

Glasfehler als Beispiel für die Technologie von Störungsscheinungen

Von Dr. phil. habil. HANS JEBSEN-MARWEDEL, Gelsenkirchen¹⁾

Wer im Betrieb mit der Herstellung von Werkstoffen zu tun hat, muß sein stetes Bemühen darauf richten, Fehler im Fabrikationsgang und dadurch im Werkstoff selbst zu vermeiden. Diese Forderung ist aber garnicht immer leicht zu erfüllen, selbst wenn man bereits über gute betriebliche Erfahrungen verfügt. Man muß den Werdegang der Fehler (Störungsscheinungen) eines Werkstoffes kennen lernen, um diese wirksam zu bekämpfen. An Beispielen aus dem Bereich der Glastechnik wird gezeigt, daß es zweckmäßig ist, die Technologie eines Werkstoffes von der Seite seiner Fehler her zu behandeln.

Die gegenseitige Beziehung von Wissenschaft und Technik hat uns gelehrt, daß eine engere Verbindung schon bei der Gestaltung des Lehrstoffes erwünscht ist. Manche Studierenden und manche Chemiker und Ingenieure, die heute in einem neuen Betätigungsfeld arbeiten, möchten das erworbene Wissen möglichst ohne Umwege industriell verwerten. In vielen Fällen wird so die Lust zu mehr wissenschaftlicher Betätigung verdrängt. Die Gründlichkeit der Ausbildung darf aber unter dieser Einstellung nicht leiden. Man wird sich also fragen müssen, wie diese Neigung zur praktischen Verwertung des Erlernten frühzeitig und ohne Schaden an der geistigen Haltung in eine nutzbringende Richtung zu lenken ist.

Praktische Anforderungen, Erfahrungsvermittlung

Die übliche Form der Behandlung technologischen Gedankengutes besteht in der Sammlung und Niederlegung aller Zusammenhänge und Eigenschaften im Hinblick auf die zu erwartenden bzw. gewünschten Zustände eines Werkstoffes. Es bedeutet für den Techniker unbedingt eine große Erleichterung, wenn ihm die Möglichkeit geboten wird, sowohl dem Bilde als auch dem Worte nach unmittelbar denjenigen Erscheinungen nachzugehen, mit denen er sich täglich auseinandersetzen muß, weil sie sich nun einmal auf dem Wege zu seinem Ziel breit machen; als dieses lernt er sehr bald die möglichst weitgehende Befreiung seines Erzeugnisses von den ihm leicht anhaftenden Fehlern kennen.

Der von der Hochschule kommende Chemiker, Physiker oder Metallurge, ebenso wie ein Hüttenmann, der sein Fach wechselt, sieht sich, in den Betrieb versetzt, oft vor einer Fülle von Vorkommnissen, die ihm der Unterricht oder das Fachschrifttum nur unzureichend, keinesfalls aber in geschlossener Form vermittelte; er kommt sich fremd in seinem Fach vor und wirkt auf seine Betriebsgenossen unbeholfen. Auch der Einblick in die Betriebe, der ihm durch gelegentliche Besuche vermittelt werden kann, zielt ja nur darauf ab, ihn den technologischen Werdegang kennen lernen zu lassen, wie er sein soll; seine eigentliche Problematik dagegen erschließt sich ihm frühestens im Laufe der praktischen Arbeit. Bei ihr lernt er erst kennen, daß der Werkstoff in der Praxis ganz andere Seiten darbietet als in der Theorie. Jetzt geht ihm auf, daß die Leistung des Technikers weniger darin besteht, gewissermaßen die „Gebrauchsanweisung zur Durchführung einer Fertigung“ einzuhalten, als darin, einen ständigen, hartnäckigen, aber auch abwechslungsreichen Kampf gegen die Tücken zu führen, die sich ihm entgegenstellen und zu deren Beherrschung Erfahrung gehört. Diese sagt nämlich aus, daß es die nachteiligen Eigenschaften sind, die uns vorwiegend in Anspruch nehmen, nicht die normalen.

