

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =
Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 43 (1963)

Heft: 2

Artikel: Zur Frage der Vergütung von Saphiroberflächen zur Verbesserung der
Reibungskonstanz von Elektrizitätszählern

Autor: Merz, Heinrich

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-33474>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zur Frage der Vergütung von Saphiroberflächen zur Verbesserung der Reibungskonstanz von Elektrizitätszählern

Von *Heinrich Merz* (Zug)

Mit 13 Textfiguren, 15 Tabellen und 4 Phototafeln

VORWORT

Im Herbst 1959 wurde mir als Mitarbeiter der Firma Landis und Gyr AG in Zug der Entwicklungsauftrag anvertraut, die Reibungskonstanz der Unterlager von Elektrizitätszählern zu verbessern; in diesem Zusammenhang hat sich die vorliegende Arbeit ergeben, die Aspekte von allgemeinem Interesse aufgezeigt hat. Ich schulde der Geschäftsleitung und vor allem Herrn Direktor Dr. G. Weber für die Publikationsfreigabe in dieser Form und für die stete Unterstützung der Untersuchungen grossen Dank.

Meinen verehrten Lehrern, Herrn Professor Dr. E. Brandenberger und Herrn Professor Dr. W. Epprecht, möchte ich für ihr immerwährendes Interesse an der Arbeit danken, das zu fruchtbringenden und sehr lehrreichen Diskussionen beste Voraussetzung bot. Auch die mannigfachen Ratschläge, die ich im Laufe der dreijährigen Versuchsarbeiten empfangen durfte, haben mich stark gefördert.

Die Firma Swiss Jewel in Locarno hat in verdankenswerter Weise die Herstellung des grössten Teils des Versuchsgutes übernommen. Dies wurde vor allem durch das rege Interesse ermöglicht, welches Herr Direktor E. G. Sandmeier den Arbeiten entgegenbrachte. Darüber hinaus schulde ich Herrn Direktor Sandmeier persönlich Dank für sehr viele wertvolle Ratschläge und Hinweise, hat er doch seinerzeit massgeblich zur Entwicklung der Zählerlagersteine aus synthetischem Saphir und zur Aufklärung ihrer Eigenheiten beigetragen.

Der Firma Djévahirdjian in Monthey (VS) verdanke ich die Überlassung einer Anzahl Messkurven, und dem Institut Dr. ing. R. Straumann in Waldenburg gebührt aufrichtiger Dank für die mit grossen Schwierigkeiten verbundene Präparation der Abdrücke für die elektronenmikroskopische Untersuchung der Lagerstein-Kalotten.

Zum Schluss sei noch für die wertvollen Hinweise gedankt, welche Diskussionen mit Mitarbeitern der Firma Landis und Gyr AG entsprangen.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Problemstellung	723
2. Einführung: Einiges über das Zählerunterlager.	723
2.1. Konstruktionsmerkmale	723
2.2. Lagergeometrie	724
2.3. Werkstoffe	725
2.4. Herstellung der Lagersteine aus synthetischem Saphir	725
3. Das Zählerunterlager als Fehlerquelle	725
3.1. Messtechnische Beobachtungen	726
3.2. Mikroskopische Betrachtungen.	728
3.3. Versuch zur Ermittlung des Abriebbeginns	729
3.4. Abriebsynthese (Suspensionsversuch)	732
3.5. Einfluss des Kristallgitters der Abriebpartikel	736
4. Struktureinflüsse bei Korundlagern	737
4.1. Die Anisotropieerscheinungen (Literatur)	737
4.2. Die Steinorientierung beim Zählerunterlager	739
4.3. Einfluss der Gitterstörungen	744
4.4. Überdeckung der Struktureinflüsse	745
5. Politurschicht und Abriebmechanismus	745
5.1. Aufbau und Entstehung einer Politurschicht	745
5.2. Das herkömmliche Polieren von Spurlagerteilen aus Korund	749
5.3. Nachweis der Politurschicht auf Spurlagerteilen aus Korund	749
5.4. Der Abriebmechanismus	754
5.5. Einfluss der Politurschicht auf die Lagerflächeneigenschaften	760
6. Diskussion des Problems	764
6.1. Versuch zu einem Modell des Abnutzungsmechanismus im Zählerunterlager.	764
6.2. Verbesserung der Reibungskonstanz	766
6.3. Anwendung Politurschicht-fördernder Substanzen beim Polieren und während des Lagerbetriebes der Saphirsteine	767
7. Versuche zu einer Vergütung der Politurschicht	768
7.1. Wahl der Substanzverbindung	768
7.2. Einbringen der Reaktionssubstanzen	768
7.3. Zählerlaufversuche	772
7.4. Versuche über sehr lange Betriebszeiten.	785
7.5. Ergebnisse aller Versuche	787
8. Diskussion des Vergütungseffektes	788
8.1. Zur Frage der Beeinflussung der Struktur der Politurschicht durch die angewendeten Zusätze	788
8.2. Versuche zum Nachweis von Platzwechsel- und Diffusionsvorgängen während der Politurvergütung	790
9. Zusammenfassung	794
9a. Summary	795
10. Literaturverzeichnis	796

1. PROBLEMSTELLUNG

Instrumentenlager jeder Art, unter ihnen die Unterlager von Elektrizitätszählern im besonderen, werden häufig Betriebsbedingungen ausgesetzt, welche an die Lagerbestandteile höchste Anforderungen stellen, wenn nicht deren Leistungsfähigkeit geradezu überfordern. Dies gilt zumeist im Hinblick auf den spezifischen Lagerdruck, fällt dieser doch als Folge der angestrebten Tiefhaltung des absoluten Reibungsmomentes allgemein sehr hoch aus. In Gleitreibungslagern wird bei metallischen Lagerwerkstoffen die Scherfestigkeit erreicht, während die Betätigung von Spaltebenen bei mineralischen oder keramischen Lagerwerkstoffen zu Mikroausbrüchen und Abrieb führt, bei gleichzeitigem Abreißen der Schmiermittelepilamen, direktem Kontakt der Lagerflächen und einer Bildung zahlreicher kleiner Verschweissungsstellen. Diese Beschädigungen der Lagerflächen können durch entsprechend grösser gewählte Herzsche Druckflächen vermieden werden. Die damit verbundene Vergrößerung des Reibungsmomentes und seiner Inkonstanz sowie anspruchsvollere Zentrierungsprobleme verlangen in bestimmten Fällen, die Lagerwerkstoffeigenschaften in Richtung grösserer Abriebfestigkeit zu verbessern. Ganz im Sinne dieser allgemeinen Überlegungen stellt sich die vorliegende Arbeit das Problem, die Reibungskonstanz von Spurlagern mit bohrender Gleitreibung für Elektrizitätszähler — im Hinblick auf eine gewünschte Verlängerung der Revisionsperioden — wenigstens während 20 Jahren zu gewährleisten, und zwar vorab durch eine Verbesserung der Abriebfestigkeit der Lauffläche von Pfannenlagersteinen aus synthetischem Saphir.

2. EINFÜHRUNG: EINIGES ÜBER DAS ZÄHLERUNTERLAGER

Mit Recht kann das Zählerunterlager als ein gutes Beispiel für ein Instrumenten-Spurlager höchster Beanspruchung gelten: die praktisch dauernd rotierende Bewegung sowie die hinlänglich genau definierte Lagergeometrie ermöglichen praxisnahe Dauerversuche unter schweren Laufbedingungen mit einem befriedigenden Messkriterium, dem Zählerfehler. Die Ergebnisse können sinngemäss auch auf andere Lagertypen übertragen werden, wobei in erster Linie spezifischer Lagerdruck und Umdrehungsgeschwindigkeit, dazu die Materialeigenschaften beider Lagerpartner und endlich die Schmierung als weiterer Parameter zu berücksichtigen sind.

2.1. Konstruktionsmerkmale

Das Zählerunterlager in der Ausführung als Spurlager mit bohrender Gleitreibung — im folgenden kurz als „*Einsteinlager*“ bezeichnet, da es nur einen einzigen Saphirstein aufweist — ist charakterisiert durch eine mit dem System —

dem drehbaren Teil des Zählers — fest verbundene Stahlkugel, die sich in einer mit dem Gehäuserahmen ebenfalls fest verbundenen Saphirpfanne dreht (s. Fig. 1, S. 724); die Saphirpfanne enthält gleichzeitig das zur Schmierung und bei nicht rostsicherer Stahlkugel zugleich als Rostschutz dienende Öl. Das Unterlager ist gegen grobe Erschütterungen — starke Beschleunigungen des Systems — abgefedert.

Zur Vermeidung der im Einsteinlager auftretenden, bohrenden Gleitreibung, die für die Abnützungserscheinungen zumeist mittelbar verantwortlich ist, wurden sogenannte „Doppelsteinlager“ eingeführt; diese bestehen aus zwei Saphir-Pfannenlagersteinen, die mit System und Gehäuse fest verbunden sind. Zwischen den Steinen ist eine Stahlkugel lose eingelegt, die sich im Betrieb — einem Kugellager nicht unähnlich — unter vorwiegend rollender Reibung dreht (FISCHER 1957) und dazu ein gewisses Abrollen zeigt (Schmiermittelnachschub!).

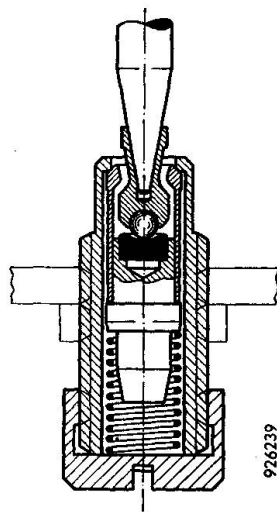


Fig. 1. Schnitt durch ein Einstein-Unterlager.

An sich ist das Problem der Abnützungserscheinungen des Zählerunterlagers und damit die Hauptfehlerquelle des Zählers durch die Anwendung des Doppelsteinlagers gelöst (s. Kap. 3.1). Die dabei ebenfalls auftretenden Nachteile sind nicht nur wirtschaftlicher (2. Saphirstein), sondern auch technischer Natur: der Zählerfachmann zieht nämlich das Einsteinlager dem Doppelsteinlager insofern vor, als es besser zentriert und wohl auch unter Vibrationseinflüssen weniger leidet.

2.2. Lagergeometrie

Mit Hilfe der Hertzschen Gleichung können Berührungsfläche und maximale Druckspannung im Lagerzentrum angenähert berechnet werden (FRÖHLICH 1955); gewisse vereinfachende Annahmen müssen hierbei allerdings getroffen werden, so z. B. Isotropie der Lagerwerkstoffe und ideale geometrische Gestalt. Für die meisten unserer eigenen Zählerlaufversuche wurde ein Dreiphasenzähler der Type MG 1 von Landis und Gyr gewählt, der bei einem Systemgewicht von 72 g und einem Kugelradius von 0,8 mm eine maximale Druckspannung von ca. 100 kg/mm² und eine Berührungskreisfläche von einem Durchmesser um 37 μ ergibt. Diese Zahlen charakterisieren zugleich die schweren Bedingungen, denen die Lagerwerkstoffe des Zählerunterlagers dauernd ausgesetzt sind.

2.3. Werkstoffe

Als Werkstoff für die Unterlagerkugel findet normalerweise ein härtpbarer Kugellager- oder Wälzlagerstahl mit ca. 1,5 % Cr und 1 % C Anwendung. Dieser nicht rostsichere Stahl ergibt bei genügender Härte die bis heute beste Oberflächenbeschaffenheit (Politur und Reinheit). Der Pfannenlagerstein besteht allgemein aus synthetischem Saphir; die sphärische Kalottenoberfläche ist ebenfalls hochglanzpoliert und die Lagersteine sind teilorientiert (optische Achse senkrecht zur Steinachse; s. auch Kap. 4). Für die Schmierung wird in der Regel ein speziell raffiniertes Mineralöl vom Pennsylvanian-Typ verwendet (im weiteren kurz als MS 2-Öl bezeichnet), welchem im Hinblick auf eine hohe Alterungsstabilität sämtliche unabgesättigten Komponenten entzogen sind (SHOTTER 1944).

2.4. Herstellung der Lagersteine aus synthetischem Saphir

Die nach dem Verneuil-Verfahren synthetisch hergestellten Saphirbirnen (über Untersuchungen zur Frage der Korundsynthese siehe z. B. COSANDEY 1956) spalten sehr leicht längs der Birnenachse in zwei Hälften auf, wobei die c-Achse häufig in der Spaltebene liegt. Der Winkel zwischen Birnenachse und optischer Achse ist abhängig von den Herstellungsbedingungen, dürfte aber für ein gegebenes Verfahren einigermaßen reproduzierbar sein. Nach Ermittlung und Markierung der Lage der optischen Achse (c-Achse, s. aber auch Kap. 4.2), werden die Halbbirnen in halbmondförmige Scheiben geschnitten und aus diesen je nach den endgültigen Abmessungen kleine Würfelchen oder Quader hergestellt. Diese Quader werden darnach auf einer speziellen Maschine zu Zylinderchen rundgeschliffen unter Verwendung von Diamantwerkzeugen (d. h. diamantbesetzten Sägescheiben und Walzen aus Elektrolytkupfer). Mit Hilfe von Diamantfräsen wird anschliessend eine sphärische Kalotte in die eine der Stirnflächen der Zylinderchen eingearbeitet, diese Kalottenfläche vorpoliert und endlich der Zählerunterlagerstein auf Hochglanz poliert; über diese letzte Operation orientiert im einzelnen Kap. 5.2.

3. DAS ZÄHLERUNTERLAGER ALS FEHLERQUELLE

In den nachfolgenden Abschnitten werden Beginn, Verlauf und Auswirkungen von Zählerunterlager-Abnützungen untersucht unter bestmöglicher Fixierung des Ausgangszustandes als Grundlage zu allen weiteren Untersuchungen. WACHSMANN (1934) hat sich bereits vor rund 30 Jahren im Rahmen seiner Dissertation mit den Problemen des Unterlagers auseinandergesetzt; die damals übliche Betrachtungsweise, vor allem der werkstofftechnischen Aspekte, hat sich seither gründlich gewandelt. In der vorliegenden Arbeit werden zwar nicht wie dort absolute Messungen der Reibungsmomente durchgeführt, sondern statt dessen die werkstofflicherseits bestehenden Möglichkeiten aufgezeigt, die Verschleissfestigkeit der verwendeten Materialien wesentlich zu verbessern. — Allgemeine Angaben, dazu Betrachtungen der speziellen Prüfprobleme an Zählern finden sich in FRÖHLICH (1953) sowie in Lehrbüchern, z. B. PFLIER (1954) und SCHMIEDEL (1954).

3.1. Messtechnische Beobachtungen

Der Zähler ist ein elektrisches Messinstrument, das in amtlich beglaubigter Form den Verbrauch an elektrischer Energie zum Beispiel in Kilowattstunden messen soll. Sein Messfehler wird in Prozenten des wahren Wertes (theoretisch) oder einer relativ genaueren Zähleranzeige, zum Beispiel eines Eich- oder Präzisionszählers (praktisch) angegeben, und zwar positiv, wenn die Anzeige des Prüflings gegenüber dem wahren Wert zu hoch, dagegen negativ, wenn die Anzeige zu gering ausfällt.

Es gibt eine Anzahl von Fehlereinflüssen, die, je nach Anforderungen an den Zählertyp, in Kauf genommen oder mehr oder weniger kompliziert auskompensiert werden müssen: so vor allem die Temperatur-, Frequenz- und Lastabhängigkeit. Nahezu alle am Aufbau des Zählers beteiligten Werkstoffe üben direkt oder indirekt ihren Einfluss auf den Zählerfehler aus. — Von den betriebszeitabhängigen Fehlerursachen treten allerdings zwei stark in den Vordergrund: die zeitliche Instabilität des Reibungsmomentes im Unterlager und die zeitliche Instabilität der Bremsmagneten. Die Instabilität des Bremsmagnete scheint einem logarithmischen Zeitgesetz zu folgen, sofern keine massiven Störungen (Berührung mit Ferromagnetika oder durch starke Wechselfelder) auftreten. Die von uns verwendeten Versuchszähler waren alt genug, um keine grösseren Fehleränderungen als solche im Betrage von Zehntelpromillen erwarten zu müssen. Somit konnte die ganze Zählerfehlerdifferenz zwischen Versuchsbeginn und einem beliebigen Messpunkt während des Versuchs, bei Kleinlast gemessen (Lastpunkt 5 % allseits, d. h. bei einer Belastung aller Phasen mit 5 % des Nennstromes, also z. B. Fliessen eines Stromes von 0,25 A durch die drei Stromspulen eines Dreiphasenzählers der Nennlast 5 A) praktisch dem Einfluss des Unterlagers zugeschrieben werden. Die teilweise ungenügende Temperaturkompensation der älteren Versuchszähler machte sich manchmal unangenehm bemerkbar, ist aber leicht zu erkennen am praktisch parallelen Verlauf der Zählerfehlerkurven (s. z. B. Fig. 4, S. 728).

Fig. 2, S. 727, gibt die Fehlerkurven von Dreiphasenzählern bei Kleinlast 5 % allseits vom normalen Einstein-, Fig. 4, S. 728, vom Doppelsteinlager in Funktion der Umdrehungszahl der Systems wieder. Die Kurven der Doppelsteinlager zeigen bezüglich Schwankung und Streuung etwa den von der Praxis gewünschten Verlauf. Die Kurven der Einsteinlager dagegen weisen bereits nach wenigen Millionen Umdrehungen — in Praxis wird ein Haushaltzähler bei mittlerem Verbrauch ca. 1...1,5 Millionen Systemumdrehungen pro Jahr ausführen — einen Abfall von einigen Prozenten auf, wobei die Streuung gleichzeitig beträchtlich zunimmt: die Kurvenschar fächert auf, die sehr guten Einheiten verhalten sich zum Teil nicht wesentlich schlechter als die Doppelsteinlager, während die schlechten bis -5% und noch weiter abfallen. Es gibt sogar vereinzelte Lager, sogenannte Ausreisser, mit einer praktisch stetig sin-

Fig. 2. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 19 (Einstein-Normalvariante).

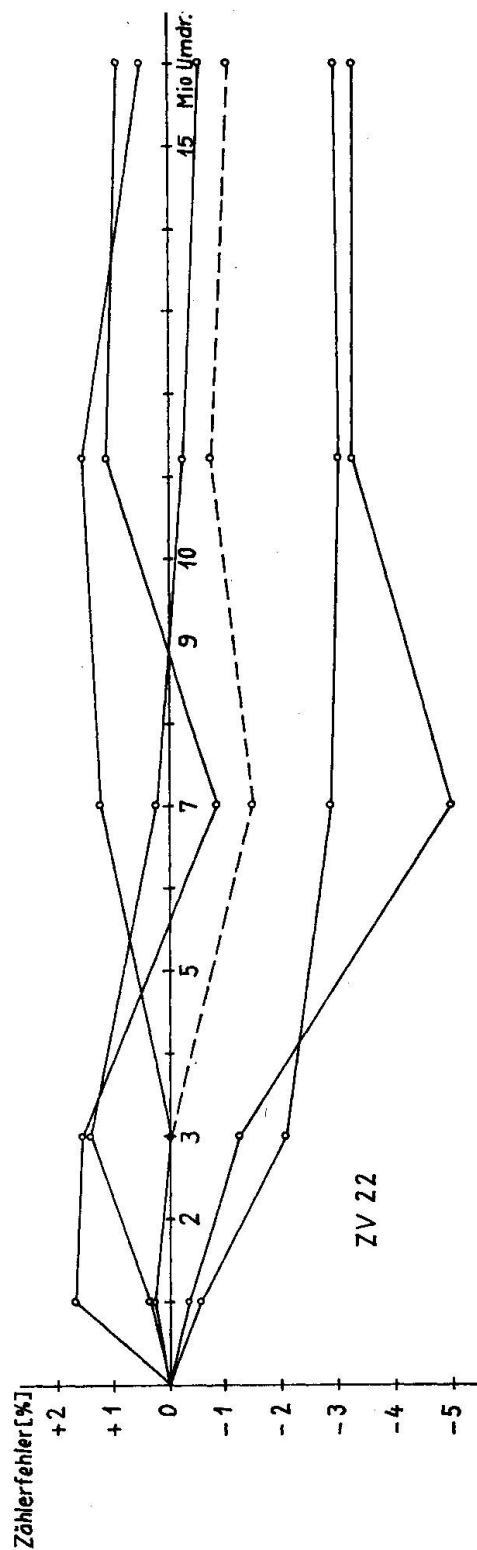
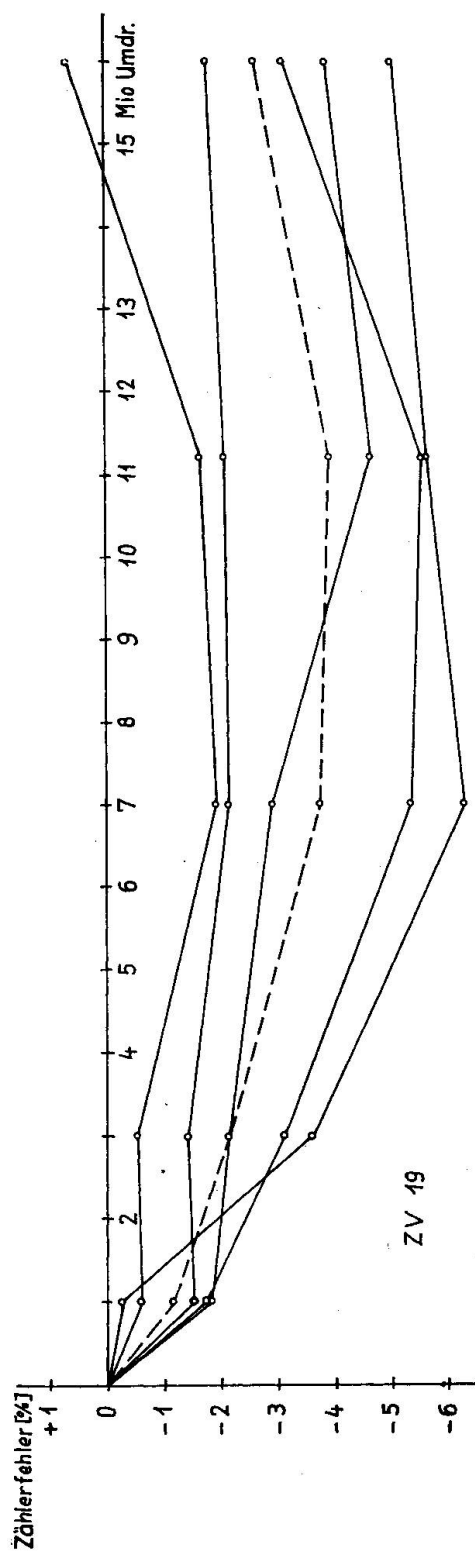


Fig. 3. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 22 (Rostaufschlammung im Schmieröl).

kenden Zählerfehlerkurve; dieser Kurvenabfall kann seine Fortsetzung finden bis zum Stillstand des Zählers bei Messlast, kann aber auch plötzlich unterbrochen werden und ebenso steil wieder ansteigen bis zu normalen Werten (siehe zum Beispiel Fig. 5, S. 735, und Fig. 6, S. 743), so dass es den Anschein erweckt, es hätte das Lager die störenden Einflüsse überwunden beziehungsweise „verarbeitet“. — Bemerkenswert ist ferner, dass — abgesehen von den Ausreissern — der weitere Kurvenverlauf nach dem anfänglichen Abfall horizontal verläuft.

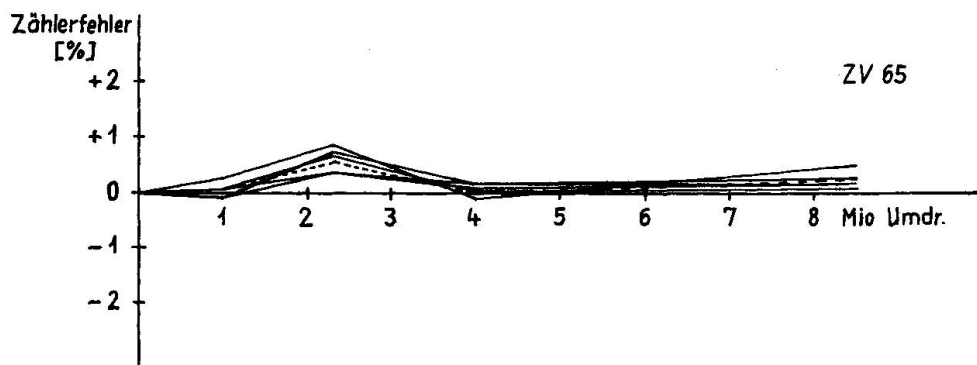


Fig. 4. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 65 (Doppelstein-Normalvariante).

Messtechnisch kann die Forderung auch folgendermassen formuliert werden: „Die Fehlerkurve eines Zählers mit Einsteinlager soll derjenigen eines Zählers mit Doppelsteinlager über eine längere Betriebszeit (20 Millionen Umdrehungen und mehr) angenähert werden.“

3.2. Mikroskopische Betrachtungen

Untersucht man Saphirstein und Stahlkugel eines in Betrieb gewesenen Einsteinlagers unter dem Auflichtmikroskop, so beobachtet man bei den meisten Einheiten mehr oder weniger stark ausgeprägte Laufspuren (vgl. Bilder 3 und 4), die bei der Kugel konzentrisch zum Zenith, beim Stein teilweise konzentrisch zum Kalottenzentrum, teilweise auch asymmetrisch und/oder sektoriell ausgebildet sind. Diese Auslenkung ist die Folge eines Seitenzugmomentes, das infolge der asymmetrischen Verteilung von Antriebs- und Bremsmomenten auf das System ausgeübt wird; die Grösse des Seitenzugmomentes ist typen- (Zählergeometrie) und lastabhängig (wird grösser mit zunehmender Zählerbelastung).

Die Intensität der Abnützung (Tiefe der Rillen und Grösse der Abriebfläche) ist nur bei starker Abriebquote mit dem Zählerfehler korrelierbar; kleine bis mittlere Beträge lassen sich im Fehlerbild meistens nicht erkennen, da sie in der normalen Streuung untergehen.

Die Laufringe weisen keine orientierten Ausbruchstrukturen auf (vgl. Bild 3); bei mittlerer Intensität erscheinen sie lichtmikroskopisch — im Querschnitt gedacht — als sehr flach ausgebildete Diskontinua der polierten Oberfläche. Auch interferenzmikroskopische Untersuchungen lassen keine neuen Einblicke gewinnen, wie ebenfalls eine Betrachtung im Auflicht-Phasenkontrast keine weitere Kennzeichnung der Natur der Abnützungsspuren gestattet. Erst eine sehr starke Beschädigung, wie sie unter normalen Betriebsverhältnissen gar nicht auftritt und nur bei trocken (das heisst ungeschmiert) gelaufenen Einheiten zu beobachten ist, lässt eine wellenförmige Kannelierung der Laufrillen erkennen, die um etwa 30° aus der Radialstrahlenrichtung ausgelenkt ist, und zwar gleichsinnig mit dem Drehsinn des Systems beziehungsweise der Kugel. Daneben sind aber auch eigentliche Ausbrüche erkennbar (siehe Bild 1).

Elektronenmikroskopische Vergrösserung lässt dagegen bei lichtmikroskopisch noch kaum wahrnehmbaren Abnützungsspuren bereits recht massive Oberflächenbeschädigungen feststellen. Bild 6 zeigt zum Beispiel Ausbrüche mit anschliessenden kürzeren oder längeren Schleifspuren, ferner Ausbrüche, die vermutlich von Verschweissungsprozessen herrühren und zugleich eine parallel zur Abnützungsrichtung verlaufende, muschelige Feinstruktur als deutliche Aufrauhung der Oberfläche aufweisen.

3.3. Versuch zur Ermittlung des Abriebbeginns

Der Kurvenverlauf in Fig. 2, S. 727, liesse vermuten, dass die Laufrillen während der ersten 1...5 Millionen Umdrehungen, also zeitgleich mit dem Kurvenabfall entstehen. Über den Beginn selber sind nur vage Hypothesen möglich, insbesondere, weil sich geringe Abnützungserscheinungen im Zählerfehler noch nicht abbilden. Um diesen Zeitpunkt erster Abnützung dennoch einigermaßen verlässlich abschätzen zu können, wurde folgender Zählerversuch durchgeführt.

In Dreiphasenzählern Landis & Gyr der Type MG 21 mit einer Zählerkonstante 240 U/kWh und Nennlast 5 A wurden je zwei Einheiten folgender Varianten, beschickt mit Lagerelementen normaler Qualität, laufen gelassen:

Anzahl System- umdrehungen	Vollständig ungeschmiert	Mit Schmier- film versehen	Mit normaler Schmiermittelmenge
10 ¹	ZV 1	ZV 7	ZV 13
10 ²	ZV 2	ZV 8	ZV 14
10 ³	ZV 3	ZV 9	ZV 15
10 ⁴	ZV 4	ZV 10	ZV 16
10 ⁵	ZV 5	ZV 11	ZV 17
10 ⁶	ZV 6	ZV 12	ZV 18

Die Reihe ungeschmierter Lager wurde angesetzt mit in heissem Cyclohexan extrahierten Lagerbestandteilen, um noch allfällig anhaftende Schmiermittelsuren zu beseitigen; der Schmierfilm bei den Varianten ZV 7 bis ZV 12 wurde durch Tauchen der Kugel in einer 5prozentigen MS-2-Öl/Benzin-Lösung erzeugt.

Eine exponentielle Stufung der Anzahl Systemumdrehungen wurde gewählt, weil der Zeitpunkt des Abriebbeginns irgendwann innerhalb dieser weiten Grenzen auftreten kann. Das Lastprogramm wurde einheitlich (das heisst ohne Wechselprogramm) zu 200% allseits, entsprechend einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 0,44 U/s festgesetzt; auf die Messung des Zählerfehlers wurde verzichtet, da dieses Kriterium im fraglichen Lebensalter des Zählerunterlagers keine spezifischen Aussagen liefert (Streuung zwischen den Varianten geht in der Messstreuung unter).

