

ISSN 0172-7613

# **Forschungsbericht 68**

BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)  
BERLIN

## **Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**

von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

---

Juni 1980

20 Seiten, 53 Bilder, 4 Tabellen, 3 Seiten Bildanhang (Stereo-Bilder)

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon 030/8104-1  
Telex 01-083 261 bamb d

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Oberflächenmeßverfahren (Übersicht)	4
3. Grundlagen der stereoskopischen Vermessung von Oberflächen	7
4. Entwicklung und Konstruktion eines Präzisions-Goniometers	12
5. Technische Daten des neuen Präzisions-Goniometers und Anwendungsbeispiele	18
6. Literatur	19
7. Bildanhang	21

---

## Zusammenfassung

Die Bearbeitung zahlreicher Probleme der Materialprüfung im Bereich der Werkstoffoberfläche verlangt eine genaue Kenntnis der Oberflächeneigenschaften der verwendeten Werkstoffe. Für den Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen und die Anwendung neuer Technologien ist die meßtechnische Erfassung und Charakterisierung von Oberflächen unumgänglich. In dieser Arbeit wird zunächst auf die verschiedenen Methoden zur Erfassung von Oberflächenkennwerten hingewiesen und im zweiten Teil die Konstruktion eines volleucentrischen Präzisionsgoniometers für ein Rasterelektronenmikroskop beschrieben. Mit diesem Goniometer ist es möglich, hochgenaue, auswertbare Stereobildpaare herzustellen.

## Summary

The investigation of numerous problems in the field of materials testing requires a precise knowledge of the surface qualities of the materials used. To apply NC machines and new technologies it is necessary to measure and characterize surfaces. This report hints to different methods for the measurement of surface characteristics. The second part describes the construction of the fully eucentric precision goniometer stage for a Scanning Electron Microscope. By means of this goniometer it is possible to take highly accurate stereo pictures which can be evaluated.



## 1. Einleitung und Problemstellung

Die Bearbeitung zahlreicher Probleme der Materialprüfung im Bereich „Werkstoffoberfläche“, wie z.B. Oberflächenschutz, Oberflächenrauigkeit, Oberflächenglanz etc., und die Beurteilung von Schadensfällen verlangt eine genaue Kenntnis der Oberflächeneigenschaften der verwendeten Werkstoffe. Da in neuerer Zeit durch den Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen die Bearbeitung von Werkstücken mit sehr engen Fertigungstoleranzen in bezug auf Abmaße und Oberfläche erfolgt und die Rohstoffverknappung zum optimalen Einsatz moderner Technologien zur Vergütung von Oberflächen zwingt, ist die meßtechnische Erfassung und Charakterisierung von Oberflächen unumgänglich. Dabei wäre es wünschenswert, über die „ausgewählte“ Meßfläche definierte Kennzahlen zu erhalten, die Aussagen über die Oberfläche erlauben und Möglichkeiten ihres evtl. Einsatzbereiches erkennen lassen.

Wenn hier von Oberflächen gesprochen wird, so sind damit ohne Einschränkung zunächst alle möglichen Oberflächen gemeint — nicht nur Oberflächen aus dem metallverarbeitenden Bereich. Darüber hinaus sind aber auch in der Lebensmittel-, der Verpackungs-, der Kunststoff- und Textilindustrie sowie der Galvanotechnik und insbesondere der Halbleiterindustrie mit ihren neuen Mikroschaltkreisen Oberflächeneigenschaften von besonderem Interesse. Fernerhin — last not least — sind Oberflächen im mikroskopischen wie submikroskopischen Bereich für Biologen bei der Untersuchung von Membranen und Zellstrukturen sowie für Mediziner bei der Erforschung von Organveränderungen, Zellschädigungen, Hautschäden etc. Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Untersuchungsthemen.

Wie vielgestaltig und komplex Oberflächen sein können, soll an folgenden Bildern (s. Bildtafeln) demonstriert werden.

Hierbei handelt es sich um einen nicht repräsentativen Querschnitt ausgewählter Beispiele von Oberflächen aus den verschiedensten Bereichen (Abb. 1 bis 18):

Dünnschichttechnologie  
Fertigung  
Oberflächenbearbeitung  
Galvanotechnik  
Bruchuntersuchungen  
Textilindustrie  
Medizinische Forschung

Bei der Ermittlung von Oberflächenkennwerten bereitet die zweidimensionale Vermessung von Oberflächen im allgemeinen — soweit es sich nicht um sehr zerklüftete Flächen handelt — keine großen Schwierigkeiten. Anders sieht es jedoch bei der dritten Dimension — der Erfassung von Höhe und Tiefe — aus. Nicht in jedem Fall kann man Informationen hierüber durch geeignete, angepaßte Meßwerkzeuge gewinnen, besonders dann nicht, wenn die Abmessungen der zu vermessenden Oberflächenstrukturen entweder zu groß oder aber viel zu klein sind oder die Oberflächen zum Vermessen mangels geeigneter Meßwerkzeuge ungeeignet sind.

Es ergibt sich also, daß an Meßtechniken, die den vielfältigen Forderungen der Oberflächenmessung und Oberflächenprüfung entsprechen sollen, folgende Anforderungen zu stellen sind:

- I. Abbildung und Darstellung der betreffenden Oberfläche mit geeigneter Auflösung und Tiefenschärfe,
- II. Bestimmung von Oberflächenkenngrößen, d. h. Vermessung von Mikrogeometrie bzw. Oberflächenrauheit,
- III. Durchführbarkeit der Messungen I und II ohne Beeinträchtigung oder Beschädigung der untersuchten Oberflächen.

Im vorliegenden Forschungsbericht wird — ausgehend von einer kritischen Diskussion der heutigen Oberflächenmeßtechniken,

ihre Einsatzbereiche und Fehlergrenzen unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik — über die Entwicklung und Konstruktion eines Präzisions-Goniometers und sein Einsatz zur Vermessung von Oberflächen in einem Rasterelektronenmikroskop berichtet.

