

## Über den Einfluß von Flüssigkeiten auf die mechanische Oberflächenvergrößerung von Glas.

VON REMBERT RAMSAUER, Witten (Ruhr).

(Mitteilung aus dem Hauptlaboratorium der Deutschen Tafelglas AG Witten-Ruhr.)

(Eingegangen am 30. Juli 1951.)

DK  
532.613.2  
539.213.26  
541.183.55  
666.163.31  
620.178.162  
621.921  
621-713  
666.1.039.3

Es wird versucht, die Rolle der Flüssigkeit gegenüber den bei der mechanischen Oberflächenvergrößerung mitwirkenden anderen physikalischen Größen abzugrenzen. Theoretische Erwägungen und experimentelle Untersuchungen an anderen Werkstoffen lassen einen um so größeren Einfluß der Flüssigkeit erwarten, je stärker die freie Grenzflächenenergie durch Adsorption herabgesetzt wird. Schleifmessungen mit Karborundum zeigen jedoch, daß Glas auffallend indifferent gegen Flüssigkeitseinflüsse ist. Weitere Abriebmessungen mit anderen Schleifmitteln lassen erkennen, daß die Flüssigkeit nicht nur die Bearbeitungshärte des Schleifkörpers, sondern ebenso die des Schleifkorns beeinflusst, und daß das besondere Verhalten von Glas sich aus einer gleichsinnigen Veränderung der Härten erklären läßt. Messungen des Sedimentvolumens von Glaspulver bestätigen, daß die Veränderung der Grenzflächenenergie durch Adsorption bei Glas nicht parallel geht mit einer Veränderung des Abriebs. Auf die Kühlwirkung der Flüssigkeit wird hingewiesen, jedoch sind nähere Angaben darüber ohne Kenntnis der Wärmeübergangszahl zwischen Flüssigkeiten und Glas nicht möglich. Ergänzende Messungen der Bohrleistung bei verschiedenen Flüssigkeiten zeigen, wie bei einem andersartigen Vorgang der Oberflächenvergrößerung die verschiedenen behandelten Einflüsse andersartig zusammenwirken können.

Die mechanische Oberflächenbearbeitung von Glas stellt sich der technischen Praxis als ein mannigfach veränderlicher Vorgang dar. Sowohl das Schleifen von Glas als auch jeder andere mit einem mechanischen Angriff der Oberfläche verbundene Vorgang [1], wie Ritzen, Schneiden, Bohren, Sägen und schließlich die Zerkleinerung, erweisen sich als abhängig von einer ganzen Reihe von technischen Faktoren, von denen jeder für sich allein physikalisch schwer zu erfassen ist, die aber in einer unterschiedlich wechselseitigen Abhängigkeit vollends unentwirrbar erscheinen und die wissenschaftliche Beherrschung und technisch befriedigende Steuerung der betreffenden Vorgänge so überaus schwierig gestalten. Rein formal gewinnt die bestehende Problematik an Übersichtlichkeit, wenn man die in der Regel bei allen Vorgängen einer mechanischen Oberflächenvergrößerung vorhandenen wesentlichen Faktoren zu gliedern versucht. Es liegt nahe und führt bereits zu einer ordnenden Übersicht, wenn man dabei die vier folgenden Hauptkomplexe unterscheidet:

1. den Probekörper selbst, mit seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften;
2. den Gegenkörper, mit dessen Hilfe die Oberflächenbearbeitung durchgeführt wird (Schleifkorn, Ritzwerkzeug, Bohrer) und der im allgemeinen härter als der Probekörper ist;
3. die Flüssigkeit, die zwischen Probekörper und Gegenkörper eingebracht wird und die auch als Träger-substanz des Schleifmittels dienen kann;
4. die mechanische Arbeit, die zur Bewegung von Probe- und Gegenkörper gegeneinander aufzuwenden ist und die durch Änderung von Druck und Geschwindigkeit in weiten Grenzen veränderlich ist.

Zur Klärung des physikalischen Ablaufs einer technischen Oberflächenbearbeitung wird man zweckmäßig

so verfahren, daß man unter möglicher Ausschaltung aller übrigen Einflüsse eine Größe herausgreift und ihre Wirkung auf den Gesamtvorgang zu erfassen versucht. Es liegt in der Natur der Sache, daß sich solche Untersuchungen zunächst denjenigen Faktoren zuwenden, deren Einfluß technisch am deutlichsten hervortritt. Dementsprechend liegen auch z. B. für den Schleifvorgang bereits aufschlußreiche Untersuchungen vor über den Einfluß von Oberflächenbeschaffenheit und Härte des Glases, über die Wirkung der verschiedensten Schleifmittel, ihre Korngröße und Kornverteilung und schließlich auch über die Abhängigkeit des Schleifprozesses von Druck und Geschwindigkeit [2].

Relativ wenig Beachtung hat bei den Untersuchungen bisher die Flüssigkeit gefunden, und die Rolle, die ihr bei dem Vorgang einer mechanischen Oberflächenvergrößerung zukommt, ist noch wenig geklärt. Bei den Praktikern im Betrieb begegnet man im allgemeinen der Auffassung, daß die Flüssigkeit in erster Linie eine Kühlwirkung habe; in vielen Fällen wird ihr auch eine „Schmierwirkung“ zugeschrieben. Sehr markant und nur scheinbar im Gegensatz zu dieser Auffassung umriß ein Werkmeister die Rolle der Flüssigkeit sowohl beim Schneiden als auch beim Schleifen und Bohren von Glas: der Gegenkörper „faßt“ die Glasoberfläche bei Anwesenheit einer richtig gewählten Flüssigkeit besser. Das nach altbewährter Gewohnheit mit Petroleum angefeuchtete Schneidrad „greift“ besser und liefert einen sauberen, leicht zu brechenden Schnitt.

Was nun dieses letztere Problem des Einflusses der Flüssigkeit auf Ritzen und Schneiden des Glases angeht, so haben TAMMAN und v. GRONOW [3] schon vor längerer Zeit festgestellt, daß das Aussehen einer Ritzbahn qualitativ sehr unterschiedlich ist je nach der verwendeten Flüssigkeit. Über einen ersten Ansatz kommt diese Untersuchung freilich nicht hinaus, und in der Deutung

der Wirkung der Flüssigkeit als eine Art mechanischer Puffer gegen den Druck der ritzenden Spitze vermag sie heute nicht mehr zu befriedigen. Für den Schleifprozeß hat v. STOEßER [4] in seiner sehr breit angelegten Untersuchung auch den Flüssigkeitseinfluß kurz berührt. Er vergleicht den Abrieb beim Schleifen mit Wasser und mit Paraffinöl und findet bei Paraffinöl einen wesentlich geringeren Abrieb, während der Versuch mit einer trockenen Scheibe fast den gleichen Abrieb ergibt wie mit Wasser. v. STOEßER glaubt, aus dem Versuch einen Hinweis für die Auffassung zu finden, daß dem Wasser keine nennenswerte Kühlwirkung beim Schleifen zuzuschreiben ist.

Durch neuere Arbeiten auf dem Gebiet der Grenzflächenphysik ist nun bezüglich der Frage nach dem Einfluß der Flüssigkeiten auf Vorgänge der Oberflächenvergrößerung ein ganz neuer Gesichtspunkt hereingebracht worden, so daß es lohnend und notwendig erscheint, auch der mechanischen Oberflächenbearbeitung von Glas eine erneute Betrachtung zu widmen. Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Reibung und Verschleiß im Zusammenhang mit dem Problem der Adsorption von Flüssigkeitsmolekülen an festen Grenzflächen [5] sowie die Arbeiten von v. ENGELHARDT über die Schleiffestigkeit [6] erbrachten als wesentliches Ergebnis, daß der Verschleiß bzw. der mechanisch erzeugte Abrieb keine ausschließlich vom festen Körper abhängige Größe darstellt, sondern mit der anwesenden Flüssigkeit veränderlich ist. v. ENGELHARDT kommt auf Grund von Untersuchungen an mineralischen, keramischen und metallischen festen Körpern zu der Feststellung, daß die Schleiffestigkeit als reziproker Wert des Abschleifs je Zentimeter Schleifweg und Gramm Belastung ein nur für jeweils ein Stoffpaar fest/flüssig gültiger Wert ist.

Daß eine Flüssigkeit einen Einfluß auf jede Oberflächenvergrößerung hat, ist theoretisch leicht verständlich. Die freie Grenzflächenenergie eines festen Körpers  $\gamma$  — aus Gründen historischer Pietät vielfach, wenn auch wenig glücklich, als Grenzflächenspannung bezeichnet [7] — ist laut Definition gleich der Arbeit, die zur Erzeugung von  $1 \text{ cm}^2$  neuer Oberfläche notwendig ist. Die Oberflächenvergrößerung  $\Delta O$  erfordert also bei einer Grenzflächenenergie  $\gamma$  einen Arbeitsbetrag

$$\Delta A_o = \gamma \cdot \Delta O \quad (1)$$

Dieser so einfach erscheinende Zusammenhang ist jedoch nicht ohne Problematik. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, daß die Größe der freien Grenzflächenenergie  $\gamma$  für Festkörper noch nicht exakt bestimmt werden konnte. Man weiß aus verschiedenen Beobachtungen an Grenzflächenerscheinungen sowie aus Analogieschlüssen zu Messungen der Grenzflächenspannung, z. B. an Quecksilber, nur einiges über die qualitative Wirkung verschiedenartiger Flüssigkeiten. Jede Anlagerung (Adsorption [8]) von Molekülen ruft demnach eine Herabsetzung der freien Grenzflächenenergie hervor, wobei die Größe der Energieveränderung nicht nur von der unbekanntem Zahl der angelagerten Moleküle, sondern auch von einem gleichfalls unbekanntem, dem Molekültypus eigenen, durch Gestalt und zwischenmolekulare Kräfte bestimmten Faktor abhängt. Unsere Kenntnisse der freien Grenzflächenenergie fester Körper in Flüssigkeiten bleiben daher meist auf die qualitative Unterscheidung zwischen verhältnismäßig gering adsorbierten

und stärker zur Adsorption neigenden „grenzflächenaktiven“ Flüssigkeiten, die die Grenzflächenenergie stärker vermindern, beschränkt.

