

1 Einführung

Von H. JEBSEN-MARWEDEL

1.1 Glas als Sonderzustand der Materie

Glas ist ein aus der Schmelze hervorgegangenes Produkt, das bei hohen Temperaturen eine stark ausgeprägte Zähigkeit besitzt. Diese erlaubt seinen Strukturelementen (Tetraeder, Oktaeder) nicht, mit einsetzender Abkühlung bei der Verarbeitungstemperatur den geordneten Zustand eines Kristallgitters anzunehmen, wie es bei anderen Stoffen, z. B. den Ionenkristallen oder Metallen der Fall ist, die beim Schmelzpunkt spontan kristallisieren. Glasschmelzen unterschreiten diese thermodynamisch kritische Zone und erstarren metastabil als unterkühlte Flüssigkeiten, die beim weiteren Abkühlen ihre flüssigkeitsähnliche Struktur einfrieren [1]. Sie bieten auch den Anblick einer als Flüssigkeit von unendlich hoher Viskosität verfestigten Substanz und stellen damit einen Sonderzustand der Materie dar, der auch schon – etwas anspruchsvoll – von Berger [2] als IV. Aggregatzustand bezeichnet wurde. Er befindet sich sozusagen zwischen der fluiden und der festen Beschaffenheit in der Schwebe. Das Glas hat gewissermaßen versäumt, die allenfalls fällige Wandlung zur Kristallisation an sich zu vollziehen. Bild 1.1 gibt den Zusammenhang schematisch wieder. Die Glasschmelze durchläuft beim Abkühlen den metastabilen Zustand der unterkühlten Schmelze (Tammann [1 a]), um die Struktur im Einfrierbereich zu fixieren (Jenckel [1 c]) und anschließend in den instabilen Zustand des Glases überzugehen ($e-f-h$ in Bild 1.1).

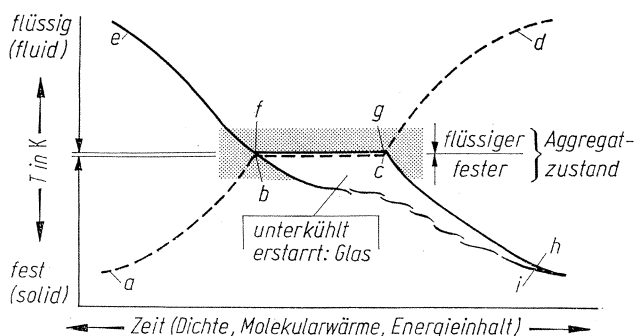


Bild 1.1. Zur Thermodynamik des Glaszustandes

$a b c d$	Schmelzvorgang (z. B. Metall)	} deutliche Phasengrenze
$b c$	Haltepunkt der Temperatur (Verflüssigung)	
$e f g h$	Erstarrungsvorgang	
$f g$	Haltepunkt der Temperatur (Kristallisation)	
$e f i$	Versäumen der Kristallisation (undeutliche Phasengrenze zwischen viskoser und spröder Beschaffenheit)	
Dunkles Feld: Gebiet entscheidender Glasbildung mit unscharfem Transformationsbereich. (Thermodynamisch instabiles Gleichgewicht „flüssig – plastisch – spröde“)		

Erst wenn man einer Glasschmelze bei einer Temperatur von $900 \pm 100^\circ\text{C}$ viel Zeit läßt, seine innere Struktur „in Ordnung“ zu bringen, bilden sich Kristalle aus, durch die es im allgemeinen zu Trübungserscheinungen kommt und die Eigenschaft eines echten und reinen Glases verloren geht. Hiervon macht man z. B. Gebrauch bei der Herstellung sogenannter „Glaskeramik“, einem modernen Werkstoff, z. B. für die Raumfahrttechnik und andere Zwecke, weil man damit über einen Stoff von extremer thermischer Unempfindlichkeit verfügt, der trotz seiner Kristallisation auch durchsichtig erhalten werden kann. Also auch eine „fehlerhafte“ Veranlagung des Glases kann sich als nützlich erweisen und wirtschaftlich zum Einsatz gebracht werden.

Um den Übergang der (silicatischen) Schmelzflüssigkeit in den kristallinen festen Zustand zu verhindern, genügen im kritischen Intervall, dem sogenannten Einfrier- oder Transformationsbereich, als Abkühlung ein Temperaturverlust von etwa 2 bis 5 K/min. Gegenüber anderen Stoffen, die sich auch in den Glaszustand überführen lassen, ist dies ein Verlauf im Zeitlupentempo, wenn man bedenkt, daß zum Bei-

spiel bei Metallegierungen, die sich neuerdings auch in den Glaszustand überführen lassen, mehr als 1000 K/s (!) erforderlich sind, um ihre Kristallisation zu verhindern und ihnen dadurch – sozusagen in extremer Raffung – glasspezifische Eigenschaften zu verleihen.

1.1.1 Der Werkstoff Glas als selbständiger thermodynamischer Zustand

Keine Industrie kann heute mehr die Grundlagen über die physikalisch-chemischen Eigenschaften und die molekulare Konstitution eines Werkstoffes entbehren. Diese sind nämlich bei der Eigenart des Werkstoffes Glas von erheblichem Einfluß auf die Erkenntnis, wie z. B. das Glas zweckmäßig zu behandeln und welches physikalische Verhalten von ihm zu erwarten ist. Schon seine Bezeichnung als „unterkühlt erstarrte Flüssigkeit“ gibt zu erkennen, daß ein thermodynamisch unbestimmter Zustand, ein Ungleichgewicht, vorliegt, mit dessen mehr oder weniger raschen bzw. langsamen Veränderung, zumal bei gehobenen Temperaturen, zu rechnen ist.

Die Vorstellung von einer „unterkühlten Flüssigkeit“ allein genügt nicht, um die Eigentümlichkeiten des Glases, in erster Linie seine Neigung zur Bewahrung dieses Zustandes (Erstarren im Transformationsbereich), zu erklären. Verschiedene Ansichten über die Rolle der homöo- und heteropolaren Bindungen in seiner Struktur haben dazu geführt, den Anschauungen aus der Kristallchemie (atomare Auffassung) mehr Bedeutung einzuräumen. Man betrachtet Glas als einen Stoff, innerhalb dessen gemischte Bindungen vorliegen, mit deren Hilfe zusammen mit der Vorstellung statistisch verstreuter „Lockerstellen“ bzw. „Trennstellen“ als Gefügeunvollkommenheiten sich viele, wenn auch nicht alle Eigentümlichkeiten erklären lassen. Begriffe wie Wabenstruktur, Bindungsfestigkeit, Feldstärke, Koordinationsbestreben, Dipolnatur, Screening (Abschirmung starker Kationenfelder) sind experimentell abgeleitete, gedankliche Hilfsmittel, die sich als Ergänzung einer vorwiegend kristallchemischen Auffassung in ihrer Gesamtheit bewährt haben. Diese Anschauungen sind in umfassender und zuverlässiger Literatur dargestellt [3].

Die wissenschaftliche Durchdringung eines technologischen Fachgebietes hat eigentlich ihren Ausgang zu nehmen von den thermodynamisch ermittelten Gleichgewichtszuständen aller physikalischen und chemischen Vorgänge. Dem Glas muß jedoch eine Ausnahme zugestanden werden. Als instabiler Körper gehorcht es z. B., ebenso wie entsprechende Mineralien, nicht mehr streng der Phasenregel. Die Ermittlung der Gleichgewichte in solchen Systemen bleibt allerdings für die Erkenntnisse ihrer Pyrogenese notwendig, aber sie bildet – technisch gesehen – nur ein unvollkommenes, oft sogar entstellendes Bild für die Erscheinungen aus der Praxis. Diese können vielmehr entweder nach statistischen Gesichtspunkten ausgewertet werden oder es müssen diejenigen Zustände durch strenge Beobachtung ermittelt werden, die das Glas auf dem Wege zum Gleichgewicht, also als Annäherung an dieses, durchmacht.

Ersteres dürfte der geeignete Weg für die Betriebe sein, ihre eigenen Beobachtungen systematisch auszuwerten. Letzteres ist der Weg, der von Laboratorien und Forschungsstätten beschritten wird, um die wirtschaftlich oft bedeutungsvollen Analogieschlüsse aus der Theorie für die Praxis ziehen zu können.

