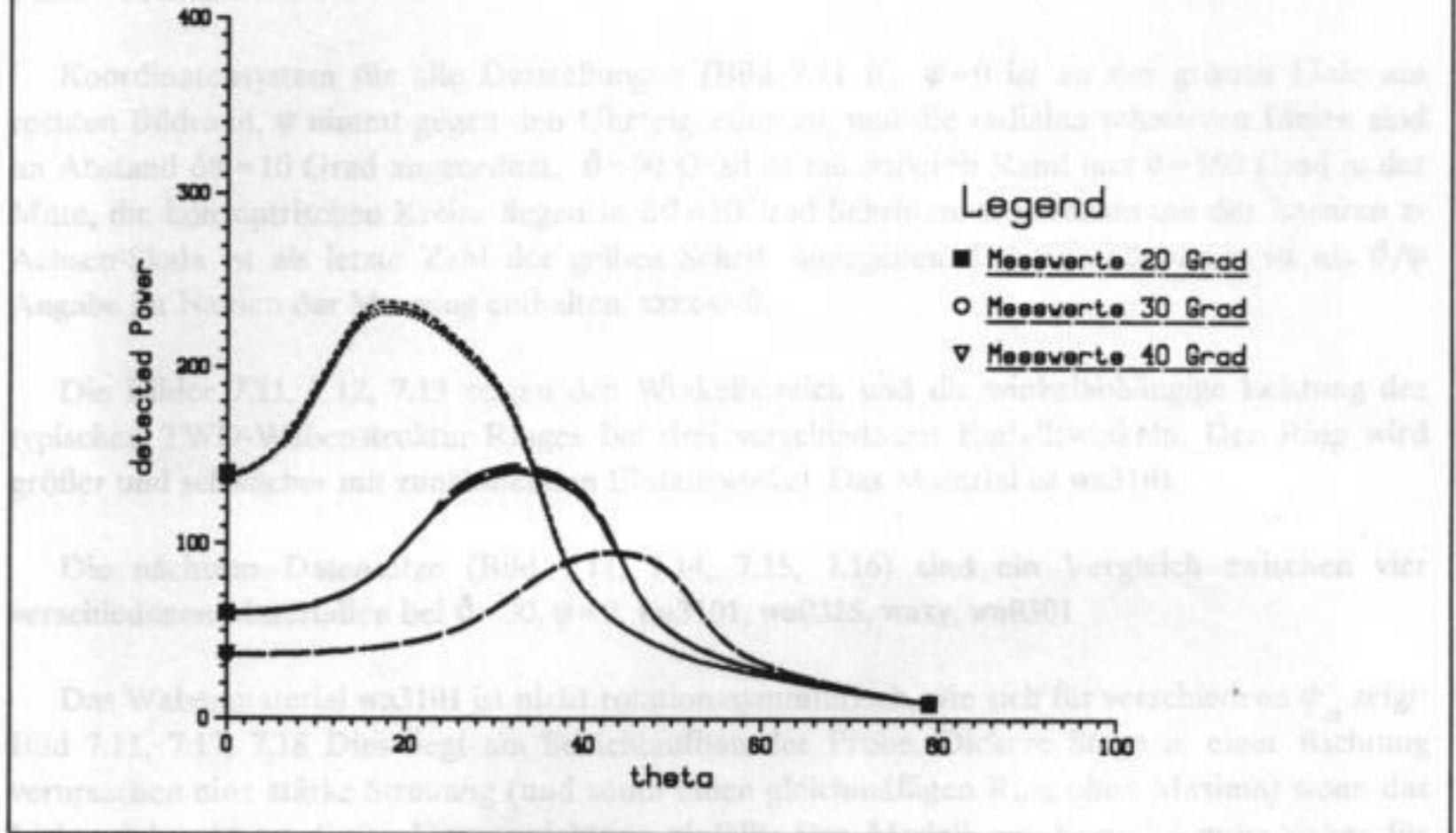


Bild 7.8, wie 7.7, Material wa0301

Als Referenz ist die Transmission von Zylinderform angegeben. Sie nicht eben nicht Lambert-Strahler darstellt. Die Transmission zeigt zwei symmetrische "Pak" in Vorwärts-Richtung

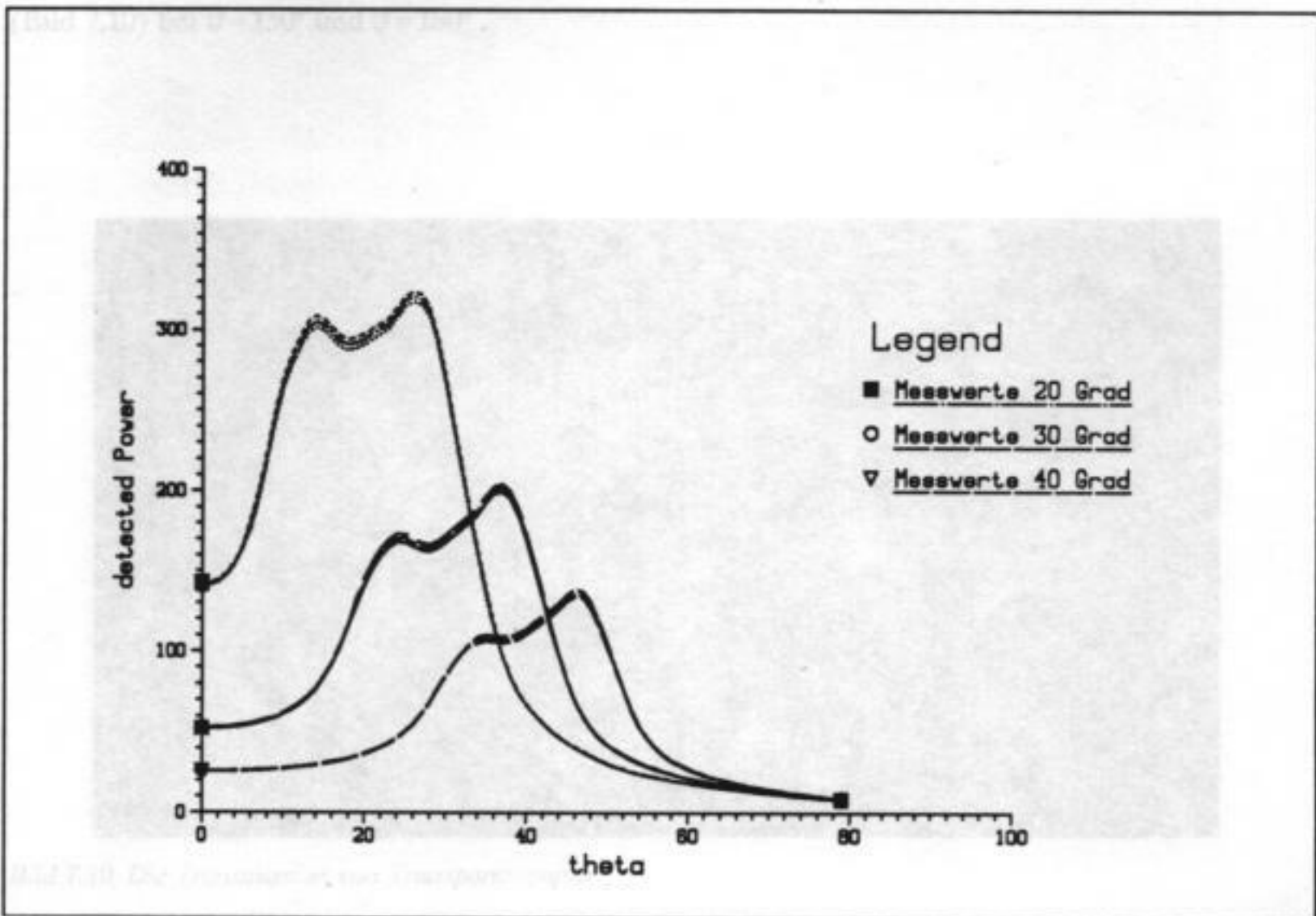


Bild 7.9, wie 7.7, Material waxy



## 7.3 Messungen mit 4 Freiheitsgraden

### 7.3.1 Transmission

Koordinatensystem für alle Darstellungen (Bild 7.11 ff):  $\varphi=0$  ist an der grünen Linie am rechten Bildrand,  $\varphi$  nimmt gegen den Uhrzeigersinn zu, und die radialen schwarzen Linien sind im Abstand  $\Delta\varphi=10$  Grad angeordnet.  $\vartheta=90$  Grad ist am äußeren Rand und  $\vartheta=180$  Grad in der Mitte, die konzentrischen Kreise liegen in  $\Delta\vartheta=10$ Grad Schritten. Das Maximum der linearen z-Achsen-Skala ist als letzte Zahl der gelben Schrift angegeben. Der Einfallswinkel ist als  $\vartheta/\varphi$  Angabe im Namen der Messung enthalten: xxxx- $\varphi$ - $\vartheta$ .

Die Bilder 7.11, 7.12, 7.13 zeigen den Winkelbereich und die winkelabhängige Leistung des typischen TWD-Wabenstruktur-Ringes bei drei verschiedenen Einfallswinkeln. Der Ring wird größer und schwächer mit zunehmenden Einfallswinkel. Das Material ist wa3101.

Die nächsten Datensätze (Bild 7.11, 7.14, 7.15, 7.16) sind ein Vergleich zwischen vier verschiedenen Materialien bei  $\vartheta=30$ ,  $\varphi=0$ : wa3101, wa0325, waxy, wa0301

Das Wabenmaterial wa3101 ist **nicht** rotationssymmetrisch, wie sich für verschiedene  $\varphi_{in}$  zeigt: Bild 7.11, 7.17, 7.18 Dies liegt am Schichtaufbau der Probe. Dickere Stege in einer Richtung verursachen eine starke Streuung (und somit einen gleichmäßigen Ring ohne Maxima) wenn das Licht senkrecht zu dieser Vorzugsrichtung einfällt. Das Modell aus Kap. 2.7 muss daher für wa3101 erweitert werden, bevor es dieses Material vollständig beschreibt. Dieses Ergebnis verdeutlicht damit die Notwendigkeit einer aussagefähigen 3D-Darstellung der Meßwerte.

Als Referenz ist die Transmission von Zeichenpapier angegeben, das **nicht** einen reinen Lambert-Strahler darstellt. Die Transmission zeigt einen deutlichen "Peak" in Vorwärts-Richtung (Bild 7.10) bei  $\vartheta=150^\circ$  und  $\varphi=180^\circ$ .