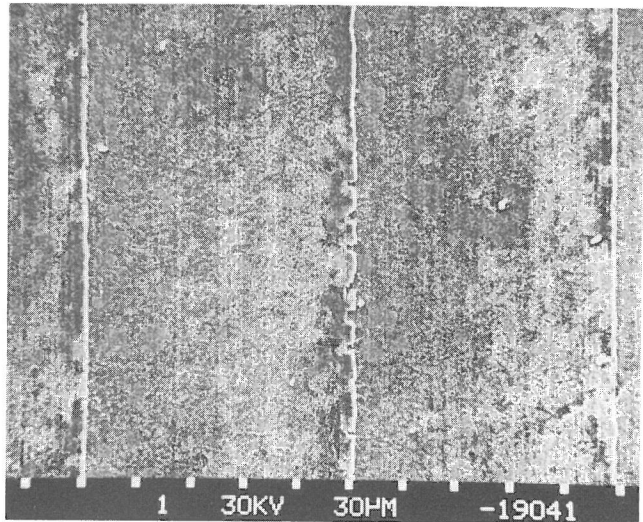


Abb. 1  
Aufdampfschicht

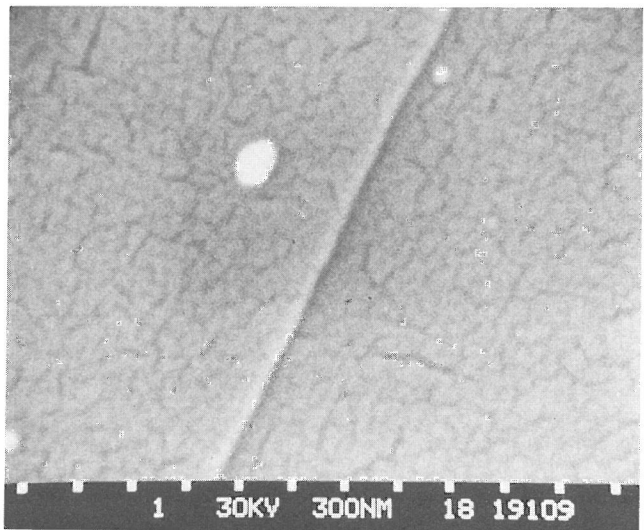


Abb. 2  
Aufdampfschicht

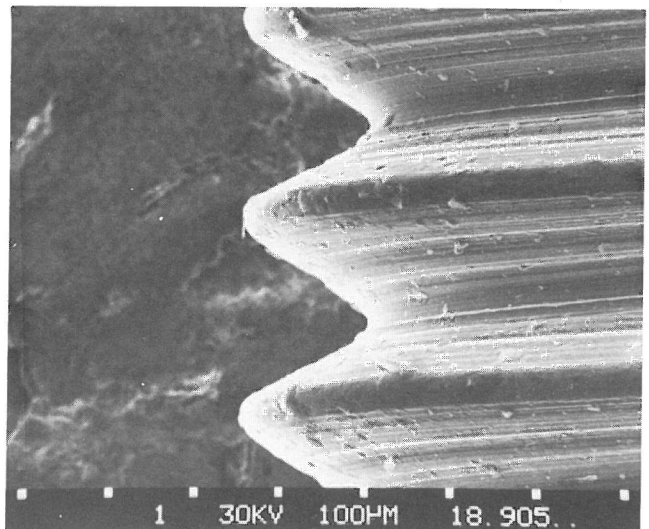


Abb. 3  
M1-Schraube

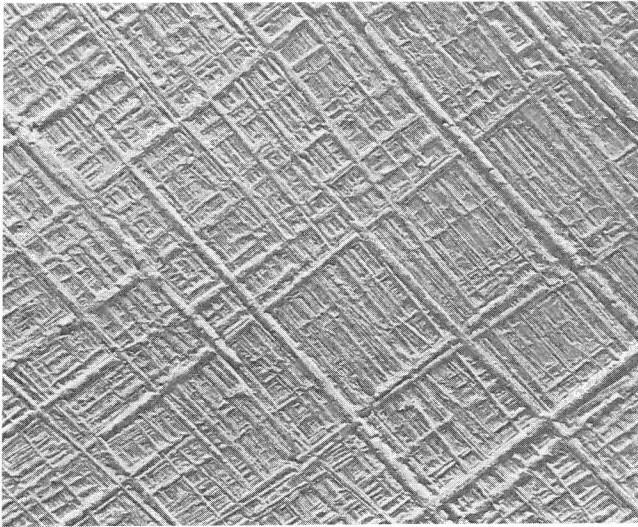


Abb. 4  
Kreuzgeschichtete Oberfläche

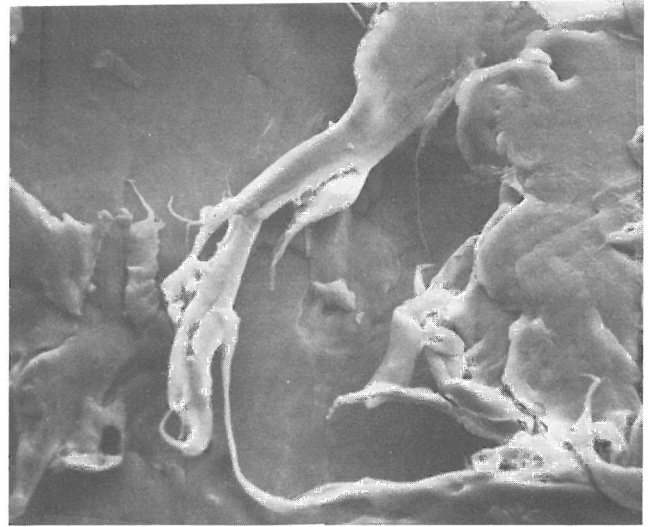


Abb. 7  
Kunststoff-Bruch

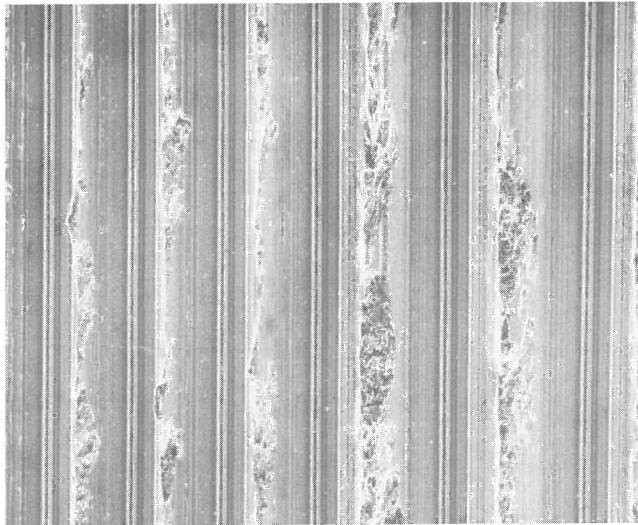


Abb. 5  
Gehobelte Oberfläche

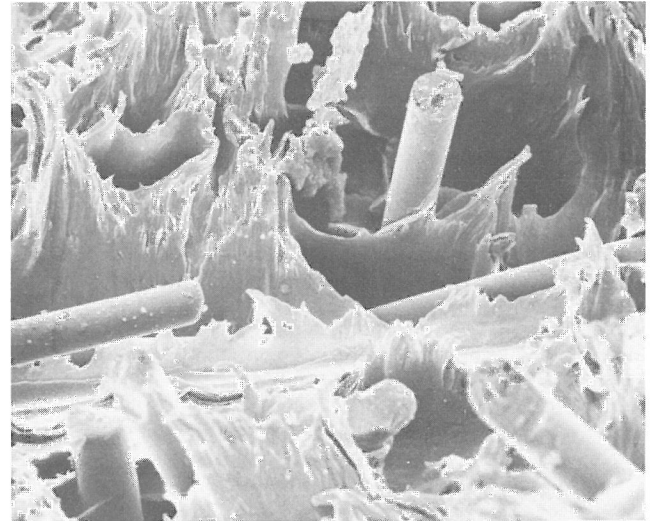


Abb. 8  
Kunststoff-Bruch

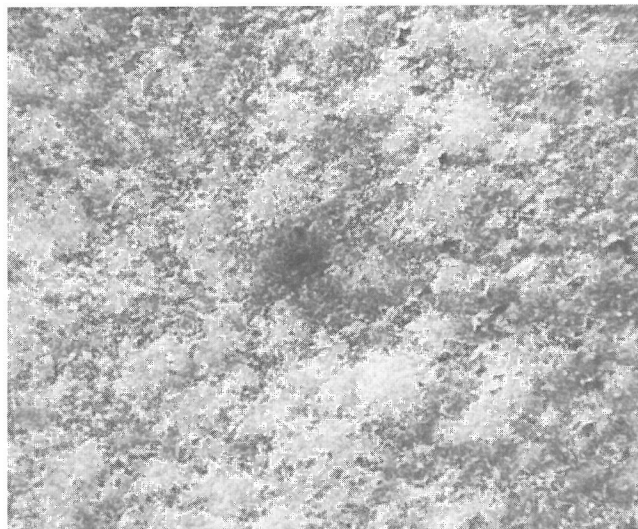


Abb. 6  
Galvanische Schicht

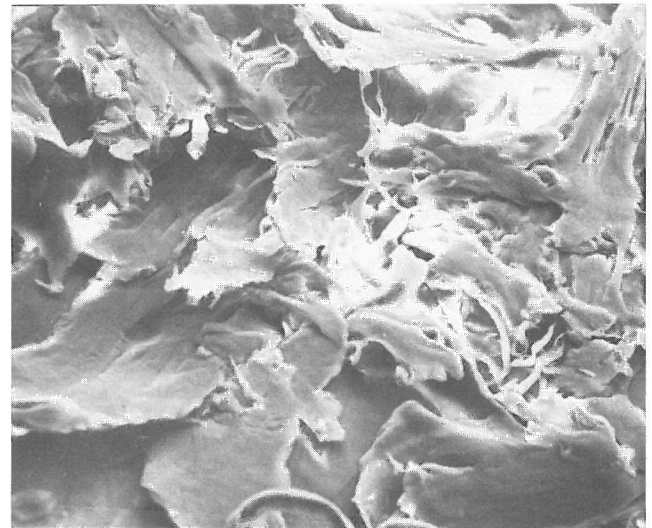


Abb. 9  
Kunststoff-Bruch



Abb. 10  
Trovidur-Bruchfläche

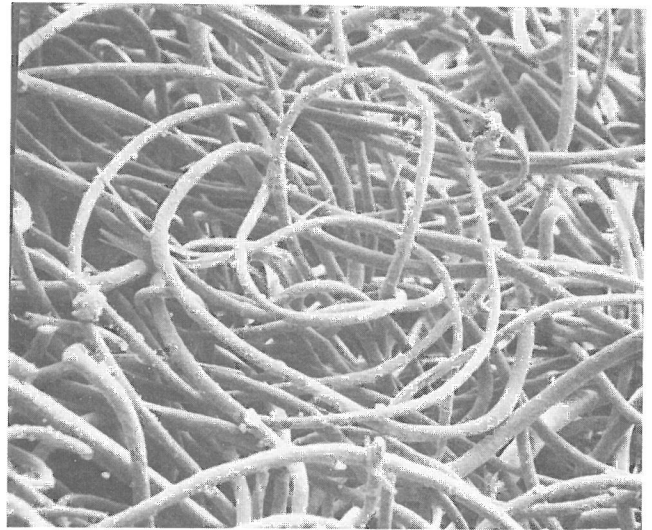


Abb. 13  
Filz

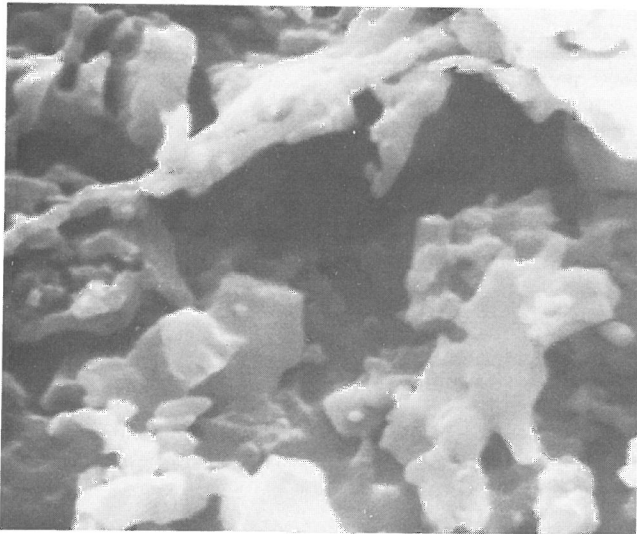


Abb. 11  
Keramik-Bruch



Abb. 14  
Filz

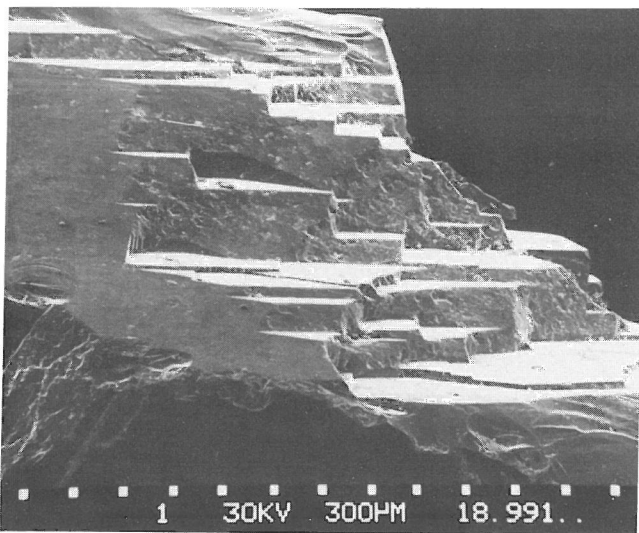


Abb. 12  
Eisenkies-Bruch

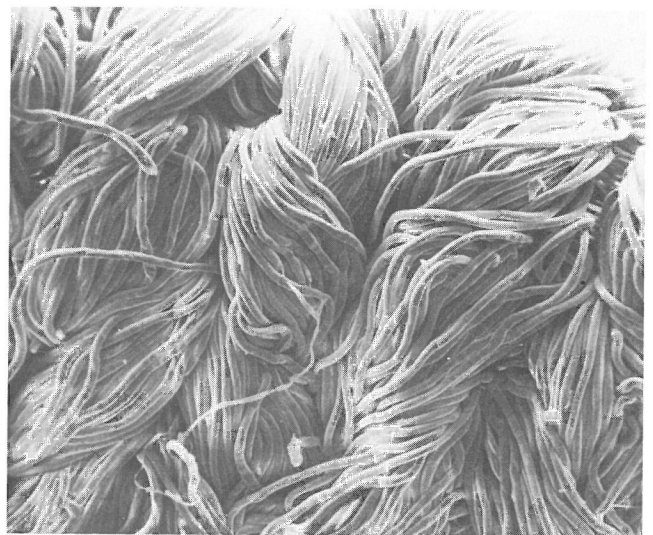


Abb. 15  
Lunge

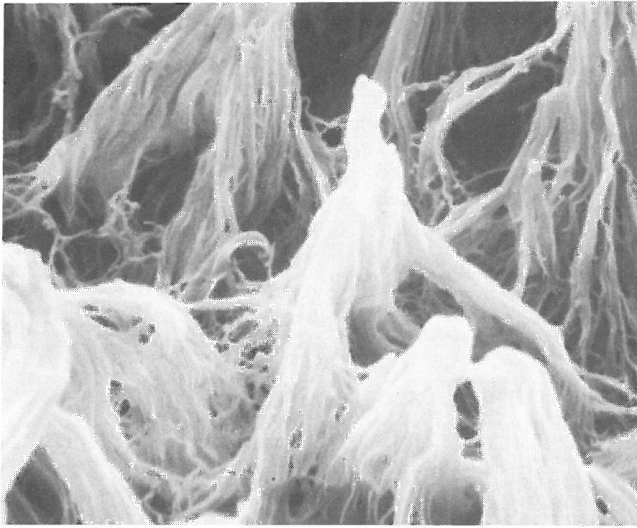


Abb. 16  
Lunge

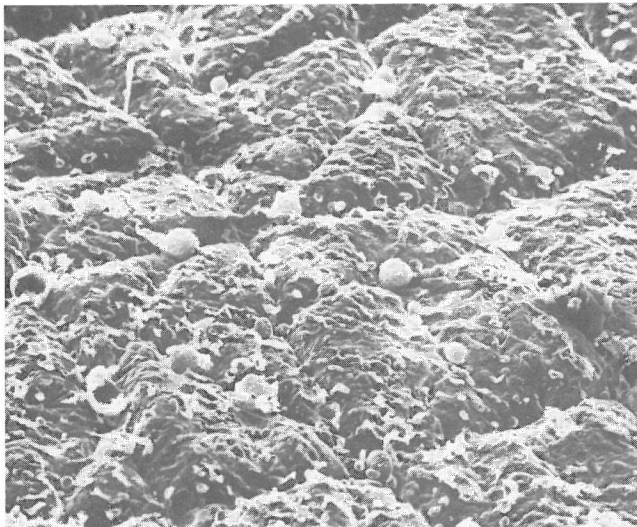


Abb. 17  
Haut

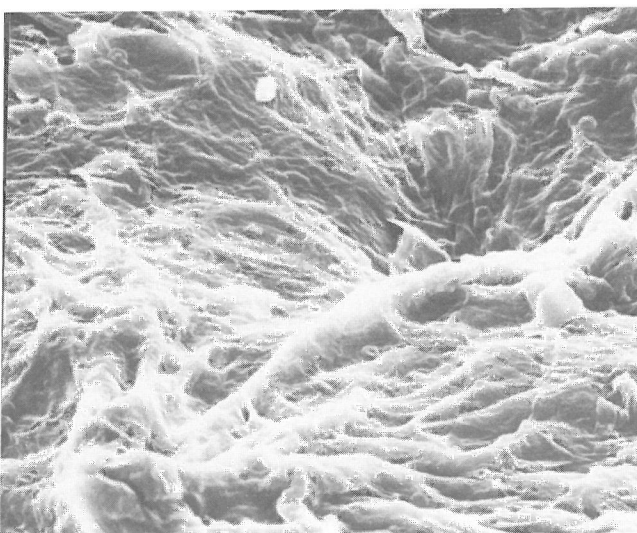


Abb. 18  
Gefäße

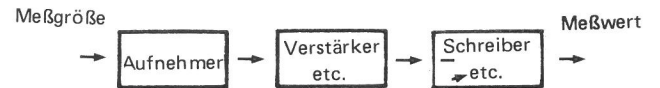
## 2. Oberflächenmeßverfahren (Übersicht)

Schon in den dreißiger Jahren hatte man mit der Entwicklung von Oberflächenmeßverfahren zur Ermittlung von Oberflächenkennwerten begonnen. Hier ist besonders das Bemühen von Gustav Schmalz zu erwähnen, der durch die Einführung von Oberflächen-Profilkurven Informationen über die Rauheit erhielt, und Ernest Abbott, der das erste Profilometer entwickelte. Diese Entwicklung ist bis heute noch nicht abgeschlossen, da die Kriterien zur Beschreibung von Oberflächen einem fortlaufenden Entwicklungsprozeß unterliegen und vielfach durch die Anwendung neuzeitlicher Technologien erneut angepaßt werden müssen. Fernerhin wird den optischen und elektronenoptischen Methoden sowie der NDT-Technik in Verbindung mit rechnerunterstützten Datenauswertegeräten in Zukunft eine große Bedeutung zukommen.

Einen systematischen Überblick über die derzeit wichtigen Oberflächenmeß- und -prüfverfahren [1] — entsprechend ihrer Wechselwirkung mit dem Prüfling — geben *Tabelle 1 und 2* wieder. Aus diesen sind die für uns wichtigen und anwendbaren Verfahren durch Umrandung herausgehoben. Es sind dies:

- Tastschnittverfahren
- Lichtinterferenz
- Glanzmessung
- Kontaminationslinien
- photogrammetrische Methoden

Die Vermessung von Oberflächen erfolgt in den meisten Fällen mit Geräten, die im Prinzip aus einem Aufnehmer (Fühler + Meßumformer), einem Anpassungsglied (Verstärker) und einem Anzeige- oder Registriergerät (Schreiber etc.) bestehen.



Je nach dem Einsatz der verschiedenen Aufnehmersysteme unterscheidet man z. B. zwischen Tastschnittverfahren, Interferenzverfahren, Glanzmessung usw.

Die am häufigsten benutzte Oberflächenrauheits-Prüfmethode ist das Tastschnittverfahren (*Abb. 19*), weil es ohne großen Aufwand in relativ kurzer Zeit durch den Einsatz moderner

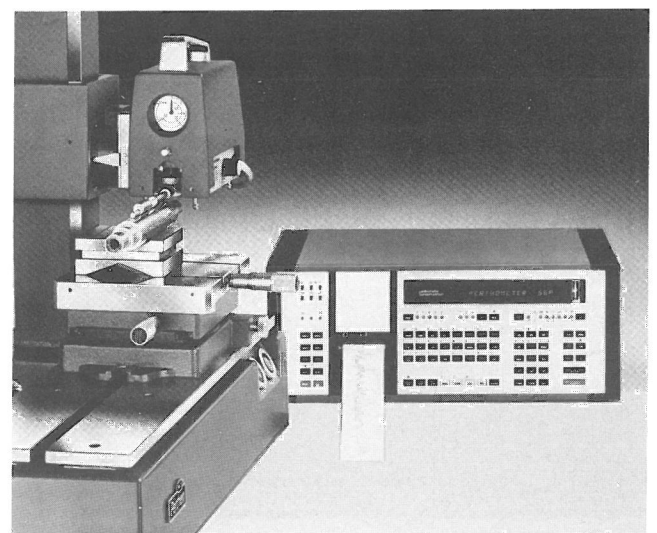


Abb. 19  
Handelsübliches Tastschnittgerät



Tabelle 1

Systematischer Überblick über die Oberflächenmeßverfahren

Meßgröße	Art des Fühlers	Aufnehmermeßsignal					
		mechanisch	pneumatisch	elektrisch		elektromagnetische Wellen	Korpuskularstrahlen
				aktiver Meßumformer	passiver Meßumformer		
Örtliche Erhebung der Oberfläche gegenüber einer Bezugslinie	berührend	Wegänderung: z. B. Oberflächenindikator nach Woxen Johansson Ritzverfahren Elastische Deformation: Tetameter nach Tornebohm	Druckänderung: Topograph von David Brown	Elektrodynamisch: Hautester von Leitz, Trentini, Abbott Profilmeter, Perthograph Piezoelektrisch: Talysurf 100, Bruel & Kjaer, Hommeltester, Brush-Surface-Analysers Photoelektrisch: Talysurf 10	Widerstandsänderung z. B. Salebro-Meter nach Mitutoyo Induktivitätsänderung: Hommeltester, Perth-O-Meter, Talysurf, Jena-Gerät Kapazitätsänderung: Mikrogonometer Anodenstromänderung: Brushsurfage	Lichtstrahl: z. B. Oberflächenprüfgerät nach Förster und Shaw's Contograph, Lewin, Schmaltz, Kosaka, Ammon, Profilograph, Kisseljow-Profilmeter Kiesewetter	
	berührungslos	elektrisches Feld mit Wolframspitze			Potentialänderung: Youngsches Verfahren		
		Lichtband				Durch die Oberfläche deformiertes Lichtband: z. B. Lichtschnittverfahren nach Schmaltz	
		fokussiertes Strahlenbündel		Lichtstromänderung: Dupny Intensitätsänderung der Laserstrahlen: Whitefield		Lichtschnittverfahren mit einem Objektiv Raumlinter	
		fokussiertes Bündel von Kurpuskularstrahlen					Kontaminationslinienverfahren mit REM
berührend	sphärische Spitze in Äquidistanten Bahnen				Induktivitätsänderung: Micro Topographier, Kartographie		
	von einer Folie eingeschlossenes Volumen	Auftriebsänderung: Rauheitswaage nach Horn					
Örtliche Erhebungen der Oberfläche gegenüber einer Bezugsfläche	berührungslos	Luftstrom über einer Luftdüse	Druckänderung: z. B. Solexgerät				
		elektrisches Feld m. Gegenformelektrode			Kapazitätsänderung: Perth-O-Meter Typ U		
		magnetisches Feld mit Magnet-Tonkopf				Induktivitätsänderung: Radhakrishnan und Horn	
		elektromagnetische Wellen (Licht) mit zeitl. Kohärenz oder mit begrenzter Kohärenzlänge		Lichtstromänderung: Glanzmessung mit dem Goniophotometer, Epikondensator von Zeiß; Reflexionsmesser nach Peters, Heinrichs		Interferenzerscheinung: Interferometer, Zweistrahl- u. Vielstrahlinterferometer; Zehender-Verfahren, Interferenzmikroskop Äquidensitenverfahren: z.B. Surface Finish Micro-Interferometer nach Linnik. Total reflektiertes Lichtbündel: Visoport, Traganteilprüfer nach Dreyhaupt	
		elektromagnetische Wellen mit räumlicher Kohärenz, "Lange Kohärenzlänge"		Lichtstromänderung: Messung des Granulationskontrastes mit Hilfe von Photozellen, Korrelation des Granulationsmusters in zwei Ebenen und das Oberflächenmeßsystem f. GAC-Systeme n. Bake u. s.		Interferenzerscheinung: Holographie	
Reibungswinkel	berührend	gekrümmte Schneide	Oberflächenindikator (Micrin) (Rubert)				

genutzte Oberflächenwechselwirkung	Prüfverfahren	
	subjektive Prüfverfahren	objektive Prüfverfahren
mechanische Wechselwirkung	Tastsinnprüfverfahren mit dem Fingernagel (Reibung)	Reibung (Vergleichsmuster-Oberflächen-normale); Bewertung nach dem Energieverlust eines Pendels.
hydraulische Wechselwirkung	Strömungsverhalten an der Oberfläche (laminare Strömung oder turbulente Strömung in einem Rohr wird z.B. durch die Oberflächenrauheit beeinflusst)	Öltropfenverfahren (die Zeit, die ein Öltropfen von 0,25 m <sup>3</sup> braucht, um einen Weg von 200 mm zu gleiten)
thermodynamische Wechselwirkung		Wärmeübergang (Messung des Temperaturabfalles an einer gegen die Oberfläche angebrachten Platte)
elektrische oder magnetische Wechselwirkung	Magnetpulververfahren	Übergangswiderstand Gleitverfahrengerät nach Trentini
Wechselwirkung mit elektromagnetischen Wellen (optische Eigenschaften)	Betrachtung mit dem bloßen Auge, Spiegelungs- und Rasterverfahren, Hell- und Dunkelfeldbeleuchtung, Phasenkontrastverfahren, Lichtspalt	Vergleichsmikroskop, Mikroskope, Maßstab auf dem Bild zum Vergleichen, Stereomikroskop, Photogrammetrie
Wechselwirkung mit Korpuskelstrahlen	Elektronenstrahl-Rastermikroskop, Elektronenmikroskop, Röntgen-Strahlenmethode	radioaktive Verfahren
akustische Rückwirkungen auf Beschallen	Schattenverfahren (Schwächung des Schallsignals durch Rißstellen)	Interferenz zwischen primärem und reflektiertem Strahl-Echoverfahren
chemische Wechselwirkungen	Adhäsion und Adsorption, Antuschieren, Anlappen, Abdruckfilme und Hüte	(Adhäsion und Adsorption), Ulko-verfahren, Fluoreszenzverfahren, Risse oder keine Risse

Tabelle 2  
Oberflächenprüfverfahren [1]

Elektronik (Mikroprozessor) umfassende Oberflächenkennwerte liefert. Das Meßprinzip beruht darauf, daß die Spitze eines Diamanten entlang der Oberfläche des Prüflings gleitet und die Vertikalbewegung der Nadel durch Verstärkung (bis zu 1.000.000fach) vergrößert aufgezeichnet wird. Mit ihr können in den meisten Fällen mit unterschiedlichsten Meßfühlern und Auswertesystemen sehr verschiedene Probleme der Praxis optimal gelöst werden.

Voraussetzung für die Abtastung — d. h. für die Anwendbarkeit dieser Methode — ist eine „brauchbare“ Oberfläche. Brauchbar heißt in diesem Fall, daß die Oberflächen eine bestimmte Härte besitzen müssen und nicht zu sehr zerklüftet sein dürfen. Im Bereich der metallverarbeitenden Industrie ist dies mehr oder weniger immer gewährleistet. Gänzlich anders verhält es sich jedoch bei der Abtastung von weichen und empfindlichen Oberflächen, da hier die Nadel aufgrund ihres Auflagedruckes eine Abtastrinne eingräbt und damit eine objektive Messung unmöglich macht [2]. Fernerhin muß berücksichtigt werden, daß wegen des Verrundungsradius (Abb. 20, 21) der Nadel bei stark strukturierten Oberflächen nur eine Hüllkurve ertastet wird, die nicht mit der wirklichen Topographie identisch ist. Eine detaillierte Darstellung der Oberflächentopographie ist auf diese Weise nicht möglich. Bessere Ergebnisse könnte nur eine konsequente Verkleinerung des Spitzenradius bringen (rein theoretisch und abgesehen von der zunehmenden Bruchempfindlichkeit); jedoch würden mit steter Verkleinerung bei konstanter Belastung die Flächendrücke auf das abzutastende Profil sehr hoch werden.

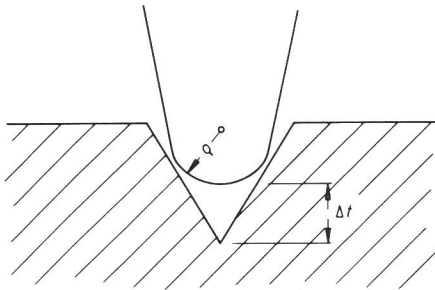


Abb. 20  
Einfluß von Tastnadelverrundungsradius und Profiltiefe auf die Erfassung von Oberflächenprofilen [2]

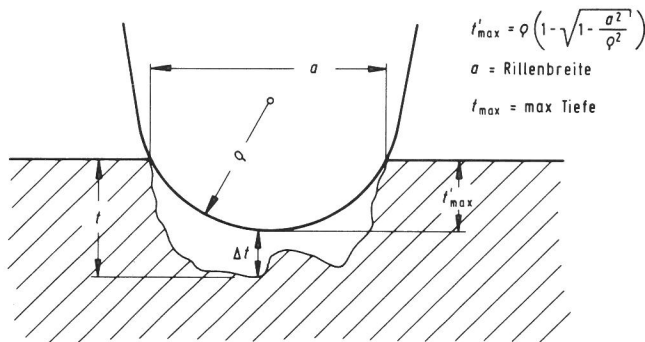


Abb. 21  
Einfluß von Tastnadelgröße (Verrundungsradius) auf die Profilermittlung. Hier wird am Beispiel gezeigt, daß nur ein bestimmter Teil des wahren Profils erfaßt werden kann [2]

Um eine Vorstellung hiervon zu bekommen, wie hoch die Flächendrücke in Abhängigkeit des Verrundungsradius werden können, läßt sich mit Hilfe der Hertz'schen Formeln errechnen [2]. Der maximale Druck, den eine Kugel in Abhängigkeit des Materials auf eine Oberfläche ausübt, ist gegeben durch

$$\sigma_{\max} = c \sqrt{\frac{PE^2}{\rho^2}}, \text{ wobei}$$

$E_1, E_2$  Elastizitätsmodul des Eindruckkörpers bzw. des gedrückten Körpers,

$P$  Auflagekraft,  
 $\rho$  Krümmungsradius des Eindruckkörpers (= Tastnadelspitze  $\sim 2 \mu\text{m}$ )  
 $c$  0,38 . . . 0,41 je nach Material  
 $E^1 = \frac{2 E_1 \times E_2}{E_1 + E_2}$  ist.

Aus dieser Formel ermittelte Werte für den Maximaldruck ergeben Werte, die größer als die Brinellhärte des betreffenden Materials sind, d. h. aber, daß bei der Abtastung von Oberflächen bleibende Meßspuren zurückbleiben und die Oberfläche beschädigen. Um dies zu ermitteln, haben wir an verschiedenen Materialien, wie Plexiglas, Messing und galvanischen Schichten, Rauigkeitsmessungen durchgeführt und die abgetasteten Oberflächen auf Abtastspuren mikroskopisch untersucht (Abb. 22, 23).