Ein anderes Problem der Formel (1) ist die Frage, ob der Teilbetrag  $\Delta A_o$  der gesamten aufgewendeten mechanischen Energie  $A$ , der zur Oberflächenvergrößerung verbraucht wird, beim Übergang von einer Flüssigkeit zur anderen stets gleich bleibt. v. ENGELHARDT hält diese Bedingung bei seinen Versuchen für hinreichend erfüllt und hat unter dieser Voraussetzung die Beziehung zwischen dem Abrieb eines Festkörpers und der freien Grenzflächenenergie in zwei verschiedenen Flüssigkeiten entwickelt in der Hoffnung, so jedenfalls über die experimentell bisher nicht hinreichend erfaßte Grenzflächenenergie relative Beziehungen aus Abriebsmessungen gewinnen zu können. Die nachfolgende Untersuchung wird zeigen, daß diese Folgerung unabhängig von der Frage, ob die darin enthaltene Voraussetzung bezüglich der Konstanz des Arbeitsbetrages  $\Delta A_o$  erfüllt ist, nicht ohne weiteres erlaubt sein kann.

Die von K. L. WOLF und Mitarbeitern durchgeführten Untersuchungen, die einen deutlichen qualitativen Einfluß grenzflächenaktiver Flüssigkeiten auf die Oberflächenabtragung ergaben, blieben auf Metall beschränkt. v. ENGELHARDT führte seine Messungen vor allem an Quarz aus, zog aber vergleichsweise auch Porzellan und Metall heran. Bei dem Vergleich dieser verschiedenen Festkörper ergibt sich, daß der Abrieb an Metall absolut genommen zwar kleiner ist als an Quarz und Porzellan, bei diesen aber die abrieberhöhende Wirkung grenzflächenaktiver Flüssigkeiten weniger ausgeprägt ist. Auffallend ist weiter, daß, während an Metallen die organischen Fettsäuren den größten Effekt zeigen, an Quarz die Alkohole entsprechender Kettenlänge vor den Fettsäuren liegen. Für Glas hat v. ENGELHARDT nur einige orientierende Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 1 [9] mit den entsprechenden Werten der übrigen Festkörpergruppen in Vergleich gesetzt sind.

Tabelle 1. Abrieb verschiedener Festkörper nach v. ENGELHARDT.

	Messing	Quarz	Glas	Porzellan
Wasser . . . . .	1	1	1	1
Oktanol . . . . .	1,82	1,69	1,25	1,41
Nonylsäure . . . .	2,05	1,61	1,18	1,43

Es zeigt sich, daß, wenn man den Abrieb bei Wasser jeweils gleich 1 setzt, Glas sowohl an Alkohol als auch an Fettsäure noch erheblich hinter Quarz und auch Porzellan zurückbleibt. Gleichsinnig mit dem Ergebnis an Quarz ergibt jedoch Glas am Alkohol einen etwas höheren Abrieb als an der Fettsäure gleicher Kettenlänge. v. ENGELHARDT kommt auf Grund dieser orientierenden Versuche zu der Auffassung, daß Glas im Gegensatz zu anderen Festkörpern sehr indifferent gegenüber einem Flüssigkeitseinfluß ist.

Die Überprüfung und der Versuch einer Erklärung dieses für die Technik des Glas-Schleifens ebenso wie für grundsätzliche Probleme der Grenzflächenphysik bemerkenswerten Ergebnisses machten neue umfangreiche Messungen des Abriebs von Glas bei verschiedenartigen Flüssigkeiten erforderlich. Die dabei benutzte Versuchsanordnung war möglichst einfach und so ge-

wählt, daß nicht nur zeitlich gleichmäßige Arbeitsbedingungen, sondern auch eine bei größtem Schleifweg kleine mechanische Arbeitsleistung gewährleistet war, so daß ein vorhandener Einfluß einer Flüssigkeit nicht durch Einwirkungen der anderen Faktoren überdeckt würde. Es war dabei durchaus erwünscht, daß sich eine Anordnung ergab, die von der von v. ENGELHARDT benutzten Apparatur stark abwich und so eine möglichst unabhängige Kontrolle gewährleistete. Während bei v. ENGELHARDT der Probekörper unter Druck auf einer rotierenden Schleifscheibe hin und her bewegt wurde und Flüssigkeit und Schleifkorn laufend gleichmäßig zugeführt wurden, ließen wir Glaskugeln zusammen mit Schleifmittel und Flüssigkeit in einer zylindrischen Kugelmühle gleichmäßig rotieren. Die Glaskugeln rollten dabei über das Schleifmittel hinweg, wobei die mechanische Energie, mit der der Angriff auf die Kugeloberfläche erfolgt, bei konstanter Drehgeschwindigkeit des Zylinders von dem Gewicht der Kugeln abhängt.

Die Probekugeln bestanden aus bleihaltigem Glas unbekannter Herkunft von einem durchschnittlichen spezifischen Gewicht von 2,80 und hatten einen Durchmesser von durchschnittlich 5 mm. Die Analyse ergab folgende Zusammensetzung (%): SiO<sub>2</sub> 62,0, Na<sub>2</sub>O 17,7, PbO 12,7, CaO 4,4, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,3, MgO 1,0. Jeweils zehn Kugeln wurden mit 5 g Schleifmittel (Korngröße kleiner DIN 70 mit etwa 50% zwischen DIN 70 und DIN 100) und 20 cm<sup>3</sup> einer Flüssigkeit in einer Kugelmühle aus Porzellan bei 150 Umdrehungen/Minute 2 Stunden lang rotiert. Die Umdrehungsgeschwindigkeit an der Innenwand des Zylinders errechnet sich zu etwa 70 cm/sec.

Nach jedem Versuch wurden die Kugeln sorgfältig mit Wasser bzw. Lösungsmittel gereinigt, 60 Minuten lang im Trockenschrank bei 150° C getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und auf der Analysenwaage gewogen. Der Abrieb lag in 120 Minuten in der Größenordnung von 0,02 bis 0,03 g, war also hinreichend genau zu bestimmen. Aus dem mittleren spezifischen Gewicht der zehn Kugeln und dem Gesamtgewicht wurde die Gesamtoberfläche der Kugeln ermittelt und der Abrieb dann auf mg/cm<sup>2</sup> umgerechnet. Die so gefundenen Werte zeigten für ein und dieselbe Flüssigkeit zunächst noch Schwankungen, die darauf zurückzuführen sind, daß in der vorliegenden Versuchsanordnung die Schleifenergie vom Kugelgewicht abhängig ist. In Bild 1 sind beispielsweise die in 35 Versuchen mit Wasser und in Bild 2 die mit Cyclohexan gefundenen Abriebwerte in Abhängigkeit vom Gewicht der Versuchskugeln aufgetragen. Aus den entsprechenden graphischen Auftragungen wurde für die verschiedenen Flüssigkeiten jeweils der mittlere Abrieb für ein Gewicht von 1,9 g für zehn Kugeln abgelesen, um so die mit unterschiedlichen Schleifenergien gefundenen Einzelwerte miteinander in Vergleich setzen zu können.