Bild 7.12, wa3101, Einfallswinkel  $\vartheta=40^\circ$ ,  $\varphi=0$

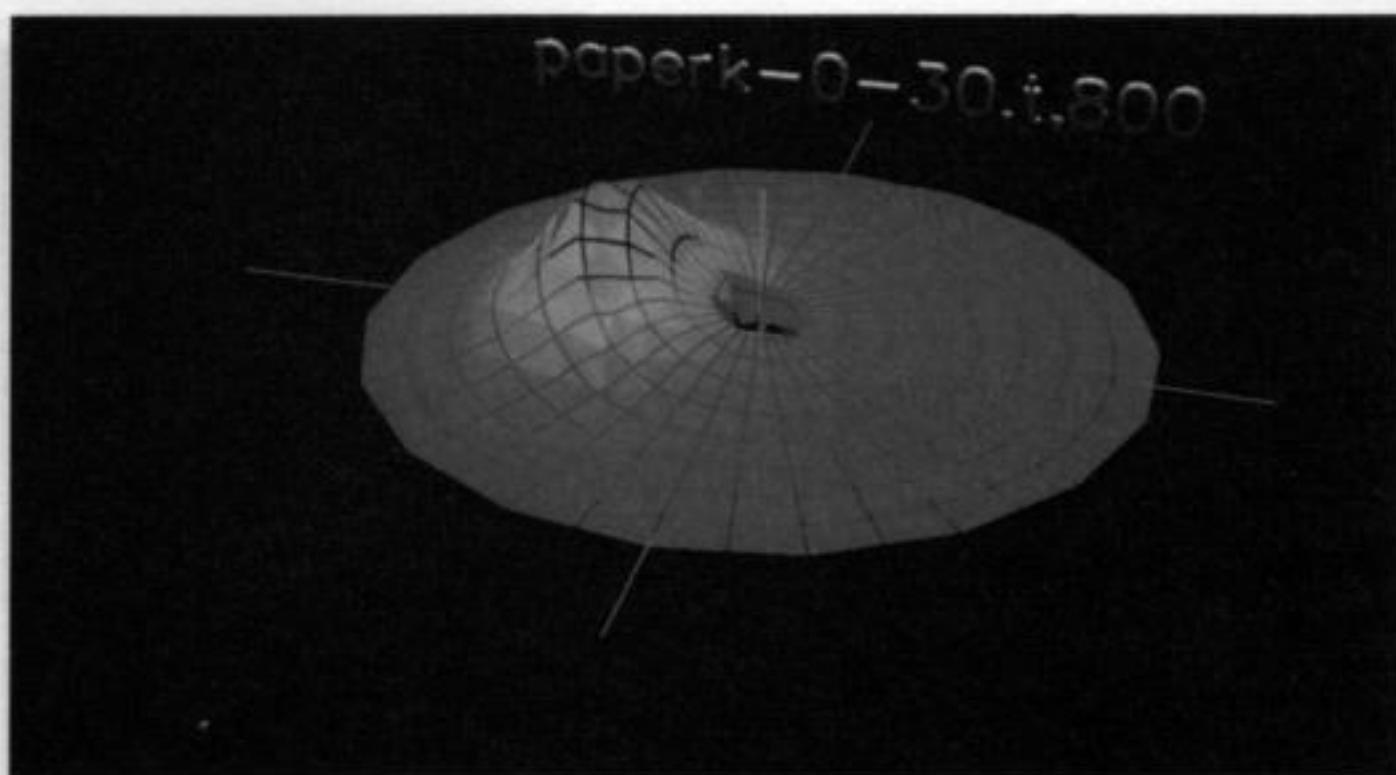


Bild 7.10, Die Transmission von Transparentpapier.

Bild 7.13, wa3101, Einfallswinkel  $\vartheta=30^\circ$ ,  $\varphi=0$ , am TWD Halter wird schwebendes Licht führt zu dem beiden grünen Namen.

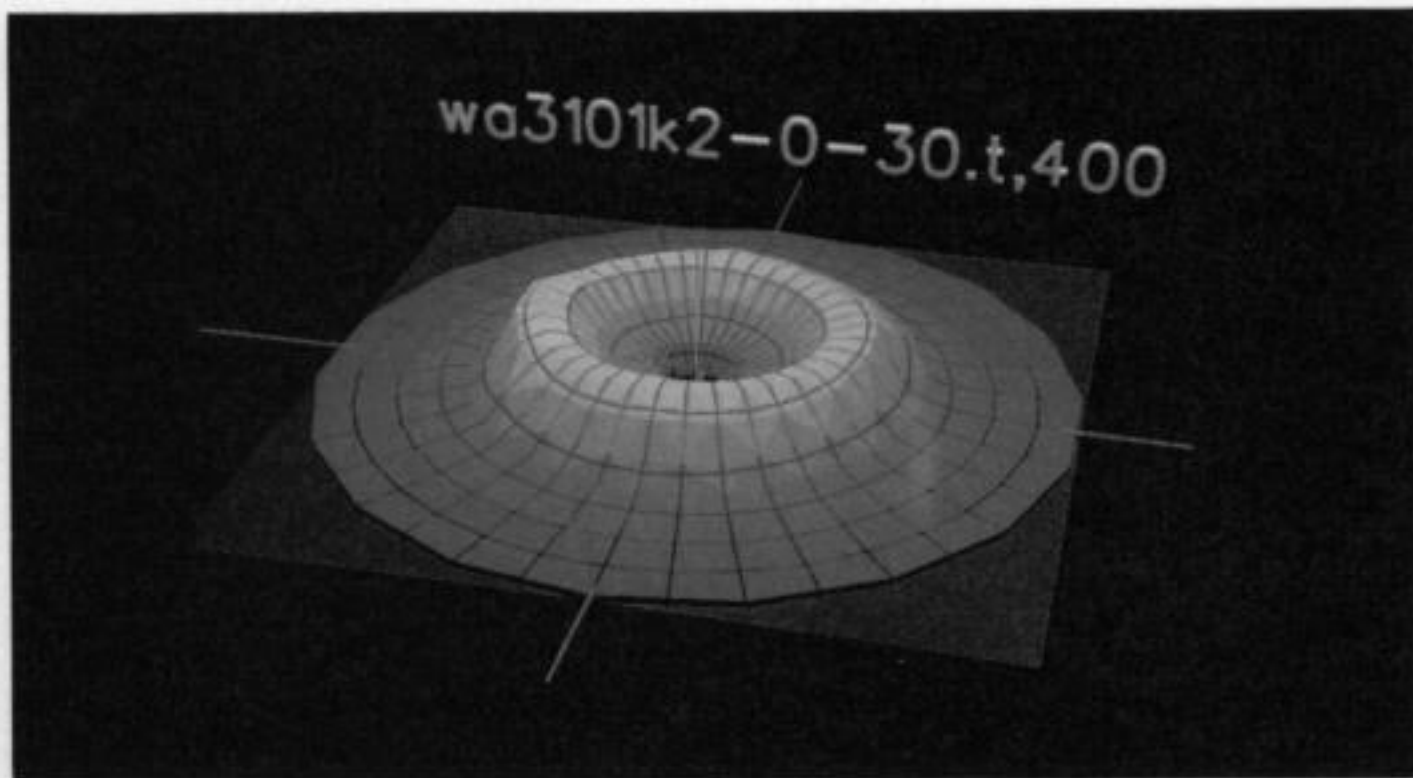


Bild 7.11, wa3101, Einfallswinkel  $\theta=30, \varphi=0$ , Glasplatte, wenig Transmission durch starke Reflexion an der Glas-Luft-Grenzfläche

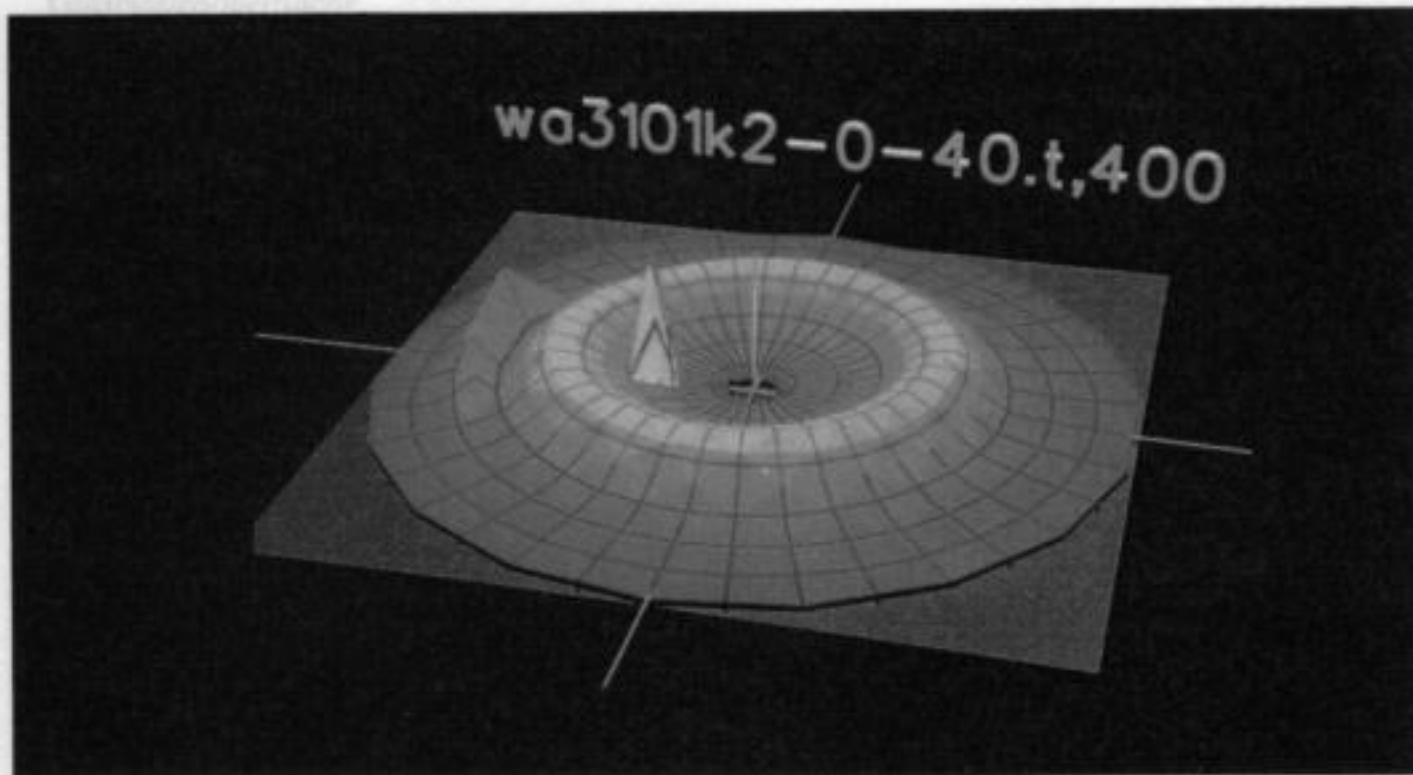


Bild 7.12, wa3101, Einfallswinkel  $\theta=40, \varphi=0$ ,

Bild 7.15 zeigt entsprechende Messungen für Einfallswinkel des flachen Maximums durch nicht verteiltes

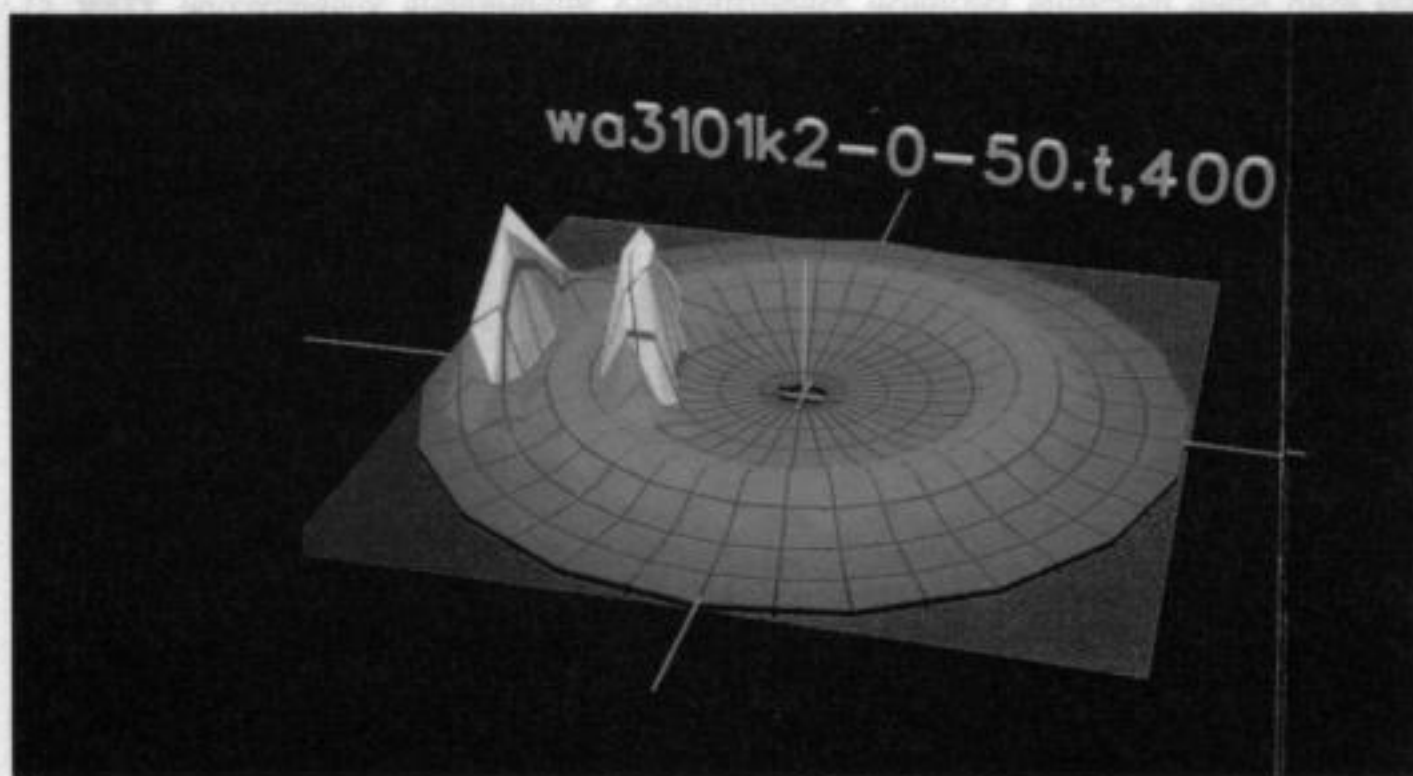


Bild 7.13, wa3101, Einfallswinkel  $\theta=50, \varphi=0$ , am TWD Halter vorbei scheinendes Licht führt zu den beiden grauen Flanken.