Die lichtmikroskopische Auswertung der Versuchseinheiten unter dem Auflichtmikroskop ergab bei 200facher Vergrößerung mit Phasenkontrast (wegen der Steinkalotten- und Kugelwölbung sind die Phasenkontrastbedingungen jeweils nur für eine Fläche mit Durchmesser ca. 50 μ im Zentrum erfüllt, erkennbar am dunklen „Phaco-Fleck“) folgende Resultate:

Ungeschmierte Einheiten

- ZV 1 ... ZV 3: Keine Abnützungsstrukturen erkennbar.
- ZV 4 Kugel: Dunkle „Brandstellen“ von den Verschweissungen, lokale Oxydation als Beginn der Reibrostbildung; Beginn der Laufringe ebenfalls angedeutet; ähnlich wie in Bild 4 äusserer Kranz.
- Stein: Einige schwache unvollständige Laufringe im Phaco-Fleck erkennbar, daneben etwas Metallübertrag von der Kugel.
- ZV 5 Kugel: Oxydierte Verschweissungsstellen (ähnlich wie in Bild 4 äusserer Kranz).
- Stein: Ziemlich starker Metallübertrag; vgl. Bild 2.
- ZV 6 Kugel: Mittelstarke Laufringe und zum Teil lockerer Reibrost.
- Stein: Mittelstarke Laufringe und Rostpartikel vom Kugelabrieb; vgl. Bild 3.

Einheiten mit Schmierfilm

- ZV 7 ... ZV 10: Keine Abnützungsstruktur erkennbar.
ZV 11 Kugel: Teilweise einige Verschweissungsstellen auftretend, sonst abnützungsfrei.
Stein: Keine Abnützungsstellen erkennbar.
ZV 12 Kugel: Kränze von Verschweissungsstellen und intermittierend „abgeschmiertem“ Metall; vgl. Bild 4.
Stein: Etliche schwache unvollständige Laufringe im Phaco-Fleck erkennbar.

Normal geschmierte Einheiten

- ZV 13 ... ZV 15 und ZV 17: Keine Abnützungsspuren erkennbar.
ZV 16 Kugel: Einige sehr schwache Verschweissungsstellen mit Anlauffarben („Brandflecke“); vgl. Bild 5.
Stein: Keine Abnützungsstrukturen erkennbar.
ZV 18 Kugel: Oxydierte Verschweissungsstellen und beginnende Laufringe.
Stein: Einige sehr schwache unvollständige Laufringe und etwas Metallübertrag von der Kugel.

Aus den folgenden Varianten wurde von je einem Saphirlagerstein die Oberfläche mit Hilfe von Polystyrolabdrücken elektronenmikroskopisch geprüft und zeigten folgende Reliefstrukturen:

Ungeschmierte Einheiten

- ZV 4 Stein: In der beginnenden Laufspur treten dreieckförmige Ausbrüche auf.
ZV 5 Stein: Der bereits lichtmikroskopisch erkennbare Metallübertrag entpuppt sich bei stärkerer Vergrößerung als richtig mit der Saphiroberfläche verschweisst. Die sonst ebene Oberfläche (s. z. B. Bild 8 neben der Laufspur) wird dadurch aufgeraut und bietet erneute Verschweissungsmöglichkeiten (ähnlich wie in Bild 9).

Normal geschmierte Einheiten

- ZV 17 Stein: Lichtmikroskopisch sind keine Abnützungsspuren erkennbar, bei sehr viel stärkerer Vergrößerung jedoch Laufspuren festzustellen (s. Bild 8). Diese Laufspuren sind ähnlich struiert wie die lichtmikroskopisch sichtbaren (an anderen Steinen) mit der 60° zur Laufrichtung orientierten Kannelierung. Auch in diesen schwachen Reliefs Spuren sind Ausbrüche erkennbar. — Die runden Partikel sind Verunreinigungen des Präparates und die feine Struktur auf der ungestörten Oberfläche vom Schattierungsmittel Palladium herrührend.
ZV 18 Stein: Metallübertrag, von der Kugel in feinverteilter Form in Richtung der Drehbewegung auf die Saphiroberfläche intermittierend aufgeschmiert (s. Bild 9).

Alles in allem kann gesagt werden:

— Der Abriebbeginn liegt für das normal geschmierte Einsteinlager bei etwa 100 000 Umdrehungen; das vollständige Fehlen des Schmiermittels verlagert den Beginn auf ungefähr 10 000 Umdrehungen vor, während ein dünner Schmierfilm bereits ausreicht, um das Auslösen von Abnützungen hinauszuschieben.

— Die Intensität der Abnutzung nimmt bei den ungeschmierten und nur mit Schmierfilm versehenen Lagern rascher zu, als bei geschmierten; ausserdem besteht der Abrieb bei ungeschmierten Einheiten vorwiegend in Metallübertrag, also dem äusseren Kennzeichen einer Verschweissung.

— Hieraus darf der Schluss gezogen werden, dass das Schmiermittel zunächst einmal die Aufgabe übernimmt, Verschweissungsprozesse tunlichst zu vermeiden, was auf die Dauer jedoch nur mangelhaft gelingt (sogar beim normal geschmierten Lager kommt gelegentlich Metallübertrag vor!); der Abreisspunkt des MS-2-Öles wird also offensichtlich an lokalen Stellen überschritten (Modell Bowden, siehe Kap. 5.43). Dazu tritt als wesentlichste Funktion des Schmiermittels im Einsteinlager sein Suspensionsvermögen für die entstandenen Abriebpartikel und damit die Fähigkeit, zu verhindern, dass der Abrieb seinerseits abrasiv wirken könne.

— Die Abnutzung beginnt bereits im submikroskopischen Bereich, wobei Abriebmechanismus und Oberflächenstrukturen den lichtmikroskopisch feststellbaren sehr ähnlich sind.

— Im Unterlager können lokal sehr hohe Temperaturen auftreten, wie dies BOWDEN (1959) allgemein für Reibschweissprozesse durch Messungen unmittelbar nachgewiesen hat (siehe Kap. 5.42). Beim Zählerunterlager sprechen die punktförmig auftretenden Anlauffarben der Stahlkugel im gleichen Sinne (siehe Bild 5), dazu auch in fortgeschrittenem Stadium der Übertrag von Metall der Kugel (siehe Bild 4) auf den Stein (siehe Bilder 2 und 9).

3.4. Abribsynthese (Suspensionsversuche)

Die Abriebprodukte können das Laufverhalten sehr massgeblich beeinflussen; sie wirken, einem Schleifmittel vergleichbar, auf die Lagersoberfläche zerstörend und das Reibungsmoment erhöhend. Die Abriebpartikel entstammen einerseits Ausbrüchen von Oberflächenfehlern — Kratzern, Löchern usw., siehe zum Beispiel Bild 7 — und anderseits von Laufspuren, siehe zum Beispiel Bild 6. Wie aus den oben beschriebenen

Versuchen und aus Fig. 2, S. 727, hervorgeht, bildet sich bereits zu Anfang des Lagerbetriebes „aktiver“ Abrieb. Es war daher von wesentlichem Interesse, den Einfluss von gleich zu Beginn, das heisst absichtlich beigegebenen Abriebteilchen auf das Laufverhalten zu untersuchen. Als Substanzen kamen hierzu in erster Linie α -Korund und Rost (Abriebprodukt der Stahlkugel) in Frage. Das Versuchsprogramm wurde noch um γ -Korund erweitert, um die Abhängigkeit des Abriebmechanismus vom Kristallbau der Abriebpartikel zu studieren (Einfluss der Feinstruktur auf Kornform und Verformbarkeit).

Dazu galt es die von BOWDEN (1959) erwähnte Möglichkeit zu klären, dass allfällige Einschlüsse von Poliermaterial in der Politurschicht — im Falle des Saphirlagersteins also Einschlüsse von Diamant! — den Abriebmechanismus sehr wesentlich beeinflussen. Ein Nachweisversuch solcher Einschlüsse durch radioaktive Markierung scheiterte leider an der geringen Menge Diamanteinschlussteile — überlegungsmässig unter $0,1 \gamma$ — und der geringen Strahlungsintensität von ^{14}C (sehr hohe Halbwertszeit von $> 10^3$ Jahren). Daher wurde in das Programm synthetischer Abriebverarbeitung auch die Variante mit Diamantkörnern aufgenommen. Zusammen mit der Normalvariante¹⁾ ergab sich so das folgende Versuchsprogramm:

- ZV 19 Normalvariante, keine Aufschlammung im Öl.
- ZV 20 Aufschlammung von α -Korundteilchen im Schmieröl.
- ZV 21 Aufschlammung von γ -Korundteilchen im Schmieröl.
- ZV 22 Aufschlammung von Rostpartikeln im Schmieröl.
- ZV 23 Aufschlammung von Diamantpartikeln im Schmieröl.

Die Lager wurden in der Ausführung als Einsteinlager aus Teilen normaler Fertigung aufgebaut; als Schmiermittel diente das übliche MS-2-Öl. Die Suspensionen wurden folgendermassen angesetzt: als Ausgangsmaterialien dienten für α -Korund ein im Stahlmörser zerstossener Saphirstein, für γ -Korund Polierpulver, für Rost ein im Freien gerosteter Streifen Tiefziehstahlblech und für Diamant Polierpaste für metallographische Zwecke, deren Bindemittel entfernt worden war. Ein weiteres Zerkleinern der Pulver kam aus Gründen der Verunreinigung nicht in Frage. Die Pulver wurden daher in MS-2-Öl aufgeschlammmt und die groben Partikel abzentrifugiert, bis nur noch die Fraktion $< 1 \mu$ zurückblieb. Die Konzentration wurde so eingestellt, dass auf ein Lager (Ölmenge ca. $1/20$ Tropfen) ungefähr 100 Partikelchen entfielen.

¹⁾ Als Normalvariante wird jeweils die Vergleichsbasis bezeichnet, die aus den fabrikationsentsprechenden Lagerelementen (s. Kap. 2.3) aufgebaut ist.

Die Dauerversuche selbst erfolgten in je 5 Zählern der Type MG 1, Nennlast 10 A, Zählerkonstante 300 U/kWh; das Lastprogramm für die Dauerversuche betrug alternierend 12 Std. 10% und 12 Std. 200% allseitige Last. Unter einer Messlast von 5% allseits wurde bei 0; 1; 3; 7; 11,2; 16 Millionen Systemumdrehungen der Zählerfehler gemessen. In Tab. 1, S. 734, sind Mittelwert und Range²⁾ dieser Messungen zusammengestellt.

Tabelle 1. Zählerfehlermessungen am Suspensionsversuch

Var. Nr.	Variante Kurzbez.	Δf in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber 0 Umdrehungen nach Dauerversuch von total Umdrehungen: (R = Range)									
		1,0 · 10 ⁶		3,0 · 10 ⁶		7,0 · 10 ⁶		11,2 · 10 ⁶		16,0 · 10 ⁶	
		Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R
ZV 19	normal	-1,17	1,66	-2,16	3,07	-3,72	4,39	-4,30	3,99	-2,60	5,70
ZV 20	α -Korund	-2,91	4,28	-5,49	6,23	-18,42	31,04	-15,42	25,48	-6,67*)	12,60*)
ZV 21	γ -Korund	-2,01	2,18	-2,48	2,86	-5,34	6,85	-3,32	4,84	-3,97	8,18
ZV 22	Rost	-0,29	2,25	-0,05	3,64	-1,44	6,20	-0,77	4,81	-1,06	4,22
ZV 23	Diamant	-1,89	14,58	-26,51	66,33	**))	—	**))	—	**))	—

*) Ohne Berücksichtigung eines Ausreissers, der bei 5 % Last stillsteht.

**) Alle Einheiten bei 5 % Last blockiert.

Fig. 2, S. 727, zeigt den Verlauf des Zählerfehlers in Funktion der erreichten Zahl von Systemumdrehungen der Normalvariante. Die Kurven der Variante ZV 20 mit α -Korundaufschlammung sind in Fig. 5, S. 735, wiedergegeben: sie fallen sofort viel stärker ab als diejenigen der Normalvariante und erreichen 3...5mal tiefere Durchschnittswerte bei extrem grosser Streuung; die meisten Lager sind somit weitgehend zerstört worden, was auch aus den mikroskopischen Befunden an Kugeln und Steinen hervorgeht: Ölverdickung durch Abriebprodukte und 3...4mal grössere Abnutzungsintensität. Ein Lager hat die synthetischen und natürlich gebildeten Abriebprodukte gleichsam „verarbeiten“ können und zum Schluss gar eine positive Abweichung gegenüber dem Ausgangswert erreicht.

Die Auswirkungen von γ -Korund als „Abriebprodukt“ sind bei weitem nicht so verheerend, trotzdem die Härte nicht wesentlich unter derjenigen von α -Korund liegt; der Zählerfehler-Mittelwert verläuft

²⁾ Im folgenden wird für die Spannweite (d. h. für die Differenz zwischen grösstem und kleinstem Messwert) der in der statistischen Qualitätskontrolle übliche Ausdruck „Range“ verwendet.

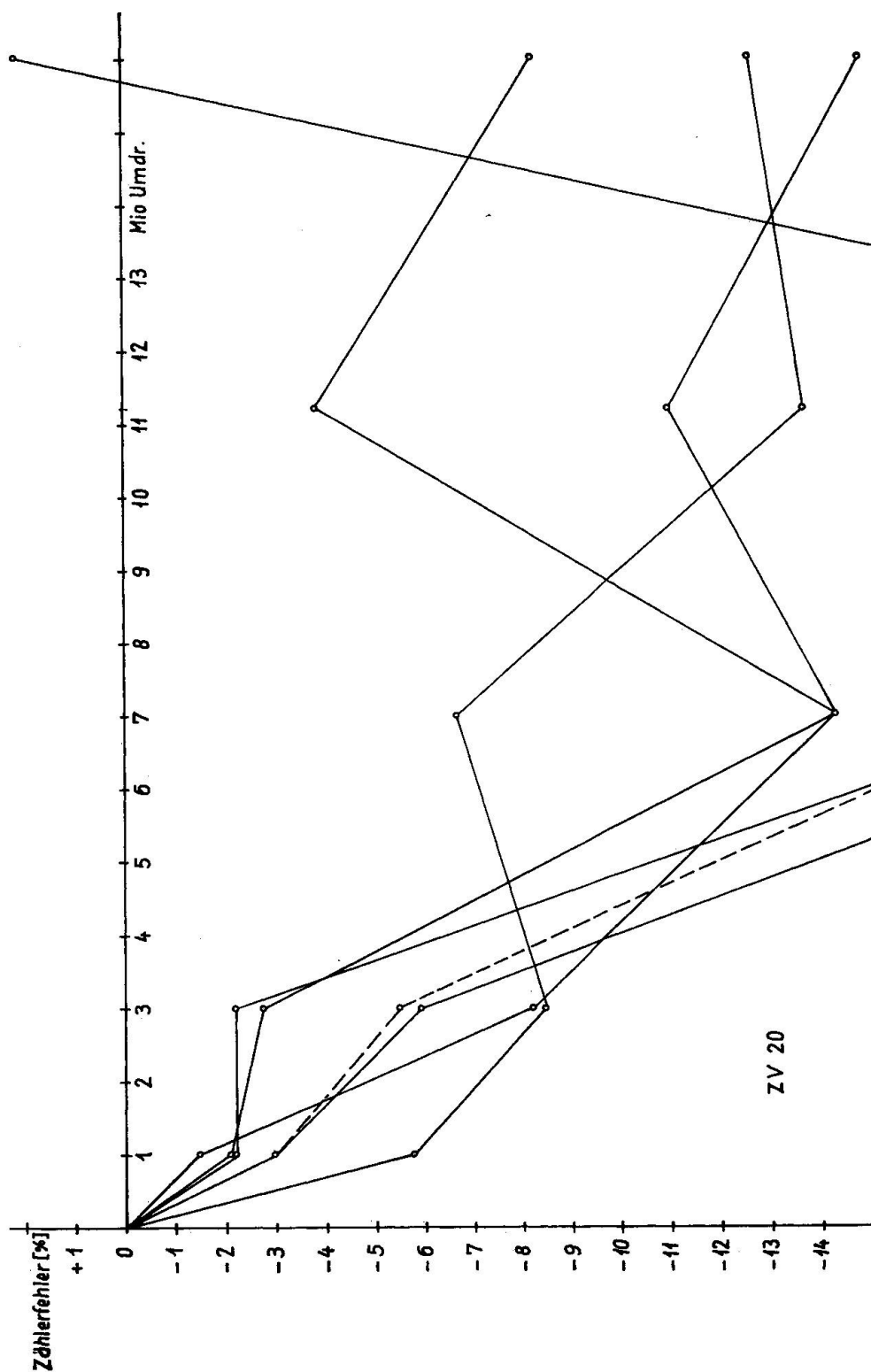


Fig. 5. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 20 (α - Al_2O_3 -Suspension im Schmieröl).

nicht weit unterhalb demjenigen der Normalvariante, und auch der Range erreicht nicht die Werte der mit α -Korund versehenen Lager. Offensichtlich spielt die Gitterstruktur der Abriebpartikel eine bedeutende Rolle.

Die Beigabe von Rost zum Schmiermittel wirkt nicht abrasiv, sondern verbessert im Gegenteil die Laufeigenschaften des Zählerunterlagers (siehe Fig. 3, S. 727). Die Kristallstruktur der Rostpartikel konnte nachträglich nicht mehr bestimmt werden (nach ihrer Herkunft zu schliessen, dürfte der überwiegende Teil aus Goethit, α -FeOOH, bestanden haben); Fe_2O_3 wirkt dagegen ziemlich stark abrasiv. Dies hindert leider daran, die Oxydationsprodukte des Stahlkugelabriebs zu einer Verbesserung der Lagereigenschaften heranzuziehen, da die Oxydation in Gegenwart des Schmiermittels nicht über die verschiedenen Hydratstufen erfolgt. Jedenfalls war an keinem Unterlager mit in situ gebildetem Rost (vom Stahlkugelabrieb her) eine ähnliche Verbesserung zu beobachten, sondern vielmehr eine Reibungszunahme.

Die Beigabe von Diamant als synthetischem Abriebmaterial zeitigte für das Laufverhalten katastrophale Folgen; bereits nach 3 Millionen Umdrehungen war ein Mittelwert von -26% erreicht worden, und bei allen späteren Messpunkten standen die Zähler bei 5% Messlast still. Die Laufflächen der Lagerelemente waren vollständig zerstört und zufolge Ausbrüchen aufgerauht, während das Öl durch die Abriebprodukte pastenartig verdickt und schmierunfähig geworden war. Aus diesem eindeutigen Ergebnis kann geschlossen werden, dass Rückstände aus der Diamant-Politurpaste kaum jemals im Lager auftreten, zumindest nicht systematisch, müsste doch sonst ein bestimmter Anteil der Zähler bereits nach sehr kurzer Zeit bei Kleinlast blockiert sein.

3.5. Einfluss des Kristallgitters der Abriebpartikel

Wie aus den oben beschriebenen Suspensionsversuchen mit willkürlich beigegebenen Abriebpartikeln aus α - und γ - Al_2O_3 hervorgeht, muss mit einer ziemlich starken Einflussnahme der Struktur des Abriebmaterials auf die Laufeigenschaften gerechnet werden. Zum gleichen Schluss kommt auch SHOTTER (1956), nachdem er die Abriebpartikel von Wolframkugeln hat untersuchen lassen, die auf Saphirstein gelaufen waren. Dabei stellte sich heraus, dass zuweilen eine gelbe, amorphe Modifikation von Wolframoxyd auftritt, die schmierende Eigenschaften aufweist, während alle kristallinen Formen von Wolframoxyd abrasiv wirken. SHOTTER (1958) überträgt dieses Modell auch auf die Abnüt-

zungserscheinungen der Kombination Stahlkugel/Saphirstein und vermutet, dass in jenen Fällen, da „long life units“ auftreten, der Stahlabrieb in eine „amorphe“ Oxydphase übergehe, während bei allen Ausreissern, die wegen zu hoher Reibung schon sehr früh ausfallen, kristallines, abrasiv wirkendes Fe_2O_3 gebildet werde. Nach SHOTTER besteht daher das Problem nurmehr darin, die Oxydationsbedingungen im Unterlager so zu steuern, dass einzig amorphe und daher eher schmierfähige Modifikationen gebildet werden; diese richtige Steuerung zu verwirklichen dürfte allerdings mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein, schon weil es Abriebprodukte gibt, welche nicht in eigentlich amorpher Form existieren können.

Bei den meisten Zählerunterlagern kann beobachtet werden, dass die Saphirsteine schwächere bis mittelstarke Laufspuren aufweisen, welche den Zählerfehler nicht merkbar beeinflussen. Dies deutet darauf hin, dass auch an Saphirlagersteinen Abriebprodukte entstehen, die nicht abrasiv wirken. STEIJN (1961) konnte mit Hilfe von Röntgen- und Elektronenbeugungsuntersuchungen zeigen, dass zumindest auf basalen Saphirflächen die Abriebprodukte von Reibprozessen röntgenamorpher Struktur sind. Es ist daher naheliegend, anzunehmen, dass auch bei Lagersteinen aus Saphir röntgenamorphe Abriebprodukte auftreten, solange keine intensive Beschädigung der Oberfläche stattfindet. Auf diese Weise lässt sich erklären, warum einerseits sogar lichtmikroskopisch Laufspuren beobachtet werden können, ohne dass eine Änderung des Reibungsmomentes bei ihrem Entstehen feststellbar ist, aber andererseits ein nur geringer Zusatz von kristallinem $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ zu so katastrophalem Einfluss auf das Lagerverhalten führt, wie ihn ZV 20 (siehe Fig. 5, S. 735) zeigt.

4. STRUKTUREINFLÜSSE BEI KORUNDLAGERN

4.1. Die Anisotropieerscheinungen (Literatur)

Da Lagersteine aus Saphir-Einkristall bestehen, muss bezüglich der Festigkeits- und Abriebeigenschaften mit der Möglichkeit von Anisotropieerscheinungen gerechnet werden. Korund gehört der Kristallklasse D_{3d} an, deren Hauptsymmetrielement eine Hexagyroide ist; somit lassen sich die vektoriellen Eigenschaften durch ein Rotationsellipsoid beschreiben.

Eindruck- und auch Ritzhärte geben nur sehr angenähert Anhaltspunkte für die Verschleissfestigkeit, insbesondere bei mineralischen Werkstoffen, wo der Verschleiss vorwiegend durch Spaltbarkeit und Mikrospindbruch bestimmt wird (s. aber

auch STEIJN 1961). ALBRECHT (1954) hatte Untersuchungen über die Härte-Anisotropie synthetischer Korunde durchgeführt; als Messkriterium benützte er eine relative Schleiffestigkeit (Bezugsmaterial weisser Spinell = 1000 Einheiten), als Messapparat eine diamantbesetzte rotierende Kugel, gegen welche das Probenmaterial in Form einer Platte unter bestimmtem Druck gepresst wurde. Je nach Schleifrichtung ergaben sich dann verschieden tiefe Einschleifkalotten bei gleicher Einwirkungszeit. — Für Korund fand ALBRECHT auf den Basisflächen hexasymmetrische Schleiffestigkeitskurven (Punkte gleicher Messwerte zu Kurven verbunden) und auf parallel zur c-Achse, im übrigen jedoch nicht näher definiert geschnittenen Flächen digyroide Figuren. In Richtung der c-Achse wurde allgemein ein Festigkeitsminimum, auf den Basisflächen ein Schleiffestigkeitsmaximum beobachtet. Aus diesen Erkenntnissen müsste der Schluss gezogen werden, die Zählerunterlagersteine seien mit der Steinachse parallel zur c-Achse zu orientieren, um in der Steinkalotte die maximale Abriebfestigkeit zu erzielen; da ferner durch den Drehvorgang der Kugel in der Kalotte alle möglichen Schleifrichtungen vorkommen, würde diese sogenannte Orientierung 0° (d. h. Winkel Steinachse/optische Achse = 0° , wobei die beim synthetischen Korund einigermassen konstant 4° betragende optische Anomalie zur Streuung gerechnet wird) isometrische Festigkeitswerte ergeben; es entstünden somit keine ausgesprochen schwachen Stellen.

STEIJN (1961) präziserte die Untersuchungen von ALBRECHT (1954) in wesentlichen Punkten. Auch er fand auf Schnittebenen parallel zur c-Achse und zwar im speziellen auf einer Prismenfläche, dass die Schleifrichtung in c-Achsenrichtung zu ausgeprägt „spröder“ Abnutzung führt (bröckelige und muschelige Ausbrüche), während sie aber anderseits senkrecht zur c-Achsenrichtung (immer auf der Prismenfläche) einen extrem hohen Abnutzungswiderstand offenbart, wobei die Abnutzung durch eine Art zähen Bruch eingeleitet wird. Auf basalen Flächen wurde im Gegensatz zu ALBRECHT eine sehr geringe Schleiffestigkeit festgestellt; die Abriebpartikel von diesen basalen Reibflächen wurden in Röntgen- und Elektronenbeugungsuntersuchungen von amorpher Struktur befunden. Ebenfalls im Gegensatz zu ALBRECHT konnte STEIJN keine Differenzierung der Schleiffestigkeit, z. B. in hexasymmetrischer Form, auf (0001) beobachten. Er konnte ferner zeigen, dass Korund in Reibungsversuchen bei Raumtemperatur plastische Verformung an der Oberfläche erleidet, falls die Reibungsrichtung die Betätigung des basalen oder prismatischen Gleitsystems gestattet. Dies ist — bei den untersuchten Fällen — lediglich bei einer Reibrichtung parallel c auf der Prismenfläche nicht möglich; daraus ergibt sich die Erscheinung eines spröden, splittrigen Bruchgefüges in dieser Richtung.

Eine noch jüngere Untersuchung (DUWELL 1962) wählt den Reiter aus Saphir und als Gegenkomponente eine Stahlplatte. Nach DUWELL werden die Abnutzungserscheinungen an Saphirreitern durch Abschervorgänge bewirkt, wie bereits WACHTMAN und MAXWELL (1954 und 1957) grundsätzlich die plastische Deformation an Saphir erkannt haben. DUWELL findet ein Minimum an Abriebfestigkeit, wenn die c-Achse des Saphirreiters nahezu senkrecht zur Stahloberfläche, aber um wenige Grade entgegen der Gleitrichtung der Stahlplatte geneigt steht und die Scherfestigkeit derart ein Minimum erreicht; umgekehrt kann eine relativ hohe Abriebfestigkeit beobachtet werden, wenn bei gleicher Anordnung die c-Achse um wenige Grade in die Gleitrichtung der Stahlplatte geneigt und damit eine wesentlich höhere Scherfestigkeit erzielt wird.

Offensichtlich spielt hier die Versuchsmethodik eine ausschlaggebende Rolle: Die Versuchsmethode von STEIJN und DUWELL ist charakterisiert durch eine geradlinige Gleitbewegung; diejenige von ALBRECHT basiert auf reiner Bohrreibung und erfasst somit auch prinzipiell ganz andere Reibrichtungen, zumindest mikrostrukturell, sobald sich auch nur andeutungsweise eine Kalotte ausgebildet hat. Im Hinblick auf das Einstein-Zählerunterlager ist die Methode von ALBRECHT eher wirklichkeitsgetreu. Beide Untersuchungsmethoden wirken aber grob-abrasiv und berücksichtigen derart lediglich das Grundmaterial, nicht jedoch die Bearbeitungsschicht. Wie später gezeigt werden wird (s. Kap. 5.5), spielt gerade die Politurschicht die entscheidende Rolle in der Abriebbeständigkeit des Saphirlagers; demzufolge sind beide Methoden für die Untersuchung der vorliegenden Probleme ungeeignet. Für Abriebuntersuchungen an Lagern ist die Berücksichtigung sämtlicher wichtiger Einflussfaktoren unerlässlich, weil einzig so die Nachahmung praxisnaher Betriebsbedingungen gelingt.

4.2. Die Steinorientierung beim Zählerunterlager (direkter Einfluss)

4.21. Orientierungsmethoden; Möglichkeiten ihrer Anwendung

Eine Teilorientierung der Lagersteine im Sinne einer konsequent eingehaltenen Beziehung zwischen Steinachse und c-Achse ist durch kristalloptische Methoden möglich (z. B. SAUCIER 1953) und auch wirtschaftlich ohne grossen Aufwand durchführbar. Eine (dreidimensionale) Vollorientierung kann dagegen nur röntgenographisch z. B. nach dem Laue-Verfahren durchgeführt werden (z. B. WINCHELL 1944).

Die Verwendung teilorientierter Lagersteine hat sich dagegen als zweckmässig erwiesen. Bei der Orientierung durch optische Methoden muss die optische Anomalie (Winkel zwischen optischer Achse und c-Achse) berücksichtigt werden; sie beträgt bei Korund $0 \dots 16^\circ$ (TROEGER 1952) und soll speziell bei synthetischem, nach dem Verneuil-Verfahren hergestellten Korund unter gleichen Herstellungsbedingungen bevorzugt um 4° liegen.

4.22. Untersuchungen von Shotter und Sandmeier

Umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung der Gründe, warum ein relativ bedeutender, aber in seiner Grösse schwankender Anteil der Zählerunterlagersteine zu starkem Abrieb neige und damit praktisch das Instrument funktionsuntüchtig mache, wurden Anfang der dreissiger Jahre in England aufgenommen. SANDMEIER (1953) äusserte in diesem Zusammenhang bereits um 1930 die Vermutung, dass die Orientierung der Lagersteine eine wesentliche Rolle im Abriebverhalten spielen müsse; er war zu dieser Auffassung gelangt, als er bei einem überwiegenden Teil der stark abgenützten Lagersteine kleine Spaltrisse entdeckt hatte, die sämtlich parallel zur Basis orientiert waren. Korund besitzt an sich keine ausgesprochene Spaltbarkeit, lediglich eine beschränkte nach der Basis. Bei Steinen der Orientierung 0° — bei Korundlagersteinen wird unter Orientierung immer der Winkel zwischen optischer Achse und der Hauptbelastungsrichtung verstanden, in unserem

Fall der Pfannenlagersteine also der Steinachse — wird in Zenitnähe der sphärischen Kalotte für einen kleinen Ausbruch die grössere Fläche durch eine mögliche Spaltebene gegeben sein, da diese nahezu parallel zur Steinoberfläche im Kalottenzenith liegt, während bei Steinen der Orientierung 90° diese möglichen basalen Spaltebenen senkrecht zur Steinoberfläche im Kalottenzenith stehen und demzufolge den Ausbruch durch Betätigung einer solchen Spaltebene nur wenig begünstigen.

