

Weiter zeigen die vorausgegangenen Überlegungen, daß eine automatische Regelung des Ofendruckes, des Brennstoffluftgemisches, der Einlegung und evtl. auch der Temperatur wesentliche Vorteile bringt. Die Regelung vermindert weitgehend die Einflüsse ungewollter Veränderungen in der Druckverteilung und Gemischeinstellung und macht die Ofenführung unabhängiger von der Sorgfalt und den Kenntnissen des Bedienungspersonals.

5. Zusammenfassung.

Die Zusammenhänge zwischen Wärmeverbrauch und Schmelzleistung eines Ofens wurden schon häufig diskutiert. Nach einer Erörterung der älteren Arbeiten werden die vom Ofenausschuß der Society of Glass Technology in Sheffield vorgeschlagene Performance-Formel wiedergegeben und ihre Vor- und Nachteile besprochen.

Es wird weiter gezeigt, daß sich der Wärmeverbrauch jedes Ofens aus dem für den betreffenden Ofen typischen Leerwert und einem zweiten im wesentlichen von der

Schmelzleistung abhängigen Wert zusammensetzt. Leerverbrauch und der Proportionalitätsfaktor für den Einfluß der Schmelzleistung können für einen Ofen theoretisch als konstant betrachtet werden, so daß sich eine Gerade ergibt, die die Abhängigkeit zwischen Wärmeverbrauch und Schmelzleistung eines Ofens darstellt. Betriebsbeobachtungen zeigen, daß der tatsächliche Verbrauch bis zu $\pm 15\%$ von der theoretischen Linie abweicht. Die Ursachen hierfür liegen einmal darin, daß die Feueinstellung den Schwankungen der Schmelzleistung nicht schnell genug folgt, zum andern in betrieblichen Maßnahmen sowie nicht zuletzt in der Wirkung ungewollter Veränderung äußerer Betriebsbedingungen. Das Ausmaß dieser Schwankungen zeigt, welche Bedeutung die automatische Regelung besitzt, die diese Schwankungen weitgehend selbsttätig ausgleicht.

Es wird empfohlen, zeitliche Veränderungen von Wärmeverbrauch und Schmelzleistung und ihre gegenseitige Abhängigkeit für jeden Ofen täglich und im Monatsmittel aufzutragen.

Schrifttum.

[1] GÜNTHER, R.: Begriffe im Ofenbau. Einheitliche Bezeichnungen für Betriebskenngrößen und für Bauteile von Glasschmelzwannen. Fachausschußbericht Nr. 49 der DGG, Frankfurt (M) 1953.
 [2] FRIEDMANN, W.: Some technical proposals and data for an examination of the thermal performance of glass melting tanks. J. Soc. Glass Technol. **20** (1936) S. 596 bis 639 T.
 [3] MOORSHEAD, W. A.: Proposals for a standard basis for the expression of tank furnace performances. J. Soc. Glass Technol. **20** (1936) S. 640—650 T.
 [4] GÜNTHER, R.: Wärmeverbrauch von Wannenöfen (bezogen auf die wichtigsten Wannentypen). Glastechn. Ber. **20** (1942) S. 108—117.
 [5] The assessment of the thermal performance of tank furnaces for melting glass. A Report by the Furnace Committee of the Soc. of Glass Technol. J. Soc. Glass Technol. **28** (1944) S. 33—52 T. [Ref. Glastechn. Ber. **22** (1948/49) S. 345—346. Dieses Sammelreferat berichtet zugleich über 9 andere Arbeiten zum gleichen Thema.]
 [6] GOULD, C. E.: The use of the furnace performance formula for estimating the coal consumption of glass melting tanks. J. Soc. Glass Technol. **36** (1952) S. 330 bis 345 T. [Ref. Glastechn. Ber. **27** (1954) S. 21.]
 [7] TOOLEY, F. V.: Handbook of glass manufacture. New York: Ogden Publ. Co. 1953.
 [8] MOORSHEAD, W. A.: Principles underlying the calculation of furnace performance. J. Soc. Glass Technol. **25** (1941) S. 270—288 T. [Ref. Glastechn. Ber. **22** (1948/49) S. 345.]
 [9] BULLE, K.: Der Faktor m der Gleichung $Q=L+mS$. Unveröffentlichtes Manuskript. (27008)

DK 666.163.37:539.213.26:539.27:621.923.7

Das Polieren von Glas. Teil II: Technische Politur des Flachglases*).

VON ERNST BRÜCHE und HELMUT POPPA, Mosbach.

Aus dem Physikalischen Laboratorium Mosbach.

(Eingegangen am 6. Februar 1956.)

In einer früheren elektronenmikroskopischen Arbeit wurde der Polierprozeß an Glasproben untersucht, bei denen mit Zirkonoxyd und Pechschale (wie in der optischen Industrie üblich) poliert worden war. Die Untersuchung wurde fortgesetzt und ergänzt, in dem Glasproben aus der Tafelglas-Industrie bei Politur mit Eisenoxyd und Filz nach den gleichen Methoden studiert wurden. Die Aufnahmen zeigen die grundsätzliche Gleichartigkeit des Polierprozesses bei beiden Arbeitsverfahren. Der Beginn des Prozesses besteht in einer Zerfurchung des Oberflächengebirges mit plastischer Deformation. Die sich schnell bildende glatte Oberfläche mit eingelagerten Schleifgrübchen wird während der Hauptdauer des Polierens laufend abgetragen. Höchstens im letzten Stadium des Auspolierens jedes Grübchens spielen Verschmierungen eine Rolle. Der Polierprozeß wird nach dem Abtragen der Grübchenschicht weitergeführt, um auch die von Sprüngen aufgelockerte Schicht darunter abzutragen und zu homogenisieren. Die vorgelegte Darstellung beschränkt sich auf die wichtigsten Erscheinungen.

In dem ersten Teil dieser Untersuchung [1] wurde versucht, ein anschauliches Bild des Poliervorganges durch zahlreiche elektronenmikroskopische Aufnahmen zu gewinnen, die von zwölf Proben verschieden lang polierten Glases ($\frac{1}{4}$ bis 100 Minuten) aufgenommen worden waren. Diese Glasproben waren „optisch poliert“ worden, d. h. sie waren — wie in der optischen Industrie üblich — mit Pechschale unter Verwendung wertvoller Oxyde (Uni-Oxyd: 70% Zirkonoxyd und

20% Ceroxyd, 10% weitere Beimengungen) poliert worden¹⁾.

In Übereinstimmung mit älteren Autoren muß das Schleifen grundsätzlich vom Polieren unterschieden werden: Während beim Schleifen Material durch Herausbrechen und Heraussprengen schnell abgetragen

¹⁾ Zur kurzen Ausdrucksweise sei der in Teil I untersuchte Polierprozeß als „optische Politur“, der in diesem Teil interessierende als „technische Politur des Flachglases“ oder einfach „technische Politur“ bezeichnet.

*) Teil I: Glastechn. Ber. **28** (1955) S. 232—243.

wird, wobei eine Oberflächenschicht in der Stärke mehrerer Lichtwellenlängen laufend aufgebrochen bleibt, handelt es sich beim Polieren erstens um die schonende Abtragung dieser von Tälern und Rissen durchfurchten Schicht und zweitens um die Glättung der Oberfläche bis auf kleine Bruchteile einer Wellenlänge. Dabei wird die Schicht mindestens bis zur Tiefe der Täler abgetragen, während Risse durch plastisch gewordenen Glas verschmiert werden können. In der Diskussion über die Vorstellung von BEILBY [2] über eine dünne plastische Oberflächenschicht wurde erkannt, daß es zu ihrem Verständnis notwendig ist, eine Erstarrungszeit des Glases nach Entlastung in der Größenordnung von 10^{-4} Sekunden anzunehmen.

Nach der Veröffentlichung von Teil I waren die Ergebnisse Gegenstand von Diskussionen [3, 4], bei denen Glasfachleute aus Wissenschaft und Technik auf die Kompliziertheit der Vorgänge und auf die Verschiedenartigkeit der einzelnen Polierarten hinwiesen und rieten, auch das Polieren, wie es in der Spiegelglasfertigung mit Filzscheiben und Eisenoxyd durchgeführt wird, zum Vergleich zu untersuchen. Die Vereinigten Glaswerke, Werk Stolberg, stellten uns das erforderliche Material an Polierproben freundlicher Weise zur Verfügung.

1. Technischer Polierprozeß, Ausgangsmaterial und Technik der Elektronenaufnahmen.

Gegenüber dem Glasschleifen und Polieren in der Optik, in der Kugelflächen von errechneten, von Fall zu Fall verschiedenen Radien verlangt werden, kommt es bei der Spiegelglasfertigung nur auf ebene Flächen an. Auch die Dicke spielt nicht jene entscheidende Rolle wie bei einer optischen Linse. Dafür müssen Spiegelglasscheiben von mehreren Quadratmetern Größe einwandfrei und in großen Mengen hergestellt werden.