1.1.2 Verzögerungserscheinungen am technischen Glas

Bei der technischen Kristallisation des Glases handelt es sich nicht um die vollendete Einspielung, sondern nur um eine schrittweise Näherung an Gleichgewichtszustände. Es werden einzelne Volumteile der Gläser, wie auch bei Gesteinen, wenn das Gleichgewicht nicht die Regel ist, zu eigenständigen schmelzflüssigen Systemen, deren Konzentrationsunterschiede sich in unterkühlten Silicatschmelzen nicht mehr ausgleichen können, weil ihre Gleichgewichtseinstellung und Diffusion zu stark von der Zeit abhängig ist [4a].

Bei seiner Zerlegung in eine feste Phase und die klare Restlösung folgt die Glasschmelze also nicht genau den Kristallisationsbahnen des Gleichgewichtsdigrammes, sondern überschreitet gelegentlich sogar mit seiner Zusammensetzung die Lage einer Feldgrenze und kehrt wieder zu ihr zurück. Diese wird also bei unzureichender Zeit der thermischen Bedingungen durch Trägheit scheinbar verwischt. Diese Verzögerungserscheinungen an der Glasschmelze und ihre Bedeutung für ihr technisches Verhalten (das also nur zu einem scheinbar stabilen Zustand wird), spielen hinüber auf alle glastechnisch bedeutsamen Gebiete, an denen Diffusionsvorgänge ausschlaggebend beteiligt sind. Damit wird es für die Technologie des Glases ebenso wichtig, die Verzögerungserscheinungen quantitativ zu erfassen, wie für die Grundlagenforschung Gleichgewichte zu messen. Selbstverständlich nimmt der Grad der Verzögerung bzw. der Zeitbedarf für die Gleichgewichtseinstellung mit steigender Temperatur (sinkender Viskosität) ab. Deshalb hat man für

Untersuchungen, die sich auf die Veränderung spezifischer Eigenschaften des Glases, z.B. im Verlauf seiner Viskositätskurve, erstrecken, Aufheizgeschwindigkeiten angewandt, die 2°C/min nicht überschreiten. Nur so ist es möglich, einigermaßen vergleichbare Werte zu erzielen.

Solches Verhalten hat Eckert [4b] die Folgerung ziehen lassen, daß die Eigenschaften des Glases an seine „Wärmevergangenheit“ gebunden sind, d.h. an die Art des Temperaturverlaufs, nicht allein die darin durchlaufende Höhe. Diese „Wärmevergangenheit“ ist also als Bestandteil der gesamten Entwicklung des Glases anzusehen.

Unter denjenigen Eigenschaften des Glases, deren Größe der „Wärmevergangenheit“ unterworfen ist, befinden sich Spannungszustand, Ausdehnung und Dichte, optische Erscheinungen wie Brechung, Absorption, die elektrische Leitfähigkeit u.a. sogar die chemische Angreifbarkeit. Der eigentliche Grund hierfür liegt an den obengenannten Verzögerungserscheinungen und an den Eigenschaftsänderungen im Einfrierbereich (üblicherweise bei 500 bis 600°C), die sich auch durch eine Wandlung des Energieinhaltes beim Erhitzen des Glases verrät. Der Endzustand, in dem das Glas angetroffen wird, entspricht deshalb auch nicht einem Gleichgewicht innerhalb derjenigen Temperatur, die es tatsächlich durchlaufen hat, sondern einer scheinbaren, von Tool und Valasek als „fiktiv“ bezeichneten Temperatur.

1.1.3 Glasfehler als Durchlaufstadien von Raumteilen selbständiger thermodynamischer Systeme

Glastechnische Fabrikationsfehler jeglicher Art, d.h. gleichgültig, ob es sich um gasförmige Einschlüsse, kristalline Ausscheidungen oder Einschlüsse von Fremdkörpern, also Raumteile, die aus Inhomogenitäten bestehen bzw. Heterogenitäten aufweisen, oder auch um Formfehler handelt, stellen keinen stationären Zustand dar, sondern entspringen einem kontinuierlich ablaufendem Prozeß, der irgendwo, irgendwann und irgendwie aufgrund der herrschenden Bedingungen zum Stoppen gebracht wurde und eingefroren ist wie das Glas selbst, sei es in Form noch unvollständiger, aber fortschreitender Lösung oder kristalliner Umwandlung. Sie teilen also mit diesem das Charakteristikum, innerhalb der fabrikatorisch zur Verfügung stehenden Zeit nicht mit der Grundmasse im Einklang zu stehen, sondern sozusagen als selbständige thermodynamische Systeme in Erscheinung zu treten, gewissermaßen also „unterwegs“ in bestimmten aber stark streuenden Stadien „abgefangen“ zu werden und sich mit der Umgebung im „Ungleichgewicht“, im nicht stationären Zustand zu befinden.

Daher stellt die Erscheinungsform auch gleichartiger Fehlerkategorien eine verwirrende Vielfalt dar. Diese erschwert einerseits die präzise Identifizierung im Zusammenhang mit dem Herstellungsprozeß und seinen Einflußgrößen, ermöglicht andererseits aber auch an mehr oder weniger typischen chemischen, mineralogischen, physikalischen oder technologischen Einzelheiten ein Urteil über die Quelle ihrer Entstehung und die Stufe ihres jeweiligen Stadiums zu gewinnen.

Es ist aus psychologischen Gründen notwendig, daß dem für die Fabrikation verantwortlichen Personal – auch wenn es nicht über die entsprechende technische Vorbildung verfügt – der Zusammenhang von Ursache und Wirkung einer auftretenden Störung so nahe gebracht wird wie möglich. Denn nur das Begreifen der Vorgänge führt zu einer sinnvollen Handlungsweise im Sinne ihrer Bekämpfung. Dazu gehört vornehmlich die richtige Auslegung der phänomenologischen Erscheinungsform ebenso wie eine unmißverständliche Bezeichnungsweise der auftretenden Fehler. Wie weit es sich dabei sogar um ein weltweites internationales Anliegen handelt, geht daraus hervor, daß die „International Commission on Glass“ über ihr Sub-Committee A 1 1969 zur besseren Verständigung in der Bezeichnungsweise typischer Glasfehler und ihrer Definition über Landesgrenzen hinaus ein dreisprachiges Wörterbuch (Terminology of Defects in Glass – Terminologie des Défauts du Verre – Glasfehler-Terminologie) herausgegeben hat. (Secretariat of Sub-Committee A1c/o Institut National Du Verre, Charleroi – Belgium).

1.2 Fabrikationsfehler als Technologie „pathologischer“ Ausnahmezustände

Wie in der Medizin bzw. Heilkunde stellen die phänomenologischen Befunde der vom gewünschten „Normalzustand“ abwertenden Merkmale, bzw. Raumteile Kennzeichen für ihre Beurteilung dar. Wie dort, gilt auch hier: Eine gut getroffene Diagnose bedeutet schon die halbe Therapie. Die Symptome füh-

ren, wie in der Pathologie, zur Festlegung einer Anfälligkeit für bestimmte Fehler und ihren Ursprung sowie zu betriebstechnischen Maßnahmen, die zu ihrer Behebung in die Wege zu leiten sind. Es ist daher für die Interpretation glastechnischer Fabrikationsfehler erforderlich, den gesamten Verlauf ihrer Erscheinungsformen, gegebenenfalls experimentell simulierend, phänomenologisch zu erfassen, um eine Einordnung und einen Eingriff in das schmelztechnische Geschehen vornehmen zu können [5].

Das Ziel technischer Arbeit besteht in der Produktion weitgehend fehlerfreier Erzeugnisse; jedoch gibt es Grenzen der Beseitigung gewisser Störungserscheinungen, nämlich dort, wo sie geduldet werden können, weil sie für das Aussehen bzw. den Verwendungszweck unerheblich sind und ihre Eliminierung einen wirtschaftlich unververtretbaren Aufwand an Arbeit und Energie erfordern würde.