SHOTTER (1944) verfolgte diese Idee bei seinen Untersuchungen und konnte in der Folge durch ausgedehnte Versuche nachweisen, dass, wie von SANDMEIER postuliert, die Orientierung der optischen Achse senkrecht zur Steinachse tatsächlich ein entschieden besseres Abriebverhalten ergibt als die Orientierung der optischen Achse parallel zur Steinachse (s. auch SHOTTER 1953 und SHOTTER 1958); dies gilt insbesondere für Trockenlauf (ungeschmierte Einheiten) bei allerdings extrem grosser Streuung, teilweise aber auch für mit MS 2-Öl geschmierte Lager, und zwar vorzugsweise für hohe spezifische Lagerbelastung.

Diese Resultate stehen mit den Ergebnissen der reinen Modellversuche von ALBRECHT (1954) in Widerspruch, in Übereinstimmung jedoch mit denjenigen von STEIJN (1961) und DUWELL (1962). Die geringe spezifische Belastung der Reibfläche — 16,5 g bei einem Kugeldurchmesser von 8 mm! — mag bei ALBRECHT sowohl die Betätigung der basalen Spaltsysteme als auch das Auftreten plastischer Deformationsvorgänge verhindert haben, es darf aber auch der Unterschied der Probengeometrie nicht ausser acht gelassen werden. Bei ALBRECHT wie bei STEIJN wurden Saphirplättchen, d. h. ebene Flächen untersucht, während bei DUWELL die Werkstoffe ausgetauscht werden: Saphirreiter reibt auf der Stahloberfläche entlang. Die Versuche an Zählerunterlagern werden dagegen an Kugelflächen durchgeführt. Es herrschen hier somit bedeutend komplexere Bedingungen als dort; zufolge des Seitenzugs des Zählers ist ja nicht nur eine bestimmte „Zenithfläche“, sondern sind auch exzentrische Flächenteile irgendwelcher Orientierung an den Laufzuständen beteiligt (s. Kap. 3.2).

4.23. Untersuchungen von Stott und Goss

Ebenfalls STOTT (1938) unternahm Versuche mit verschiedenen orientierten Lagersteinen, aus denen hervorging, dass eine Orientierung von $70 \dots 90^\circ$ sehr gute Resultate ergab und eine solche von ca. 10° sehr schlechte. Daraus leitete er die Forderung ab, vermehrt auf die Orientierung zu achten und als günstige $70 \dots 90^\circ$ einzuhalten.

Goss (1941) ging von diesen Untersuchungen aus und erweiterte sie systematisch, indem er die Orientierung von 0 bis 90° in 10° -Intervallen variierte. Diese Systematik wurde — wie häufig bei diesem Problem! — denkbar schlecht belohnt: Goss erhielt sehr grosse Streuung und Mittelwertsschwankungen; immerhin wurden auch hier die kleinsten Abnutzungsgrade unter relativ geringer Streuung bei den 80 und 90° orientierten Lagersteinen beobachtet. Goss machte ein beschränktes basales Gleitvermögen für die grössere Abnutzungsquote auf den Basisflächen verantwortlich und deutete damit die Interpretation von STEIJN (1961) bereits an.

Die Ergebnisse von STOTT und Goss decken sich demnach mit denjenigen SHOTTERS und mit den Modellversuchen von STEIJN.

4.24. Eigene Untersuchungen

Trotz alledem bestand immer noch eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der praktischen Zählerlaufversuche und den — vom Standpunkt des Zählerunterlagers aus gesehen — eigentlich recht praxisnahen Modellversuchen von ALBRECHT. Ein eigener kleiner Zählerlaufversuch sollte versuchen, diese Diskrepanz wenn möglich zu klären.

Der Versuch bestand aus folgenden zwei Varianten, für die je 5 Zähler vom Typ MG 1, Nennlast 10 A, Zählerkonstante 300 U/kWh eingesetzt wurden:

ZV 19: synthetische Saphirlagersteine, optische Orientierung 90° (heute Normalfall);

ZV 24: synthetische Saphirlagersteine, optische Orientierung 0°.

Alle übrigen Komponenten entsprachen dem Normalfall: Stahlkugel $\varnothing 1/16''$, MS-2-Öl in normaler Menge, Oberflächengüte usw. Die Versuchsbedingungen waren die folgenden:

Dauerversuchslast: alternierend 12 Std. 10 % und 12 Std. 200 % allseits.

Messlast: 5 % allseits.

Messpunkte bei 0; 1; 3; 7; 11,2 und 16 Millionen Umdrehungen.

Die Lagerbestandteile wurden labormässig gereinigt und zusammengesetzt und anschliessend in die bereits montierten Versuchszähler eingeschraubt; damit wurde jede schockartige Belastung der Unterlagersteine (durch Transport und Stromstösse) vermieden.

Die Kurven Zählerfehler in Funktion der erreichten Umdrehungszahl des Systems sind in den Figuren 2 und 6 wiedergegeben. Das Fehlerbild Fig. 2, S. 727, der Einstein-Normalvariante mit 90° orientierten Steinen ZV 19 repräsentiert den üblichen Verlauf. Demgegenüber zeigt das Kurvenbild Fig. 6, S. 743, der Variante mit 0° orientierten Steinen ZV 24 anfänglich eher besseres Laufverhalten der Lager, das, von einer Ausnahme abgesehen, erst bei 16 Millionen Umdrehungen vergleichbar mit der Normalvariante wird. Dieser eine Ausreisser fällt zwischen 3 und 6 Millionen Umdrehungen sehr stark ab und erreicht bei 11,2 Millionen seinen Tiefstwert mit $-9,6\%$, worauf eine geringe Erholung bis 16 Millionen Umdrehungen (Schlussmessung vor Versuchsabbruch) eintritt.

In Übereinstimmung mit diesen Fehlerwerten wurden folgende mikroskopische Beurteilungswerte registriert (Abnutzungsquote als Range angegeben, Ausreisserwerte in Klammer):

	Orientierung 90° ZV 19	Orientierung 0° ZV 24
Ölzustand	unverändert	unverändert
Kugelabnützung	50 ... 100 μ \varnothing leicht rau	50 ... 130 μ \varnothing (350) leicht rau
Steinabnützung	50 ... 100 μ \varnothing Laufspuren kon- zentrisch zum Kalottenzentrum	50 ... 100 μ \varnothing (350) Laufspuren konzentrisch zum Kalottenzentrum. Ausreisser sektoriell mit Ausbrüchen

Bei diesem Vergleichsversuch konnte beobachtet werden, dass die Orientierung 0° eine zumindest zeitweise grössere Abriebbeständigkeit aufweisen kann als die übliche 90°-Orientierung, solange die Steine peinlichst jeder Schockbehandlung durch Transport usw. ferngehalten werden und dadurch die Auslösung basaler Spaltsysteme im Sinne SANDMEIERS unterbleibt. Der „Ausreisser“ zeigte aber gleichzeitig, wie trügerisch dieser Gewinn an Abnutzungswiderstand ist: Tritt nämlich dennoch Abrieb auf — sei es durch Ausbrüche entlang basaler Spalt-
risse (SANDMEIER), sei es durch plastische Verformung bis zum Abscheren der Reibschweissungen, wie auf Grund der Ergebnisse von STEIJN und DUWELL anzunehmen wäre —, dann führt dieser zu massiver Beeinträchtigung der Lauffläche und damit zu deutlich schlechterem Laufverhalten als selbst die schlechtesten Einheiten der 90° orientierten.

Bei Einhaltung der entsprechenden Grenz- oder Übergangsbedingungen ist es demnach möglich, sowohl die Modellversuche von STEIJN als auch von ALBRECHT im Zählerunterlager gleichzeitig zu reproduzieren.

Im Hinblick auf einen sicheren und gleichmässigen Lagerbetrieb muss nach diesen Erkenntnissen der 90°-Orientierung der Zählerunterlagersteine unbedingt der Vorzug gegeben werden.

4.25. Intensität des Einflusses der Steinorientierung auf das Abriebverhalten

Wie die erwähnten Autoren gezeigt und es auch die eigenen Versuche bestätigt haben, muss mit einer immer wieder feststellbaren Anisotropie der Abriebbeständigkeit des Saphirlagersteins gerechnet werden. Die Unterschiede sind jedoch nicht so gross, dass durch weitere Orientierungsmassnahmen noch wesentliche Verbesserungen erzielt werden könnten; die Verhältnisse liegen vielmehr derart komplex, dass je nach Betriebsbedingungen gar Umkehreffekte auftreten können. Somit ist die Lösung der gestellten Hauptaufgabe nicht auf diesem Wege zu erreichen.

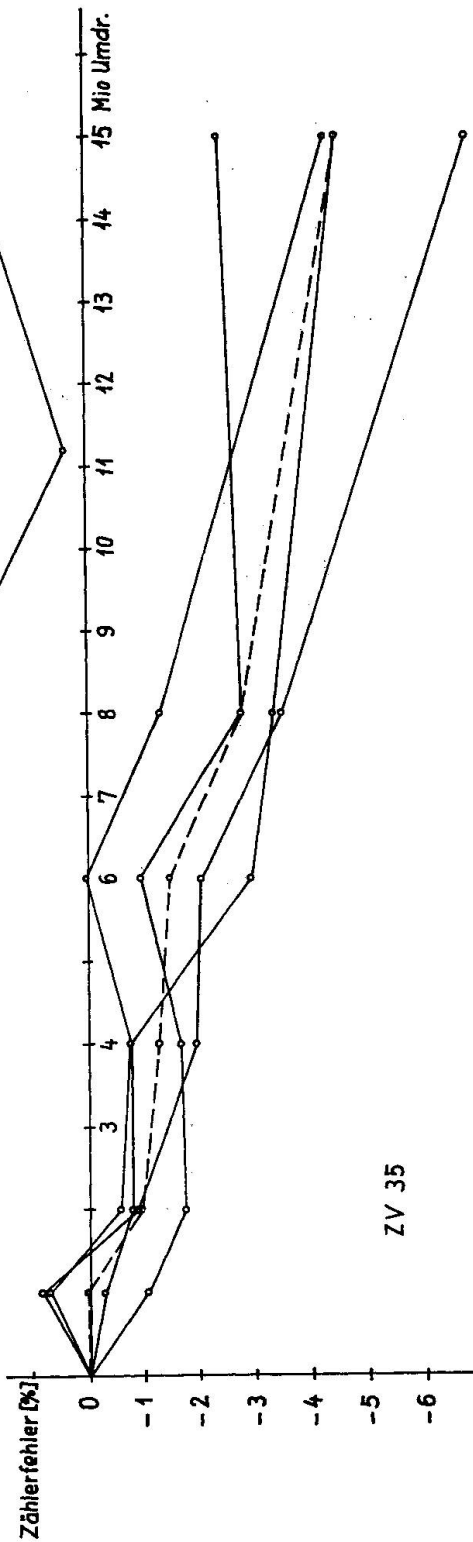
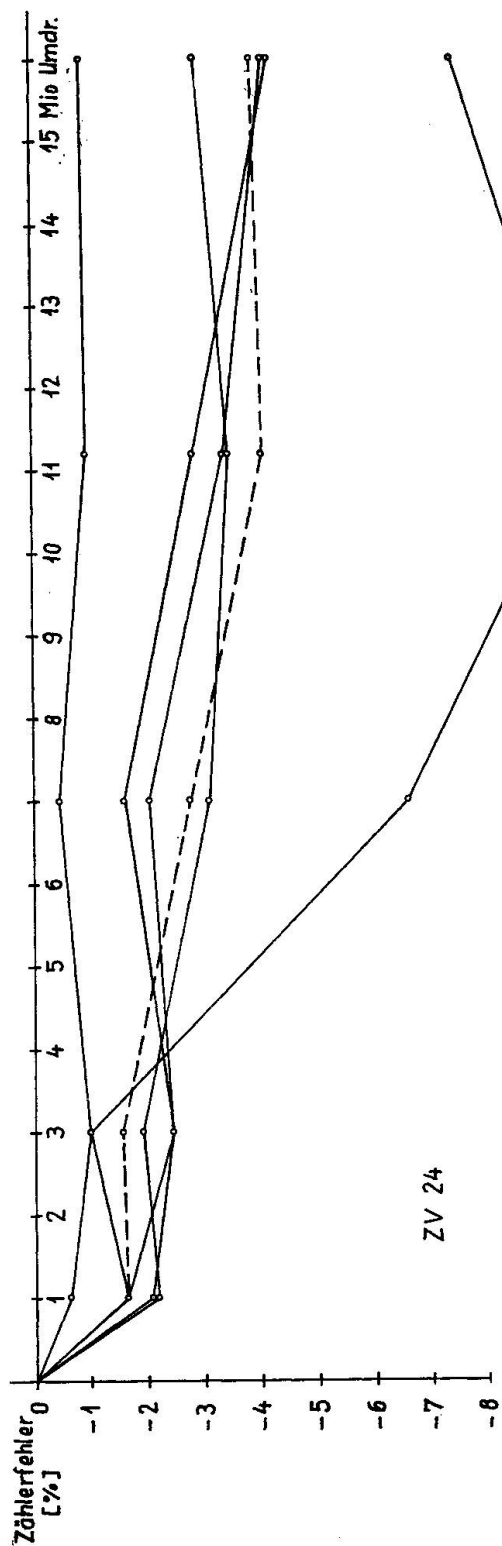
Fig. 6. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 24 (0° orientierte Lagersteine).


Fig. 7. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 35 (mit BeO polierte Lagersteine mit Stahlkugel).

4.3. Einfluss der Gitterstörungen (indirekter Einfluss)

Bei Kristallen wirken sich Gitterbaufehler grundsätzlich auf die kristallphysikalischen Eigenschaften aus (z. B. VAN BUEREN 1959, BOLLMANN 1959, WINKLER 1955 und BARRETT 1952). Metalle erleiden z. B. anlässlich der Kaltverformung eine Steigerung ihrer Versetzungsdichte; die Versetzungen blockieren ihrerseits die Gleitprozesse und je grösser die Versetzungsdichte ist, um so kleinere Gleitwege sind unter gleichen Bedingungen nurmehr möglich. Dies äussert sich makroskopisch in der bekannten Kaltverfestigung der Metalle. Diese Kaltverfestigung besteht ebenfalls bei einer Oberflächenbearbeitung, wobei das Einarbeiten von Oxydteilchen die Wirkung der induzierten Versetzungen gleichsinnig verstärkt (MOORE und TEGART 1951).

Nachdem erkannt worden ist (STEIJN und DUWELL), dass auch bei Saphir gewisse Gleitvorgänge den Abriebvorgang einleiten, mag es naheliegen, dieses für Metalle gültige Modell zumindest qualitativ auch auf bestimmte lokale Verformungsvorgänge von anorganischen Verbindungen zu übertragen. Wohl befasste sich SPADERNA (1961) mit der Einbeziehung der Versetzungen in die Festigkeitstheorie spröder Werkstoffe und untersuchte z. B. deren Einfluss auf die Biegefestigkeit; auf eigentliche Oberflächenvorgänge wurde jedoch nicht eingetreten.

Ein einfacher Versuch sollte abklären, ob von seiten der Gitterbaufehler ein massgebender Einfluss auf die Abriebfestigkeit der Saphirzählerlagersteine zu erwarten sei. Das Versuchsmaterial war von der Firma Djévahirdjian zusammen mit rekristallisierten Steinen geliefert worden (siehe Kap. 5.5). Es waren dies Unterlagersteine aus Saphir, welcher zwar nach dem normalen Verneuil-Verfahren hergestellt, aber zur Verminderung der thermischen Spannungen unter einem dreimal kleineren Temperatur/Zeitgradienten abgekühlt worden war. Die Unterlagersteine wurden in einem Zählerlaufversuch unter analogen Bedingungen gleichzeitig wie in Kap. 5.53 die thermisch behandelten geprüft.

- ZV 27 synthetischer Saphirstein, unter normaler Geschwindigkeit abgekühlt,
- ZV 28 synthetischer Saphirstein, langsam abgekühlte Birne.

Die Messresultate sind in Tab. 2, S. 745, zusammengestellt. Ein Vergleich der beiden Varianten ergibt praktische Übereinstimmung im Verlauf der Mittelwertskurven, jedoch überraschenderweise deutlich grössere Streuung der Lager mit Steinen aus langsam abgekühltem Saphirmaterial. Einige Kurven des ZV 28 nehmen zudem zwischen 0 und 1 Million Umdrehungen sehr rasch ab. Die mikroskopische Beurteilung der Lagerkomponenten Stein und Kugel zeigt ein weitgehend übereinstimmendes Bild bezüglich Abnutzungsintensität und -struierung; das Schmiermittel hatte sich nicht verändert.

Aus diesem Versuch kann geschlossen werden, dass eine Verminderung der Kristallbaufehler im Grundmaterial auf das Laufverhalten der Zählerunterlager kaum einen deutlichen Einfluss ausübt. Im Gegensatz zu der erwarteten Verbesserung ist sogar eher eine Verschlechterung im Sinne einer Streuungszunahme festzustellen; dies wäre in Übereinstimmung mit den Beobachtungen an thermisch behandelten Lagersteinen (siehe Kap. 5.53) dahingehend zu interpretieren, dass eine Abnahme der Versetzungsdichte Gleitvorgänge und das Auftreten von Verschweissungen fördert und somit eigentlich zu einer Verschlechterung der Lagergüte führen muss.

Tabelle 2. Zählerfehlermessungen an thermisch behandelten Steinen und solchen aus langsam kristallisiertem Saphir

Var. Nr.	Variante Kurzbez.	Range und $\bar{\Delta f}$ in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von					
		$1,0 \cdot 10^6$		$3,0 \cdot 10^6$		$7,0 \cdot 10^6$	
		$\bar{\Delta f}$	Range	$\bar{\Delta f}$	Range	$\bar{\Delta f}$	Range
ZV 26	thermisch behandelt	-2,36	2,59	-3,78	6,04	-4,31	5,79
ZV 27	normal	-1,18	2,58	-1,84	2,96	-2,78	2,48
ZV 28	langsam abgekühlt	-1,73	4,11	-2,29	4,46	-2,55	4,47

4.4. Überdeckung der Struktureinflüsse

Alle vorgängig beschriebenen, mittelbaren und unmittelbaren Einflussfaktoren der Kristallorientierung auf die Laufeigenschaften der Saphirunterlagersteine wirken sich nicht besonders deutlich oder zuweilen sogar überhaupt nicht aus. Diese Beobachtung führt zum Schluss, dass das Laufverhalten zur Hauptsache durch einen richtungsunabhängigen Faktor beeinflusst wird, nämlich durch die Politurschicht. Über die damit verknüpften Probleme orientiert das nachfolgende Kapitel.

5. POLITURSCHICHT UND ABRIEBMECHANISMUS

5.1. Aufbau und Entstehung einer Politurschicht

Die Anschauungen über den Aufbau der Bearbeitungs- und Politurschicht haben im Laufe der Zeit starke Wandlungen erfahren und Auseinandersetzungen hervorgerufen, die bis heute noch nicht endgültig beigelegt sind. Newton war der

Ansicht, die Oberfläche bearbeiteter Werkstoffe werde durch Abtragen der erhabenen Teile, mithin durch reine Verminderung der Rauhtiefe auf dem Abtragswege geglättet. Gegen Ende des letzten Jahrhunderts gewann allmählich die Vorstellung einer Materieverschiebung an Bedeutung (z. B. bei Lord Rayleigh), welche durch BEILBY weiterentwickelt wurde, allerdings in einer sehr kühnen Form: Nach BEILBY (1921) soll während des Bearbeitungsprozesses die Oberfläche eines Werkstoffs so stark erhitzt werden, dass sie in einer hauchdünnen Schicht aufschmilzt und unter dem Einfluss der Oberflächenspannung in eine ideal glatte Ebene übergeht; für die Struktur der Politurschicht folgt daraus, dass sie ähnlich einer erstarrten Flüssigkeit glasartig-amorph sein müsse.

FINCH (1934) entdeckte, dass polierte Kupferoberflächen imstande seien, feinste Zinkkriställchen bei Raumtemperatur zu lösen, bis eine gewisse Sättigung eintritt. Diese Beobachtungen wertete FINCH als Beweis für den amorphen Zustand der Politurschicht bzw. die Existenz der „Beilbyschicht“. RAETHER (1948 und 1950) kam dagegen auf Grund umfangreicher und sehr sorgfältiger Elektronenbeugungs-Untersuchungen zur Überzeugung, eine eigentliche Beilbyschicht mit flüssigkeits-ähnlicher Struktur könne es nicht geben, es sei der Aufbau der Politurschicht vielmehr in jedem Fall polykristallin, wobei die Grösse der Kristallite (in seiner Terminologie) in Richtung zur Oberfläche hin abnehme. BOWDEN (1959) neigt wieder eher der Ansicht zu, es bestünde wirklich eine sehr dünne ($\sim 10 \dots 20 \text{ \AA}$ dicke) amorphe Schicht, allerdings nicht im Sinne Beilbys zufolge Oberflächenspannung entstanden (diese Ansicht wird verständlicherweise von allen Seiten als überholt betrachtet), sondern durch die Summation zahlreicher submikroskopisch kleiner Verschweissungsstellen.

Nach RAETHER (1950) werden die oberflächennahen Kristallite bzw. der Einkristall (sofern es sich um einen solchen handelt) an der Oberfläche durch einen mechanischen Polierprozess zertrümmert. Die „Auflösungsgrenze“ lag bei seinen Elektronenbeugungs-Untersuchungen ungefähr bei $10 \dots 20 \text{ \AA}$; abgesehen von dieser der Untersuchung vorderhand noch entzogenen Grenzschrift konnte er keinen neuen Materialzustand im Sinne BEILBYS entdecken. Der Übergang vom ungestörten Grundmaterial bis zur Oberfläche ist gekennzeichnet durch abnehmende Grösse der Kristallite (s. z. B. Fig. 8, S. 747), wobei die jeweils feinste „Fraktion“ materialspezifisch ist. Dies gilt nicht nur für Metalle, sondern auch für mineralische Werkstoffe; nach RAETHER spielt bei diesen allerdings die Härte eine wesentliche Rolle: während bei Metallen ein relativ geringer Bearbeitungsgrad feinstkristallines Oberflächengefüge nach sich zieht, bewirkt weitgehendes Fehlen plastischer Verformbarkeit bei Mineralien sprödes Ausbrechen; die Zone intensiver Gitterstörung wird um so kleiner, je härter das Mineral ist. Dafür treten im allgemeinen keine Störeffekte durch Oberflächenoxydation auf wie bei den Metallen.

BOWDEN (1959) und Mitarbeiter haben festgestellt, dass bei Reibvorgängen im allgemeinen die Schmelztemperatur des niedrigerschmelzenden der beiden Reibpartner erreicht wird; bei metallischen Werkstoffen kann dies durch Wahl zweier verschiedener Metalle und Messen der EMK zwischen denselben nachgewiesen werden. Es handelt sich hierbei um sehr kurzzeitige (Grössenordnung $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ s}$ Halbwertszeit) und örtlich sehr beschränkte Ereignisse (Grössenordnung μ^2 und kleiner). Sie charakterisieren die Verschweissungsprozesse erhabener Stellen, die zufällig aufeinandertreffen, kurzzeitig zu einem tragenden Element (unter vielen andern) und durch diese Überbeanspruchung plastisch deformiert und aneinander-

geschweisst werden, danach sich durch Abscherung wieder trennen. Bei Metallen wird dieser Vorgang durch die immer mehr oder weniger starke Oxydation der Oberfläche noch erschwert; eine desoxydierte und entgaste Metalloberfläche lässt den Reibungskoeffizienten im Hochvakuum auf ein Vielfaches desjenigen Wertes ansteigen, der üblicherweise beobachtet wird. Nach BOWDEN (1959) ist für den Politurvorgang nicht vor allem die Härte, sondern die Schmelztemperatur wegleitend; BOWDEN anerkennt zwar die These von RAETHER, weist aber darauf hin, dass sie mit der heutigen Ansicht der amorphen Beilbyschicht Übereinstimmung zeige, sobald genügend kleine Kristalle betrachtet werden.

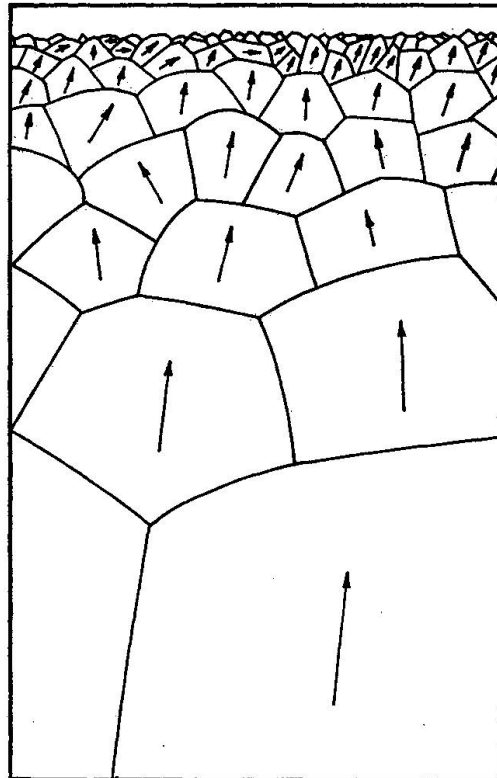


Fig. 8. Schema des Aufbaus einer Politurschicht.

Auch bei nichtmetallischen Werkstoffen konnte BOWDEN diese äusserst kurzzeitigen Temperaturspitzen feststellen und zwar in Form von Lichtblitzen (sogenannten "hot spots").

In der Tat scheinen diese Diskrepanzen eher eine Frage der Definition zu sein, wenn man berücksichtigt, dass

- die Beilbyschicht nicht wie ursprünglich angenommen schichtförmig angesehen werden darf und die obersten 10...20 Å bis vor kurzem noch keiner strukturellen Untersuchungsmethode zugänglich waren und bis heute noch nicht systematisch untersucht worden sind;
- Zustand und Tiefe der äussersten Zonen materialspezifisch, anisotrop und von der Bearbeitungsintensität abhängig, sowie durch mannigfache Fremdeinflüsse (Oxydation, Adsorption u. a. m.) beeinflussbar sind. Es ergibt sich dabei eine Abstufung vom weichen, niedrig schmelzenden Metall über harte, hoch schmelzende Metalle und mineralische Werkstoffe bis zu solchen Materialien, die auch

unter höchsten Beanspruchungen keine plastische Verformung oder Aufschmelzen zeigen wie z. B. der Diamant (vgl. Bild 11).

Versucht man in diesem Sinne eine Synthese der Anschauungen von BEILBY, FINCH, RAETHER, BOWDEN unter Beizug der modernen Ansichten über den Realbau der Kristalle (s. z. B. VAN BUEREN 1959, READ 1953 und FRIEDEL 1956), so gelangt man etwa zu folgendem Bild: Durch Vorbearbeitungsvorgänge zur Oberflächenverfeinerung werden in einem Werkstoff, der sich zunächst in strukturell ausgeglichener Lage befinden möge, Gitterfehlstellen induziert, die sich teilweise zu Kleinwinkelkorngrenzen zusammenfinden bzw. häufen und derart zu einem Gebiet zahlreicher Subkörner von geringster Ausdehnung führen. Die Grösse dieser Subkörner nimmt gegen die Oberfläche hin ab, der Auslenkwinkel zur Grundorientierung immer mehr zu (vgl. Fig. 8, S. 747). Die Oberfläche ist durchzogen von Furchen des Bearbeitungswerkzeugs. Folgt der Vorbearbeitung (z. B. dem Schleifen) ein Feinbearbeitungsvorgang (z. B. ein Polieren), so wird die Zertrümmerung der oberflächennahen Subkörner fortgesetzt. Je nach Sprödigkeit des Werkstoffes ist es ein weiterer Abtrag ohne Verschweissungsvorgänge (bei Materialien mit sehr hohem Elastizitätsmodul bzw. hohem Schmelzpunkt) oder, mit abnehmenden Werten von Elastizitätsmodul und Schmelzpunkt, ein zunehmender Anteil an Verschweissungsprozessen der streckenweise verfrachteten Partikel, die sich vorzugsweise in den Bearbeitungsfurchen ansammeln. Man denkt hier unwillkürlich an das von HÜTTIG 1957 definierte Mahlgleichgewicht, das sich bei bestimmter materialspezifischer Korngrösse zwischen Zerkleinerungsprozess (als Vektor gedacht) und Verschweissungs- bzw. Sinterprozess (als Gegenvektor gedacht) einstellt. — Das verfrachtete Material in den Bearbeitungsspuren wird eine gewisse Sinterfestigkeit erreichen, die höher liegen dürfte als diejenige lose aufgeschütteten Pulvers (trotz der Anziehungskraft so feiner Teilehen), aber andererseits diejenige des danebenliegenden „anstehenden“ Grundmaterials nicht erreichen, trotz dessen intensiv gestörter Gitterstruktur. Damit ist die grössere Lösungsgeschwindigkeit des Furchenmaterials gegenüber dem Grundmaterial beim Ätzen erklärbar, weist doch auch das verfrachtete Furchenmaterial einen noch viel höheren Grad struktureller Störung auf als das Oberflächen-Grundmaterial. Substanzen mit sehr tiefen Elastizitätsmodul- und Schmelzpunktwerten dürften, wie BOWDEN 1959 gezeigt hat, einem reinen Fliessvorgang durch oberflächliches Aufschmelzen unterliegen.

Zur Vervollständigung kann noch ein weiteres, dem Mahlgleichgewicht von HÜTTIG verwandtes Gleichgewicht berücksichtigt werden: das Ordnungsgleichgewicht. Wie bereits erwähnt, stellt die Politurzone eine strukturell ausgeprägt instabile Phase dar mit der Tendenz, in den ursprünglichen gesetzmässig geordneten Zustand zurückzukehren. Daraus abgeleitet kann man sich z. B. vorstellen, dass eine richtig amorphe oder zumindest röntgenamorphe Politurschicht existiert, jedoch unter Umständen nur während des Politurvorganges selbst, bzw. vielleicht noch sehr kurze Zeit nachher andauernd, bis die Ordnungsrückführung diese Zone wieder verschwinden lässt. Die Zeitkonstante dieser Rückbildung dürfte materialspezifisch sein und in gewissen Fällen die Existenz einer solchen weitgehend amorphen Zone nachweisen lassen.