Die moderne Spiegelglasindustrie bedient sich maschineller Verfahren, bei denen z. B. 3 m breite Platten aus der Wanne gezogen und dann über Fließtische geführt und dabei bearbeitet werden [5]. Nach Temperung und Kühlung kommt das Band auf den Schleiftisch, auf dem es gleichzeitig beiderseitig erst mit grobem und dann immer feinerem Sand durch unter und über der Platte umlaufende Scheiben glatt und auf Dicke geschliffen wird. Nach Abschneiden geeigneter Längen von einigen Metern werden die so erhaltenen Platten auf den Poliertisch aufgelegt, auf dem sie erst auf der einen und nach Umwenden auf der anderen Seite durch große Polierfilzscheiben bearbeitet werden. Es liegen jeweils drei Scheiben, sich etwas in ihrem Wirkungsbereich überdeckend, nebeneinander, die das langsam durchgeschobene Glas in der vollen Breite polieren. Die Scheiben werden dabei von der Achse aus mit Poliermittel (Fe_2O_3) in wäßriger Aufschwemmung beschickt. Die Polierflüssigkeit wird im Kreislauf dauernd mit frischem Poliermittel versetzt und den verschiedenen Scheibengruppen zugeführt. Die Poliergruppen arbeiten zunächst mit viel, dann immer weniger Korn und schließlich mit reinem Wasser. Der Filz ist am Anfang der Benutzung locker und porös. Am Ende bildet er einen mit dem verbrauchten Poliermittel verklebten und zusammengedrückten festen Kuchen. Die untersuchten Proben waren am seitlichen Rand der

Glastafeln herausgeschnitten worden, und zwar je eine Probe nach jedem Poliergang.

Für die elektronenmikroskopischen Aufnahmen wurde das in Teil I erwähnte Kohlehaut-Verfahren weiter verbessert, so daß auch von relativ rauen Oberflächen (Anfangszustand) gute Aufnahmen zu erhalten waren und größere zusammenhängende Bezirke (bis 0,5 mm) ohne tragendes Netz präpariert werden konnten. Zu ihrer Abbildung wurde die Vergrößerung des Elektronenmikroskops auf 80fach herabgesetzt und die Gesichtsfeldblende entsprechend vergrößert. Bild 1 zeigt eine solche Aufnahme, und zwar eine Probe nach dem Durchgang durch die erste Reihe von Polier-elementen²⁾.

Es wurden Lack- und Doppelabdrucke verwendet. Bei den Doppelabdrucken dienten die drei gleich geeigneten Kunststoffe Palavit³⁾, Plexiglas und Polystyrol als Abdruckmaterial. Die Bedampfung erfolgte mit Platin unter etwa 20° Neigung zur Matrize. Eine senkrechte Bedampfung mit Kohlenstoff sorgte für eine stabile Tragfolie. Alle gezeigten Aufnahmen geben auf Grund der Präparation die Glasoberfläche gewissermaßen von „innen“ wieder, so als ob der Betrachter aus dem Innern des Glases heraus auf die Oberfläche schauen würde. Bis auf Bild 1 und 2 sind die gezeigten Aufnahmen umkopiert, d. h. sie geben nicht das Leuchtschirmbild und nicht den Abzug seiner Fotografie, sondern das fotografische Negativ wieder, auf dem für Elektronen undurchlässige Objektteile hell und Bedampfungsschatten dunkel erscheinen.

2. Grunderscheinungen der optischen und technischen Politur.

Ohne auf Einzelheiten einzugehen, sei zunächst die Frage gestellt, ob zwischen der optischen Politur (mit Zirkonoxyd und Pech) und der technischen Politur (mit Eisenoxyd und Filz) grundsätzliche Unterschiede bestehen, oder ob die Grundvorgänge identisch sind.

Als Grundvorgänge der optischen Politur war im Teil I zusammenfassend festgelegt:

1. Unter der Wirkung der Polierkörner wird die geschliffene Oberfläche zerfurcht, wobei die plastische Verformung des Glases (SMEKAL [6]) unter hohem Druck eine wichtige Rolle spielt.
2. Es bilden sich — in Übereinstimmung mit den Beobachtungen von LORD RAYLEIGH [7] und den Vorstellungen von BEILBY [2] — sogleich ebene, glatte Bezirke auf der Oberfläche, die mit fortschreitendem Polierprozeß wachsen und schließlich die ganze Fläche einnehmen.
3. Die Oberflächenschicht wird während des Polierprozesses laufend abgetragen, bis die Lage der Oberfläche die Talsohlen der tiefsten Schleifgrübchen unterschritten hat.

²⁾ Leider war die Anpassung des EM erst im Endstadium der Untersuchung vorgenommen worden, ebenso wie uns erst relativ spät durch Entgegenkommen der Leitz-Werke ein Ortholux-Lichtmikroskop mit Phasenkontrast zur Verfügung stand, das die Untersuchung sehr erleichterte.

³⁾ Für die Überlassung des Palavits danken wir der Firma Kulzer & Co., Friedrichsdorf (Taanus).

4. Ein „Zuschmieren“ im engeren Sinn der mechanischen Vorstellung von BELBY darf nur im Anfangsstadium und im Endstadium des Polierens angenommen werden. Verschmierungen konnten nur bei sehr flach gewordenen „Nestern“ unmittelbar vor dem Verschwinden beobachtet werden.

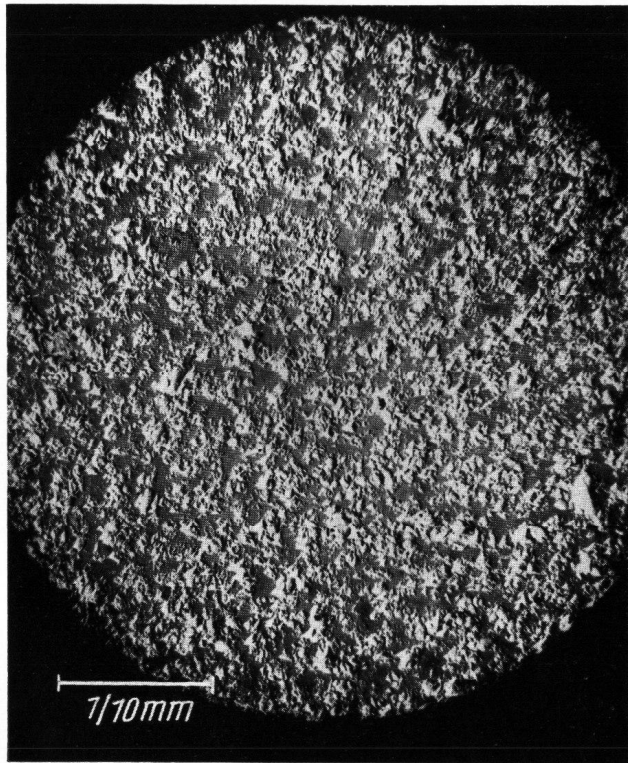


Bild 1. Spiegel-Flachglas, geschliffen und anpoliert nach dem ersten Poliergang. Aufnahme des vollen Gesichtsfeldes in geringer Vergrößerung (200 ×). Lackabdruck mit Kohle verstärkt und mit Platin schräg bedampft. Ansicht der Glasoberfläche von innen.

Bevor diese Grundvorgänge der optischen Politur mit denen der technischen Politur verglichen werden, sei zunächst der Ausgangszustand für beide Politurarten, die feingeschliffene Oberfläche, nochmals betrachtet. Da das Schleifen vor der optischen und technischen Politur gleichartig mit einer Eisenschale erfolgt, sind grobe Unterschiede bei den beiden Versuchsreihen nicht zu erwarten und auch nicht festzustellen. Der Vorgang besteht in Reißbildungen im Glas und im Herausbrechen von Schollen aus der Oberfläche. Bild 2 zeigt eine derartige Fläche einer technischen Flachglasprobe. Die Vergrößerung ist, um Einzelheiten besser hervortreten zu lassen, 15mal so groß wie bei Bild 1. Die Struktur der Schlißfläche entspricht im wesentlichen dem in Teil I gezeigten Bild 2. Die bei der optischen Ausgangsprobe vorhandenen, fast anpolierten Bezirke, die an erstarrte Lavafelder erinnern und die auf die Wirkung von zermahlenem Schleifkorn zurückgeführt wurden, sind jedoch nicht so ausgeprägt. Um die Verhältnisse hier genau zu überschauen und Aussagen für den Praktiker machen zu können, wäre es notwendig, den Schleifprozeß genauer zu untersuchen.