Long [6] unterscheidet in diesem Sinne ausdrücklich ein „ideales“ Glas von einem „realen“. Er vergleicht unter diesem Gesichtspunkt die Verschiedenheit der Maßstäbe und Aufgaben einer auf äußerste Präzision ausgerichteten, kompromißlosen Tätigkeit des Wissenschaftlers für die Grundlagenforschung mit der zwangsläufig auf die Wirtschaftlichkeit abzielenden Einstellung eines industriell eingesetzten Systematikers. Neben ihrer Fähigkeit hängt das Einvernehmen theoretisch und praktisch eingesetzter Kräfte von der ebenso psychologisch wie organisatorisch schwierigen Abstimmung beider aufeinander ab. Daraus geht der Erfolg für den technischen Fortschritt einer industriellen Fertigung hervor. Eine gewisse „Entfeinerung“ des Produktes leitet sich demzufolge von seinem Gebrauchswert ab und bezieht seine Berechtigung aus (z. B. energie-) wirtschaftlichem Gebot. Übertriebene Anforderungen sind unökonomisch und *können* markttechnisch wenig sinnvoll sein. Nur ein ideales Glas ist – wenigstens im technischen Sinne – „optisch leer“.

1.2.1 Fehler eines Werkstoffes als Quelle technologischer Erkenntnisse

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. Diese Daten stehen in reichhaltigen Lehrbüchern und Tabellenwerken zur Verfügung [3]. Es bedeutet aber für den Techniker notwendig eine große Erleichterung, wenn ihm die Möglichkeit geboten wird, sowohl dem Bilde als auch dem Worte nach unmittelbar denjenigen Erscheinungen nachzugehen, die ihn mehr in Anspruch nehmen, als der normale Ablauf betrieblicher Vorgänge. Er muß sich täglich mit Betriebsstörungen und Fabrikationsfehlern, diesen „Wegelagerern“ auf der Strecke zum Erfolg, auseinandersetzen.

Inzwischen hat auch die grundsätzliche Seite dieser Behandlung einer Werkstoffkunde ihre Darstellung gefunden [5c]:

„Ständig wieder auftretende Krankheiten eines Patienten lassen die Störungen erkennen, zu denen sein Organismus neigt. Es ist möglich, an dem Krankheitsbild zu erkennen, welcher Behandlung oder Lebensweise er bedarf, um seine Gesundheit zu wahren. In gleicher Weise 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, vor welchen Umständen es also bewahrt werden muß, um vollwertig zu werden, zu sein und zu bleiben.“

Der Ingenieur muß ein Gefühl dafür bekommen, „wie dem Werkstoff zumute ist“ (Max Eyth). Man befindet sich dabei in derselben Lage wie ein Arzt, der zu entscheiden hat, woher ein Krankheitssymptom stammt, und zur Diagnose oft einen Test nach dem anderen durchführen muß, um zu erkennen, welche Ursachen *nicht* in Betracht kommen. Nur so kann er bisweilen durch Einengung des pathologischen Sachverhaltes zur richtigen Therapie gelangen.

So entwickelt sich in Analogie zum Organismus geradezu die „Pathologie eines Werkstoffes“ als geschlossenes technologisches System, dessen besondere Eignung als Ausbildungsgrundlage auch für den Nachwuchs kaum zu bestreiten ist. Sie bedeutet eine Anerkennung der Fehler wie im Leben so auch in der Praxis als Lehrmeister und damit als Mittel einer Erziehung zur Erfahrung. Dieses System verfolgt nicht den Werdegang des behandelten Stoffes, sondern den seiner Fehlerarten, ist also auf ganz andere Zusammenhänge angewiesen. Man ist gezwungen, sich auch der oft verkannten oder vernachlässigten meisterlich-handwerklichen Erfahrung anzunehmen, die daher in das System einbezogen wird und ihre technologische Deutung oder Kritik erfahren muß. So gesehen, bleibt das Glasschmelzen eben doch noch eine „Kunst“.

Jeder Vorgang und seine Beschreibung wird nicht dort erfaßt, wo seine Stärke zu suchen, sondern wo seine größte Schwäche zu erwarten ist, um auf diese Weise den „Nöten“ der Betriebswirtschaft wirksam zu begegnen. Über die Behandlung bzw. Beseitigung aller, den technischen Arbeitsbedingungen eng benachbarten Fehlzustände wird der Werdegang eines Erzeugnisses eingengt auf den technisch anzustrebenden. Man dringt vor in Richtung auf das Ziel fehlerfreier Fertigung. Der Blick wird für das technisch Wesentliche geschult und in betriebswirtschaftliche Richtung gelenkt.

Auf diese Weise wird dem Gebäude einer „Technologie der Regelzustände“ eine „Technologie der Ausnahmestände“ eingegliedert, mit der sich technologisch erst zusammen ein vollständiger Überblick erzielen läßt.

1.3 Physikalischer Ablauf der Formgebung

1.3.1 Besonders relevante Bereiche des Zähigkeitsverlaufs („Länge“ bzw. „Kürze“ des Glases)

Für die gesamte Herstellung und Verarbeitung des Glases ist sein Zähigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur von ausschlaggebender Bedeutung. Den Verarbeitungsbereichen sind einige besonders hervorzuhebende Fixpunkte mehr oder weniger zugeordnet (Bild 1.2). Sie sind international erarbeitet und kennzeichnend für das charakteristische Verhalten des Glases [7]. Das Zähigkeitsverhalten im Transformationsgebiet T_g der Gläser wurde durch Littleton und Roberts behandelt. Das führte zu den Definitionen des „annealing point (A. P.)“ und des „strain point (S. P.)“, die als „obere“ und „untere“ Kühltemperatur bezeichnet werden. Bei dem oberen Wert ist eine schnelle Entspannung des Glases (in 15 min)

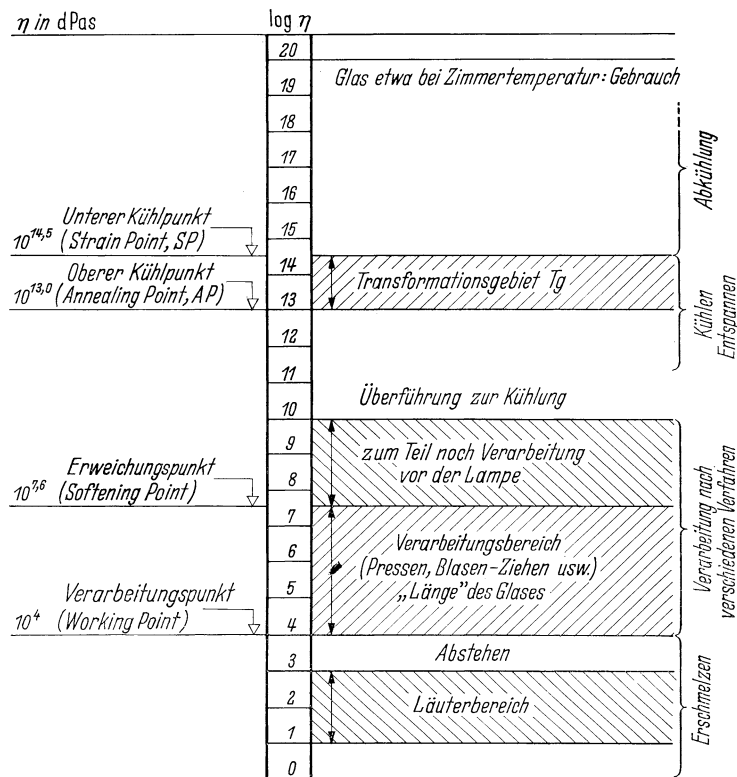


Bild 1.2. Skala der wichtigsten Fixpunkte im gesamten Viskositätsbereich der Gläser nach dem internationalen Stand. (Nach einem Entwurf von O. Lindig)

möglich, bei dem unteren handelt es sich um eine Zähigkeit, bei der die Entspannung etwa 16 h benötigt, ohne daß es mit neuen permanenten Spannungen einfriert. Nach Lillie wurden diese Punkte durch ein viskosimetrisches Meßverfahren als bei $10^{13,4}$ bzw. $10^{14,6}$ d Pa s liegend ermittelt. Die Viskosität des Glases im Kühlbereich ist nicht nur eine Funktion der Temperatur, sondern auch eine Funktion der Wärmevergeschichte, ein Charakteristikum, an das man sich für die meisten Vorgänge am Glase erinnern muß

(Abschnitt 2.1.2.2). Nach Arbeiten von Stott und nach der ASTM-Vorschrift zur Messung des A. P. und S. P. wurde dieses Relaxationsverhalten des Glases berücksichtigt. Es führte zur Festlegung des A. P. bei einer Viskosität von $10^{13,0}$ und des S. P. bei einer Viskosität von $10^{14,5}$ unter der Voraussetzung, daß die Abkühlgeschwindigkeit bei der Messung $4^\circ\text{C}/\text{min}$ beträgt. Bei statischen Messungen verändert sich der A. P. auf $10^{13,2}$, wie Lillie bekannt gab.