Sollte es nicht möglich sein, ihn an dieser vorwiegend betrieblichen Erfahrung frühzeitig teilnehmen zu lassen? Bedeutet es nicht eine erhebliche Ausweitung des Erlernten, wenn ihm durch einen wissenschaftlich geschulten Praktiker als Gegenstand des Lehrfaches Einblick gewährt wird in die Betriebsstörungen und die Fehler des Fabrikationsganges bzw. des Werkstoffes?

Systematik der Fehler-Techologie

Es soll nicht verkannt werden, daß, namentlich auf dem Gebiet der Metalle, viele der besten Arbeiten sich gerade mit ihren Fehlern befassen, aber eine geschlossene Technologie von dieser Seite her besteht wohl vorerst nur für das Glas²⁾. Sie verfolgt nicht den Werdegang des behandelten Stoffes, sondern den seiner

¹⁾ Nach einem Vortrag im „Haus der Technik“, Essen, Sommer-Sem. 1946. Das dort verwendete Bildmaterial konnte hier nur z. Teil gebracht werden.

²⁾ H. Jebsen-Marwedel: Glastechnische Fabrikationsfehler. Berlin 1936, Verlag Julius Springer. — (11. Auflage in Vorbereitung).

Fehlerarten, ist also auf ganz andere Zusammenhänge angewiesen und gezwungen, sich auch der oft verkannten oder vernachlässigten meisterlich handwerklichen Erfahrung anzunehmen, die damit in das System einbezogen wird und ihre wissenschaftliche Deutung oder Kritik erfahren muß.

Den Überblick über ein solches System bietet Bild 1. Es setzt die auftretenden Glasfehler zu den am ehesten in Betracht kommenden Störungsquellen in Beziehung. Jedes schraffierte Feld kennzeichnet eine bestimmte Gruppe von Fehlern, die natürlich in verschiedenen Varianten auftreten, ja oft sogar verschiedene Ursachen haben können. Es darf aber für den Untersuchenden nicht lange zweifelhaft sein, wo er die Störung einzurichten hat, um ihr wirksam zu begegnen. Hierüber entscheidet dann das ausgiebig zur Verfügung stehende Vergleichsmaterial.

Genesis einer Fehlerart

Es sei zunächst ein Beispiel herausgegriffen, welches zu den für Glas besonders entscheidenden Homogenitätsstörungen gehört und neuerdings bis ins einzelne verfolgt werden konnte:

Es ist die Aufgabe des Glastechnikers, möglichst homogenes Glas zu erzeugen. Er erfährt bald genug, daß dies meist ein frommer Wunsch bleibt, weil das Glas stets durchsetzt ist mit Schlieren. Er muß sich also mit dieser Erscheinung auseinandersetzen.

Die Frage heißt jetzt aber nicht mehr: „Wie kommt es, daß das Glas schlierig ausfällt?“ (Antwort – aber keine Erklärung: „Weil sich in ihm verschieden zusammengesetzte, schwer mischbare Raumteile nebeneinander vorfinden“) – sondern sie richtet sich auf die Erscheinung selbst, die Schliere, und lautet: „Welches sind die Umstände ihrer Entstehung?“ Sie zielt darauf ab, den Fehler bis an seinen Ursprung zurückzuverfolgen, nicht den Stoff³⁾. Gelingt dies nicht unter betriebsgerechten Bedingungen, so müssen sie künstlich herbeigeführt, erforderlichenfalls „in Reinkultur gezüchtet“ werden, wie jedes naturwissenschaftliche Experiment.

Infolgedessen hat die Bildreihe 2 mit der Herstellung homogenen Glases nur ganz entfernt etwas zu tun; um so eingehender klärt sie die Entstehungsgeschichte von Schlieren durch ihre Rückverfolgung bis zur eigentlichen Form ihres Ursprungs auf und ist damit für die Beurteilung der Homogenität des Glases und der ihr drohenden Störungen schließlich von grundsätzlicher Bedeutung. Darüber hinaus ermöglichen diese Aufnahmen sogar einen Einblick in die Vorgänge an löslichen Flüssigkeitspaaren, für die das Glas dank der Trägheit, mit dem sie sich an ihm vollziehen, sozusagen mit „natürlicher Zeitlupe“ als Modell gedient hat.