Als Charakteristikum für den Beginn des Polierprozesses zeigen die Bilder 3 bis 6 Glasoberflächen, wie sie sich etwa nach 5% der gesamten Polierzeit ausbilden, d. h. nachdem die Glasscheibe den ersten Satz der

Polierscheiben durchlaufen hat. Die Aufnahmen entsprechen dem Bild 1 mit dem Unterschied, daß die Vergrößerung von Bild zu Bild jeweils um den Faktor 3 höher gewählt wurde, wie es Bild 7 veranschaulicht.

Diese Bilder überraschen insofern, als auf den von ihnen dargestellten Oberflächen der Polierprozeß schon merklich weiter fortgeschritten ist als auf den entsprechenden Oberflächen nach etwa 5% der optischen Politur. Es ergibt sich damit eine im weiteren Ablauf noch deutlicher werdende Erscheinung: Die Vorgänge bei der Spiegelglaspolitur sind offenbar robuster und laufen infolgedessen schneller ab als die vorsichtigere Bearbeitung optischer Gläser. Allerdings darf die Verschiedenartigkeit der Gläser nicht übersehen werden. Bei verschiedener Flachglaszusammensetzung kann die notwendige Polierzeit im Verhältnis 1:2 schwanken. Eine Untersuchung der technisch polierten Oberflächen nach weniger als 5% der Polierzeit konnte nicht durchgeführt werden. Für diese sicher sehr aufschlußreiche Studie wird man nicht — wie im vorliegenden Fall — die Glasproben erst entnehmen, wenn die Glasplatte den ersten Satz der Polierscheiben verlassen hat, sondern während des Durchganges durch den Poliersatz. Die Proben, die für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung standen, waren zeitlich äquidistant, während sie bei der in Teil I veröffentlichten Untersuchung des optischen Poliervorganges den interessantesten ersten Glättungsprozeß gegenüber dem folgenden langen Abtragungsprozeß bevorzugten.



Bild 2. Spiegelglas, fein geschliffen; 3000 ×.

Doch auch ohne genauere Kenntnis der Oberflächenbilder innerhalb der ersten 5% des technischen Poliervorganges steht die plastische Verformung als eine Grunderscheinung (SMEKAL) außer Zweifel, und man wird den Schluß ziehen, aus den gezeigten und vielen anderen ähnlichen Bildern, daß die eingangs erwähnten Grundvorgänge 1 und 2 bei optischer und technischer Politur übereinstimmen.

Der Grundvorgang 3 besteht bei der optischen Politur in einer laufenden Senkung der glatten Oberfläche, womit ein zunehmendes Verschwinden der Schleifgrübchen verbunden ist. Er wird durch die

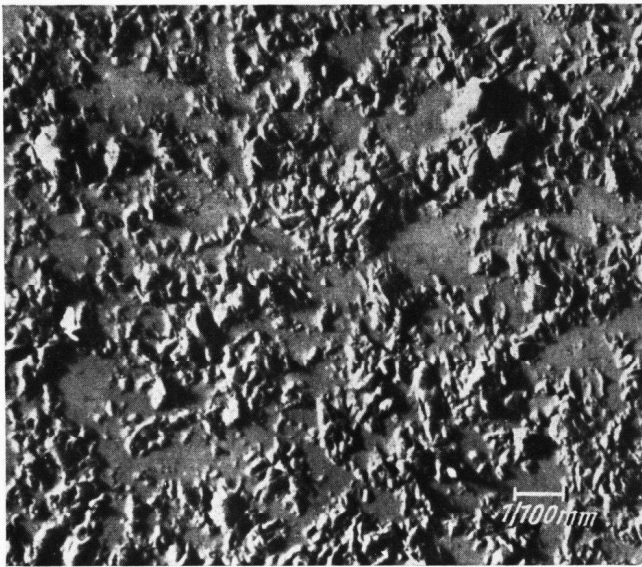


Bild 3. Ausschnitt aus Bild 1 in höherer Vergrößerung und nach Umkopieren des Bildes (vgl. Abschn. 1); 600 ×.

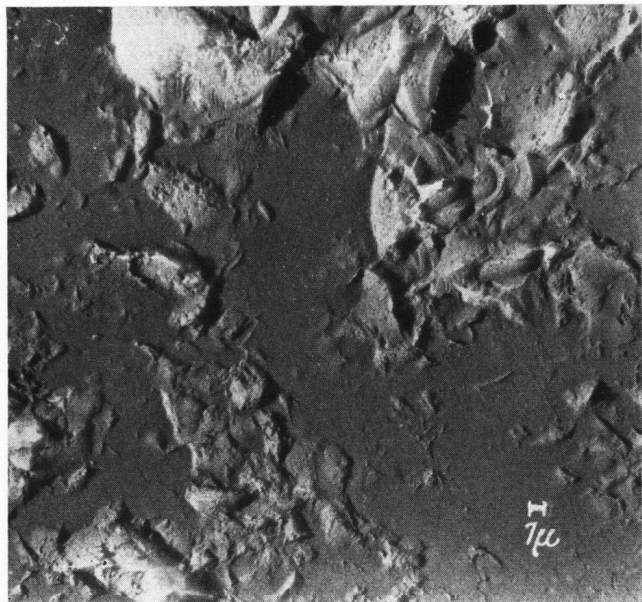


Bild 4. Wie Bild 3; 1800 ×.

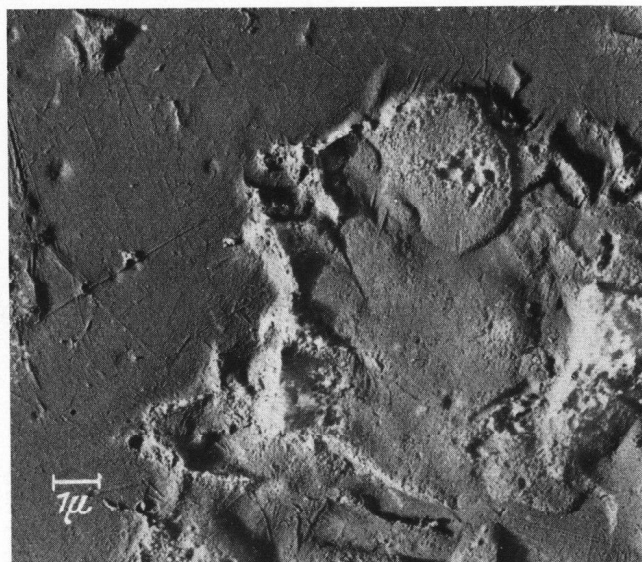


Bild 5. Wie Bild 3; 5400 ×.

neuen Aufnahmen ebenfalls bestätigt. Hierzu seien in den Bildern 8 bis 10 Aufnahmen nach dem zweiten Poliergang in wachsender Vergrößerung wiedergegeben. Diese und die späteren Aufnahmen zeigen die glatte Oberfläche mit den eingelagerten Poliergrübchen. Daß ihre Zahl geringer wird, läßt der Vergleich der Übersichtsbilder von großem Gesichtsfeld (Bild 3 und 8) erkennen. Bild 11 gibt hierzu noch ein elektronen-

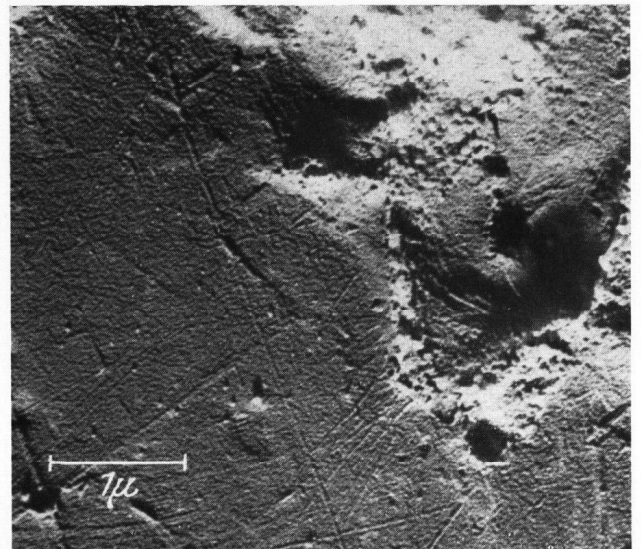


Bild 6. Wie Bild 3; 16200 ×.