Die graphische Darstellung der Bilder 1 und 2 gibt zugleich einen Einblick in die Meßgenauigkeit. Bei den Messungen für Wasser (Bild 1) fallen eine Anzahl von Meßpunkten mit starker Abweichung von der als Mittelwert ausgezogenen Geraden auf. Für diese Werte, die als fragwürdig in der Abbildung gegenüber den brauchbaren Werten als ausgefüllte Kreise gezeichnet sind, lassen sich die Ursachen für die Abweichung in jedem Falle angeben. Es zeigte sich nämlich, daß die Vorgeschichte der Kugeln nicht bedeutungslos ist und ein Einfluß vorausgegangener Versuche stattfindet. Kugeln, die z. B. vorher in Benzol oder Cyclohexan geschliffen sind, zeigen in Wasser zunächst niedrigen Abrieb; wurden sie dagegen vorher in Flüssigkeiten mit höherem Abrieb geschliffen, so lag der Abrieb bei nachfolgendem Schleifen in Wasser überdurchschnittlich hoch. Man wird annehmen müssen — und dies befindet sich in Übereinstimmung mit von v. ENGELHARDT gemachten Beobachtungen — daß die Rissigkeit der Kugeloberfläche zu Beginn eines Versuches unterschiedlich ist je nach der im Vorversuch verwendeten Flüssigkeit. Als brauchbare Meßwerte sind daher in den nachfolgenden Angaben nur diejenigen Versuchsergebnisse benutzt, bei denen derlei Ein-

flüsse von Vorversuchen völlig andersartiger Flüssigkeiten nicht vorliegen konnten. Abgesehen von diesen Streuungen bleiben allerdings auch bei den als brauchbar hingestellten Meßwerten Abweichungen bestehen, die absolut genommen ziemlich hoch erscheinen mögen, die aber in Hinblick auf die Natur des untersuchten Vorganges, bei dem Streuungen infolge lokaler Inhomogenitäten unvermeidbar sind, hingenommen werden müssen. Experimentelle Fehlerquellen sind natürlich nicht ganz ausgeschlossen; insbesondere war die Umlaufgeschwindigkeit leichten Schwankungen von zwei bis drei Umdrehungen/Minute unterworfen, was das Versuchsergebnis beeinflussen kann. Die Ungenauigkeit, die durch die summarische, mit Hilfe der spezifischen Gewichts-

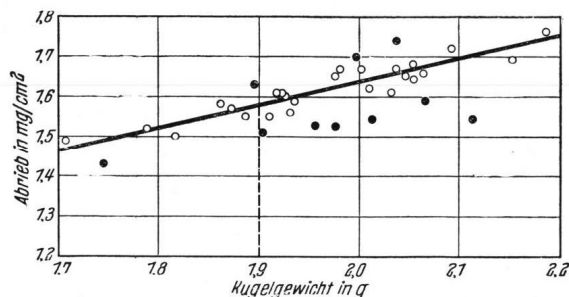


Bild 1. Abrieb von Glas mit Karborundum und Wasser in Abhängigkeit vom Kugelgewicht.

bestimmung ermittelte Oberfläche in das Ergebnis hineingetragen sein könnte, ist dagegen, verglichen mit den übrigen Faktoren, wie eine Kontrolle ergab, nur gering. Der Fehler, der durch einen unterschiedlichen Auftrieb der Glaskugeln in den Flüssigkeiten verschiedener Dichte verursacht sein kann, blieb außer Rechnung, zumal sich zeigte, daß die Kugeln bei der Rotation nicht in der Flüssigkeit liegen, sondern etwas oberhalb des Flüssigkeitsspiegels gegen den Drehsinn der Kugelmühle anrollen. Eine weitere Fehlermöglichkeit, die der Verwendbarkeit der Versuchsanordnung bei zähen Flüssigkeiten überhaupt eine Grenze setzt, liegt darin, daß die Viskosität der Flüssigkeit die Bewegung der Kugeln hemmt. Solange allerdings die Kugeln gegen die Drehrichtung der Zylinderwand überhaupt noch nach unten rollen, ist dieser Einfluß gering. Erst wenn die Zähigkeit der Flüssigkeit so groß wird, daß, wie z. B. bei Glycerin, die

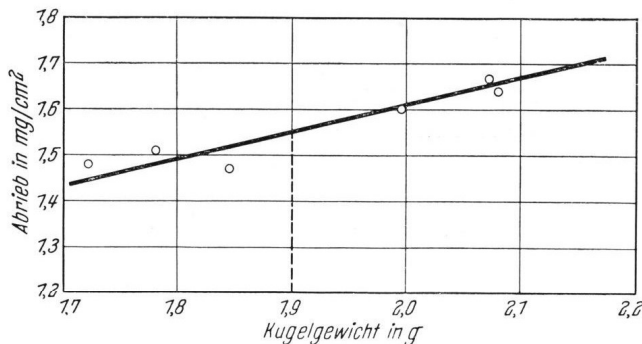


Bild 2. Abrieb von Glas mit Karborundum und Cyclohexan in Abhängigkeit vom Kugelgewicht.

Kugeln an der rotierenden Wand „kleben“ — Messungen an Kieselsäureäthylestern bekannter Zähigkeit ergaben, daß dies etwa oberhalb 35 Zentipoise der Fall ist — wird die Versuchseinrichtung unbrauchbar. Der Wert für Glycerin, der weiter unten angegeben ist, wurde daher durch Extrapolation aus einer verdünnten wäßrigen Lösung, bei der die Messung noch einwandfrei möglich war, gewonnen.

Die verwendeten Flüssigkeiten, Lösungsmittel und löslichen Substanzen waren, soweit sie nicht ausdrücklich als technische Substanzen bezeichnet sind, Stoffe des handelsüblichen größten Reinheitsgrades. Auf eine besondere Reinigung konnte um so eher verzichtet werden, als sich an Glas nicht die bei Metallen zu beobachtende Empfindlichkeit gegen kleinste Spuren von Verunreinigungen zeigte.

Bei der Auswahl der Flüssigkeiten hielten sich praktische Gesichtspunkte und eine mehr grundlegende orientierte Frage-

stellung die Waage. Die gesamte Meßreihe wirkt dadurch möglicherweise etwas uneinheitlich. Es kam jedoch darauf an, eine größere Zahl verschiedener Substanzen zu untersuchen, wobei der Gesichtspunkt nicht außer acht bleiben konnte, daß prinzipiell auch eine praktische Nutzenanwendung möglich sein sollte. In einzelnen Fällen war die Wahl einer bestimmten Flüssigkeit, z. B. des 2-Äthylhexanols, bedingt durch die bestehende günstige Beschaffungsmöglichkeit im erwünschten Reinheitsgrad und der notwendigen kleinen Viskosität [10].

Das Ergebnis der beim Schleifen von Glas mit Karborundum (Siliziumkarbid) in verschiedenen reinen Flüssigkeiten gefundenen Werte zeigt Tabelle 2. Die zunächst angegebenen Größen für den stündlichen Abrieb in  $\text{mg}/\text{cm}^2$  haben eine Genauigkeit von durchschnittlich  $\pm 0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2$ . In der zweiten Kolonne ist der relative Abrieb bezogen auf den Wert für Wasser gleich 1 angegeben, um eine schnellere Bewertung und den Vergleich mit anderen Messungen zu erleichtern. Das auffallendste Merkmal der in Tabelle 2 gegebenen

Tabelle 2. Abrieb von Glas mit Karborundum.

Flüssigkeit	Abrieb in $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$	Abrieb relativ
Wasser .....	1,58	1,00
Benzol .....	1,50	0,95
Cyclohexan .....	1,55	0,97
Äthanol .....	1,62	1,03
2-Äthylhexanol .....	1,95	1,23
Benzylalkohol techn. ...	(1,70)	1,08
Acetaldehyd .....	1,73	1,09
Benzaldehyd techn. ....	1,66	1,05
Äther .....	1,31	0,83
Petroleum techn. ....	1,83	1,16
Terpentin techn. ....	1,69	1,07
Glyzerin .....	—	(1,37)
Silikonöl .....	—	(1,27)
Äthylsilikat A .....	1,30	0,82
Äthylsilikat B .....	1,70	1,08

Werte ist, daß die vorhandene Abriebveränderung in jedem Falle sehr gering ist und selbst bei denjenigen Substanzen, wie Petroleum und 2-Äthylhexanol, die relativ starke Einflüsse erkennen lassen, eine 30%ige Erhöhung des Abriebs nicht übersteigen. Bei Metall dagegen zeigen sich Abriberhöhungen von 100 und mehr Prozent. Selbst bei Quarz und Porzellan fand v. ENGELHARDT wesentlich größere Abriebschwankungen. An Quarz fand er z. B. für Benzylalkohol einen relativen Abrieb von 1,35, für 2-Äthylhexanol 1,67. Auch Silikonöl, dessen Affinität zu Glas so groß ist, daß es eine wasserabstoßende Schicht darauf zu bilden vermag, zeigt keine übermäßige Erhöhung des relativen Abriebs. Diese Messung an Silikonöl gilt aber nur mit gewissen Vorbehalten; wie bei Glyzerin war die Zähigkeit des zur Verfügung stehenden Öls so groß, daß der Wert aus einer etwas verdünnten benzolischen Lösung extrapoliert werden mußte. Von den Kieselsäureäthylestern standen mehrere Proben zur Verfügung, die sich durch die Art der Vernetzung der Moleküle in zwei Gruppen schieden. Eine geringe Abriberhöhung ergab die Gruppe B, bei der die Vernetzung vornehmlich durch Si-O-Si-Brücken geschieht; die Gruppe A, bei der daneben noch eine andere Art von Brückenbildung besteht, ergab den kleinsten bei Karborundum gefundenen Abrieb [11].