Die Zähigkeitslage der nach DIN 52324 festgelegten Transformationstemperatur ist nicht nur von der Aufheizgeschwindigkeit sondern auch von der „Länge“ des Glases (Relaxationsverhalten) abhängig. Die mit einer Aufheizgeschwindigkeit von $4^\circ\text{C}/\text{min}$ bestimmte Transformationstemperatur liegt für die meisten Silicatgläser bei einer Zähigkeit zwischen $10^{13,0}$ und $10^{13,4}$ d Pa s; sie kann für extrem kurze Gläser jedoch auch noch bei kleineren Zähigkeiten liegen. Bei Gläsern mit extremen Zusammensetzungen ist der Zähigkeitsbereich größer [7k]. Die Transformationstemperatur des Glases ist daher nicht ohne weiteres als „Zähigkeitsfixpunkt“ zu bezeichnen, zumal auch Unterschiede in seiner Festlegung bestehen, wenn diese elektrisch oder dilatometrisch gemessen wird.

Der dilatometrisch gemessene Erweichungspunkt darf nicht mit dem „softening point“ verwechselt werden. Es handelt sich hierbei um diejenige Stelle der Ausdehnungskurve, an welcher Ausdehnung und Komprimierung der Meßprobe durch den Meßdruck im Gleichgewicht stehen und somit scheinbar Null wird. Nach Messungen von Littleton liegt die zugehörige Viskosität je nach verwendetem Dilatometer bei verschiedenen Werten im Bereich von 10^{11} d Pa s.

Erst die Zähigkeitsstufe, in welcher eine deutliche Verformung des Glases unter seinem Eigengewicht einsetzt, wird durch den softening point gekennzeichnet. Er ist diejenige Temperatur, bei der das Glas über eine Zähigkeit von $10^{7,6}$ d Pa s verfügt. Es besteht eine Meßvorschrift durch die ASTM; sie beruht auf einer Fadenverlängerung durch die eigene Schwere, wobei die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen dynamischer und statischer Messung verschwindend gering werden. Die zugehörigen Glastemperaturen liegen zwischen 600 und 900°C .

Im Hinblick auf die Verarbeitung des Glases wurde noch ein Verarbeitungspunkt (working point) bei 10^4 d Pa s festgelegt, der durch ein Rotationsviskosimeter oder mit Hilfe der Stäbchen-Einsinkmethode nach Dietzel und Brückner [71] ermittelt wird. Er ist zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit des Glases geeignet. Die Temperaturspanne zwischen Verarbeitungs- und Erweichungspunkt eines Glases kann als Charakteristikum für diejenige Eigenschaft, die der Glastechniker als seine „Verarbeitbarkeitslänge“ bezeichnet, dienen. Sie kennzeichnet vor allem seine Eignung für die maschinelle Verarbeitung.

1.3.2. Praktische Auswertung

Die genannten Temperaturbereiche, die in vorstehender Weise gekennzeichnet sind, kommen in Bild 1.3 sich gegenseitig auf engem Raum bedingend zur Darstellung und geben einen Überblick über die Bezeich-

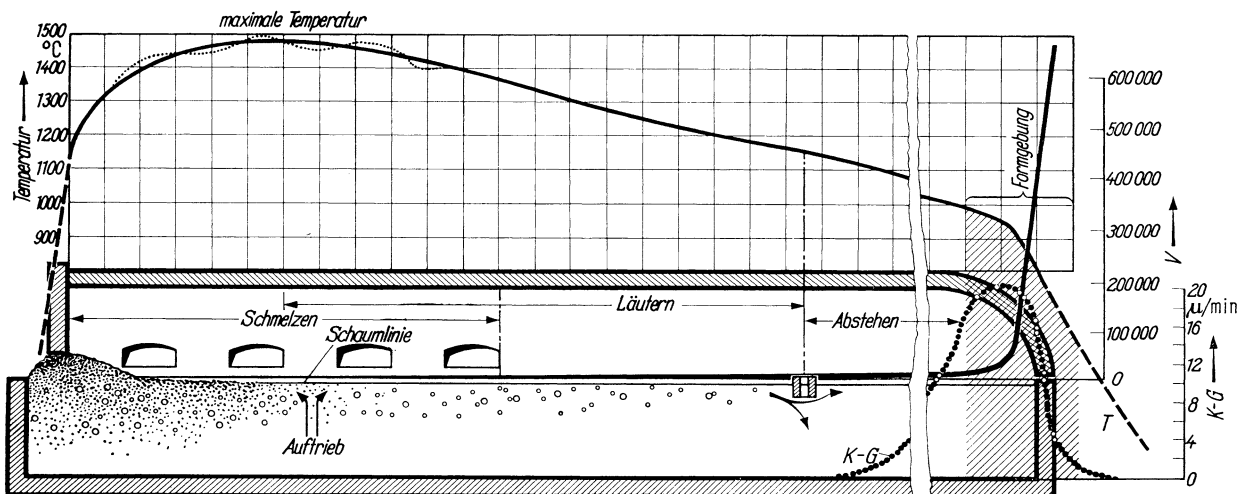


Bild 1.3. Schema Viskosität des Glases sowie der Häufung physikalischer Ereignisse im Augenblick der Ausarbeitung am Arbeitsende

nung der fixierten Meßpunkte zu den Verarbeitungsvorgängen im Werdegang des Glases. Sie erfordern eine Überwachung des Glases durch laufende Messung seiner Zähigkeitswerte. Lindig gibt in nachfolgender Tabelle die Gegenüberstellung eines durch Temperaturfixpunkte gekennzeichneten ausgesprochen „langen“ Glases im ersten Fall (Differenz 417 °C) und eines ausgesprochen kurzen Weichglases (Differenz 303 °C) im zweiten Fall:

Tabelle 1.1.

Glasart	Transformationspunkt nach DIN 52 324	Unterer Kühlpunkt 10 ^{14,5} d Pa s	Oberer Kühlpunkt 10 ^{13,0} d Pa s	Erweichungs- punkt 10 ^{7,6} d Pa s	Verarbeitungs- punkt 10 ⁴ d Pa s	Differenz °C	Läuterungs- bereich 10 ² d Pa s
D 50	530	510	568	817 ← „lang“ → 1 234		417	1 620 °C
N 16	535	495	537	712 ← „kurz“ → 1 015		303	1 430 °C

Solche Messungen ermöglichen die Anpassung optimaler Eigenschaften von Gläsern an die Gegebenheiten bei der Formgebung nach verschiedenen Verfahren, wie es fast alle Kategorien von Massenware durchgemacht haben.

1.4 Systematik der Fehler

1.4.1 Schematische Übersicht „geduldeter“ Fehler (Mängel)

Trägt man die in verschiedenen Fabrikaten möglichst vermiedenen, andererseits aber auch wieder die „geduldeten“ Mängel tafelförmig zusammen, so ergibt sich ein übersichtlicher Vergleich, der nur noch darunter leidet, daß das handelsübliche Einheitsgewicht des Einzelstückes der Ware in weiten Grenzen schwankt (0,05 bis 100 kg!). Erst wenn z. B. etwa 200 einander ohne Auswahl folgende Glühlampenkolben in der Durchsicht schlieren- oder blasenfrei sind, entsprechen sie der zu einer mittleren Spiegelglasscheibe verarbeiteten Glasmenge. Selbst auf die Gefahr hin, daß bei kleinen Glasartikeln ein gewisser Hundertsatz „Fehlfabrikat“ aussortiert werden muß, so ist dies oft der billigere Weg als eine höhere Schmelzarbeit zu leisten, um den Durchschnitt zu heben. Hierfür sind vorwiegend betriebswirtschaftliche Überlegungen maßgebend.

In der Tabelle 1.2 ist eine Aufstellung enthalten, in welcher 10 verschiedene Glasarten unter diesen Gesichtspunkten mit einem (subjektiven) Homogenitätszeugnis versehen wurden.

Der Überblick ergibt sich aus dem Gesamtbild der einerseits vermiedenen, andererseits aber mehr oder weniger „geduldeten“ Fehler nach erfahrungsgemäßer Schätzung.