Bild 7.14, wa3101, Kurvenzylinder, an Oberfläche angebracht, relativ starke Transmission durch geringe Dicke, gleichmäßiger Ring

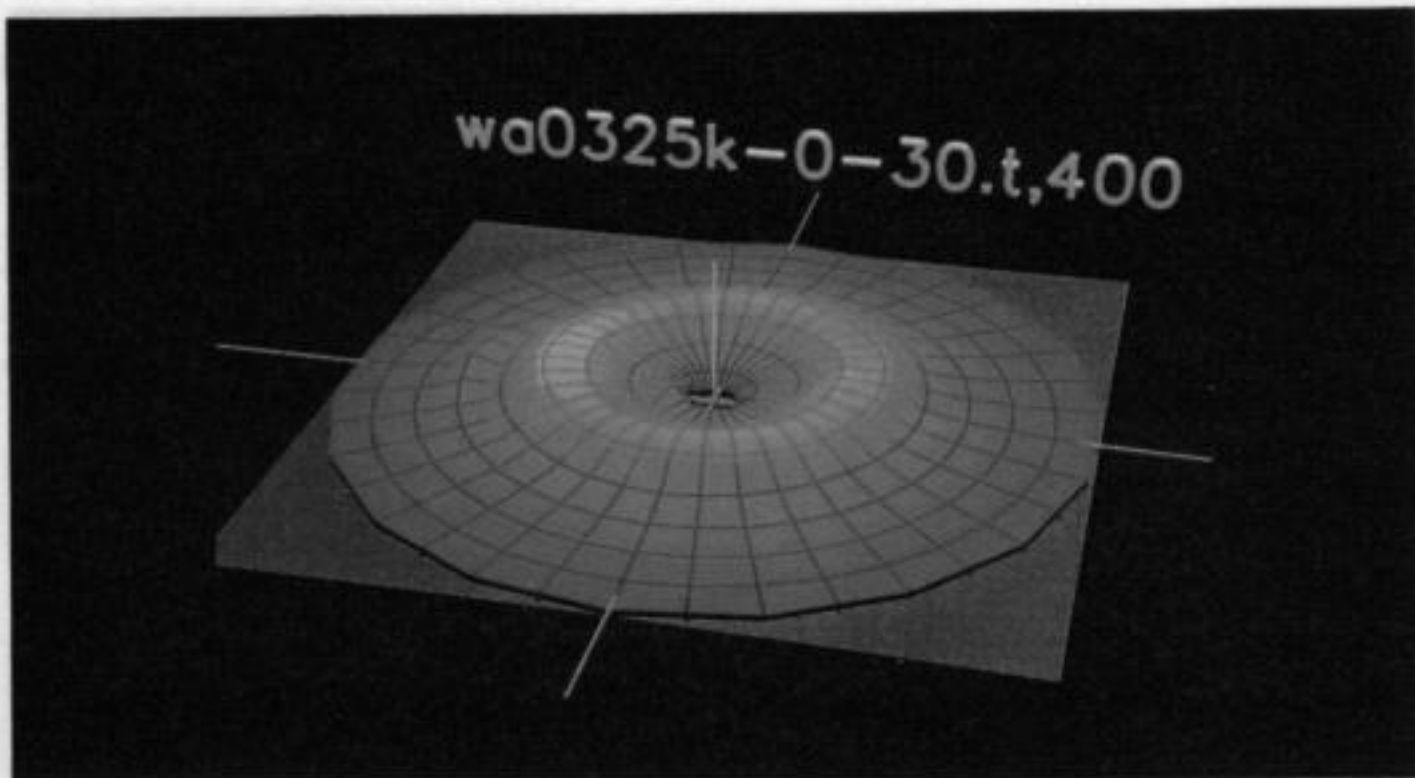


Bild 7.14, wa0325, Glasröhrchen zwischen 2 Glasplatten, wenig Transmission durch starke Reflexion an der Glasplattenoberfläche

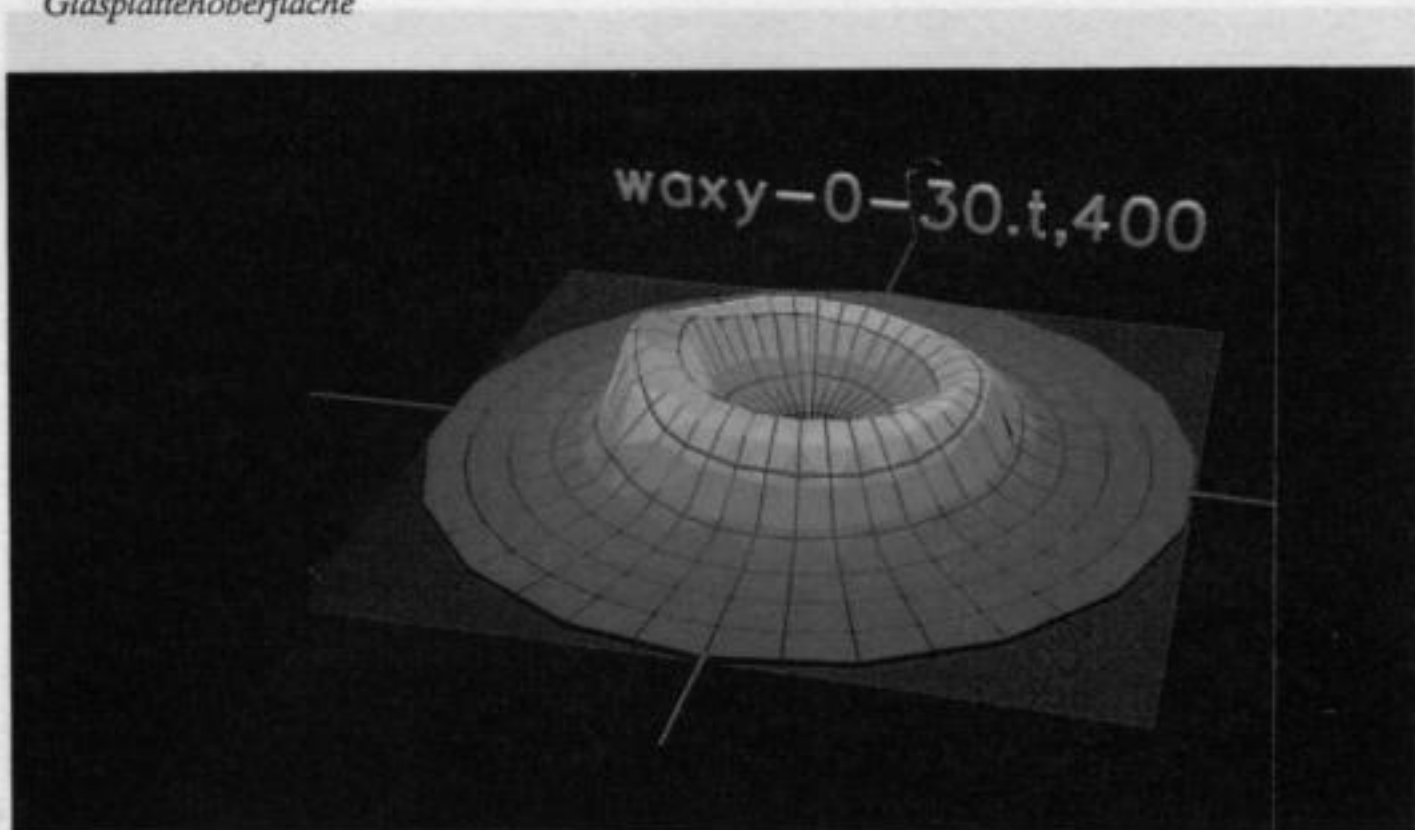


Bild 7.15, waxy, unregelmäßige dünnwandige Kunststoffzylinder, deutliches Maximum durch nicht gestreuten Anteil

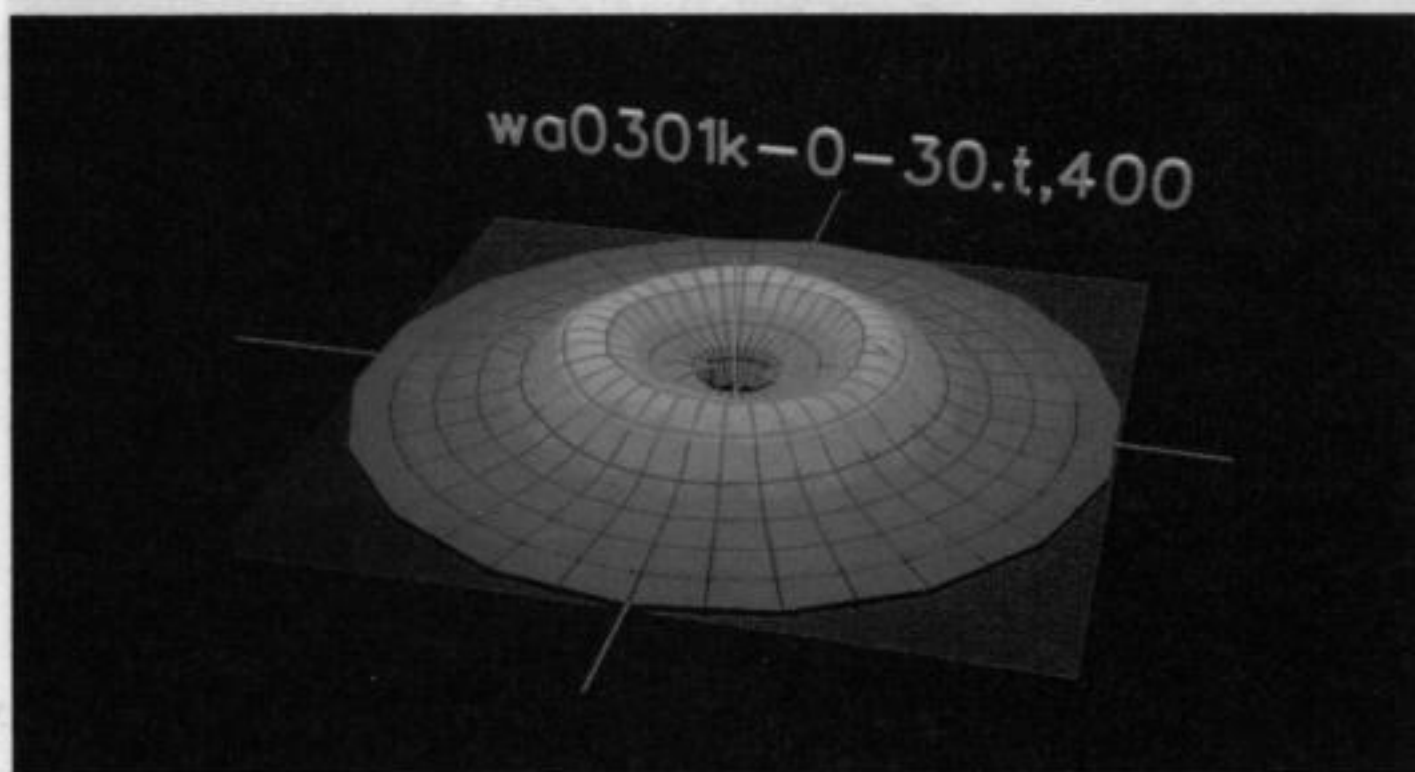


Bild 7.16, wa0301, Kunststoffzylinder, an Oberfläche angeschmolzen, relativ starke Transmission durch geringe Dicke, gleichmäßiger Ring