³⁾ Aus dem Bereich der maßgeblich von ihm entwickelten Großzahlforschung, die sich die Erkundung der Verbesserungsmöglichkeiten eines Erzeugnisses durch Ausschalten seiner Fehler auf statistisch zu erschließenden Wegen zur Aufgabe stellt, macht mich K. Daeves in dankenswerter Weise brieflich auf folgendes aufmerksam: Man wird sich natürlich nicht darauf beschränken dürfen, ein Verfahren oder einen Gegenstand unter alleiniger Berücksichtigung der örtlichen Fehlererscheinungen zu verbessern. Dann würde man leicht den gleichen Fehler begehen wie die Medizin, die eine Zeit lang bestimmte Krankheitserscheinungen nur örtlich behandelte, bis man erkannte, daß diese Erscheinungsform wirksam nur über eine Änderung der Konstitution zu bekämpfen ist.

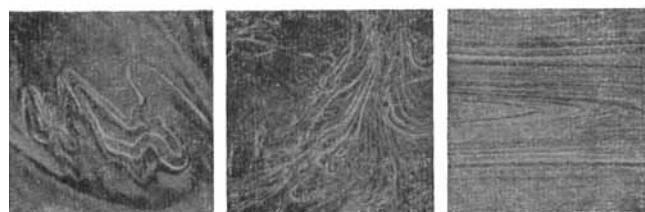
Auch in der Technik ist es nicht immer richtig, sich über das kausale Zustandekommen des Fehlers den Kopf zu zerbrechen, weil man dann leicht auf „Ursachen“ stößt, die eine Voraussetzung für das ganze Verfahren sind, daher auch nicht ohne weiteres abgestellt werden können. Besonders wirksam hat sich ein Verfahren erwiesen, bei dem man zunächst ohne Berücksichtigung der Kausalzusammenhänge feststellt, wie sich der Anteil der fehlerhaften Ware mit bestimmten Variationen beeinflußbarer Betriebsbedingungen verändert. Da es sich dabei um Wahrscheinlichkeitsfunktionen handelt, genügt es oft, die erkannten Einflußgrößen nur soweit, wie dies technisch oder wirtschaftlich tragbar erscheint, dann aber alle gleichzeitig in die als günstig erkannte Richtung einzustellen. Dadurch werden die einzelnen Wahrscheinlichkeiten multipliziert mit starker Erfolg auf das Absinken des Fehleranteils einwirken. Im Sinne der Bekämpfung dieser Fehler würde dann die erste Fragestellung lauten: „Mit welchen Betriebsfaktoren und in welcher Weise steht der Anteil der fehlerhaften Stücke in Beziehung?“

Glasfehler und ihre möglichen Ursachen	Störungsquellen									
	Gemenge (Rohstoffe) mechanisch chemisch misch	Schmelze (Temperatur) Schmelzen Läute Ab- rührung stehen	Ofen- et- mos- phäre	FFMaterial Ober- ofen	Hafen Wanne Schmiede usw.	Formgebung heiß kalt	Kühlen	Versand u. Handel Ver- packen Lager port	Ge- brauch	
● Glasfehler	Steinchen (feste Körper im Glas)									
	Knoten									
	Schlieren (Glas im Glas)									
	Galle (Aussickerung)									
	Blasen (Gase im Glas)									
	Färbung (Mißfärbung)									
	Entglasung (Kristalle im Glas)									
	Formfehler Bearbeitungsfehler									
	Spannung									
	Bruch Verletzung									
	Niederschläge Zersetzung									

B11.1

Bild 1
Schema des Zusammenhangs der vorkommenden Fehler des Glases mit verschiedenen Störungsquellen im Verlauf seines „Werdegangs“.