Möglicherweise kann dieses Bild eine gewisse Bestätigung erfahren, sobald die Strukturuntersuchungsmethoden mit einer Eindringtiefe von nur wenigen Å, z. B. die Elektronendiffraktion mit langsamen Elektronen (niedrige Beschleunigungs-

spannung in der Grössenordnung von nur einigen hundert Volt) zu diesen Untersuchungen eingesetzt werden, wobei diese dann besonders wirkungsvoll der Aufklärung von Politurschichtproblemen dienen, wenn sie unmittelbar nach oder besser sogar während der Bearbeitungsprozesse vorgenommen werden.

5.2. Das herkömmliche Polieren von Spurlagerteilen aus Korund

Der in Kap. 2.4 kurz erwähnte Politurprozess verläuft folgendermassen: Die Saphirlagersteine erhalten einen Tropfen Diamantaufschlämmung der Körnung $1 \dots 2 \mu$ und werden nach Vorwärmen in eine Drehvorrichtung gespannt, die sie mit ca. 10 000 Touren/min rotieren lässt. Gegen die vorgeschliffene Kalotte wird ein zugespitztes Polierholz gepresst, das seinerseits eine Rotationsgeschwindigkeit von ca. 30 000 Touren/min in der Gegenrichtung aufweist. Anfangs setzen die Diamantkörner den vom Vorschleifen her bekannten Prozess des Abtrages durch schneidende Schleifwirkung fort, allerdings um eine Grössenordnung feiner. Durch den recht beträchtlichen Anpressdruck und das Fehlen jeglichen Kühlmittels wird die Temperatur von Steinoberfläche und Hölzchenspitze ziemlich rasch in die Höhe getrieben; nach einigen Sekunden erweicht das Polierholz etwas, nimmt die Schleifkörner auf und passt sich der Steinkalotte an. Dadurch wird der Hochglanzpoliturprozess eingeleitet, der in einem sehr kurzzeitigen, innigen Kontakt der Holzspitze mit der Steinoberfläche die letzten feinen Bearbeitungsspuren tilgt. Durch den damit verbundenen Temperaturanstieg beginnt das Hölzchen zu verkohlen, und der Politurprozess muss sofort abgebrochen werden. Der eigentliche Hochglanzpoliturprozess dürfte innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde ablaufen. Dehnt man diesen Verarbeitungsabschnitt zu lange aus, so wird die Politurzone überhitzt und ergeben sich Absplitterungen.

5.3. Nachweis der Politurschicht auf Spurlagerteilen aus Korund

5.31. Röntgenographische Untersuchungen

In einer kleinen Voruntersuchung wurde die Struktur des Bearbeitungsabriebs studiert, um derart allenfalls Anhaltspunkte über die Strukturänderungen während des Polierens zu gewinnen. Zu diesem Zwecke wurde Abriebmaterial der verschiedenen Bearbeitungsstufen röntgenographisch nach der Debye-Scherrer-Methode untersucht. Die visuelle Ausmessung der Linienbreite von α -Korund an den Pulverdiagrammen ergab folgende Werte (Mittelwert von 5 Messstellen):

Sägestaub vom Zerteilen der Halbbirnen	0,68 mm
Schleifstaub vom Rundscheifen	0,83 mm
Schleifstaub vom Vorpolieren	0,78 mm
Vergleichstest (Korund 20 min lang in Achatschale verrieben)	0,91 mm

Damit war zumindest nachgewiesen, dass keine deutlich zunehmende Linienverbreiterung eine Abriebverfeinerung der fortlaufenden Bearbeitungsstufen charakterisiert. Auch Rückstrahlaufnahmen vom Kalottenzentrum und Durchstrahlaufnahmen von auf ca. 0,1...0,01 mm Restdicke im Kalottenzenith abgeschliffenen Steinen ergaben absolut scharfe Lauepunkte.

Diese letzten Fehlergebnisse stimmen allerdings mit den Feststellungen RAETHERS (1948 und 1950) überein, wonach Röntgenstrahlen ein zu grosses Eindringvermögen für die Abklärung von Politurschichtstrukturen besitzen.

5.32. Lichtmikroskopische Untersuchungen

Nach früheren Untersuchungen existiert auf polierten Korundteilen keine Politurschicht beziehungsweise Beilbyzone (FINCH, 1936, und indirekt auch RAETHER, 1950 und 1957). Dies trifft auch durchaus zu, solange die Politurprozesse an ebenen Flächen bei kleinen Belastungen und Tourenzahlen, mithin also bei kleiner Bearbeitungsintensität durchgeführt werden. So zeigen zum Beispiel Schmucksteine aus Korund (Rubin und Saphir) unter dem Auflichtmikroskop bei etwa 200facher Vergrösserung meist noch ein Netzwerk von feinen Bearbeitungsspuren. Die schalen- beziehungsweise pfannenförmig ausgebildeten Zählerunterlagensteine können dagegen zufolge ihrer radialsymmetrischen und dementsprechend selbstzentrierenden Form viel höheren Bearbeitungsintensitäten unterworfen werden (Feststellung von SANDMEIER, veröffentlicht bei SHOTTER, 1944).

Etwa 60 bis 80% der Steine lassen nach einem einmaligen Hochglanzpoliturprozess unter dem Lichtmikroskop bei 72facher Vergrösserung keine Bearbeitungsspuren erkennen, und bei ca. 30 bis 40% sind auch unter Anwendung von 200facher Vergrösserung und Auflichtphasenkontrast nicht die geringsten Oberflächenstrukturen erkennbar; Interferenzmethoden scheiden zufolge der sehr geringen Querausdehnung dieser feinsten Bearbeitungsspuren und Fehlen entsprechender auch noch so geringer Höhenunterschiede aus.

Der Politur/Ätz-Nachweis kann an Zählerlagersteinen aus Saphir ebenso durchgeführt werden wie an Metallen: wird ein einwandfrei

polierter Stein während ungefähr zwei Minuten in kochende konzentrierte Schwefelsäure getaucht, so wird durch diesen (für Korund) relativ milden Ätzangriff die Politurschicht entfernt, und das feine Bearbeitungsgefüge, wie es vor Durchführung des Hochglanzpoliturprozesses bereits vorlag, tritt wieder zutage. Es ist immerhin bemerkenswert, dass dieser einfache Standardversuch der Metallographie bei einem der härtesten Mineralien erfolgreich durchgeführt werden kann.

5.33. Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Bild 10 zeigt die Oberfläche eines polierten Saphirsteines in der Gegend des Kalottenzentrums. Dieser Stein ist nicht ideal gut poliert; man erkennt noch deutlich die weiter abgetragenen und überpolierten Vorbearbeitungsspuren, wie sie in Bild 7 im erst vorpolierten Zustand zu sehen sind. Aber gerade deswegen gibt er befriedigende Beweismomente für eine Materieverschiebung (sei es im Sinne RAETHERS oder BOWDENS bleibe dahingestellt) während des Politurprozesses an Saphiroberflächen: Alle Kratzer weisen eine verschwommene, verwaschene Struktur auf, wobei insbesondere nirgends scharfe, gezackte Ränder wie in Bild 7 auftreten. Ferner können einzelne Kratzer beobachtet werden, die unterwegs stellenweise aufhören, später aber wieder ihre Fortsetzung in der gleichen Richtung finden; sie sind partiell gelöscht oder eben zugeschmiert worden. Betrachtet man weiter das bei ungefähr gleicher Vergrößerung wiedergegebene Bild 8, so entdeckt man auch hier wieder vereinzelte, aber nur äusserst schwach angedeutete überpolierte Verarbeitungsspuren; dazwischen sind relativ grosse Bereiche völlig strukturlos (die Kügelchen sind Präparationsverunreinigungen, und die scheinbare Feinstruktur auf der Oberfläche ist auf das Bedampfungsmittel Palladium zurückzuführen).

Eine weitere Möglichkeit des Nachweises von Politurschichten auf Saphir gibt die Struktur von Abnutzungsspuren. Bild 6 zeigt die Oberfläche eines Saphirsteines aus dem Lager einer Normalvariante. Man entdeckt mehr oder weniger parallel verlaufende, feine Abnutzungsspuren, die durch Schleifwirkung des Abriebs entstanden sind. Daneben sind jedoch auch stärkere Beschädigungen feststellbar, von denen hier die beiden interessantesten besprochen sein sollen: die grosse Schleifspur am oberen Bildrand weist angenähert dreieckförmige Ausbrüche in intermittierender, beinahe regelmässiger Reihenfolge auf, wobei die Spitzen entgegen der Kugelbewegung orientiert sein dürften (Analogie zu den lichtmikroskopisch feststellbaren Ausbrüchen bei stärkerer Ab-

nützung). In der rechten Bildhälfte sieht man weiter die kurze, kometenartige Schleifspur eines Kornes, das, zunächst auf der Oberfläche aufgesetzt, sich mit fortgesetzter Gleitbewegung zwischen Kugel und Stein immer tiefer in die Saphiroberfläche eingegraben hat und schlussendlich steckengeblieben ist. Das Bild dieser Beschädigungsspur mit seinen ausgeprägten Randaufwölbungen ist mit demjenigen auf einer duktilen Substanz vergleichbar; eine gewisse plastische Verformbarkeit muss demnach auch beim Saphir angenommen werden.

Eine Diamantoberfläche erweist sich demgegenüber als von völlig anderer Struktur; der Abdruck zu Bild 11 stammt von einem Diamantunterlagerstein, der einen ähnlichen Herstellungsprozess erfahren hat. Die ganze Oberfläche ist aufgebaut aus Mikrobruchflächen, der Glättungsprozess durch reinen Abtrag ohne Materieverschiebung scheint augenfällig. Die beginnende Laufspur auf Bild 11 ist charakterisiert durch spitzwinklige, dreieckförmige Ausbrüche; die Substruktur in den Laufrillen ist überraschend ähnlich jenen bei Saphirsteinen. Wenn auch schlechter ausgebildet als bei diesen, treten ebenfalls schlagstrahlenähnliche Gebilde etwa 45° zur Schleifrichtung orientiert auf. Interessanterweise erscheint der Glättungsgrad elektronenoptisch in der Laufspur besser als auf dem nicht beanspruchten Gebiet daneben — ein Zeichen dafür, dass sich auch das Diamantlager selbst einpolieren möchte (siehe Kap. 5.44).

Nach Bild 11 ist es nicht weiter verwunderlich, dass sich die Diamantlager im Zählerunterlagerbetrieb trotz der grossen Werkstoffhärte kaum besser bewähren als gute Saphirsteine: die Mikrobruchstruktur bietet mannigfachen Anlass zu Beschädigungen und lokalen Überlastungen, die zu Ausbrüchen führen und ihrerseits wieder wie Schleifmittel wirken. Diamant zeigt bekanntlich starke Härteanisotropie, die sich bei den noch folgenden Schleifprozessen voll auswirken kann (die Diamantsteine können selten optimal, das heisst nach der $[111]$ -Richtung orientiert werden).

5.34. Elektronenbeugungs-Untersuchungen

SHOTTER (1944) liess auf Veranlassung von SANDMEIER Saphirplatten durch FINCH und WILMAN elektronendiffraktographisch untersuchen. FINCH erhielt auf Anstrahlaufnahmen bei 50 kV Beschleunigungsspannung von den polierten Saphirplatten diffuse Interferenzpunkte, denen er entnahm, die Politurschicht müsse aus feinstkristallinem Material oder unvollständig rekristallisiertem Korundglas bestehen.

1953 wurden Elektronenbeugungsuntersuchungen im Auftrage von

Landis & Gyr an der Universität Bern durchgeführt (unveröffentlicht); es war ausserordentlich schwierig, aus den Lagersteinen Keile herauszupräparieren, welche die spezifische „Pfannenlagerstein-Kalotten-Politur“ zu untersuchen gestatteten, denn Aufnahmen an ebenen Saphirplatten hatten ja schon bei FINCH keine befriedigenden Ergebnisse erzielt. Diese Aufnahmen — hergestellt bei vermutlich 50 kV Beschleunigungsspannung — zeigten eine allgemeine Streuschwärzung und teilweise diffus ausgebildete Punkte, die gegenüber den Aufnahmen von FINCH keine wesentlich neuen Aspekte ergaben; auch hier wurde das Auftreten einer amorphen Politurschicht als erwiesen betrachtet.

Beide Untersuchungen sprechen indessen nach den Interpretationen ähnlicher Bilder durch RAETHER kaum zwingend für eine amorphe Schicht, vor allem nicht von einer Dicke von einigen hundert Å. Eine periphere Verbreiterung der Reflexe bis zu deren Zusammenschluss zu eigentlichen Ringen, womöglich noch mit radialer Verbreiterung, wie sie aus Gefügen mit feinsten Kristalliten analog zu feinsten Pulvern im Pulverdiagramm bewirkt wird, konnte in keinem Fall beobachtet werden. Wenn also weiterhin die Existenz einer feinstkristallinen Politurschicht oder gar eine amorphe Deckschicht auf den Saphirzählersteinen angenommen werden soll, wie es auf Grund der elektronenmikroskopischen Aufnahmen (siehe Kap. 5.33) nicht unvernünftig erscheint, so nur unter folgenden Bedingungen oder mindestens einer derselben:

— Die Politurzone müsste derart dünn sein, dass sie auch dem nur sehr wenig tief eindringenden, streifenden Elektronenstrahl zu wenig Anteil zu entsprechend peripherer Verbreiterung oder gar Verschmelzung der Einzelreflexe zu Ringen bietet, mithin also nur wenige Atomlagen, bis höchstens 10...15 Å Dicke umfasst, was angesichts der sehr harten Natur des Korundes und seines hohen Schmelzpunktes nicht unwahrscheinlich ist;

— eine allfällig während des Polierprozesses vorhandene, gegenüber dem unbearbeiteten Einkristall stark gestörte oder gar amorphe Politurschicht könnte zufolge ihrer grossen Instabilität nach dem Politurprozess sofort rekristallisieren, respektive auskristallisieren. Dabei ist zu erwarten, dass der darunterliegende — weitgehend ungestörte — Einkristall als Anwachssubstrat wirksam wäre und somit die Schicht praktisch in den Einkristall zurückgebaut würde. Sie könnte demzufolge elektronendiffraktographisch nicht mehr als solche nachgewiesen werden, aber ihre zumindest kurzzeitige Existenz aus den mikroskopisch hinterbliebenen Spuren des Oberflächenreliefs bewiesen werden.

5.4. Der Abriebmechanismus

5.41. Mikrotopographie der Oberfläche

Obwohl die Saphirlagersteine und Stahlkugeln eine der geometrischen Idealgestalt stark angenäherte Oberflächengestalt aufweisen (Rauhtiefe etwa $0,02 \mu$) muss doch auch im Zählerunterlager mit dem „Topographie-Effekt“ nach BOWDEN (1959) gerechnet werden, und sei es auch nur in sehr abgeschwächter Form (zum Beispiel in einer örtlich sehr unterschiedlichen Druckbelastung trotz durchgehender Auflagefläche). Örtlich sehr hohe Druckspitzen führen zum Abreißen des Ölfilmes und zu Verschweissungsvorgängen, wie zum Beispiel Bild 5 aus ZV 16 zeigt: an der Kugel hat sich ein Kranz von „Brandflecken“, oxydierten Stellen gebildet; bei intensiveren Verschweissungsprozessen besteht Metallübertrag von der Kugel auf den Stein, wie es besonders bei Abwesenheit des Schmiermittels häufig vorkommt (vgl. Bild 2). Das Metall ist von der Kugel abgeschert und auf der Saphiroberfläche richtig festgeschweisst worden; es kann zum Beispiel durch Ultraschallbehandlung nicht entfernt werden.

5.42. Einfluss des Schmelzpunktes und der Warmfestigkeit der Lagerwerkstoffe

Wie bereits in Kap. 5.1 angeführt, gelang BOWDEN und seinen Mitarbeitern der Nachweis, dass die Temperatur auf den Lagerflächen den Schmelzpunkt der niedriger schmelzenden Lagerkomponente lokal erreicht. Daraus folgt, für spezifisch hochbelastete Lager, wie es zum Beispiel das Zählerunterlager darstellt, Materialien mit hohen Schmelztemperaturen zu wählen.

Die Schmelztemperatur der Lagerwerkstoffe steht genau genommen als Mass für die Scherfestigkeit und beschreibt somit die Abriebfestigkeit nur mittelbar. Ebenso gut müsste die Warmfestigkeit in einem engen Zusammenhang mit dem Abriebverhalten stehen. Innerhalb einer Werkstoffklasse mit ungefähr gleichen Schmelzpunkten, zum Beispiel der Stähle, sollten diejenigen Sorten besseres Verhalten aufweisen, die eine hohe Warmfestigkeit besitzen. Um diese Hypothese nachzuprüfen, wurde ein Vergleichsversuch in der Schnellaufstest-Einrichtung (Beschreibung dieser Versuchseinrichtung siehe Kap. 7.4) durchgeführt. Als Kugelmateriale wurden folgende zwei Stahlsorten gewählt:

— vakuumerschmolzener Kugellagerstahl mit 1 % C und ca. 1,5 % Cr (Normalvariante); Vickershärte $HV_5 = 880 \dots 960 \text{ kg/mm}^2$;

- a) Ausführung als Einsteinlager AV 1
- b) Ausführung als Doppelsteinlager AV 2
- warmfester Werkzeugstahl (Schnelldrehstahl) mit 0,9 % C; 4,2 % Cr; 2,0 % V; 8,2 % Mo; Vickershärte $HV_5 = 900 \dots 930 \text{ kg/mm}^2$; Ausführung als Einsteinlager AV 14.

Alle übrigen Versuchsparameter stimmten bei den drei Varianten überein, so namentlich Steinqualität, Schmiermittelqualität und -menge und die technischen Dauerversuchsbedingungen. Als Messkriterium für die Reibungsänderung während des Dauerversuchs diente die Auslaufzeit (siehe Kap. 7.4). In Fig. 9, S. 756, sind die Messwerte in Funktion der zurückgelegten Anzahl Rotordrehungen aufgetragen; sie lassen erkennen, dass das Lager mit der Kugel aus warmfestem Schnittstahl über sehr lange Betriebszeiten eine wesentlich bessere Reibungskonstanz einhält als der normalerweise verwendete Kugellagerstahl: so übertrifft die Reibungskonstanz der Variante AV 14 in der Ausführung als Einsteinlager nicht nur diejenige der Einstein-Normalvariante AV 1, sondern sogar auch diejenige der Doppelstein-Normalvariante AV 2. Die mikroskopische Beurteilung der Lagerteile liess denn auch nur eine sehr geringe Abnützung an den Lagerteilen der Schnelldrehstahl-Variante erkennen.

5.43. Rolle des Schmiermittels und allfälliger Trennmittel

Das Schmiermittel übernimmt im Gleitlager als Hauptfunktion die Trennung der Lagerpartner zwecks Unterbindung von Verschweissungsvorgängen. Geringe spezifische Lagerbelastung und relativ hohe Tourenzahlen lassen meistens hydrodynamische Schmierverhältnisse entstehen, welche die Erfüllung dieser Hauptfunktion ohne weiteres ermöglichen. Wird die Belastung des Schmiermittels durch Zunahme des spezifischen Lagerdrucks und/oder Abnahme der Gleitgeschwindigkeit erhöht, so tritt zunächst einmal Grenzschmierung ein, mit allgemein einer monomolekularen Schichtdicke. Bei noch weitergehender Belastungssteigerung, aber auch schon beim Auftreten von Belastungsspitzen zufolge der geometrischen Oberflächeninhomogenitäten, reisst der Schmierfilm lokal ab, und es kommt zu Schweissprozessen zwischen den Lagerpartnern; nach Abscheren der Schweissbrücken schliesst sich das Schmierepilamen wieder, die schädlichen Folgen der Verschweissungen — Metallübertrag, Bildung von Abriebprodukten, Oxydation, kristallstrukturelle Regeneration der Politurschicht — bleiben jedoch bestehen. Nach SCHUNK (1949) soll auch Verschleiss auftreten, wenn das Epilamen von der Lageroberfläche

Fig. 9. Auslaufzeit in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Varianten AV 1, AV 2 und AV 14 (Kugeln aus normalem Kugellagerstahl bzw. warmfestem Werkzeugstahl).

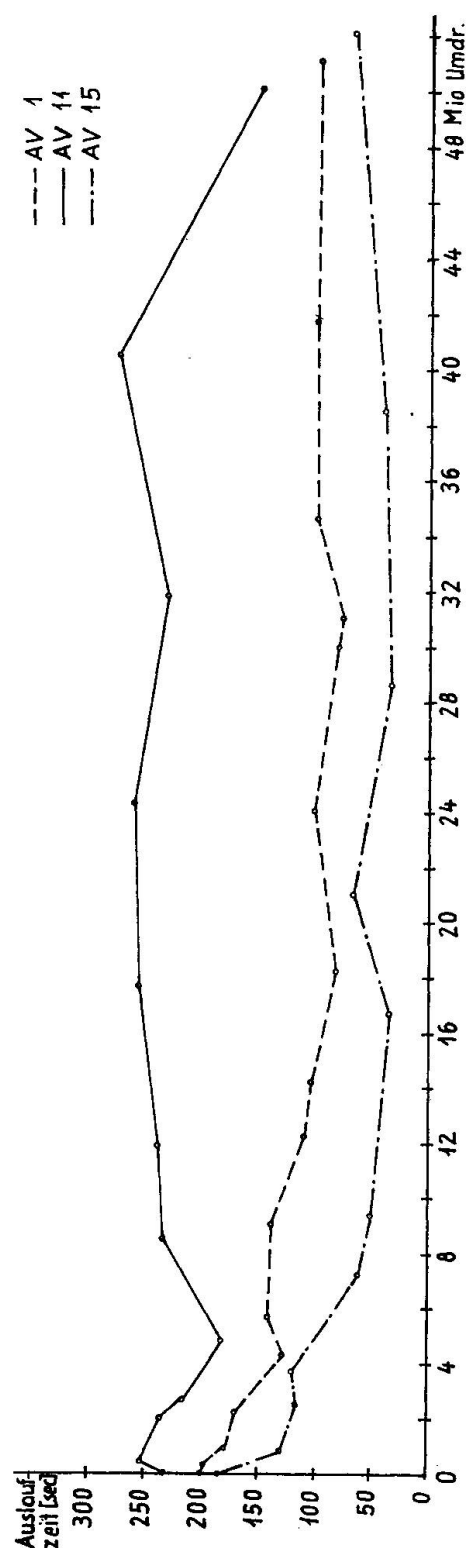
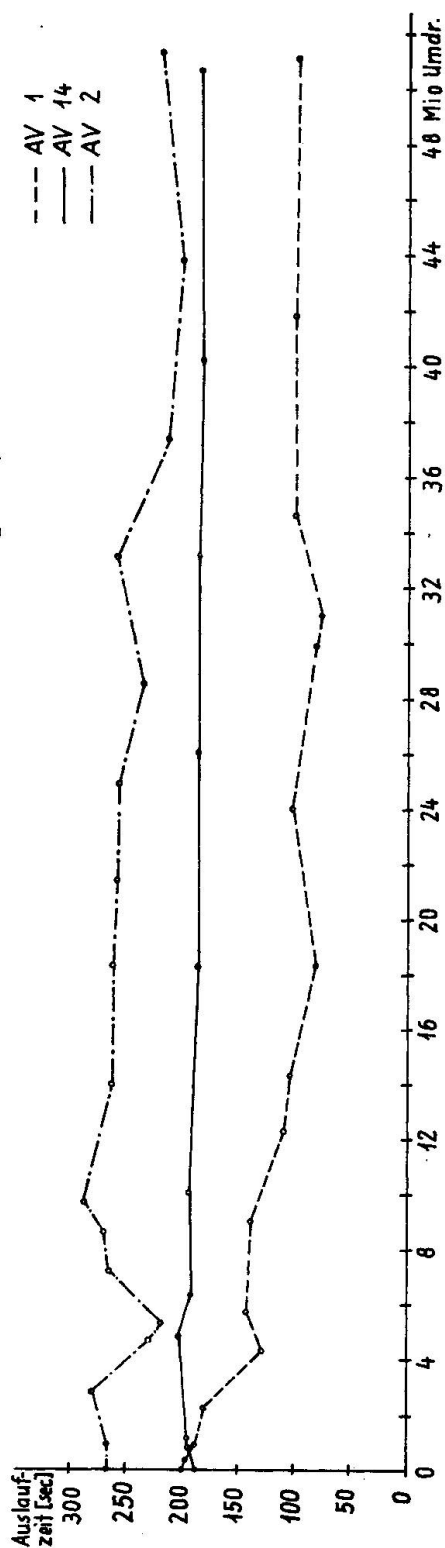


Fig. 10. Auslaufzeit in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Varianten AV 1, AV 11 und AV 15 (Normalvariante; mit Bariumstearat und mit Aluminiumstearat politurvergütet geschmierte Lager).

gelöst wird, indem es dann die obersten Atome des Lagerwerkstoffs mitreisst, an welche die Epilamenmoleküle ziemlich stark gebunden sind.

An das Schmieröl des Zählerunterlagers werden über diejenige nach hoher Abreissfestigkeit hinaus noch weitere Forderungen gestellt (SHOTTER, 1944):

- Grosse Alterungsbeständigkeit, speziell gegen oxydierende Einflüsse. Das Öl darf nicht verharzen, sonst führt dies zu einer Reibungszunahme infolge Viskositätszunahme oder gar Funktionsuntüchtigkeit des Öles.
- Gutes Suspensionsvermögen für die sich bildenden Abriebteilchen, um sie möglichst von der Laufzone fernzuhalten.
- Niedrige Viskosität, besonders auch bei niedrigen Temperaturen; die Viskositäts/Temperatur-Kurve soll im Bereich 0...40° C möglichst flach verlaufen.
- Nach Erfüllen oben gestellter Forderungen soll das Öl möglichst gute Schmierfähigkeit und Benetzbarkeit von Stein und Metalloberflächen aufweisen.

In Zählern hat heute ziemlich allgemein ein Pennsylvanian-Öl, zum Beispiel vom Typ Silvertown meter oil Nr. 2 (SHOTTER, 1944), Anwendung gefunden, das speziell für Zähler und Instrumentenlager entwickelt worden ist und ein Optimum in der Erfüllung obiger Forderungen darstellt. Weitere Einzelheiten und Messwerte finden sich bei SHOTTER (1944).

Die Verwendung spezieller Additivs zur Verbesserung der Epilamenschmierung hat sich im Zählerunterlager nicht bewährt; viele dieser Additivs enthalten Sulfid- oder Phosphatverbindungen, die metalloberflächenaktiv sind. Offenbar greifen sie die feinst polierte Oberfläche der Stahlkugeln zu stark an; der chemische Angriff der Additivs auf die Werkstoffoberfläche bezweckt ja gerade eine möglichst grosse Haftfestigkeit, damit die Additivs in Fällen des Abreissens des normalen Schmieröles die Hochdruckschmierung sicherstellen.

Vom Standpunkt der Alterungsbeständigkeit der Unterlagerschmierung aus müsste man die Verwendung von Festschmiermitteln mit Schichtgitterstruktur, zum Beispiel Graphit, Molybdänsulfid oder Wolframsulfid anstreben; dies wäre auch von seiten der Temperatur- und Druckbeständigkeit zu begrüßen. Leider lässt sich die Schmierung mit Festschmiermitteln im Einsteinlager nicht durchführen, da der Schmierfilm auch bei feinsten Körnung des Schmiermittels und Anwendung von speziellen Haftzusätzen (zum Beispiel auf Lackbasis) nach wenigen tausend Umdrehungen zur Seite gedrückt würde und sich wiederum Verschweissungen einstellten. Entsprechende Kugelbehandlung zur besseren Fixierung erbringt keine nennenswerten Verbesserungen. Bei

Doppelsteinlagern ist die Verwendung von Molybdänsulfid grundsätzlich möglich.

Versuche mit Trockenlauf des Zählerunterlagers, also unter Weglassen jeglichen Schmiermittels (auch Festschmiermittel) haben bei SHOTTER (1953) sehr unterschiedliche Resultate mit geradezu extrem grosser Streuung ergeben. Offensichtlich kann die Abwesenheit des Schmiermittels zu sehr intensiven Verschweissungsprozessen führen (wie dies in Kap. 3.3 nachgewiesen werden konnte) mit groben, kristallinen Ausbrüchen.