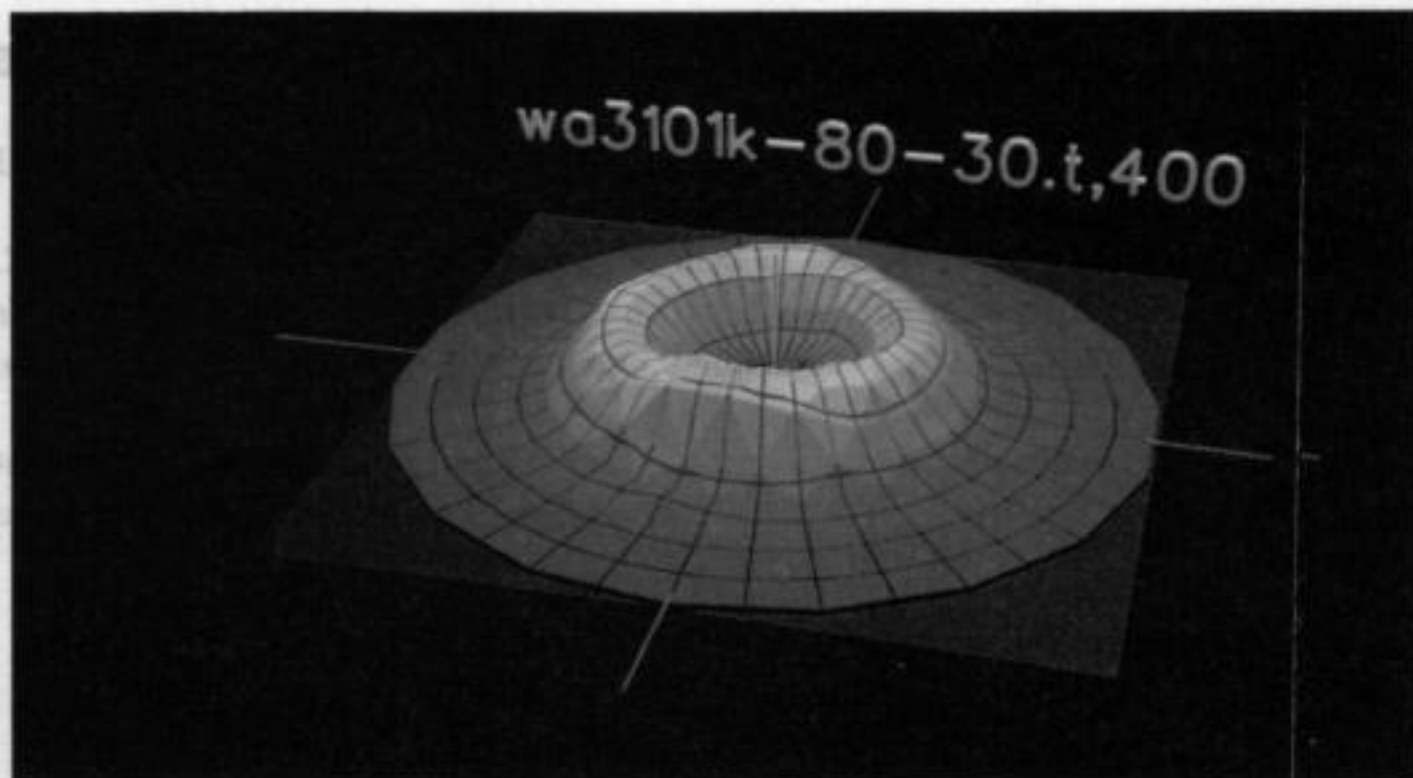


Bild 7.17, wa3101,  $\varphi=80$ , gleichmäßiger Ring + ungestreutem Anteil

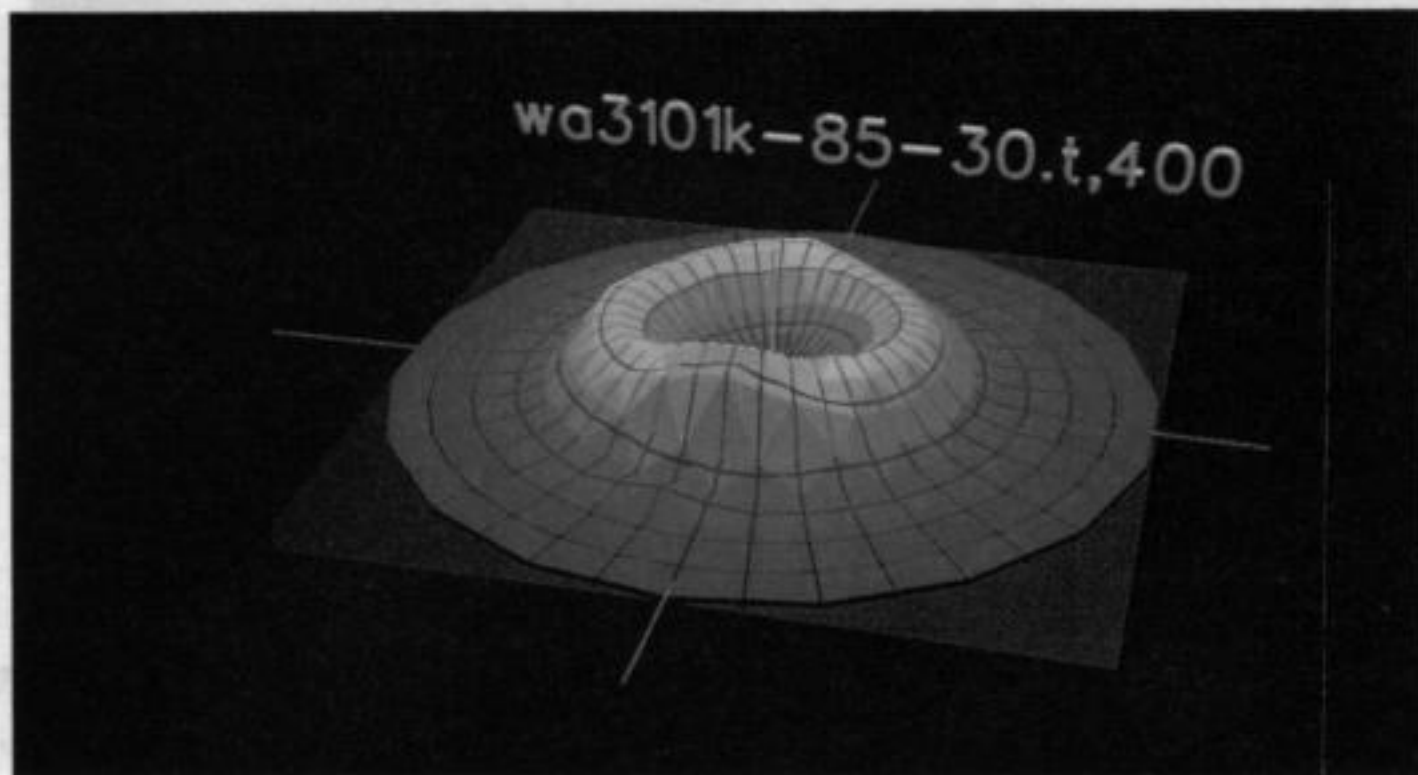


Bild 7.18, wa3101,  $\varphi=85$ , Zunahme des ungestreuten Anteil

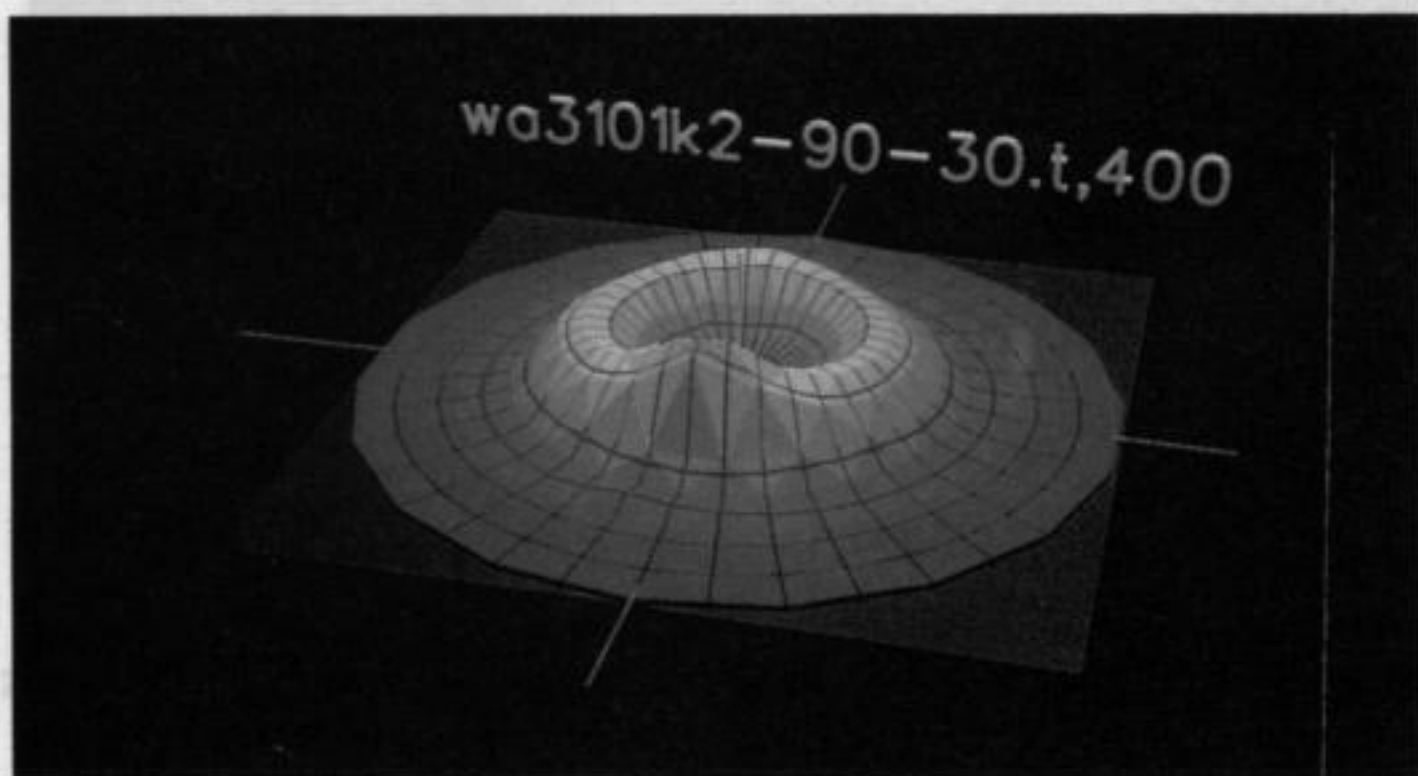


Bild 7.19, wa3101,  $\varphi=90$ , Maximum des ungestreuten Anteils

### 7.3.2 Reflexion

Hier ist  $\vartheta = 0$  Grad in der Mitte, sonst ist das Koordinatensystem wie in 7.3.1.