Die Wirkung verschiedener Substanzen in wäßriger Lösung auf den Abrieb gibt Tabelle 3. Die Effekte sind in allen Fällen außerordentlich gering und liegen viel-

fach innerhalb der experimentellen Schwankungen des reinen Wasserwertes. Die Abhängigkeit des Abriebs von der Konzentration wurde genauer untersucht für das System Wasser-Glyzerin und Wasser-Phenol (Bild 3). Bis zu zwei Volumenprozent Glyzerin ist ein Einfluß kaum spürbar, bis 20% erfolgt ein leichter Anstieg, dem oberhalb 50% ein zweites Anwachsen des Abriebs folgt. Aus diesem Kurvenverlauf wurde der in Tabelle 2 angegebene Wert für reines Glyzerin extrapoliert. Einen sehr auffallenden Verlauf zeigt der Abrieb im System Wasser-Phenol, das dadurch interessant ist, daß zwischen etwa 8 und 83% Phenol eine Mischungslücke besteht, sich die beiden Mischungspartner in diesem Konzentrationsbereich also teilweise entmischen. Während nun bis zur Mischungslücke keine merkliche Abriberhöhung eintritt, zeigt sich mit Beginn der Entmischung eine deutliche Erhöhung des Abriebs, mit zunehmender Konzentration dann ein Abfall zu einem auffallend niedrigen Wert bei etwa 40% Phenol und dann ein Wiederanstieg auf einen relativen Abrieb etwas über 1 jenseits der Mischungslücke. Eine Deutung dieses Kurvenverlaufs steht noch aus und kann ohne eine eingehende Analyse des Solvatations- und

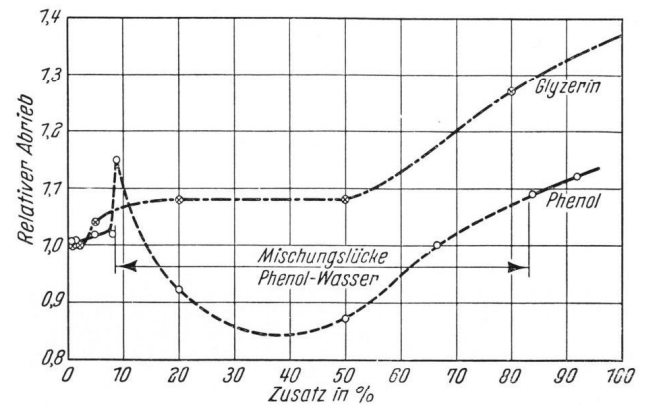


Bild 3. Konzentrationsabhängigkeit des Abriebs von Glas in Glyzerin-Wasser und Phenol-Wasser.

Assoziationsverhaltens des ganzen Systems wohl nicht gegeben werden.

Lösungen organischer Substanzen — Laurinsäure, Stearinsäure und Cetylalkohol (vgl. Tabelle 3) — in Benzol und Cyclohexan wurden gleichfalls untersucht.

Tabelle 3. Relativer Abrieb wäßriger und benzolischer Lösungen.

Flüssigkeit	Relativer Abrieb
Wasser .....	1,00
0,2 Gew.-% Seifenlösung techn. ....	~ 1,00
1 Gew.-% Na-Sulfonat .....	1,04
1% Na-Wasserglas .....	1,00
1/2—1% Bohreröl .....	1,08
1 Gew.-% Borsäure .....	~ 1,00
1 Gew.-% Citronensäure .....	0,90
1 Gew.-% Adipinsäure .....	0,96
10 Gew.-% Rohrzucker .....	1,03
5 Gew.-% Stärke .....	1,06
1/10 n HCl .....	0,91
1% Glyzerin .....	~ 1,00
5% Glyzerin .....	1,04
1% Phenol .....	~ 1,00
5% Phenol .....	1,02
Benzol .....	1,00
Cetylalkohol 0,01 molar .....	~ 1,00
Laurinsäure 0,01 molar .....	1,04
Stearinsäure 0,01 molar .....	~ 1,00

Auch hier waren die Effekte, wie weiter unten am speziellen Beispiel noch gezeigt wird, sehr gering. Bei Konzentrationen bis zu Molenbrüchen von 0,0005 (d. h. fünf gelöste Moleküle auf 10000 Moleküle Lösungsmittel) fielen die Werte innerhalb der Meßgenauigkeit mit denen der Lösungsmittel zusammen. Selbst bei Konzentrationen nahe der Sättigungsgrenze betrug die Abrieberhöhung, bezogen auf den Abrieb des reinen Lösungsmittels, nicht mehr als 1,05—1,08, und es war nicht zu entscheiden, ob die Alkohole einen stärkeren Einfluß hatten als die Fettsäuren. Die Messungen dieser organischen Lösungen machen den Unterschied des Verhaltens von Glas gegenüber Metallen oder Quarz ganz besonders deutlich. Der Abrieb von Kupfer beispielsweise verdreifacht sich bei höheren Fettsäuren in Cyclohexan bereits bei kleinsten Konzentrationen, und auch an Quarz fand z. B. v. ENGELHARDT bei einer Konzentration von 0,03 Mol/Liter für benzolische Lösungen von Oktadecanol 1,56 und Stearinsäure 1,37.

Zusammenfassend ergeben die Messungen also, daß beim Schleifen von Glas mit Karborundum nur ein relativ geringer Flüssigkeitseinfluß vorhanden ist. Das technische Schleifen von Glas läßt sich von der Flüssigkeit her demnach nur in engen Grenzen steuern. Der Ersatz des gebräuchlichen Wassers etwa durch Petro-

Korngrößenunterschiede muß aber an den absoluten Werten des Abriebs auffallen, daß Borkarbid, das in der Härtereiherfolge an der Spitze steht, einen beträchtlich viel kleineren Abrieb hat als Karborundum. Innerhalb der übrigen Schleifmittel dagegen zeigen sich keine so starken Unterschiede, wie sie nach der Verschiedenheit der Härten erwartet werden sollten. Es wird hier deutlich, daß die Wirkung eines Schleifmittels keineswegs allein durch seine Härte bestimmt ist, sondern daneben von einem speziellen, von der Art auch des bearbeiteten Körpers abhängigen Angriffsvermögens des Schleifkornes und seinem Abnutzungswiderstand abhängt [12].

Das auffallende — beim Vergleich der hier aus theoretischen Gründen auf Benzol = 1 bezogenen Abriebwerte — deutlich erkennbare Ergebnis der Messungen ist nun, daß der Flüssigkeitseinfluß nicht nur im ganzen klein bleibt, sondern für jedes Schleifmittel ein anderer ist. Während z. B. Benzol bei Karborundum den niedrigsten Abrieb hat, liegen bei Ferrochrom alle übrigen Werte unter dem von Benzol. Wasser ergibt im allgemeinen einen niedrigen Wert, nur bei Zirkonsilikat fällt er sehr hoch aus. Äthanol ergibt teilweise höheren, teilweise aber kleineren oder fast gleichen Abrieb wie 2-Äthylhexanol. Ähnlich regellos erweist sich der Vergleich etwa zwischen Petroleum und Terpentin.

Tabelle 4. Messungen des Abriebs von Glas bei verschiedenen Schleifmitteln.

	Karborundum		Korund		Quarzsand		Borkarbid		Ferrochrom		Zirkonsilikat	
	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.
Wasser	1,58	1,05	0,90	0,86	0,67	0,86	1,17	0,82	1,00	0,81	0,81	1,28
Benzol	1,50	1	1,05	1	0,78	1	1,43	1	1,23	1	0,63	1
Cyclohexan	1,55	1,03	0,88	0,84	0,77	0,99	1,30	0,91	(1,21)	0,98	0,60	0,95
Petroleum techn.	1,83	1,22	1,13	1,08	0,84	1,08	1,50	1,10	1,15	0,93	0,81	1,28
Terpentin techn.	1,69	1,13	1,22	1,16	(0,83)	1,06	1,50	1,05	1,16	0,94	0,78	1,24
Äthanol	1,62	1,08	0,98	0,93	0,64	0,82	1,35	0,94	1,01	0,82	0,72	1,14
2-Äthylhexanol	1,95	1,30	1,25	1,19	0,63	0,81	1,36	0,95	0,94	0,76	0,71	1,12

leum dürfte nur in ganz speziellen Fällen technisch und ökonomisch in Frage kommen, und die Verwendung wäßriger Lösungen mit „grenzflächenwirksamen“ Zusätzen verspricht keinen besseren Erfolg.

In Hinblick auf die Veränderlichkeit der Oberflächenabtragung mit der Flüssigkeit bei anderen Festkörpern muß dieses Ergebnis überraschen und zwingt zu der Frage, welche Ursachen das indifferente Verhalten von Glas gegen Flüssigkeitseinflüsse hat. Zur Klärung dieser Frage wurde zunächst untersucht, ob die gleiche Eigenheit des Glases sich auch bei anderen Schleifmitteln feststellen läßt. Für eine Reihe von Flüssigkeiten wurden Schleifversuche mit Korund, Quarzsand, Borkarbid, Zirkonsilikat und Ferrochrom durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Tabelle 4 zusammen mit den entsprechenden Werten bei Karborundum.

Zur Bewertung des absoluten Wertes des stündlichen Abriebs in mg je cm<sup>2</sup> ist zu bemerken, daß die Körnungen der Schleifmittel nicht völlig einheitlich waren. Ziemlich gleiche Korngröße hatten Korund und Karborundum, etwas gröber, aber unter sich gleichartig waren Halterner Quarzsand und gemahlenes Zirkonsilikat, noch stärkeren Anteil mittlerer Korngröße hatte Borkarbid. Ferrochrom dagegen wich in seiner Kornzusammensetzung sehr erheblich von den übrigen Schleifmitteln ab und hatte über 60% auf dem Sieb DIN 40 zurückbleibenden Anteil. Selbst bei Berücksichtigung der

Wenn es nun auch nicht gelingt, eine Gesetzmäßigkeit oder auch nur bestimmte Regeln in diesen Messungen zu erkennen, so ergeben sie doch einen Hinweis von ganz prinzipieller Bedeutung. Sie lassen erkennen, daß die Flüssigkeit nicht nur die Grenzflächenenergie des Festkörpers beeinflusst, sondern ebenso auch eine Wirkung auf das Schleifkorn selbst ausübt. Im Sinne der eingangs gemachten methodischen Bemerkung über die vier Hauptkomplexe, die bei jedem Vorgang der Oberflächenabtragung zu unterscheiden sind, heißt dies, daß es hinsichtlich des Flüssigkeitseinflusses nicht möglich ist, nur den Probekörper und nicht gleichzeitig auch das physikalische Verhalten des als Werkzeug wirkenden Gegenkörpers zu betrachten. Es bleibt durchaus offen, ob dieser Flüssigkeitseinfluß auf das Werkzeug in vielen Fällen nicht vernachlässigbar gering ist; grundsätzlich aber darf er nicht außer acht gelassen werden, und es ist aus diesen Gründen auch nicht möglich, aus Abriemmessungen auf das spezielle Adsorptionsverhalten einer Flüssigkeit zu schließen oder gar zu hoffen, relative Werte der freien Grenzflächenenergie aus derartigen Messungen zu erhalten [13].