5.44. Das Abnützungs/Politur-Gleichgewicht

Nach den in Kap. 3 beschriebenen Versuchen muss es als aussichtslos bezeichnet werden, im Zählerunterlager andere als hochglanzpolierte Steine zu verwenden; die damit unvermeidbar verknüpften Ausbrüche kristallinen Materials längs der Ränder der Bearbeitungsspuren — ein Zustand, wie ihn zum Beispiel Bild 7 charakterisiert — müssten nach den Suspensionsversuchen zu urteilen zu baldiger Zerstörung des Lagers beziehungsweise zu ähnlicher Reibungsinkonstanz führen, wie dies Fig. 5, S. 735, zeigt. Die Nachprüfung dieser Hypothese anhand eines Zählerversuches ZV 25 mit 4 Stück MG-1-Zählern, Nennlast 5 A, Zählerkonstante 600 U/kWh, mit Einsteinlagern, in welche Steine mit nur vorpolierter, aber nicht hochglanzpolierter Kalotte eingebaut wurden (übrige Versuchsparameter dagegen identisch mit der Einstein-Normalvariante), ergab bei zwei Einheiten die Bestätigung unserer Annahme (siehe Fig. 11, S. 759): in einem Fall stärkere, im andern gar extrem grössere Reibungsinkonstanz als bei der Normalvariante (vgl. Fig. 2, S. 727). Die Fehlerkurven der beiden andern Einheiten verlaufen dagegen gerade spiegelbildlich zu denjenigen der Normalvariante: während der ersten Millionen Umdrehungen nach positiven Fehlern, also im Sinne einer Reibungsabnahme, anschliessend horizontal verlaufend (einer später allerdings wieder abnehmend). Diese Reibungsabnahme ist bedingt durch eine Rauigkeitsabnahme der Steinoberfläche (es waren einwandfrei polierte Kugeln verwendet worden), und diese wiederum kann nur eine Folge der Selbstpolitur sein. Man ist demnach versucht, anzunehmen, das Zählerunterlager „wünsche“ sich gleichsam den geeigneten Politurgrad selbst festzulegen; der vorpolierte Zustand ist zu wenig fein und muss vom Unterlager selbst noch nachbearbeitet werden — Politurbildung —, während der normale Hochglanzpoliturzustand gleichsam „zu gut“ ist und daher vorerst durch Abrieb teilweise zerstört werden

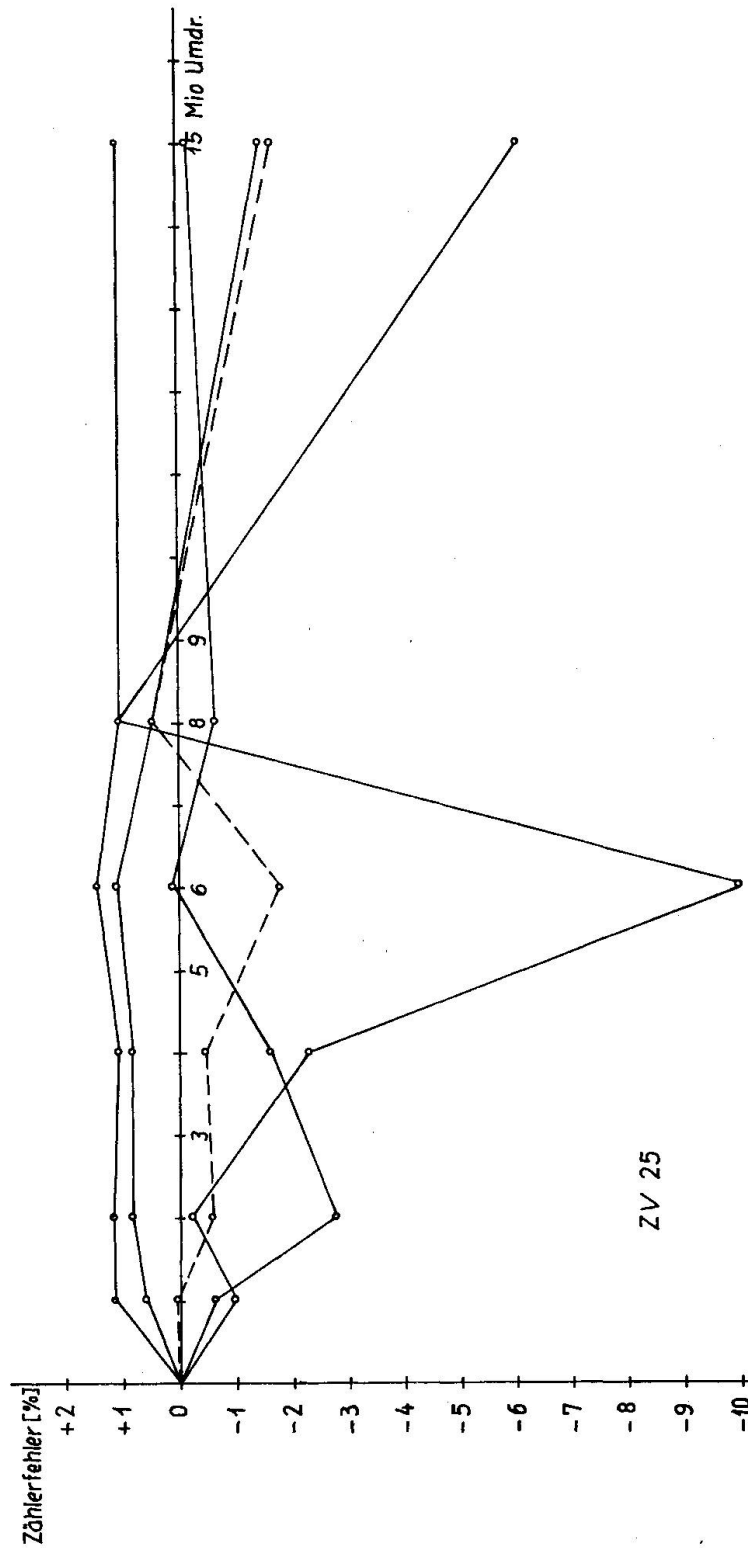


Fig. 11. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 25 (nur vorpolierte Steine).

muss, bis er „passt“ — Politurabtrag beziehungsweise Abriebbildung. Der optimale Grad der Politur bedeutet in diesem Sinne offensichtlich eine Art Gleichgewicht. Sind die Abriebpartikel zu zahlreich oder zu gross beziehungsweise von vorwiegend kristalliner Struktur, dann kann das Gleichgewicht nicht erreicht werden, und das Lager wird weitgehend zerstört, beziehungsweise verharrt in einem dauernd ändernden Ungleichgewichtszustand (siehe Kap. 3.4, ZV 20, Fig. 5, S. 735). Dieses Politur/Abrieb-Gleichgewicht weist eine gewisse Ähnlichkeit mit dem in 5.14 postulierten Zerkleinerungs/Verschweissungs-Gleichgewicht auf.

Eine gewisse Stütze findet diese Theorie des Abrieb/Politur-Gleichgewichtes auch in den Feststellungen von STOTT (1938) und SHOTTER (1944), wonach bereits gelaufene Saphirunterlagersteine nach Reinigung und Wiedereinbau deutlich grössere Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb zeigen als neue Steine, sofern ihre Politurschicht nicht zerstört ist; diese Beobachtung erklärt sich dadurch, dass diese Steine ihren Politur/Abrieb-Gleichgewichtszustand bereits im Laufe der ersten Inbetriebnahme gefunden haben.

Aus diesen Erkenntnissen könnte gefolgert werden, es sei bereits bei der Herstellung der Zählerunterlagersteine durch ein „Abfangen“ des richtigen Hochglanzpoliturgrades das Problem der Abriebbeständigkeit befriedigend zu lösen. Dies ist leider aus folgenden Gründen nicht möglich: einmal wäre es zweifelsohne äusserst schwierig, den Hochglanzpoliturprozess, der ja in seiner heute geübten Form nur Bruchteile von Sekunden währt, im geeigneten Moment abzubrechen; dazu bestünde die latente Gefahr kristalliner Ausbrüche.

5.5. Einfluss der Politurschicht auf die Lagerflächeneigenschaften

5.51. Literatur

BEILBY (1921) äusserte sich bereits zu diesem Problem und fand, dass die Politurschicht eines Lagerwerkstoffes härter und abriebfester als das Grundmaterial sei. Dieselbe Ansicht vertritt FINCH auch in bezug auf polierte Zählerunterlagersteine aus synthetischem Saphir; so sagte er in seinem Untersuchungsbericht an SHOTTER (1944): „The superiority of the Sandmeier's polished specimens (die Zählerunterlagersteine) in wear tests is probably due to the semi-vitreous nature of the polish layer produced by this method.“ Dies gilt, wie in 5.32 bereits erwähnt, nur für die Kalottenpolitur der Pfannenlagersteine, nicht jedoch für irgendwelche, beliebige polierte Saphirflächen.

Nach STEIJN (1961) müsste ebenfalls erwartet werden, dass ein Einfluss der Politur der Saphiroberfläche auf das Laufverhalten besteht, indem er plastisches Fliessen voraussetzt. Zumindest müsste es leichter zu Verschweissungen mit der

Stahloberfläche der Kugel kommen als dies z. B. an der Oberfläche eines Diamants geschieht.

Zum gegenteiligen Schluss kommt DINICHERT (1954), der eine Rekristallisation für die Korundoberflächen von Lagerteilen postuliert; nur wenn keine amorphe Deckschicht den Einkristall „verhülle“ sei es möglich, die guten Eigenschaften des Grundkristalls und eine Vorzugsorientierung auszunützen. Ferner soll eine Rekristallisation den Zusammenhalt der Deckschicht fördern, die Oberflächenunebenheiten ausgleichen, die Mikrorauhigkeit verkleinern und dergestalt die Reibungsverhältnisse verbessern.

5.52. Sogenannte Kaltpolitur

Der erste Schritt zur Überwindung, besser gesagt zur Umgehung des instabilen Strukturzustandes „Politurschicht“ wurde und wird auch heute noch in Form der sogenannten Kaltpolitur gesehen. Unter Kaltpolitur versteht man die Durchführung des Politurprozesses im Sinne Newtons, also eine Oberflächenverfeinerung durch reine Abtragswirkung unter peinlicher Vermeidung allzustarker auch nur lokaler Erhitzung. Die Kaltpolitur kann an Saphirteilen durch stufenweise Bearbeitung mit immer feineren Diamantaufschlämmungen bis hinab zu ungefähr $0,25\ \mu$ Korngrösse bei sehr langsamen Tourenzahlen durchgeführt werden. Der Kaltpoliturprozess wird damit zwar sehr aufwendig, ist aber immerhin einigermassen realisierbar. SHOTTER (1936) hatte auch diese Frage zu klären versucht und dazu kaltpolierte Steine in einen Laufversuch mit Zählerunterlagern genommen. Das Ergebnis war ein eher schlechteres Verhalten der kalt gegenüber den normal polierten Steinen. Er schloss sich deshalb 1944 der Auffassung von FINCH an, die Politurschicht sei als verantwortlich für das gute Laufverhalten anzusehen.

Die Kaltpolitur stellt aber nicht die beste Methode dar, um den Einfluss der Politurschicht auf das Laufverhalten der Zählerunterlagersteine abzuklären. Kaltpolierte Saphirsteine weisen eine ähnliche Oberflächenbeschaffenheit auf wie polierter Diamant (siehe Bild 11). Sie bieten damit nicht optimale mikrogeometrische Verhältnisse. In diesem Sinne ergeben, wie DINICHERT (1954) empfiehlt, nach einer normal durchgeführten Politur thermisch behandelte Steine bezüglich ihrer Vergleichbarkeit mit normal polierten Steinen bessere Versuchsbedingungen.

5.53. Versuche mit thermisch behandelten Lagersteinen

Zunächst wurde ein Zählerlaufversuch gemäss einem Vorschlag der Firma Djévahirdjian mit thermisch behandelten Steinen durchgeführt.

Das Versuchsmaterial wurde nach dem gesamten Bearbeitungsprozess inklusive Hochglanzpolitur einer Glühung während einiger Stunden bei 1800° C im Stickstoff unterworfen.

Die praktischen Zählerlaufversuche wurden wiederum in Dreiphasenzählern der Type MG 1, Nennlast 5 A, Zählerkonstante 600 U/kWh, angesetzt; als Vergleich diente eine Normalvariante mit nicht thermisch behandelten Steinen aus dem gleichen Grundmaterial und vom gleichen Hersteller angefertigt, so dass die Vergleichbarkeit gewährleistet war. Pro Variante waren 8 Zähler eingesetzt.

ZV 26 Synthetischer Saphirstein, thermisch behandelt nach der Bearbeitung.

ZV 27 Synthetischer Saphirstein, normal hergestellt, ohne Nachbehandlung.

Alle übrigen Parameter stimmten bei beiden Varianten überein, beziehungsweise entsprachen dem Normalfall: Stahlkugel $\varnothing 1/16''$, MS-2-Öl in normaler Menge, Oberflächengüte von Stein und Kugel, optische Orientierung der Steine 90° usw. Die Versuchsbedingungen waren die folgenden:

Dauerversuchslast: alternierend 12 Std. 10 % und 12 Std. 200 % allseits.

Messlast: 5 % allseits.

Messpunkte bei 0; 1; 3 und 7 Millionen Systemumdrehungen.

Die Messergebnisse sind in Tab. 2, S. 745, zusammengestellt: Sowohl der Mittelwert als auch der Range verlaufen bei Variante ZV 26 mit den thermisch behandelten Steinen deutlich schlechter als bei der Normalvariante ZV 27. Die mikroskopische Auswertung der Lagerteile ergab keinen Unterschied zwischen den beiden Varianten; sämtliche Einheiten wiesen mittlere Abnutzungsgrade auf.

Eine Wiederholung dieses Versuchs mit allerdings etwas anderen Behandlungsbedingungen, in Anlehnung an DINICHERT (1954) 1 Stunde 1250° C in Wasserstoff (ausreichend für eine vollständige Ausheilung der Gitterfehlstellen), zeitigte ebenfalls eindeutig schlechtere Ergebnisse gegenüber der Normalvariante. Bei diesem Versuch konnte bis zu seinem Abbruch bei 8,5 Millionen Umdrehungen sogar ein beinahe ideal linearer Abfall von ca. -0,9% pro Million Umdrehungen beobachtet werden. Die schlechteren Ergebnisse der thermisch behandelten Steine sind demnach reproduzierbar.

5.54. Versuche mit angeätzten und verschieden stark polierten Steinen

Bekanntlich unterliegen strukturgestörte Gebiete viel eher Lösung und chemischen Reaktionen als angenähert ideal struierte Kristallite

der gleichen Substanz. Diese Erscheinung kann man sich im Falle des weitgehend inerten Korundes zunutze machen, um die Politurschicht durch einen schwachen Ätzangriff zu entfernen ohne das Grundmaterial anzugreifen. Die Ätzbedingungen sind die folgenden: Eintauchen der an Platindrähtchen aufgehängten Lagersteinchen während zwei Minuten in kochende konzentrierte Schwefelsäure, anschliessend Auskochen in destilliertem Wasser. Dieser Ätzangriff löst die Politurschicht und deckt das letzte feine Bearbeitungsgefüge wieder auf („Seidenglanz“ anstelle des polierten „Hochglanzes“).

Weiter sollte auch der Einfluss mehrmaligen Hochglanzpolierens festgestellt werden. Aus bekannten Gründen lässt sich die Politurschichtdicke zwar nicht direkt messen, aber von wiederholtem Hochglanzpolieren darf angenommen werden, dass es die Politurschicht verstärkt und die Oberfläche weiter glättet. — Dem Zählerversuch wurden daher noch zwei weitere Varianten beigefügt: eine erste mit bestimmt nur einmal glacierten und eine zweite mit dreimal glacierten Steinen, beide aus derselben Korundbirne stammend:

- ZV 19 Normalvariante mit normalpolierten und nicht weiter behandelten Steinen;
- ZV 29 Normalpolierte, dann aber abgeätzte Steine (Behandlung wie oben angegeben);
- ZV 30 Nur einmal glacierte Steine ohne Nachbehandlung;
- ZV 31 Dreimal glacierte Steine ohne Nachbehandlung.

Pro Variante wurden je 5 MG-1-Zähler, Nennlast 10 A, Zählerkonstante 300 U/kWh ausgerüstet und dem Versuchsbetrieb bei alternierend 12 Std. 10% und 12 Std. 200% allseitige Last übergeben. Alle übrigen Versuchsparameter waren wieder übereinstimmend: Durchmesser der Stahlkugel, Steinorientierung, Schmiermittelqualität (MS-2-Öl) und -menge, Lagertype (Einsteinlager) usw. Unter der üblichen Messlast von 5% allseits wurde bei 0; 1; 3; 7; 11,2 und 16 Millionen Systemumdrehungen der Zählerfehler gemessen und die in Tab. 3, S. 764, wiedergegebenen Werte erhalten.

Der Mittelwert der Variante ZV 29 verläuft deutlich tiefer, also ungünstiger als die Normalvariante; auch die Streuung ist grösser als normal. Die einmal glacierten Steine verhielten sich im Mittel ähnlich wie die Normalvariante bei anfänglich etwas grösserer Streuung, während die dreimal glacierten Steine mit ihrer vermutlich dickeren Politurschicht einen deutlich besseren Kurvenverlauf aufwiesen mit einer der Normalvariante vergleichbaren Streuung.

Tabelle 3. Zählerfehlermessungen an Versuchen mit abgeätzten und verschiedenen polierten Saphirlagersteinen

Var. Nr.	Variante Kurzbez.	R = Range und $\bar{\Delta f}$ in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach Dauerversuch von total Umdrehungen:									
		$1 \cdot 10^6$		$3 \cdot 10^6$		$7 \cdot 10^6$		$11,2 \cdot 10^6$		$16 \cdot 10^6$	
		$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R
ZV 19	Normalvariante	-1,17	1,66	-2,16	3,07	-3,72	4,39	-4,30	3,99	-2,60	5,70
ZV 29	abgeätzt	-1,42	3,59	-2,40	3,65	-6,04	6,50	-6,65	10,08	-4,41	10,53
ZV 30	1 \times glaciert	-1,52	3,61	-1,87	5,08	-3,12	4,64	-3,77	3,82	-2,50	3,29
ZV 31	3 \times glaciert	-1,53	2,09	-1,20	3,24	-1,47	3,52	-1,94	3,57	-1,52	2,74

Die mikroskopische Beurteilung der Lager nach Versuchsabbruch ergab folgende Beobachtungen:

- Ölzustand: Bei allen Varianten unverändert schmierfähig, jedoch bei ZV 29 teilweise Abriebprodukte enthaltend.
- Stein- und Kugelabnützung: Varianten ZV 19, ZV 30 und ZV 31 vergleichbar, bei den geätzten Steinen etwa doppelt so intensiv.

Diese Feststellungen decken sich mit den messtechnischen Ergebnissen.

5.55. Schlussfolgerungen aus den Versuchen

Aus den oben beschriebenen Versuchen mit thermisch behandelten, abgeätzten und verschiedenen stark polierten Lagersteinen geht wohl eindeutig hervor, dass mindestens bei unseren Versuchsbedingungen (hohe spezifische Lagerbelastung und kleine Umdrehungsgeschwindigkeit) ein Entfernen beziehungsweise Umgehen der Politurschicht nicht zu der zunächst zu erwartenden Verbesserung der Laufeigenschaften führt, sondern diese im Gegenteil verschlechtert. Das bedeutet offensichtlich, dass die *Politurschicht des Lagersteins* verbessert werden muss, soll das eingangs gestellte Problem erfolgversprechend angegangen werden.

6. DISKUSSION DES PROBLEMS

6.1. Versuch zu einem Modell des Abnützungsmechanismus im Zählerunterlager

Aus den bis hierher durchgeführten Versuchen und daran geknüpften Überlegungen lässt sich für den Abnützungsmechanismus im Zählerunterlager das folgende Modell entwerfen:

Wird das Lager im geschmierten Zustand bei Stillstand belastet, so wird sich schon bei den ersten Umdrehungen zwischen den Lagerpartnern die trennende Schmierschicht auf ein Epilamen reduzieren. Die Oberflächen von Stein und Kugel gleichen, stark vergrößert, einer Hügellandschaft; die Höhenunterschiede sind zwar gering (Größenordnung 100 bis 500 Å, kaum je ein μ erreichend) und bei gut polierten Lagerteilen ohne scharfe Spitzen. Trotzdem wird im Sinne statistischer Gesetze gelegentlich eine erhabene Stelle der Kugel auf eine solche des Steins treffen. Der Ölfilm wird daselbst abgerissen, die Stahloberfläche gleitet direkt über die Saphiroberfläche. Dadurch entsteht an dieser Stelle Reibungswärme, und zwar so rasch, dass sie auch von den metallischen Oberflächen nicht abfließen kann und es zu lokalen Wärmestauungen kommen wird. Zusammen mit der sich einstellenden höheren Belastung wird die lokale Scherfestigkeit der Stahlkugel örtlich überschritten, plastische Verformung stellt sich ein, und in der Folge bildet sich eine Art Metallbrücke zwischen Kugel und Stein, indem das Metall auf dem Stein eigentlich festschweisst. Die anschließende Abscherung wird wohl meistens im metallischen Teil der Brücke stattfinden, zuweilen aber auch in der Politurzone des Saphirsteins, letzteres besonders dann, wenn die Abscherung eine „schwache“ Saphirstelle trifft, zum Beispiel am Rand einer der überdeckten, zugesinterten Bearbeitungsspuren. Die getrennten Flächen sind zunächst sehr oberflächenaktiv, die metallische physikalisch-adsorptiv und chemisch-reaktiv, die mineralische dagegen wohl eher nur physikalisch-adsorptiv, beide jedoch von einer anormalen Kristallstruktur.

Abgescherte Schweissstellen können erneut zu einer Verschweissung führen, da sie durch Materialauftrag zumindest einseitig erhaben sind; es können zuweilen ganze Perlenketten von Schweisspunkten bemerkt werden. Bildet dies die eine Möglichkeit für die Entstehung der beobachteten Laufspuren, so wird eine weitere auf einzelnen Ausbrüchen aus den Politurschichten beruhen. Einzelne Partikel von Ausbrüchen oder Schweissbrücken führen zu stärkeren und zahlreicheren Ausbrüchen entlang ihrer Schleifspur, diese Ausbrüche wieder zu neuen Verschweissungen und Ausbrüchen, im Sinne einer autokatalytischen Reaktion oder gar einer Kettenreaktion. Die neuen Ausbrüche werden begünstigt durch reliefstrukturelle Änderungen der Oberfläche, welche die Verschweissung begleiten: die Politurzone wird lokal abgetragen, oder sie kann ihre Gitterfehlstellen weitgehend abbauen; kristallines Material liefert jedenfalls in der Folge stets gefährlichere Ausbruchpartikel als die Politurzone.

Der bis dahin beschriebene Abnützungsvorgang stimmt mit den messtechnischen Beobachtungen zwischen 0 und 2...5 Millionen Rotor-drehungen überein (Absinken der Fehlerkurve entsprechend einer Reibungszunahme). Würde dieses Modell auch für den weiteren Verlauf der Abnützung gelten, so wäre ein mehr oder weniger lawinenartiges Anschwellen des Abriebs und letzten Endes eine vollständige Zerstörung des Lagers zu erwarten. Dies tritt in Ausnahmefällen denn auch tatsächlich auf (Ausreisser), aber bereits auch häufiger, falls die Abriebquote im Lager künstlich erhöht oder, weniger ausgesprochen, wenn die Politurzone thermisch entspannt wird. Normalerweise muss demnach ein weiterer Effekt ein Abklingen der Abnützung, das in der Fig. 2, S. 727, erscheinende Abbiegen der Fehlerkurven in die Horizontale, ergeben; dieses wird offenbar bestimmt durch einen dem Abriebprozess entgegen gerichteten Politurvorgang, der in den Laufrillen einsetzt und dem Abrieb das Gleichgewicht halten kann, so dass sich phänomenologisch Konstanz der Reibung ergibt. Diese Politur in den Laufrillen ist analog der Verschweissung und dem Abrieb ein örtlich und zeitlich sehr beschränktes Ereignis, das jedoch mit grosser Häufigkeit stattfindet. Der Politurprozess verläuft ähnlich wie der bei der Lagersteinherstellung stattfindende: die lokalen Verschweissungen führen nicht nur zur Erzeugung von Abrieb, sondern auch zu einer Verfestigung der Oberfläche, und zwar vor allem der metallischen Kugeloberfläche, indem durch die unter Schubkräften ablaufende, plastische Verformung Oxydteile eingearbeitet und das Gitter lokal gestört wird. Die Saphiroberfläche wird zufolge plastischen Fliessens laufend eine lokale Politurerneuerung erfahren, wohl etwa als eine Art „Subkorn-Sintern“.

6.2. Verbesserung der Reibungskonstanz

Bestrebungen zur Verbesserung der Konstanz der Reibung über längere Betriebszeiten müssen nach dem Gesagten offenbar in erster Linie die *Erhaltung der Politurschicht* auf der Saphir- und Stahloberfläche anstreben. Der instabile Zustand „Politurschicht“ muss so gut wie möglich haltbar gemacht, beziehungsweise ständig erneuert werden, was durch Abtrag oder lokale thermische Ausheilung der Gitterfehlstellen beziehungsweise Rekristallisation an Politurschicht partiell verloren geht. Der am Anfang der Zählerfehlerkurve während der ersten Millionen Systemumdrehungen bestehende Abfall muss dadurch vermieden werden, dass das Einsetzen des selbsttätigen Lagerpoliturprozesses, wie er nach 3.1 und 6.1 im Einsteinlager beobachtet werden kann, der Inbetrieb-

nahme des Lagers vorgeschaltet wird. Die Politurschicht muss von Anfang an möglichst gleichmässig beschaffen sein; ihre Scherfestigkeit muss auch in der äussersten Zone gross sein, indem hier während der Verschweissungsvorgänge am ehesten plastische Deformation eintreten wird. Ein allfälliges Bestreben der Politurschicht zur Ausheilung der Gitterfehlstellen oder Rekristallisation muss möglichst lange, tunlichst ständig, unterbunden werden.

6.3. Anwendung Politurschicht-fördernder Substanzen beim Polieren und während des Lagerbetriebes der Saphirsteine

Die Forderung nach einer Stabilisierung der Politurschicht lässt zunächst den Gedanken aufkommen, durch geeignete Zusätze zum Poliermittel die Ausbildung der Politurschicht während des Poliervorganges selbst zu begünstigen. In einem Vorversuch (siehe S. 736) war ja bereits festgestellt worden, dass die Beigabe gewisser Substanzen (Rost) zum Schmiermittel nicht zu einer Erhöhung der Reibung, sondern im Gegenteil zu ihrer Verminderung führt.

Solche Zusätze können der Politurschicht in verschiedener Weise dargeboten werden: einmal in bestimmter Konzentration dem Schmiermittel, wobei dies in Form von Suspendieren, Ausfällen oder Lösen im MS-2-Öl geschehen kann. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Beigabe beim Polieren, sei es zum Poliermittel, sei es durch Ersetzen der üblichen Diamantaufschlammung durch eine Aufschlammung aus der gewünschten Substanz während eines Teils des Politurprozesses.

Ein Zusatz zum Grundmaterial kann sinngemäss nicht in Frage kommen, sollen doch die Substanzen in der Politurschicht eine amorphe oder zumindest kryptokristalline Struktur herbeiführen; dem Grundmaterial beigegeben, würden sie dessen Kristallisation behindern oder gar verunmöglichen. Umgekehrt wird man mit Vorteil möglichst wirksame Substanzen unter denjenigen Stoffen suchen, die bei der Korundsynthese sorgfältig vermieden werden müssen (Si, Ca, Ba, B usw.), um eine fehlerfreie Kristallisation zu erreichen.

Man könnte allenfalls auch an eine Verwendung von Glassteinen denken; entsprechende Versuche von SHOTTER (1953) haben jedoch negative Ergebnisse gezeitigt (extrem starke Zunahme der Reibung bereits nach kurzer Betriebszeit). Offenbar reicht die Druckfestigkeit von Glas nicht aus. Die oben vorgeschlagenen, vergütet polierten Lagersteine sollen die Vorzüge der Politurschicht eines reibungskonstanten Verhaltens mit den vorzüglichen Festigkeitseigenschaften des kristallinen Grundmaterials verbinden.

7. VERSUCHE ZU EINER VERGÜTUNG DER POLITURSCHICHT

7.1. Wahl der Substanz-Verbindung

Die Wahl der zur Vergütung verwendeten Verbindungen hat sich danach zu richten, in welcher Weise die Substanzen Anwendung finden sollen:

— Sollen sie *zum Polieren* verwendet, also dem Poliermittel beigegeben werden, so müssen sie gegenüber dem Schmelzpunkt des Korunds (2050°C) einen deutlich tieferen Schmelzpunkt und einen möglichst hohen Siedepunkt aufweisen, ausserdem möglichst inert sein, um keine Ätzerscheinungen hervorzurufen. Die Härte der Verbindung darf beträchtlich sein (zusätzliche Polierwirkung). Diesen Forderungen können nur Oxyde genügen.

— Soll die Substanz dagegen wirken, *während das Lager in Betrieb ist*, also als Zusatz zum Schmiermittel dienen, dann muss sie andern Anforderungen genügen: sie darf keinerlei korrodierende Wirkung auf die sehr empfindliche Oberfläche der Stahlkugel ausüben; damit scheiden die meisten anorganischen Verbindungen wie Halogenide, Nitrate, Sulfate, Phosphate usw. aus. Von diesem Standpunkt aus verbleiben auf der anorganischen Seite ebenfalls nurmehr Oxyde. Diese haben aber den Nachteil hoher Kohäsion, damit aber der Reaktionsträgheit und mechanischer Störung des Lagerbetriebs. Besser geeignet sind weiche organische Verbindungen mit tiefem Schmelzpunkt, die im Schmieröl emulgiert, aufgeschlämmt oder gar gelöst werden können: Stearate, Naphthenate, Oleate usw. Diese Stoffe dürften die Schmiereigenschaften des Öles oft noch verbessern und zerfallen überdies relativ rasch, sobald sie in den Bereich einer Mikroschweisstelle geraten.

In Tab. 4, S. 770/771, ist eine Zusammenstellung wichtiger Eigenschaftswerte gegeben, welche bei der Politurvergütung eine massgebende Rolle spielen können.

7.2. Einbringen der Reaktionssubstanzen

7.21. Zugabe während des eigentlichen Poliervorganges

Hierfür bestehen drei Möglichkeiten:

Polierart 1: Beimengen der Substanzen zum Poliermittel, zum Beispiel im Volumenverhältnis Zusatzsubstanz zu Diamant wie 1 : 1. Dies hat

den Vorteil, den eigentlichen Poliervorgang so wenig wie möglich zu ändern und der Gegenwart der Substanz während der ganzen Politur.

Polierart 2: Der Saphirstein wird zuerst mit der normalen Diamantaufschlammung vorpoliert, dann aber das Polieren vor Beginn des glaçage unterbrochen; der Stein wird gereinigt und der Hochglanzpoliturprozess mit frischem Polierholz und einer Aufschlammung von reiner Reaktionssubstanz (ohne Diamant) durchgeführt. Diese Art hat gegenüber der ersten den Vorteil, dass während des für die Ausbildung der äussersten Politurzone wichtigsten Endprozesses ausschliesslich mit der Reaktionssubstanz gearbeitet wird.

Polierart 3: Der gesamte Poliervorgang wird ohne Diamant, also ausschliesslich mit Reaktionssubstanz durchgeführt. Dieses Verfahren bietet gegenüber dem zweiten keine wesentlichen Vorteile, hat dafür aber allgemein gewichtige Nachteile: die Oberflächengüte erreicht auch nicht annähernd den Grad der beiden andern Verfahren oder gar des normal hergestellten Steins, sondern es ist in den meisten Fällen kaum mehr ein Poliereffekt feststellbar; dies führt zu sehr unregelmässigem Laufverhalten (Ausbrüche, Aufrauhung usw.), also gerade zum Gegenteil des Angestrebten. — All das ist jedoch durchaus verständlich, erreichen doch die wenigsten Oxyde nur annähernd die Härte des Korunds und können demzufolge die Einleitung des Poliervorganges, den durch schneidenden Abtrag immer feiner werdenden Abschliff, überhaupt nicht übernehmen.