7.21 und 7.22 zeigen die stärkere Reflexion an der Wabenoberfläche bei flacherem Einfallswinkel, das Material ist wa3101. Auf Grund von "Einfallswinkel=Ausfallswinkel" liegt das Maximum der Reflexion bei  $\vartheta = 30$  Grad und  $\vartheta = 50$  Grad ( $\varphi = 180$  Grad).

Die letzten 3 Diagramme zeigen einen Vergleich zwischen den Reflexions-Eigenschaften dreier verschiedener Materialien ( $\vartheta = 30$ ,  $\varphi = 0$ ):

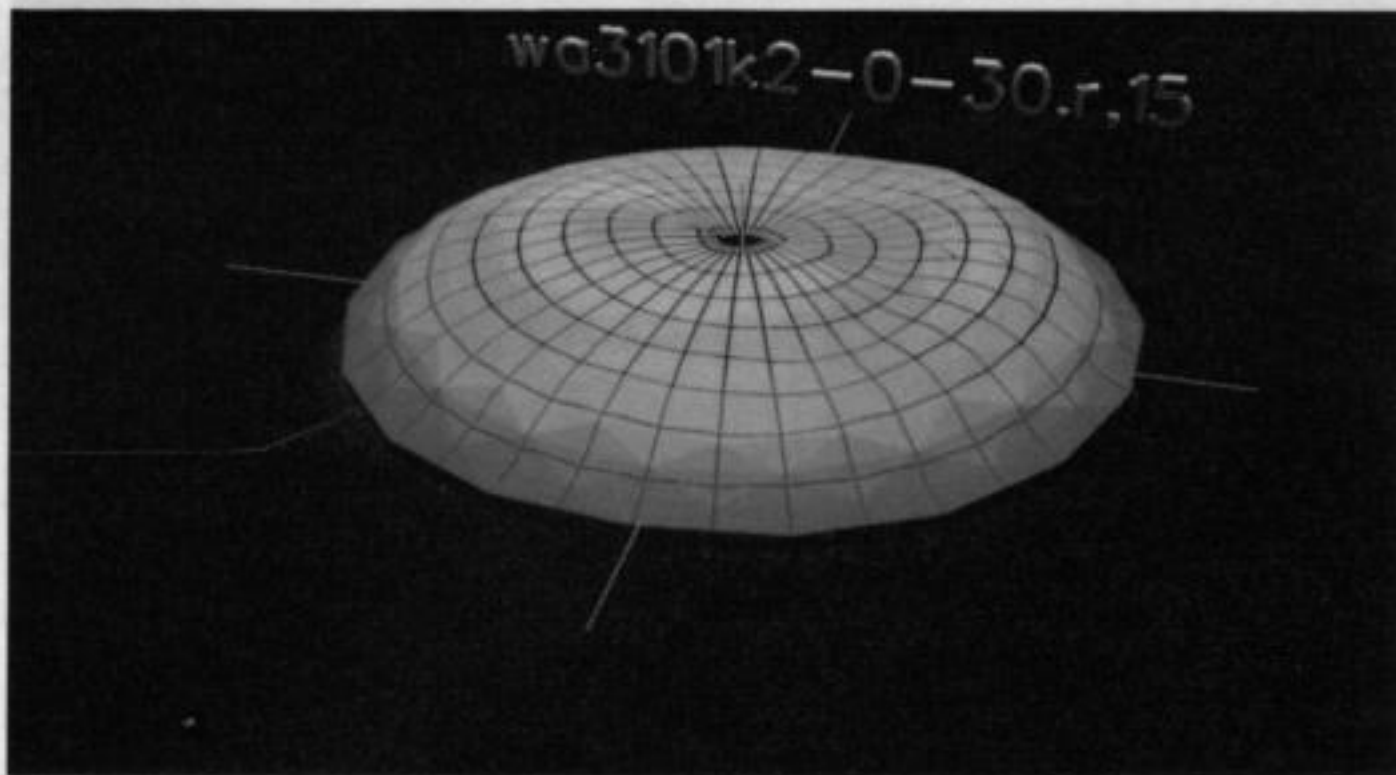


Bild 7.21, wa3101,  $\vartheta = 30$  Grad, Maximum der z-Achsen-Skala: 15

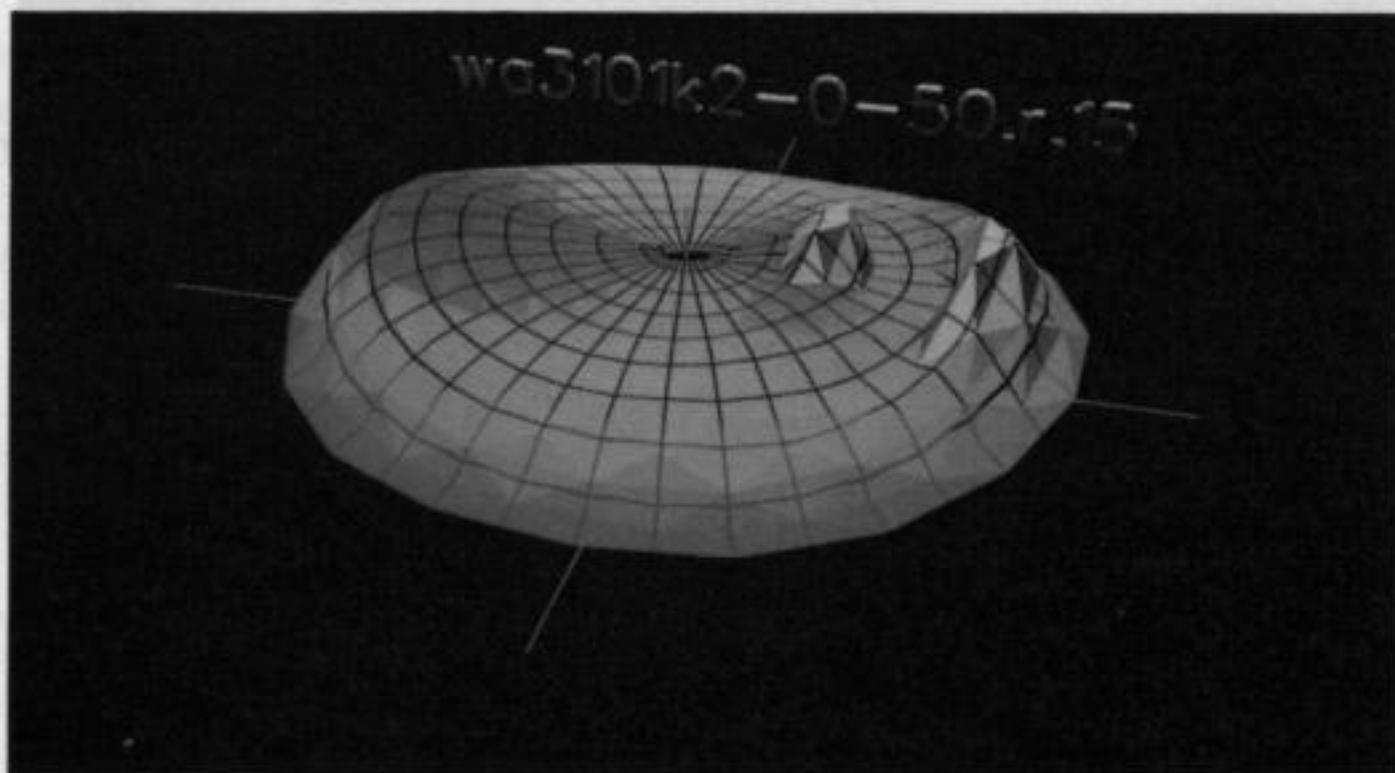


Bild 7.22, wa3101,  $\vartheta = 50$  Grad, steigender Anteil an gerichteter Reflexion, durch Spiegelung der Lampe im zweiten Parabol-Spiegel entstehen die grauen "Peaks"

Bild 7.25, wa6325,  $\vartheta = 30$  Grad, stark gerichtete Rückstreuung durch Reflexion an der Glasplatte, Maximum der z-Achsen-Skala: 300

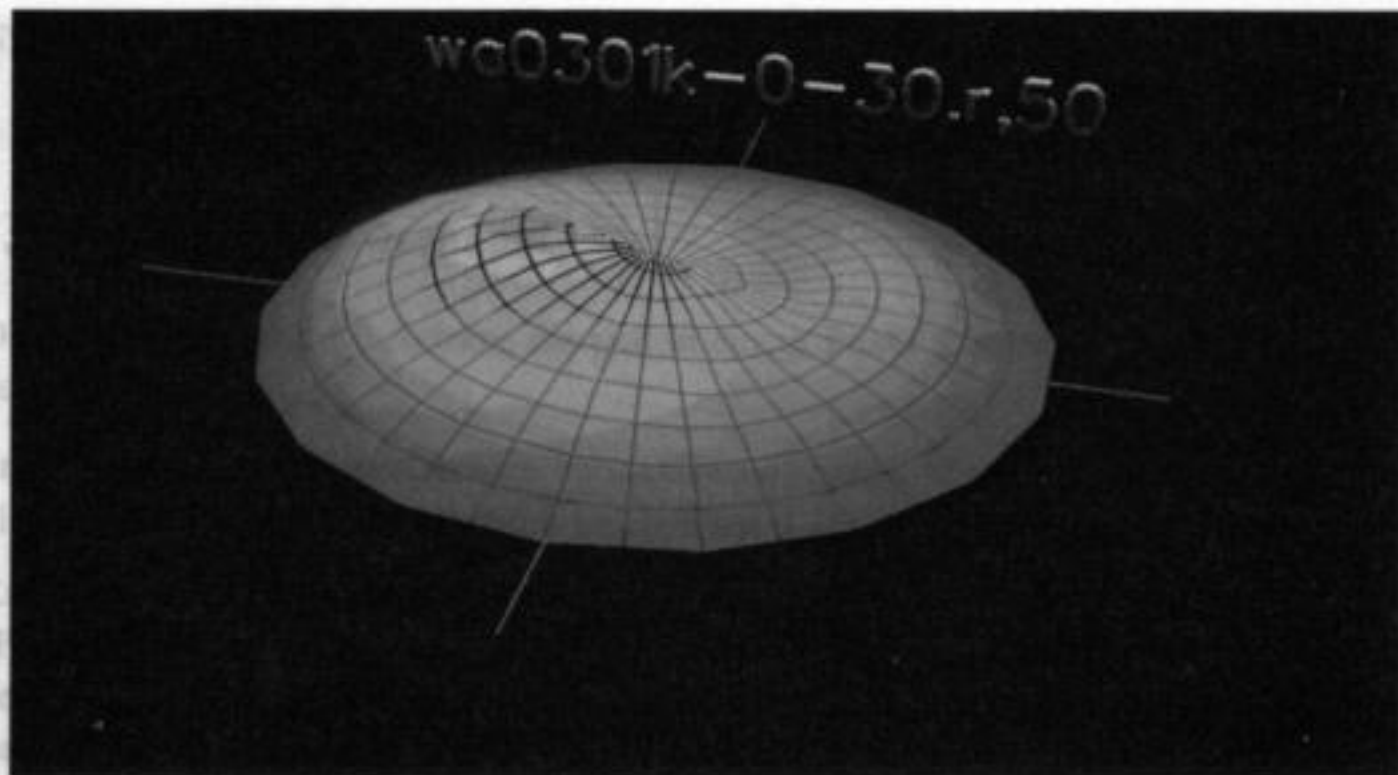


Bild 7.23, wa0301,  $\theta = 30$  Grad, stärkere Rückstreuung, da die Oberfläche durch das Anschmelzen größer ist.  
Der z-Maßstab (z-Maximum = 50) ist grösser als in Bild 7.21.