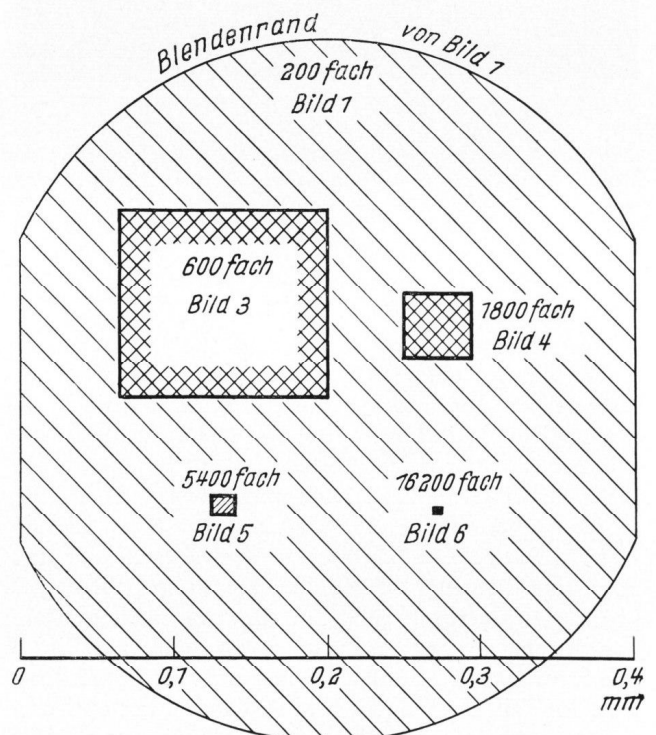


Bild 7. Vergleichsschema der Bildausschnitte bei den verschiedenen Vergrößerungen der Bilder 1 bis 6.

mikroskopisches Übersichtsfeld nach dem vierten Poliergang wieder. Auch auf Lichtbildern ist die Abnahme der Poliergrübchen, wenn auch nicht in den Einzelheiten, verfolgbar.

Der etwas zweifelhafte Grundvorgang 4, nämlich das gelegentlich beobachtete Zuschmieren der Löcher, erhält durch die Proben der technischen Politur

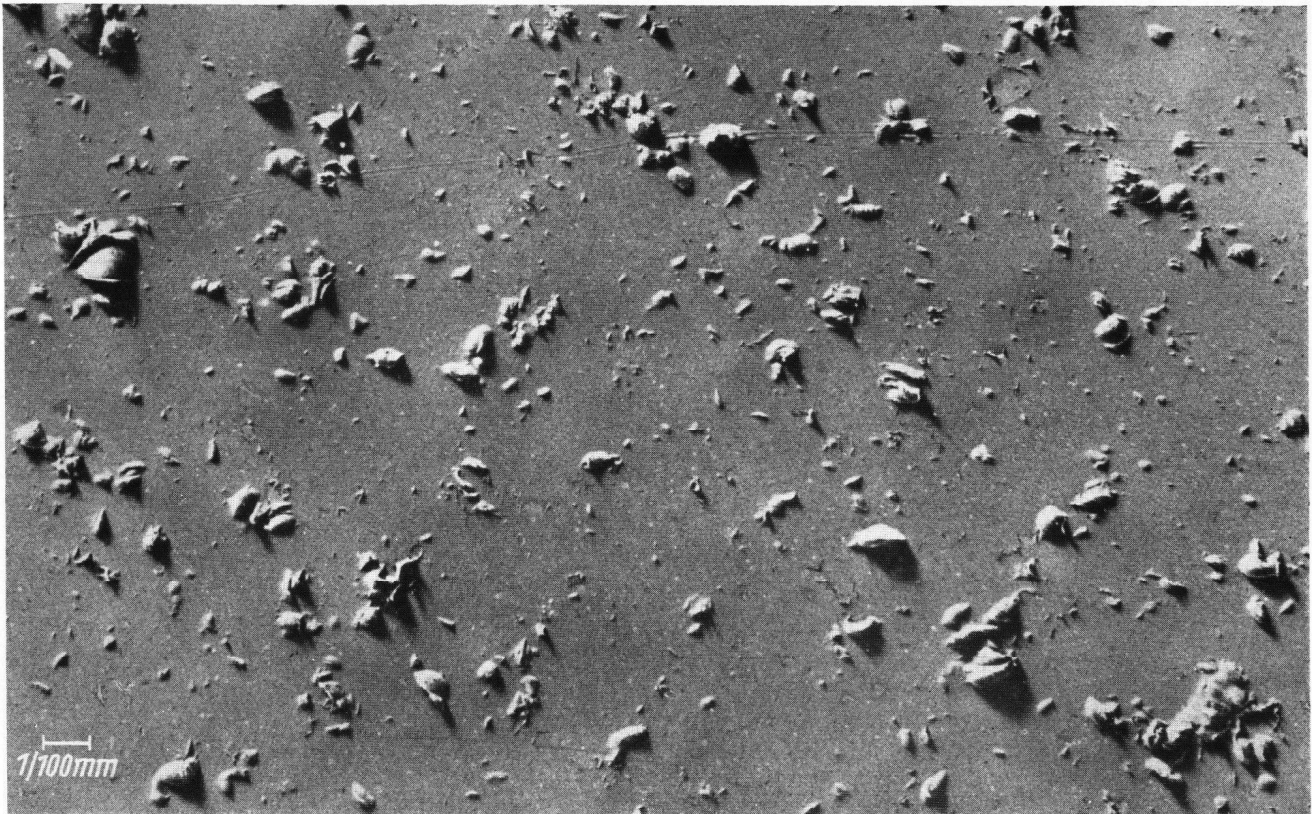


Bild 8. Spiegelglas wie bei Bild 1 aber nach dem zweiten Poliergang; 600 ×.

keine entscheidende Bestätigung. Die Schärfe der Lochränder in den Bildern 9 und 10 sowie zahlreiche weitere Aufnahmen besagen eindeutig, daß von einem Zuschmieren größerer Löcher in diesen Fällen keine Rede sein kann. Der Prozeß der plastischen Verformung ist vielmehr auf eine außerordentlich dünne Oberflächenschicht beschränkt und kann daher für die Gestaltung der Oberfläche erst dann unmittelbare Bedeutung gewinnen, wenn es sich um sehr flache Nester oder Risse handelt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Grunderscheinungen beim optischen und technischen Polierprozeß, soweit sie mit dem Elektronenmikroskop zu beobachten sind, im Prinzip gleichartig verlaufen.

3. Einzelheiten der optischen und technischen Politur.

3.1. Unterschied in der Rauhmigkeit.

Bei den Untersuchungen der optischen Politur [1] waren bei kurzer Polierdauer geebnete Flächen mit einzelnen Löchern zu beobachten. Nachdem die Präparationstechnik nunmehr verbessert ist, sei diese Beobachtung nochmals an zwei Bildern von hoher Vergrößerung demonstriert (Bild 12 und 13). Die Proben waren nach $6\frac{2}{3}$ Minuten (= 7% der gesamten) Polierzeit erhalten worden. Die geebneten Oberflächenbezirke zeigen noch eine Fülle von Kratzern, die sich überkreuzen, Löcher, Nester und im ganzen eine erhebliche



Bild 9. Wie Bild 8; 1800 ×.

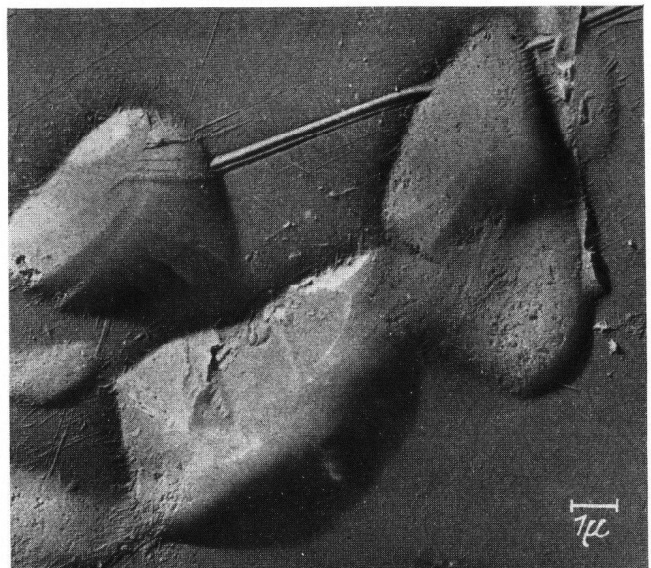
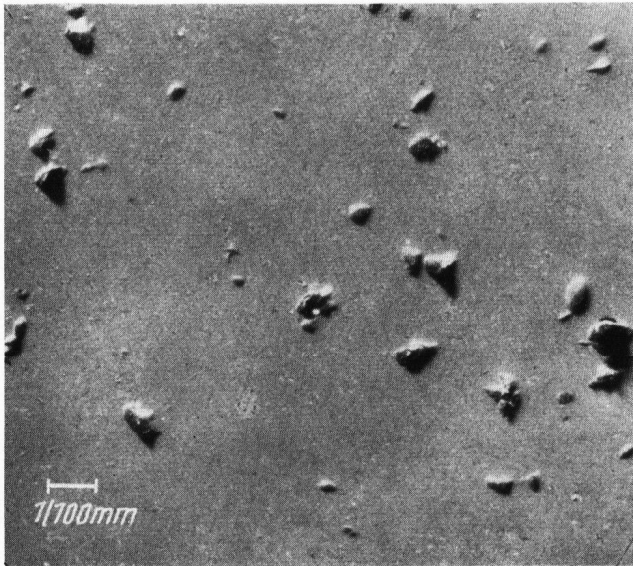
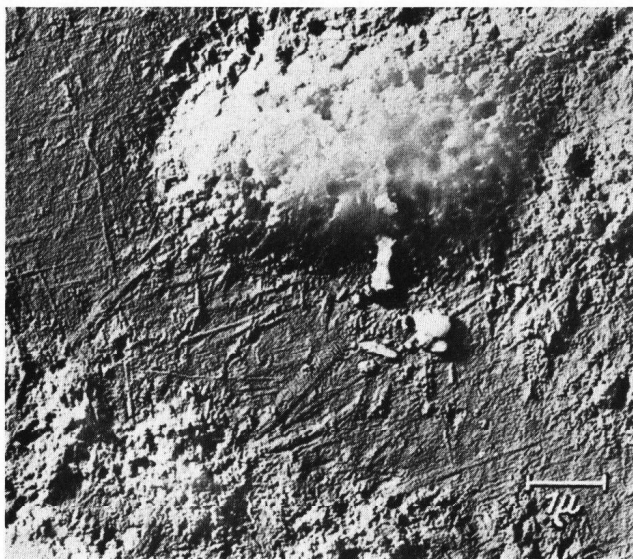


Bild 10. Wie Bild 8; 5400 ×.