Auch die nach den Polierarten 1 und 2 hergestellten Lagersteine weisen nicht immer die sonst erreichte Oberflächengüte auf; das Vorbearbeitungsgefüge schimmert bei 200facher Vergrösserung unter dem Lichtmikroskop betrachtet teilweise noch schwach durch. Während dies bei gewöhnlichen Steinen eindeutig eine Verschlechterung gegenüber dem hochglanzpolierten Zustand darstellt, ist bei den vergütet polierten Steinen bis zu mittlerer Kratzerstärke kein solcher Einfluss festzustellen. Das Vergütungspolieren verbessert demnach nicht nur die Konstanz der Reibung bei hoher Lagerbelastung, wie im Nachstehenden noch gezeigt wird, sondern es vermindert zugleich die Empfindlichkeit des Lagers hinsichtlich seiner Oberflächenfehler.

7.22. *Beigabe während des Lagerbetriebes*

Lagersteine, welche vergütet poliert wurden, ergeben zwar während einer gewissen Zeit befriedigende Konstanz der Reibung (siehe Fig. 7, S. 743), lassen jedoch in der Folge häufig eine gewisse Erschöpfung der

Tabelle 4. *Eigenschaften einiger gegenüber Korund politurvergütend wirksamer Substanzen*

Reaktions- substanz	Atomnr. Kation	Wertig- keit Kation	Ionenradius in Å des Kations*)	Ionen- radien- Verhältnis zu Al ⁺⁺⁺	Schmelz- punkt in °C*)	Verdamp- fungspunkt in °C*)	Schmelzpunkts- erniedrigung im System mit Al ₂ O ₃ **)	Beobachtete Politurver- gütungs- wirkung
Al ₂ O ₃	13	3+	0,51	1,00	2050	3500	—	—
BeO	04	2+	0,35	0,69	2530	ca. 3900	+	+
B ₂ O ₃	05	3+	0,23	0,45	ca. 450	1500		+
MgO	12	2+	0,66	1,30	2800		—	—
SiO ₂	14	4+	0,42	0,82	1710	2230	—	—
P ₂ O ₅	15	5+	0,35	0,69	563	subl. 347		—
CaO	20	2+	0,99	1,94	2580	2850	+	+
TiO ₂	22	4+	0,68	1,34			—	—
V ₂ O ₅	23	5+	0,59	1,16	690	(1750)		—
Cr ₂ O ₃	24	3+	0,63	1,24	1990		—	—
Co ₂ O ₃	27	3+	0,63	1,24	(895)	(895)		+
NiO	28	2+	0,69	1,35	1990		—	+
ZnO	30	2+	0,74	1,45	> 1800	subl. 1800	—	+
GeO ₂	32	4+	0,53	1,04	1115			+
SeO ₂	34	4+	0,50	0,98	350	subl. 315		—

ZrO ₂	40	4 +	0,79	1,55	2700	~ 4300	-	+
MoO ₃	42	6 +	0,62	1,22	795	subl.		+
CdO	48	2 +	0,97	1,90	(900)	(900)		+
SnO ₂	50	4 +	0,71	1,39	(1127)			+
TeO ₂	52	4 +	0,70	1,37		subl. 450		- / +
BaO	56	2 +	1,34	2,63	1923	ca. 2000	+	+
CeO ₂	58	4 +	0,94	1,85	2600		-	+
WO ₃	74	6 +	0,62	1,22	1473			+
PbO	82	2 +	1,20	2,35	888		++	+
Tristearylborat	05	3 +	0,23	0,45				+
Borsäure	05	3 +	0,23	0,45	185	(300)		+
Zinkstearat	30	2 +	0,74	1,45	130			++ / -
Bariumstearat	56	2 +	1,34	2,63				+
Ba-Naphthenat	56	2 +	1,34	2,63				+

*) Nach Handbook of chemistry and physics 44 (1962/63).

**) Nach Landolt/Börnstein, Band II, Teil 3 (1956).

Spalten 6 und 7: () bedeutet Zersetzung.

Spalten 8 und 9: -- = keine merkliche Beeinflussung; + = Beeinflussung feststellbar; ++ = Beeinflussung sehr deutlich.

Vergütungswirkung durch Abtrag erkennen. Eine Beigabe der Reaktionssubstanzen zum Schmiermittel gestaltet sich über längere Zeit wirkungsvoller. Auch hier lassen sich drei verschiedene Verfahren anwenden, die hier allerdings von der Natur der Substanz abhängen:

Aufschlammung: Oxydische Zusätze wurden durch Zerreiben in der Achatschale zerkleinert, zuerst trocken und dann unter Schmieröl MS 2. Die dabei durchschnittlich erreichte Korngrösse betrug $1\ \mu$ und weniger. Auch Borsäure musste aufgeschlämmt werden, wobei allerdings seine Schichtstruktur an sich schon schmiervverbessernd wirkt.

Suspension durch Ausfällung: Bedeutend besser als diese reine Aufschlammung oxydischer Reaktionssubstanzen wirken Suspensionen frisch ausgefällter organischer Verbindungen. So wurden zum Beispiel Versuche mit Metallstearaten durchgeführt, deren Kation eine Politurvergütung des Saphirs erwarten lässt. Hierbei wurde das Stearatpulver im normalen Schmieröl MS 2 bis über seinen Schmelzpunkt erwärmt und gelöst; beim Abkühlen ergab sich dann eine feinstkörnige Suspension, die bei höheren Konzentrationen das Öl bis zu fettartiger Konsistenz verdickte.

Lösung: Noch besser verhält sich natürlich eine Lösung solcher Substanzen im Öl. Leider sind sie als lösliche Verbindungen im Handel meist nicht erhältlich. Einzig Bariumnaphthenat, eine konsistenzmässig teerähnliche Substanz, erwies sich als sehr gut öllösliche Reaktions-substanz. Öllösliche Verbindungen haben den Vorteil, den Lagerbetrieb in keiner Weise mechanisch zu beeinträchtigen, wie das zum Beispiel bei den oxydischen Zusätzen immer wieder festgestellt werden musste. Ausserdem kann durch Variation der Viskosität des Trägeröles auch für einen ganz bestimmten Gehalt an Zusatzsubstanz die richtige Viskosität des Schmiermittels eingestellt werden.

7.3. Zählerlaufversuche

7.31. Beschreibung der Versuchseinrichtung

Bindende Aussagen über die Wirksamkeit der Politurvergütung an Unterlagersteinen konnten nur Zählerversuche selber geben, bei welchen Systemgewicht und Tourenzahl praxisentsprechend eingehalten wurden. Überdies war ein — allerdings sehr stark vereinfachtes — Lastwechselschema angezeigt, meist 8...12 Std. 10% der Nennlast als Kleinlastpunkt, während der übrigen Zeit Verharren unter Grenzlast, im Falle des MG 1 auf 200% der Nennlast.

Um die individuellen Begleitumstände des Versuchs (Spannungsschwankungen, Stromunterbrüche im Netz usw.) bei vergleichender Auswertung berücksichtigen zu können, erhielt jede Versuchseinheit entsprechende Normalvarianten in Einstein- und eventuell auch in Doppelsteinlager-Ausführung; die eigentlichen Versuchsvarianten wurden jedoch ausnahmslos in Einsteinlager-Ausführung ausgerüstet.

Als Kriterium für die Reibung gilt der Zählerfehler (Definition siehe 3.1); seine Messung erfolgte jeweils bei 5% der allseitigen Nennlast als der kleinsten, noch verlässlich erfassbaren Umdrehungsgeschwindigkeit (optimales Verhältnis zwischen grösstmöglicher Empfindlichkeit und sicherer Reproduzierbarkeit der Messungen). Um den Einfluss der Strom- und Spannungsschwankungen auf die Messungen zu eliminieren, wurde die zu messende Versuchseinheit in Serie mit einem Eichzähler der Type Landis & Gyr CFMF3E1 (spannungsseitig an die gleiche Phase und stromseitig in Serie mit den Stromspulen der Versuchszähler) geschaltet; die Steuerung des Eichzählers erfolgte durch Photozellenabtastung. Als Messwertablesung galt die Anzeige des Eichzählers für eine dreimalige Systemumdrehung des Prüflings. Pro Messpunkt wurde jeder Zähler dreimal auf diese Weise gemessen, so dass letzten Endes jeder Messpunkt eines einzelnen Versuchszählers als Mittel aus neun Systemumdrehungen aufgefasst werden kann; damit wurden sehr kurzzeitige, vorübergehende Störungen im Laufzustand nicht zu stark überbewertet.

Die Reproduzierbarkeit einer Messung lag im allgemeinen innerhalb $\pm 0,5\%$ relativ; bei bedeutendem Abrieb oder zu grobkörnigen Schmiermittelzusätzen trat aber auch stärkere Inkonstanz auf und erhöhte dann die Reproduzierbarkeit bis auf maximal $\pm 5\%$ relativ.

7.32. Programm und Vorbereitungen

Das Versuchsprogramm umfasste eine grössere Anzahl interessierender Zusatzsubstanzen, die entsprechend der jeweiligen Vergütungsmethode einer der drei in Tab. 5, S. 774—775, aufgeführten Gruppen zugeordnet wurden. Es war nicht möglich, alle sich ergebenden Kombinationen zu berücksichtigen, da dies einen untragbaren Aufwand bedeutet hätte.

Für die Kugel wurde neben dem üblicherweise verwendeten, nicht rostsicheren Kugellagerstahl bei gewissen Varianten auch Rubin eingesetzt, um vergleichsweise auch als Kugel ein der Lagerpfanne analog vergütbares Material zu untersuchen.

Die Herstellung sämtlicher poliervergüteter Pfannenlagersteine nach

Programm Tab. 5, S. 774—775, übernahm in verdankenswerter Weise die Firma Swiss Jewel in Locarno.

Die Konzentrationen 1 : 10 für die Varianten mit Stahlkugel und 1 : 3,25 für diejenigen mit Rubinkugel sind in Vorversuchen als optimale ermittelt worden; die Rubinkugel verlangt entsprechend der bedeutend schlechteren Beschaffenheit ihrer Oberfläche gleichsam einen höheren Gehalt an Substanz zur Erzielung wirksamer Vergütung.

Die Lagerteile wurden sorgfältig gereinigt — mit einem Lösungsmittel unter Druckluft abgespritzt, anschliessend in frisch kondensiertem, heissem Cyclohexan extrahiert — und nach einer letzten mikroskopisch-visuellen Kontrolle in üblicher Weise zusammengebaut. Leider erwies sich dabei ein grosser Teil der Rubinkugeln von sehr schlechter Oberflächengüte (Löcher, Kratzer und Scharten; die Kugeln lassen sich nämlich wegen ihrer Gestalt nur mit einem verschwindend kleinen Bruchteil der Bearbeitungsintensität polieren, mit der die Steinkalotten behandelt

Tabelle 5. *Programm für die Zählerlaufversuche mit vergüteten Saphirlagersteinen*

1. Gruppe: Vergütete Saphirlagersteine mit normaler Schmierung			
Zusatzsubstanz	Polierart	Mit Stahlkugel	Mit Rubinkugel
BeO	1	ZV 34	—
	2	ZV 35	—
B ₂ O ₃	1	ZV 36	—
	2	ZV 37	—
MgO	1	ZV 38	—
	2	ZV 39	—
CaO	2	ZV 40	ZV 41
Cr ₂ O ₃	2	—	ZV 42
Co ₂ O ₃	2	—	ZV 43
NiO	2	ZV 44	ZV 45
GeO ₂	2	ZV 46	ZV 47
ZrO ₂	1	ZV 48	—
	2	ZV 49	—
MoO ₃	2	—	ZV 50
SnO ₂	1	ZV 51	—
	2	ZV 52	ZV 53
TeO ₂	2	ZV 54	ZV 55
CeO ₂	2	ZV 56	ZV 57
WO ₃	2	ZV 58	ZV 59

2. Gruppe: Normal hergestellte Saphirlagersteine und MS 2-Öl mit politurvergütenden Schmierzusätzen			
Reaktionssubstanz	Gewichtsverhältn. Reaktionssubstanz zu Schmieröl	Mit Stahlkugel	Mit Rubinkugel
Borsäure	1 : 2,75	—	ZV 66
	1 : 4	ZV 67	ZV 68
	1 : 25	ZV 69	—
Tristearylborat	1 : 2	ZV 70	ZV 71
	1 : 10	ZV 72	ZV 73
Zinkstearat	1 : 3,25	—	ZV 74
	1 : 10	ZV 75	—
Bariumstearat	1 : 3,25	—	ZV 76
	1 : 10	ZV 77	—
Bariumnaphthenat	38 %	ZV 78	ZV 79

3. Gruppe: Vergütete Saphirlagersteine und MS 2-Öl mit entsprechenden politurvergütenden Schmierzusätzen (Kombinationen)			
Reaktionssubstanz	Polierart	Gewichtsverhältnis Zusatzsubstanz zu Schmieröl	
		1 : 10 mit Stahlkugel	1 : 3,25 mit Rubinkugel
B ₂ O ₃ /Borsäure	2	—	ZV 84
CaO	2	ZV 85	—
Cr ₂ O ₃	2	—	ZV 86
Co ₂ O ₃	2	ZV 87	ZV 88
NiO	2	ZV 89	ZV 90
ZnO	2	ZV 91	ZV 92
GeO ₂	2	ZV 93	ZV 94
MoO ₃	2	—	ZV 95
CdO	2	ZV 96	ZV 97
SnO ₂	2	—	ZV 98
TeO ₂	2	ZV 99	ZV 100
BaO/Bariumstearat	1	ZV 101	—
	2	ZV 102	—
CeO ₂	2	ZV 103	ZV 104
PbO	2	ZV 105	ZV 106

Tabelle 6. Dauerversuchsbedingungen für die Zählerlaufversuche mit vergüteten Saphirlagersteinen

Ein- heit	Zählerdaten		Lastprogramm allseits	Anzahl Zähler pro Var.	Messpunkte nach Erreichen folgender Anzahl System- Umdrehungen ($\times 10^6$)	Varianten	Resultate siehe Tabelle
	Nenn- strom in A	Konst. U/kWh					
I	5	600	12 Std. 10%	4	0; 1; 2; 4; 6; 8; 15	ZV 32 (Stahlkugel-Einstein- Normalvariante)	7
			12 Std. 200%			ZV 34...39, ZV 48, ZV 49	
II	5	600	12 Std. 10%	4	0; 1; 2; 4; 8; 11,8	ZV 60 (Stahlkugel-Einstein- Normalvariante)	8
			12 Std. 200%			ZV 61 (Stahlkugel-Doppelstein- Normalvariante) ZV 70...73	
III	5	600	12 Std. 10%	4	0; 1,0; 2,3; 4,0; 7,9; 13,1	ZV 33 (Rubinkugel-Einstein- Normalvariante)	9
			12 Std. 200%			ZV 62 (Stahlkugel-Einstein- Normalvariante) ZV 63 (Stahlkugel-Doppelstein- Normalvariante) ZV 66 und ZV 68	

IV	10	300	12 Std. 10% 12 Std. 200%	5	0; 1,0; 2,3; 4,0; 8,5	ZV 64 (Stahlkugel-Einstein-Normalvariante) ZV 65 (Stahlkugel-Doppelstein-Normalvariante) ZV 67 und ZV 69	10
V	5	600	8 Std. 10% 16 Std. 200%	3	0; 1,2; 2,0; 4,2; 8,5	ZV 80 (Stahlkugel-Einstein-Normalvariante) ZV 81 (Stahlkugel-Doppelstein-Normalvariante) ZV 42, ZV 50...53, ZV 74...79, ZV 84, ZV 86, ZV 93...95, ZV 98, ZV 101 und ZV 102	11
VI	5	600	8 Std. 10% 16 Std. 200%	3	0; 1,1; 2,2; 4,8; 8,5	ZV 82 (Stahlkugel-Einstein-Normalvariante) ZV 83 (Stahlkugel-Doppelstein-Normalvariante) ZV 40, ZV 41, ZV 43...45, ZV 54...59, ZV 85, ZV 87...92, ZV 96, ZV 97, ZV 99, ZV 100, ZV 103...106	12

Sämtliche Versuchseinheiten wurden als Einstein-Lagertype getestet.

Für alle Einheiten gemeinsame Versuchsdaten: Zählertype: Dreiphasenzähler MG 1 380/220 V 50 Hz.

Systemgewicht: 72 g.

Umdrehungsgeschwindigkeit: bei 10 % ca. 0,02, bei 200 % ca. 0,4 U/s.

Kugeldurchmesser: 1/16".

Schmiermittelmenge: normal (d. h. fabrikationsentsprechend).

Messlast: 5 % allseits.

werden, indem sie nach dem gleichen Prinzip — Rollieren — feinbearbeitet werden wie die Stahlkugeln). Die Mischungen des Schmiermittels mit den verschiedenen Zusätzen wurden wie in 7.21 und 7.22 beschrieben hergestellt.

7.33. Durchführung und Resultate

Da auf die Grösse der Zählerversuchseinheiten Rücksicht genommen werden musste, konnten die drei Gruppen nicht gesamthaft untersucht werden, sondern mussten auf sechs Einheiten verteilt werden. Jede Einheit wurde mit Einstein- und Doppelstein-Normalvarianten als Vergleichsbasis ergänzt.

Die Versuchsbedingungen der einzelnen Einheiten sind in Tabelle 6 S. 776/777, zusammengestellt; die Resultate (Mittelwert und Range der Zählerfehlerdifferenz gegenüber Versuchsbeginn für jeden Messpunkt) enthalten die Tabellen 7 bis 12, S. 779—783. Die geringen Unterschiede in den Versuchsbedingungen (Messpunkte, Nennstrom und Dauer-versuchsprogramm) waren technisch bedingt und dürften die Vergleichbarkeit der Resultate nicht beeinträchtigen.

Bei nahezu allen Varianten besteht ein mehr oder weniger deutlicher Vergütungseffekt, erkennbar an einer gegenüber der Normalvariante ausgeglicheneren Fehlerkurve. Die Vergütung wirkt aber nicht immer langfristig; diese Erscheinung ist vor allem bei nur poliertvergüteten Lagersteinen zu beobachten, zum Beispiel bei Variante ZV 35, Fig. 7, S. 743. Die Kurven halten sich zwar im Mittel sehr gut konstant bis zu 6 Millionen Umdrehungen, danach fallen sie jedoch allmählich auf das Niveau der Einstein-Normalvariante ab.

Eine ausgezeichnet stabilisierende Wirkung auf das Verhalten der Reibung üben Bariumverbindungen aus. Dieser Effekt kann besonders dann voll genutzt werden, wenn die mechanisch störenden Einflüsse der Zusatzsubstanz auf ein Minimum beschränkt oder ganz ausgeschaltet werden, wie dies bei organischen Verbindungen der Fall ist. So zeigen zum Beispiel die Varianten mit Bariumstearat und Bariumnaphthenat ZV 76...79 in der Ausführung als Einsteinlager sogar äquivalentes Reibungsverhalten zum normalen Doppelsteinlager (vgl. Fig. 12, S. 784, mit Fig. 4, S. 728).

Bei vielen Oxydzusätzen zum Schmiermittel ist dagegen der mechanische Störeinfluss trotz der Kornfeinheit als Inkonzanz spürbar; im Mittel verlaufen die Kurven zwar besser als die Einstein-Normalvariante,

Tabelle 7. *Resultate der Einheit I* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und Δf in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von														
	1 · 10 ⁶		2 · 10 ⁶		4 · 10 ⁶		6 · 10 ⁶		8 · 10 ⁶		15 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten		
	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	a	γ	
	ZV														
32	-1,28	2,24	-1,51	1,87	-2,02	3,25	-2,89	2,34	-2,30	1,29	-3,98	2,22	2,33	2,20	4,53
34	-1,09	0,85	-1,71	1,88	-1,08	1,40	-0,89	4,56	-2,29	2,65	-3,21	4,66	1,71	2,67	4,38
35	+0,07	1,92	-0,90	1,18	-1,27	1,22	-1,45	2,98	-2,69	2,16	-4,47	4,37	1,81	2,30	4,11
36	-0,83	1,30	-1,84	1,49	-1,20	1,70	-1,52	2,21	-1,96	4,13	-2,93	2,72	1,71	2,26	3,97
37	+0,20	1,11	-0,74	1,65	-0,76	1,14	-0,99	0,63	-1,25	1,52	-1,51	3,60	0,91	1,61	2,52
38	-1,55	3,11	-2,21	3,70	-1,74	4,57	-1,36	3,77	-1,42	3,08	-4,36	5,83	2,11	4,18	6,29
39	-0,89	0,80	-0,83	0,76	-1,47	3,13	-2,41	4,36	-2,80	6,60	-2,72	6,10	1,85	3,85	5,70
48	-0,45	1,70	-1,08	1,32	-0,81	0,55	-0,48	1,45	-1,22	5,08	-2,50	5,07	1,09	2,53	3,62
49	+0,24	3,64	+0,16	1,45	-0,92	4,09	-1,02	3,64	-1,06	4,47	-4,50	2,65	1,32	3,48	4,80

Tabelle 8. *Resultate der Einheit II* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und Δf in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von													
	1 · 10 ⁶		2 · 10 ⁶		4 · 10 ⁶		8 · 10 ⁶		11,8 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten			
	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	α	γ	$a + \gamma$	
	ZV													
60	-2,16	0,68	-3,53	2,58	-4,81	4,05	-4,87	5,90	-5,48	5,17	4,17	3,68	7,85	
61	-0,09	0,30	-0,05	0,89	+0,23	1,00	+0,40	0,88	-0,77	3,08	0,31	1,23	1,54	
70	+0,22	0,27	+0,98	4,35	+1,38	4,62	-0,59	3,11	-4,72	9,13	1,58	4,30	5,88	
71	-0,06	1,01	+0,17	0,86	+0,38	0,80	-0,54	2,09	-2,17	2,65	0,66	1,55	2,21	
72	-0,03	0,63	-0,77	1,72	-1,06	1,43	-2,34	3,34	-3,48	6,06	1,54	2,64	4,18	
73	-0,59	3,06	-0,31	1,53	-0,81	1,68	-0,42	2,26	-1,77	5,46	0,78	2,80	3,58	

Tabelle 9. *Resultate der Einheit III* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und $\bar{\Delta f}$ in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von												
	1,0 · 10 ⁶		2,3 · 10 ⁶		4,0 · 10 ⁶		7,9 · 10 ⁶		13,1 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten		
	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	α	γ $\alpha + \gamma$	
33	+ 1,59	2,07	+ 1,24	0,83	+ 0,66	1,12	- 0,47	3,45	+ 0,37	2,53	0,87	2,00	2,87
62	- 0,80	2,61	- 1,28	1,24	- 1,62	2,99	- 1,98	4,84	- 6,20	5,61	2,52	3,46	5,98
63	+ 0,38	0,82	+ 0,06	0,58	- 0,07	0,73	+ 0,27	0,65	+ 0,93	1,15	0,34	0,79	1,13
66	+ 0,78	1,19	+ 0,52	0,61	+ 0,57	2,50	+ 0,62	1,51	+ 0,74	1,61	0,65	1,48	2,13
68	+ 2,87	13,17	+ 1,52	6,98	+ 1,53	7,52	- 0,05	6,11	- 1,04	9,39	1,40	8,63	10,03

Tabelle 10. *Resultate der Einheit IV* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und $\bar{\Delta f}$ in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von											
	1,0 · 10 ⁶		2,3 · 10 ⁶		4,0 · 10 ⁶		8,5 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten			
	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	$\bar{\Delta f}$	R	α	γ $\alpha + \gamma$		
64	-0,74	1,50	-2,26	3,22	-4,72	3,08	-4,14	3,30	2,79	2,83	5,62	
65	+0,04	0,36	+0,57	0,52	+0,04	0,26	+0,23	0,42	0,22	0,38	0,60	
67	-1,08	2,55	-0,08	1,27	-0,41	1,58	-0,47	2,63	0,51	2,01	2,52	
69	-1,21	1,39	-1,31	1,29	-1,71	0,81	-1,51	2,84	1,43	1,58	3,01	

Tabelle 11. *Resultate der Einheit V* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und Δf in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von											
	1,2 · 10 ⁶		2,0 · 10 ⁶		4,2 · 10 ⁶		8,5 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten			
	Δf	R	Δf	R	Δf	R	Δf	R	α	γ	$\alpha + \gamma$	
ZV												
80	-3,34	2,24	-3,88	0,67	-3,56	1,22	-2,76	2,64	3,38	1,69	5,07	
81	-0,05	0,43	-0,12	0,02	+0,26	1,88	-0,58	0,78	0,28	0,80	1,08	
42	+0,09	0,36	-0,49	1,74	-1,26	2,90	-2,96	3,74	1,20	2,18	3,38	
50	+0,01	0,76	-1,06	1,60	-3,72	2,29	-2,23	1,97	1,75	1,07	2,82	
51	-0,53	0,50	-0,15	1,36	-1,58	0,70	-1,92	1,85	1,04	1,10	2,14	
52	-0,01	1,13	-1,18	1,56	-3,37	1,93	-2,10	0,74	1,67	1,34	3,01	
53	-0,07	0,36	-0,28	0,42	-3,51	5,55	-0,67	2,63	1,13	2,24	3,37	
74	+1,48	1,66	+1,06	0,68	+1,38	0,35	+1,29	1,55	1,30	1,06	2,36	
75	-0,29	0,69	-0,22	0,29	-1,34	1,87	-1,46	2,38	0,83	1,31	2,14	
76	+1,43	0,62	+1,24	1,24	+0,30	1,25	-0,95	0,41	0,98	1,13	2,11	
77	+0,11	0,12	+0,28	0,24	$\pm 0,00$	0,36	-0,84	0,35	0,31	0,32	0,63	
78	-0,23	0,95	+0,33	0,46	-0,04	0,64	-0,88	1,23	0,37	0,82	1,19	
79	+0,27	1,13	+0,29	0,81	+0,41	0,60	-0,31	0,29	0,32	0,72	1,04	
84	-1,83	3,94	-0,54	2,07	-0,53	1,98	-0,12	1,09	0,75	2,27	3,02	
86	-3,79	9,06	-1,42	4,97	-0,14	4,24	-0,89	2,73	1,56	5,25	6,81	
93	-0,57	0,04	-0,78	2,23	+0,03	3,48	+0,71	4,48	0,50	2,56	3,06	
94	-3,54	2,16	-1,46	4,78	-2,33	2,01	-0,28	2,52	1,90	2,87	4,77	
95	-1,05	6,17	-8,63	6,36	-4,44	1,46	-4,80	5,81	4,73	4,95	9,68	
98	+0,07	2,74	+0,01	1,75	-0,31	1,43	-1,26	0,81	0,41	1,68	2,09	
101	+0,22	0,82	+0,42	0,42	+0,14	0,55	-0,50	0,77	0,32	0,64	0,96	
102	+0,40	1,06	+1,12	0,70	-0,77	3,27	-0,98	1,73	0,82	1,69	2,51	

Tabelle 12. *Resultate der Einheit VI* (Lagerkomponenten siehe Tab. 5 und 6, Versuchsbedingungen siehe Tab. 6)

Var.	R (Range) und $\overline{\Delta f}$ in %: durchschnittliche Fehleränderung gegenüber Versuchsbeginn nach totaler Anzahl Umdrehungen von										
	1,1 · 10 ⁶		2,2 · 10 ⁶		4,8 · 10 ⁶		8,5 · 10 ⁶		Gütekoeffizienten		
	$\overline{\Delta f}$	R	$\overline{\Delta f}$	R	$\overline{\Delta f}$	R	$\overline{\Delta f}$	R	α	γ	$\alpha + \gamma$
ZV											
82	-1,77	3,03	-3,41	2,65	-4,43	4,00	-2,81	2,81	3,11	2,87	5,98
83	+0,06	0,23	-0,23	0,09	+0,04	0,09	+0,41	0,43	0,18	0,21	0,39
40	+0,66	4,32	-2,35	5,35	+0,40	3,44	-0,68	0,48	1,02	3,40	4,42
41	+0,59	0,74	+0,48	1,00	-0,45	2,02	-0,69	3,24	0,55	1,75	2,30
43	+1,33	1,52	+1,05	1,88	+0,35	1,37	-0,13	1,06	0,71	1,46	2,17
44	-1,02	3,21	-4,42	1,21	-3,41	0,47	-0,57	2,39	2,35	1,82	4,17
45	+0,92	0,26	-0,05	0,78	-1,00	0,15	-0,43	1,68	0,60	1,05	1,65
54	-2,14	4,94	-3,53	6,43	-3,88	3,35	-1,40	4,02	3,24	4,68	7,92
55	+0,06	2,01	-0,24	2,70	-1,06	4,19	-0,33	2,53	0,42	2,35	2,77
56	-0,93	2,91	-2,95	3,53	-3,55	2,82	-2,67	1,85	2,52	2,78	5,30
57	+1,00	0,86	+0,67	1,48	+0,22	0,59	+0,77	2,35	0,67	1,07	1,74
58	-0,61	2,73	-3,32	6,04	-1,10	1,97	-1,17	0,66	1,55	2,85	4,40
59	+0,30	0,18	-0,01	0,93	-0,24	1,89	-0,34	3,32	0,22	1,59	1,81

85	-0,03	1,20	-0,28	0,91	+0,43	1,13	+1,44	1,93	0,54	1,19	1,73
87	+0,27	1,84	+0,19	1,28	+0,60	1,73	-1,37	2,62	0,61	1,87	2,48
88	+1,82	3,93	+2,21	2,88	+1,87	2,78	+1,58	0,85	1,87	2,86	4,73
89	+0,10	5,81	-0,76	7,29	-0,26	3,73	+1,63	5,10	0,69	5,48	6,17
90	+3,97	2,82	+5,01	2,05	+5,30	3,16	+5,33	6,94	4,90	3,74	8,64
91	-0,24	3,11	-0,76	0,91	-1,93	0,78	-2,56	5,37	1,39	2,96	4,35
92	+0,71	2,15	+0,29	2,33	-1,38	0,73	-1,81	2,75	1,05	1,99	3,04
96	-0,71	1,24	+0,35	0,59	+0,28	1,50	+0,86	2,08	0,55	1,33	1,88
97	+0,13	2,51	+0,33	1,35	+0,17	1,11	+1,20	2,30	0,46	1,82	2,28
99	+0,33	1,12	-0,95	9,02	-3,49	3,48	-6,84	5,28	2,90	4,94	7,84
100	+0,56	1,99	-0,25	5,63	-1,87	4,18	+1,09	3,78	0,94	3,92	4,86
103	-0,08	3,63	+2,30	0,89	+2,40	0,85	+3,43	0,47	2,05	1,46	3,51
104	+0,77	0,02	+0,68	1,11	+1,17	2,06	+1,78	4,99	1,10	1,61	2,71
105	+0,36	1,09	+0,96	1,55	-0,43	1,72	-0,12	4,27	0,47	2,09	2,56
106	-0,23	0,66	+0,40	2,54	-0,97	5,79	-1,09	3,65	0,67	3,29	3,96

aber sowohl die Inkonstanz des Mittelwertes als auch die Streuung sind deutlich grösser. In krassen Fällen kann sich dieser Effekt auf den Anfangsmesswert (auf den ja alle andern bezogen werden) derart auswirken, dass alle Kurven mehr oder weniger stark ansteigen zufolge der Abnahme der Reibung, beruhend auf einer Überlagerung der Vergütungswirkung mit einer Zerkleinerung der Beigabesubstanzen (siehe Fig. 13, S. 784).