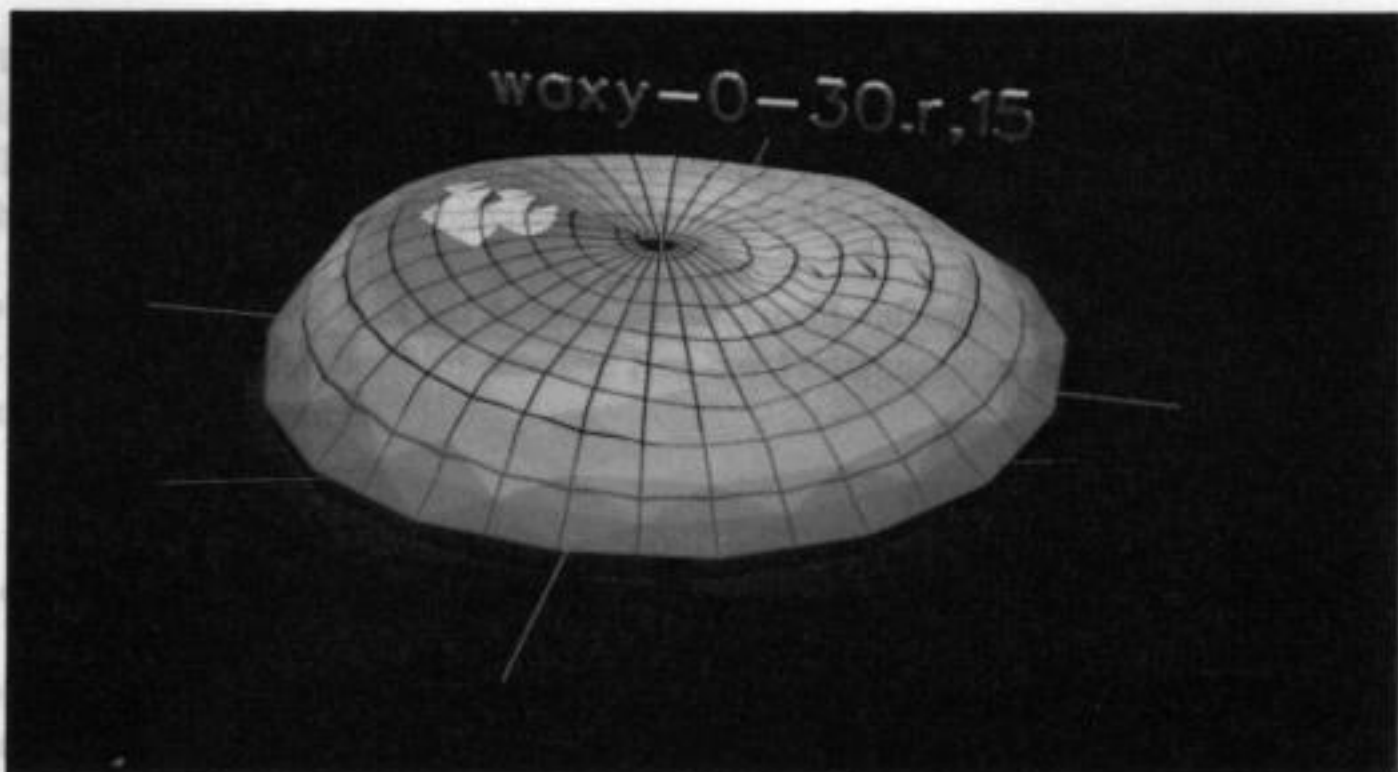


Bild 7.24, waxy,  $\theta = 30$  Grad, geringe Rückstreuung

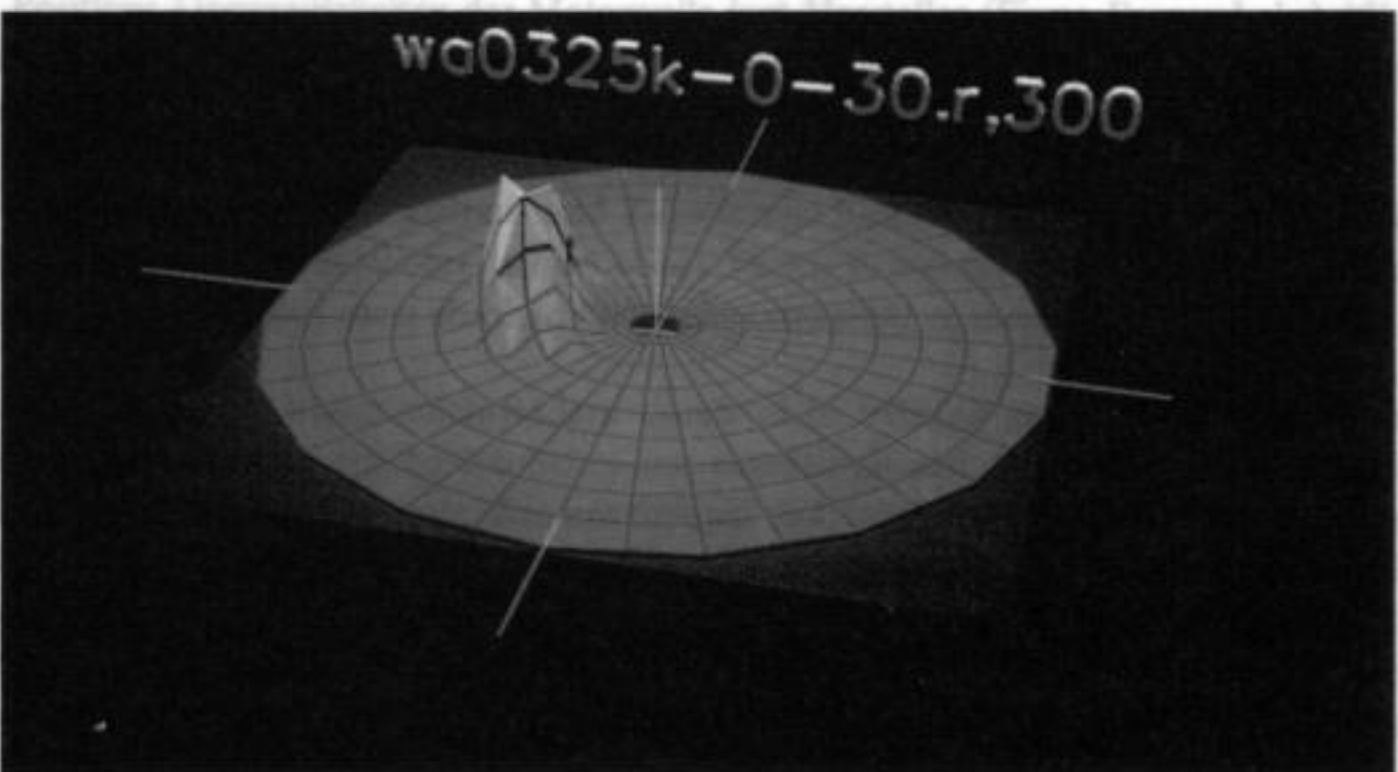


Bild 7.25, wa0325,  $\theta = 30$  Grad, stark gerichtete Rückstreuung durch Reflexion an der Glasplatte, Maximum der z-Achsen-Skala: 300

## 8 Fehler

### 8.1 Justierfehler der Mechanik

Die Apparatur besitzt 5 Achsen, die sich in einem Punkt schneiden sollen. Dabei treten zwei Fehler auf:

1. paralleler Versatz, d.h. zwei Achsen haben einen kleinsten Abstand  $a$
2. Winkelabweichung, d.h. zwei Achsen weichen um  $\alpha$  von ihrem Sollwinkel (0 oder 90 Grad) ab

Zur Bestimmung von  $a$  wird ein Fadenzug in die Probenhalterung eingebaut. Bei Drehung der Probenhalterung um die Probennormale (horizontale Achse) sollte der Fadenschnittpunkt ortsfest sein. Die Abweichung von maximal 3mm liegt an einer nicht völlig kreisförmigen Probenhalterung, die aus 4 gefrästen Segmenten zusammengesetzt ist. Der Fadenschnittpunkt sollte auch ortsfest bei Drehung der Probe um die Vertikale sein. Eine Abweichung davon ist kleiner als 3mm. Für die beiden Probenachsen ist  $a$  somit kleiner als 3 mm, ein in die Praxis vernachlässigbarer Wert.

Für die Detektorachsen wird  $a$  mit der CCD-Kamera bestimmt. Dazu wird an den Fadenschnittpunkt ein 1 x 1 cm großes schwarzes Papier geklebt und beobachtet, ob diese Markierung an allen Detektorpositionen in der Bildmitte ist. Es wurde keine Abweichung gefunden, woraus sich bei 6mm Brennweite des Objektivs  $a$  mit  $a < 1\text{cm}$  abschätzen läßt.

Die Abschätzung von  $\alpha$  ist bei Achsen, die senkrecht aufeinander stehen, bisher noch nicht in einer exakten Form durchgeführt worden. Aus der Fertigungsgenauigkeit wird  $\alpha$  in diesem Fall mit  $\alpha < 1$  Grad angenommen.

### 8.2 Genauigkeit der mechanischen Position

Die Eichung der Schrittmotorantriebe (Schritte pro Winkelgrad der angetriebenen Achse) ergibt sich aus dem Untersetzungsverhältnis des Getriebes zwischen Motor und Achse. Dabei treten 3 Fehler auf:

1. Positions-Ungenauigkeiten der Motorwelle laut Hersteller (Firma Berger-Lahr)  $\pm 3'$  an der Motorwelle, d.h. bei einer 1:10 Untersetzung beträgt dadurch das Spiel an der angetriebenen Achse:  $\pm 0.3'$

2. Ungenauigkeiten der Zahnrad- und Zahnriemen Teilung und nicht-zentrische Bohrungen der Wellenpassungen (aufgebohrt / aufgerieben). Dieser Fehler ist abhängig von der Stellung der angetriebenen Achse und ohne absoluten Winkelmesser nicht zu messen.

3. Spiel zwischen Zahnriemen-Rädern durch nicht beliebig große Zahnriemen-Spannung, dabei wird eine Position von beiden Seiten aus angefahren und die Winkeldifferenz angegeben. Bei den vertikalen Achsen wurde dies mit Spiegel und fokussiertem Laserstrahl nachgemessen: Als Testfall wurde die Mitte des Schwenkbereiches angefahren: Je zweimal von den beiden Endpunkten des Schwenkbereiches aus und zweimal von einer Position, die jeweils 1 Grad links/rechts der Mittenposition liegt: Dabei ergab sich als größte Differenz zweier Laserstrahlpositionen: 11mm. Dies bedeutet bei einem Abstand zwischen Spiegel und Schirm von 7.5 m eine Winkeldifferenz von 2.5'.

4. Ungenauigkeiten der "zero-position"-Lichtschranke. Bei den Tests zu 3. ergab sich: ca. 5'. Der Abstand der Lichtschranke vom Drehpunkt beträgt ca. 15cm, 5' sind demnach 0.2 mm an der Lichtschranke (realistischer Wert).

Die mechanische Positions- Ungenauigkeit beträgt somit weniger als 5% des kleinsten verwendeten Winkelrasters (2 Grad).