Bild 11. Spiegelglas nach dem vierten Poliergang; 600 \times .Bild 12. Optisch poliertes Glas aus Teil I der Untersuchung; 2500 \times .Bild 13. Wie Bild 12; 10000 \times .

Rauhigkeit. Zwei entsprechende Oberflächenstellen des technisch polierten Materials nach dem zweiten Poliergang (10% der gesamten Polierzeit) gaben die Bilder 9 und 10 wieder. Hier ist eine wesentlich glattere Oberfläche vorhanden, in die die Schleifgrübchen und Kratzer scharf abgegrenzt eingelagert sind.

3.2. Sprunggrübchen.

In Bild 14 sind Risse (a) und scharfe Kanten von ausgeprägten Sprunggrübchen (b) zu erkennen, die anscheinend erst während des Polierprozesses ausgebrochen sind.

Das sehr instruktive Bild 15 zeigt darüber hinaus, wie die scharfen Kanten der Schleifgrübchen dem Angriff einzelner Körner ausgesetzt sind. Diese Körner werden offenbar aus dem Innern der Grübchen herausgetragen und reißen die Oberfläche nahe dem Rande in groben Kratzern auf.

3.3. Auffüllung der Schleifgrübchen.

Obwohl in der Literatur mehrfach angegeben wird, daß die Schleifgrübchen mit Substanz angefüllt seien, bzw. beim Polierprozeß durch Glas oder Polierkörner oder Produkte des Polierprozesses angefüllt würden, konnten bei den vorliegenden Untersuchungen Polierkörner nur einmal einwandfrei festgestellt werden. Es waren etwa 50 Körner, die dichtgedrängt an der tiefsten Stelle einer Mulde angehäuft waren. Glas- oder Glasprodukte wurden ebenfalls nicht häufig gefunden, obwohl einige hundert Aufnahmen daraufhin geprüft wurden. Bei den Bildern 9 und 10, 14 und 15 waren kaum Andeutungen von Einlagerungen erkennbar, während man bei den Bildern 12 und 13 optisch polierten Glases eher davon sprechen könnte. Im Endstadium des Auspolierens flacher Mulden bemerkt man dagegen meist in der etwas vertieft liegenden Fläche jene charakteristische Rauigkeit, die mit einer Auffüllung zusammenzuhängen scheint (Bild 16). Auch die in Bild 17 wiedergegebene Probe von technisch poliertem Glas zeigt an den flachen Stellen diesen Auffüllungsprozeß.

3.4. Risse.

Bild 17 demonstriert auch die häufig zu beobachtenden Risse, die bei Spiegelglas selbst nach längerem Polieren erkennbar sind und die meist als Rückstände von Schleifsprünge gedeutet werden müssen. Sie beginnen wie bei Bild 14 an stark zerklüfteten Brüchen und führen mit unvermittelten Wendungen über das ganze Gesichtsfeld. Bei Bild 17 ist das Sprungfeld, das meist nur mit Mühe auf den Originalen zu verfolgen ist, nachgezeichnet worden. Das Bild läßt den Zusammenhang der einzelnen Grübchen erkennen und zeigt, wie auch noch bei diesem Glättungsstand die oberste Schicht des Glases von Sprünge zerrissen ist. Es ist daher vernünftig, daß der Praktiker noch nicht mit dem Abtragen der Oberfläche aufhört, sobald fast alle Grübchen verschwunden sind, sondern weiterpoliert, d. h. die Oberfläche weiter abträgt, um sicher auch die zunächst unsichtbaren Sprungsysteme in der nächsten Schicht möglichst zu beseitigen.

4. Zeitlicher Ablauf des Poliervorgangs.

Wenn man beim Ablauf des Poliervorgangs nicht den Einzelprozeß an einem Grübchen, sondern ihre

Gesamtheit auf der Fläche betrachtet, kann man einige charakteristische Phasen unterscheiden:

Auf der feingeschliffenen Oberfläche beginnt eine Zerfurchung der höchsten Erhebungen durch Polierkörner, wobei plastische Verformungen und Verschmierungen des Materials eine wichtige Rolle spielen. Neue Sprünge entstehen im allgemeinen nicht mehr; es mag aber vorkommen, daß sich eingesprungene Risse infolge der relativ großen Kräfte vergrößern und daß Stücke herausgesprengt werden (Bild 14). Dieser Vorgang bis zur Herstellung einer in erster Näherung geebneten Oberfläche verläuft unter der hohen Kraftwirkung einzelner, bevorzugt zur Wirkung kommender Körner sehr schnell, so daß bei der technischen Politur diese Phase nach dem Durchlauf des ersten Satzes der Polierscheiben bereits abgeschlossen ist. Man sieht (im Gegensatz zu den kurzfristigen Unterbrechungen zur Probenentnahme bei optischer Politur) nur das Endergebnis einer anpolierten Fläche, bei der die geebnete Fläche bereits die Größe von etwa 50% der Gesamtfläche erreicht hat.

Die zweite Phase, deren Beginn man mehr oder minder willkürlich festlegen kann und vielleicht am besten von dem Zeitpunkt des Zusammenschlusses der geglätteten kleinen Bezirke an rechnet, ist durch die Einordnung der Polierkörner in eine gleichmäßige Arbeitsschicht gekennzeichnet, bei der jedes Korn nur eine geringe Kraftwirkung ausübt. Dem entspricht die zusammenhängende geglättete Oberfläche, in die die Schleifgrübchen eingelagert sind. Diese Phase ist die eigentliche Polierphase, bei der die Arbeitssphäre immer tiefer in das Glas eindringt, indem das Material teils mechanisch, teils chemisch abgetragen wird. Dabei vergrößert sich die polierte Fläche in dem entsprechenden Maße, wie die von den Schleifgrübchen eingenommene Fläche abnimmt.

An diese zweite Phase, in der die polierte Fläche zu fast 100% hergestellt wird, schließt sich eine dritte Phase an. Sie unterscheidet sich im Prinzip nicht von der zweiten Phase, hat jedoch nicht mehr die Aufgabe, die wenigen übriggebliebenen Grübchen zu beseitigen, sondern die von Rissen beschädigte Schicht unter den schon vorher abgetragenen Grübchen abzubauen.

Um klarer zu sehen, mag noch ein Blick auf die Statistik der Vorgänge geworfen werden. Bereits im Teil I waren Zweifel geäußert worden, ob das Polieren nicht in der halben oder drittel Zeit gegenüber der tatsächlich angewandten Polierzeit hätte erledigt werden können. Es hatte sich nämlich gezeigt, daß die Fläche bereits nach etwa 20 Minuten, d. h. nach 20% der gesamten Polierzeit, die damals für erforderlich gehalten wurde, weitgehend auspoliert und frei von Schleifgrübchen war.