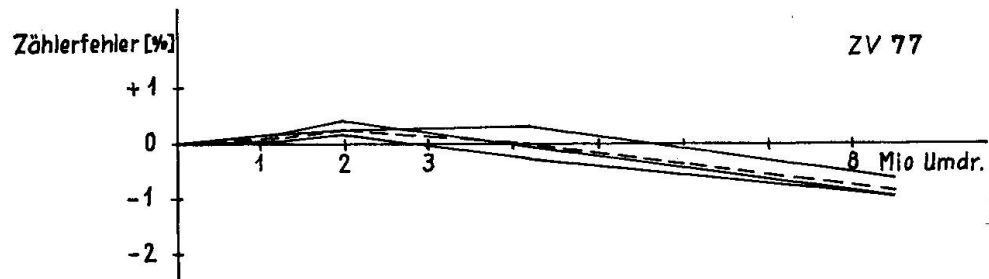


Fig. 12. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 77 (mit Bariumstearat politurvergütungsgeschmierte Unterlager mit Stahlkugel).

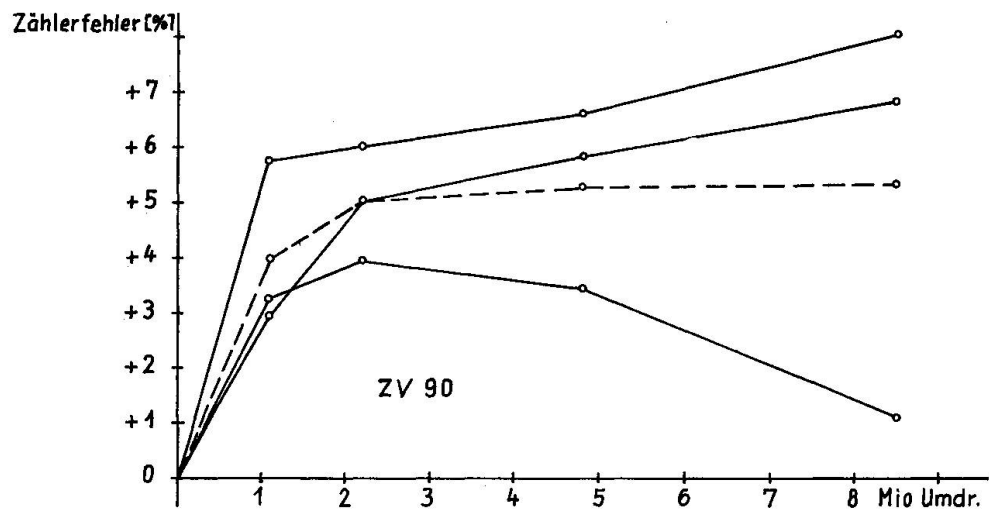


Fig. 13. Zählerfehler in Funktion der Anzahl Systemumdrehungen der Variante ZV 90 (Kombination von NiO-poliervergüteten Lagersteinen mit Politurvergütungsschmierung; mit Rubinkugel).

7.34. Auswertung der Resultate

Um das umfangreiche Versuchsmaterial in eine übersichtlich-vergleichbare Form zu bringen, sollen zwei einfache Gütekoeffizienten eingeführt werden zur Charakterisierung des gesamten Kurvenverlaufs (Mittelwert

und Streuung) einer Versuchsvariante, nämlich als Koeffizienten α den Mittelwert der Ordinatenbeträge (Zählerfehler) der Mittelwertskurven; praktisch berechnet als Mittel aus den Beträgen der Zählerfehlermittelwerte von jedem Messpunkt einer Variante. Jede Abweichung von der Abszisse, nach oben und unten, ist unerwünscht und soll betragsmässig erfasst werden (daher Betrag ohne Vorzeichen). Ein rein algebraischer Mittelwert würde die Schwankungen der Mittelwertskurve nicht berücksichtigen, daher musste eine vereinfachte Art der Mittelwertsstreuung eingeführt werden. — Der Koeffizient γ bedeutet den mittleren Betrag, gebildet aus den Spannweiten aller Messstellen pro Variante. Auch die Streuung an jeder Messstelle muss berücksichtigt werden; bei der geringen Stückzahl pro Variante (3...5) ist nur der Range (Spannweite) sinnvoll.

α und γ wirken gleichsinnig: je kleiner ihr numerischer Wert, desto besser, das heisst reibungskonstanter beziehungsweise streuungsärmer ist die Variante. Die beiden Werte können daher auch zu einem einzigen Gütewert addiert werden. Einzelnen orientieren sie über die Beschaffenheit des Kurvenschwarms: so geben zum Beispiel die Werte bei ZV 89 (α klein und γ gross) an, dass die Mittelwertskurve nicht wesentlich von der Abszisse abweicht und sich diese Variante somit zwar weitgehend reibungskonstant verhält, die Einzelwerte dagegen sehr stark streuen, weshalb die Variante gesamthaft, also bezüglich $\alpha + \gamma$, als der Normalvariante höchstens ebenbürtig betrachtet werden darf. Den umgekehrten Fall (α gross und γ klein) zeigt zum Beispiel die Normalvariante ZV 80: Eng gebündelter, indes stark abfallender Kurvenschwarm.

In den Tabellen 7—12, S. 779—783, sind die Werte für α und γ sowie deren Summe für jede einzelne Versuchsvariante aufgeführt und ermöglichen den direkten Vergleich mit den Normalvarianten.

7.4. Versuche über sehr lange Betriebszeiten

Zählerlaufversuche bedürfen sehr langer Betriebszeiten. Unter Einhaltung der wichtigsten Bedingungen (maximale Drehzahl und Systemgewicht), wie sie der Praxis entsprechen, ist höchstens eine Zeitraffung um den Faktor 10 erreichbar; einer Betriebsdauer von 20 Jahren steht somit eine rund zweijährige Versuchsdauer gegenüber. Um darüber hinaus auch Anhaltspunkte über das Laufverhalten bis gegen 50 Millionen Rotordrehungen innert nützlicher Frist zu gewinnen, wurden mit einer Anzahl aussichtsreicher Varianten Schnellauftests mit 6...10mal höherer

Maximal-Tourenzahl durchgeführt. Der Versuchsstand umfasste eine Anzahl Dreiphasenzähler vom Typ MG 1, Nennlast 5 A, Zählerkonstante 600 U/kWh, Systemgewicht 72 g, bei welchen die zwei Bremssysteme entfernt worden sind, ebenso die beiden unteren Antriebssysteme, so dass nurmehr das oberste verbleibt (geringster Seitenzug). Anstelle des nicht mehr messbaren Zählerfehlers tritt eine Relativmessung für die Reibung, die Auslaufzeit von 1 U/s Umdrehungsgeschwindigkeit an bis zum Stillstand der Systemscheibe, also ausser der Lagerreibung und eines vernachlässigbaren Anteils Luftreibung ohne Mitwirkung antreibender oder bremsender Momente. Diese Messung der Auslaufzeit ist im allgemeinen auf $\pm 5\%$ reproduzierbar.

Die Übereinstimmung der Auslaufzeit mit dem Zählerfehler ist qualitativ gut; so äussert sich zum Beispiel der Abfall der Einstein-Normalvariante (siehe Fig. 2, S. 727) auch in der Auslaufzeitkurve (vgl. Fig. 10, S. 756). Eine richtige quantitative Beziehung zwischen der Auslaufzeit und dem Zählerfehler kann jedoch nicht erwartet werden, weil die Betriebsbedingungen zu unterschiedlich sind; so kann zum Beispiel beim Schnellauftest auch ohne weiteres hydrodynamische Schmierung auftreten.

Das Programm für diese Versuche umfasste je ein Einsteinlager der in Tab. 13, S. 787, zusammengestellten Kombinationen. Als Schmiermittelbasis diente MS-2-Öl (mit Ausnahme der Varianten AV 12 und 13, für welche ein qualitativ analoges Mineralöl mit wesentlich niedrigerer Viskosität gewählt wurde). Alle nicht erwähnten Versuchsparameter (wie zum Beispiel Ölmenge, Kugeldurchmesser usw.) waren wiederum dieselben wie im Falle der Normalvariante.

Die Messresultate (Angabe des Mittelwerts von je drei Auslaufzeitmessungen pro Messstelle) sind in Tab. 14, S. 788, wiedergegeben. Allgemein kann festgestellt werden, dass es durch Anwendung geeigneter politurvergütender Schmiermittelzusätze sowohl für Stahl- als auch für Rubinkugeln gelingt, bis zu 50 Millionen Umdrehungen auch unter hoher spezifischer Lagerbelastung Reibungskonstanz zu wahren. Bei NiO ist gegen Versuchsende ein gewisser Abfall feststellbar, während bei MoO₃ und PbO auch dann noch gute Werte gefunden werden. Borsäure verhält sich in Kombination mit einer Rubinkugel sehr gut; für die Stahlkugel hat sich dagegen die noch weichere (beziehungsweise tiefer schmelzende) Borverbindung Tristearylborat besser bewährt. Bariumnaphthenat zeigt gegen Ende des Versuchs wie NiO einen gewissen Kurvenabfall, während Bariumstearat wiederum eher besser zu wirken scheint.

Tabelle 13. *Programm für Langzeitversuche in der Schnellauf-test-Einrichtung*

1. Normalvarianten				
AV 1 Einstein-Normalvariante mit gewöhnlicher Stahlkugel				
AV 2 Doppelstein-Normalvariante mit gewöhnlicher Stahlkugel				
AV 3 Als Vergleich Einstein-, Normalvariante“ mit Rubinkugel				
2. Kombinationen politurvergüteter Steine mit politurvergütenden Schmierzusätzen des gleichen Oxyds				
Beigabe	Polierart	Kugelmaterial	Konzentration des Schmiermittelzusatzes zum Öl	Variante
NiO	2	Rubin	1 : 3,25	AV 4
NiO	2	Stahl	1 : 10	AV 5
MoO ₃	2	Rubin	1 : 3,25	AV 6
PbO	2	Stahl	1 : 10	AV 7
3. Kombination normal hergestellter Steine mit politurvergütenden Schmiermittelzusätzen in Form nichtoxydischer Verbindungen				
Beigabe		Kugelmaterial	Konzentration des Schmiermittelzusatzes zum Öl	Variante
Borsäure		Rubin	ca. 1 : 3	AV 8
Tristearylborat		Stahl	1 : 5	AV 9
Bariumstearat		Rubin	1 : 3,25	AV 10
Bariumstearat *)		Stahl	1 : 10	AV 11
Bariumnaphthenat		Rubin	38 %	AV 12
Bariumnaphthenat		Stahl	38 %	AV 13

*) S. Fig. 10, S. 756.

7.5. Ergebnisse aller Versuche

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Lagersteinen aus synthetischem Saphir durch geeignete Zusätze zum Poliermittel oder/und später zum Schmiermittel eine Vergütung der Politurschicht erzielt werden kann. Als besonders wirksam haben sich hierfür Calcium-, Kobalt-, Cadmium- und Bleioxyd sowie verschiedene Bor- und Bariumverbindungen erwiesen.

Tabelle 14. *Auslaufzeit-Messwerte der Langzeitversuche*

Var. Nr.	Auslaufzeit-Messwerte in Sekunden (Durchschnitt von drei Messwerten) nach Dauerversuch von ungefähr Umdrehungen:							
AV	$0 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$16 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$
1	199	179	171	142	139	105	82	100
2	268	268	281	221	287	264	237	223
3	123	216	166	159	215	182	93	94
4	115	202	245	241	265	241	203	166
5	121	190	211	174	226	229	176	149
6	195	206	214	201	198	202	200	198
7	180	200	202	189	198	191	203	199
8	192	193	208	195	233	262	217	228
9	157	202	208	221	211	215	186	169
10	159	230	243	214	239	221	217	218
11	232	236	216	184	239	256	231	150
12	156	182	192	213	243	204	180	165
13	164	186	195	185	185	173	152	132

Im günstigsten Fall ist es gelungen, die Fehlerkurve eines Zählers mit Einsteinlager durch Vergütung des Saphirsteines derjenigen eines Zählers mit normalem Doppelsteinlager anzugleichen, somit das eingangs gestellte Problem zu lösen. Ferner scheint es möglich, die angestrebte Konstanz der Reibung im Zählerunterlager sogar über die geforderte Betriebszeit von 20 Jahren hinaus auch bei hohen Systemgewichten zu gewährleisten.

8. DISKUSSION DES VERGÜTUNGSEFFEKTES

8.1. Zur Frage der Beeinflussung der Struktur der Politurschicht durch die angewendeten Zusätze

Bei den Versuchen hat sich die Beigabe der Reaktionssubstanzen zum Schmiermittel besonders im Hinblick auf eine langfristige Wirksamkeit bewährt; dies deutet darauf hin, dass vorab der Erhaltung der Politurschicht und erst in zweiter Linie der Verbesserung ihrer Anfangsqualität Beachtung geschenkt werden sollte. Das augenfälligste Merkmal der Politurvergütung besteht in einer sofortigen und andauernden „Stabilisierung“ des in 5.44 skizzierten Abrieb/Politur-Gleichgewichtes, das sich ohne Zusätze nur mühsam und nicht voll zuverlässig einspielt (siehe Normalvariante Fig. 2, S. 727).

Naturgemäss stellt sich die Frage, worauf der beobachtete Vergütungseffekt beruhen könne. Der Gedanke liegt nahe, die Antwort in einer Art „Strukturreaktion“ innerhalb der äussersten Zone der Politurschicht zu suchen: unter der lokal sehr hohen Bearbeitungsintensität beim Polieren beziehungsweise bei Verschweissungen während des Lagerbetriebes und der daraus resultierenden hohen Reaktionsbereitschaft können sich Platzwechsel-, unter Umständen sogar örtlich und zeitlich beschränkte Diffusionsvorgänge abspielen. Werden nun in unmittelbarer Nähe solcher submikroskopischer Reaktionsflächen Substanzen bereitgehalten, welche das in nahezu ideal dichtest gepackter Raumerfüllung aufgebaute Korundgitter infolge Eindiffundieren stören, zum Beispiel durch den Einbau grösserer Kationen, dann müsste dies eine „Stabilisierung“ des strukturell ungeordneten Zustandes „Politurschicht“ bedeuten. Diese „Strukturreaktionen“ können zwangsläufig nur wenige Atomlagen dicke Schichten erfassen; die auf diese Weise absichtlich gestörten Teilgebiete atomarer Grössenordnung setzen Gleitvorgängen, wie sie bei der plastischen Verformung ablaufen, zusätzlichen Widerstand entgegen, so wie es Versetzungen allgemein tun und es auch im Falle von in Metalloberflächen eingearbeiteten submikroskopischen Oxydteilchen gilt. Derart werden die schädlichen Folgen der Verschweissungen — Materialübertrag von einem Lagerteil auf den andern und Abtrennen kleinster in sich strukturell geordneter Bereiche, das heisst Bildung von kristallinem Abrieb — herabgemindert.

Mit dem Postulat eines solchen Mechanismus — Gleitvorgänge, Abscheren von Schweissbrücken — für die Abnützung an Saphir wird ein Bild entworfen, wie es unserer Vorstellung von der Bearbeitung der Metalle entspricht. Es darf aber nicht ausser acht gelassen werden, dass es sich einerseits um Einzelvorgänge über submikroskopisch kleine Bereiche handelt, und andererseits höchste Belastungen (Spitzen bis 500 und 1000 kg/mm²) wiederum in derart kleinen Bezirken Bedingungen schaffen, denen diese Werkstoffe makroskopisch normalerweise nie ausgesetzt sind.

Als nächstes drängt sich die Frage nach einer experimentellen Beweisführung obiger Theorie auf. Zunächst spricht in diesem Sinne die Beobachtung, dass sich vorwiegend jene Substanzen als politurvergütungswirksam erwiesen, deren Kation einen wesentlich grösseren Ionenradius besitzt als Aluminium (vgl. Tab. 4, S. 770/771). Eine weitere Beweisführung ist jedoch sehr schwer, da alle heute üblicherweise zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden zu geringe Nachweisempfindlichkeit aufweisen. So haben auch die empfindlichsten Verfah-

ren — Elektronenbeugung und radioaktive Markierung — keinen Entscheid gestattet, wie in den weiteren Kapiteln gezeigt wird. Als Stütze obiger Überlegungen kann jedoch der zunächst folgende — allerdings empirische — Indizversuch gelten.

8.2. Versuche zum Nachweis von Platzwechsel- und Diffusionsvorgängen während der Politurvergütung

8.21. Barium- gegen Aluminiumstearat als Reaktionssubstanz

Soll die Grösse des Kations tatsächlich eine wesentliche Rolle in der Vergütung spielen und diese sich als eigentliche „Strukturreaktion“ innerhalb der Politurschicht erweisen, dann muss ein einfacher Indizversuch, etwa der Ersatz von Bariumstearat durch Aluminiumstearat als Reaktionssubstanz wesentliches Interesse beanspruchen. Die günstigen Versuchsergebnisse mit Bariumstearat sind aus ZV 77 und AV 11 (siehe Fig. 10, S. 756, und Fig. 12, S. 784) bekannt; Versuche mit Aluminiumstearat als Beigabe zum Schmiermittel sollten demgegenüber keine Verbesserung zeigen, das Verhalten vielmehr der Normalvariante entsprechen, falls nicht andere Effekte als eine Vergütung im oben skizzierten Sinne — wie etwa ein reiner Trenneffekt — eine Verbesserung der Konstanz der Reibung durch Zusatz von Aluminiumstearat ergeben.

Die Versuche wurden in der Schnellauf-test-Einrichtung durchgeführt, um sie innert nützlicher Frist bis zu hohen Umdrehungszahlen zu bringen. Als Konzentration für die Zusätze wurde in beiden Fällen wiederum das Gewichtsverhältnis Beigabe zu MS-2-Öl gleich 1 : 10 gewählt und als Lagerkomponenten die gewöhnliche nicht rostsichere Stahlkugel und normaler, also nicht vergütet polierter Saphirstein eingesetzt.

Die erhaltenen Messkurven mit der Auslaufzeit in Funktion der erreichten Umdrehungszahl im Dauerversuch — Umdrehungsgeschwindigkeit 6...8 U/s — werden in Fig. 10, S. 756, mit der entsprechenden Einstein-Normalvariante verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, wie das mit Bariumstearat geschmierte Lager den Vergütungseffekt, also Reibungskonstanz zeigt, während das mit Aluminiumstearat geschmierte Lager in seinem Laufverhalten der Normalvariante gleicht, ja sich sogar noch etwas schlechter verhält als diese. Der Versuch ist innerhalb der Messgenauigkeit und der Versuchsstreuung reproduzierbar.

8.22. Untersuchungen mit Hilfe der Elektronenbeugung

Für die Untersuchungen mit Elektronenbeugung nach dem Anstrahlverfahren müssen ebene Flächen zur Verfügung stehen, da der Primär-

strahl unter einem Winkel von ungefähr zwei Grad auf die Präparatfläche streifend auftreffen muss. Aus den Lagerstein-Kalotten können nicht ohne thermische Beeinflussung oder mechanische Beschädigung Keile für die Untersuchung herauspräpariert werden; ausserdem reicht die Fläche von einer solchen Keilspitze für die diffraktographische Untersuchung nicht aus. Daher musste ein Modellager für ebene Saphirplättchen anstelle des Kalottensteins konstruiert werden, das unter den gleichen Bedingungen bezüglich spezifischer Lagerbelastung und Umdrehungsgeschwindigkeit laufen konnte wie das Zählerunterlager und dabei eine Lauffläche von mindestens 1 mm^2 ergab. Dies wurde durch Verwendung eines Stahlbolzens anstelle der Kugel erreicht, wobei dem Stahlbolzen eine Kuppe mit grossem Radius ($r = 75 \text{ mm}$) angeschliffen und poliert wurde.

In diesem Modellager wurden nun Kombinationen Stahlzapfen/Saphirplatte unter MS-2-Ölschmierung mit und ohne Zusätze zur Politurvergütung laufen gelassen. Durch Vergleichsaufnahmen neben und auf der Laufstelle sollte festgestellt werden, ob die Laufstelle eine andere Feinstruktur aufweise als die unbenützte Oberfläche. Die Untersuchungen konnten unsere Hypothese weder bestätigen, indem die Ausbildung der Reflexe in beiden Fällen gleich war, noch eindeutig widerlegen, da einerseits das Eindringvermögen entsprechend der anzuwendenden Beschleunigungsspannung von 50 kV wesentlich mehr als einige Netzebenen umfasste und anderseits der Anteil der eigentlichen Lauffläche von ca. 1 mm^2 im Vergleich zum gesamten vom Strahl betroffenen Streifenstück von ca. 1 mm Breite und 5 mm Länge zu klein ist, um bei geringem Strukturunterschied einen feststellbaren Einfluss auf die Ausbildung der Reflexe auszuüben.

Aus der Reflexform kann jedoch eine qualitative Aussage über den Zustand der submikroskopischen Oberflächenrauhigkeit gewonnen werden. Während Kikuchi-Linien (siehe zum Beispiel BAUER, 1958, und BARRETT, 1952) auf eine sehr gut ausgebildete Gitterordnung (geringe Fehlerintensität) schliessen lassen — wie sie auch bei Saphirlagern nach Abätzen der Politurschicht, also für das Grundmaterial charakteristisch, nachweisbar ist —, deuten Reflexverlängerungen in Richtung senkrecht zur Testfläche am Prüfling auf eine besonders glatte Oberfläche hin. Als Grund dieser Erscheinung wird die Aufladung dieser besonders ebenen Oberflächen mit Elektronen angegeben (trotz Anwendung einer Entladevorrichtung) und die damit verbundene teilweise Ablenkung des Elektronenstrahls, bevor er gebeugt wird (siehe zum Beispiel BAUER, 1958). — Auf Grund dieses Effektes kann folgendes geschlossen werden:

Während die Oberflächenrauigkeit bei Verwendung gewöhnlicher Ölschmierung eher zunimmt, nimmt sie durch Anwendung der Politurvergütungsschmierung umgekehrt ab.

Die Untersuchungen wurden entsprechend Tab. 15, S. 792, an Saphirplatten mit optischer Orientierung 0° und 90° (bezogen auf die Be-

Tabelle 15. *Elektronenbeugungsuntersuchungen an Saphirplatten*

Optische Orientierung der Saphirplatten zur Belastungsrichtung		0°	90°	
Schmierung		MS 2-Öl ohne Zusatz	MS 2-Öl ohne Zusatz	MS 2-Öl mit 1 : 10 Ba-stearat
Länge der Reflexe senkrecht zur Probenoberfläche in mm	auf der Lauffläche	2,5	3,0	6,0
	neben der Lauffläche	4,0	4,5	3,0
Bild Nr.		—	12	13

lastungsrichtung) durchgeführt, und zwar einerseits mit normaler MS-2-Öl-Schmierung und andererseits mit einem Zusatz von gewichtsmässig 1 : 10 Bariumstearat zum Schmieröl. Diese Lagerplättchen wurden in der Modelleinrichtung unter einer Last von 50 kg, entsprechend dem spezifischen Lagerdruck eines Zählerunterlagers während 10 Stunden bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 1 U/s laufen gelassen und von ihnen anschliessend Elektronenbeugungsaufnahmen bei 50 kV Beschleunigungsspannung einmal von der Lauffläche, daneben auch vom Randgebiet angefertigt.

Aus der Verkürzung beziehungsweise der Verlängerung der Reflexe senkrecht zur Oberfläche — Resultate siehe Tab. 15 — darf eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit bei gewöhnlicher Schmierung und eine Abnahme derselben bei Vergütungsschmierung angenommen werden. Damit ist ein weiterer Hinweis auf eine Veränderung der Politurschicht während des Lagerbetriebes und deren Beeinflussung durch Vergütungszusätze wenigstens angedeutet.

8.23. Untersuchungen mit Hilfe radioaktiv markierter Zusätze

Stofftransporte lassen sich häufig durch radioaktive Isotope nachweisen. Es lag daher nahe, die radioaktive Markierungsmethode zu Untersuchungen über den Mechanismus der Politurvergütung heranzuziehen. Zu diesem Zweck musste lediglich das entsprechende Kation der Reaktionssubstanz genügend grosse Strahlungsausbeute ergeben (also vernünftige Halbwertszeit und günstigen Wirkungsquerschnitt aufweisen usw.). Dies trifft gerade für ^{139}Ba zu, das als β - und γ -Strahler eine Halbwertszeit von 85 min aufweist; auch ^{187}W mit einer Halbwertszeit von 24 Std. liegt noch einigermaßen günstig.

Für die Bestrahlungsversuche wurden je drei nicht benutzte Lagersteine gewählt, die eine Serie mit BaO reaktionspoliert, die andere mit WO_3 ; die beiden Serien konnten gegenseitig als Nullstandard dienen (Grundpegel für allenfalls schon im Grundmaterial enthaltene Mengen an Ba- beziehungsweise W-Atomen). Die Steine waren nach der Herstellung sorgfältig gereinigt und schlussendlich noch in verdünnter Salpetersäure ausgekocht worden, um jegliche Adsorption auszuschliessen (BaO ist zufolge Hydrolyse ohnehin bereits in kochendem Wasser zu 91% löslich). Schärfere Reinigungsagenzien durften nicht angewendet werden, sollte nicht die Politurschicht angegriffen werden.

Die reaktionspolierten Steine wurden im Reaktor Diorit in Würenlingen bei einem Neutronenfluss von ca. $3 \cdot 10^{12}$ Neutronen/cm²s während 4,5 Std. aktiviert (\sim dreifache Halbwertszeit von ^{139}Ba). Anschliessend wurden sie nochmals gereinigt und mit Hilfe eines Zählrohrs und eines multi-channel- γ -Spektroskopes ausgemessen; im einzelnen wurden folgende Ergebnisse gefunden:

— Bei der einen charakteristischen Bariumlinie, 1,41 MeV tritt sowohl bei den Ba- wie den W-reaktionspolierten Steinen eine gleich hohe, breite Doppelspitze auf, so dass diese Linie nicht ausgewertet werden kann. Diese Doppelspitze gehört zu charakteristischen Verunreinigungen des Grundmaterials. Offenbar ist also die Konzentration so gering, dass sie nicht ausreicht, um ein deutliches Maximum bei 1,41 MeV auszubilden.

— Die Linie 0,17 MeV ist dagegen störungsfrei und erlaubte, wie ein parallel gelaufener BaNO_3 -Standard zeigte, eine sichere quantitative Nachweisgrenze für Ba von 10^{-7} g, beziehungsweise 0,1 γ absolut.

— Die drei BaO-reaktionspolierten Steine wiesen bei 0,17 MeV auch nicht

die geringste spezifische Erhebung aus der Grundstreuung auf; somit enthielt ein Stein, wenn überhaupt, sicher weniger als 10^{-7} g BaO.

— Auch die Linie 0,14 MeV, die für ^{187}W charakteristisch ist, trat bei den W-reaktionspolierten Steinen nicht auf; hier liegt aber die Nachweisgrenze deutlich höher als bei ^{139}Ba , so dass bei W ein positiver Effekt noch weniger zu erwarten ist als bei Ba.

Die Nachweisempfindlichkeit bei ^{139}Ba muss als optimal angesehen werden; somit kann auch die radioaktive Markierungsmethode keine Anhaltspunkte für die Aufnahme von Reaktionssubstanz in die Politurschicht der Saphirsteine liefern. Aber ebenso wie bei den Untersuchungen mit Hilfe der Elektronenbeugung beweist auch dieses negative Ergebnis noch nicht das Gegenteil. Nimmt man an, dass ein Ersatz von 5...10% der Aluminiumionen in der äussersten Zone der Politurschicht (Dicke von 10...20 Å) durch Bariumionen ausreicht, um den Vergütungseffekt zu erzielen, dann erhält man pro Lagerstein (Kalottenoberfläche zu ungefähr 3 mm² gerechnet) eine Menge von nur 10^{-8} bis 10^{-9} g BaO; diese Menge liegt aber unter der Nachweisgrenze unserer Aktivierungsanalyse.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Als Instrumentenlager mit sehr hoher spezifischer Lagerbelastung und geringer Umdrehungsgeschwindigkeit stellt das Unterlager von Elektrizitätszählern extrem hohe Ansprüche an die Eigenschaften der Lagerteile und des Schmiermittels. Dazu kommt die Forderung, es habe das Lager wenigstens 20 Jahre lang wartungsfrei ohne Änderung der Reibung zu laufen. Das bisher verwendete Einsteinlager konnte diesen Anforderungen keineswegs genügen; sie liessen sich nur durch Anwendung des wirtschaftlich und in den zählertechnischen Funktionen ungünstigeren Doppelsteinlagers erfüllen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde zunächst festgestellt, dass beim Lagerbetrieb Verschweissungen mit Metallübertrag von der Kugel auf den Stein stattfinden. Ferner konnte anhand einiger Versuche mit verschiedenartig hochglanzpolierten, abgeätzten oder thermisch behandelten Lagersteinen gezeigt werden, dass sich die Politurschicht auf das Laufverhalten günstig auswirkt. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit der Literatur.