a b c



d e f

Bild 2

Morphologische Entwicklungsstufen der „Schlieren“ im Glasfluß
a Ursprünglich kugelförmiger Raumteil einer Glasschmelze, der sich durch Adhäsion über stereometrisch gleiche Raumteile ausbreitet und durch Kapillarität zwischen sie eindringt, bevor Lösung durch Diffusion stattfindet.

b Spontan vor sich gehende Mischung: Noch ist ein sich trichterförmig aufstülpenden Raumteil zu erkennen, die Umgebung aber schon „gestört“ durch äußere Einwirkung anderer Kräfte als diejenigen der Grenzflächenspannung.

c Die Schmelze besteht aus zahlreichen mehr oder weniger zellenförmig abgeschlossenen Raumteilen, deren geringe Deformation aber schon Reihenbildung im Zuge der Strömungsordnung erkennen lässt.

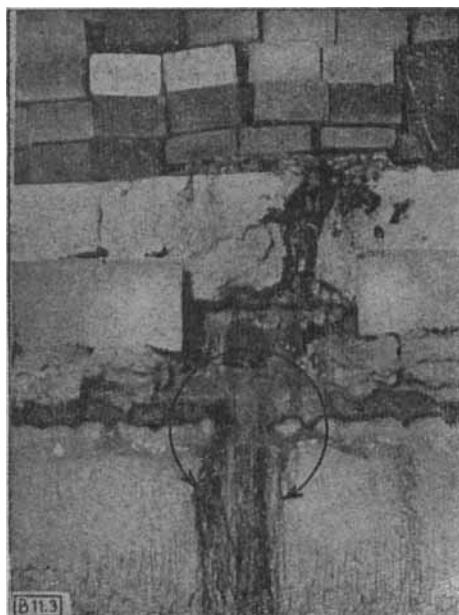
d Durch von außen einwirkende Kräfte werden zellenförmige Raumteile einzeln oder in Gruppen deformiert zu strangförmigen, wenn ihre Zusammensetzung sich stark genug von der Umgebung unterscheidet.

e Unterschiedliche Raumteile („Schlieren“) liegen ungeordnet und z. T. ineinander verflochten nach Maßgabe der herrschenden Zufälligkeiten bis zur Fadenform gereckt nebeneinander vor.

f Im Zuge auftretender Strömungen bildet sich eine hydrodynamische Ordnung der Schlieren aus, die damit zugleich Indikatoren im eingefrorenen Zustand für die herrschende Strömungsrichtung, auch bei der Formgebung, sind.

Beispiele charakteristischer Störungen und Fehler

Einige Beispiele aus den verschiedenen Störungsbereichen sollen die Darstellung des Stoffes illustrieren. Auf statistisch oder meßtechnisch ermittelte Werte einzugehen und ihren Niederschlag in Form von Diagrammen zu bringen, verbietet die Beschränkung des Umfangs.

Bild 3
Örtliche Zerstörung von Ofenbaustoffen durch Bildung eutektischer Schmelzflüsse in rückwärtiger Berührung mit dem Konstruktionsseisen. Im Bereich des Kreises („Spülkante“ des abgelassenen Glases) Eintritt der Schlackenkaskade in den Glasfluß

Aus dem Glasofenbau:

Die häufigen Vorkommnisse offensichtlicher Störungen im Verhalten feuerfester Baustoffe bedürfen im Hinblick auf die Empfindlichkeit der Glasschmelze für artfremde Substanz eingehender Aufklärung. Nach Bild 3 ist eine örtlich um sich greifende Zerstörung auf die fehlerhafte Zugänglichkeit eiserner Konstruktionsteile des Ofens als Reaktionsteilnehmer an der Flugstaubglasur zurückzuführen. Es ist der den Schmelzpunkt erniedrigenden Wirkung von Eisenoxyden zu danken, wenn an dieser Stelle die Glasschmelze Massen langsam kriechender Schlacke als Verunreinigung empfängt. Die Störung kann so weit gehen, daß dieser Schlackenstrom als Schlierenstrang in das Erzeugnis gelangt und dort Spannungen bis zum eintretenden Bruch aus-

löst, Bild 4. Solche weitgehend mittelbaren Zusammenhänge verdienen ganz besonders in den technologischen Überblick einbezogen zu werden. In geeigneter Darstellung werden sie sich dem Betrachter einprägen als – vermeidbare – Quelle störender Erscheinungen.