Wenn das Glas nur einen relativ geringen Einfluß der Flüssigkeit beim Schleifvorgang erkennen läßt, so heißt dies also nicht, daß keine Unterschiede der freien Grenzflächenenergien infolge unterschiedlicher Adsorption vorliegen, sondern bedeutet zunächst nur soviel, daß

offenbar die Veränderungen der Oberflächenenergie an Glas ziemlich parallel gehen mit entsprechenden Änderungen am Schleifkorn und dessen „Härte“ und Wirksamkeit in einer in ihren Einzelheiten physikalisch noch zu klärenden Weise ebenfalls beeinflussen [14].

Findet somit die zunächst überraschend geringe Abhängigkeit des Schleifeffektes an Glas bei verschiedenen Flüssigkeiten mit dem Werkzeugeinfluß der Flüssigkeit bereits eine einleuchtende Erklärung, so war es doch wünschenswert, das Adsorptionsverhalten dieser Flüssigkeiten noch einmal gesondert zu prüfen, um zu zeigen, daß die relative Invarianz des Glasabriebs nicht etwa ihre Ursache in einem speziellen Adsorptionsverhalten dieser Flüssigkeiten gegen Glas habe.

Daß eine differenzierte Adsorption verschiedener Flüssigkeiten an Glas tatsächlich besteht, ist schon auf Grund alltäglicher Beobachtungen, vor allem von Benetzungerscheinungen an Glas, kaum zu bezweifeln. Aus Reibungsmessungen geht darüber hinaus hervor, daß Moleküle mit polaren endständigen Gruppen eine sehr viel ausgeprägtere Adsorptionsneigung zu Glas haben als unpolare Moleküle. Reibungsmessungen mit Zweistoffgemischen lassen eine starke Grenzflächenaktivität, z. B. der Fettsäuren an Glas, erkennen [15]. In der vorliegenden Untersuchung wurde das Adsorptionsverhalten der benutzten Flüssigkeiten aber noch in anderer Weise untersucht, nämlich durch die Messung der Sedimentvolumen von Glaspulver in diesen Flüssigkeiten.

Die Bestimmung des Sedimentvolumens ist ein bequemes qualitatives Testverfahren auf Adsorptionsvorgänge, das in manchen Fällen eine rasche Orientierung ermöglicht [16]. Bei den vorliegenden Messungen wurden jeweils 1 g der Siebfraction kleiner DIN 100 (0,06 mm) in Standgläsern mit verschiedenen Flüssigkeiten zum Absetzen gebracht und die Volumina verglichen. Das Trockenschüttelvolumen betrug nach kräftigem Schütteln 0,90 cm<sup>3</sup>, nach 15-minütigem Zentrifugieren 0,88 cm<sup>3</sup>. Das Absetzen geschah aus rationellen Gründen in verhältnismäßig klein kalibrierten Röhren von 8,5 cm Höhe und einer inneren Weite von 8 mm. 0,1 cm<sup>3</sup> entsprachen dabei etwa 1,7 mm Höhenunterschied. Ohne auf die zum Teil noch auf eine quantitative Behandlung wartenden theoretischen Grundlagen näher einzugehen, genügt zum Verständnis des Effektes der Hinweis, daß die Geschwindigkeit des Absetzens im wesentlichen von der inneren Reibung der Flüssigkeit abhängt, daß aber das nach hinreichend langer Zeit konstant abgesetzte Volumen bei verschiedenen Flüssigkeiten Unterschiede zeigt, die auf eine geordnete Orientierung der Moleküle an der Grenzfläche der Festkörper und eine vermutlich dadurch bedingte unterschiedliche Reibung zwischen den Teilchen zurückzuführen sind. Ist die Reibung an den Stellen, an denen sich die herabsinkenden Teile berühren, groß, so bleiben die Teilchen in der einmal eingenommenen Lage sperrig liegen; ist die Reibung aber klein, so findet ein Abgleiten gegeneinander in einen dichteren Packungszustand statt. Hat nun eine Adsorption an den Oberflächen der absinkenden Teilchen stattgefunden, so ergibt sich eine dichtere Packung und also eine Abnahme des Sedimentvolumens. Über die Stärke der Adsorption und das Maß der Herabsetzung der freien Grenzflächenenergie durch Adsorption gibt sie allerdings keinen Aufschluß. Am brauchbarsten erweist sich das Testverfahren, wenn man die Adsorptionsneigung eines in Lösung gegebenen zweiten Stoffes prüfen will. Bei wäßrigen Lösungen an Glas setzt die Methode aus, da Wasser bereits ein außerordentlich kleines Sedimentvolumen hat, das durch Veränderung der Adsorption wenig beeinflusst werden kann. Dagegen ist die Prüfung sehr brauchbar, um das Verhalten organischer Substanzen in Benzol oder Cyclohexan zu prüfen. Das Sedimentvolumen dieser unpolaren Lösungsmittel ist sehr groß und verrät, daß nur eine geringe Adsorptionsorientierung der Flüssigkeit an Glas stattgefunden hat. Die generelle Brauchbarkeit der Methode zeigte sich deutlich, z. B. im Falle einer Benzolprobe, bei der eine Verunreinigung

vermutet wurde. Während reines Benzol ein relatives Sedimentvolumen von 1,95 zeigte, hatte diese Probe ein relatives Volumen von 1,68, mußte also verunreinigt sein.

Die Werte der gemessenen Sedimentvolumen in reinen Flüssigkeiten zeigt Tabelle 5, jeweils bezogen auf Wasser = 1. Wenn auch, wie ausgeführt, aus den Werten nicht auf die quantitative Veränderung der freien Grenzflächenenergie geschlossen werden darf, so weisen die größten Volumina bei Benzol und Cyclohexan doch deutlich auf eine geringere Grenzflächenaktivität dieser Substanzen hin; Flüssigkeiten mit endständigen polaren Gruppen dagegen haben kleinere Sedimentvolumen, und erwartungsgemäß ist das Volumen von 2-Äthylhexanol kleiner als das von Äthanol. Daß das Sedimentvolumen von Wasser den kleinsten Wert zeigt, kann bei der starken, bereits zum chemischen Angriff (Hydrolyse) übergehenden Affinität des Wassers zur Glasoberfläche nicht überraschen.

Tabelle 5. Sedimentvolumen von Glas in reinen Flüssigkeiten.

Flüssigkeit	Sedimentvolumen relativ	Flüssigkeit	Sedimentvolumen relativ
Wasser .....	1,00	Benzaldehyd	
Benzol .....	1,95	techn. ....	1,32
Cyclohexan .....	2,31	Äther .....	1,78
Äthanol .....	1,31	Petroleum techn.	1,68
2-Äthylhexanol .	1,24	Terpentin techn.	1,48
Benzylalkohol		Glyzerin .....	1,05
techn. ....	1,30	Silikonöl .....	1,53
Acetaldehyd ...	1,14	Äthylsilikat A ..	1,46
		Äthylsilikat B ..	1,32

Der qualitative Einfluß einer Adsorption an der Grenzfläche zeigt sich noch deutlicher bei der Bestimmung der Sedimentvolumina von Glaspulver in Lösungen von Alkohol oder Fettsäure in Benzol und Cyclohexan. In jedem Falle ergibt sich bereits bei sehr kleinen Konzentrationen eine starke Grenzflächenaffinität der polaren organischen Substanzen zu Glas. Als Beispiel zeigen Bild 4 und 5 die Messungen gegen Stearinsäure in Benzol und in Cyclohexan. Bild 6 gibt einen Eindruck der deutlichen Veränderlichkeit der Höhe des abgesetzten Glaspulvers in den Standgläsern. Bereits bei einem Molenbruch von 0,0001 (d. h. ein Molekül Stearinsäure auf 10000 Moleküle Lösungsmittel) zeigt sich eine starke Volumenabnahme, dem ein Wiederanstieg mit zunehmender Konzentration folgt, weil offenbar die Fettsäuremoleküle als Doppelmoleküle angelagert werden, was nach molekular-physikalischer Vorstellung eine Reibungserhöhung zwischen den festen Teilchen bedeutet.