Weitere Zählerlaufversuche mit Lagern, denen künstlich Abrieb zugesetzt wurde, ergaben katastrophale Folgen für einen Zusatz von Diamant- und α -Korund-Partikeln, während umgekehrt eine nicht näher definierte Rostmodifikation (Synthese oxydierter Abriebpartikel von der Stahlkugel) eine Verbesserung der Reibungskonstanz ergab. Daraus wurde geschlossen, dass sich gewisse Zusätze günstig auf die angestrebte Aufrechterhaltung der Politurschicht auswirken, sie also eine Art Vergütung der Politurschicht ergeben. Hierbei können die Zusätze

entweder dem Poliermittel beigelegt, mithin während des Herstellungsprozesses der Hochglanzpolitur angewendet werden, oder aber — noch wirkungsvoller, weil während des Lagerbetriebes andauernd wirksam — dem Schmiermittel beigelegt werden. Es wurden umfangreiche Zählerlaufversuche mit oxydischen und organischen Zusätzen durchgeführt und festgestellt, dass insbesondere Ba-, Ca-, Co-, Cd- und Pb-Verbindungen sehr günstige Resultate ergeben. Diese Kationen weisen alle deutlich grössere Ionenradien auf als Aluminium, so dass vermutet wird, dass sie Anlass zu zusätzlicher Störung des Korundgitters geben und derart die eine plastische Verformung und Verschweissung einleitenden Gleitprozesse behindern. Eine Nachprüfung mit Aluminiumstearat als unwirksamem Zusatz lieferte denn auch erwartungsgemäss keinerlei Verbesserung des Laufverhaltens. Versuche, mit Hilfe von Elektronenbeugung und radioaktiver Markierung den Einbau dieser Kationen in die Politurschicht unmittelbar nachzuweisen, zeigten jedoch keinen Erfolg.

9a. SUMMARY

Bearings of watt-hour-meters are subjected to very high specific loads and to small speeds of rotation. This is the reason why the requirements for instrument bearings with respect to properties of the bearing materials and to those of the lubricant are extremely high. Furthermore the bearing should run over a period of at least 20 years without service showing no change in friction. The single-jewel bearing used as far did not meet all these requirements. They could be met by use of double-jewel bearings, which however show disadvantages in the technical functions of the meter and from the economical side.

The results of the present investigation showed that during operation of the bearing transport of metal from the ball upon the jewel can occur due to occasional welding. Studies on various highly polished, etched and thermally treated bearing jewels proved that the polish layer has a favourable effect on the running behaviour. These results are in agreement with those reported in the literature.

Further experiments with bearings containing purposely added abrasion particles showed catastrophic results in the case of diamond- and α -corundum-particles. On the other hand addition of rust particles improved the constancy of friction. The conclusion is that certain additions favour the intended preservation of the polish layer leading to a kind of improvement of the polish layer. These additions can be added either to the polishing agent, or to the lubricant which is the more effective way. A great number of running tests with watt-hour-meters using oxides and organic compounds as additions has been carried out. Especially Ba-, Ca-, Co-, Cd- and Pb-compounds showed very favourable results. All these cations have much larger ionic radii than aluminium, and possibly could cause additional defects in the structure of corundum. These defects impede the slip processes which initiate plastic deformation and welding. Checking this conception by use of aluminium stearate as an indifferent addition, showed no improvement in the running behaviour. Investigations by means of electron diffraction and radioactive tracers in order to follow directly the incorporation of these cations in the polish layer did not show any positive results.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- ALBRECHT, FR. (1954): Zur Härteanisotropie des synthetischen Korunds. *Z. Kristallogr.* 106, p. 183.
- BARRETT, CH. S. (1952): *Structure of metals*. 2. Aufl., New York.
- BAUER, E. (1958): *Elektronenbeugung*. München.
- BEILBY, G. (1921): *Aggregation and flow of solids*. London.
- BOLLMANN, W. (1959): Versetzungen in Metallen. *Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn.* 25, p. 310.
- BOWDEN, F. P. und TABOR, D. (1959): *Reibung und Schmierung*. Berlin.
- VAN BUEREN (1959): *Imperfections in crystals*. Amsterdam.
- COSANDEY, R. (1956): *Etude sur la préparation du corindon*. Thèse Univ. Lausanne.
- DINICHERT, M. P. (1954): Quelques effets de la température sur les pierres synthétiques. *Bull. Soc. Suisse Chronométrie*.
- DUWELL, E. J. (1962): Friction and wear of single-crystal sapphire sliding on steel. *J. appl. physics* 33, p. 2691.
- FINCH, G. J., QUARELL, A. G., ROEBUCK, J. S. (1934): *Proc. Roy. Soc. A* 145, p. 676.
- FINCH, G. J. (1936): *Science progress* 16, p. 609.
- FISCHER, ED. (1957): Beiträge zur Kenntnis der Rollbohrreibung in Gerätelagern. Diss. TH Dresden.
- FRIEDEL (1956): *Les dislocations*. Paris.
- FRÖHLICH, H. (1953): Der neuzeitliche Wechselstrom-Elektrizitätszähler. *Landis und Gyr Mitt.* 1, Nr. 1 und 2.
- (1955): Das Unterlager des Wechselstrom-Elektrizitätszählers. *Landis und Gyr Mitt.* 3, p. 1.
- Goss, J. H. (1941): Effect of sapphire-crystal orientation on the wear of watt-hour-meter bearings. *Trans. AIEE* 60, p. 811.
- HÜTTIG, G. F. (1957): Experimentelle Grundlagen des Begriffes Mahlungsgleichgewicht. *Z. Metallkunde* 48, p. 352.
- MOORE, A. J. W. und TEGART, W. J. McG. (1951): Rupture of oxide films during repeated sliding. *Austr. J. Sc. Res. A* 42, p. 181.
- PFLIER, P. M. (1954): *Elektrizitätszähler*. Berlin.
- PINSKER (1953): *Electron diffraction*. London.
- RAETHER, H. (1948): Über die Struktur mechanisch bearbeiteter Oberflächen und deren Eigenschaften. *Z. Physik* 124, p. 286.
- (1950): Über die Struktur mechanisch und elektrolytisch polierter Oberflächen. *Mikroskopie* 5, p. 101.
- (1957): Anwendung der Elektroneninterferenzmethode auf spezielle Probleme. *Handb. der Physik* 32, p. 443.
- READ, W. T. (1953): *Dislocations in crystals*. New York.
- SANDMEIER, E. G. (1953): Vortrag vom 25. 6. 53 in Monthey.
- SAUCIER, H. (1953): Sur une méthode rapide d'orientation des cristaux de corindon synthétique. *Bull. Soc. franç. Min. Crist.* 76, p. 480.
- SCHMIEDEL, K. (1954): *Die Prüfung der Elektrizitätszähler*. Berlin.
- SCHUNK, J. (1949): Kritischer Vergleich der Gleitreibungszustände unter besonderer Berücksichtigung der Vorgänge bei Grenzreibung. Diss. TH Aachen.

- SHOTTER, G. F. (1936): Technical report T/T 31 der "British electrical and allied industries research association, Letherhead, Surrey".
- (1944): Technical report T/T 39 (ebenda).
- (1953): Technical report T/T 48 (ebenda).
- (1956): Technical report T/T 49 (ebenda).
- (1958): Technical report T/T 55 (ebenda).
- SPADERNA, K. (1961): Einfluss der Atomversetzungen auf die Festigkeit von Al_2O_3 . E und M 78, p. 428.
- STEIJN, R. P. (1961): On the wear of sapphire. J. appl. physics 32, p. 1950.
- STOTT, V. (1938): Investigation of problems relating to use of pivots and jewels in instruments and meters. The national physical Laboratory 24 (1938), p. 1.
- TRÖGER, W. E. (1952): Tabellen zur optischen Bestimmung. Stuttgart.
- WACHSMANN, F. (1934): Untersuchung der Reibungsverhältnisse in Elektrizitätszählern unter besonderer Berücksichtigung der Veränderlichkeit der Reibungswerte im Verlaufe längerer Betriebszeiten. Diss. TH München.
- WACHTMAN, J. B. und MAXWELL, L. H. (1954): Plastic deformation of ceramic-oxide single crystals I. J. Amer. Ceram. Soc. 37, p. 291.
- (1957): Plastic deformation of ceramic-oxide single crystals II. J. Amer. Ceram. Soc. 40, p. 377.
- WINCHELL, A. N. (1944): Orientation of synthetic corundum for jewel bearings. Amer. Min. 29, p. 399.
- WINKLER, H. G. F. (1955): Struktur und Eigenschaften der Kristalle. 2. Aufl., Berlin.

BILDTEXT-VERZEICHNIS

- Bild 1. Extrem starke Abnützung an Saphirlagerstein nach Trockenlauf ($V = 1000 \times$, Schrägbeleuchtung).
- Bild 2. Aus ZV 5, Metallübertrag von der Stahlkugel auf den Saphirstein ($V = 200 \times$, Phaco).
- Bild 3. Aus ZV 6, mittelstarke Laufringe auf Saphirstein ($V = 200 \times$, Phaco).
- Bild 4. Aus ZV 12, Abscherstellen und Oxydation auf der Stahlkugel ($V = 500 \times$, Phaco).
- Bild 5. Aus ZV 16, „Brandflecke“ bzw. Verschweissungsstellen auf der Stahlkugel ($V = 1000 \times$, Phaco).
- Bild 6. Schwache Abnützungserscheinungen auf Saphirlager-Kalottenoberfläche ($V = 6500 \times$).
- Bild 7. Nur vorpolierter Saphirlagerstein; teilweise ausgeebnete Bearbeitungsspuren mit Ausbruchrändern ($V = 12000 \times$).
- Bild 8. Aus ZV 17, äusserst schwache Laufspuren auf Saphirlager-Kalottenoberfläche ($V = 13000 \times$).
- Bild 9. Aus ZV 18, Metallübertrag von der Stahlkugel auf Saphirlager-Kalottenoberfläche festgeschweisst ($V = 15000 \times$).
- Bild 10. Überpolierte Bearbeitungsspuren auf Saphirlager-Kalottenoberfläche ($V = 10500 \times$).
- Bild 11. Beginnende Laufspur mit Ausbrüchen auf Diamantlager-Kalottenoberfläche ($V = 9000 \times$).
- Bild 12. Elektronenbeugungsbild von Saphirplattenoberfläche, unter normaler Ölschmierung gelaufen:
a) Steinrand (neben der Laufläche).
b) Steinmitte (auf der Laufläche).
- Bild 13. Elektronenbeugungsbild von Saphirplattenoberfläche, unter Bariumstearat/Ölschmierung politurvergütend gelaufen:
a) Steinrand (neben der Laufläche).
b) Steinmitte (auf der Laufläche).

TAFEL I

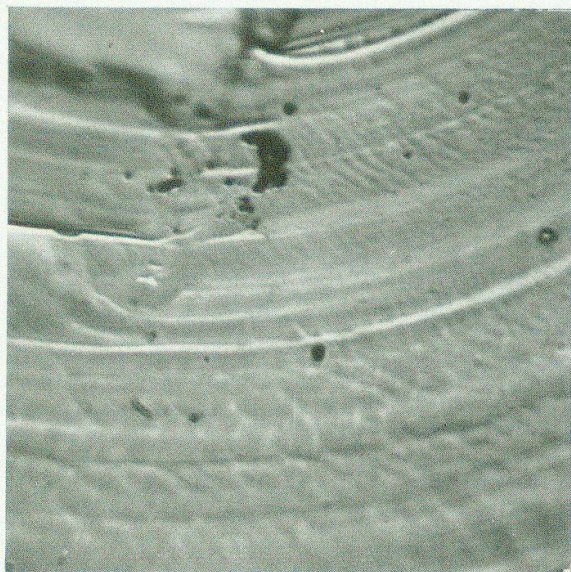


Bild 1.

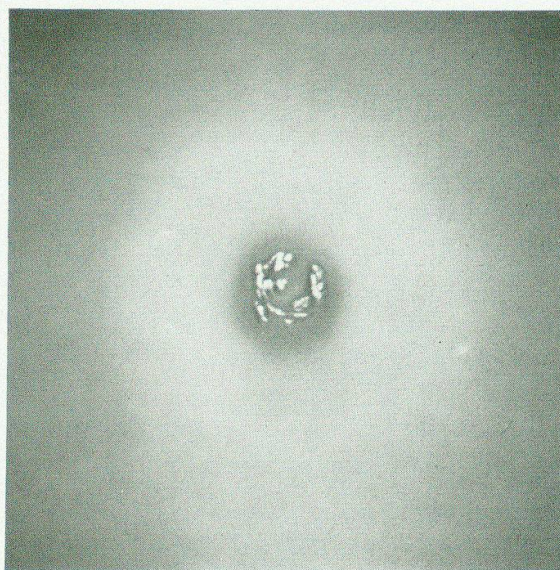


Bild 2.

Bild 3.

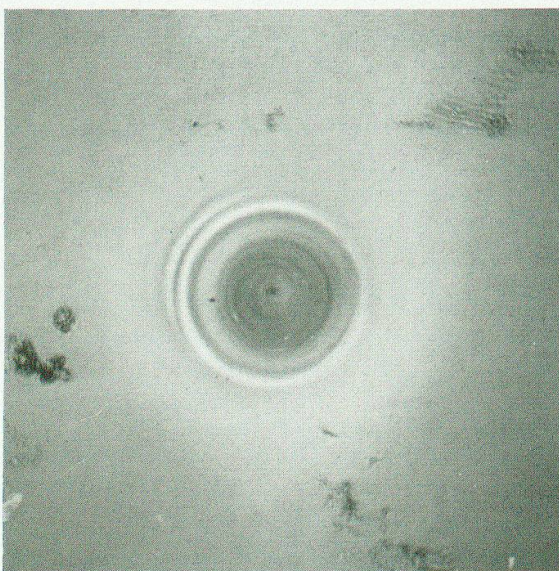
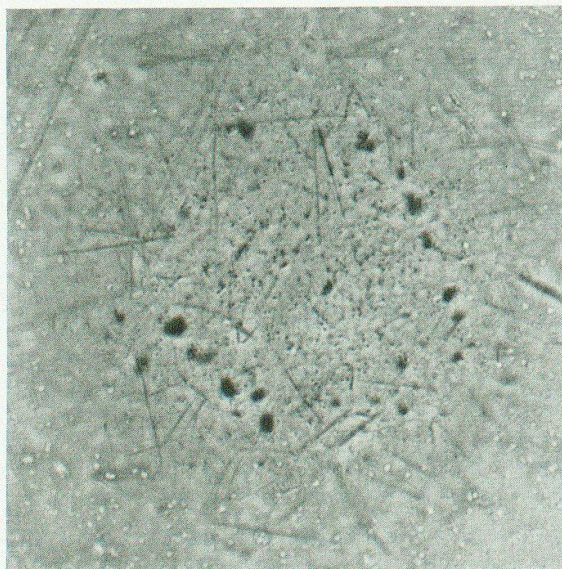


Bild 4.

Bild 5.



TAFEL II

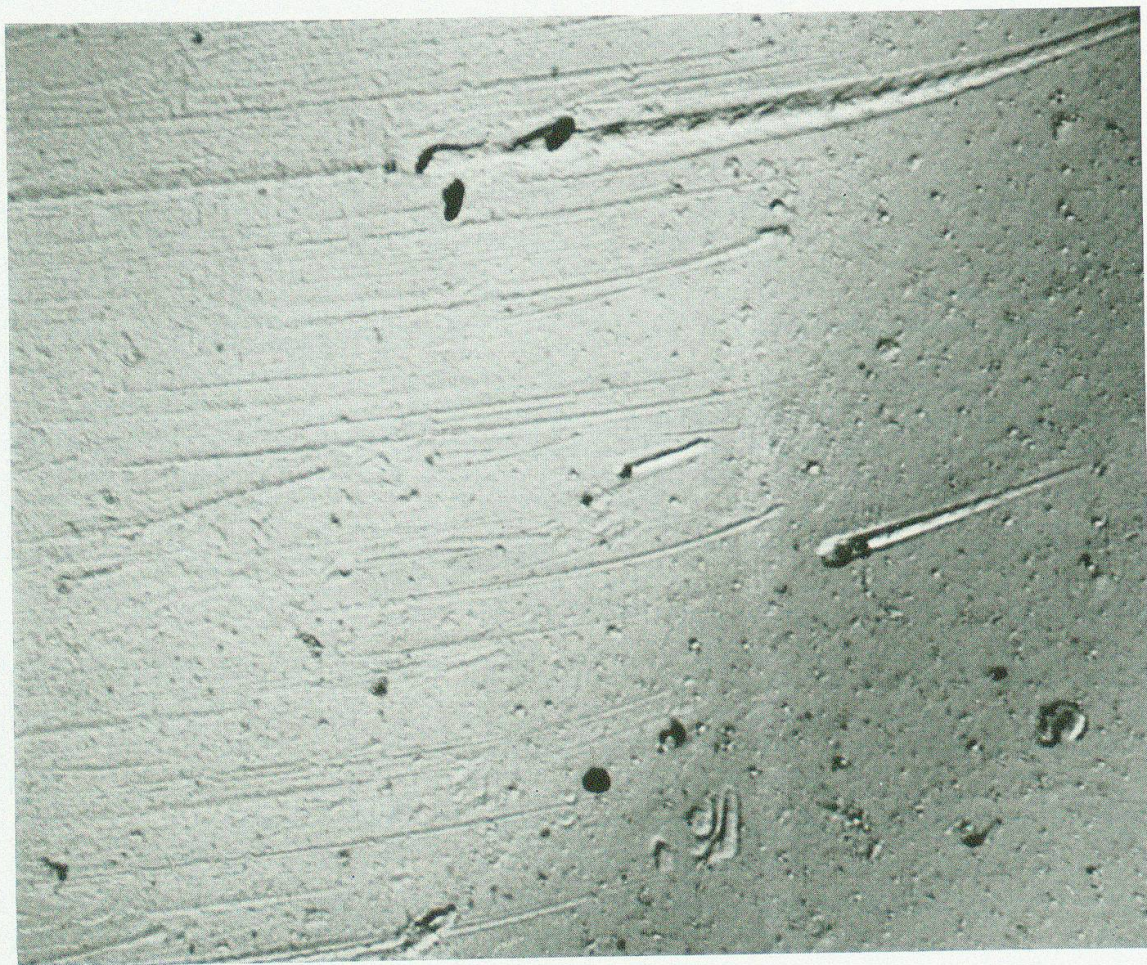
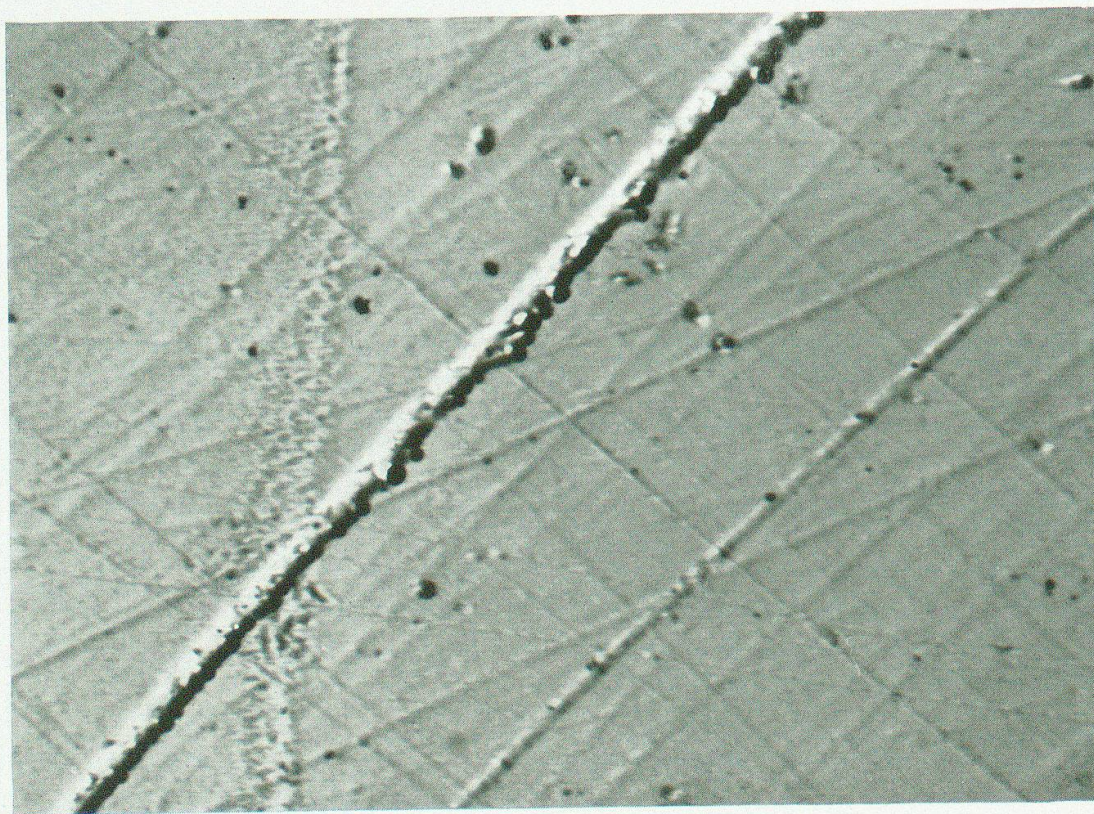


Bild 6. ↑

Bild 7. ↓



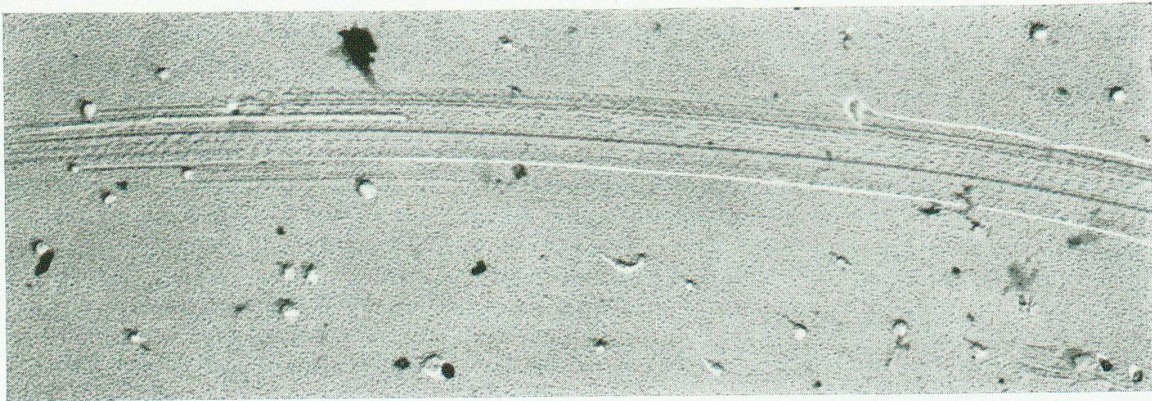


Bild 8. ↑

Bild 9. ↓

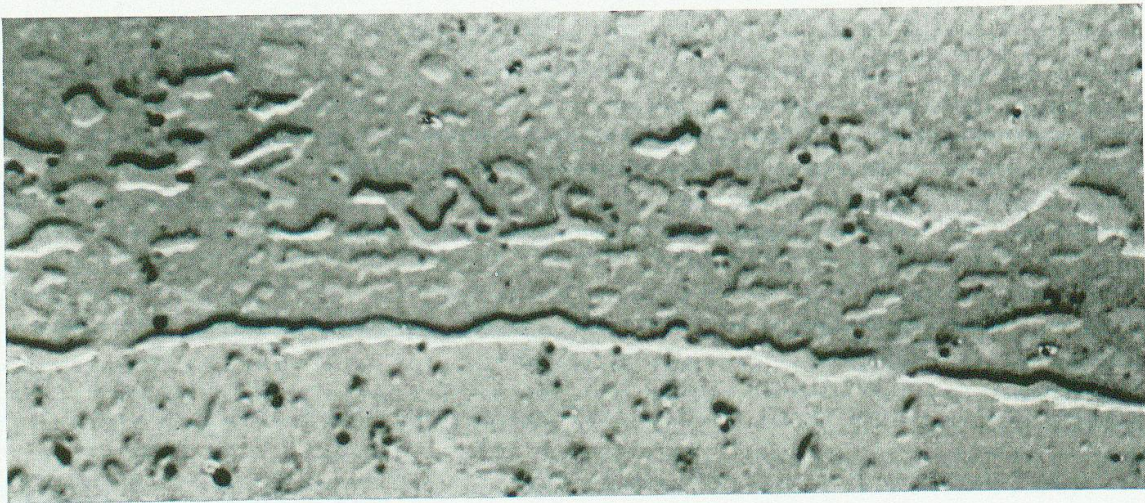


Bild 10.



TAFEL IV

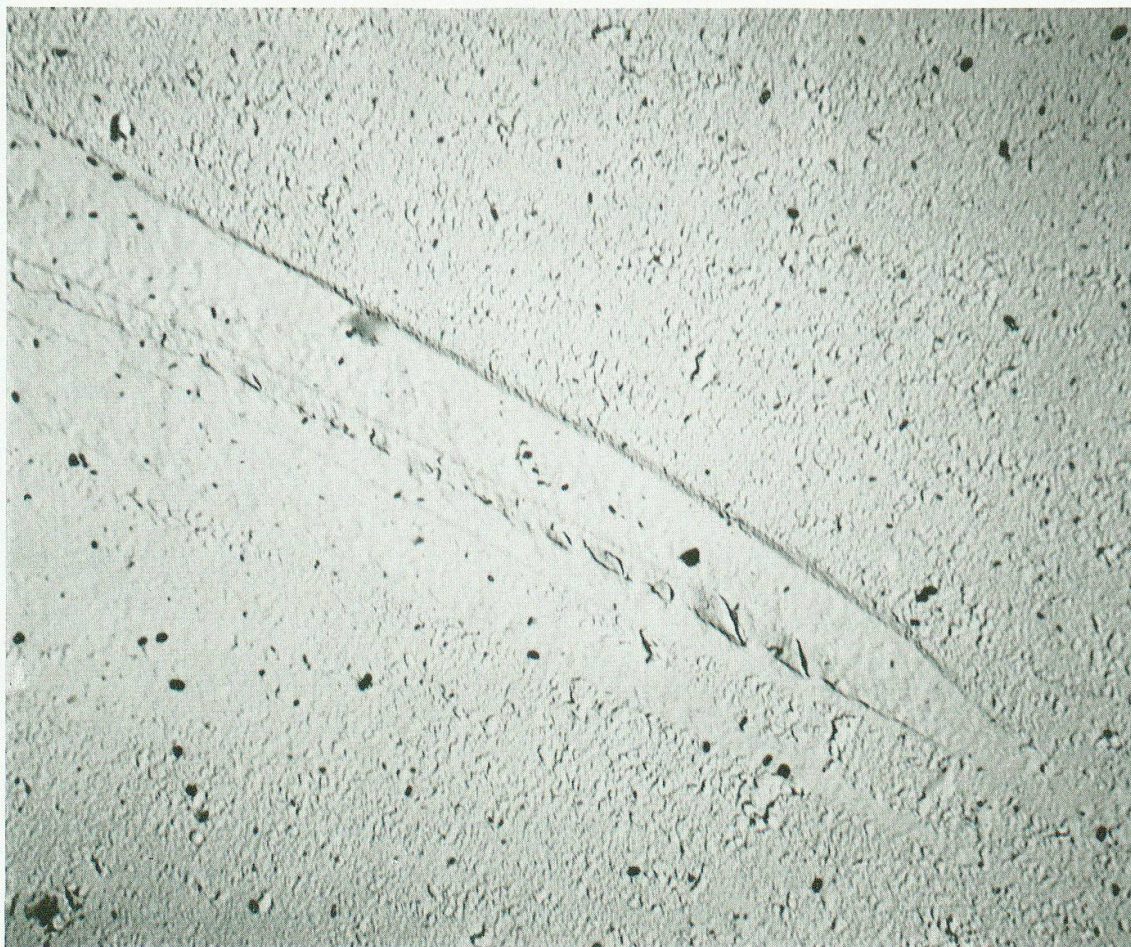


Bild 11.

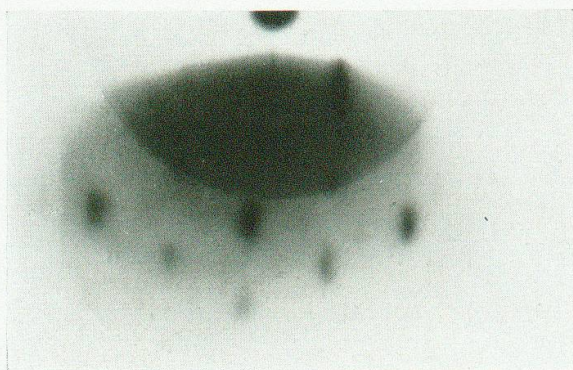


Bild 12a.

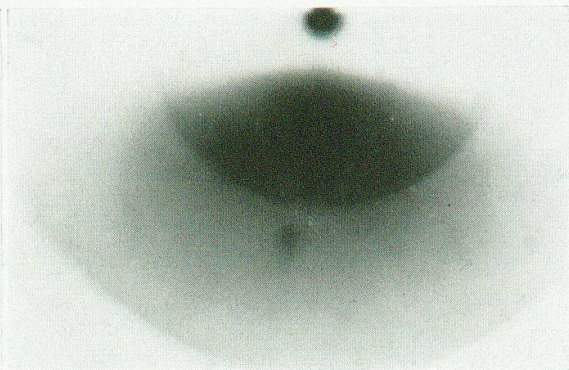


Bild 12b.

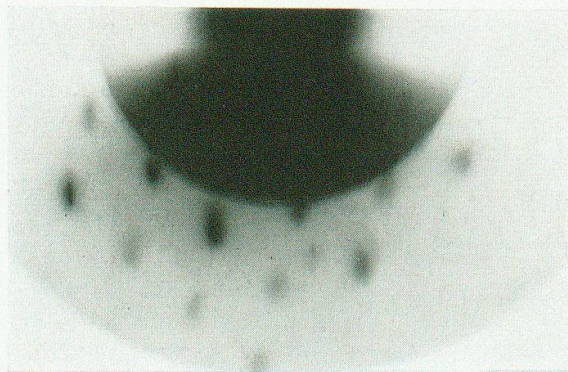


Bild 13a.

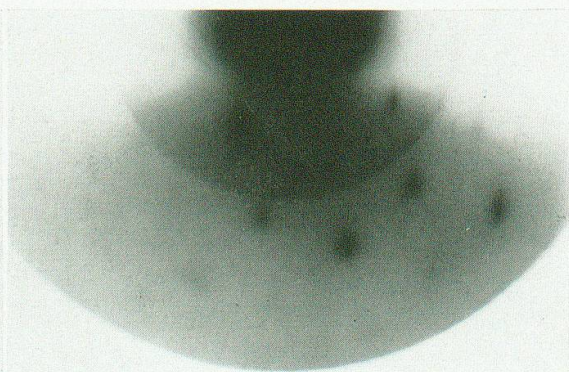


Bild 13b.