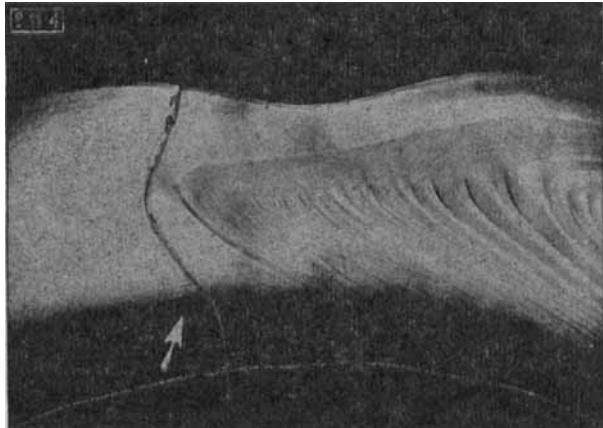


Bild 4

Schnitt durch die Wandung eines Flaschenkörpers
Durchfallendes Licht — Tonerdehaltiger Schlierenstrang als Ursache für
auftretenden Bruch. (Vor dem Pfeil: Sprungbildung u. U. als Folge der
Vorgänge nach Bild 3.) Vergr. $\approx 4:1$

Aus dem Bereich der Schmelze:

Eine hervorstechende Gruppe von Fehlern des Glases betrifft seine gasförmigen Einschlüsse in Form von Blasen. Unter ihnen sind diejenigen, die aus den Poren der feuerfesten Steine des Schmelzofens stammen, Bild 5, die weniger häufigen; darum wurden sie auch als Fehlerquelle zu wenig beachtet. Geht man ihr bis zu den Einzelheiten nach, so wird der Mechanismus der Entbindung von Blasen aus den Poresystemen offenkundig, Bild 6, und vervollständigt das allgemeine Bild des Schmelzverlaufs und seiner Begleiterscheinungen.

Das äußerst empfindliche und selten gebührend beachtete Gleichgewicht zwischen der Ofenatmosphäre, die nur Spuren von Schwefeloxiden zu enthalten braucht, und den zur Verdampfung neigenden Alkalien der Glasschmelze führt in Abhängigkeit von relativ geringen Schwankungen zu einem ständigen Wechsel zwischen Zersetzung und Neubildung an sich geringer Mengen von Natriumsulfat, Bild 7 und 8. Sein Niederschlag auf der Glasoberfläche oder seine Aussickerung aus Schmelzbestandteilen bildet die sehr unliebsame „Glasgalle“ mit einer beträchtlichen Korrosionswirkung, als deren Folge über das verborgen bleibende Zwischenglied „verstärkte Korrosion“ das Glas „fähig“ wird; eine Kette von Ursache und Wirkung, wobei einzelnen Gliedern ein sehr unterschiedlicher Grad von Offenkundigkeit zukommt.