1.4.2 Stufen der Glasherstellung und ihrer Störungsquellen

Die Anzahl der vorkommenden Arten glastechnischer Fehler erstreckt sich meist auf so verschiedene Stufen der Glasherstellung, daß ihre Bekämpfung unter der Schwierigkeit leidet, den Entstehungsort sicher erkennen zu können. Vielfach besteht sogar die vorgefaßte Meinung, daß der Ursprung gewisser Fehler – sagen wir einmal Blasen – nur an einer bestimmten Stelle der Glasherstellung zu suchen sei, z. B. in der Läuterung. Man würde dabei aber übersehen, daß in verschiedenen Stufen der Glasherstellung Bedingungen herrschen, die auf verschiedene Art und Weise ein und dieselbe Fehlersorte erzeugen können.

Die hauptsächliche Aufgabe zur Bekämpfung der Fehler liegt also zunächst in einer Diagnose (z. B. ob es sich um Entglasungen oder „Steinchen“ aus dem Gemenge oder vom feuerfesten Material handelt), in zweiter Linie darin, festzustellen, wo der den Fehler erzeugende Herd zu suchen ist [5].

Man kann nun die verschiedenen Fehlerarten mit den am meisten hervortretenden Störungsquellen in Beziehung setzen und erhält somit einen Überblick darüber, welche Zusammenhänge bei ihrem Auftreten in Betracht zu ziehen sind bzw. aus welchen Vorgängen die eigentliche Störung hervorgeht (Bild 1.4). Die Größe der Gefahr kommt schätzungsweise in der verschieden dichten Schraffierung zum Ausdruck. Die weitere Klärung ist Sache der Verfolgung von Einzelheiten, für die das in diesem Buch vorliegende Vergleichsmaterial zur Verfügung steht.

Tabelle 1.1. Übersicht geduldeter Fehler (Mängel)

Glasart	Ungefähre Größenordnung des gebräuchlichsten Stückgewichtes kg	Mehr oder weniger geduldete Fehler						Geschätzte Rangordnung der Gesamthomogenität
		Schlieren	Blasen	„Steinchen“ Ungeschmolzenes	Farbstich	Oberflächen- Unregelmäßigkeiten	Spannung	
1 optisches Glas	0,02...0,5	≡	=	≡	≡	^c	≡	1
2 { Spiegelglas	10...100	= ^a	=	=	+	^c	=	1...2
Fensterglas	2...100	= ^a	—	—	+	—	=	2
3 Glühlampenkolben	0,05	±	±	—	—	—	=	2
4 Bleikristall	0,25...2,0	±	—	=	=	±	±	2...3
5 Weißhohlglas	0,1...0,2	±	±	—	—	=	—	2...3
6 chemische Geräte	0,05...3,0	+	+	—	—	—	=	2...3
7 Preßglas	0,1...1,0	+	+	—	— ^b	—	±	3
8 Wirtschaftsglas	1,0	+	+	—	+	±	—	3
9 Flaschen	0,25...1,0	+	+	—	± ^b	±	±	3...4
10 Gußglas	10...100	+	+	±	+	±	±	3...4

^a Schlieren fehlen im Spiegel- und Tafelglas nur scheinbar, weil sie durch den Herstellungsprozeß parallel zu der Oberfläche liegen und bei der Durchsicht unkenntlich sind.

^b Gilt für Fehlfärbungen.

^c Werden bearbeitet.

Ein + bedeutet, daß der Fehler (Mangel) geduldet wird. Ein —, daß er vermieden werden muß. ± sagt aus, daß Indifferenz besteht. Die Wiederholung des Zeichens — bedeutet die Strenge, mit der der Fehler zu eliminieren ist.

Glasfehler und ihre möglichen Ursachen			Störungsquellen														
			I		II			III	IV		V		VI	VII			VIII
			Gemenge (Rohstoffe)		Schmelze (Temperatur)			Ofen- at- mo- sphäre	FF Material/ Hafen Wanne Schwimmer usw.		Formgebung		Kühlen	Versand u. Handel			Ge- brauch
			mecha- nisch	che- misch	Schmel- zen	Läute- rung	Ab- stehen		Ober- ofen		heiß	kalt		Ver- packen	Lagern	Trans- port	
Glasfehler	A	Steinchen (feste Körper im Glas)															
		Knoten															
	B	Schlieren (Glas im Glas)															
	C	Galle (Aussickerung)															
	D	Blasen (Gase im Glas)															
	E	Färbung (Mißfärbung)															
	F	Entglasung (Kristalle im Glas)															
	G	Formfehler															
		Bearbeitungsfehler															
	H	Spannung															
	Bruch																
	Verletzung																
I	Niederschläge																
	Zersetzung																

Bild 1.4. Abhängigkeit der Entstehung glastechnischer Fabrikationsfehler von den Stufen der Glasherstellung

Ein Zusammenhang der Fehlerarten mit den fortschreitenden Stufen der Glaserzeugung und ihre innere Abhängigkeit von den zugehörigen Einflußgrößen ist den schraffierten Feldern zu entnehmen. Sie verläuft im wesentlichen so, daß diejenigen Fehler, deren Ursprung sehr früh, also bereits in der Schmelze oder sogar im Gemenge gelegen sein kann, einige Stufen später nicht mehr entstehen und daß die Bildung solcher

Fehler, die sich erst in einer späteren Stufe bemerkbar macht, in den ganz frühen nicht immer gesucht zu werden braucht. Daraus ergibt sich die Systematik der in der Abbildung von oben links nach unten rechts fortschreitenden ursprünglichen Zusammenhänge der Fehlerarten mit den Fabrikationsstufen. Die Entstehungsmöglichkeit bestimmter Fehlerarten umfaßt stets eine Mehrzahl zusammenhängender Stufen der Glaserzeugung; sie überschlägt kaum eine von ihnen.

1.4.3 Untrennbarer Zusammenhang mehrerer Fabrikationsfehler (Beispiel)

Es ist oft unzweckmäßig, die Beurteilung der fabrikationstechnischen oder betriebswirtschaftlichen Bedeutung von Fehlertypen am Glase jeweils für sich allein vorzunehmen. Ein richtiges Vorgehen verlangt, daß der Fehler nicht aus dem Zusammenhang herausgegriffen, vielmehr nur im Rahmen sämtlicher Begleitumstände betrachtet werden darf.

Verschiedene Fehlerarten können über eine physikalische Eigenschaft miteinander verbunden sein. Sie lassen sich unter Umständen durch gleiche betriebliche Maßnahmen beeinflussen, oft jedoch im entgegengesetzten Sinn. So kann z. B. die Beseitigung von Störungen durch ein ungeeignetes feuerfestes Material über das Mittel der Temperatursenkung nicht ohne nachteilige Wirkung auf den Schmelz- oder Läuterzustand des Glases betrieben werden, höchstens in ganz engen Grenzen.

Ein Beispiel soll das erläutern: Man darf den Blasengehalt einer Schmelze in Abhängigkeit von der Gemengezusammensetzung, insbesondere dem Sulfatzusatz, oder der Ofenatmosphäre, nicht trennen von der Einwirkung der gleichen Betriebsumstände auf Galleabscheidung oder den Schmelzverlauf. Es wäre in jedem Falle bedenklich, Maßnahmen zur Beseitigung eines Fehlers zu treffen, deren Folge für eine andere Fehlermöglichkeit außer acht gelassen wird.

Diese Erkenntnis läßt sich laboratoriumsmäßig belegen in Form einer „Darstellung schmelztechnischer Vorgänge aus dem Glashüttenbetrieb im Laboratorium“ an der Einwirkung von (Sulfat und Kohle-) Gemischen auf Gemengesmelzen eines normalen Kalk-Natron-Silicatglases [10] (Bild 1.5).

Es wurde aus mehreren Reihen Schmelzen in Tiegel mit einem Inhalt von etwa 0,5 kg eine vollständige Systematik zusammengestellt, deren einzelne Glieder gleichermaßen auf jede der vier Eigenschaften Abscheidung von Galle, Helligkeit des Farbstiches, Zustand der Schmelze, Zustand der Läuterung untersucht worden waren. Schon eine visuelle Betrachtung der Schmelzen ließe zwar einen Teil der Eigenschaften, z. B. Galle, rein äußerlich erkennen, jedoch noch nicht ihre Verteilung der anderen Fehler über das gesamte Feld. Erst dessen schematische Wiedergabe läßt eine gewisse Ordnung in Erscheinung treten, die zu wertvollen Rückschlüssen berechtigt. In Bild 1.5 finden sich die Eigenschaft in der oben genannten Reihenfolge in abgestimmter Weise stichwortartig eingetragen, soweit sie bei den wiederholten Versuchen als typisch festgestellt wurden.