Die neuen Untersuchungen bei technischem Spiegelglas ließen eine noch bessere zeitliche Ökonomie erkennen. Auch hier waren schon nach Durchlauf des zehnten Satzes von Polierscheiben — abgesehen von Kratzern — nur noch wenige fehlerhafte Stellen auffindbar. Eine rohe quantitative Abschätzung dieses Befundes spiegelt Bild 18a wider. Hier ist in der absinkenden Kurve die Anzahl der Störstellen pro mm² als Funktion der Zahl der durchlaufenden Polierscheiben-Sätze wiedergegeben. Wegen des logarithmischen Ordinatenmaßstabes springt allerdings die starke Abnahme der Störstellen nicht sehr ins

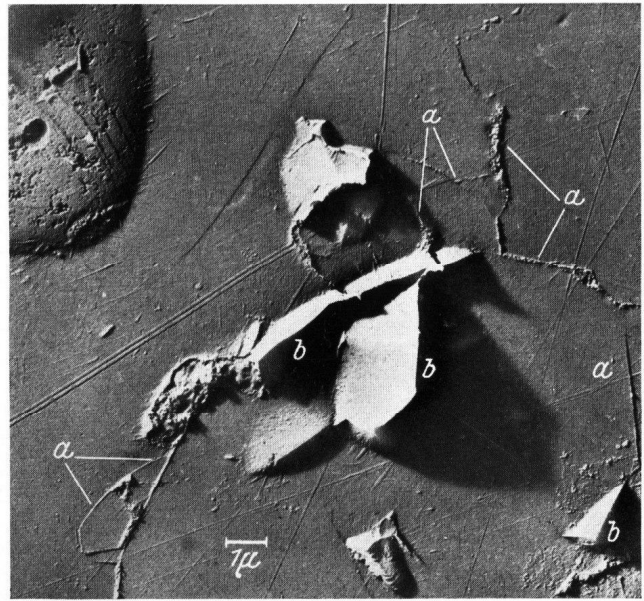


Bild 14. Einzelheit einer Polierprobe Spiegelglas nach dem zweiten Poliergang; 5000 ×. Es sind ältere Schleifgrübchen (b), junge Sprünge, Kratzer und Risse (a) zu erkennen.

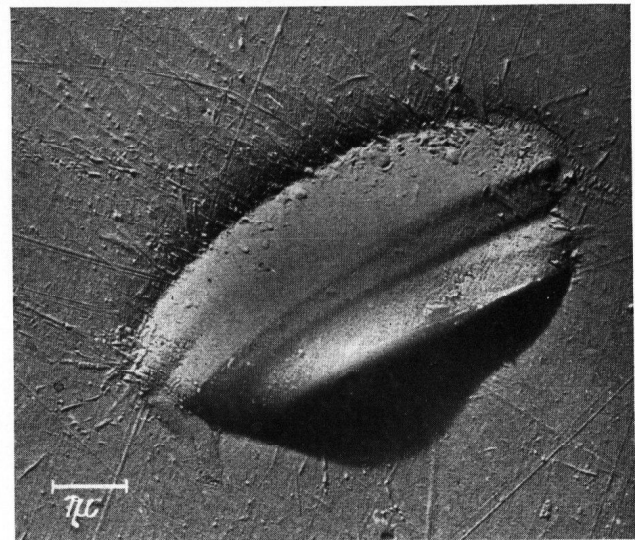


Bild 15. Einzelnes Schleifgrübchen nach dem siebenten Poliergang m. angekratzter Kontur, i. d. Tiefe völlig leer; 9500 ×.

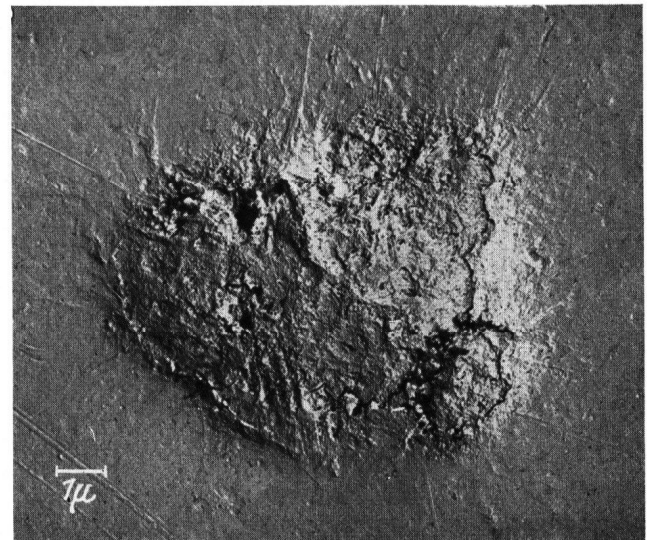


Bild 16. „Nest“, die Endphase eines Poliergrübchens bei optischer Politur aus Teil I nach 16 Min. Polierdauer; 6000 ×.

Auge. Deutlicher wird dies auf Bild 18b, wo in der ansteigenden Kurve das Verhältnis von störstellenfreier Fläche zur Gesamtfläche („Bedeckungsgrad“) in Prozenten dargestellt ist. Jeder Störstelle wurde dabei eine unpolierte Fläche von $50 \mu^2$ zugeordnet⁴⁾. Man sieht, daß der einwandfrei auspolierte Flächenteil schnell nach Beginn des Polierens steigt und bereits nach drei Poliergängen die 96%-Grenze überschreitet, d. h. geringer wird als der Lichtverlust an einer Scheibe ohne reflexvermindernden Belag. Nach zehn Poliergängen, d. h. nach dem Durchlauf durch die halbe Poliermaschine, ist der Verlustanteil bereits auf weniger als 0,1% zurückgegangen. Diesen Befund kann man so deuten: Die Poliermaschine, die einen der teuersten Arbeitsgänge bei der Spiegelglasfertigung durchführt und einen Engpaß der Fertigung darstellt, lief in diesem Fall auf einem nicht unerheblichen Teil des Bandes leer. Das hatte einen dreifachen Grund: Erstens arbeitete

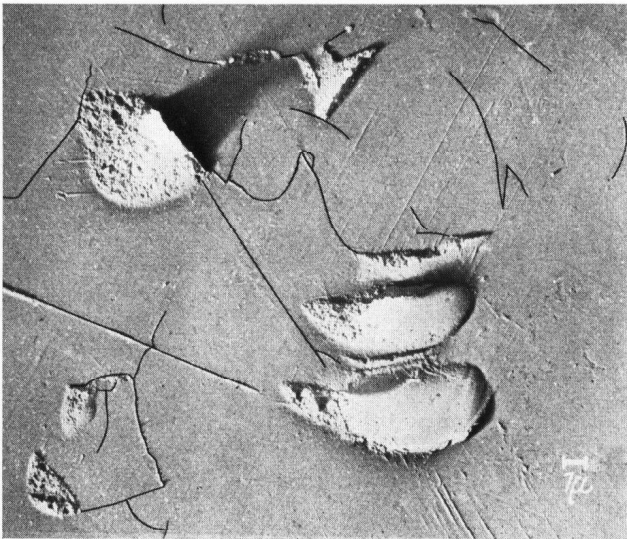


Bild 17. Spiegelglas, Gruppe von Schleifgrübchen, teilweise an den Rändern gefüllt mit nachgezogenen Glasrissen nach dem dritten Poliergang; $3000 \times$.

nach Mitteilung des Werkes die Poliermaschine, als die Proben entnommen wurden, zufällig mit einem anderen Tempo als sonst. Zweitens waren die Proben vom Rande entnommen worden, wo der Polierprozeß infolge des Überstandes der Scheiben mit höherem Polierdruck und daher intensiver erfolgt. Drittens ist — wie schon gesagt — ein gewisses „Überpolieren“ wegen der Mikrosprünge in der Schicht unterhalb der Grübchen an sich nicht überflüssig.

5. Die Rayleigh-Beilby-Schicht.

Die in Teil I entwickelten Vorstellungen über die Beilby-Schicht sind inzwischen vorgetragen [4] sowie durch statistische Betrachtungen und weitere Materialsammlung ergänzt worden. Das Beobachtungsmaterial und die Betrachtungen sollen demnächst ausführlich veröffentlicht werden, so daß hier ein zusammenfassender Hinweis genüge. Dieser Hinweis übergeht insbesondere die wichtige Frage, ob es sich bei der Oberflächenschicht überhaupt um Glas handelt.

⁴⁾ Eine genauere Ermittlung des von Grübchen eingenommenen Flächenteils wäre z. B. durch eine optische Flächenmessung unter Verwendung einer Fotozelle möglich.

Bei Annahme einer Erstarrungszeit von 10^{-4} Sekunden, die nach dem Verschwinden der Druckwirkung bis zum Wiedererstarren vergeht, kommt man zu dem Verständnis einer insgesamt plastischen Oberflächenschicht von einigen $m\mu$ Dicke⁵⁾. Das Vorhandensein dieser Schicht folgt nicht notwendig aus den vorliegenden Beobachtungen, steht aber mit ihnen in Einklang und entspricht in gewisser Hinsicht den Vorstellungen von BEILBY. Dieser hatte als Dicke der Schicht etwa $10 m\mu$ angenommen, d. h. etwa dieselbe Größenordnung, die sich hier abschätzen ließ. Dagegen konnte das Verschmieren der Oberflächenrauigkeit als bestimmender Prozeß des Polierens experimentell nicht bestätigt werden. Die plastische Schicht scheint vielmehr erst im Endstadium der Glättung eines sehr flachen Nestes hierfür Bedeutung zu gewinnen.