Dabei bedeuten:  $I$  gemessener Strom,  $R_1$  Leitungswiderstand,  $R_i$  Innenwiderstand des Meßgeräts,  $U_0$  Solarzellen Leerlaufspannung

### 8.3 Meßgenauigkeit mit Keithley-Pico-Amperemeter

Die Schaltung der Solarzelle mit Keithley-485-Pico-Amperemeter zeigt Bild 8.1:

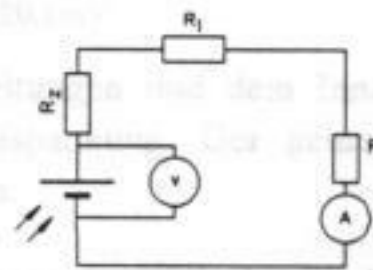


Bild 8.1, Schaltung des Keithley-Pico-Amperemeters mit Solarzelle und Leitungswiderstand

Die Meß-Ungenauigkeit der auf den Detektor einfallenden Intensität besteht aus zwei Teilen: Zum einen Abweichungen zwischen gemessenem Kurzschlußstrom und "wahrem" Kurzschlußstrom der Solarzelle, sowie Meß-Ungenauigkeit des Pico-Amperemeters. Für das erstere ist das Kennlinienfeld einer Solarzelle maßgebend (Bild 8.2):

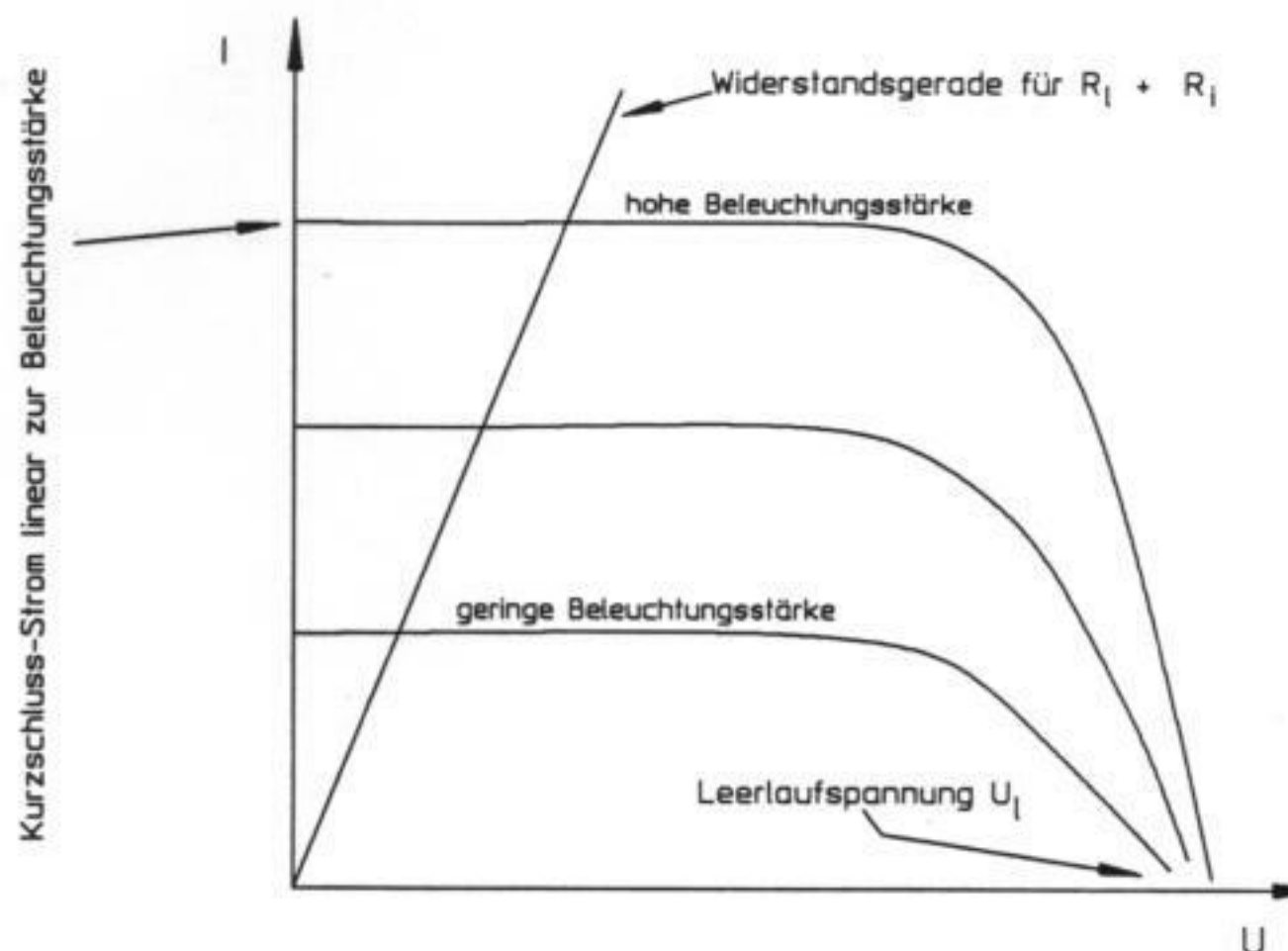


Bild 8.2, Die Kennlinien einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Der Kurzschlußstrom einer Solarzelle ist proportional zur einfallenden Beleuchtungsstärke. Durch den Leitungswiderstand  $R_1$  und den Innenwiderstand des Meßgeräts  $R_i$  wird nicht der exakte Kurzschlußstrom gemessen, sondern ein weiter "rechts" liegender Punkt auf der Kennlinie der Solarzelle.



Statt dem Innenwiderstand des Meßgeräts wird von Keithley die "Input Voltage Burden"  $U_{vb} = 200\mu\text{V}$  angegeben, der Spannungsabfall am Meßgerät. Damit ergibt sich folgende Bedingung für Linearität zwischen einfallende Intensität und gemessenem Strom:

$$I \cdot R_1 + U_{vb} \ll U_1$$

Dabei bedeuten:  $I$  gemessener Strom,  $R_1$  Leitungswiderstand,  $U_{vb}$  Spannungsabfall am Meßgerät,  $U_1$  Solarzellen Leerlaufspannung

Der Leitungswiderstand wurde vor dem Einbau der Solarzelle gemessen:  $R_1 = 2.0 \pm 0.2 \text{ Ohm}$ .  $U_1$  und  $I$  wurden für zwei Beleuchtungsstärken gemessen:

$I$	$U_1$	$I \cdot R_1 + U_{vb}$
$1.0227 \pm 0.002 \text{ mA}$	$375.0 \pm 0.2 \text{ mV}$	$2.2 \text{ mV}$
$107.40 \pm 0.1 \mu\text{A}$	$190.40 \pm 0.1 \text{ mV}$	$0.4 \text{ mV}$

Der Spannungsabfall an den Leitungen und dem Innenwiderstand des Meßgeräts beträgt weniger als 1% der Zellenleerlaufspannung. Der gemessene Strom wurde als ausreichend proportional zur Intensität angesehen.

Der Meßfehler des Keithley-Pico-Amperemeter ist angegeben mit:

Bereich	Fehler	maximaler Wert/ letzte Stelle
10 $\mu\text{A}$	$\pm 0.5\%$	$19.99 \pm 0.03 \mu\text{A}$
100 $\mu\text{A}$	$\pm 0.5\%$	$199.9 \pm 0.3 \mu\text{A}$
1 mA	$\pm 0.5\%$	$1.999 \pm 0.003 \text{ mA}$

Für typische Meßwert ergibt sich ein Fehler von:

Meßwert	Bereich	absolut	relativ
21 $\mu\text{A}$	100 $\mu\text{A}$	0.4 $\mu\text{A}$	2%
190 $\mu\text{A}$	100 $\mu\text{A}$	1.25 $\mu\text{A}$	0.6%

## 9 Zusammenfassung

Zur Untersuchung der winkelabhängigen Streuung neuartiger Materialien wurde eine leistungsfähige Apparatur entworfen und gebaut. Dies umfaßte das mechanische Design, die Erstellung der Steuerungs-Software, die Meßwertaufnahme und die Darstellung der Meßergebnisse. Neuartig waren die Ideen zur TWD-Daylighting Simulation und die Darstellung der Meßergebnisse mit Methoden der 3D-Computer-Graphik. Die Ergebnisse zeigen bisher unbekannte Details (die Asymmetrie des Wabenmaterials wa3101 und die sehr kleine Streuung an massiven Aerogel-Schichten).

Die durch diese Apparatur zur Verfügung stehenden Daten erlauben verbesserte Modelle der inneren Strahlungsvorgänge in Transparente-Wärme-Dämmung-Materialien (TWD). Durch zukünftig mögliche Absolut-Messungen kann auch die Absorption der Probe bestimmt werden. Die Meßwerte ermöglichen die Simulation von Innenräumen, die ganz oder teilweise durch TWD-Fenster beleuchtet werden. Zu diesem Zweck wurden zwei Methoden vorgeschlagen und ein einfaches Modell der Streuung an TWD-Wabenmaterial entwickelt.

Folgendes wurde im Institut erstmalig verwendet: CAD-Software zur detaillierten Planung der Mechanik, UNIX-Workstations zur Steuerung des Experiments via VME-Bus und 5-Phasen-Schrittmotoren.

Die ersten Meßergebnisse wurden bereits in [PLATZER 90] veröffentlicht.

Für Fragen, Anregungen, und eventuelle Nachfragen zum Quellcode besteht die Möglichkeit via e-mail Kontakt aufzunehmen: Adresse: [apian@ise.fhg.de](mailto:apian@ise.fhg.de)

## Anhang: Kodierung einer Achse (Steuerung des Laser-Schwenkarmes)

### 1. 3D Interpolation von Meßwerten

Gegeben sind Meßwerte der Form  $z=f(x,y)$ . Liegen  $x$  und  $y$  nicht äquidistant, können die  $z$ -Werte auf einem äquidistanten  $x$ - $y$  Gitter durch Mittellung bestimmt werden. Dies führt nur dann zu den erwarteten Ergebnissen, wenn das Gitter "gröber" ist als die ursprüngliche Verteilung der  $x$ - $y$  Koordinaten der Meßwerte. Liegen die Punkte des Gitter dagegen dichter als die Meßpunkte, entstehen Strukturen (Treppen,Ecken) in der graphischen Darstellung, die nicht in den Meßdaten vorhanden sind. Eine Interpolation zwischen den Meßwerten ist schwieriger als im 2D-Fall  $y=f(x)$ , da eine Menge dreidimensionaler Punkte keine eindeutige Oberfläche definiert. Bereits vier Punkte erlauben zwei verschiedene Oberflächen: Ist  $f(x,y)$  gegeben durch  $f(0,0)=2$   $f(0,10)=1$   $f(10,0)=1$  und  $f(10,10)=2$ , so ist sowohl Sattel- wie auch eine Talfläche zwischen den Punkten möglich. Minimalflächen sind nicht eindeutig definierbar, da keine eindeutigen Verbindungen zwischen den einzelnen Punkten gegeben sind.