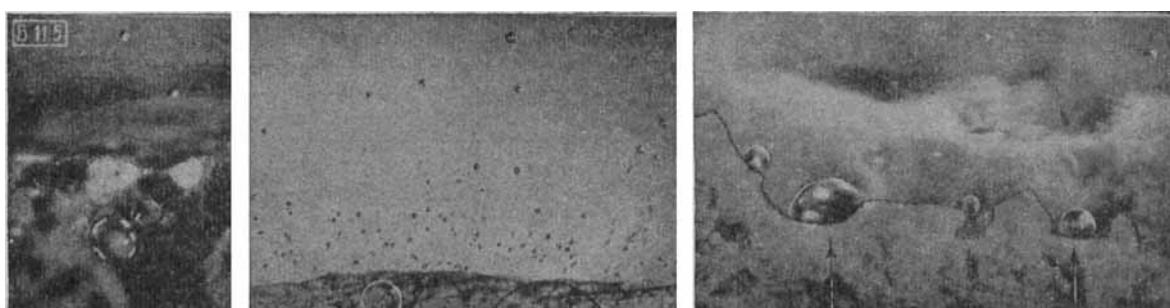


Bild 5

Blasen aus den Poren feuerfester Steine des Schmelzofens — Mitte: Aus der Grenzfläche Stein/Glas in die Schmelze aufsteigende Blasen. — Links: Einzelheit (aus dem weißen Kreis) — Rechts: Einzelheit (aus dem schwarzen Kreisbogen) bei stärkerer Vergrößerung. (Befund einer Störung)

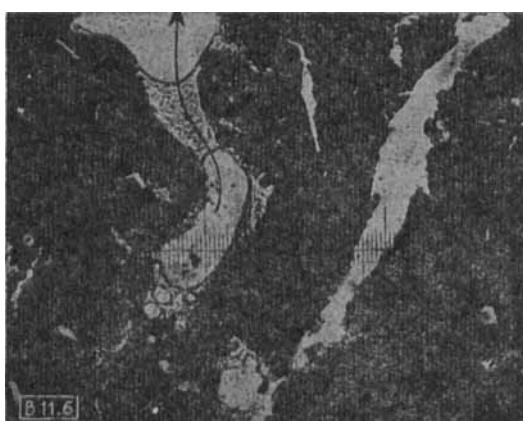


Bild 6

Entbindung eines Blasenvolumens aus den kommunizierenden Porenkanälen
des feuerfesten Materials vor Eintritt in die Schmelze
Mikroskopisch, Vergr. 15:1.
(Mechanismus, der der Störung nach Bild 5 zugrunde liegt)

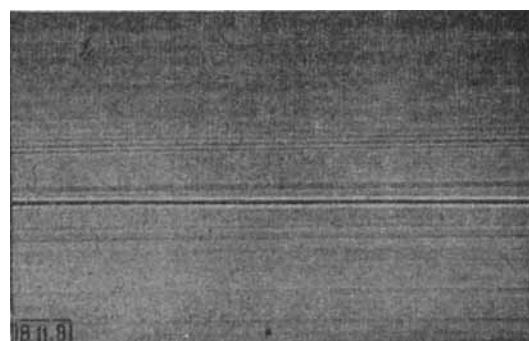


Bild 7

Fadenbildung („gekämmten“) Glases als mittelbare Folge des Auftretens
von tonerdebeladenem Randglas



Bild 8

Hydrolytische Zersetzung durch Kondensationswasser verursacht ein Verwachsen von Glasscheiben in ihrer Verpackung auf dem Transport: Bei thermischer oder mechanischer Beanspruchung treten Sprungnester auf
Vergr. rd. 4:1.
(Unerwarteter Zusammenhang von zwei völlig verschiedenen Fehlern)



Bild 9

Niederschlag einer Haut feinster Sulfatteilchen auf der Schmelzoberfläche
als Ursache für verstärkte Korrosion feuerfesten Materials

Von Lager und Transport:

Die Angreifbarkeit des Glases durch Wasser ist eine seiner unerfreulichen Eigenschaften, der schon manche methodische Arbeit gewidmet wurde. Die praktisch vorkommenden Schäden, die durch hydrolythische Zersetzung eintreten können, gehören aber mit zu den Grundlagen einer technologischen Sammlung der Eigenschaften von Glas, Bild 9, auch wenn sie, wie in diesem Fall, ursächlich „nur“ mit Verpackung und Transport desselben zusammenhängen.