Die Beobachtungsbefunde stützen in gewissem Maße die Annahme der Beilby-Schicht als wichtigen Faktor des Polierprozesses. Die Deutung setzt neben der Annahme einer Erstarrungszeit voraus, daß die Polierkörner in die Glasoberfläche „einschneiden“. Auch hierfür findet man Hinweise in den Aufnahmen. Es wurde bereits erwähnt, daß Polierkörner, die beim Polieren aus einer Mulde im Glase herausgerissen werden, am Rande der Mulde deutliche Spuren hinterlassen, bevor sie sich wieder in die kräftemäßig ausge-

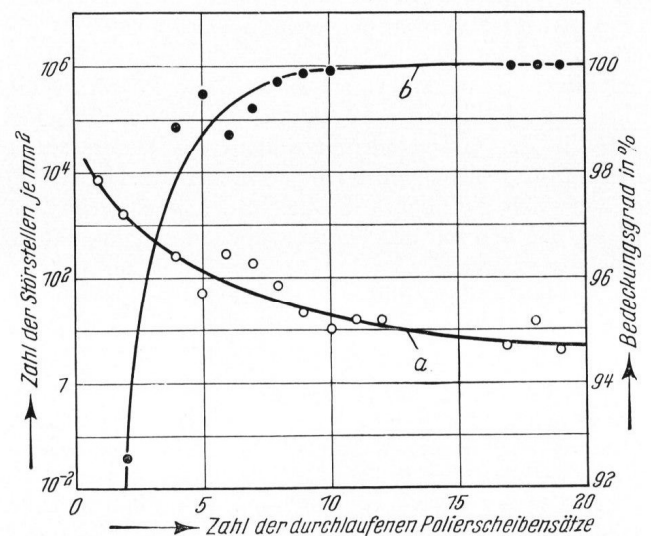


Bild 18. Abhängigkeit von der Polierzeit: (a) der Schleifgrübchenzahl pro mm², (b) der in Prozenten angegebenen auspolierten Fläche.

glichene Schicht einordnen (Bild 16). Daß die Körner scharfkantig sind, konnte allerdings in den Dimensionen von einigen $m\mu$, in denen sich der Ritzprozeß abspielt, nicht erwiesen werden. Daß die Polierkörner härter als Glas sind, ist dagegen auf Grund einer kürzlich erfolgten Mitteilung [8] wahrscheinlich, derzufolge Aluminiumoxyd die Mohs-Härte 8 bis 9 hat, während von Glas 6 bis 7 bekannt ist.

Trotz alledem kann man sich aber auch die Frage vorlegen, ob eventuell weiche Körner eine Bewegung der Oberfläche hervorbringen könnten und ob die Plastizität überhaupt erforderlich sei. Hierzu seien Versuche mit einer sehr harten Spindel aus nitriertem Stahl zum Vergleich herangezogen. Die Spindel lief in einer

⁵⁾ Statt $m\mu$ (Millimikron) heißt es nach dem Normblatt DIN 1301 nm (Nanometer), $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

weichen Bronzeschale mit Petroleum als Schmierung und Kühlung. Man sollte meinen, daß der nitrierte Stahl seine Oberflächenstruktur nicht ändert. Beobachtet wurde demgegenüber, daß der Stahl bei dem Lauf in Kratzer, die quer zur Bewegungsrichtung lagen, „hineinflöß“. Die während der Spindelbewegung übertragenen kleinen Impulse reichten offenbar aus, das Material in langsame Bewegung zu bringen. Auch bei Glas müßte das im Prinzip möglich sein, wenn es auch bei Vergleich der Geschwindigkeits- und Härteverhältnisse wenig wahrscheinlich zu sein scheint, daß dieser Prozeß einen merklichen Anteil an dem Glätten der Oberfläche hat.

Ungeklärt bleibt bei allen diesen Vorstellungen, die nur mechanische und elastisch-plastische Fragen betreffen, wie die nachgewiesene laufende Abtragung der Oberflächenschicht zustande kommt. Hier muß offenbar noch ein anderer Vorgang mitspielen, den das Elektronenmikroskop nicht zu zeigen vermag. Es liegt nahe, an chemische Vorgänge zu denken, wie sie besonders in russischen Arbeiten [9] zur Deutung der Abtragung herangezogen worden sind. Danach dient der Polierprozeß zur Beseitigung der sich immer wieder auf dem freigelegten Glas schnell bildenden Schutzschichten.

6. Schlußbemerkung.

Die vorliegende Arbeit sollte nicht Einzelprozesse betrachten und auch nicht eine geschlossene Theorie der Poliervorgänge geben. Die viel bescheidenere Aufgabe war es vielmehr, den praktischen Verlauf eines wichtigen technischen Prozesses mit modernen optischen Mitteln zu verfolgen, um dadurch eine gewisse Ordnung in die sich teilweise widersprechenden Angaben in der Literatur⁶⁾ zu bringen. Es mag sein, daß bei eingehender Auswertung des Materials in den Archiven von Firmen und Instituten diese Untersuchung zum großen Teil überflüssig gewesen wäre. Doch wird jenes Material im allgemeinen der Öffentlichkeit nicht zur Kenntnis kommen.

Die Untersuchung zeigte die grundsätzliche Gleichartigkeit des Polierprozesses in der optischen und in der Spiegelglasfertigung, wodurch unsere früheren Folgerungen auf eine sichere Basis gestellt sind. So weiß man heute, daß der Beginn des Polierprozesses in einer

⁶⁾ Eine sehr eingehende Literaturübersicht mit mehr als 50 Arbeiten ist 1932 im Fachausschußbericht Nr. 21 der DGG veröffentlicht. Inzwischen haben besonders russische Institute eingehende Untersuchungen über die Grundlagen der Glasschleif- und Polierprozesse durchgeführt. Die Untersuchungen sind in einem Buch vom N. N. KATSCHALOW (Korr. Mitglied der Akad. Wiss. SSSR): Die Grundlagen der Glasschleif- und Polierprozesse (Moskau: Verl. Akad. Wiss. 1946) verarbeitet worden. Eine Übersetzung der eingehenden Arbeit ist in die Bibliothek der DGG eingestellt worden und kann dort eingesehen oder entliehen werden.

Zerfurchung des Oberflächengebirges durch Polierkörner besteht, wobei die plastische Deformation des Glases unter hohem Druck von Wichtigkeit ist. Bald bilden sich glatte Oberflächenbezirke, in die noch tiefe Schleifgrübchen eingelagert sind. Der Hauptarbeitsvorgang des Polierens, der den weitaus größten Teil der Gesamtzeit in Anspruch nimmt, besteht anschließend darin, die geglättete Oberflächenschicht laufend abzutragen, bis die Arbeitssphäre nicht nur praktisch sämtliche Schleifgrübchen unterschritten hat, sondern bis auch die darunter liegende, von Sprüngen durchsetzte Schicht mindestens teilweise abgetragen ist.

Zum Schluß sei noch die Ansicht von A. LAMESCH angeführt, der nach Kenntnis der vorliegenden Untersuchung äußerte:

„Beim Beginn des Polierens wird beim Spiegelglas mit „offenen“ Filzen gearbeitet, d. h. die einzelnen Filzhaare liegen vollkommen frei: der Filz ist also nicht verschmutzt. In diesem Falle kommt es insofern auf eine Abrasion der Oberflächen mit losen Schleifmitteln hinaus, als das Polierkorn das Werkzeug darstellt, welches durch die einzelnen Filzhaare als Werkzeuggegenhalter gegen die zu bearbeitende Fläche gedrückt wird. Beim zweiten Teil des Poliervorganges jedoch sind die Filze „geschlossen“, d. h. sie sind vollkommen verschmiert. Die einzelnen Haare sind nicht mehr sichtbar, und der Filz ist mit einer pechähnlichen Schicht des Poliermittels bedeckt, die vollkommen zusammenhängend, feucht und glänzend ist. Die einzelnen Polierkörner drücken sich in diese Schicht ein, und es kommt also in etwa auf eine Oberflächenbearbeitung mit gebundenem Schleif- d. h. Poliermittel heraus. Hier liegt also rein im äußerlichen Zustand des Filzes eine große Ähnlichkeit vor mit dem Pechkuchen der optischen Industrie. Es darf nicht übersehen werden, daß beim Polieren durch die Reibung Wärme erzeugt wird, die sich auf die Viskosität des Peches auswirkt, so daß ich mir vorstellen könnte, daß geschlossener Filz und „warmer“ Pechkuchen in ihrem Widerstand gegen das Eindringen von Polierkörnern sich ähnlich verhalten. Es erscheint mir auch außerordentlich wichtig, nochmals zu unterstreichen, daß der Polierprozeß kein rein physikalischer Prozeß ist. Es spielen sehr wohl Hydrolyse (große Oberflächen des Glases) sowie kolloidchemische und evtl. sogar elektrische Vorgänge eine Rolle . . .“

Zu danken haben wir Herrn Direktor LAMESCH und seinen Mitarbeitern für die bereitwillige Erfüllung aller unserer Wünsche nach Polierproben und Auskünften. Unser Dank gebührt auch den Leitz-Werken für die leihweise Überlassung eines großen Forschungsmikroskops und schließlich der Hüttentechnischen Vereinigung der deutschen Glasindustrie, dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg sowie der Arbeitsgemeinschaft für Elektronenoptik e. V., ohne deren finanzielle Hilfe die Untersuchungen nicht hätten durchgeführt werden können.