Parallel zu diesen Sedimentvolumen wurde für die gleichen Konzentrationen auch der Abrieb bestimmt (ausgezogene Kurven in Bild 4 und 5), und gerade an diesen Messungen zeigt sich deutlich, daß der Abrieb nicht ausschließlich von der Veränderung der Grenzflächenenergie des geschliffenen Körpers abhängig ist. Der Abrieb zeigt bei kleinsten Konzentrationen kaum eine Veränderung; erst bei zunehmender Konzentration, in einem Bereich, wo das Sedimentvolumen einen Wiederanstieg zeigt, wird der Abrieb vergrößert. Im Sinne der oben gegebenen Vorstellung über eine gleichzeitige Wirkung der Flüssigkeit auf Festkörper und Schleifkorn heißt das, daß die Stearinsäure auf Glas wie auf das Schleifmittel (Karborundum) bei kleinsten Konzentrationen eine

parallel laufende Wirkung hat und erst mit dem Auftreten von Doppelmolekülen an der Grenzfläche unterschiedliche Veränderungen in der Grenzflächenenergie erleidet, die zu einem unterschiedlichen Schleifverhalten führen.

Wenn die spezifische Art der Flüssigkeitswirkung an Glas mit gleichsinnigen und gleichartigen physikalischen Veränderungen an den Oberflächen sowohl des Schleifkörpers als auch des Schleifkorns nun bereits eine wesentliche Aufklärung erfährt, so bleibt dennoch offen, ob bei Glas nicht außerdem noch weitere Einflüsse mitspielen. In erster Linie bleibt derjenige Faktor zu prüfen, der nach allgemeiner Ansicht betriebserfahrener Praktiker die Hauptaufgabe der Flüssigkeit ausmacht: die Kühlwirkung. Im Hinblick auf diese Wirkung der Flüssigkeit muß hervorgehoben werden, daß ja nicht nur an Glas, sondern bereits an Porzellan und an Quarz ein gegenüber Metallen wesentlich kleinerer Einfluß der Flüssigkeit auf den Abrieb festzustellen ist, und es fällt auf, daß die Reihenfolge der Festkörper dabei parallel läuft zur mittleren Wärmeleitfähigkeit der betreffenden Stoffgruppen, die in  $\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$  bei Metallen etwa 0,2—0,3, bei Quarz 0,03, bei Porzellan 0,004 und bei Glas 0,002 beträgt. Im allgemeinen wird die Kühlwirkung der Flüssigkeit hergeleitet aus der Tatsache einer mehr oder weniger stark spürbaren Erwärmung der Schleifflüssigkeit; zum rechten Verständnis der Möglichkeit eines differenzierten Einflusses verschiedener Flüssigkeiten muß man sich aber erinnern, daß diese Erwärmung nur das integrale Ergebnis von sehr vielen in kleinsten Dimensionen lokalisierten Bruchvorgängen darstellt. Bei jedem solchen Bruchvorgang wird nur ein Teil der Spannungsenergie zur Erzeugung der neuen Oberfläche verbraucht und ein anderer, wesentlich größerer Teil als Wärme freigesetzt. Es ist nicht zu bezweifeln, daß dabei auf kleinste Bereiche lokalisierte

leicht einzusehen, daß die Temperaturspitzen bei metallischen, gut wärmeleitenden Festkörpern in diesem Körper selbst relativ schnell ausgeglichen werden können

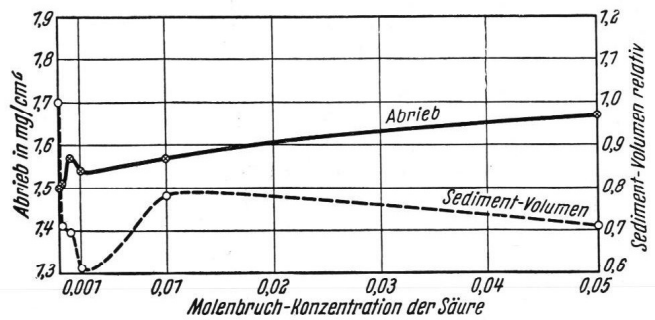


Bild 4. Konzentrationsabhängigkeit des Abriebs von Glas und des Sedimentvolumens von Glaspulver in Lösungen von Stearinsäure in Benzol.

nen und der Anteil der Flüssigkeit an der Wärmeleitung nicht so sehr ins Gewicht fällt. Anders aber bei spröden, schlecht wärmeleitenden Stoffen; hier könnte es einen erheblichen Unterschied ausmachen, in welchem Umfange und in welcher Zeit die lokale Wärme von der Flüssigkeit aufgenommen wird. Bei schlechter Ableitung der Wärme wird die Oberfläche nach dem Bruch relativ stärker verspannt bleiben und den Eintritt weiterer Brüche mehr begünstigen als bei guter Abführung der Wärme. In welcher Größenordnung ein solcher Einfluß liegt und in welchem Grade sich die verschiedenen Flüssigkeiten dabei unterscheiden, läßt sich jedoch ohne eine eingehende Untersuchung des Wärmeüberganges zwischen Flüssigkeit und Glas nicht sagen, und ehe entsprechende zuverlässige Angaben nicht vorliegen, müssen alle Überlegungen zu dem Problem einer spezifischen Kühlwirkung der Flüssigkeiten Vermutungen bleiben.

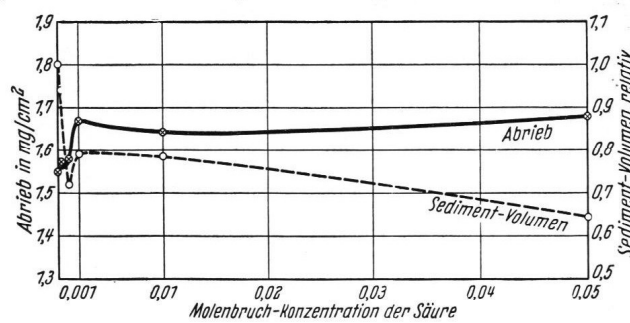


Bild 5. Konzentrationsabhängigkeit des Abriebs von Glas und des Sedimentvolumens von Glaspulver in Lösungen von Stearinsäure in Cyclohexan.

Bei jedem solchen Bruchvorgang wird nur ein Teil der Spannungsenergie zur Erzeugung der neuen Oberfläche verbraucht und ein anderer, wesentlich größerer Teil als Wärme freigesetzt. Es ist nicht zu bezweifeln, daß dabei auf kleinste Bereiche lokalisierte

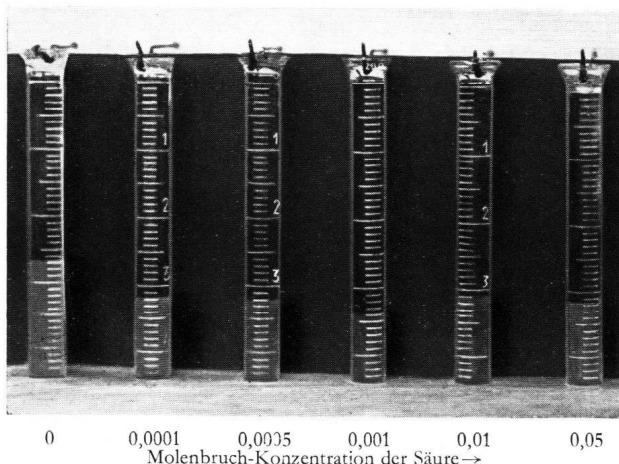


Bild 6. Sedimentvolumen von Glaspulver in Lösungen von Stearinsäure in Benzol.

hohe Temperaturspitzen erreicht werden. Bei Metallen sind diese Temperaturen experimentell gemessen [17], und BOWDEN glaubt sie auch bei der Erzeugung von Kratzern auf Glas empirisch erwiesen [18]. Es ist nun

Deutlicher noch als beim Schleifen tritt im technischen Betrieb die Kühlwirkung der Flüssigkeit beim Bohren von Glas in Erscheinung. In der Absicht zu prüfen, ob die beim Schleifen von Glas gefundenen Ergebnisse auch bei einem derartigen, in seinen Arbeitsbedingungen so andersartigen mechanischen Angriff der Oberfläche gültig sind, wurden daher in Ergänzung der Untersuchung noch eine Reihe von orientierenden Bohrversuchen an Glas unternommen.