Aus der Veredelung des Glases:

Es ist bekannt, wie empfindlich die Silberschicht eines Spiegels zersetzen den Einwirkungen der Atmosphäre zugänglich ist, wenn sie nicht gründlich durch einen Lacküberzug geschützt wird. Wer an einem sorgfältig gewonnenen Präparat, Bild 10, erfährt, wie sich der einmal begonnene Prozeß u. U. kanalartig fortsetzt, wird für immer davon überzeugt sein, daß der Schutz für den Rand besonder wichtig ist.

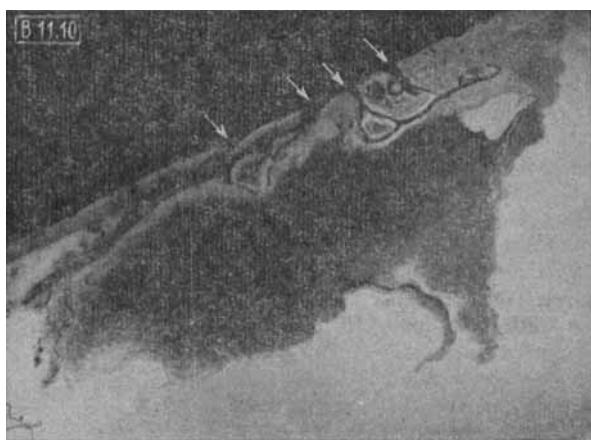


Bild 10

Randfehler an der Silberschicht eines Spiegels
Der Belag ist vom Rande her angefressen. Von Kanälen (Pfeile) ausgehend,
greift die Zerstörung selbsttätig um sich.
Vergr. rd. 4:1

Warum sollen nicht auch die charakteristischen Mängel, die einer an sich marktfähigen Ware anhaften, in ähnlicher Weise zu ihrer Kennzeichnung dienen, wie gewisse Materialwerte, zumal wenn sich z. B. ihre Machart davon herleiten und damit zugleich das Werturteil im Sinne einer Warenkunde fällen läßt? Es genügt ein Blick auf die Struktur der Oberfläche eines in der Form geblasenen und eines geschliffen-polierten Kristallglases (nach Bild 11 u. 12), um beurteilen zu können, welche Waren-

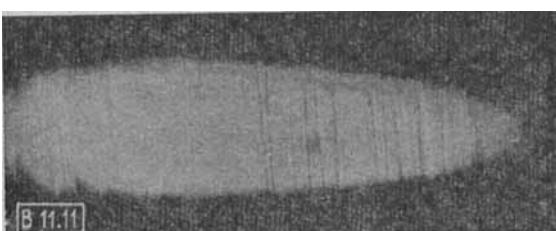


Bild 11

Formriefen, im plastischen Zustand bei der Verarbeitung durch den Glasbläser empfangen



Bild 12

Unvollständig auspol. Schleifriefen mit Rattermarken eines Bleikristallglases

Bild 11 und 12
Struktur der Oberfläche von Gläsern als Kennzeichen ihrer Machart
Reflexbilder. Vergr. rd. 4:1

gattung vorliegt und wie sie eingeschätzt werden muß. Aber sie muß erst einmal ihre Darstellung im Rahmen der Technologie des Werkstoffes finden.

Analogie zum pathologischen Organismus

Die herausgegriffenen Beispiele lassen sich beliebig fortsetzen. Sie alle müssen durch eingehende Beschreibung, bildlich überzeugende Darstellung, meßtechnische Erfassung, statistische Ermittlung, analytischen Befund oder als funktionelle Vorgänge in Schaubildern belegt und in ihrer betriebswirtschaftlichen Bedeutung erfaßt werden. Aber der Hinweis mag genügen, um das Ziel zu kennzeichnen: Jeder Vorgang wird nicht dort gefaßt, wo seine größte Stärke zu suchen, sondern wo seine größte Schwäche zu erwarten ist; als Schaubild, gegebenenfalls an Modellen, aber auch statistisch oder meßtechnisch, so lernt man am besten kennen, von welcher Seite ihm am ehesten Gefahr droht.