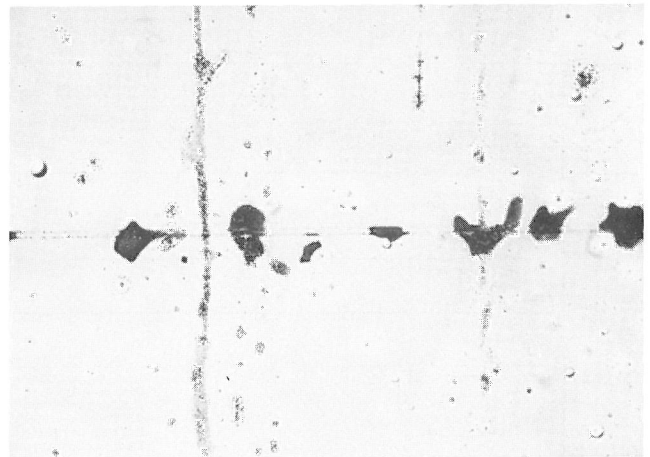


Abb. 22  
Tastspuren

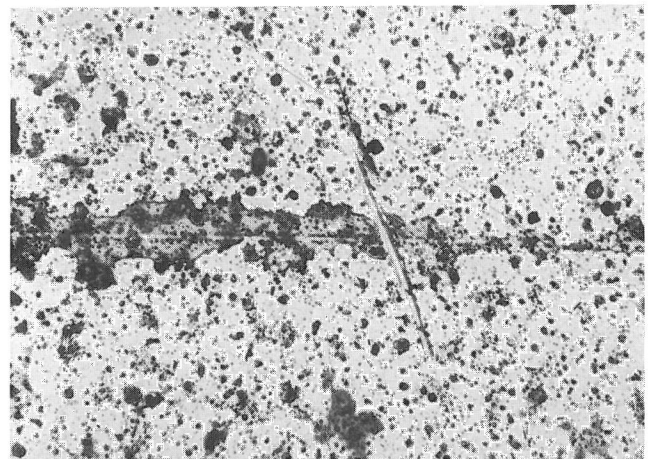


Abb. 23  
Tastspuren

Zur Verdeutlichung sind in der *Tabelle 3* die maximalen Belastungen für verschiedene Materialien und die dazugehörigen Brinellhärten zusammengefaßt [2]:

*Tabelle 3*  
Oberflächenbelastungen bei Tastschnittsystem

Material	Al	Au	Glas	Ni	Stahl
$\sigma_{\max}$ [kp/mm <sup>2</sup> ]	$\rho = 10 \mu\text{m}$ 200	235	205	365	365
	$\rho = 2 \mu\text{m}$ 580	630	590	1060	1000
Brinell [kp/mm <sup>2</sup> ]	15...50	50...230	500...600	90...300	70...600

Wie man aus der obigen Tabelle ersieht, bekommt man schon bei Verwendung von Tastnadeln mit  $10\mu\text{m}$  Radius bleibende Meßspuren, deren Breite zugleich Rückschlüsse auf die Härte des Materials zulassen. Bei sinnvoller Anwendung und Beschränkung auf Rillentiefen von  $0,5\text{...}1\mu\text{m}$  wird das Tastschnittverfahren für schnelle Routinemessungen jedoch quantitative Aussagen liefern.

Gänzlich unmöglich ist es aber, Fasern, Textilien und Gewebe z. B. mit Hilfe von Tastschnittsystemen zu vermessen. In solchen Fällen empfiehlt es sich, berührungslose Methoden anzuwenden. Dabei kann die Abtastung einer Oberfläche anstelle der Abtastnadel auch mit Licht- oder Korpuskel-Strahlen erfolgen. Der große Vorteil dieser Methoden gegenüber den direkten Tastverfahren besteht darin, daß dies berührungslos geschieht, d. h. keine Meßspuren auf dem Prüfling erzeugt werden.

Zu diesen Methoden zählen u. a. [3]:

- Fibre Optic Transducer
- Optical Fourier Transformation
- Lichtreflexion
- Differential Light Scattering
- Laser Scanning Analyzer
- Holography
- Interferometrie
- Glanzmessung
- Photogrammetrische Methoden,

von denen die Interferometrie [4] die sicherlich bekannteste Methodik ist. Sie wird bereits seit langem angewendet, um Niveauunterschiede an Flächen zu studieren und zu messen, wie z. B. Messung der Oberflächengüte mechanisch bearbeiteter Flächen, Messen der Dicke dünner Schichten usw. Die herausragenden Vorteile der interferometrischen Methode anderen Verfahren gegenüber sind:

- Beobachtung der Oberflächenstruktur durch Abbildung
- Untersuchung der Oberflächenstruktur mehrerer Schnitte gleichzeitig durch Vielstrahlinterferenz
- außerordentlich hohe Meßgenauigkeit
- selbstkalibrierend
- Verwendung der Lichtwellenlänge als Maßstab (hohe Tiefenauflösung)
- Die Beurteilung einer großen Fläche ist mit einem Blick möglich

Die interferometrische Flächenprüfung eignet sich besonders für Flächen, deren Rauhtiefen unter  $1\mu\text{m}$  liegen. Die Meßunsicherheit bei Multipelinterferenzen ist dabei nicht größer als  $0,001\mu\text{m}$ . Die ansonst bei Zweistrahlinterferenzen auftretenden Streifen sind hier durch Linien ersetzt, die wirkliche Profil- oder Niveaukurven darstellen und Oberflächenformen verschiedener Art genau wiedergeben (Abb. 24, 25).

Durch die Vielstrahlinterferenz wird ein interessanter Meßbereich erschlossen ( $0,001\text{...}0,1\mu\text{m}$ ), der gewöhnlich nur mit Hilfe des Elektronenmikroskops untersucht wird. Neben der Messung der Oberflächengüte feinstbearbeiteter Metallflächen gewinnen in neuerer Zeit auch die optisch polierten Flächen zunehmend an Bedeutung. Dadurch, daß die Probenflächen durch Bedampfung mit hochreflektierenden Schichten belegt werden können, ist eine Oberflächenmessung mit großer Genauigkeit möglich.

Ganz ähnlich wie bei der eben behandelten Methode liegen die Verhältnisse bei Anwendung des Lasers als Methode zur Beschreibung [5] von Oberflächen. Die Gründe für den erfolgreichen Einsatz liegen in seinen besonderen physikalischen Eigenschaften. Auch hier scheiden die Nachteile der Tastschnittsysteme aus. Von besonderem Vorteil bei Anwendung dieser Methode ist:

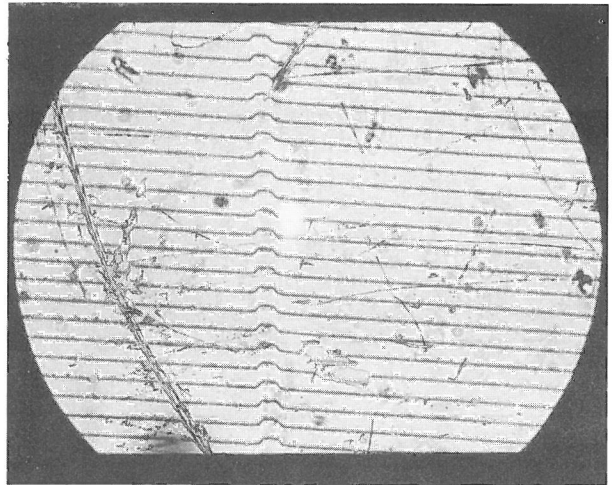


Abb. 24  
Vielstrahlinterferenz an einer Gold-Aufdampfstufe

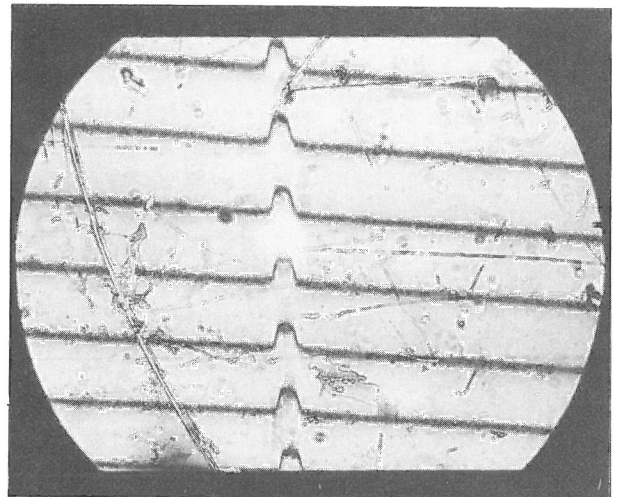


Abb. 25  
Vielstrahlinterferenz (höher aufgelöst)

- keine Zerstörung der Oberfläche
- Meßmöglichkeit während der Fertigung
- räumliches Erfassen von Oberflächenstrukturen
- Messung aus größerer Entfernung möglich.

Je nach entsprechender Anwendung der Methode (Tast-Fühlschnittverfahren, holographische Interferometrie, Reflexionseigenschaft, Granulationsmuster) wird zwischen den einzelnen Verfahren unterschieden. Auf weitere Einzelheiten sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen.

Zum Schluß dieser vergleichenden Betrachtung sei noch auf die Glanzmessung sowie Streulichtmessung zur Charakterisierung und zur Ermittlung von Rauigkeiten von Oberflächen hingewiesen, ohne in diesem Zusammenhang näher darauf einzugehen [6 bis 8].

### 3. Grundlagen der stereoskopischen Vermessung von Oberflächen

Alle bisher betrachteten Methoden benutzen zur Ermittlung von Oberflächenkennwerten als Sensoren Tastdiamanten oder Licht- bzw. Laserstrahlen, um nach geeigneter Detektion auswertbare Ergebnisse zu erhalten.

Eine andere brauchbare Methode ist die, bei der die Oberfläche durch einen Tastdiamanten geritzt wird, so daß sich eine Schleifspur (Ritzspur) eingräbt. Bei senkrechter Betrachtung erscheint im Mikroskop eine gerade Linie, die keine Informati-

onen über das Profil ergibt. Kippt man jedoch die Oberfläche um einen bestimmten Winkel, so erkennt man deutliche Abweichungen der Linie nach oben und unten (von einer mittleren Linie), und man ist nun in der Lage, bei bekanntem Winkel die erkennbare Ritzspur auszumessen und das Profil zu ermitteln (Abb. 26).

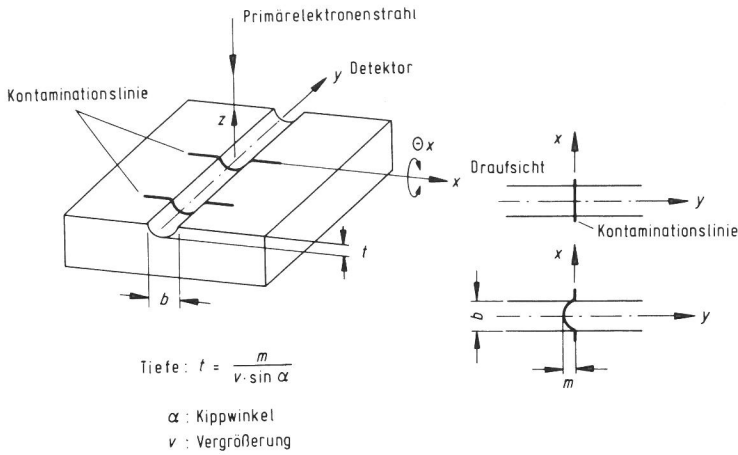


Abb. 26  
Methode zur Höhen- bzw. Tiefendarstellung mit Hilfe von Kontaminationslinien [9 bis 11]

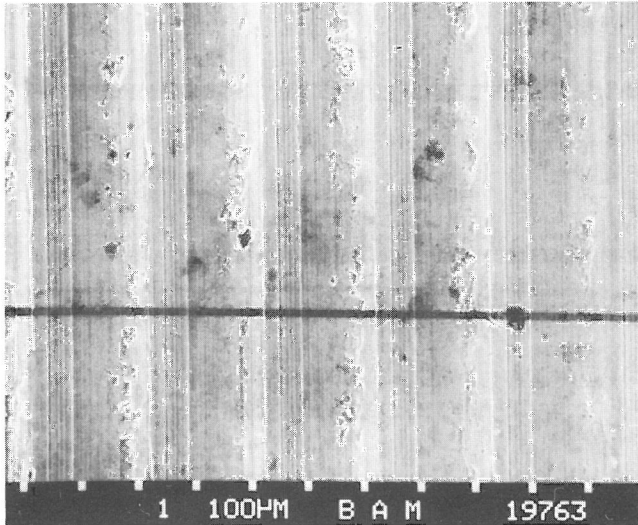


Abb. 27  
Kontaminationslinie  
Probe nicht gekippt, Linie aufgeschrieben

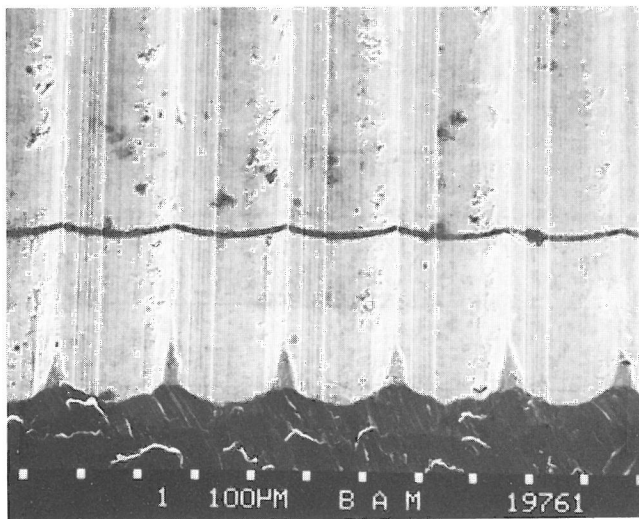


Abb. 28  
Kontaminationslinie  
Probe gekippt

Jedoch ist diese Methode nicht in allen Fällen anwendbar, besonders dann nicht, wenn es sich um stark strukturierte und empfindliche Oberflächen handelt. Besser geeignet ist dagegen die abgewandelte Methode von HOOVER, ECKOLT und HILLMANN [9 bis 11], die den Effekt der ansonst im Elektronenmikroskop sehr störenden Kontamination der Probenoberfläche bei Bestrahlung mit Elektronen dazu benutzen, durch einen langsamen Line-Scan des Elektronenstrahls Kontaminationslinien auf die Probenfläche zu schreiben. Diese entstehen dadurch, daß beim Auftreten der Elektronen auf der Präparatoberfläche auf dieser vorhandene Ölmoleküle geplatzt und zu unbeweglichen Kohlenstoffmolekülen vermascht werden. Durch Kippen der Präparatoberfläche kann dann aus dem Verlauf der Kontaminationslinie auf die Oberflächentopographie geschlossen werden (Abb. 27, 28).

Bei der nun zu besprechenden Methode — der Stereotechnik — [12 bis 33] stehen, im Gegensatz zur allgemeinen Anwendung, in unserem Fall die Wechselwirkung von Elektronen mit Festkörperoberflächen und die Bilderherstellung nach den Prinzipien der Fernsehetechnik im Vordergrund. Die geometrische Auswertung von Stereobildern, mit der sich die Stereophotogrammetrie befaßt, ist heute eine sehr bedeutungsvolle Technik. Erinnert sei hier an die vielen verschiedenen Anwendungsbereiche, wie Luftbildmessung, Architekturphotogrammetrie und Denkmalpflege, Festlegung von Gebäudeschäden, Rekonstruktionen zerstörter Gebäude, Ingenieurbau, Straßen- und Verkehrswesen, Ballistik, Flugbahnbestimmung, Satellitenphotogrammetrie und Flugwesen, Atomphysik (Auswertung von Teilchenspuren in der Wilson-Nebelkammer), Gletscherkunde, Meteorologie und Wolkenmessung, Verkehrsunfallaufklärung, Medizin, Nutzung von Bodenschätzen, Flurbereinigung, Mondvermessung und dergleichen mehr. In der vorliegenden Arbeit sollen die für uns wichtigen Zusammenhänge der Ausmessung räumlicher Gebilde kurz erläutert werden:

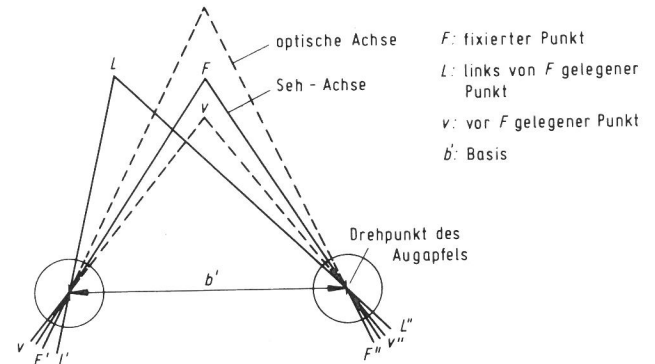


Abb. 29  
Vorgänge beim räumlichen Sehen [25, 26]

Bei der Stereovermessung geht man von der Tatsache aus, daß die Tiefenwahrnehmung, nämlich das räumliche Sehen, darauf beruht, daß in beiden Augen eines Betrachters verschiedene Bilder auf der Netzhaut erzeugt werden (Abb. 29), die dadurch entstehen, daß der zu betrachtende Gegenstand von verschiedenen Punkten aus gesehen wird [25, 26]. Man kann dies photographisch dadurch verifizieren, indem man beide Augen durch photographische Apparate ersetzt und entsprechende Bilder herstellt, die nach Entfernung der Objekte betrachtet annähernd den gleichen räumlichen Eindruck wie vorher beim Betrachten der Natur ergeben. Zur bequemeren Betrachtung wird dabei meist eine Stereolupe oder ein Stereoskop verwendet. Die geometrische Auswertung von Stereobildern [28 bis 32], mit der sich die Stereophotogrammetrie befaßt, scheint eine sinnvolle Ergänzung zu den bisher besprochenen Methoden zu sein. Hier erfolgt die Ermittlung von Oberflächenkennwerten dadurch, daß zunächst unter geeigneten Bedingungen Stereobildpaare hergestellt und in entsprechenden Auswertegeräten vermessen werden. Dabei kann es sich um Luftbilddaufnahmen wie auch um elektronenmikroskopische Stereoaufnahmen handeln.

Im Gegensatz zu den üblichen lichtoptischen Stereoaufnahmen, bei denen das Objekt in der Regel feststeht, wird im Bereich der Elektronenmikroskopie aus konstruktiven Gründen nicht mit ortsbeweglichem Linsensystem gearbeitet. Das Objekt wird gewöhnlich so angeordnet, daß es aus der Normalebene zur optischen Achse des Mikroskops nach beiden Seiten um einen bestimmten Winkel (= halber Konvergenzwinkel) gekippt (Abb. 30) werden kann. Von jeder Lage des Objektes wird nacheinander eine Aufnahme gemacht, so daß auf diese Weise ein Stereobildpaar entsteht, welches ebenso wie ein mit parallelen Achsen aufgenommenes Bild räumlich ausgemessen werden kann. Da es nur auf die relative Lage des Objektes zum Objektiv ankommt, ist es gleich, ob das Objekt oder das Objektiv geschwenkt wird [27].