Jedesmal waren es nämlich verschiedene zusammenhängende Bezirke (Tiegelgruppen) des untersuchten Feldes, die in bezug auf eine der vier Eigenschaften als einwandfrei anzusprechen waren und die besten Gläser enthielten. Es genügte aber niemals, ein Gemenge nach *einer* Eigenschaft des Schmelzverlaufes allein zusammenzustellen, weil viele Vorgänge ineinandergreifen. Der Glassatz und die Betriebsweise ergaben sich vielmehr daraus, daß möglichst alle Eigenschaften der Schmelze in Betracht gezogen wurden, auf die ein Einfluß auch nur angenommen werden mußte. Der Glassatz sollte ausfindig gemacht werden, dessen Lage im Diagramm möglichst auf jede der vier Eigenschaften mit Bestwerten entfällt oder wenigstens an ihnen teil hat. Das drückt sich in der gegebenen Darstellung dadurch aus, daß der schraffierte Teil als einziger *allen* Feldern gemeinsamen ist. Die in ihm gelegenen Tiegelgläser waren frei von Galle (Umrandung: Punkte), sie hatten hellen Farbstich (Umrandung: Nullen), bestanden aus klarer Schmelze (Umrandung: Kreuze) und zeigten gute Läuterung (Umrandung: Striche). Damit wird die zweckmäßige Zusammensetzung von Soda-Sulfat-Glasgemengen mit Kohlezusatz beschränkt auf ein eng umrissenes Gebiet, das damit auch für die Verhältnisse im Betrieb richtungweisend wird.

Dem Diagramm ist abzulesen, daß dieses Gebiet als „Insel“ auf einen Sulfatzusatz entfällt, durch den etwa 4 % des Alkalis im Glase eingeführt werden, wenn dessen Gesamtwert etwa 13 % beträgt (wovon also 9 % aus Soda stammen). Ferner entspricht das schraffierte Feld einem Kohlezusatz zum Gemenge, der etwa 5 bis 6 % des Sulfatgewichtes ausmacht.

Sind diese Zahlen auch nicht allgemeingültig, so geben sie doch schon einen gesicherten Anhalt für ähnlich liegende betriebliche Verhältnisse, zumal sie sich mit praktischen Erfahrungen in befriedigender

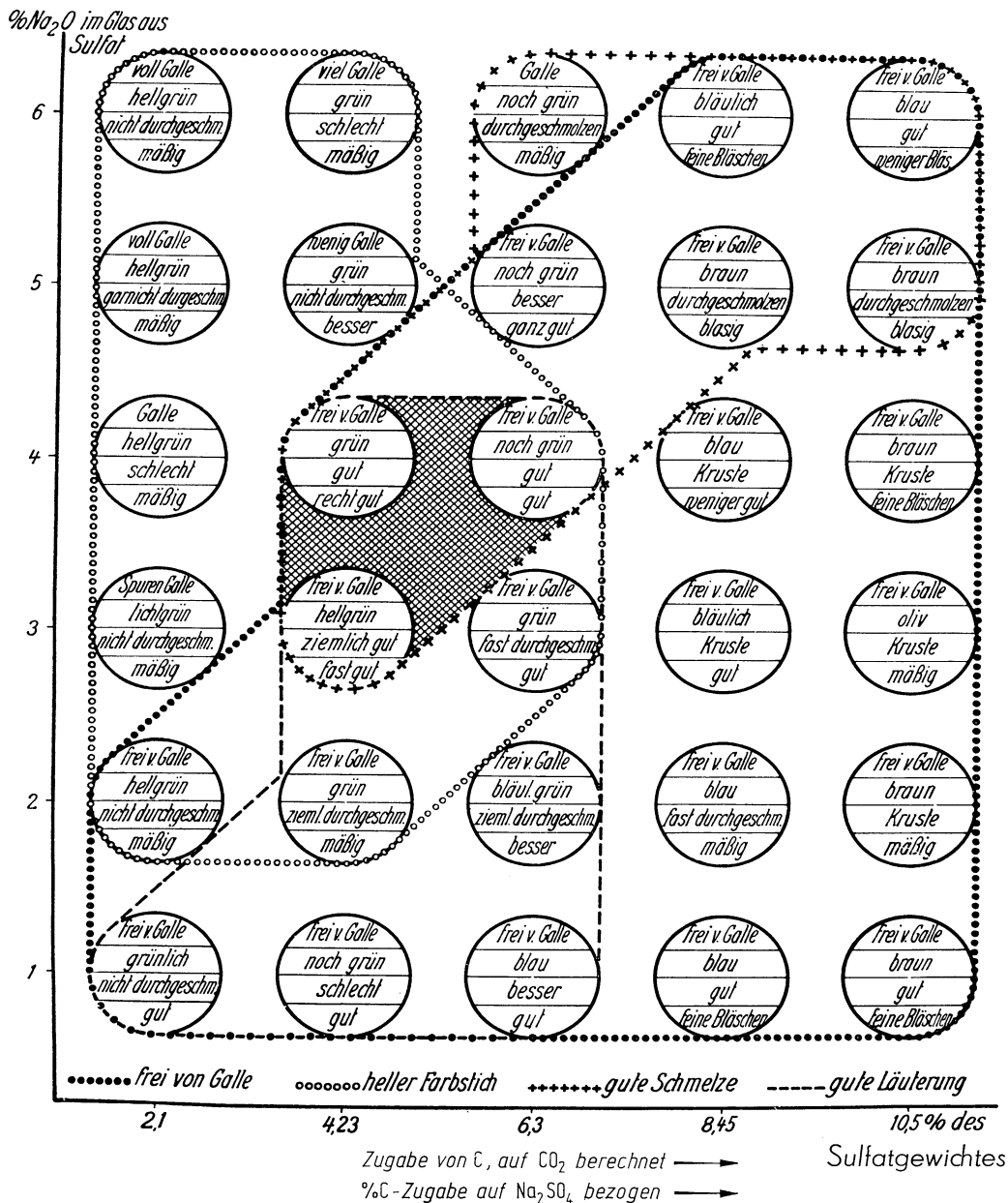


Bild 1.5. Schema des Befundes von Tiegelschmelzen einer ausgedehnten Versuchsreihe zur Erkundung der Zustände einer Sulfatglasschmelze in Abhängigkeit von den Redox-Einflüssen des Kohlezuschlages im Gemenge

Weise decken. Das ist zugleich ein Beweis für die Anwendbarkeit von Beobachtungsergebnissen in kleineren Laboratoriumsversuchen auf den großen Maßstab des Betriebes, wenn nur darauf geachtet wurde, daß sie unter Bedingungen entstehen, die denen der Technik möglichst angenähert sind.

Weiter ist das Ergebnis ein Zeichen dafür, wie weit vorausbestimmend die Zusammensetzung des Gemenges (bei gleichem Gehalt an Glasoxiden) sowohl auf den Schmelzverlauf des Glases als auch auf mehrere seiner späteren Eigenschaften wirkt. Außerdem zeigt das Ergebnis, wie gut man im Labormaßstab praktische Verhältnisse simulieren kann, eine Erfahrungstatsache, die man Skeptikern nicht nahe genug bringen kann.

In dem Schaubild wird gleichzeitig mit der verschiedenen Wichtigkeit der vier Eigenschaften insofern gerechnet, als bewußt auf dem Gebiete des Farbstiches gewisse Zugeständnisse geduldet werden mußten, wenn überhaupt alle vier Schmelzwerte harmonisch im Glase vereinigt werden sollten. Jedes einzelne der untersuchten Fehlergebiete erlaubt also einen viel weiteren Spielbereich oder sogar noch eine Verbesserung, als mit Rücksicht auf die anderen Eigenschaften zulässig wäre, die für die Güte der Schmelze mitbestimmend sind.

Es handelt sich im vorliegenden Beispiel zwar um einen besonderen Fall, der nicht für alle Betriebe Gültigkeit haben kann; doch muß als grundsätzlich daraus festgehalten werden, daß in den meisten Fällen ein solcher untrennbarer Zusammenhang einer Mehrzahl von Fabrikationsfehlern besteht, die nicht unabhängig voneinander bekämpft werden können. Nur durch Einbeziehung aller Auswirkungen der Bekämpfungsmittel oder -wege kann vermieden werden, möglicherweise von einem Fehler in einen anderen zu fallen.

1.4.4 Suche nach „potentiellen“ Fehlerquellen

Darunter ist folgendes zu verstehen: Für die in (glashütten)-technischen Betrieben auftretenden Fehler kommt fast immer eine Mehrzahl von Fehlerquellen in Betracht. Es läßt sich nicht von vornherein entscheiden, welche davon am meisten Aussicht hat, durch ihre Beseitigung den Fehler zu beheben. Um die Arbeit der für die Betriebsüberwachung verantwortlichen Stellen zu erleichtern und teilweise erst ihre Systematik zu ermöglichen, ist es erforderlich, so viele wie möglich der als „potentiell“ in Betracht kommenden Fehlerquellen von vornherein auszuschalten. Nur dadurch vermindert sich die Anzahl der möglichen Fehlerquellen genügend, um mit besserer Aussicht auf Erfolg die verbleibenden Fehlerquellen ihrer Ursache nach zu erkennen und zu bekämpfen. Großzahlstatistische Untersuchungen [11] können wertvolle Hinweise geben.

Die Trägheit des Reaktionsvermögens eines betriebstechnischen Eingriffs in den Prozeß bringt es mit sich, daß die Auswirkung von Maßnahmen unter Umständen reichlich lange auf sich warten läßt und die Geduld auf eine harte Probe stellt. Erfahrungsgemäß führt das gelegentlich dazu, schon eine weitere Maßnahme einzuleiten, bevor das Endergebnis abgewartet wurde. Ein solches Vorgehen erschwert die Erkenntnis der echten Zusammenhänge.

Es kann sich als nützlich erweisen, vermutete Einflußgrößen durch erfolglose Maßnahmen auszuschalten, um auf diese Weise eine Einengung potentieller Fehlerquellen vorzunehmen, und zu der eigentlichen Fehlerquelle vorzudringen [5f].

Ein sorgfältiges Studium der nachfolgenden Darlegung aller Kategorien potentieller Fehler soll dazu führen, Fehlentscheidungen so weit wie möglich zu vermeiden, um auf kürzestem Wege ans Ziel einwandfreier Produktherstellung zu gelangen. Parallel laufende systematische Untersuchungen in Laboratorien und wissenschaftlichen Forschungsinstituten mit weitgehender Simulierung praktischer Verhältnisse sind dabei unerlässlich und hilfreich.

1.5 Einspielung des Glases auf optimale Beschaffenheit

1.5.1 Empirie und Methodik

Die verschiedenartigen Anforderungen an Gläser bringen es mit sich, daß es für jede Glasart eine optimale Beschaffenheit gibt, der man sich in der ganzen Welt anzunähern bemüht. Dies geschieht

- durch betriebstechnische Erfahrungen des Praktikers,
- durch eine systematische Auswertung des Verhaltens im praktischen Gebrauch,
- durch wissenschaftliche Auskundschaftung der Eigenschaften des Glases in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung und Vorbehandlung,
- durch anwendungstechnische Auswertung wissenschaftlicher Ergebnisse.

Der Wissenschaftler muß sich darüber klar sein, daß die praktische Erfahrung des Handwerkers oder Ingenieurs im Betrieb niemals vernachlässigt werden darf. Dessen „Fingerspitzengefühl“ bedeutet oft – auch ohne Erkenntnis kausaler Zusammenhänge – eine wertvolle Grundlage für die methodischen Entwicklungsarbeiten.

Der reine Praktiker muß sich andererseits aber bewußt sein, daß seiner Arbeitsweise natürliche Grenzen gesetzt sind. Ohne Untersuchungen auf wissenschaftlicher Grundlage wäre eine systematische Fortentwicklung unmöglich. Die Faustregeln des Empirikers bilden trotz mancher Skepsis eine anregende Grundlage für die Konzeption wissenschaftlicher Problemstellung, um die Regel technischen Handelns auf eine gesunde Grundlage zu stellen. Dann wird sich der Praktiker auch aufgeschlossen zeigen für die systematische Arbeitsweise des Forschers. Ein Beispiel hierfür gibt der folgende Abschnitt.

1.5.2 Technisches Feld eines Mehrstoffsystems

Die Darstellung des grundlegenden Dreistoffsystems $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ (nach Morey und Bowen [8a]) gibt die Isothermen, Phasengrenzen und die eutektischen Punkte wieder (Bild 1.6). Ihnen überlagert wurde sowohl das Gebiet geringster Kristallisation (nach Zschimmer und Dietzel [8 b]) eingetragen als auch dasjenige hydrolytischer Haltbarkeit (nach Keppeler [8]). Die beiden letzteren überschneiden sich auf einem relativ eng begrenzten Gebiet. Unter Beibehaltung des zur Verarbeitung erforderlichen Viskositätsbereiches muß sich also die praktische Herstellung auf dieses Gebiet konzentrieren. Das für die Industrie wichtigste Gebiet ist damit weitgehend vorgegeben, aber bei weitem noch nicht eindeutig festgelegt. Denn immer noch unzureichende Eigenschaften im Sinne des Zuschnitts auf eine Eignung zu maschineller Verarbeitung greifen über ein Dreistoffsystem hinaus und machen es nötig, weitere Zuschläge vorzusehen, um gleichzeitig alle erforderlichen Eigenschaften zu erzielen, ohne unzuträgliche Zugeständnisse oder eine Verzichtleistung auf andere Qualitäten in Kauf nehmen zu müssen.

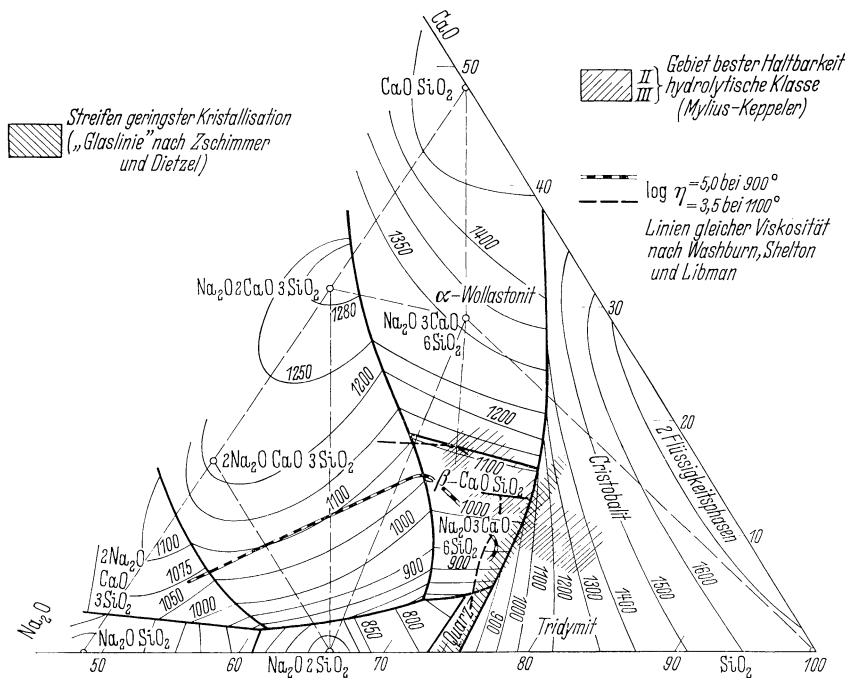


Bild 1.6. Technisch wichtiger Teil des Dreistoffsystems $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ nach Morey und Bowen mit eingetragenen Feldern geringster Kristallisation und bester Haltbarkeit

Ein Dreikomponentenglas erfüllt bei weitem nicht mehr die Anforderungen an die diffizilen Verarbeitungsbedingungen bei fortgeschrittener Mechanisierung der Formgebung. Es bedarf einer Ergänzung durch weitere dosierte Komponenten, mit denen erst die erforderliche Stabilisierung des Verhaltens erzielt oder Freiheitsgrade in der einen oder anderen Richtung erkaufte werden. Unter ihnen sei u.a. verwiesen auf die Oxide von Al, Mg, Ba, K als „Korrektoren“.