7. Schrifttum.

- [1] BRÜCHE, E. und POPPA, H.: Das Polieren von Glas. Teil I: Optische Politur. Glastechn. Ber. **28** (1955) S. 232–242. In dieser Arbeit sind die Vergrößerungsangaben unter einigen Bildern zu berichtigen. Die in den Abbildungen enthaltenen Längenmaßstäbe für 1μ sind richtig. S. 236, Bild 6: Vergrößerung 13500 \times ; Bild 8: Vergrößerung 3000 \times ; S. 237, Bild 10: Vergrößerung 9000 \times ; S. 241, Bild 21: Vergrößerung 8500 \times ; Bild 22: Vergrößerung 7000 \times .
- [2] BEILBY, G. T.: Surface flow in crystalline solids under mechanical disturbance. Proc. Roy. Soc. **72a** (1903) S. 218–225.
- [3] BRÜCHE, E.: Untersuchung über den Poliervorgang. Referate im Fachausschuß I der DGG am 17. 3. 55 und 21. 11. 55. [Glastechn. Ber. **28** (1955) S. 285 und **29** (1956) S. 71.]
- [4] BRÜCHE, E. und POPPA, H.: Der Nachweis der Rayleigh-Beilby-Schicht. Phys. Verh. **6** (1955) S. 197.

- Elektronenmikroskopische Studie zum Polieren von Glas. Silikattechn. 6 (1955) S. 378—384.
Die Tellersprünge bei Glas. Phys. Verh. 6(1955) S. 11—12.
- [5] JEBSEN-MARWEDEL, H.: Tafelglas. Essen: Girardet 1950. S. 32—40.
- [6] KLEMM, W. und SMEKAL, A.: Über den Grundvorgang des Polierens von Gläsern. Naturwiss. 29 (1941) S. 688 bis 690. [Ref. Glastechn. Ber. 20 (1942) S. 22.]
SMEKAL, A.: Mikrointerferometrische und übermikroskopische Ergebnisse über die Mikroplastizität von Silikatgläsern. Referat im Fachausschuß I der DGG am 27. 10. 54. [Glastechn. Ber. 28 (1955) S. 81], sowie zahlreiche andere Veröffentlichungen.
- [7] RAYLEIGH (Lord): Microscopic study of optical surface. Collected Papers 4 S. 542.
- [8] WITTEKIND, F.: Ein metallographisches Universal-Poliervorverfahren. Metalloberfläche Teil A 9 (1955) S. 188.
- [9] KATSCHALOW, N. N.: Die Grundlagen der Schleif- und Polierprozesse. Moskau u. Leningrad: Verlag d. Akad. d. Wiss. (1946). [Dtsche Übers. in der Bucherei der DGG]. Vgl. auch [4, Nr. 2], wo die wichtigsten russischen Arbeiten zitiert und kurz behandelt sind. (26786)

DK 65.012.3:331.124

Organisatorische Maßnahmen zur Entlastung der Leitung und zur Erhöhung des Personalleistungsgrades.

VON GÜNTHER ABROMEIT, Düsseldorf.

(Vortrag anlässlich der Jahresversammlung der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie am 11. Oktober 1955 in Braunschweig.)

Die ausführende Tätigkeit ist heute weitgehend durchrationalisiert, dies gilt für die leitende Tätigkeit nicht in gleichem Maße. Allgemein klagen die Betriebsführungskräfte über Zeitnot und Überlastung. Es werden die Methoden besprochen, durch deren Anwendung die Leitungskräfte entlastet werden können. Bedeutsam sind vor allem die Prinzipien der Arbeitsteilung und Planung, deren Anwendung jedoch voraussetzt, daß ein neuer Arbeitsstil entwickelt wird. Alles hängt davon ab, ob die psychologisch bedingten Widerstände der Mitarbeiter gegen die Einführung der neuen Methoden überwunden werden können. Die Mitarbeiter müssen davon überzeugt werden, daß sie in echtem team-work ihre Fähigkeiten am besten zur Geltung bringen können und die größte Arbeitsfreude gewinnen.

1. Das Problem.

Wissenschaftliche Theorien pflegen nach einer gewissen Zeit des Bestehens zu ihrem geistigen Ausgangspunkt zurückzutendieren; eine solche Neubesinnung ist meist ein Zeichen dafür, daß die betreffende Wissenschaft auf eine höhere Ebene vorgedrungen ist und daran geht, die Peripherie ihrer Erkenntnis auszuweiten. Diesen Stand scheint die Lehre von der Organisation gegenwärtig erreicht zu haben.

Die moderne Organisationslehre hat ihren Ursprung in der Lehre FREDERICK TAYLORS im „scientific management“. Seit diese Lehre vor über 50 Jahren entwickelt worden ist, haben Konstrukteure, Betriebsingenieure, Organisatoren und Arbeiter in unermüdlicher Zusammenarbeit die ausführende Arbeit bis in ihre letzten Elemente analysiert und dabei die Erkenntnisse für eine sinnvolle Arbeitsgestaltung gewonnen. Es ist unbestreitbar, daß als Ergebnis dieser Maßnahmen die ausführende Arbeit leichter und produktiver, das Ziel des Organisierens auf dieser Ebene also erreicht worden ist.

Gegenwärtig wird uns aber bewußt, daß wir diese Lehre zu einseitig ausgelegt haben, indem nur die Bereiche des Betriebes organisiert, rationalisiert und verwissenschaftlicht wurden, die der Betriebsleitung untergeordnet sind. Die Betriebsleitung selbst dagegen blieb von der Rationalisierungsbewegung weitgehend unberührt und arbeitet nach wie vor nach traditionellen Maximen. Dies ist der große Widerspruch unserer heutigen Industrieorganisation, der sich am deutlichsten darin äußert, daß die rein ausführende Arbeit immer leichter wird, während die Führung, wenn sie ernst und verantwortungsbewußt betrieben wird, eine männermordende Beschäftigung geworden ist.

In dieser Situation muß sich die Organisationslehre auf ihren Ausgangspunkt besinnen. Das scientific management in der von TAYLOR geschaffenen Form war ursprünglich keineswegs nur eine Lehre zur Rationalisierung der ausführenden Arbeit, sondern er hatte auch die Führung selbst im Auge, was u. a. am Beispiel des von ihm entwickelten Funktionsmeistersystems deutlich

wird. Hier muß heute wieder angeknüpft werden, um in der Organisation der Führungskräfte das nachzuholen, was bei der ausführenden Arbeit längst erreicht ist.

Im Rahmen einer solchen Neubesinnung stehen drei Probleme im Vordergrund des Interesses:

1. Verteilung der Betriebsführungsaufgaben auf einen größeren Personenkreis,
2. Neubestimmung der Aufgaben der Führungskräfte und bewußte Vereinfachung des Betriebsführungsproblems,
3. Entwicklung der Teamarbeit.

2. Verteilung der Betriebsführungsaufgaben auf einen größeren Personenkreis.

Die Betriebsleiter klagen am häufigsten, daß sie zeitlich nicht mehr in der Lage sind, ihre wichtigsten Betriebsführungsaufgaben wahrzunehmen, sondern durch Nebenarbeiten und Routinebeschäftigungen voll beansprucht werden. Darunter leidet nicht nur die Planung und die betriebspolitische Vorschau; es zeigt sich oft auch die paradoxe Erscheinung, daß sich die leitenden Herren nicht mehr betriebsnah fühlen, obwohl sie sich von morgens bis abends um geschäftliche Probleme bemühen. Dies rührt daher, daß die Betriebsführungs-kräfte durch zu viele Schreiarbeit an ihr Büro gefesselt sind und während der restlichen Zeit außerhalb des Betriebes durch Tagungen, Konferenzen und Nebenämter so in Anspruch genommen werden, daß sie kaum noch Gelegenheit haben, einen engen Kontakt zum Betrieb aufrechtzuerhalten und den nachgeordneten Stellen das Gefühl der Allgegenwart des Chefs zu vermitteln. Unterführer, die sich auf diese Weise allein gelassen fühlen, neigen aber entweder zu unerwünschten Eskapaden oder werden nachlässig.

Will man diesen Übelstand beseitigen, dann muß man sich zunächst darüber klar werden, ob sich die von der Betriebsleitung selbst wahrgenommenen Aufgaben nicht auf mehr Schultern verteilen lassen. Das Prinzip der Arbeitsteilung ist auf der Stufe der ausführenden Arbeit mit überaus großem Erfolg angewandt worden.