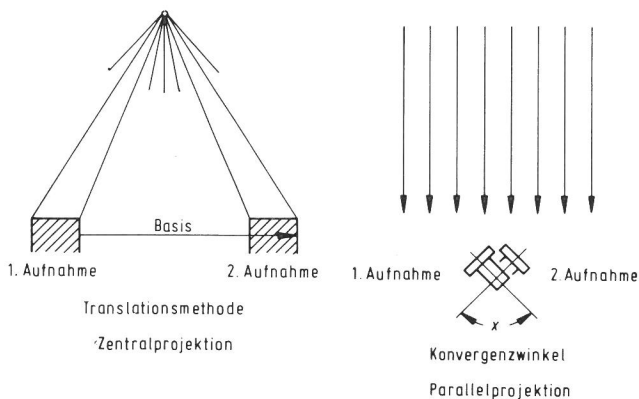


Abb. 30  
Methoden zur Stereobildherstellung [27]

Grundsätzliche Unterschiede von Licht- und Elektronenmikroskopen bestehen in der Art der Strahlenbündel, obwohl Abbildung und Vergrößerung nach den optischen Gesetzen erfolgen. Während bei Auge, Kamera und Lichtmikroskop die Bündel zentralperspektivisch verlaufen, durchdringen die Elektronen die Präparate annähernd parallel. Von Bedeutung für die Auswertung ist aber nur der Teil, der das Präparat durchdringt. Was später mit den Elektronenwellen zur Bildherstellung geschieht, bleibt jedoch ohne Einfluß. Das heißt, daß sich bei parallelem Strahlengang Aufnahme- als auch Auswertemethoden von denen bei der Luftbildkartierung üblichen Methoden unterscheiden müssen.

Trotz der stürmischen Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronen- bzw. Elektronenrastermikroskopie und der Signalverarbeitung ist es bis heute für viele Anwender noch nicht problemlos, Tiefen- bzw. Höheninformationen von elektronenmikroskopischen Objekten zu erhalten. Vermessungen der dritten Dimension mit sehr hoher Genauigkeit, insbesondere bei empfindlichen und kleinen Objekten, sind nach wie vor Domäne der Stereotechnik. Stereobildpaare werden in Rasterelektronenmikroskopen gewöhnlich durch Verkippungen des zu untersuchenden Objektes gegenüber der Instrumentenachse und Betrachtung in diesen beiden Positionen erhalten. Bei sehr hohen Vergrößerungen wird der abtastende Elektronenstrahl nur sehr wenig aus der Achse abgelenkt, so daß die Abbildung des Objektes nahezu durch eine Parallelprojektion erfolgt. Aufnahmen schwächerer Vergrößerung stellen dagegen zentralperspektivische Abbildungen dar (Abb. 31).

Es gibt zwei gebräuchliche Methoden, Stereobildpaare in einem Rasterelektronenmikroskop herzustellen: die Translationsmethode und die Klappmethode (Abb. 32). Bei der Translationsmethode, d.h. bei kleinen Vergrößerungen, wird das Objekt zwischen beiden Aufnahmen senkrecht zur optischen Achse um eine bestimmte Strecke verschoben, wobei der Arbeitsabstand erhalten bleibt.

Für die Höhendifferenz  $y$  zweier Bildpunkte ergibt sich folgender Zusammenhang (Abb. 32) [12, 13]:

$$w = L + K_V$$

Abstand des Projektionszentrums vom Objekt

$$y = \frac{p \cdot w}{x \cdot V}$$

$x$ : Verschiebung  
 $V$ : Vergrößerung  
 $p$ : Parallaxe

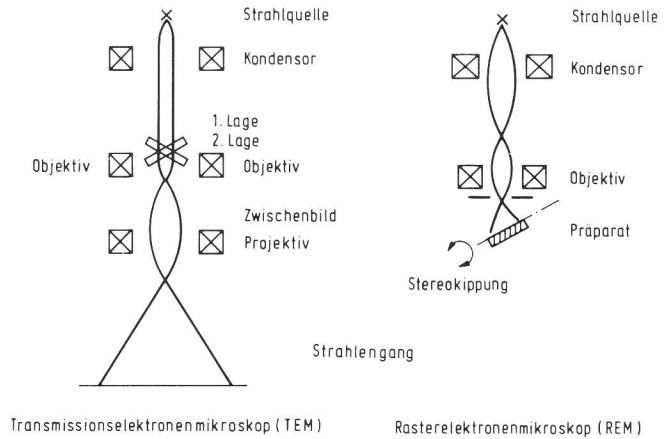


Abb. 31  
Strahlengang in Elektronenmikroskopen und Lagen des Objektes bei der Stereobildherstellung

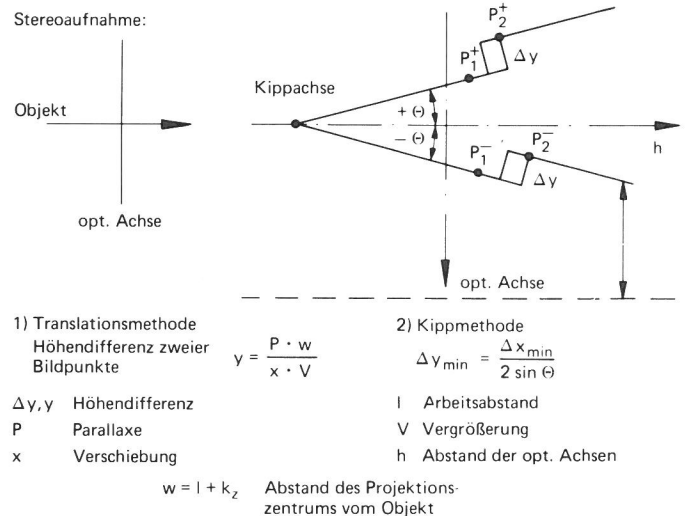


Abb. 32  
Methoden zur Herstellung von Stereobildpaaren

Bei der Klappmethode dagegen erfolgt eine Drehung  $\Delta: \pm \theta$  um eine Achse senkrecht zur optischen Achse. Mit den Abständen  $x_1, x_2$  von der Spur der Kippachse erhält man für  $V > 1000$  folgende Beziehung [12, 13]:

$$y_0 = \frac{x_{01} \sin \Phi_2 - x_{02} \sin \Phi_1}{\sin 2\Theta}$$

( $\Phi_1 = \alpha - \Delta \theta$ ,  $\Phi_2 = \alpha + \Delta \theta$ ),  $\alpha = 0^\circ$   $V_1 = V_2$   
(Parallaxe  $p = x_{01} - x_{02}$ )

und in vereinfachter Darstellung für die Höhendifferenz:

$$y_0 = \frac{p}{2 V \sin \Theta}$$

Für viele Anwendungen der Stereomikroskopie interessiert aber die kleinste noch nachweisbare Höhendifferenz (s. Tabelle 3). Sie ist gegeben durch:

$$\Delta y_{\min} = \frac{\Delta p_{\min}}{2 V \sin \Theta}$$

Für  $\Delta p_{\min} = 1 \text{ nm}$ ,  $\theta = 5^\circ$  ergibt sich z. B. eine Höhe von  $\Delta y = 5,8 \text{ nm}$ .

Eine Verbesserung der Höhengauflösung ist nur noch durch Vergrößerung des Kippwinkels zu erreichen (Tabelle 4).

Bei kristallinen Objekten können jedoch durch Braggsche Reflexion zusätzlich Strukturen entstehen, die nicht auf Dickenunterschieden beruhen und die sich sehr empfindlich mit den Einstrahlungsbedingungen verändern. Dies ist bei der Untersuchung von Kristallbaufehlern sehr störend und setzt ein Goniometer mit zwei voneinander unabhängigen Kippachsen voraus.

Bei der Herstellung der Stereobildpaare ist zu beachten, daß durch apparative und elektronenoptische Unzulänglichkeiten Fehler mit in die Bilderstellung eingehen, die bei der anschließenden Auswertung berücksichtigt werden müssen. Es sei an dieser Stelle nur auf einige Fehlermöglichkeiten hingewiesen, die auftreten können bei Ermittlung bzw. Einstellung von:

- Abstand vom Projektionszentrum
- Vergrößerung
- Bildrotation
- Kippwinkel
- Parallaxenbestimmung

Durch fehlerhafte Einstellungen können auf diese Weise falsche Orientierungsdaten zu Modellverbiegungen führen, die nur in speziellen Geräten beseitigt werden können. Bei der Betrachtung von Stereobildpaaren, die unter verschiedenen Konvergenzwinkeln hergestellt wurden, erkennt man deutliche Unterschiede zum objektähnlichen Bild. Ursache hierfür ist, daß bei der Herstellung von Stereobildern das Basisverhältnis des freiaugigen Sehens sich kaum jemals einhalten läßt. Durch eine Basisänderung wird die dritte Dimension des Objektes gedehnt oder gestaucht, was zur Folge hat, daß die Bildpaare zur Ermittlung der wahren Tiefe und Höhe nicht nur betrachtet, sondern an dafür geeigneten Geräten ausgemessen werden müssen, wenn verbindliche Aussagen über die Oberflächentopographie gemacht werden sollen (Abb. 33).

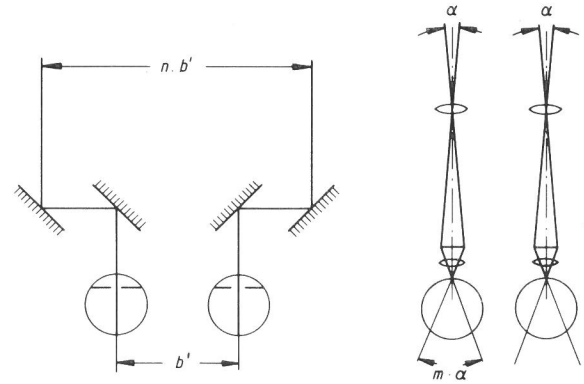
Tabelle 4  
Höhenauflösung von Stereobildpaaren bei verschiedenen  $V$ ,  $\Theta$ ,  $\Delta p$

$\Delta p$	$\Theta$	10fach				100fach			
		$\pm 1^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
0,01		0,014 327	0,005 737	0,002 879	0,001 462	0,001 433	0,000 574	0,000 288	0,000 146
0,05		0,071 634	0,028 684	0,014 397	0,007 310	0,007 163	0,002 868	0,001 440	0,000 731
0,1		0,143 269	0,057 369	0,028 794	0,014 619	0,014 327	0,005 737	0,002 879	0,001 462
0,2		0,286 537	0,114 737	0,057 588	0,029 238	0,028 654	0,011 474	0,005 759	0,002 924
0,5		0,716 343	0,286 843	0,143 969	0,073 095	0,071 634	0,028 684	0,014 397	0,007 310
1,0		1,432 685	0,573 686	0,287 938	0,146 190	0,143 269	0,057 369	0,028 794	0,014 619

$\Delta p$	$\Theta$	1000fach				10 000fach			
		$\pm 1^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
0,01		0,000 143	0,000 057	0,000 029	0,000 015	0,000 015	0,000 006	0,000 003	0,000 001
0,05		0,000 716	0,000 287	0,000 144	0,000 073	0,000 072	0,000 029	0,000 014	0,000 007
0,1		0,001 433	0,000 574	0,000 288	0,000 146	0,000 143	0,000 057	0,000 029	0,000 015
0,2		0,002 866	0,001 148	0,000 576	0,000 292	0,000 286	0,000 114	0,000 058	0,000 030
0,5		0,007 160	0,002 870	0,001 440	0,000 730	0,000 720	0,000 290	0,000 140	0,000 070
1,0		0,014 330	0,005 740	0,002 880	0,001 460	0,001 430	0,000 570	0,000 290	0,000 150

$\Delta p =$  Parallaxe       $V =$  Vergrößerung       $\Theta =$  Kippwinkel       $y =$  Höhe



$b'$ : Augenabstand, Vergrößerung der Basis durch Geräte auf  $n \cdot b$  ( $m \cdot \alpha$ )

Abb. 33  
Einfluß der Basisbreite auf das Tiefenunterscheidungsvermögen [25]

Ein wesentliches Merkmal der Elektronenabbildung ist die hohe Tiefenschärfe. Während Lichtmikroskope nur Schichten geringer Tiefe scharf darstellen, können mit Elektronenmikroskopen räumliche Objekte im allgemeinen in voller Ausdehnung scharf abgebildet werden. Das ermöglicht die Herstellung scharfer dreidimensional auswertbarer Stereobildpaare.

Die zum Durchstrahlungstyp gehörenden Elektronenmikroskope arbeiten ähnlich wie die Lichtmikroskope. Von einer Kathode (= Lichtquelle) ausgesandte Elektronen (= Lichtstrahlen) durchdringen auf ihrem Wege zum Leuchtschirm (Okular-Auge) das Objekt und werden dabei gebremst, gestreut und z. T. absorbiert. Auf den Leuchtschirm treffen die Elektronen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Intensität auf und erzeugen so ein Bild.

Neben diesem Typ hat sich in neuerer Zeit ein Gerät durchgesetzt, bei dem sekundäre und rückgestreute Elektronen zur Bilderstellung herangezogen werden: das Rasterelektronenmikroskop. Die grundlegenden Ideen stammen aus den dreißiger Jahren von Manfred v. Ardenne. Das Prinzip des Gerätes beruht darauf, daß ein Elektronenstrahl die Oberfläche eines Präparates zeilenförmig abtastet und mit ihm synchron der

$$\Delta y = \frac{\Delta p}{V \cdot 2 \cdot \sin \Theta} \quad \Theta = \frac{\gamma}{2}$$

Schreibstrahl einer Kathodenstrahlröhre geführt wird. Die entstehenden sekundären (reflektierten) Elektronen werden detektiert und steuern über eine Elektronik die Helligkeit des Schreibstrahls einer Oszillographenröhre. Auf diese Weise wird die Probenoberfläche gescannt und zeilenförmig auf dem Bildschirm der Kathodenstrahlröhre zusammengesetzt. Da die Menge der emittierten Sekundärelektronen in erster Linie vom Auftreffwinkel des abtastenden Strahls auf der Objektfläche abhängt, wirken REM-Bilder sehr plastisch (siehe Bildtafeln). Auch Rasterelektronenmikroskope arbeiten mit sehr hoher Tiefenschärfe, weshalb die Aufnahme und Auswertung stereoskopischer Bildpaare von räumlichen Objekten auf photogrammetrischem Wege möglich ist (Abb. 34).



Abb. 34  
Modernes Hochleistungs-Rasterelektronenmikroskop (Fa. Cambridge)

Erste Messungen an elektronenmikroskopischen Stereoaufnahmen wurden 1940 von W. EITEL und E. GOTTHARDT [28] am Institut für Photogrammetrie der TH Berlin gemacht und unter Annahme einer strengen Parallelprojektion ausgewertet. Erst nach einer längeren Ruhepause wurden auf Initiative von J. G. HELMCKE [31] 1952 die Arbeiten wieder aufgenommen.

Zur Betrachtung und Auswertung von Stereoaufnahmen wird ein Stereoauswertegerät [29] verwendet (hier abgebildet ein Elmitop, das zur Auswertung elektronenmikroskopischer Aufnahmen für uns vom Institut für Photogrammetrie der TU Berlin gebaut wurde) (Abb. 35). Der Auswertung von Stereobildern liegt folgendes Prinzip zugrunde:

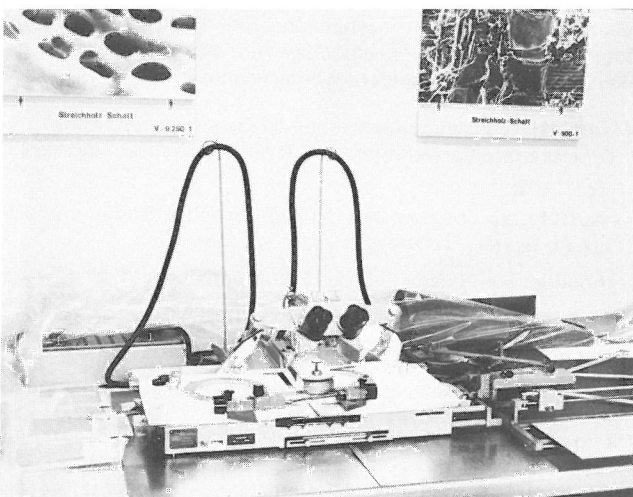


Abb. 35  
Stereoauswertegerät „Elmitop“

Die zusammengehörigen Punkte in stereoskopischen Aufnahmen liegen so zueinander, daß sie als Raumpunkte erscheinen. Entsprechend können nun auch nachträglich auf den Teilbildern

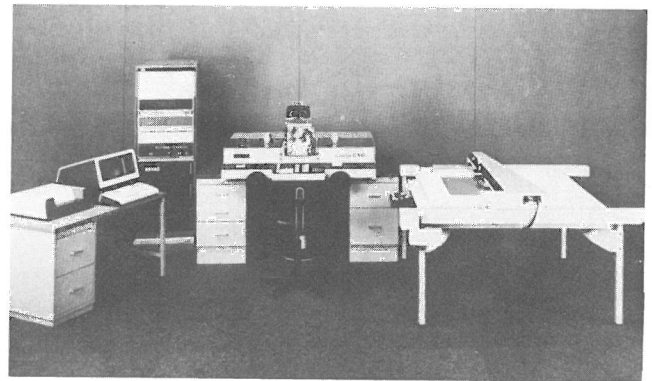


Abb. 36  
Modernes stereoskopisches Auswerte- und Kartiergerät (Zeiss)

Marken angebracht werden, so daß bei der stereoskopischen Betrachtung beide zu einer räumlich gesehenen Meßmarke  $M$  zusammenschmelzen. Durch bewegliche Anordnung der Marken ist es möglich, der Meßmarke  $M$  beliebige Lagen im Raum zu geben und mit ihr das Objekt auch in der Tiefe noch abzutasten und auszumessen. Das Prinzip der wandernden Marke wurde von F. Stolze und H. de Grouilliers 1892 eingeführt. Von Pulfrich, dem Vater der Stereophotogrammetrie, wurde daraus unter Benutzung photogrammetrischer Bilder ein Meßsystem entwickelt und 1901 ein Gerät zur Ausmessung von Stereobildpaaren konstruiert [25]. Das Meßprinzip (Abb. 37) beruht darauf,

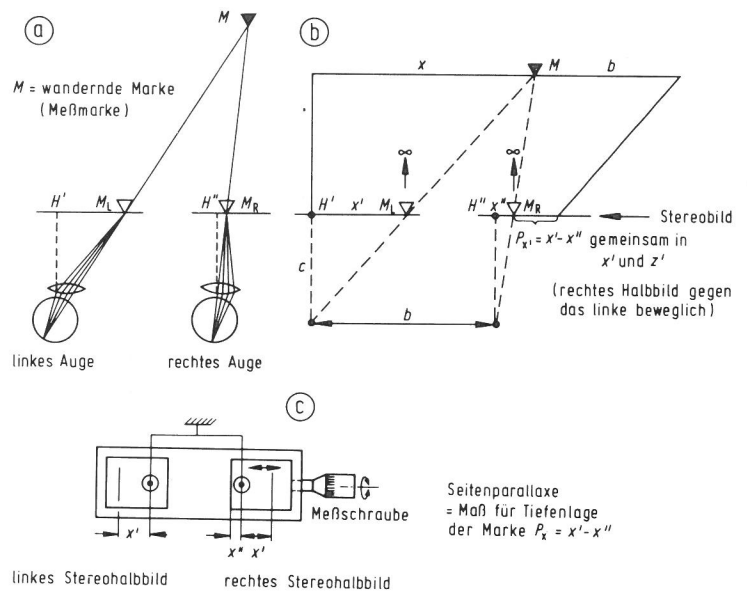


Abb. 37  
Auswertung von Stereobildpaaren. Dargestellt am Beispiel mit der wandernden Meßmarke [25]

daß durch die seitliche Verschiebung eines Bildes bei festgehaltenen Marken es zu einer scheinbaren Auf-/Ab-Bewegung der Meßmarke  $M$  kommt, die an der Meßschraube des Stereotops die ablesbare Größe  $p_x$  der seitlichen Bewegung erzeugt. Die Seitenparallaxe ist zugleich ein Maß für die Tiefenlage der Marke. Läßt man die wandernde Marke nacheinander auf zwei räumlich hintereinander liegenden Punkten des Stereobildes aufsitzen, so ergibt sich aus der Differenz der Abmessungen der Tiefenabstand der Punkte (Abb. 38).