Durch den Zusammenschluß all dieser „Ausnahmezustände“ in ein übersichtliches System kommt eine Art „Pathologie des Werkstoffes“ zustande, von der keine Stufe seines Werdegangs verschont bleibt.

Sie umfaßt schließlich seine Technologie mit der gleichen Vollkommenheit von der negativen Seite her, wie eine Beschreibung der Regelzustände von der positiven, aber rückt sie zugleich in die lebendige Nähe der Betriebe.

Ständig wieder auftretende Krankheiten eines Patienten lassen die Störungen erkennen, zu denen sein Organismus neigt. Sie sind oft geradezu der Schlüssel zu seinem Wesen. In gleicher Weise, wie es möglich ist, an dem Krankheitsbild zu erkennen, welcher Behandlung oder Lebensweise der Kranke bedarf, um seine Gesundheit zu wahren, gelingt es, aus den Fehlern eines Materials zu lernen, durch welche Eigenarten und unter welchen Umständen es dem von ihm verlangten Zustand auszuweichen veranlagt ist. Im gleichen Verhältnis wie die Fehlzustände erkannt werden, die den technischen Arbeitsbedingungen leider oft verzweifelt eng benachbart sind und sich demzufolge meiden lassen, wird das Urteilsvermögen gestärkt; der Werdegang des Stoffes wird eingeengt auf den technisch anzustrebenden, und man gelangt zu fehlerfreier Fertigung. Der Blick wird für das technisch Wesentliche geschult und in betriebswirtschaftliche Richtung gelenkt.

Engere Verbindung von Wissenschaft und Technik. Erfahrungsaustausch

Es fallen zahlreiche Anregungen aus der Betriebstechnik für die Wissenschaft an; sie erweitern den Bereich des so ungemein wichtigen Analogieschlusses zu anderen Gebieten und bleiben nicht ohne Einfluß auf die „Strategie der Forschung“ (Daeves). Umgekehrt wird manchem Ergebnis der Wissenschaft ganz von selbst die Übertragungsfähigkeit auf den Betrieb erschlossen.

Eine Bedingung ist allerdings an den Erfolg dieser Methode technologischer Behandlung eines Erzeugnisses oder Werkstoffes gebunden: diejenige der Freigebigkeit. So, wie der Arzt nicht geizen darf mit seiner und seiner Kollegen Erfahrung an tausend vorangehenden Patienten, um beim nächsten um so sicherer seine Diagnose zu stellen, muß der Techniker sich auf die Erfahrung aller, besonders seiner Vorgänger und Fachgenossen stützen dürfen, um ein sicheres Urteilsvermögen zu gewinnen. Er befindet sich mit der Freigabe seiner Erfahrung in einer ungleich schwierigeren Lage als der Theoretiker, denn ihm sind oft die Wege an die Öffentlichkeit verbaut. Wir werden uns aber eingestehen müssen, daß es immer der Erfahrungsaustausch der Gesamtheit eines Fachgebietes im Rahmen der Gemeinschaftsbestrebungen ist, der dessen Entwicklung und damit sein Niveau bestimmt. Dazu gehört aber die Beherrschung der Betriebsstörungen und Erzeugnisfehler über das theoretische Maß hinaus, an deren Behandlung im Lehrfach und im Schrifttum es offenkundig mangelt.

Es wäre sicherlich lohnend, auch auf anderen Gebieten diese Bearbeitungsweise reichhaltigen Stoffes als wertvollen Bestandteil, aber auch als geschlossenes System der Technologie in Vortrag und Schrifttum aufzugreifen. Das gilt für Eisen- und Nicht-eisenmetalle, für Kunst- und Preßstoffe, außer Glas auch für Keramik und Email, für Holz, wie für Baustoffe überhaupt, Papier, Textilien, Leder usw.; kurzum für weite Bereiche industrieller Technik, auch über die der Chemie hinaus. [B 11]

Eintrag. 13. Oktober 1946