Die Bohrungen wurden durchgeführt mit einer handelsüblichen Bohrmaschine bei etwa 900 U/min mit einem Widiastahlbohrer von 10 mm Durchmesser. Der Bohrdruck wurde stetig von Hand ausgeübt, nachdem sich zeigte, daß ein konstanter mechanischer Druck auf den Bohrer einen zunächst zu großen spezifischen Flächendruck an der Bohrspitze, bei zunehmender Tiefe des Bohrloches aber einen zu geringen Bohrdruck ergab. Der Druck mit der Hand aber paßt sich dem größtmöglichen Flächendruck fast zwangsläufig an und kann nach einiger Übung auch so ausgeführt werden, daß die Bohrerergebnisse relativ gut übereinstimmen. Um eine gleichmäßige Wirkung bei allen Flüssigkeiten zu gewährleisten, wurden sie nicht durch Zutropfen herangeführt, sondern vor Beginn der Bohrung in einen um den Bohrer aufgekitteten Ring geschüttet. Als Maß für die Bohrleistung diente das in 30 sec gebohrte Volumen. Als genaueste Be-

Die Bohrungen wurden durchgeführt mit einer handelsüblichen Bohrmaschine bei etwa 900 U/min mit einem Widiastahlbohrer von 10 mm Durchmesser. Der Bohrdruck wurde stetig von Hand ausgeübt, nachdem sich zeigte, daß ein konstanter mechanischer Druck auf den Bohrer einen zunächst zu großen spezifischen Flächendruck an der Bohrspitze, bei zunehmender Tiefe des Bohrloches aber einen zu geringen Bohrdruck ergab. Der Druck mit der Hand aber paßt sich dem größtmöglichen Flächendruck fast zwangsläufig an und kann nach einiger Übung auch so ausgeführt werden, daß die Bohrerergebnisse relativ gut übereinstimmen. Um eine gleichmäßige Wirkung bei allen Flüssigkeiten zu gewährleisten, wurden sie nicht durch Zutropfen herangeführt, sondern vor Beginn der Bohrung in einen um den Bohrer aufgekitteten Ring geschüttet. Als Maß für die Bohrleistung diente das in 30 sec gebohrte Volumen. Als genaueste Be-

stimmungsmethode für dieses Volumen erwies sich die Ausfüllung mit einer plastischen Masse, die dann gewogen wurde. Mit ein und derselben Flüssigkeit wurden jeweils vier Bohrungen ausgeführt, wobei der Bohrer nach jeder Bohrung wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt wurde. Die Schwankungen innerhalb einer solchen Serie von vier Messungen betragen im allgemeinen etwa 10%. Die in Tabelle 6 angegebenen Werte zeigen allerdings eine größere Spanne. Die Ursache dafür liegt darin, daß sich bei den verschiedenen Meßreihen verschiedene Mittelwerte für eine Flüssigkeit ergaben, je nachdem in welcher Reihenfolge die Flüssigkeiten aufeinander folgten, eine Beobachtung, auf die zurückzukommen sein wird.

Der Zusammenhang der in Tabelle 6 angegebenen relativen Bohrleistung, wiederum bezogen auf den Wert für Wasser gleich 1, mit den Ergebnissen der Schleifversuche ist auffallend schlecht. Zwar ergeben Benzol

Tabelle 6. Bohreffekt an Glas mit reinen Flüssigkeiten.

Flüssigkeit	Bohrvolumen relativ	Flüssigkeit	Bohrvolumen relativ
Wasser . . . . .	1,00	Petroleum techn.	1,0—1,2
Benzol . . . . .	0,4—0,7	Terpentin techn.	1,2—1,6
Cyclohexan . . . . .	0,3	Glyzerin . . . . .	1,2—1,6
2-Äthylhexanol . . . . .	1,3—2,3	Silikonöl . . . . .	0,4—0,7
Äther . . . . .	0,65		

und Cyclohexan schlechte Bohreffekte, aber die Differenz gegenüber Wasser ist beträchtlich viel größer als bei den Schleifversuchen. Auffallend ist weiter, daß der Bohreffekt bei Terpentin besser ist als bei Petroleum und daß Silikonöl einen bemerkenswert schlechten Bohreffekt zeigt.

Bedenkt man, daß der Gegenkörper beim Bohren metallisch ist und also unter den Schleifmitteln Ferrochrom am ehesten zum Vergleich geeignet sein sollte, so wird deutlich, daß die veränderten Arbeitsbedingungen eine wesentliche Verlagerung bezüglich der wirkenden physikalischen Effekte hervorgerufen haben. Ein Zusammenhang zwischen der Adsorptionsneigung der Flüssigkeit und dem Bohreffekt ist nicht erkennbar. Dagegen zeigte sich schon bei der Durchführung der Versuche, daß eine unterschiedliche Kühlwirkung erheblich an Bedeutung gewonnen hat.

Der Einfluß der Erwärmung zeigt sich schon darin, daß im allgemeinen mit einem von dem vorausgehenden Versuche noch heißen Bohrer eine größere Bohrleistung erzielt wurde als mit einem kalten Bohrer. Aus diesem Grunde wurde, wie erwähnt, der Bohrer zwischen den einzelnen Messungen jeweils wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt. Es wird hier ganz deutlich, daß die Bohrleistung entscheidend abhängt von der Art und Weise, wie die Flüssigkeit die Wärme wegnimmt. Wird die Wärme in der Bearbeitungszone schlecht abgeleitet, so erhöht sich die gesamte Temperatur von Stahl und Glas. Das Glas wird weicher und scheint leichter bearbeitbar. Man hat beim Bohren dann fast den Eindruck, als ob sich der Stahl in ein weiches Material hineinfrißt. Wenn dieser Punkt erreicht ist, befindet man sich allerdings auch bereits in dem Gefahrenbereich, wo das Glas zu springen geneigt ist. Bei Äthylhexanol z. B. und auch bei Glyzerin wurde das Glas so warm, daß Bohrzeiten über 30 sec nicht gewagt werden konnten.

Mit der verstärkten Bedeutung der Kühlung allein ist jedoch die Besonderheit des Bohrvorganges nicht charakterisiert. Hinzu kommt, daß der Einfluß der Flüssigkeit auf den Gegenkörper, der beim Schleifen mit verschiedenartigen Schleifmitteln bereits als wesentlich

für Oberflächenbearbeitungsvorgänge in Anwesenheit einer Flüssigkeit erkannt wurde, beim Bohren eine noch viel größere Rolle spielt. Der Einfluß, den die Flüssigkeit auf den Bohr Stahl hat, zeigte sich schon darin, daß die Bohrleistung weitgehend von der Reihenfolge der verwendeten Flüssigkeiten abhängig war. Durch das Bohren beispielsweise mit Benzol und Cyclohexan, im geringen Maße auch mit Wasser, wurde der Bohrer geradezu abgestumpft, so daß das Bohrerergebnis bei der nachfolgenden Flüssigkeit wesentlich kleiner als im Mittel ausfiel. Diese Beobachtung ist auf Grund der Erkenntnisse über den Verschleiß von Metallen durchaus verständlich. Die Abnutzung, die der Bohrer erleidet, ist bei verschiedenen Flüssigkeiten nicht nur quantitativ verschieden, sondern das entstehende Verschleißprofil hängt auch in ganz spezifischer Art von der Flüssigkeit ab. Einen deutlichen Eindruck dieser Wirkung ergibt die in Tabelle 7 mitgeteilte Meßreihe. Mit einem neu angeschärften Bohrer wurde in der ersten Bohrung bei einer 1<sup>0</sup>/<sub>10</sub>igen Bohröl-Wasser-Emulsion ein Wert gefunden, der etwa der mittleren Bohrleistung bei Wasser entsprach. Aber schon die zweite bis vierte Messung zeigten dann einen erheblichen Abfall der Bohrleistung, der in den nachfolgenden Bohrungen mit Natriumsulfonat und mit verdünnter Salzsäure noch vergrößert wurde.

Tabelle 7. Einfluß der Reihenfolge der Flüssigkeiten auf die Bohrleistung.

Nr.	Flüssigkeit	Relatives Bohr-volumen	Nr.	Flüssigkeit	Relatives Bohr-volumen
1	1% Bohröl in Wasser . . .	1	5	Wasser . . .	0,54
	1. Messung		6	Terpentin . .	0,85
2	1% Bohröl in Wasser . . .	0,59	7	Wasser . . .	0,60
	Durchschn.		8	Petroleum ..	0,56
	2.—4. Messg.		9	Terpentin ..	0,96
3	1% Na-Sulfonat i. Wasser	0,52	10	Petroleum ..	0,73
			11	Petroleum ..	0,99
4	1 <sup>1</sup> / <sub>10</sub> n HCl . .	0,43	12	Petroleum ..	1,37
			13	Terpentin ..	1,19

Terpentin zeigt einen Wiederanstieg der Bohrleistungen, der aber noch erheblich unter der mittleren Bohrleistung für Terpentin bleibt, aber eine Verbesserung der Bohrleistung mit Wasser bewirkt (vgl. Bohrung 5, Bohrung 7). Noch wesentlich verbessert wird die Bohrleistung schließlich durch die Verwendung von Petroleum.

In diesem Zusammenhang ist eine Bemerkung zu machen zu der von den Praktikern oft diskutierten Frage, ob Terpentin oder Petroleum die geeignetere Bohrflüssigkeit sei. Die vorliegenden Messungen ergeben, daß eine größere Bohrleistung zwar mit Terpentin zu erzielen ist, daß aber Petroleum auf die Dauer doch wohl den Vorzug verdient, weil sich bei Petroleum der Bohrer länger und besser scharf hält. Man muß annehmen, daß bei Petroleum durch den Verschleiß eine mikroskopische Oberflächenstruktur laufend regeneriert wird, die einen gleichbleibenden Angriff auf den Glaskörper gewährleistet. Diese Schlußfolgerung soll indes keine Vorschrift sein, wie überhaupt die Frage der Anwendung der hier berichteten Ergebnisse auf die Praxis nicht ohne Vorbehalt möglich ist. Es handelt sich hier in jedem Falle um Messungen, die sich bezüglich Zeit, Druck und Geschwindigkeit in engen Grenzen bewegen und die nur dort Gültigkeit beanspruchen können, wo einigermaßen ähnliche Arbeitsbedingungen vorliegen.