Auf die bei der Herstellung von Stereobildpaaren auftretenden möglichen Fehler wurde schon hingewiesen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Herstellung einwandfreier, auswertbarer Stereobilder ist, daß die Kippachse die optische Achse schneidet, zu dieser senkrecht steht und in der Mitte des Bildes sowie in der mittleren Höhe der Präparatebene liegt. Damit diese

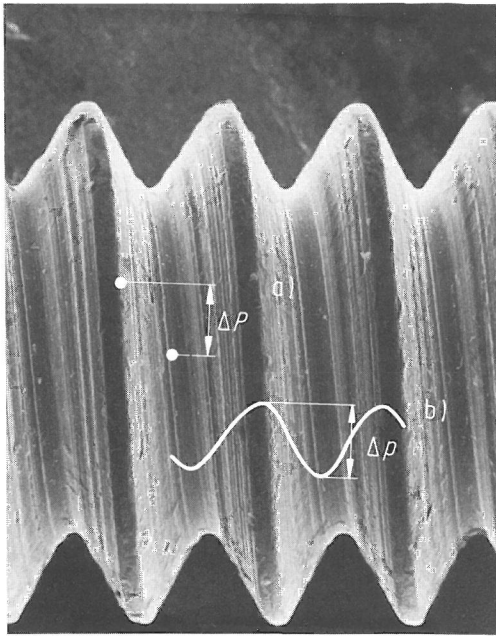


Abb. 38  
Beispiel für eine Stereoauswertung

- a) punktwises Aufsetzen der Meßmarke  
b) kontinuierliches Führen der Marke

Bedingungen erfüllt sind, ist es unbedingt erforderlich, eine optimale Justierung des Präparates zu gewährleisten. Anderenfalls kommen durch falsche Einstellung zusätzlich Fehler bei der Auswertung zum Tragen, die nur, wie bereits erwähnt, in speziellen Auswertegeräten korrigiert werden können. Von besonderer Bedeutung für die Herstellung vermeßbarer Stereobildpaare ist die Einstellung des Kippwinkels. Diese muß reproduzierbar mit hoher Genauigkeit — es genügt hier in den meisten Fällen nicht, sich auf die Skalierung der Einstelltriebe zu verlassen — bis auf  $0,01^\circ$  möglich sein. Nach Helmcke [32] ist eine Ablesegenauigkeit von wenigen Minuten wünschenswert, wobei die Einstellgenauigkeit diesen Wert nicht ganz zu erreichen braucht: „Solange aber diese Bedingung nicht erfüllt ist, bleibt jeder Versuch einer mathematisch exakten Messung sinnlos, da der Fehler bis zum Vielfachen der zu messenden Strecke ansteigen kann, ohne daß die jeweilige Fehlergröße feststellbar wäre.“ Für eine Neukonstruktion eines Probentisches sollte daher als Mindestvoraussetzung gelten, daß bei der Einstell- und Ablesevorrichtung die gleiche Genauigkeit erreicht wird wie am verwendeten Auswertegerät. Legt man die Leistungsfähigkeit unseres Gerätes (Elmitop) zugrunde, mit dem minimale Parallelaxendifferenzen von  $0,01$  mm meßbar sind, so ergibt sich bei Anwendung der Auswerteformel

$$\Delta y = \frac{\Delta p}{2 V \sin \gamma/2} = \frac{0,01}{2 V \sin \gamma/2} \Theta = \frac{\gamma}{2},$$

daß die kleinste noch meßbare Höhendifferenz von der Vergrößerung und vom jeweiligen Kippwinkel abhängt. Je größer dieser ist, desto kleinere Höhenunterschiede werden bei gleicher Vergrößerung feststellbar sein. Bei der Auswertung von Ultradünnschnitten sind von anderen Autoren [33] Winkel von  $\pm 30^\circ$  benutzt und Höhenunterschiede von  $20$  nm gemessen worden.

Im folgenden Beispiel sollen für zwei Vergrößerungen —  $1000$  und  $10000$  — bei drei verschiedenen Kippwinkeln die errechneten minimalen  $\Delta y$ -Werte einander gegenübergestellt werden:

$V \backslash \gamma$	1000fach	10 000fach
10	$5,73 \cdot 10^{-5}$ mm	$5,73 \cdot 10^{-6}$ mm
20	$2,87 \cdot 10^{-5}$ mm	$2,87 \cdot 10^{-6}$ mm
30	$1,93 \cdot 10^{-5}$ mm	$1,93 \cdot 10^{-6}$ mm

Einstellgenauigkeiten des Kippwinkels würden bei  $\gamma = 20^\circ$ ,  $V = 1000$  zu folgenden Abweichungen führen:

$\gamma = 20^\circ, V = 1000$ $\Delta p = 0,01$ mm	$\Delta \gamma$	$1,0^\circ$	$2,7443 \cdot 10^{-5}$ mm
		$0,5^\circ$	$2,8098 \cdot 10^{-5}$ mm
		$0,1^\circ$	$2,8652 \cdot 10^{-5}$ mm
		$0,01^\circ$	$2,8779 \cdot 10^{-5}$ mm

Für andere  $\Delta p$ -Werte sind die Abweichungen erheblich.

#### 4. Entwicklung und Konstruktion eines Präzisions-Goniometers

Die Herstellung von exakt vermeßbaren Stereobildpaaren in Elektronenmikroskopen erfordert Präparathalter mit vielfältigen Einstellmöglichkeiten sehr hoher Präzision. Nur in ganz wenigen Fällen sind kommerzielle Geräte mit solchen universellen Manipulatoren ausgerüstet. Der Grund dafür liegt in der sehr schwierigen technischen, konstruktiven Realisierbarkeit von Miniaturgoniometern hoher Genauigkeit. Im Gegensatz zu den Transmissionsmikroskopen sind die Rasterelektronenmikroskope z. T. mit sehr großen Kammern ausgerüstet, in denen sich — je nach Fabrikat — ein fest eingebautes Präparataufnahmesystem befindet oder aber sog. Probenwagen bei jedem Präparatwechsel ein- und ausgefahren werden können. Die Manipulation der verschiedenen Objektpositionen wird in der Regel über Feinstelltriebe mechanisch von außen vorgenommen. Goniometer für diese Geräte sind im Handel, besitzen aber nicht alle erforderlichen Einstellmöglichkeiten. Zum anderen kommt hinzu, daß die Qualität der Mechanik in bezug auf Einstellgenauigkeit — also Spielfreiheit — und Trommelskalierung sehr zu wünschen übrig läßt. Jedes dieser Goniometer ist nur für ein bestimmtes Fabrikat verwendbar. Ein Austausch bzw. ein Einsatz eines Fremdfabrikates ist aus konstruktiven Gründen nicht möglich.

Da es für die Stereobildherstellung besonders darauf ankommt, einen einmal eingestellten Präparatbereich um eine Achse in ganz bestimmten Winkeln kippen zu können, ohne daß an der Fokussierung etwas geändert werden muß, erfordert dies zur normalen Kippung und Drehung des Präparates eine weitere Kippachse. Bei dem uns zur Verfügung stehenden (im Handel befindlichen) System handelt es sich jedoch um eine Normalversion für nicht so hohe Ansprüche. Eine zweite Kippachse ist nicht vorhanden, und die Präparatoberfläche kann nicht in die Höhe der ersten Kippachse eingestellt werden. Ein Auswandern des Bildes ist also damit unvermeidlich. Kommerziell war ein geeignetes Gerät derzeit für unser Rasterelektronenmikroskop leider nicht erhältlich. Ein Ausweg aus dieser Situation war nur durch eine Eigenentwicklung möglich, die allen Anforderungen gerecht werden sollte, wie

- optimale Einstellmöglichkeiten (Präzisionsausführung) der Präparatoberfläche in bezug auf die Kippachsen und Positionierung,
- Ausführung des Systems mit drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgraden,
- hochgenaue Einstellung der Stereokippachse ( $0,01^\circ$ ),
- motorisches Antriebssystem (Schrittmotor),
- motorisches Antriebssystem (Schrittmotor),
- elektronisches Anzeigesystem der verschiedenen Positionen.

Die Idee, die dieser Neuentwicklung zugrunde lag [28], war die Konstruktion eines volleuzentrischen\*) Goniometers. Der Unterschied zu normalen Goniometern, die häufig bei der Röntgenbeugung verwendet werden, liegt darin, daß hier die

\*) Kippung wie Drehung der Probe erfolgen euzentrisch, d. h. Drehung erfolgt nicht um die Mittelachse des Probentellers, sondern um den Auftreffpunkt des Elektronenstrahls und die Kippung um eine horizontale Achse durch den Auftreffpunkt.



Kreuztischsysteme (X, Y, Z) über die Schalen für die Rotationen gesetzt werden. Das hat technisch jedoch zur Folge, daß bei einer Verkipfung die Kreuztischsysteme und Antriebsachsen

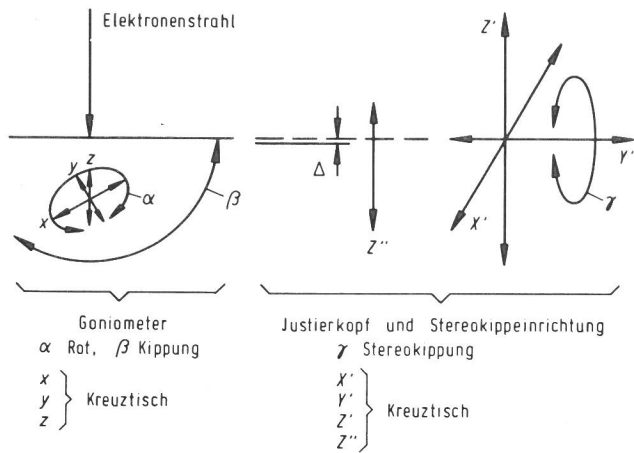


Abb. 39  
Achsensysteme des projizierten volleuzentrischen Präzisions-Goniometers

mitgedreht werden. Diese Drehung führt jedoch, falls alles in einer Probenkammer durchgeführt werden soll, bei einer rein mechanischen Lösung zu unüberwindbaren Schwierigkeiten. Abgesehen von den hohen Kosten ist eine Entkopplung der verschiedenen Achsensysteme kaum spielfrei zu fertigen. Statt dessen wurde in unserem Fall der motorischen Version mit direkt angetriebenen Tischen der Vorzug gegeben. Aber auch hier gab es bald räumliche Schwierigkeiten. Trotz der scheinbar großen Probenkammer mußte nach Lösungen geforscht werden, die die geforderten Freiheitsgrade im Probenraum bei gleichzeitiger Präzision ermöglichten. Eine kardanische Lösung des Problems war aus räumlichen und elektronenoptischen Gründen nicht möglich. Von vielen Entwürfen blieb nur eine Konzeption, die

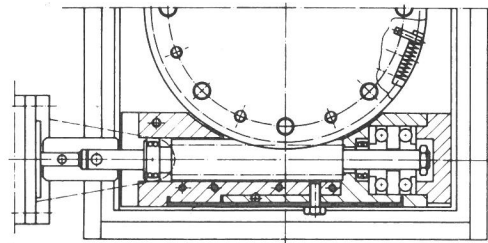


Abb. 40  
Stereokippeinrichtung: Antriebssystem (Schnecke, Schneckenrad, Lagerung)

dazu zwang, die Kippung des Objektes in Richtung Detektor durch ein Segment von  $150^\circ$  mit aufgesetzter Rotation und Kreuztischelementen zu konstruieren und die dritte Rotation, die Stereokippung, nach außen zu verlegen.

Das euzentrische Zentrum ist hierbei ein fiktiver Punkt oberhalb der Kreuztische. Nur auf diese Weise konnte eine optimale Ausführung aller Einstellachsen gewährleistet werden. Konzipiert wurde das System aus fertigungstechnischen Gründen in Modulbauweise, um so vielen Ansprüchen und eventuellen Reparaturen gerecht zu werden. Im folgenden Bild (Abb. 39) ist das Achsensystem des volleuzentrischen Goniometers schematisch dargestellt. Das Gesamtsystem besteht aus den translatorischen Achsen X, Y, Z und den rotatorischen Achsen  $\alpha$ ,  $\beta$  im Goniometer (links im Bild) und weiteren translatorischen Achsen X', Y', Z'' nebst einer Rotation  $\gamma$  im Justierkopf der Stereokippeinrichtung (rechts im Bild). Dabei werden die Goniometerachsen mit Schrittmotoren in Präzisionsausführung betätigt. Die Achsen zur Justierung des Goniometers und der Stereokippung sind aus dem Schutzgehäuse der Stereokippeinrichtung, das durch Elastomerdichtungen gegen die Probenkammer abgedichtet wurde, herausgezogen. Die räumliche Trennung beider Goniometerschalen für die Probenkippungen ermöglicht den Einsatz eines geschlossenen Rundlagers großen Durchmessers (Abb. 40) in Präzisionsausführung, das auf

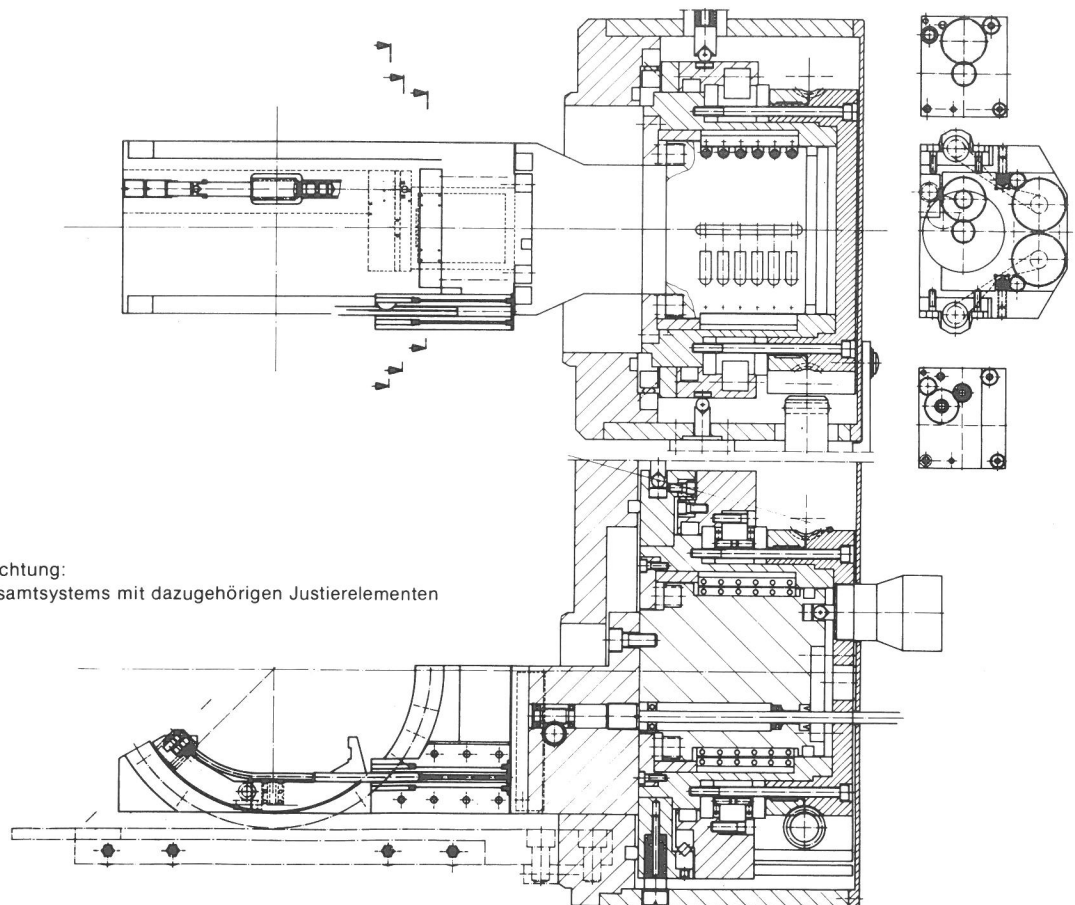


Abb. 41  
Stereokippeinrichtung:  
Aufbau des Gesamtsystems mit dazugehörigen Justierelementen

formstabilen Kreuztischelementen montiert und zur Mittenjustierung in Kreuzrollenlagern spielfrei geführt wird. Die Stereokippung erfolgt durch Drehung dieses Lagers durch Schnecke und Schneckenrad in verspannter Ausführung. Das Schneckengehäuse ist zu diesem Zweck geteilt (Abb. 41) und über eine stabile Blattfeder miteinander verbunden.

Zur Einstellung des Kippwinkels wurde ein rechnender Spindeltrieb benutzt, der eine Einstellung und Ablesung des Kippwinkels auf  $0,01^\circ$  ermöglicht. Der gesamte Einstellwinkel der Stereokippeinrichtung beträgt theoretisch ohne angebautes Goniometer  $\pm 180^\circ$ , jedoch wird dieser Winkelbereich nur bis zu  $\sim 50^\circ$  benötigt, da dies von den räumlichen Gegebenheiten im Probenraum abhängt. Im folgenden Bild ist diese Anordnung der Stereokippeinrichtung in Verbindung mit dem Goniometer dargestellt (Abb. 42).

Mit Hilfe der zusätzlichen Kreuztischelemente X', Y', Z' (in verspannter Ausführung) kann die Achse des Rundlagers, die gleichzeitig Stereokippachse ist, zur optischen Achse des Mikroskops justiert werden. Besonders hochgenau ist die Verstellung in der Y-Richtung ausgeführt, um nach dem Anbau des Goniometers die Drehmitte mit der Mikroskopachse zur Deckung zu bringen (Differentialschraubtrieb). Um nach dem Anbau des Goniometers dieses mit seinen Achsen optimal zum Stereosystem justieren zu können, wurde zusätzlich eine weitere Justiereinstellung zur Mittenjustierung beider Systeme vorgesehen. Dies war nötig, um auch mechanische Fertigungstoleranzen auszugleichen. Der scheinbar große Aufwand der diversen Justierelemente ist dadurch gerechtfertigt, daß nur auf diese Weise eine allseitige optimale Einstellung beider Systeme zueinander und zur optischen Achse des Mikroskops möglich ist. Jeder Verzicht auf Einstellhilfen hätte nur geringfügige Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Geräten gebracht.

Das Halbschalengoniometer in volleuzentrischer Ausführung hat gegenüber anderen Konstruktionen den großen Vorteil, daß — wie bereits erwähnt — der einmal eingestellte Objektpunkt bei Rotationen und Verkippungen nicht mehr auswandert. Es liegt also eine optimale Raumpunktpositionierung vor. In unserem

Fall für eine Stereometrie heißt dies: Der so eingestellte Präparatbereich bleibt bei Verkippung scharf, wandert nicht aus und braucht auch nicht nachfokussiert zu werden. Damit können unterschiedliche Vergrößerungen in verschiedenen Bildbereichen vermieden werden, die ansonst zu Bildverzerrungen führen.

Volleuzentrische Ausführung im hier vorliegenden Fall heißt konstruktiv folgendes:

- Anordnung der Objektrotation auf der Halbschale des Goniometers,
- Integration des Hubtisches zur Hebung oder Absenkung der Präparatstelle auf den euzentrischen Punkt in die Drehmitte der Rotation,
- Aufbau der Kreuztische X, Y auf dem Rundtisch zur Objektpositionierung.