#### Der Winkelbereich der Detektorschwenkarm

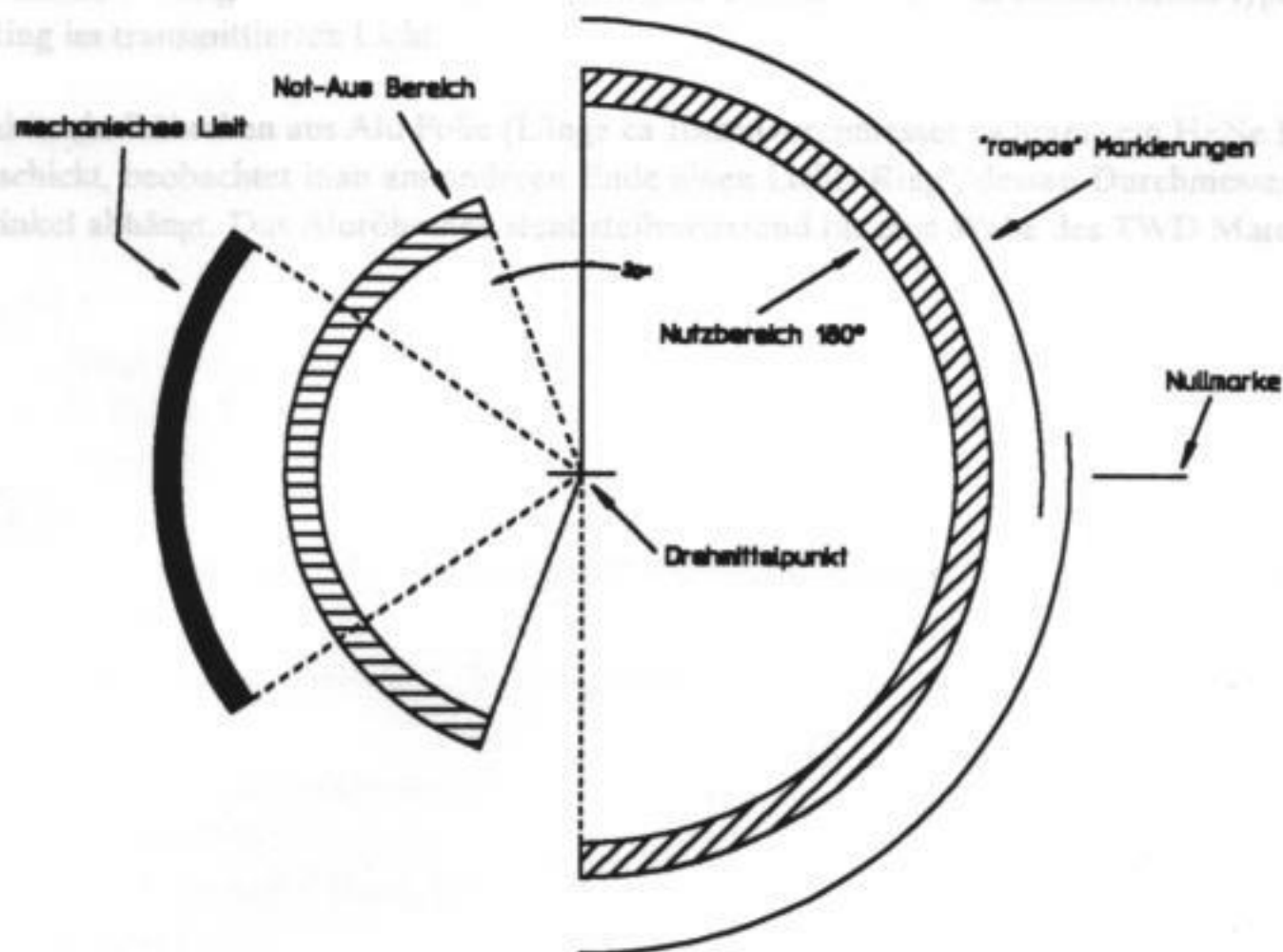
Der Winkelbereich des Detektor-Schwenkarmes beträgt 180 Grad. Die Gefahreneinstellung einer Position außerhalb dieses Bereiches wird durch die Kontrollfunktion in dem üblichen Schrittmotor-Steuerungs-Programm verhindert. Sollte durch eine Defektsituation der Detektor dennoch mehr als 20 Grad über seinen zulässigen Bereich fahren, unterbricht ein Mikroschalter die Not-Aus-Signalleitung des 40V Netztes. Der Schwenkarm ist an seiner Bewegung durch den unteren Teil der Stahlkonstruktion beschränkt. (Mechanisches Limit). Gegebenfalls eingetrennt ist die Position der Nullmarke und der 7000 µ Gradwert.

## 2. Winkelcodierung einer Achse ( Beispiel Detektor Schwenkachse)

Das in 2.7 beschriebene Modell wurde durch 2 Detektoren ergänzt.

Es wird nur eine dieser Wände des TWD Material beschleunigt, sodass hinter der TWD ein einzelner schwarzer Ring. Die Summe aller Ringe ergibt den für 2 Wände charakteristische typischen breiten Ring im transparenten Licht.

2. wird ein mechanisches Limit aus Aluminium (Licht ca. 1000nm) durch einen Laser-Strahl geschickt, beobachtet man an der Stelle einen Durchmesser von ca. 100µm. Der Einfallswinkel ist abhängig von der Winkelcodierung des TWD Material.



Die Winkelbereiche der Detektorschwenkachse

Der Winkelbereich des Detektor-Schwenkarms beträgt 180 Grad. Das Anfahren einer Position außerhalb dieses Bereiches wird durch eine Kontrollfunktion in den UNIX Schrittmotor-Steuerungs-Programmen verhindert. Sollte durch eine Fehlfunktion der Detektor dennoch mehr als 20 Grad über seinen normalen Bereich fahren, unterbricht ein Mikroschalter die Not-Aus-Signalleitung des 40V Netzteils. Der Schwenkarm ist in seiner Bewegung durch den unteren Teil der Stahlkonstruktion beschränkt ("mechanisches Limit"). Ebenfalls eingezeichnet ist die Position der Nullmarke und der "rawpos" Detektoren.

### 3. Gründe für TWD-Modell

Das in 2.7 beschriebene Modell wird durch 2 Beobachtungen begründet:

1. wird nur eine einzelne Wabe des TWD Materials beschienen, entsteht hinter der TWD ein einzelner schmaler Ring. Die Summe aller Ringe ergibt den für TWD Wabenmaterialien typischen breiten Ring im transmittierten Licht.

2. wird in ein Röhrchen aus Alu Folie (Länge ca 10cm, Durchmesser ca 8mm) ein HeNe Laser-Strahl geschickt, beobachtet man am anderen Ende einen Licht-"Ring", dessen Durchmesser vom Einfallswinkel abhängt. Das Aluröhrchen steht stellvertretend für eine Wabe des TWD Materials.

[Davis 86]

"Improved Facility for BRDF, BTDF Optical Scatter Measurements"  
L. Davis, J. Kepros, Space Systems Division, Lockheed Company  
SPIE, Vol. 675, Stray Radiation V (1986)

[Jacobs 89]

"Bestimmung des Gesamtenergieertrages von optischen Wärmedämmstrukturen"  
B. Jacobs  
Diplomarbeit Universität Freiburg 1989

[Jackson]

"Classical Electrodynamics"  
J.D. Jackson  
Wiley, Second Edition, 1975

[Hottel&Sarafim]

"Radiative Transfer"  
H.C. Hottel, A.F. Sarafim, McGraw-Hill

[Hunt 83]

"Light Scattering Studies of Silica Aerogels"  
A.J. Hunt, Lawrence Berkeley Laboratory  
LBL-Report 15756  
Int. Conf. on Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses and Composites,  
Gainesville, FL, 1983

[Hunt&Berdahl 85]

"Structure Data From Light Scattering Studies of Aerogels"  
A.J. Hunt, F. Berdahl, Lawrence Berkeley Laboratory  
LBL-Report 15579

[Klema 89]

Dr. Klema, LBL, private Mitteilung September 1989

[Malacara]

"Physical Optics and Light Interference, Fundamentals and Applications"  
edited by D. Malacara, W. J. Brown, W. J. Wilson  
Academic Press Inc.

[Numer. Rec.]

"Numerical Recipes"  
W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolski, W.T. Vetterling  
Cambridge University Press

**Literatur**

- [Berger]  
"Solar-Optical Properties of Multilayer Thin-Film Systems"  
K. Farnsworth, P. S. Srinivasan, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science  
Katalog und Datenblatt 5-Phasen Schrittmotoren  
Firma Berger-Lahr, 7630 Lahr,
- [Bergmann-Schäfer]  
"Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik"  
Bergmann, Schäfer, de-Gruyter-Verlag
- [Born&Wolf]  
"Principles of Optics"  
M. Born, E. Wolf, Pergamon-Press
- [Davis 86]  
"Improved Facility for BRDF/BTDF Optical Scatter Measurements"  
L. Davis, J. Kepros, Space Systems Division, Lockheed Company  
SPIE, Vol 675, Stray Radiation V (1986)
- [Jacobs 89]  
"Bestimmung des Gesamtenergiedurchlasses transparenter Wärmedämmsysteme"  
B. Jacobs  
Diplomarbeit Universität Freiburg 1989
- [Jackson]  
"Classical Electrodynamics"  
J.D. Jackson  
Wiley, Second Edition, 1975
- [Hottel&Sarofim]  
"Radiative Transfer"  
H.C. Hottel, A.F. Sarofim, McGraw-Hill
- [Hunt 83]  
"Light Scattering Studies of Silicia Aerogels"  
A.J. Hunt, Lawrence Berkeley Laboratory  
LBL-Report 15756  
Int. Conf. on Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses and Composites,  
Gainesville, FL, 1983
- [Hunt&Berdahl 85]  
"Structure Data From Light Scattering Studies of Aerogel"  
A.J. Hunt, P. Berdahl, Lawrence Berkeley Laboratory  
LBL-Report 16579
- [Klems 89]  
Dr. Klems, LBL, private Mitteilung September 1989
- [Malacara]  
"Physical Optics and Light Measurements, Photometry and Radiometry"  
edited by D. Malacara, written by W.L. Wolfe  
Academic Press Inc.
- [Num Rec]  
"Numerical Recipes"  
W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling  
Cambridge University Press

- [Papamichael 86]  
"Solar-Optical Properties of Multilayer Fenestration Systems"  
K. Papamichael, F. Winkelmann, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division  
Verlag 1987  
Proceedings of the 1986 International Daylighting Conference, Long Beach Ca
- [Papamichael 88]  
"Determination and Application of Bidirectional Solar-Optical Properties of Fenestration Systems"  
K. Papamichael, J. Klems, S. Selkowitz, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division  
Proceedings of the 13th National Passiv Solar Conference, Cambridge, MA, 1988
- [Pflüger 84]  
"Transparente Wärmedämmmaterialien"  
A. Pflüger,  
Diplomarbeit Universität Freiburg, 1984
- [Platzer 87]  
"Solar Transmission of Transparent Insulation Material"  
W. Platzer,  
Sol. Energy Mat., 16, 275-287, 1987
- [Platzer 90]  
"Measurements of hemispherical transmittance of structured materials like transparent insulation materials"  
W. Platzer, P. Apian-Bennewitz, V. Wittwer  
ISE
- [Platzer&Wittwer 89]  
"Transparent Insulation Materials"  
W. Platzer, V. Wittwer  
ISE
- [rayshade]  
Das C-Program rayshade ist via "anonymous ftp" Protokoll über die Internet-Adresse "weed eater.math.yale.edu", 130.132.23.17 erhältlich.
- [Rubin & Lambert 83]  
"Transparent Silica Aerogel for Window Insulation"  
M. Rubin, C.M. Lambert, Lawrence Berkeley Laboratory  
LBL-Report 14462
- [Siegel&Howell]  
"Thermal Radiation Heat Transfer"  
R. Siegel, J.R. Howell  
McGraw-Hill
- [Spitzglas 84]  
"Defining Daylighting from Windows in Terms of Candlepower Distributions Curves"  
M. Spitzglas, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division,  
Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-18087

[Thalmann 87]

"Image Synthesis, Theory and Practice"

Nadia Magnenat-Thalmann, Daniel Thalmann

Springer-Verlag 1987

[Thomson]

CCD Data Book

Firma Thomson, 8 München 70

[Tritsch 90]

"Strommessungen am OPAL-Zentraldetektor"

B. Tritsch

Diplomarbeit Universität Freiburg 1990

- Herrn Dr. V. Witwer für überaus menschliche Vertrauen und vielseitige Unterstützung
- Herrn P. Jäggle für viele Anregungen und ein prädestiniertes VAX-Rechnernetzwerk
- den Mitarbeitern der Werkzeuggestalt für die präzise Mechanik
- Herrn B. Tritsch für die schnelle Computerauswertung
- Dr. Papamichael und Dr. Klemm (beide 1989) für lange Gespräche über die Radiometrie
- den Mitarbeitern der Abteilung Katalysator-Entwicklung für die angenehme Arbeitsatmosphäre
- der Abteilung Systemtechnik, die das HP-ME10-CAD-Programm zur Verfügung stellte
- sowie meinen Eltern für Anregungen und moralische Unterstützung



Zu danken habe ich allen, die mir geholfen haben, besonders:

- Herrn Prof. A. Goetzberger für die Vergabe der Arbeit und sein Institut mit guter Arbeitsatmosphäre
- Herrn Dr. V. Wittwer für das mir bewiesene Vertrauen und vielseitige Unterstützung
- Herrn P. Jägle für viele Anregungen und ein problemloses UNIX-Rechnernetzwerk
- den Mitarbeitern der Institutswerkstatt für die exakte Mechanik
- Herrn B. Tritsch für die schnelle Computerplatinen-Herstellung
- Dr. Papamichael und Dr. Klems (beide LBL) für lange Gespräche über ihr Radiometer
- den Mitarbeitern der Abteilung Kollektor-Entwicklung für die angenehme Arbeitsatmosphäre
- der Abteilung Systemtechnik, die das HP-ME10-CAD Programm zur Verfügung stellte
- sowie meinen Eltern für Anregungen und moralische Unterstützung