Die durchgeführte Untersuchung wurde hier in ihrer ganzen Breite, auch mit solchen Ergebnissen, für die eine befriedigende Deutung noch aussteht, geschildert. Vielleicht liegt einer der Gründe für die zahlreichen Schwierigkeiten, denen sich die heutige Glasforschung gegenübergestellt sieht, darin, daß empirische Ergebnisse, für die eine abgerundete Theorie noch nicht vorliegt, viel zu wenig bekannt gemacht werden. Zugleich aber sollte die ausführliche Schilderung der Untersuchung deutlich machen, wie schwierig es ist, einen scheinbar so einfachen Vorgang wie die mechanische Oberflächenabtragung in seinen physikalischen Elementarvorgängen zu analysieren — wobei allerdings die Gefahr in Kauf genommen werden mußte, daß der eine oder andere nun voreilig die Leistungsfähigkeit der Forschung überhaupt in Zweifel ziehen wird.

Die Untersuchung ergibt, daß der Einfluß der Flüssigkeit auf die mechanische Oberflächenabtragung

an Glas nicht ausschließlich aus einer Herabsetzung der freien Grenzflächenenergie des Glases erklärt werden kann. Es findet vielmehr gleichzeitig auch eine Einwirkung der Flüssigkeit auf den Gegenkörper statt, deren Bedeutung je nach der Art des Bearbeitungsvorganges sehr verschieden sein kann. Es ist außerdem zu vermuten, daß die Art, wie die in der Bruchzone entstehende Wärme durch die Flüssigkeit abgeleitet wird, von Einfluß auf den gesamten Bearbeitungsvorgang ist. Bei technischen Bearbeitungsprozessen ist die Trennung und die Abschätzung der Bedeutung jedes einzelnen dieser Faktoren in seinem Verhältnis zu den übrigen noch nicht befriedigend möglich. Unsere Erkenntnisse über den Einfluß der Flüssigkeit auf Bruchvorgänge bei spröden Körpern lassen damit noch wesentliche Fragen offen, die zu klären nur gemeinsame Aufgabe von empirischer Untersuchung und theoretischer Betrachtung sein kann.

#### Anmerkungen und Schrifttum.

- [1] Die nachfolgenden Darstellungen beschäftigen sich in erster Linie mit dem Schleifen von Glas. Das Ritzen und Schneiden von Glas und die Rolle der Flüssigkeit bei dieser Art von Bearbeitungsvorgängen sollen in einer späteren Untersuchung behandelt werden. Der Vorgang des Polierens wird zunächst in den folgenden Betrachtungen außer acht bleiben. Ohne auf die Fragen nach dem Wesen des Poliervorganges im einzelnen einzugehen — vgl. dazu die Untersuchungen von SMEKAL, KLEMM u. a. — darf wohl als sicher angenommen werden, daß beim Polieren von Glas andere Vorgänge als eine mechanische Oberflächenabtragung im Vordergrund stehen. Soweit aber beim Polieren sekundär eine mechanische Abnutzung statthaben könnte, dürfte die hier anzustellende Untersuchung auch für das Polieren bedeutsam sein.
- [2] Ältere Arbeiten bis 1932, vgl. v. REIS, L. und MARKMANN, A.: Über das Polieren des Glases, DGG-Fachauschußbericht Nr. 21, Juni 1932. Von neueren Arbeiten seien erwähnt: v. STOESSER, K.: Das Härteverhalten von Gläsern beim Schleifen mit rotierender Scheibe, Glastechn. Ber. **18** (1940) S. 337—352. BRANDT, H. M.: Über die Veränderung von Glasoberflächen durch Schleifen und Polieren, Glastechn. Ber. **16** (1938) S. 123—131, und ders., Diss. Univ. Berlin 1936 [Ref. Glastechn. Ber. **15** (1937) S. 314]; ferner Diss. POETZL, T. H. Dresden, 1933 [Ref. Glastechn. Ber. **13** (1935) S. 61], und neuerdings GEORG, K.: Beitrag zum Schleifen optischer Gläser mit losen Schleifmitteln, Glastechn. Ber. **23** (1950) S. 100—106.
- [3] TAMMANN, G. und ELSNER v. GRONOW, H.: Über das Ritzen von Spiegelglas. Z. anorg. allg. Chem. **201** (1931) S. 37—40. [Ref. Glastechn. Ber. **11** (1933) S. 33.]
- [4] v. STOESSER, K.: [2], Anm. 2.
- [5] RAMSAUER, R. und WOLF, K. L.: Einfluß des Schmiermittels auf Energie- und Materialverschleiß bei Grenzschichtreibung. Chem.-Ing.-Techn. 1949, Nr. 11/12, S. 216—218 [Ref. Glastechn. Ber. **24** (1951) S. 69] und RAMSAUER, R.: Physikalische Zusammenhänge bei der Grenzschichtreibung, Teil I bis III. Kolloid-Z. **111** u. **112**, insbesondere Teil III: Verschleiß und Grenzschichtreibung. Kolloid-Z. **112** (1949) S. 26—35. [Ref. Glastechn. Ber. **24** (1951) S. 70.]
- [6] v. ENGELHARDT, W.: Schleiifestigkeit und Grenzflächenenergie fester Stoffe. Naturwiss. **33** (1946) S. 195—203. [Ref. Glastechn. Ber. **22** (1948/49) S. 270] und ders. mit kurzer Zusammenfassung in den Fiatberichten „Naturforschung und Medizin in Deutschland, 1939—1946“, Bd. 49, Mineralogie, S. 69, unt. „Schleifen“.
- [7] Die Grenzflächenenergie von Flüssigkeiten gegen Luft, also an der Oberfläche, wird als „Oberflächenspannung“ bezeichnet; in diesem Falle ist der Begriff „Spannung“ noch anschaulich, denn die Flüssigkeit erscheint wie von einer Membrane umgeben, die das Bestreben hat, die kleinste Oberfläche herzustellen.
- [8] Näheres über Adsorption und Grenzflächenenergie vgl. z. B. WOLF, K. L.: Theoretische Chemie, 2. Aufl. Leipzig: Barth 1948.
- [9] Die Angaben beruhen auf einer frdl. brieflichen Mitteilung von W. v. ENGELHARDT. — Die Werte, die in der Arbeit R. RAMSAUER (in Glastechn. Ber. **22** (1949) S. 211, vgl. Anm. 13) für den Abrieb angegeben sind, beziehen sich nicht auf Glas, sondern, was aus dem Wortlaut vielleicht nicht hinreichend deutlich wird, auf Quarz.
- [10] In der Beschaffung der organischen Flüssigkeiten unterstützte uns die IMHAUSEN-Forschung in Witten. Silikonöl und Kieselsäureester stellte Prof. STAMM von der Goldschmidt-AG. in Essen zur Verfügung. Beiden Firmen sei für die frdl. Unterstützung auch an dieser Stelle gedankt.
- [11] Bei Feststellung dieses Unterschiedes der Wirkung der verschiedenartigen Kieselsäureäthylester schien sich zunächst die Möglichkeit anzubieten, Schleifmessungen als eine Art Test für die Art der Bindung auszugestalten und die Erniedrigung des Abriebs auf chemische Veränderungen an der Glasoberfläche zurückzuführen. Unter Verweis auf die späteren Ausführungen erscheint hier indes Vorsicht geboten. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich hierbei nur um kleine Differenzierungen im Adsorptionsverhalten der beiden Stoffgruppen gegen Glas einerseits und Siliziumkarbid andererseits.
- [12] Vgl. dazu WAGNER, H. W.: Neue Auffassung der Härteeigenschaften als Ursache der Schleifleistung. Mech. Engn. **72** (1950) S. 225—226.
- [13] Die Diskussion der Frage nach dem Zusammenhang zwischen Abrieb und Herabsetzung der freien Grenzflächenenergie findet sich eingehender bei RAMSAUER, R.: Freie Grenzflächenenergie und Schleiifestigkeit von Glas. Kolloid-Z. **121** (1951) Nr. 1/2, S. 71—74. [Ref. Glastechn. Ber. **24** (1951) S. 182.]
- [14] W. v. ENGELHARDT stellt zur Erklärung der Indifferenz von Glas noch eine weitere Anschauung zur Diskussion. Danach soll die Ursache für das Verhalten von Glas darin liegen, daß die Mehrzahl der Brüche unter der Oberfläche und also unter Ausschaltung der Flüssigkeitswirkung ihren Ausgang nehmen, während die Brüche normalerweise, z. B. an Quarz, von der Oberfläche ausgehen. Die Tatsache, daß der Bruchbeginn bei Glas im Innern liegt, müßte jedoch wohl noch empirisch erwiesen werden. Bei Zerreißversuchen an Glas jedenfalls fand SMEKAL, daß der Bruchbeginn in den weitaus meisten Fällen an der Oberfläche lag.
- [15] RAMSAUER, R.: Grenzschichtreibung an Glas als Adsorptionsproblem. Glastechn. Ber. **22** (1949) S. 205—211, insbesondere Bild 2/4.
- [16] Über Prinzip und Methodik der Bestimmung von Sedimentvolumen vgl. WOLF, K. L. und KUHN, D.: Zur Erscheinung und Theorie der Sedimentvolumina von Pulvern in Flüssigkeiten. Angew. Chem. **63** (1951) Nr. 12, S. 277—280.
- [17] MAILÄNDER und DIES: Beitrag zur Erforschung der Vorgänge beim Verschleiß. Techn. Mitt. Krupp, Forschungsbericht **5** (1942) S. 212, ferner BOWDEN, F. P.: vgl. Anm. 18.
- [18] BOWDEN, F. P.: Reibung. Nature **166** (1950) 4217, S. 330—334. (20459)