Dargestellt ist dieses Prinzip in den Abb. 43 und 44. Angetrieben werden die einzelnen Achsen mit Kleinsträzisionsmotoren der Firma Phytron in Hochvakuumausführung, die einzeln mit spielfreien Getrieben versehen wurden. Selbstverständlich wurden alle Achsen kugellagert und soweit wie möglich die Antriebsachsen spielfrei in Miniaturkreisellagern fixiert (Abb. 45).

Die Motore samt Getriebe zum Antrieb der Tische (X, Y) konnten in die Mitte des Rundtisches in einem achteckigen Baustein integriert werden, der zugleich an drei äußeren Flächen die Kugelführung des Hubtisches fixiert. Die Antriebsachsen der Motore übertragen über federverspannte Zahnräder und Schnecken ihr Antriebsmoment spielfrei auf die Zahnstangen der Tische (Abb. 46, 47).

Als Bauelemente für die Tischeinstellungen wurden handelsübliche Teile, wie Drahtkugellager (Abb. 48), Kreuzrollenlager (Abb. 49) und ein kreuzrollengelagertes Präzisionsrundlager (Abb. 50) verwendet. Um eine Beeinflussung der Mikroskopfunktion durch Streufelder der Motore zu verhindern, wurden alle Motore mit Mu-Metallabschirmungen versehen und sonstige Mechanikteile in antimagnetischer Ausführung (Messing, Titan) vorgesehen.

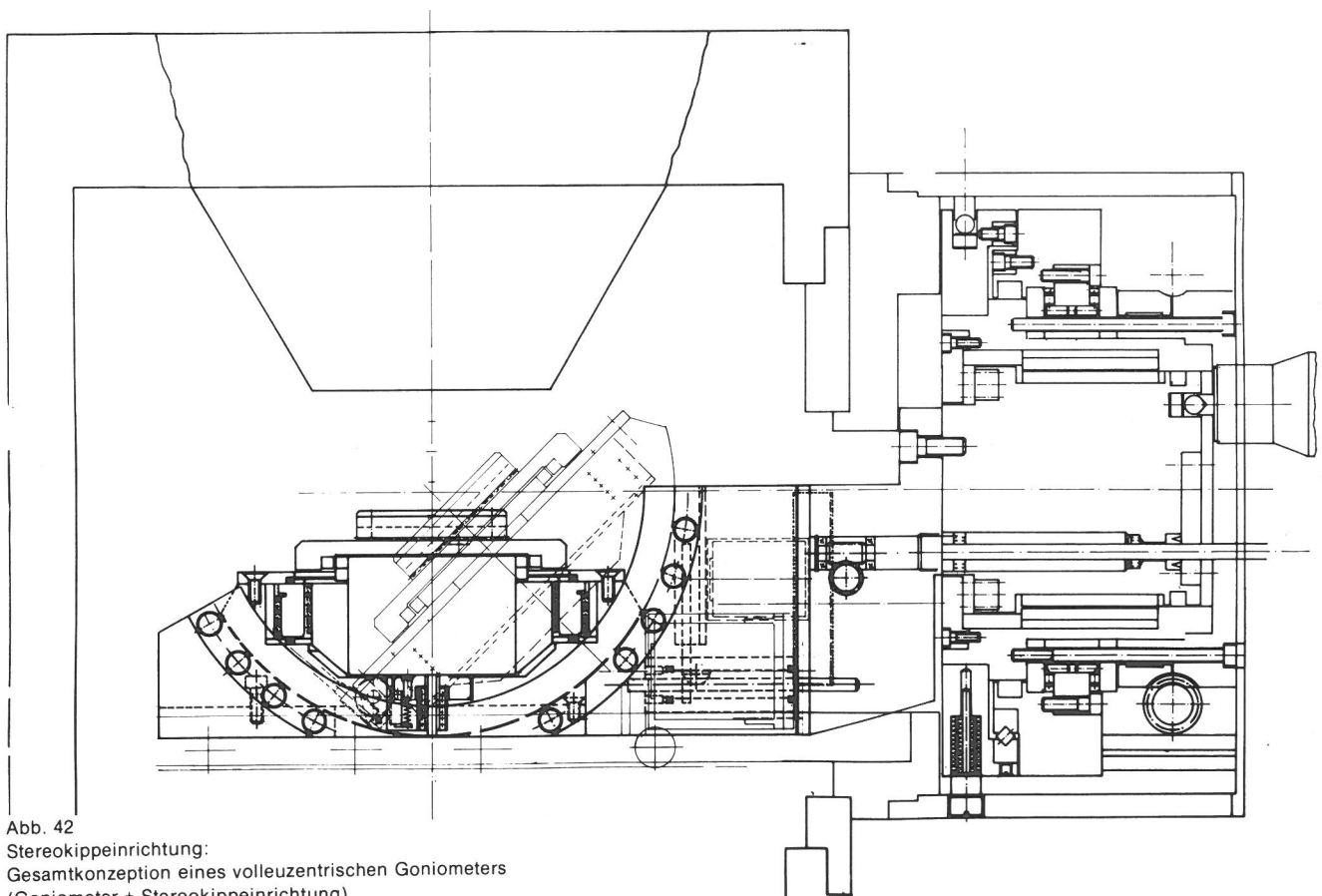


Abb. 42  
Stereokippeinrichtung:  
Gesamtkonzeption eines volleuzentrischen Goniometers  
(Goniometer + Stereokippeinrichtung)

In Abb. 51 ist das so konzipierte Gesamtsystem des volleuzentrischen Goniometers mit Präzisionskippeinrichtung dargestellt.

Im linken Bildteil ist ein Modell des Goniometers, rechts daneben das gefertigte Stereokippsystem zu sehen.