Diese Maßnahmen sind weitgehend vergleichbar den Vorgängen auf dem Gebiet der Metalle, einem „Legieren“ [9], durch die der Werkstoff sowohl den erforderlichen Verarbeitungs- als auch den Gebrauchsbedingungen und Verwendungszwecken feinfühlig angepaßt wird. Es ergibt sich auf diese Weise von selbst, daß eine sorgfältige Beobachtung und Erforschung, die daraus gezogenen Schlußfolgerungen, ihre Übertragung auf den technischen Ablauf des Verfahrens, eine Anpassung der Zusammensetzung an die jeweiligen Anforderungen eine weitgehende Übereinstimmung bestimmter Glastypen in allen Ländern zur Folge haben und immer noch für Ergänzungen zugänglich sind.

Literatur zu Kapitel 1

- 1 a. Tammann, G.: Über die Gläser als unterkühlte Flüssigkeiten. Glastechn. Ber. 3 (1925/26) 73. – Der Glaszustand. Leipzig: L. Voß 1933
- Eitel, W.: Der physikalisch-chemische Zustand des Glases. Glastechn. Ber. 3 (1925/26) 195

- Tammann, G.: Das Verhalten der Gläser in ihrem Erweichungsintervall. *Glastech. Ber.* 7 (1929/30) 445. – Die Bestimmung einer den Übergang vom spröden Glas in eine hochviskose Masse charakterisierenden Temperatur. *Glastech. Ber.* 11 (1933) 63
- 1 b. Berger, E.: Beitrag zur Frage nach der Natur des Glaszustandes. *Glastech. Ber.* 5 (1927/28) 393
 - 1 c. Jenckel, E.: Das Wesen des Transformationspunktes. *Glastech. Ber.* 16 (1938) 191–198. – Die glasige Erstarrung der Hochpolymeren. In: *Die Physik der Hochpolymeren*. Stuart, H. A. (Hrsg.) Bd. III, S. 608–638 Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1955
 2. Berger, E.: Probleme des Glaszustandes. I. Glas als vierter Zustand der Materie. *Z. Tech. Phys.* 12 (1931) 344. Ref. *Glastech. Ber.* 10 (1932) 42
 - 3 a. Eitel, W.: Silicate science. In: *Glass science*, Vol. III. New York: Academic Press 1976
 - 3 b. Scholze, H.: Gas – Natur, Struktur und Eigenschaften, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1977
 - 4 a. Eckert, F.: Über die physikalischen Eigenschaften der Gläser. *Jb. Radioaktivität und Elektronik* 1923, S. 93. Schrifttum *Glastech. Ber.* 1 (1924) 129
 - 4 b. Berger, E.: Gleichgewichtsverschiebungen im Glas und Einfluß der Wärmevergeschichte auf seine physikalischen Eigenschaften. *Glastech. Ber.* 8 (1930) 339. – Über die Abhängigkeit der Glaseigenschaften von der Wärmevergeschichte. *Z. Instrumentenk.* 51 (1931) 127. Ref. *Glastech. Ber.* 10 (1932) 611
 - 5 a. Jebesen-Marwedel, H.: Glasfehler als Beispiel für die Technologie von Störungserscheinungen. *Angew. Chem.* 19 (1947) 64. Ref. *Glastech. Ber.* 22 (1948/49) 305
 - 5 b. Jebesen-Marwedel, H.: Pathologie der Werkstoffe; Beispiel Glas. *Technik* 3 (1948) 175. Ref. *Glastech. Ber.* 22 (1948/49) 440
 - 5 c. Jebesen-Marwedel, H.: „Pathologie“ in der Technik. *Sprechsaal* 92 (1959) 96–100
 - 5 d. Jebesen-Marwedel, H.: Einordnung des Glases in ein System „pathologischer“ Anfälligkeit des Materials für regelwidrige Zustände. *Sprechsaal* 95 (1962) 73–76
 - 5 e. Jebesen-Marwedel, H.: Pathologische Begriffe in der Technik von Störungs- und Schadensfällen. *Maschinenschaden* 35 (1962) H. 11/12
 - 5 f. Jebesen-Marwedel, H.: Erkundung der „Ursache“ und des „Grundes“ für das Auftreten betrieblicher Störungen durch Fabrikationsfehler. *Glastech. Ber.* 39 (1966) 239–242
 6. Long, B.: Betrachtungen über die Entwicklung des technischen Fortschritts in der Glasindustrie. *Verres Refract.* 10 (1956) 337
 - 7 a. Littleton, J. T.; Roberts, E. H.: A method for determining the annealing temperature of glass. *J. Opt. Soc. Am.* 4 (1920) 224
 - 7 b. Lillie, H. R.: Viscosity of glass between the strain point and melting temperature. *J. Am. Ceram. Soc.* 14 (1931) 502
 - 7 c. Lillie, H. R.: Viscosity-time-temperature relations in glass at annealing temperatures. *J. Am. Ceram. Soc.* 16 (1933) 619
 - 7 d. Stott, V. H.; Turner, D.; Sloman, H.: Effects of thermal treatment on glass as shown by precise viscosimetry. *Proc. R. Soc.* 112 A (1926) 499
 - 7 e. Tentative method of test for annealing point and strain point of glass. ASTM Designation: C 336
 - 7 f. Lillie, H. R.: Re-evaluation of glass viscosities at annealing and strain point. *J. Am. Ceram. Soc.* 37 (1954) 111
 - 7 g. Littleton, J. T.: The softening point of glass. *J. Soc. Glass Technol.* 24 (1940) 176
 - 7 h. Tentative method of test for softening point of glass. ASTM Designation: C 338
 - 7 i. Lillie, H. R.: A method for measuring the flow point of glass. *J. Am. Ceram. Soc.* 35 (1952) 149
 - 7 k. Lindig, O.: Die Zähigkeit von Gläsern bei der Transformationstemperatur. In: *Beiträge zur angewandten Glasforschung*. Schott, E. (Hrsg.), S. 209–220. Stuttgart: Wiss. Verlagsges. 1959
 - 7 l. Dietzel, A.; Brückner, R.: Ein Fixpunkt der Zähigkeit im Verarbeitungsbereich der Gläser. Schnellbestimmung des Viskositäts-Temperatur-Verlaufs. *Glastech. Ber.* 30 (1957) 73–79
 - 8 a. Morey, G. W.; Bowen, N. L.: Das Dreistoffsystem Natriummetasilicat, Calciummetasilicat und Kieselsäure. *J. Soc. Glass Technol.* 9 (1925) 226. Ref. *Glastech. Ber.* 4 (1926/27) 64. Darstellung rechtwinklig umgezeichnet von A. Dietzel, *Sprechsaal* 60 (1927) 5
 - 8 b. Zschimmer, E.; Dietzel, A.: Die Temperatur-Zeit-Kurven der sichtbaren Entglasung bei Spiegelglas. *Z. Tech. Phys.* (1926) 278. – *Sprechsaal* 60 (1927) 110, 129, 145, 165, 186, 204. Ref. *Glastech. Ber.* 5 (1927/28) 378
 - 8 c. Keppeler, G.; Ippach, H.: Die Haltbarkeit von Gläsern im Natron-Kalk-Kieselsäure-System. *Sprechsaal* 60 (1927) 329, 261, 281, 297. Ref. *Glastech. Ber.* 5 (1927/28) 369
 - Keppeler, G.; Körner, F.: Über einige wichtige Eigenschaften der Flaschengläser. *Sprechsaal* 67 (1934) 607, 623, 640. Ref. *Glastech. Ber.* 13 (1935) 130
 9. Jebesen-Marwedel, H.: Glas als „Legierung“. Pro und Contra. *Sprechsaal* 108 (1975) 639–646. – Konflikte der Umgangs- und Fachsprache. *Glas. Silik. Z.* 15 (1976) 370–378
 10. Jebesen-Marwedel, H.; Becker, A.: Darstellung schmelztechnischer Vorgänge aus dem Glashüttenbetrieb im Laboratorium; Beispiel: Die Einwirkung von Sulfat und Kohle-Gemischen auf Gallebildung, Erschmelzbarkeit, Farbstich und Läuterung eines normalen Glases aus Sand-Soda-Kalk-Gemenge. *Glastech. Ber.* 13 (1935) 109
 11. Daeves, K.; Beckel, A.: Großzahlforschung und Häufigkeitsanalyse. Weinheim: Verlag Chemie 1948

Glastechnische Fabrikationsfehler

"Pathologische" Ausnahmezustände des Werkstoffes

Glas und ihre Behebung; Eine Brücke zwischen

Wissenschaft, Technologie und Praxis

Jebsen-Marwedel, H.; Brückner, R. (Hrsg.)

2011, XVIII, 623 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-16432-3