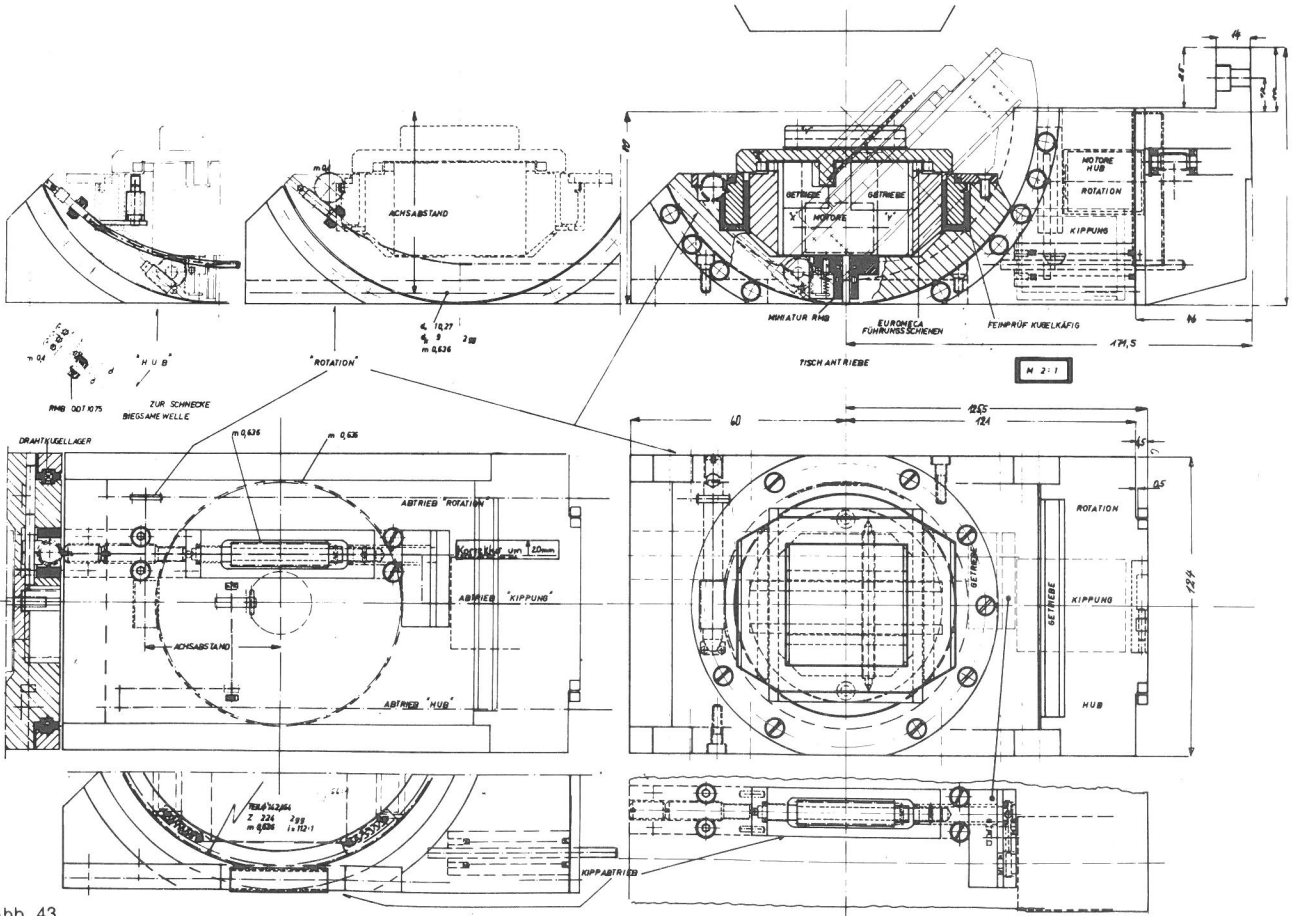


Abb. 43  
Goniometer-Ausführung

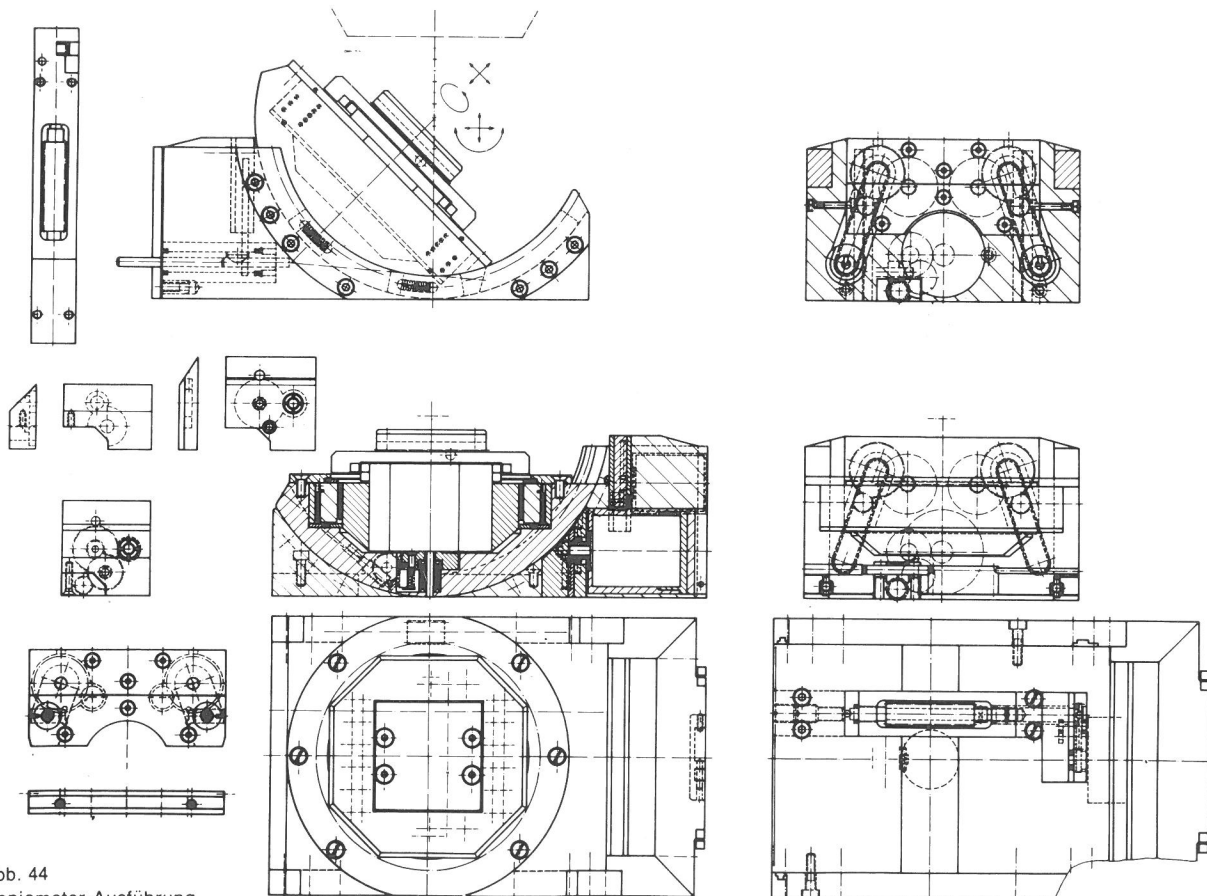


Abb. 44  
Goniometer-Ausführung

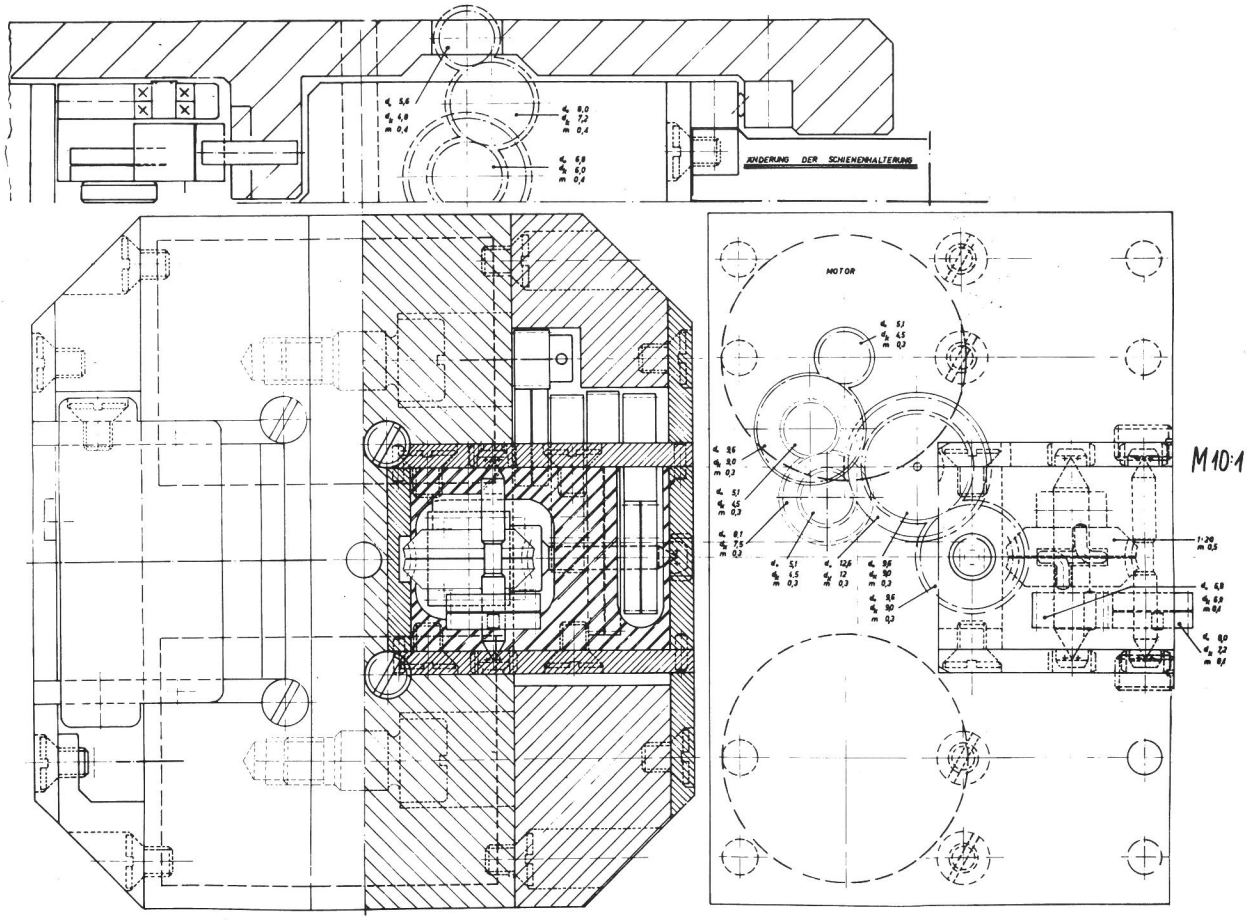


Abb. 45  
Goniometer:  
Blockmodul, Antriebssystem für einen Tisch

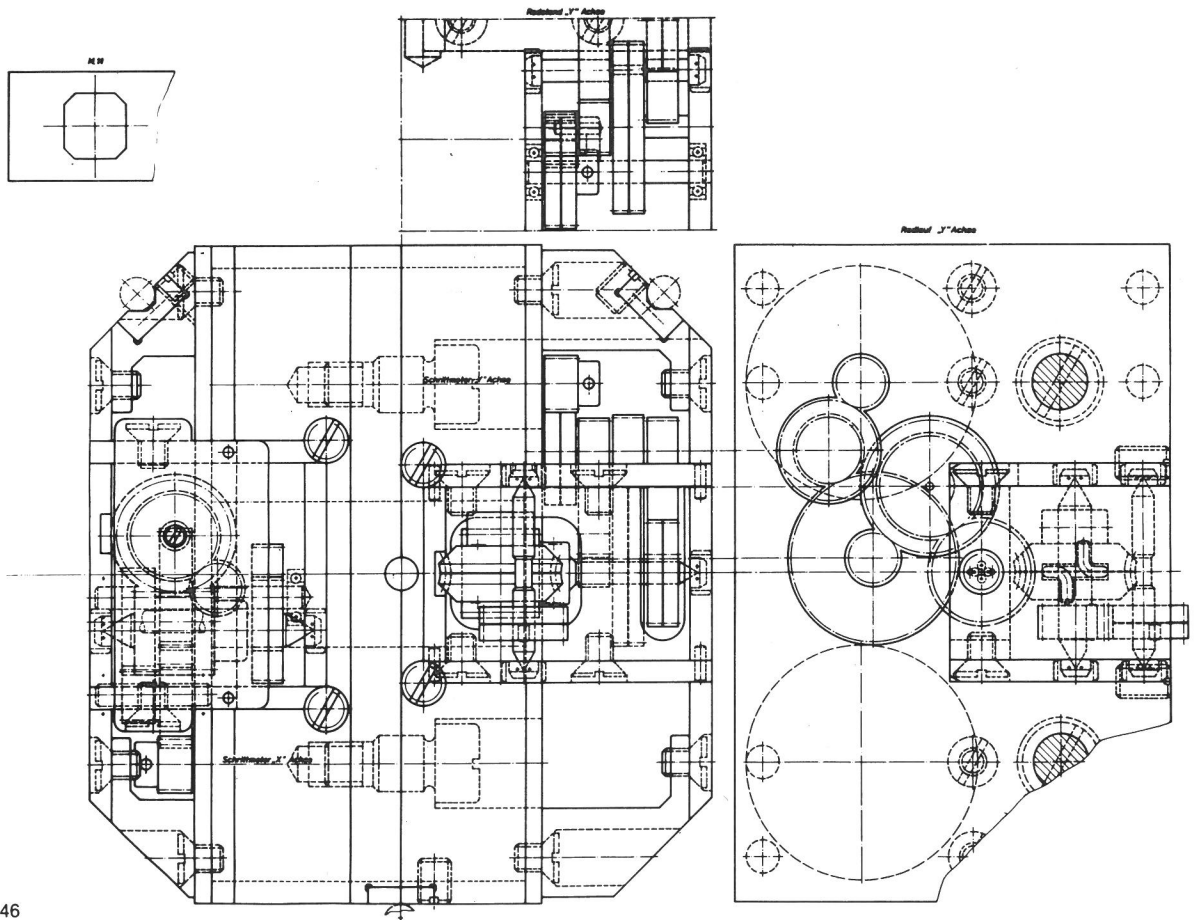


Abb. 46  
Goniometer:  
Blockmodul, Hubeinstellung, Tischantriebssysteme

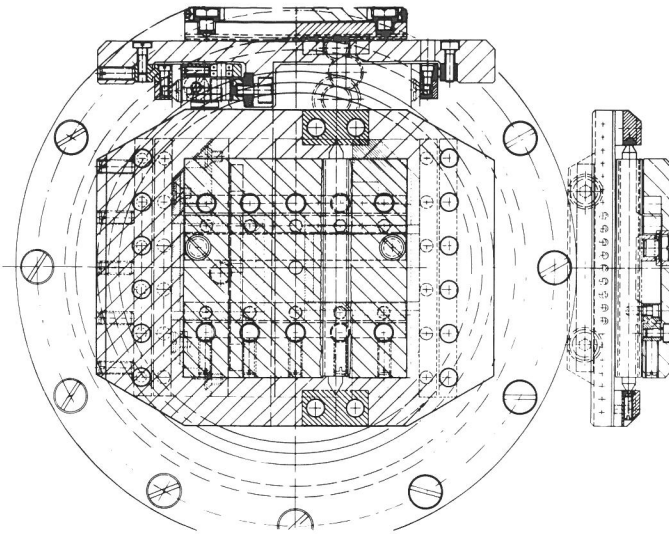


Abb. 47  
Goniometer:  
 Draufsicht: Tische, Rotation

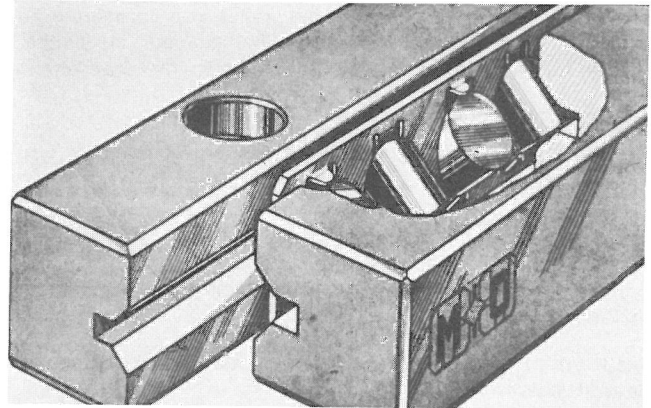


Abb. 49  
Kreuzrollenlager

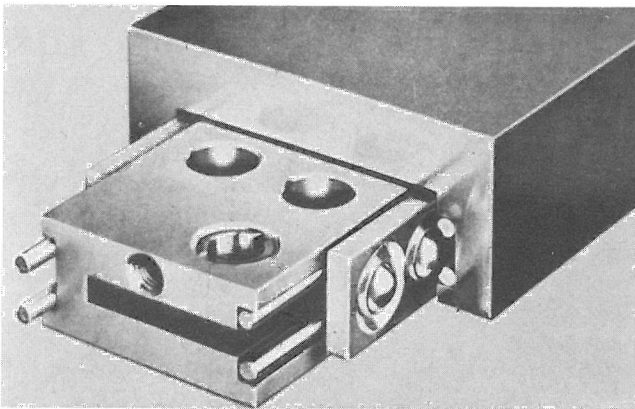


Abb. 48  
Drahtlager

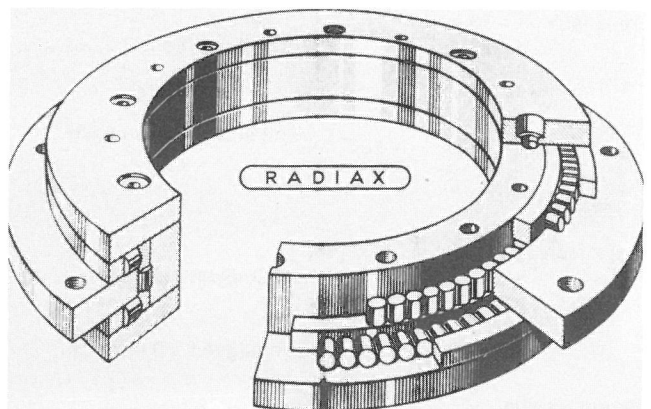
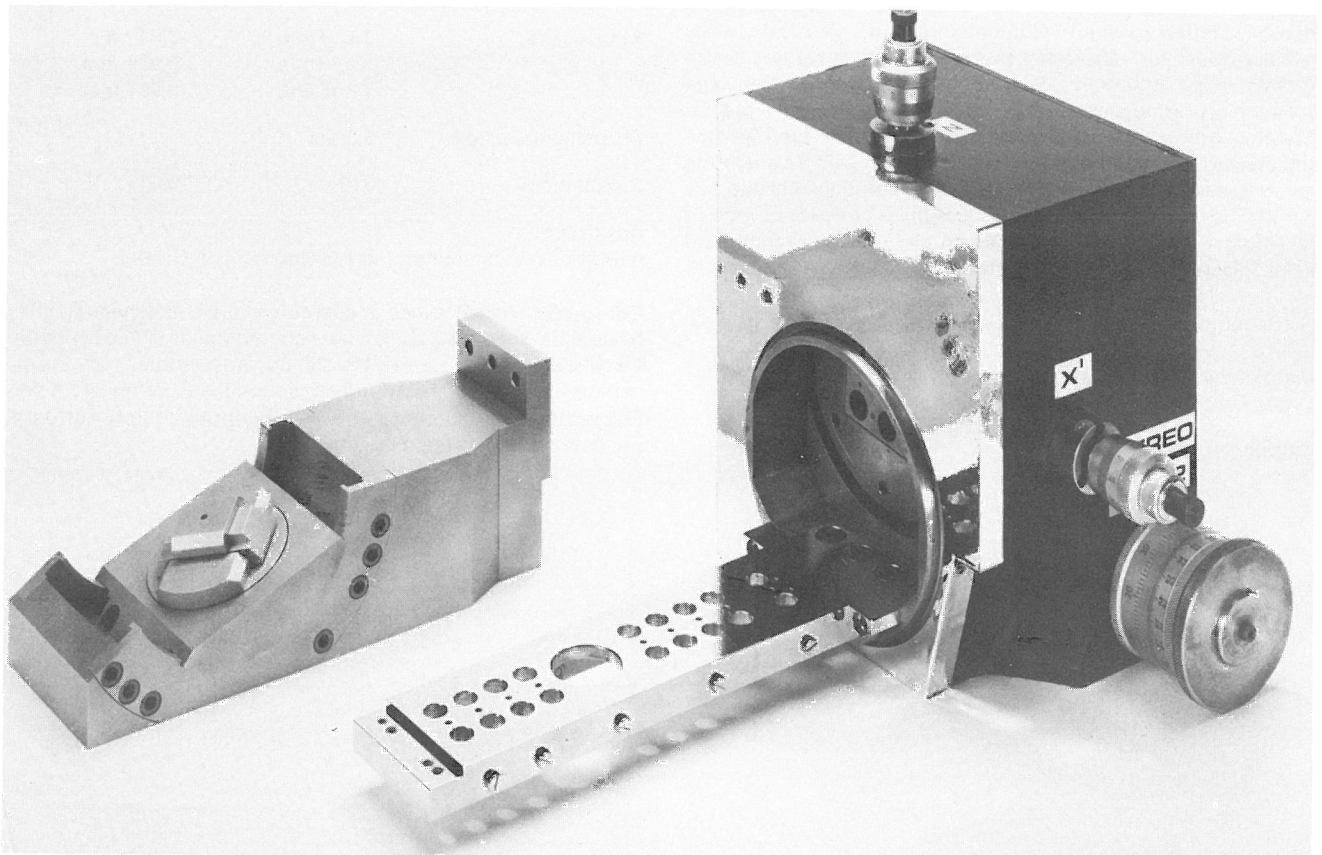


Abb. 50  
Radiax-Kreuzrollen-Präzisionslager

Abb. 51  
Gesamtansicht des projektierten und z. T. fertiggestellten volleuzentrischen Präzisions-Goniometers



## 5. Technische Daten des neuen Präzisionsgoniometers und Anwendungsbeispiele

Um fertigungstechnischen Schwierigkeiten von vornherein zu begegnen und die Teilefertigung überschaubar zu halten, wurden für das Bauprogramm drei Bauabschnitte vorgesehen:

- I. Stereokippeinrichtung
- II. Justierkopf (Verbindungsglied zwischen Goniometer und Stereokippung)
- III. Goniometer

Begonnen wurde zunächst mit der Anfertigung der Stereokippeinrichtung. Teil II und III des Programms sollten zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Das Konzept sah folgende technische Daten des Goniometer-Gesamtsystems vor:

### Goniometer

Kreuztisch:  $X \pm 15 \text{ mm}$   
 $Y \pm 20 \text{ mm}$                       Verstellung / Schritt  $0,001 \text{ mm}$   
 $Z \pm 5 \text{ mm}$

Rotation:  $\alpha \pm 180^\circ$   
 Kippung:  $\beta - 10^\circ \dots + 50^\circ$                       Verstellung / Schritt  $0,01^\circ$

### Justierkopf

Kreuztisch:  $Z'' \pm 2,5 \text{ mm}$   
 $X' \pm 5 \text{ mm}$                       Genauigkeit  $\pm 0,005 \text{ mm}$   
 $Y' \pm 5 \text{ mm}$   
 $Z' \pm 5 \text{ mm}$                       Genauigkeit  $\pm 0,001 \text{ mm}$

### Stereokippung

$\gamma \pm 180^\circ$                       Genauigkeit  $\pm 0,01^\circ$

Zwischenzeitlich nahm die Firma Cambridge — z. T. nach unseren und eigenen Ideen und Unterlagen — die Fertigung eines volleuzentrischen Goniometers auf, das mit einer selbstentwickelten Mikroprozessorsteuerung versehen durch Vorwahl das Anfahren aller Achsen gleichzeitig auf eine Sollposition ermöglicht. Der Prototyp konnte von uns im Rasterelektronenmikroskop Testversuchen unterzogen werden und erwies sich trotz einiger Vereinfachungen — in Abweichung von unserem Konzept — als durchaus zufriedenstellend. Es wurde eine Einstellgenauigkeit von  $0,5 \mu\text{m}$  — ohne Abschirmung der Motore — erreicht. Schwächen der mechanischen und elektronischen Ausführung wurden inzwischen verbessert.

Die technischen Daten dieses Gerätes sind (Abb. 52, 53):

### Motorische Verstellung:

Kippung:  $3 - 33^\circ$                       Genauigkeit:  $0,01^\circ$

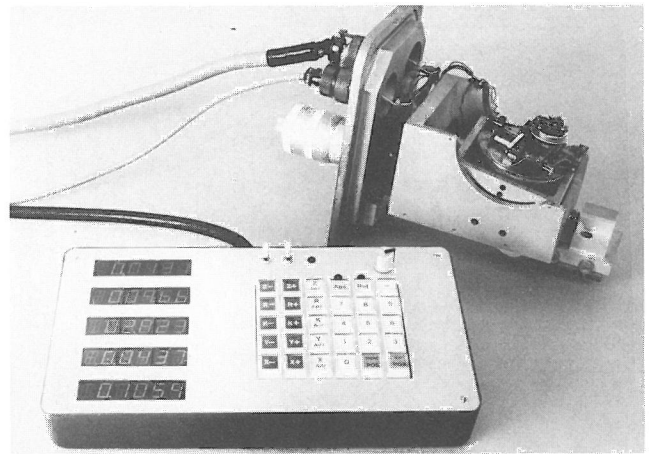


Abb. 52  
 Volleuzentrisches Halbschalen-Goniometer mit Mikroprozessorsteuerung (Fa. Cambridge)

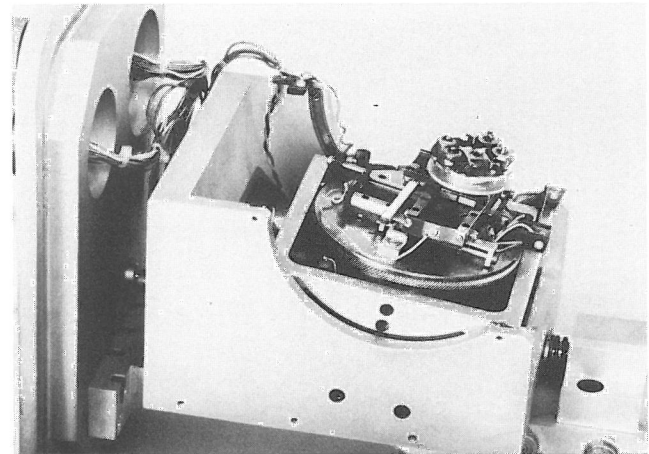


Abb. 53  
 Volleuzentrisches Halbschalen-Goniometer (Fa. Cambridge)

Kreuztische:	$Z \pm 4 \text{ mm}$	$0,01 \text{ mm}$
	$X \pm 12 \text{ mm}$	$0,001 \text{ mm}$
	$Y \pm 12 \text{ mm}$	$0,001 \text{ mm}$
Einstellgenauigkeit:	$0,5 \mu\text{m}$	
Rotation:	$340^\circ$	$0,01^\circ$
Zusätzlich manuelle Y-Verstellung:	$\pm 7,5 \text{ mm}$	

Der große Vorteil eines steuerbaren euzentrischen Gerätes besteht im Gegensatz zu den überwiegend manuell bedienbaren Goniometern darin, daß die Herstellung auswertbarer Stereoaufnahmen großer Präzision und ein schnelles Durchmusteren von Präparaten auch zu einem späteren Zeitpunkt durch Aufzeichnung der Koordinaten möglich ist.

## Literatur:

- [ 1] Abou-Aly, M.:  
Ein systematischer Überblick über die Oberflächenprüf- und Meßverfahren.  
Metalloberfläche **30** (1976), 12, S. 569
- [ 2] Schlötterer, H.:  
Über die Grenzen der Anwendung von Tastschnittgeräten.  
Metalloberfläche 19. Jahrg. 1965, 1, S. 8
- [ 3] Feinle, P.:  
Tagungsbericht BAM: Internationale Konferenz „Metrology and Properties of Engineering Surfaces“ 1979, Leicester
- [ 4] Lehmann, W.:  
Oberflächenprüfung mittels Lichtinterferenz.  
Metalloberfläche **30** (1978), 12, S. 579
- [ 5] Abou-Aly, M.:  
Meßverfahren zur Beschreibung der Oberfläche mit Hilfe des Lasers.  
Metalloberfläche **31** (1977), 12, S. 568
- [ 6] Lohmeyer, S.:  
Glanzmessung. Metalloberfläche **30** (1976), 12, S. 573  
Glanzmeßgeräte. Metalloberfläche **30** (1976), 12, S. 583  
**31** (1977), 1, S. 28  
**31** (1977), 2, S. 74
- [ 7] Wiechmann, R.:  
Verfahren zur betrieblichen Überwachung eines Relativwertes für die Oberflächengestalt der Kupferfolie für kupferkaschierte Schichtpreßstoffe.  
Metalloberfläche **31** (1977), 12, S. 563
- [ 8] Bodesheim, J., A. Otto:  
Bestimmung der Rauigkeit von Silberfolien durch Streulichtmessung.  
Vakuum-Technik 23. Jahrg. (1974), 7, S. 198
- [ 9] Eckolt, E., W. Hillmann:  
Bestimmung der Rauheit technischer Oberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop durch Kontaminationslinien.  
Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl. **6** (1973), S. 329
- [10] Hillmann, W., E. Eckolt, O. Kranz:  
Fortschritte in der Untersuchung von technischen Oberflächen.  
Vortragsmanuskript — PTB Braunschweig  
  
Kranz, O., W. Hillmann:  
Untersuchungen der Diamantspitzen der Tastnadeln von Rauheitsmeßgeräten mit dem Raster-Elektronenmikroskop.  
Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl. **6** (1973), S. 319
- [11] Hoover, R. A.:  
Measuring Surface Variations with the Scanning Electron Microscope Using Deposited Contamination Lines.  
J. Phys. E: Sci. Instr. **4** (1971), S. 747
- [12] Reimer, L., G. Pfefferkorn:  
Rasterelektronenmikroskopie.  
Springer-Verlag 1973
- [13] Reimer, L.:  
Elektronenmikroskopische Untersuchungs- und Präparationsmethoden.  
Springer-Verlag 1967
- [14] Boyde, A.:  
Practical Problems and Methods in the Three-Dimensional Analysis of Scanning Electron Microscope Images.  
Scanning Electron Microscopy 1970, IITRI, Chicago, p. 105
- [15] Boyde, A.:  
A Stereo-Plotting Device for SEM Micrographs; and a Real Time 3-D System for the SEM.  
Scanning Electron Microscopy 1974, IITRI, Chicago, Part I
- [16] Boyde, A.:  
Determination of the Principal Distance and the Location of the Perspective Centre in Low Magnification SEM Photogrammetry.  
J. of Microscopy **105** (1975), Part I, p. 97
- [17] Howell, P. G. T.:  
A Theoretical Approach to the Errors in SEM Photogrammetry.  
SCANNING **1** (1978), 2, S. 118
- [18] Howell, P. G. T.:  
The Derivation of Working Formulae for SEM Photogrammetry at Low Instrumental Magnifications.  
SCANNING **1** (1978), 4, S. 230
- [19] Cripps, J. B., H. Sang:  
Stereo Height Measurements in Scanning Electron Microscopy.  
Rev. Sci. Instr. **41** (1970), 12, S. 1825
- [20] Lane, G. S.:  
The Application of Stereographic Techniques to the Scanning Electron Microscope.  
J. Sci. Instr. **2** (1969), S. 565
- [21] Pawley, J. B.:  
Design and Performance of Presently Available TV-Rate Stereo SEM Systems.  
Scanning Electron Microscopy (SEM)/1978, Vol. I, p. 157
- [22] Piazzesi, G.:  
Photogrammetry with the Scanning Electron Microscope.  
J. Sci. Instr. **6** (1973), S. 392
- [23] Hilliard, J. E.:  
Quantitative Analysis of Scanning Electron Micrographs.  
J. of Microscopy **95** (1972), p. 45
- [24] Kuschek, D.:  
Das Raster-Elektronenmikroskop.  
Elektronik (1972), 12, S. 415
- [25] Burkhardt, R.:  
Das Stereoskop in seiner Anwendung als Meßgerät.  
Photo-Technik und -Wirtschaft (1956), 6, S. 241  
  
Dreidimensionale Auswertung von nach Blödorn und Lange aufgenommenen elektronenmikroskopischen Stereobildern.  
Optik **50** (1978), 4, S. 279
- [26] Müller, H. O.:  
Die Ausmessung der Tiefe übermikroskopischer Objekte.  
Kolloid-Zeitschrift **99** (1942), 1, S. 6
- [27] Weimann, G.:  
Methoden und Probleme der photogrammetrischen Auswertung von Elektronen- und Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen.  
Allgemeine Vermessungsnachrichten (1970), 9, S. 374  
  
Stereotechnik mit Raster-Elektronenmikroskopen.  
Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl. **3** (1970), S. 361
- [28] Eitel, W., E. Gotthardt:  
Über die stereophotogrammetrische Dickenmessung kleinster Kristalle nach übermikroskopischen Aufnahmen.  
Naturw. **28** (1940), S. 367

- [29] Burkhardt, R.:  
Das Elmitop, ein für elektronenmikroskopische Bildpaare umgestaltetes Zeiss-Stereotop.
- [30] Gotthardt, E.:  
Zur räumlichen Ausmessung von Objekten mit dem Elektronenmikroskop.  
Naturw. **28** (1940), S. 367
- [31] Helmcke, J.-G.:  
Theorie und Praxis der elektronenmikroskopischen Stereoaufnahmen.  
Optik **11** (1954), 5, S. 201  
  
Methoden zur Tiefenausmessung elektronenmikroskopischer Objekte und Forderungen an ein photogrammetrisches Auswertegerät.  
Optik **12** (1955), 6, S. 253
- [32] Helmcke, J.-G., H. J. Ortmann:  
Fehler bei der Tiefenbestimmung elektronenmikroskopischer Stereoaufnahmen.  
Optik **11** (1954), 12, S. 562
- [33] Williams, R. C., F. Kallmann:  
Interpretations of Electr. Micrographs of Single and Serial Sections.  
J. biophys. biochem. Cytol. **1** (1955), S. 301
- [34] Petersohn, D.:  
Ein neues volleuzentrisches Goniometer für das Raster-elektronenmikroskop.  
Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl. **10**

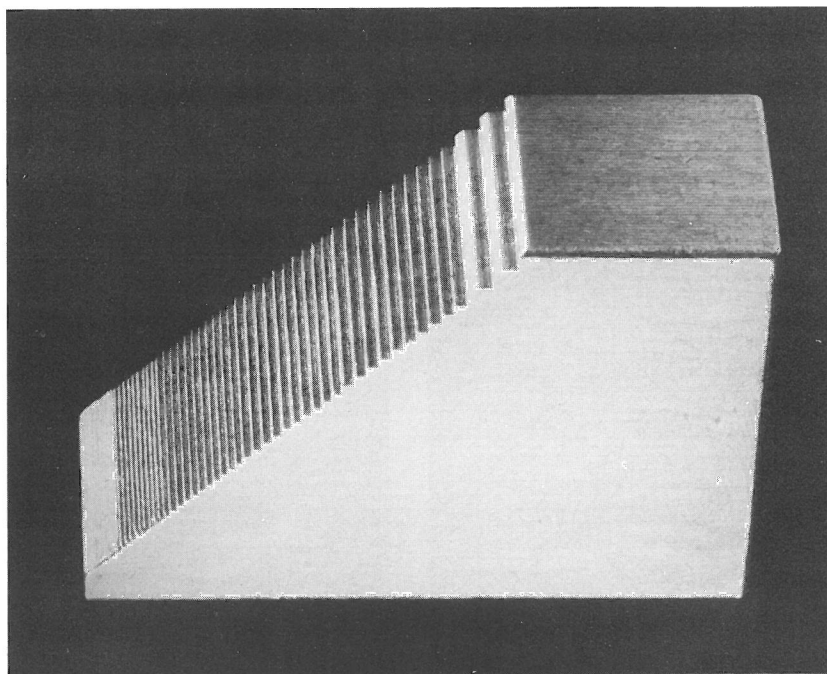
Dem Bereiche 7.320 „Entwicklung und Versuchswerkstätten“, insbesondere Herrn S. Irmer, möchte ich für die Anfertigung der vielen Zeichnungen sowie für die anregenden Diskussionen herzlich danken.



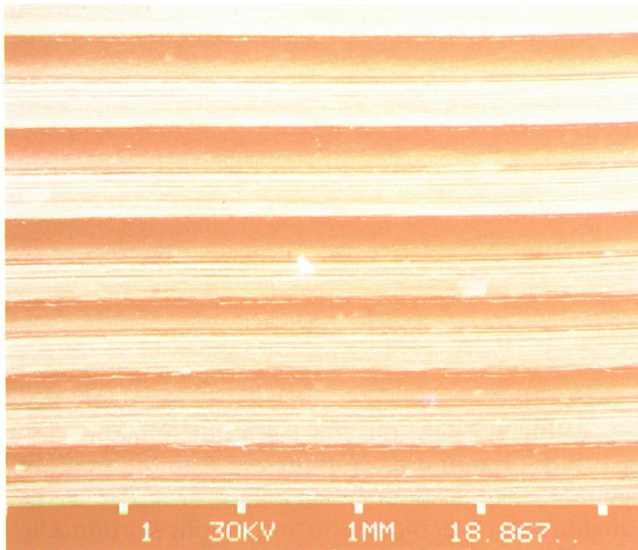
Im folgenden Bildanhang sind einige Stereobilder ausgewählt worden, die mit Hilfe der beiliegenden Stereobrille betrachtet werden können. Bei den Bildern 1 und 2 handelt es sich um die Abbildung einer gehobelten Oberfläche bei verschiedenen Kippwinkeln. Die Bilder 3 und 4 stellen Treppen eines Stufenkeils dar (siehe Übersichtsbild), die mit einer NC-gesteuerten Fräsmaschine hergestellt wurden. Die Stufenabstände wurden im oberen Teil mit einer Stufenhöhe von 0,001 mm gefertigt und nach unten hin mit Steigungen von 0,005 / 0,01 / 0,05 / 0,1 / 0,5 mm fortgesetzt. Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie konnte die Genauigkeit der Maschine getestet werden. Um den Einfluß des Kippwinkels zu demonstrieren, ist aus dem Stufenbereich ein Stereobild mit  $\pm 5^\circ$  und  $\pm 10^\circ$  hergestellt worden.

Das Bild 5 stellt Eichnormale der PTB Braunschweig dar, mit denen Tastschnittgeräte kontrolliert werden können. In den folgenden Bildern 6 und 7 sind zu Testzwecken die Gewindesteigungen einer M 1-Schraube abgebildet und stereoskopisch vermessen worden.

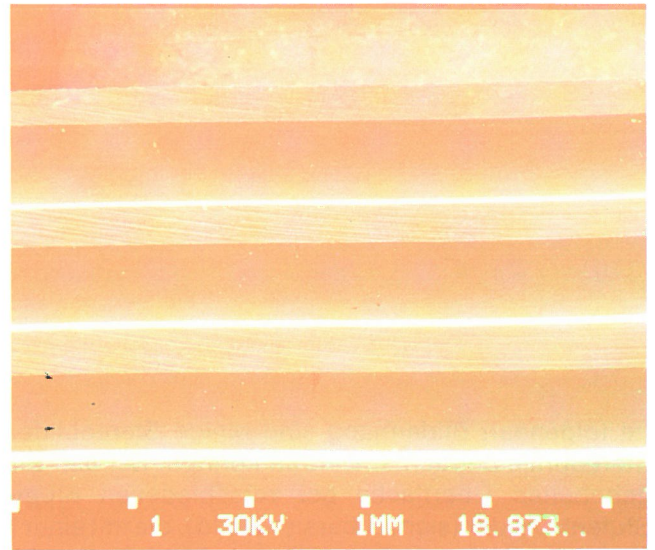
Die Bilder 8 zeigen die Bruchfläche eines Eisenkieses und verdeutlichen sehr anschaulich die Schwierigkeiten, mit Hilfe von Tastschnittgeräten die Stufenhöhen zu ermitteln. Abschließend sind zwei Bilder (9 und 10) von Kristallspaltstufen angefügt, die mit Hilfe der Photogrammetrie vermessen werden können.



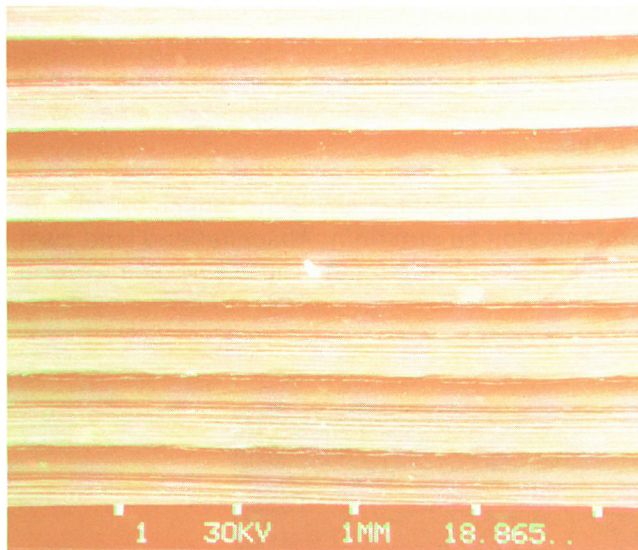
Stufenkeil



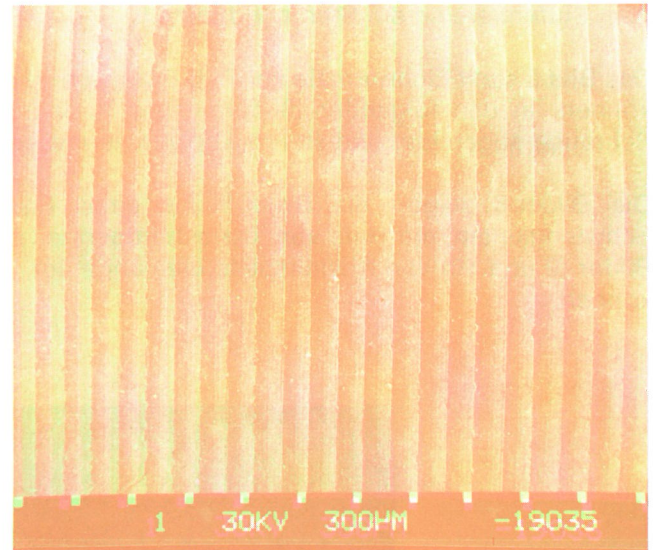
1: mechanisch bearbeitete Oberflächen (gehobelt)



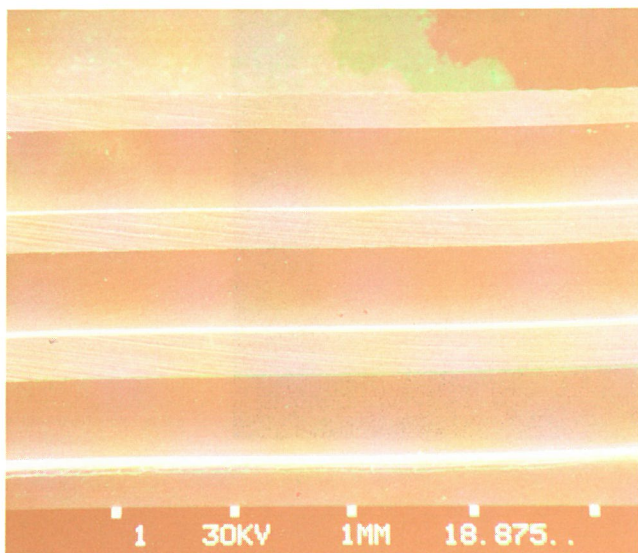
4: Bearbeitung eines Stufenkeils



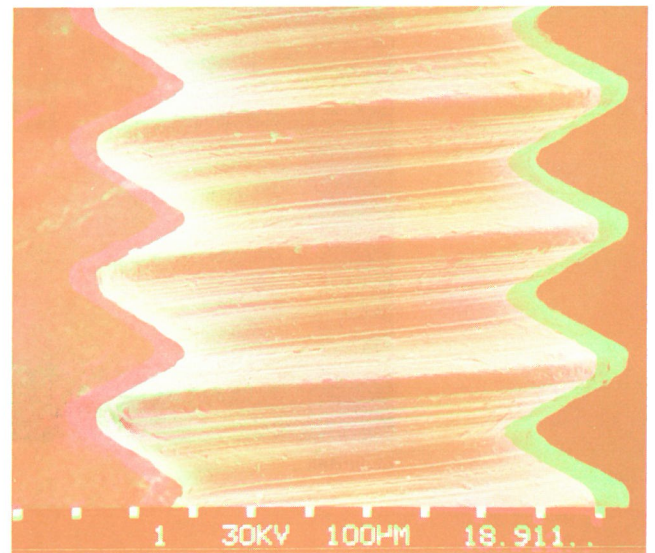
2: mechanisch bearbeitete Oberflächen (gehobelt)



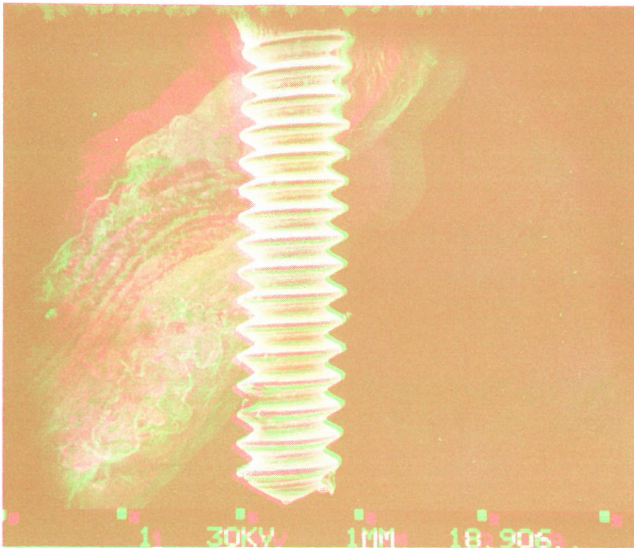
5: Eichnormale der PTB



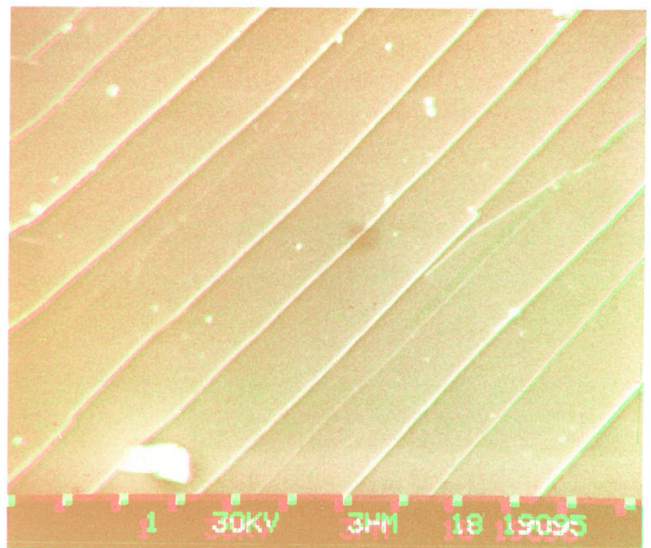
3: Bearbeitung eines Stufenkeils



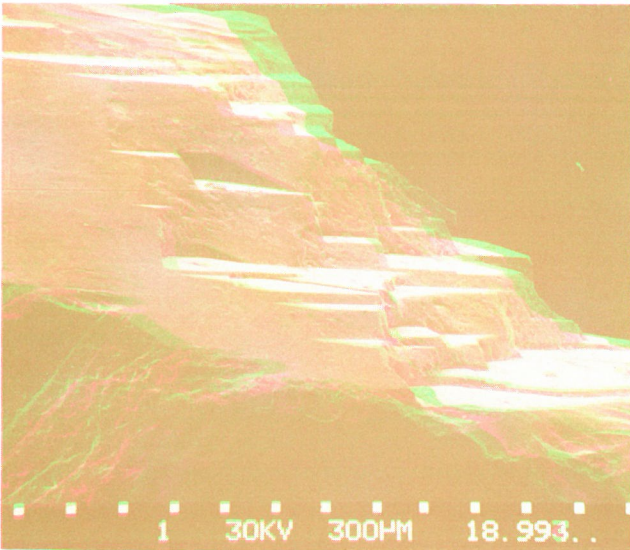
6: M 1-Gewinde



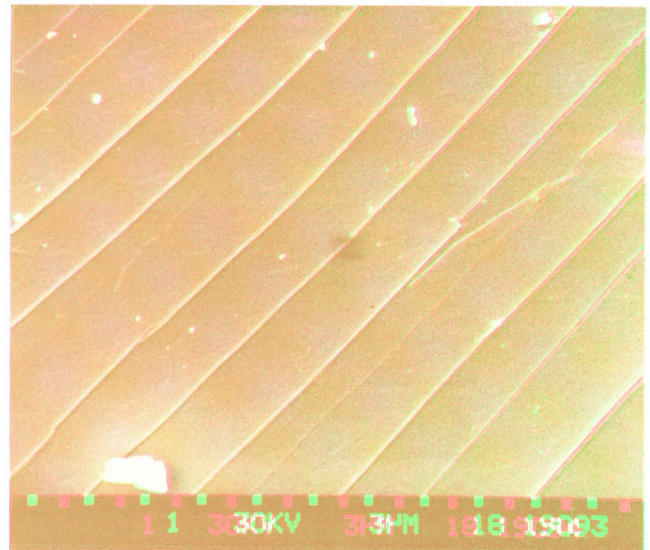
7: M 1-Gewinde



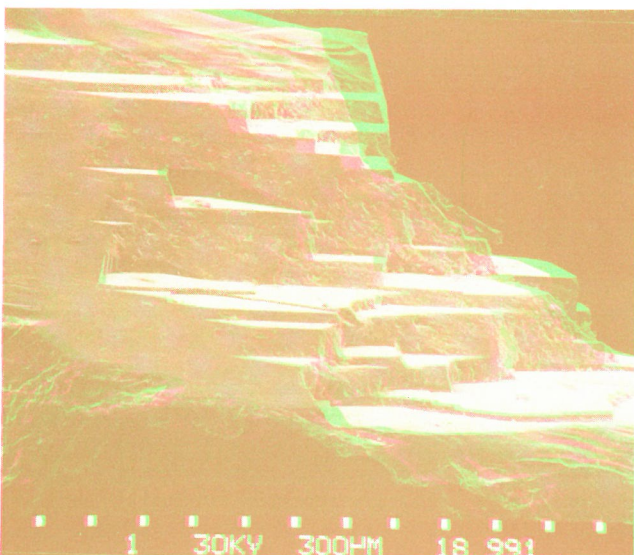
10: Spaltstufen auf Magnesiumfluorid



8: Bruchfläche eines Eisenkieses



11: Spaltstufen auf Magnesiumfluorid



9: Bruchfläche eines Eisenkieses



## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**  
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**  
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**  
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**  
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**  
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**  
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**  
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**  
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**  
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**  
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin**

**Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —**

von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen**

von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**

von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**  
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**  
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**  
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**  
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**  
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**  
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**  
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**  
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**  
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**  
von Dr.-Ing. U. Holzöhner

Nr. 49/Dezember 1977

**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**  
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**  
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**  
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**  
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**  
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54 /Oktober 1978

**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

**Stabilität von Sandwichbauteilen**  
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langli

Nr. 57/März 1979

**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing**  
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**  
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**  
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**  
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**  
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**  
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 65/Februar 1980

**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**  
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**  
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Nr. 67/Mai 1980

**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**  
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Juni 1980

**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.**  
**Entwicklung eines vollezentrischen Präzisions-Goniometers**  
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn