

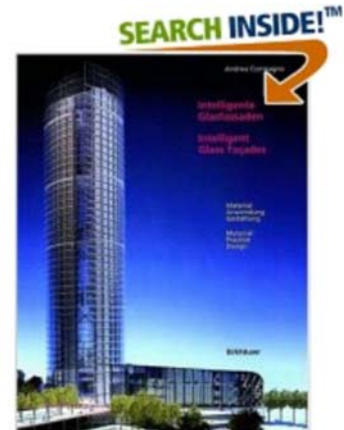
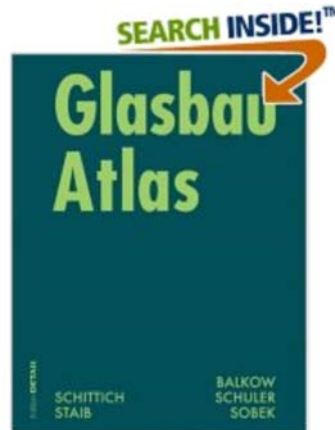
Werkstoffe II – Glas 1

Prof. Hans Herrmann

Lernziele heute:

- Erklären was Glas ist
- Diskutieren des Glaszustands vs. kristalliner Zustand
- Kennenlernen der Bestandteile und Rohstoffe von Baugläsern
- Verstehen des Temperaturverhaltens von Gläsern
- Charakterisieren und erklären typischer Schäden in Glas

- **Glaströsch:** Glas und Praxis Handbuch, 4. Auflage online
- **S. Schittich, G. Staib, D. Balkow:** Glasbauatlas, Birkhäuser, 2. überarb. und erweiterte Aufl. 2006
- **A. Compagno:** Intelligente Glasfassaden, Material, Anwendung, Gestaltung, Birkhäuser 2002



Glas – ein besonderes Material

«Es gibt kein älteres Material das so modern ist und so viel Zukunft hat wie Glas»

- Hohe Wandelbarkeit: Farbe, Transparenz, Form, Oberfläche, Festigkeit, Steifigkeit, Hitze und chemische Widerstandsfähigkeit, elektrische und thermische Leitbarkeit
- Dauerhaft, (ver)formbar, bearbeitbar, stabil
- Biokompatibel
- Unerschöpfliche Rohmaterialien und vollständige Rezyklierbarkeit
- Unerschöpfliches Innovationspotential in industrieller Herstellung und Verarbeitung

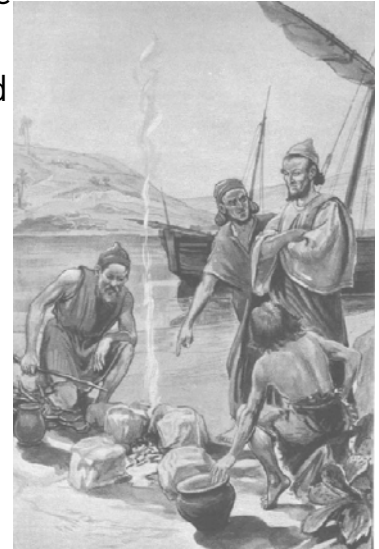
Die Entdeckung synthetischer Gläser

Entdeckung ca. 5000v.Chr. durch phönizische Kaufleute im Libanon (nach Plinius d. Ä. «Historia naturalis» 23-79n.Chr.)

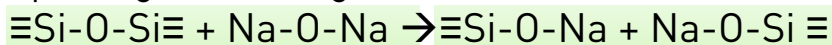
Kochfeuer zwischen natronhaltigen Blöcken am Strand

Verflüssigung der Blöcke mit dem Sand durch die hohen Temperaturen des Feuers

→ Opake, glasartige Substanz



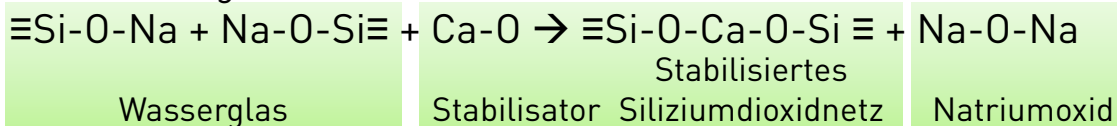
Spaltung zu Wasserglas:



Glasbildner Glaswandler

Wasserglas

Stabilisierung:



Wasserglas

Stabilisator Siliziumdioxidnetz

Natriumoxid

Der Glaszustand

Einkomponenten Kieselgläser: Elektronenhülle

Si: 4 Valenzelektronen (wie C)

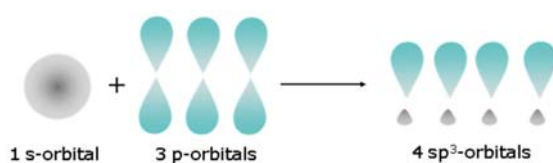
Grundzustand $3s^2 3p^2 \rightarrow$ Hybridisiert $sp^3 \rightarrow$ Tetraederstruktur (109.5°)

$[\text{SiO}_4]^{4-}$ Tetraeder ist Nahordnung

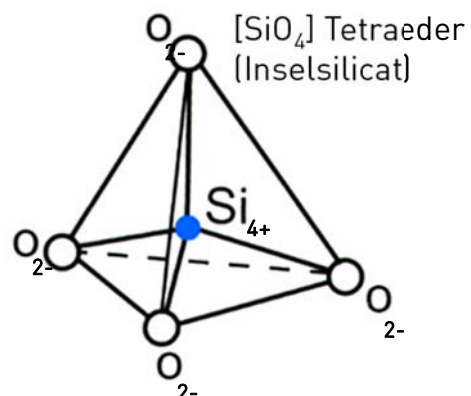
- Hybridorbital besitzen größere Elektronenwolken als Atomorbital

→ größere Überlappungsbereiche sind möglich

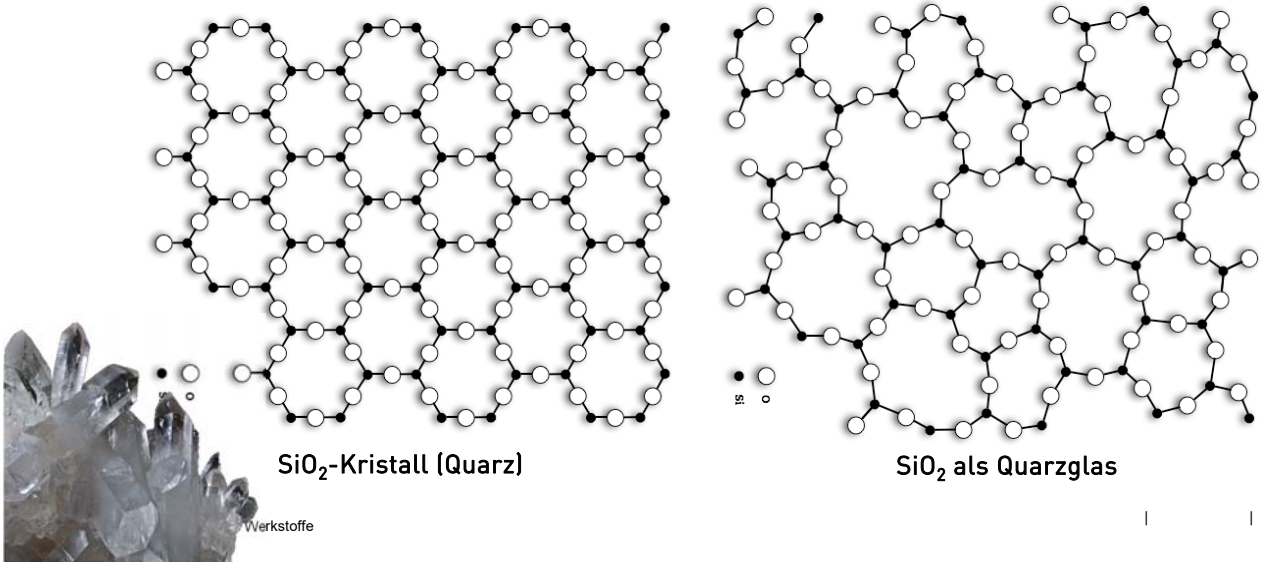
(zusätzlicher Gewinn an Bindungsenergie ist Ursache für Hybridisierung)



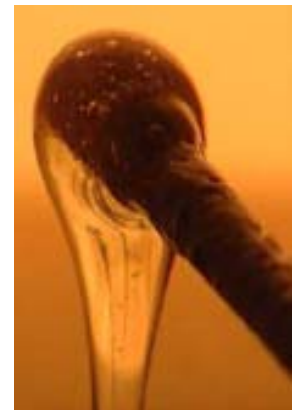
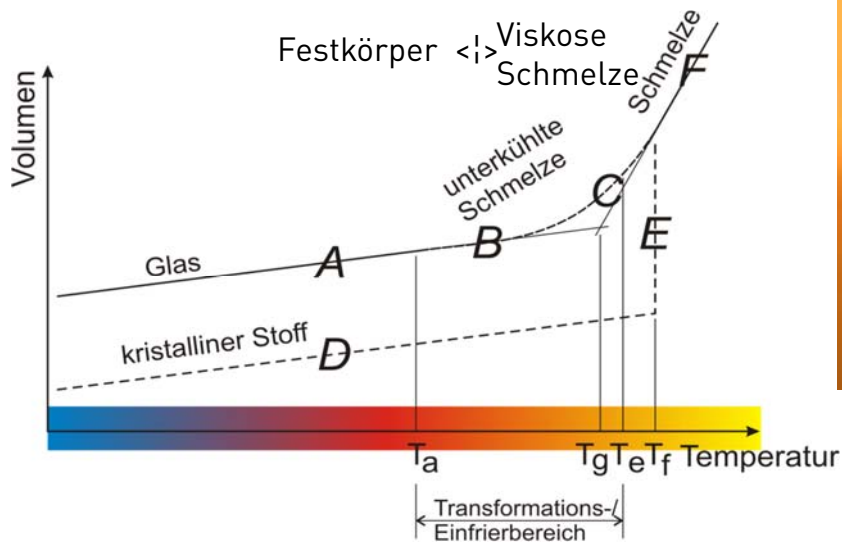
109.47°
Bindungswinkel



- Im Glas sind grundsätzlich die gleichen Bindungszustände wie im Kristall (SiO_4 Tetraeder).
- Quarz hat Gitter (kristalline Fernordnung), Quarzglas ein Netzwerk mit unregelmässigen Bindungswinkeln und Abständen (ausschliesslich Nahordnung).



Glas verstehen: Das V-T-Diagramm



Wärmedehnung durch asymmetrische Potentiale + Expansion durch Änderung der Netzwerkstruktur

Netzwerkstruktur: Stark verknüpft \rightarrow weit offen

Festkörper mit nichtkristalliner, amorpher Struktur
→ Glaszustand



Kristalliner Zustand (Einkristall / Polykristall)

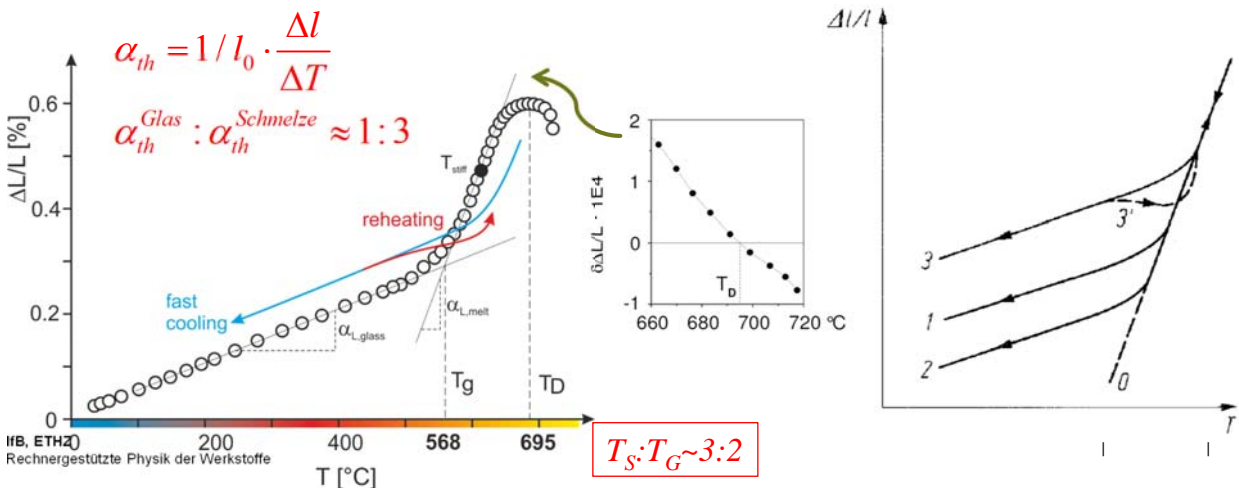
- Periodisches Gitter
- Alle Verbindungen gleiche Festigkeit
- Scharfer Schmelzpunkt

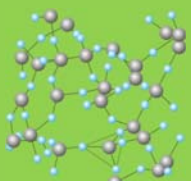
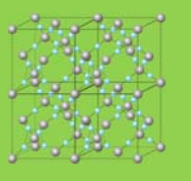


Glaszustand (amorpher Zustand)

- Eingefrorene ungeordnete Struktur
- Bei Abkühlung zunehmende Viskosität
→ Transformationsbereich
- Ende des Transformationsbereichs liegt der Glasübergang
- Sprunghafte Änderung der Wärmedehnung

Glasdichte hängt von Abkühlrate ab.
Geringe Kühlrate → höherer Dichte; hohe Kühlrate → geringere Dichte
Grund: Moleküle können durch schnelle Abkühlung nicht in Gleichgewichtslage gehen.
Geringere Packungsdichte wegen rascher Viskositätszunahme
→ Glastemperatur ändert sich mit der Abkühlrate.



Gläser	Kristalline Stoffe
Transformationsbereich (TB)	Scharfer Schmelzpunkt
Volumenzunahme im TB bereits wie Flüssigkeit	Sprung im Volumen am Schmelzpunkt
Oberhalb T_f wie kristalliner Stoff	Oberhalb T_f wie Glas
Unregelmässiges Netzwerk (unregelmässige Bindungswinkel und Abstände) ohne Fernordnung (wie Flüssigkeit) → isotrope, unterkühlte Flüssigkeit extrem hoher Zähigkeit (10^{19} dPas RT)	Regelmässig, periodisch wiederkehrend, geordnet (Fernordnung) → anisotrop
Starke und schwache Bindungen liegen nebeneinander vor → Erstarrungs-/Erweichungsintervall	Bindungen mit annähernd gleicher Stärke → Schmelzpunkt
Quarzglas 	Quarzkristall 

← Schmelzen und abkühlen →

Der Glaszustand ist der eingefrorene Zustand einer unterkühlten Flüssigkeit, die ohne zu kristallisieren erstarrt (Gustaf Tamman (1861-1938))

Natürliche Gläser

Glasbildung ...

- ... durch amorphe Erstarrung vulkanischer Schmelzen (Gesteinsglas)
- ... durch Meteoriteneinschlag (Impaktglas/Tektit)
- ... durch Blitzeinschlag (Fulgurite)
- ... durch Felsstürze (Friktionite)
- ... durch Schockwellen (Diaplektisches Glas)
- ... durch Lebewesen (Glasschwamm)



Glasrezepturen

«Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen und 5 Teile Kreide – und du erhältst Glas»

ältestes Glasrezept des assyrischen König Assurbanipal (7. Jh.v. Chr.)



Glas hat oft keine definierte chemische Zusammensetzung, es ist eine Mischung aus Metalloxiden und anderen chemischen Elementen und Verbindungen.

Bausteine der Gläser sind Oxide von Si, B, Al, Mg, Ca, Ba, Pb, Zk, Li, Na, K

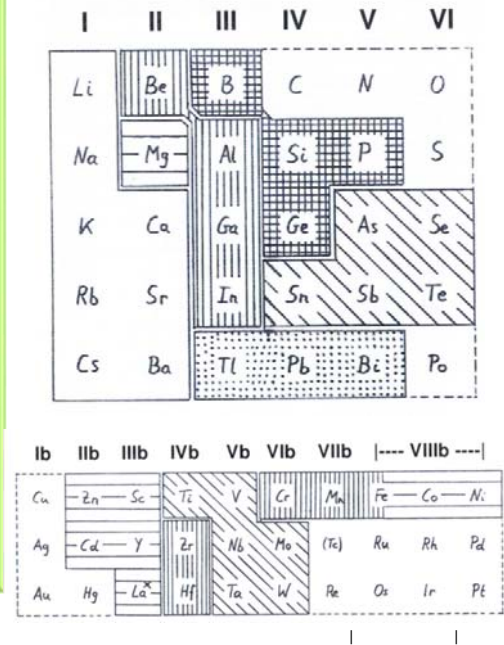
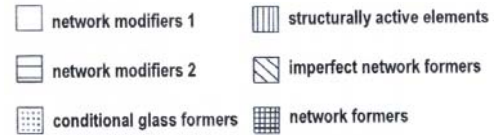
Die chemische Analyse bezeichnet immer Anteil eines Elements in Form dessen Oxides.

Da Glas kein Gefüge hat, müssen die Eigenschaften über die Chemie der Bindungen beeinflusst werden über Fremdionen!



Glaseigenschaften – Glasmikrostruktur

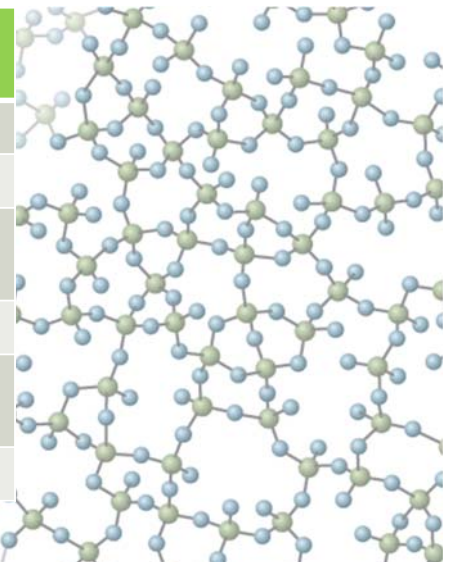
- Das Material, das die Grundstruktur bestimmt, nennt man **Netzwerkbildner** (Glasbildner).
- **Netzwerk wandler** werden in das vom Netzwerkbildner gebildete Gerüst eingebaut. Sie reißen die Netzwerkstruktur auf, indem der Brückensauerstoff der Tetraeder gesprengt wird.
- **Stabilisatoren** können sowohl Netzwerk wandler als auch Netzwerkbildner sein. Sind nicht in der Lage als Einzelkomponente ein Glas zu bilden.



Glasbildner

Glasbildner können Einkomponentenglas bilden.
 Elektroneutralität kann nur von Stöchiometrien erfüllt werden.

		M_2X_3	MX_2	M_2X_5	Elektronen -summe
Siliciumdioxid	SiO_2		x		3.33
Bortrioxid	B_2O_3	x			2.8
Phosphor- pentoxid	P_2O_5			x	3.71
Germanium	GeO_2		x		3.3
Arsenik / Diarsentrioxid	As_2O_3	x			3.6
Antimon	Sb_2O_5			x	3.71



Netzwerkwanter / Glaswandler

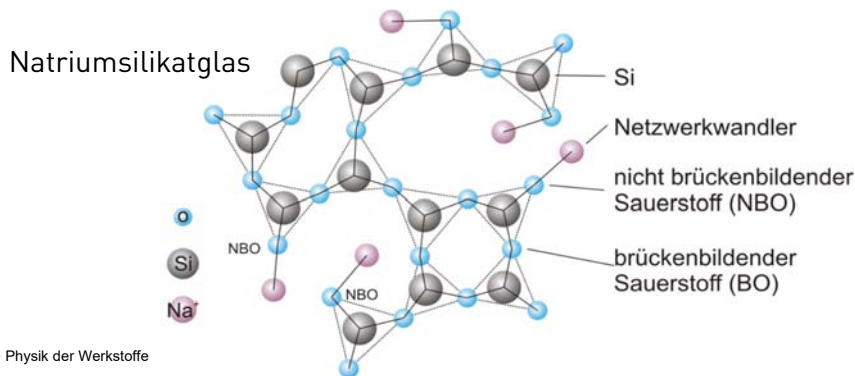
Netzwerkwanter spalten das Netzwerk auf und verringern die Zahl der Verknüpfungsstellen → kleinere Glastemperatur, geringere Viskosität
Anstelle der Atom- tritt schwächere Ionenbindung auf.

Glaswandler sind vornehmlich basische Oxide mit grossen Kationen:

Natriumoxid (Na_2O) → $\eta \downarrow$ Calciumoxid (CaO) → chemische Resistenz

Kaliumoxid (K_2O) → Glas wird länger; Litiumoxid (Li_2O) → $\eta \downarrow \downarrow$

seltener: Bariumoxid, Nioboxid, Rubidiumoxid, Strontiumoxid, Caesiumoxid (CsO), Tantal(V)-oxid, Telluroxid



Stabilisatoren

Zwischenoxide können sowohl Netzwerkwanter als auch
Netzwerkbildner sein, aber nicht Einkomponentenglas.

Beispiele sind:

Mangan(II)-oxid (MnO) → *Glas wird länger*

Aluminiumoxid (Al_2O_3) → *Glas wird länger, mech. Festigkeit ↑, chem. Resistenz ↑*

Bleioxid (PbO) → *Tg ↓, Brechzahl ↑, el. Widerstand ↑, Absorption v. Röntgenstrahlen*

Titandioxid (TiO_2) → *Brechzahl ↑, Säureresistenz ↑*

Zirconium(IV)-oxid (ZrO_2) → *chemische Resistenz ↑, Trübungsmittel für Emails*

Zinkoxid ZnO → *Härte ↑*

Ploniumoxid (PoO)

Zinn(II)-oxid (SnO)

Cadmiumoxid (CdO)

Berylliumoxid (BeO)

Thoriumoxid (ThO_2)

Selen(IV)-oxid (SeO_2)

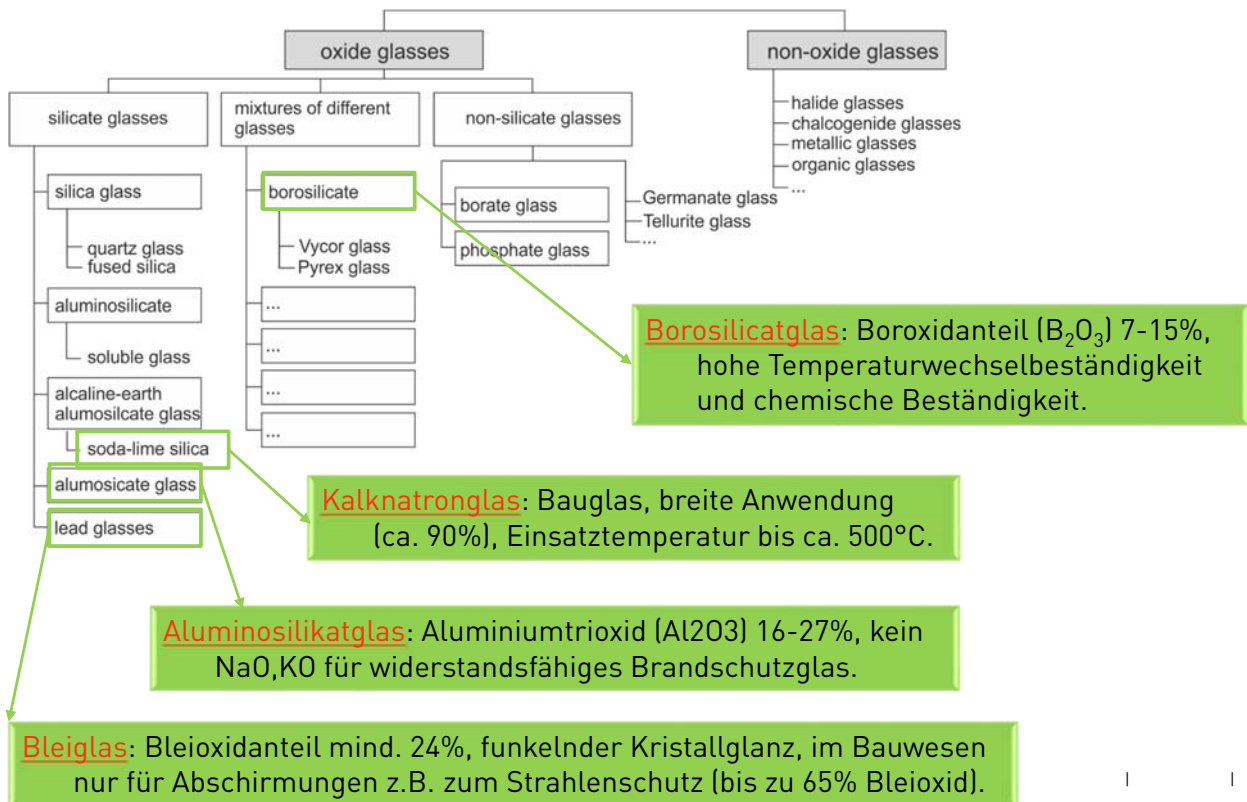
Eisen(II)-oxid (FeO)

Eisen(III)-Oxid (Fe_2O_3)

Nickel(II)-oxid (NiO)

Cobalt(II)-oxid (CoO)

Einteilung der Gläser

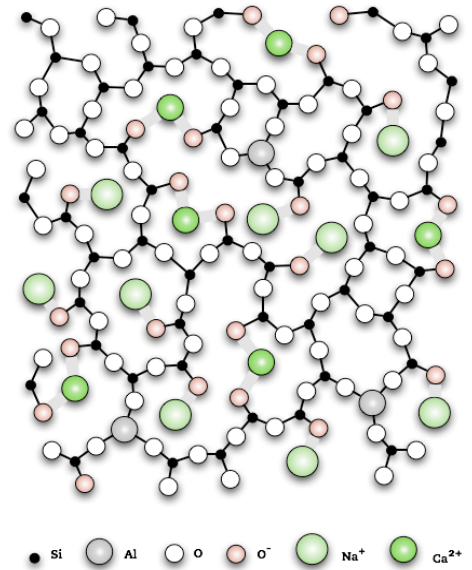


Zusammensetzung wichtiger Gläser

Glasart / Gewichtsprozent	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	B ₂ O ₃	PbO	TiO ₂	F	As	Se	Ge	Te
Quarzglas	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalknatronglas*	72	2	14	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Floatglas	72	1,5	13,5	-	3,5	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Bleikristallglas	60	8	2,5	12	-	-	-	17,5	-	-	-	-	-	-
Laborglas	80	3	4	0,5	-	-	12,5	-	-	-	-	-	-	-
E-Glas	54	14	-	-	4,5	17,5	10	-	-	-	-	-	-	-
Email	40	1,5	9	6	1	-	10	4	15	13	-	-	-	-
Chalkogenidglas 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	55	33	-
Chalkogenidglas 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	32	30	25

Kalknatronglas: Zuschlagstoffe

- Flussmittel (Zinkoxid, Thallium):
 - Verminderung des Schmelzpunktes.
 - Beschleunigung der Läuterung (= Entfernen von Glasbläschen aus der Schmelze).
 - Verminderung der Entglasung (= Trübung des Glases durch örtliche Kristallbildung beim Erstarren).
- Veränderung der Brechzahl (Bariumoxid, Blei).
- Absorption von Infrarotstrahlung (Cer).
- Veränderung der thermischen und elektrischen Eigenschaften (Boroxid).
- Erhöhung der Bruchfestigkeit (Aluminiumoxid).
- Trübungsmittel (Zindioxid, Calciumphosphat, Fluorid, Zirkoniumdioxid).



Färben von Glas

Über Zwischenoxide werden die Eigenschaften des Glases gesteuert
→ Ionenfärbung

Beimischung von Metallen in Form von Nanopartikeln in der Schmelze (Silber / Gold in Korngrößen <10nm, Form wichtig)

→ Colloidale Färbung

Beeinflussung durch nicht an der Reaktion beteiligte Zusätze für Farbe, Brechungsindex, Trübung.

Entfärbung durch Metalloxide, die die komplementäre Farbe zur Verunreinigung bringen → Glasmacherseife



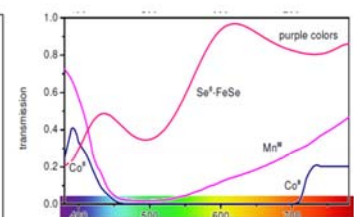
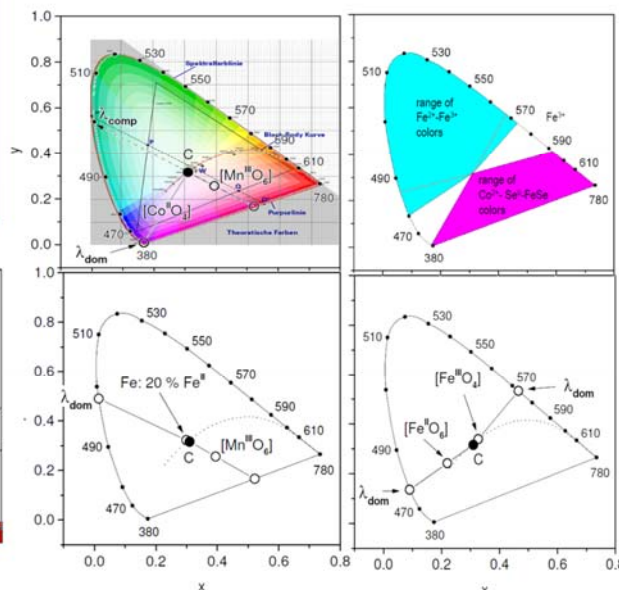
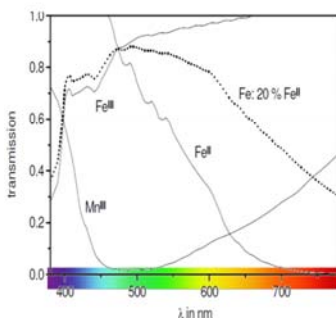
Kalknatronglas: Zuschlagstoffe für die Färbung

Oxide		Farbe
Kupferoxid (einwertig)	CuO	Rot (Kupferrubinglas)
Kupferoxid (zweiwertig)	Cu ₂ O	Blau
Kobaltoxid	Co ₂ O ₃	Dunkelblau
Chromoxid	Cr ₂ O ₃	Grün
Eisenoxide	Fe ₂ O ₃	Je nach Wertigkeit Fe ²⁺ =blau / Fe ³⁺ =gelb → Mischung grün
Uranoxid	UrO	Gelb-/Grünfärbung (Annagelb mit grüner Fluoreszenz)
Nickeloxid	NiO	Violett, rötlich, bräunlich (Entfärbung)
Manganoxid (Braunstein)	MnO	Glasmacherseife
Selenoxide	SeO/SeO ₂	Rosa (Rosalin) und rot (Selenrubin)
Silber		Feines Silbergelb
Gold		Rubinrot (in Königswasser aufgelöst)
Indiumoxid	In ₂ O ₃	Gelb bis bernsteinorange
Neodym	NdO	Rosa bis purpur, lila

Kalknatronglas: Zuschlagstoffe für die Entfärbung

Entfärbung mit Mn³⁺: Nur eine komplementärfarbe möglich!

Bsp:
Fe²⁺:Fe³⁺=1:4



Entfärbung mit Mischung aus Cobalt-Selen macht Komplementärfarbe für beliebige Fe²⁺:Fe³⁺ Mischungen möglich!

Kalknatronglas: Rohstoffe

Quarzsand: Körnung <1mm; fast reines SiO_2 ; durch gezielte Rohstoffauswahl kann die grüne Eigenfarbe von Kalknatronglas nahezu aufgehoben werden → Chemische Entfärbung; *Glas-/Netzwerkbildner*

Netzwerkwanler und Stabilisatoren in carbonatisierter Form:

Natriumcarbonat: Soda; Na_2CO_3 ; senkt Schmelzpunkt des SiO_2 ; *Flussmittel; Netzwerkwanler*.

Pottasche: Kaliumcarbonat K_2CO_3 ; liefert Kaliumoxid für die Schmelze; *Netzwerkwanler und Flussmittel*.

Kalk: Calciumcarbonat CaCO_3 ; Netzwerkwanler; *Erhöhung der Glasfestigkeit*.

Feldspat: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Als Trägerrohstoff für Al zur *Erhöhung der Glashärte*.

Altglas: Drastische Senkung des Energieverbrauchs aber schlechte Farb-trennung, Fremdstoffe → nicht für hochwertige Gläser zu verwenden.



Element	Oxid	Rohmaterialien: Optionen für Oxide				
Si	SiO_2	Sand	Bruchglas			
Ti	TiO_2	Illmenit, FeTiO_3	TiO_2			
Zr	ZrO_2	Zirkon, ZrSiO_4	ZrO_2			
Al	Al_2O_3	Feldspat $[\text{Ba,Ca,Na,K,NH}_4](\text{Al,B,Si})_4\text{O}_8$	Nephelinit	Hochofen-schlacke	Klingstein	Kaolinit
		$\text{Al}(\text{OH})_3$	Al_2O_3			
B	B_2O_3	Borax	H_3BO_3	B_2O_3	Colemanit	Tinkal
Fe	Fe_2O_3	Rotes Eisenoxid	FeS	FeS_2		
Cr	Cr_2O_3	Cr_2O_3	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$			
Na	Na_2O	Natriumcarbonat Na_2CO_3	NaOH			
K	K_2O	Potasche, K_2CO_3				
Ca	CaO	Kalkstein				
Mn	MnO	MnO_2	MnCO_3			
S	SO_3	Na_2SO_4	K_2SO_4	CaSO_4	Gips	BaSO_4
Pb	PbO	PbO	Pb_3O_4			
Mg	MgO	Dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	MgCO_3			

5

- Mechanische Eigenschaften von Glas variieren stark.
- Bruchfestigkeit wird stark von der Qualität der Oberfläche bestimmt.
- Glas ist sehr resistent gegen Chemikalien; Ausnahme: Flusssäure.
- Hoher elektrischer Widerstand bei Raumtemperatur, der bei steigender Temperatur rasch abnimmt.
- Einsatztemperaturen unterscheiden sich je nach Glastyp stark.

Eigenschaft		Kalknatronglas DIN1249-10	Borosilicatglas
Dichte (bei 18°C)	Kg/m ³	2500	2200-2500
Härtegrad nach Mohs	-	5-6	
Elastizitätsmodul E	GPa	73	63
Querdehnzahl	-	0.23	0.2
Spez. Wärmekapazität	J/(kgK)	720	800
Lineare Wärmedehnzahl (20-300°C)	mm/(mK)	9x10 ⁻³	Klassenabhängig
Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	1.05	1
Biege/Druck/Zugfestigkeit	N/mm ²	45/700-900/30-90	
Mittlerer Brechindex	-	1.52	1.5

Einstellung von Glaseigenschaften

Grosse Datenbanken für Glaseigenschaften (z.B. SciGlass > 390.000 Glasskompositionen).

Eigenschaftsvorhersage anderer Zusammensetzungen über Regressionsanalyse.

- Praktisch alle physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gläsern und glasbildenden Schmelzen.
- Unterschiedliche Interpolationsmethoden für breite Konzentrationsbereiche.
- Dreiecksdiagramme für Glasbildung.
- Optische Spektren.

b variable Koeffizienten
n Anzahl aller
Glaskomponenten
C Konzentration der
Komponenten

$$\text{Glaseigenschaft} = b_0 + \sum_{i=1}^n \left(b_i C_i + \sum_{k=1}^n b_{ik} C_i C_k \right)$$

→ Kristallisation oder Phasentrennungen dürfen nicht auftreten.

Einstellung von Glaseigenschaften: Bsp. Dichte

Dichtevariation 2-6g/cm³; Dichte SiO₂ kristallin 2.65/amorph 2-2.2g/cm³

→ Aufgelockerte Struktur, Abhängig von Vorgeschichte

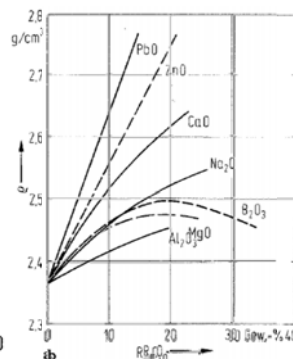
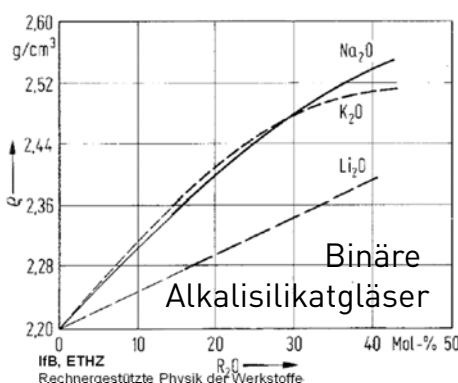
Zugabe von Alkalioxiden erhöht die Glasdichte:

aufsprengen des Netzwerkes ↔ Auffüllen der Hohlräume

Wegen höherer atomarer Masse nimmt Dichte zu

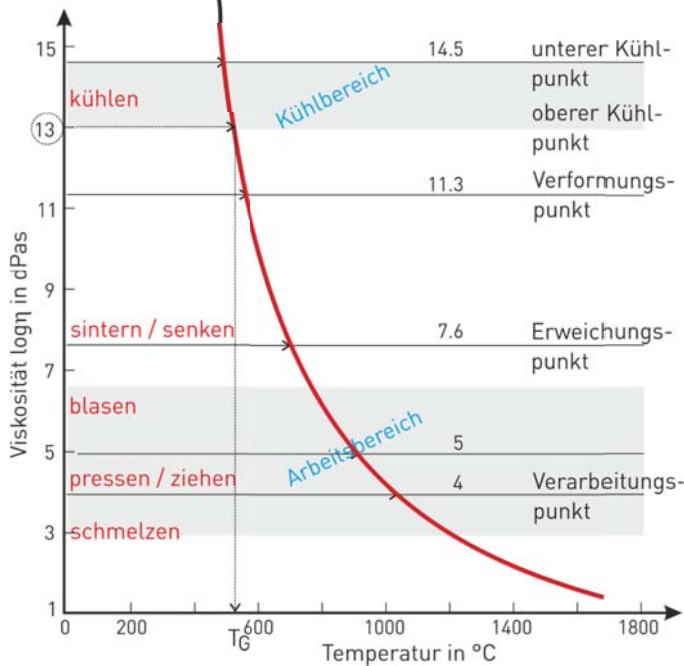
Abschätzung:

$$\rho = \frac{100}{\sum_i p_i / \rho_i} \approx 2.5$$



Oxid	ρ_i (g/cm ³)	Oxid	ρ_i (g/cm ³)
SiO ₂	2.24	As ₂ O ₅	3.33
Al ₂ O ₃	2.75	CaO	4.3
B ₂ O ₃	2.9	ZnO	5.94
Na ₂ O	3.2	BaO	7.2
K ₂ O	3.2	PbO	10.3
MgO	3.25		

Temperaturabhängigkeit der Viskosität



IFB, ETHZ
Rechnergestützte Physik der Werkstoffe

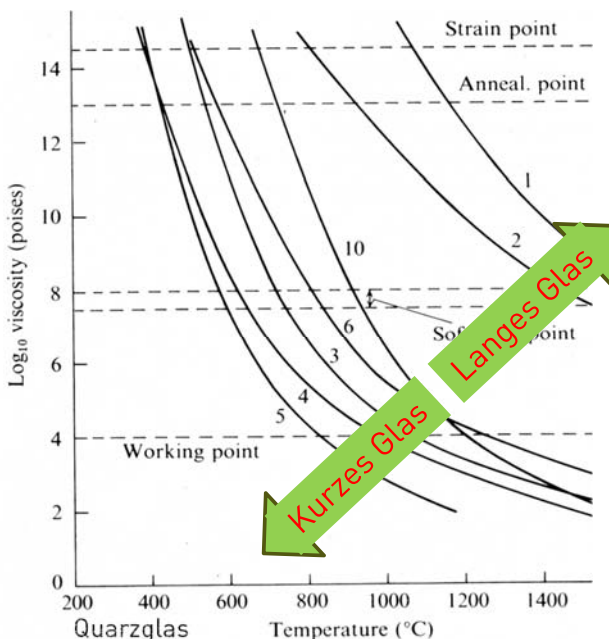
Grosser Viskositätsbereich (16-18 Grössenordnungen) → Unterschiedliche Viskosimeter erforderlich (Faserziehen, Torsion, Rotation)

Vogel-Fulcher-Tamman (VFT) Gleichung (für $T > T_g$)

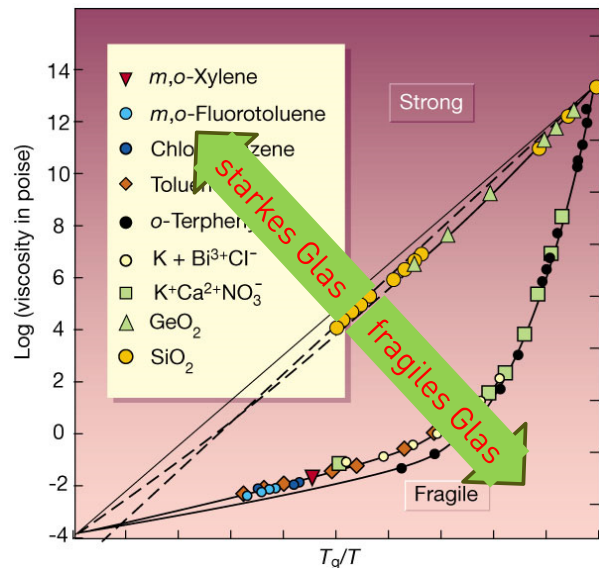
$$\log \eta = A + \frac{B}{T - T_0}$$

Def.: Glastemperatur $T_G = T^{13}$
Temperatur bei 10^{13} dPas

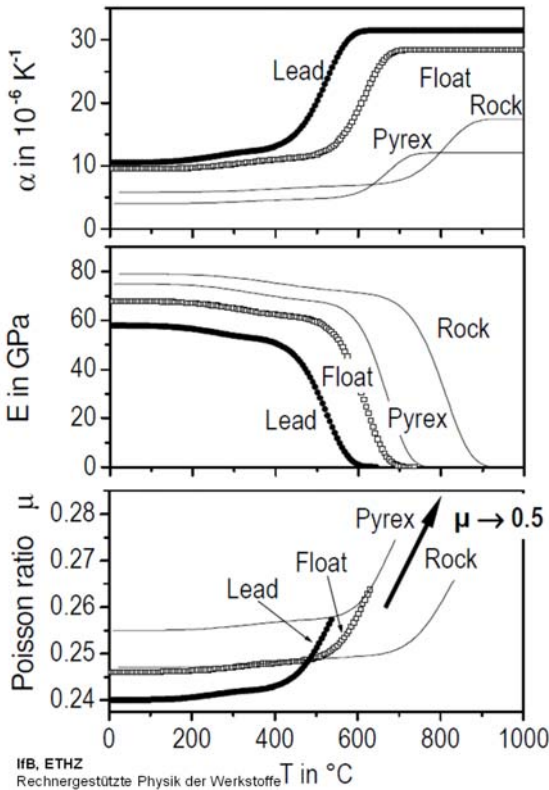
Temperaturabhängigkeit der Viskosität



- 1 Quarzglas
- 2 Quarzglas/B₂O₃ (3%)
- 3 Natron-Kalk-Glas
- 4/5 Bleikristall 21/58%PbO
- 6/7 Borosilikatglas 21/28%B₂O₃
- 8/9/10 Aluminosilikatglas 5.6/14.5/20.5%AL₂O₃



Temperaturabhängigkeit mechanischer Größen



Elastische Konstanten ändern sich im Glasübergang

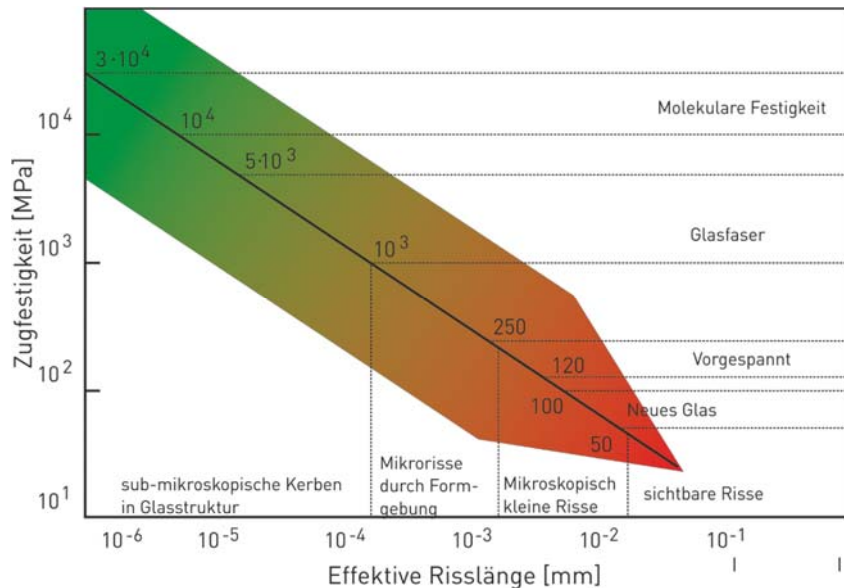
Im visko-elastischen Bereich sind Elastische Konstanten frequenz-abhängig (! Ultraschallmessung)

Oberhalb T_D ist Querkontraktion 0.5 (Inkompressibilitätsbedingung)

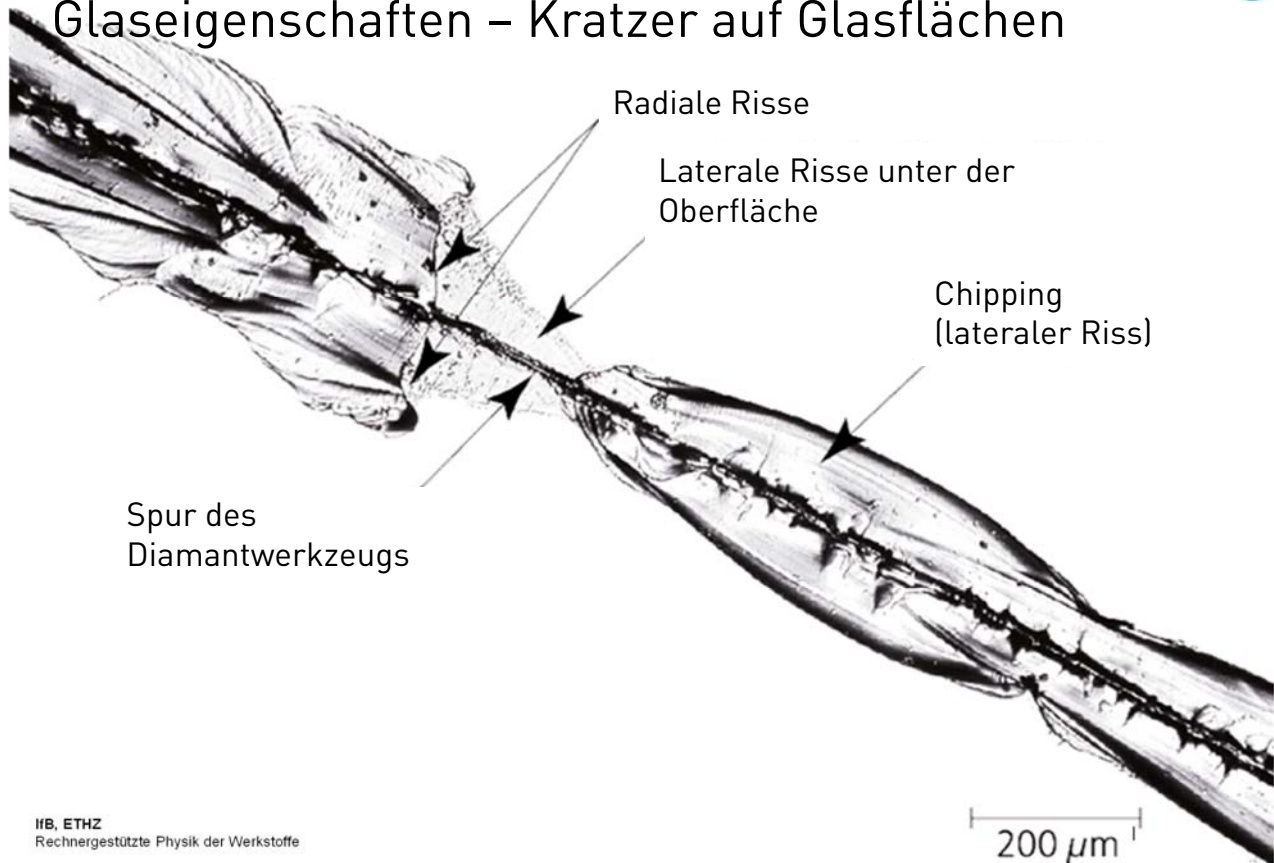
Pyrex=Borosilikatglas;
Rock=Quarzglas

Glaseigenschaften – Bruchverhalten

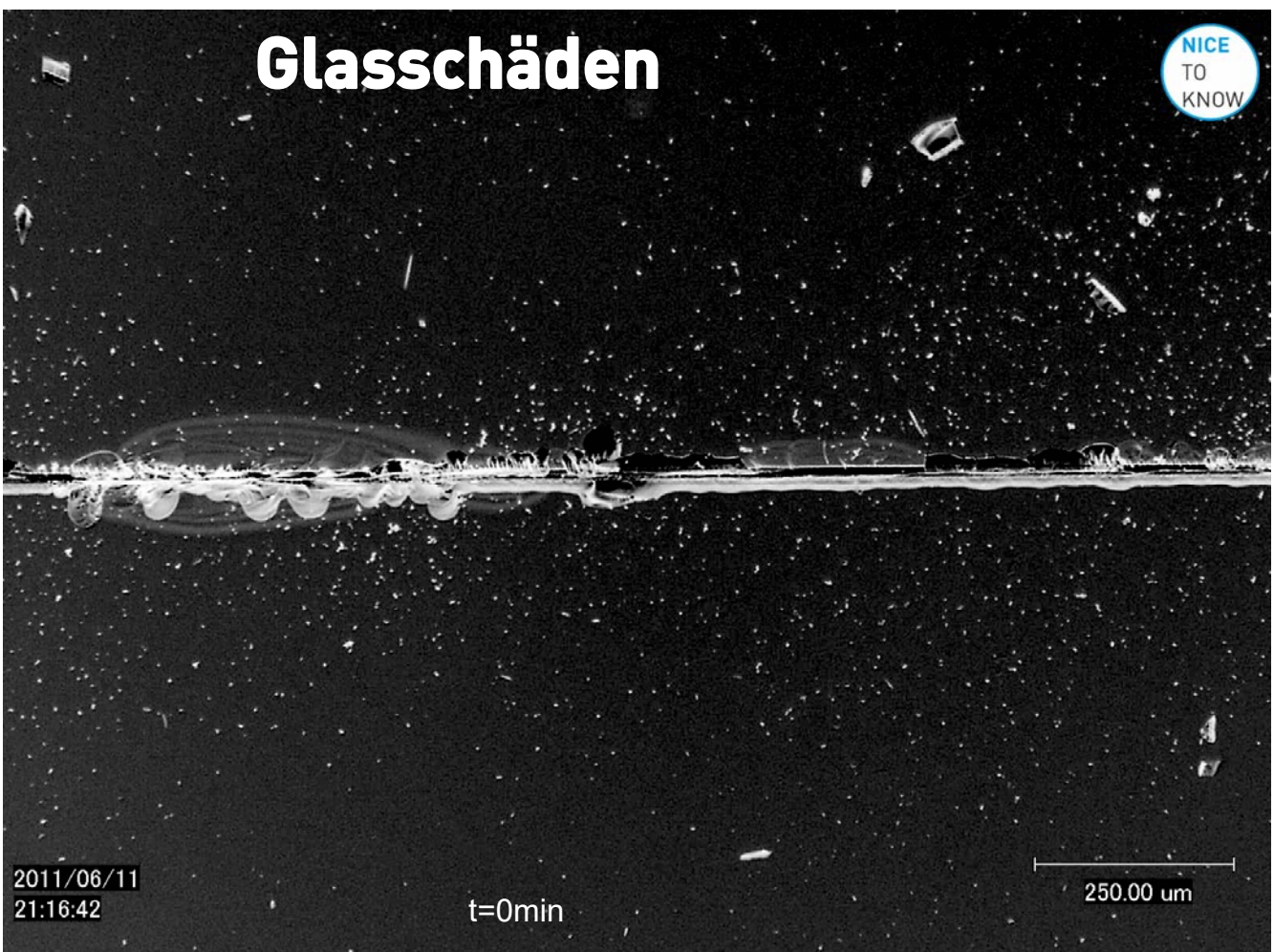
- Sprödes Bruchverhalten aufgrund der geringen Zugfestigkeit und Bruchdehnung.
- Hohe Bruchgefahr durch geringe Oberflächenverletzungen (Kerbwirkung).



Glaseigenschaften – Kratzer auf Glasflächen



Glasschäden



Glasschäden

NICE
TO
KNOW

2011/06/11
21:17:43

t=1min

250.00 um

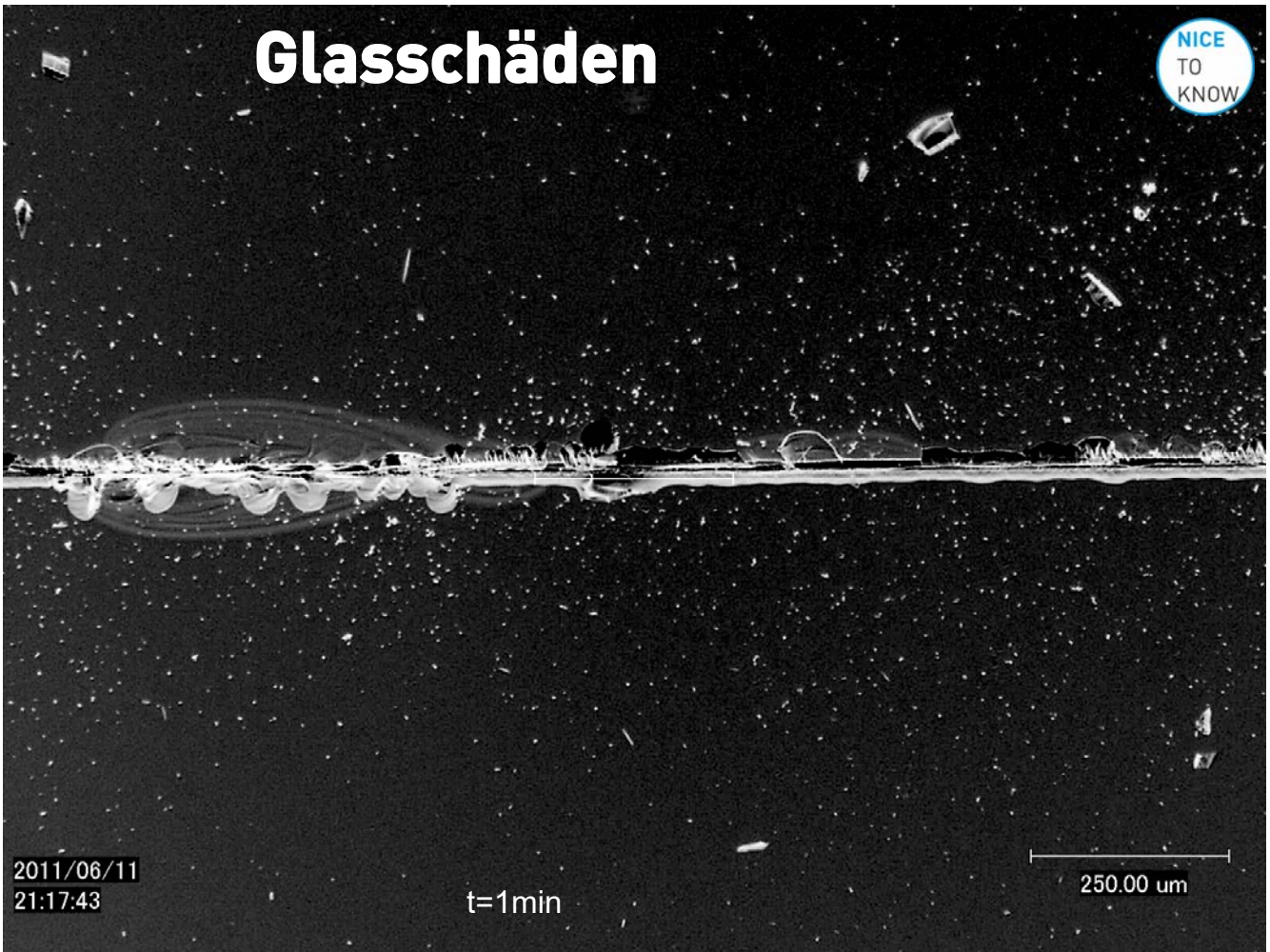
Glasschäden

NICE
TO
KNOW

2011/06/11
21:18:43

t=2min

250.00 um



Glasschäden

NICE
TO
KNOW

2011/06/11
21:26:43

t=10min

250.00 um

Glasschäden

NICE
TO
KNOW

2011/06/11
22:31:43

t=75min

250.00 um

Glasschäden

NICE
TO
KNOW

2011/06/12
00:36:43

t=200min

250.00 um

Glasschäden

NICE
TO
KNOW

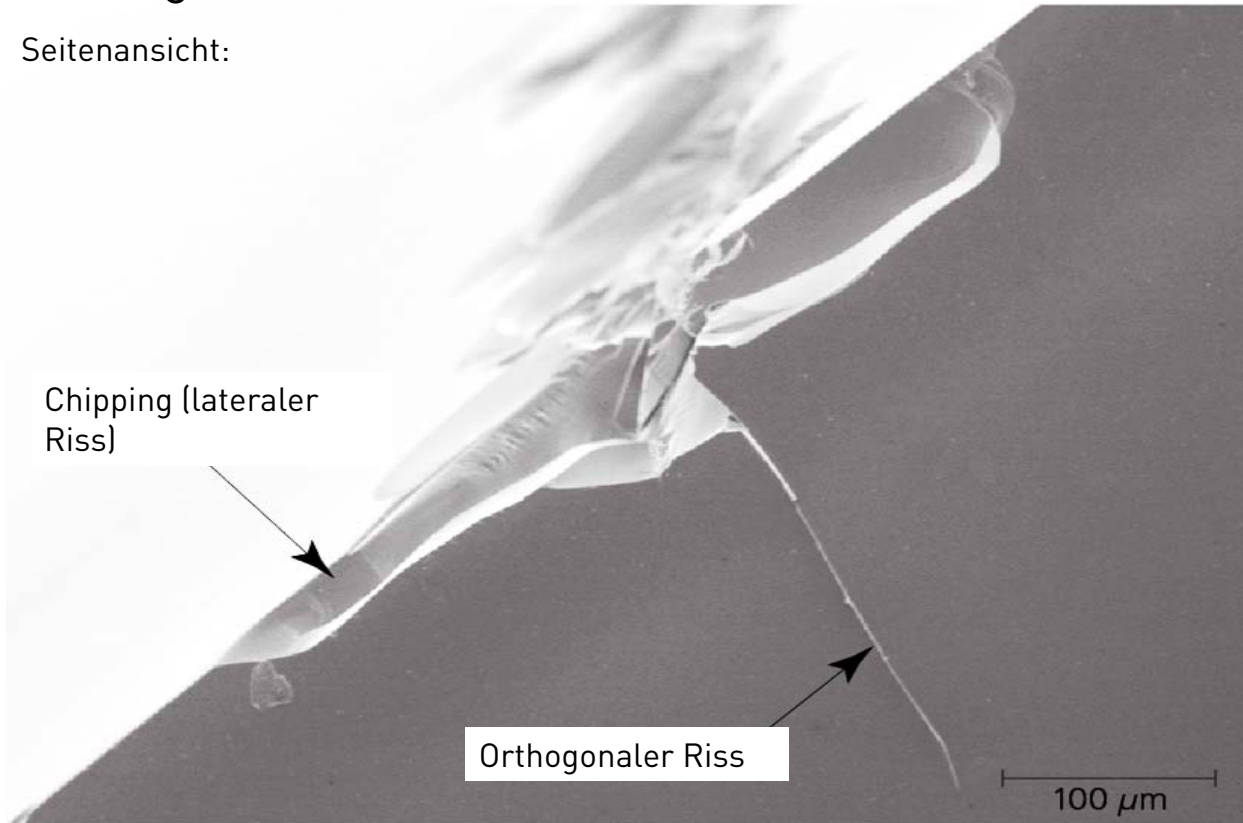
2011/06/12
00:56:43

t=220min

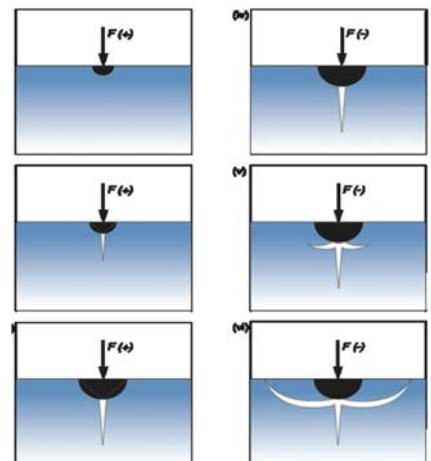
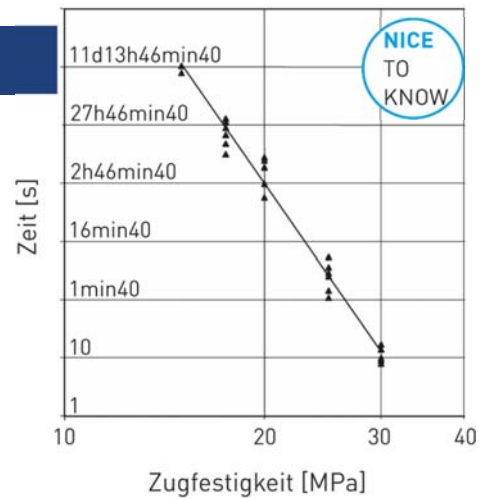
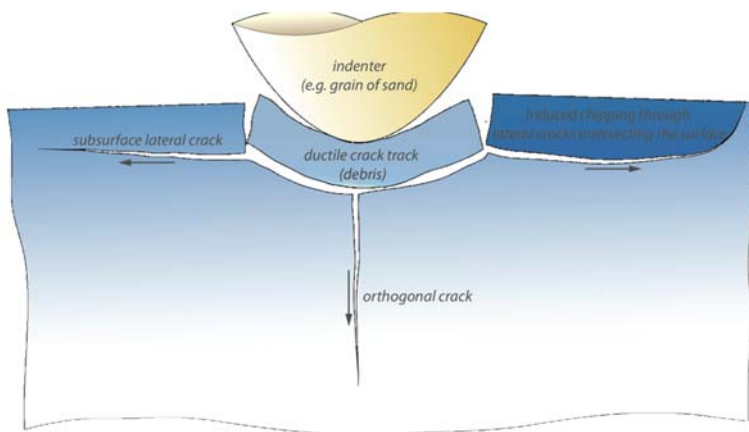
250.00 um

Glaseigenschaften – Kratzer auf Glasflächen

Seitenansicht:

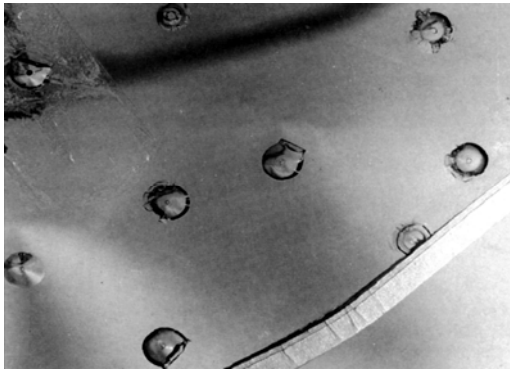


Glaseigenschaften – Kratzer



Orthogonale Risse bestimmend Festigkeit.
 Spannungssingularität an Risspitze führt zu Dichteänderungen.
 Spannungsinduzierte Festigkeitsänderung + Spannungskorrosion and Rissitzen führt noch nach Tagen zu Festigkeitsverlust.

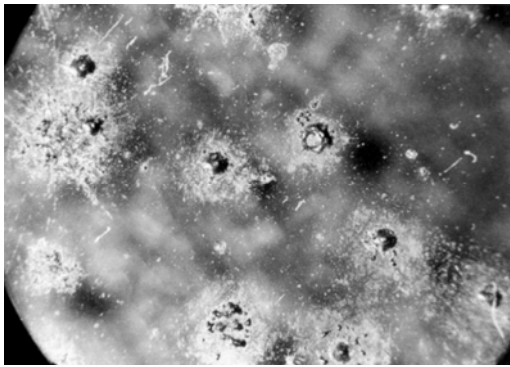
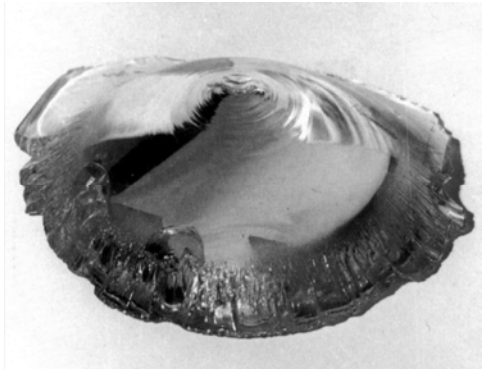
Glaseigenschaften – Oberflächenbeschädigung



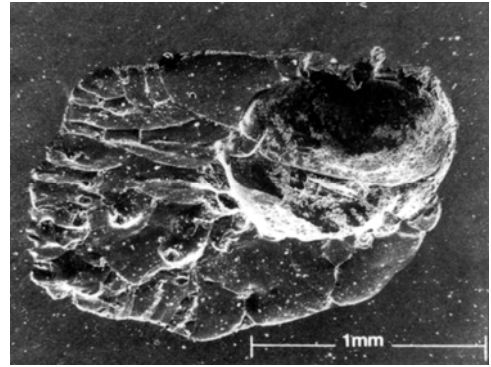
Schneller Einschlag
kleiner, harter Körner.



Hertzscher
Kegel auf der
gegenüber
liegenden Seite.



Kraterbildung durch
Schweissperlen



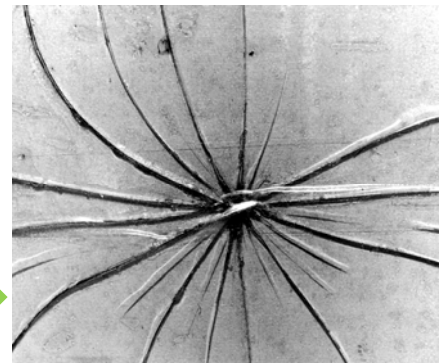
Glaseigenschaften – Bruchbilder



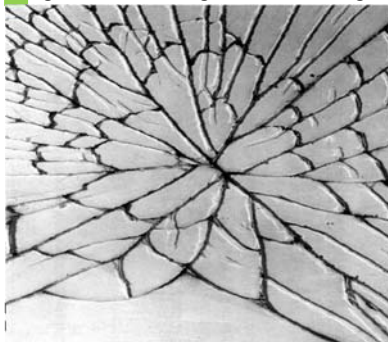
Schädigung durch
Einschlag eines weichen
Körpers.



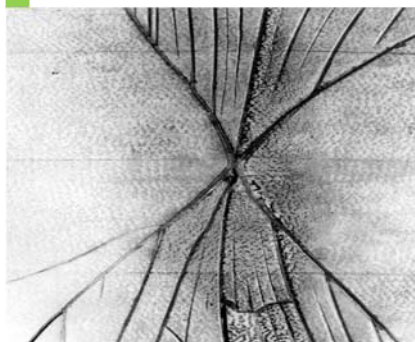
Schädigung durch
Einschlag eines harten
Körpers.



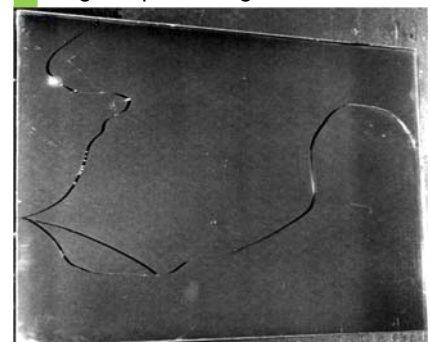
Schädigung durch
gleichmässige Belastung



Biegebruch



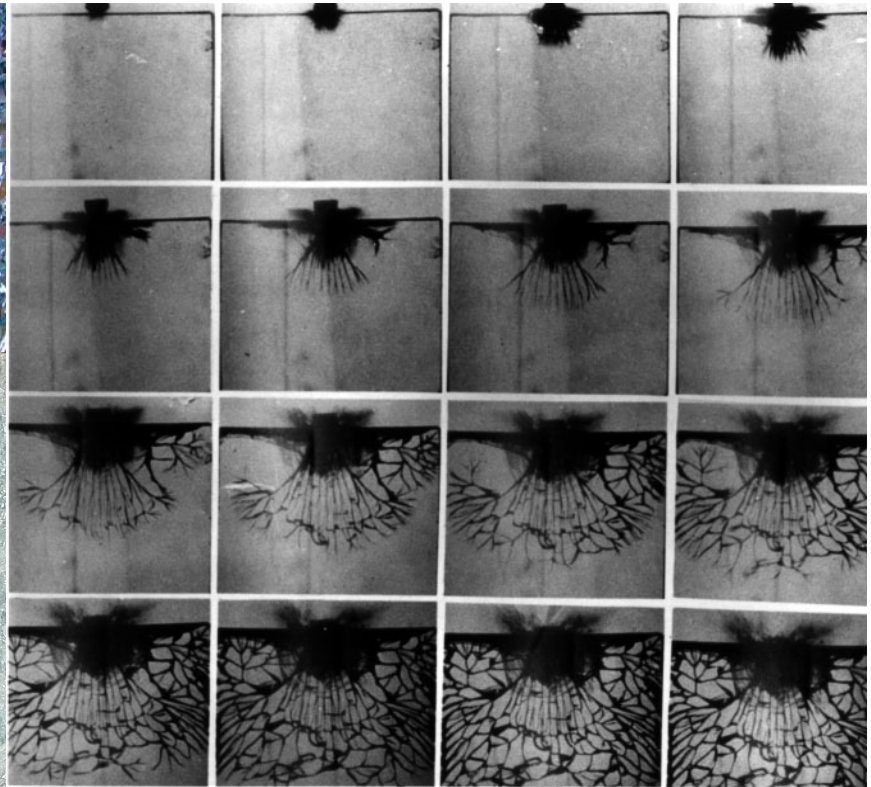
Risse durch thermische
Eigenspannungen



Bruchbilder vorgespanntes Glas

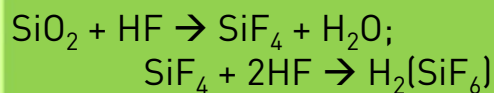


Fragmentation aufgrund von Rissgabelungen und Vereinigungen.



Beständigkeit von Glas gegen Flusssäure

Fluorwasserstoffsäure löst das Siliciumdioxid auf und wandelt es zu SiF_4 um. In wässriger Lösung reagiert es weiter zu Hexafluorokieselsäure



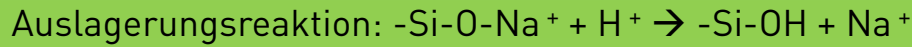
Leicht lösliches Siliziumhexafluorid SiF_6 wird gebildet.

Achtung bei sauren Fassadenreinigern.



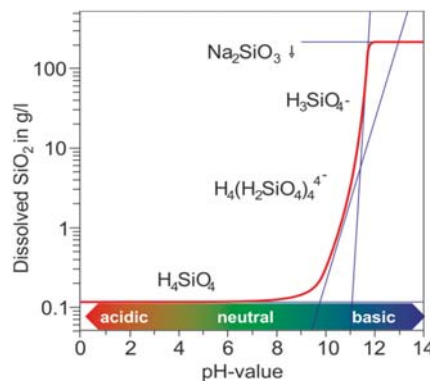
Beständigkeit von Glas gegen wässrige Säure

Ionenaustauschreaktion – Protonen der Säure ersetzen Kationen im Glas.

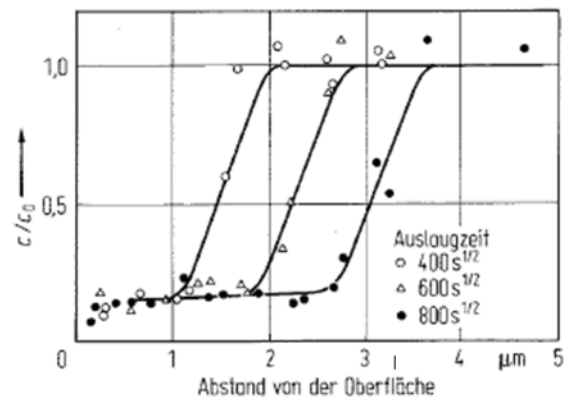


Durch die Reaktion verarmt die Säure an Protonen \rightarrow pH \uparrow

Es entsteht eine Silikatgelschicht, die mit Protonen gesättigt ist und als Diffusionsbarriere den weiteren Angriff hemmt \rightarrow Passivierung



IFB, ETHZ
Rechnergestützte Physik der V.



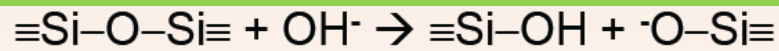
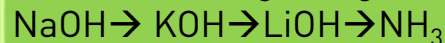
Beständigkeit von Glas gegen Basen

Vollständige Auflösung des Kieselsäuregerüsts, Angriff auf brückenbildenden Sauerstoff

SiO₂ Moleküle gehen in Lösung und bleiben dort als Polysilikate

Es entstehen immer neue Oberflächen \rightarrow keine Schutzschicht

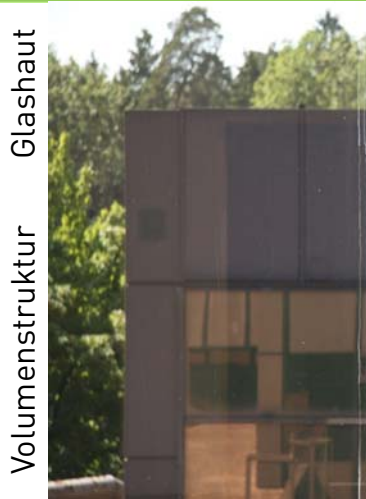
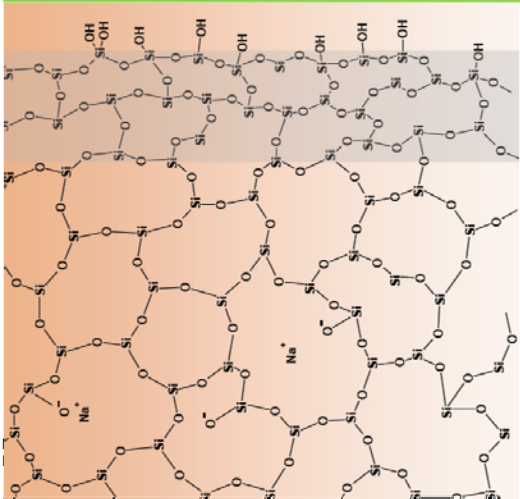
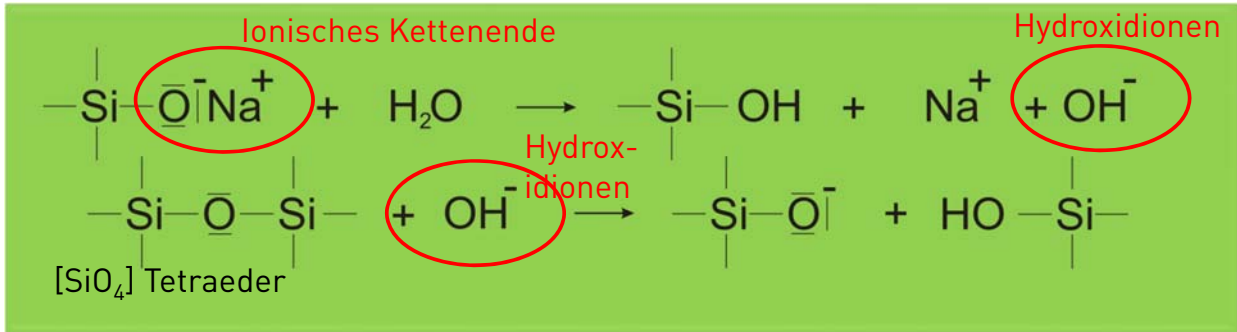
Stärke des Laugenangriffs nimmt in der Reihenfolge ab:



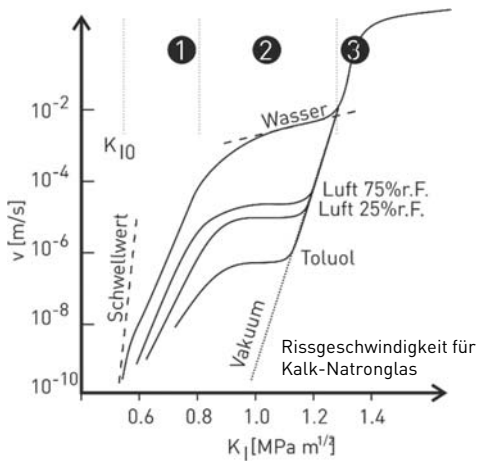
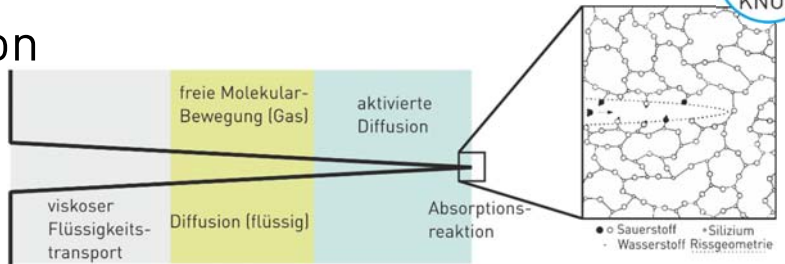
Oberflächenverätzungen durch Kalkmilch, (Beton/Putz)



Beständigkeit von Glas gegen Wasser



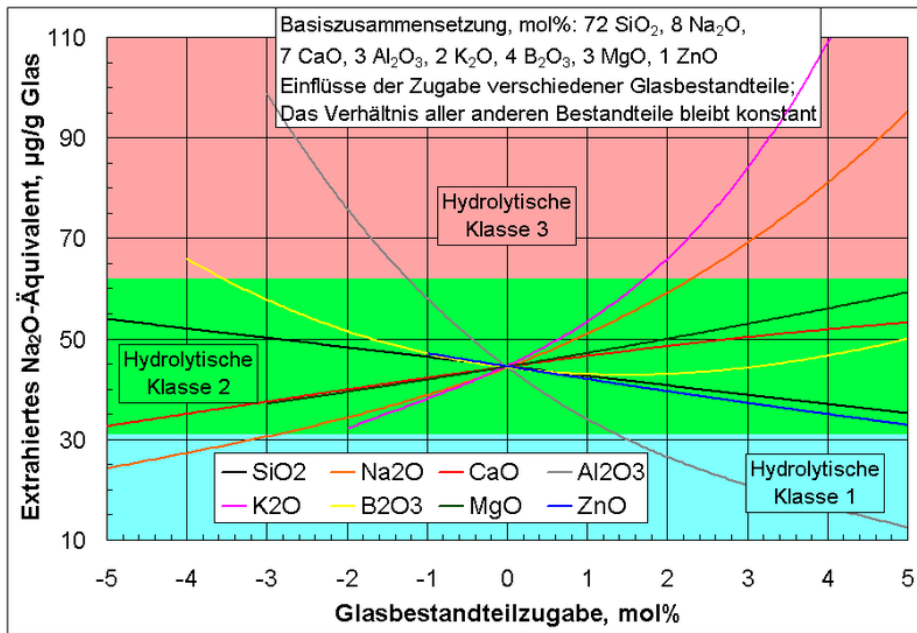
Spannungskorrosion



- 1** Wassertransport zur Risspitze durch Diffusion
 → Begrenzt Rissgeschwindigkeit
 Zugspannung erhöht Rissöffnung und folglich Transport und Rissgeschwindigkeit gem.:

$$\frac{da}{dt} = f(K_I) = AK_I^n$$
- 2** Reduzierte Mobilität von Wasser führt zu konstanter Wachstumsrate
- 3** Rissfortschrittsgeschwindigkeit erreicht den Wert in Vakuum → unabhängig von Umgebungsmedium
 → Spontanbruch setzt ein wenn K_{IC} erreicht wird

Beständigkeit von Glas gegenüber Wasser



Entglasung

Glas ist so alt wie das Universum, aber warum gibt es keine vulkanische Gläser aus dem Präkambrium (>4.5Mrd Jahre)?

Gläser in einem metastabilen Zustand

- Entglasung (Kristallisation) über geologische Zeiträume
- thermodynamisch stabile Kristallstruktur ausgehend von Keimen
- heute vollkommen rekristallisiert.

Schneeflockenobsidian ist im Prozess der Umwandlung, SiO₂ als Cristobalit



Entglasung

Auskristallisation unterhalb des Transformationsbereichs

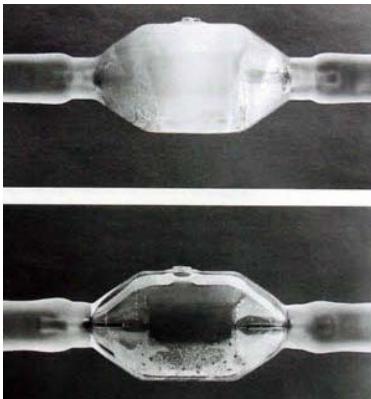
→ Alterungsprozess durch Druck und Temperatur

Ausscheidung von kristallisierter Kieselsäure und von feldspatartigen Kristallen zurückzuführen

→ Festigkeitsverlust, Härtegewinn, Anisotropie, Erblinden

24-48 Stunden nahe Schmelzpunkt halten und langsam abkühlen

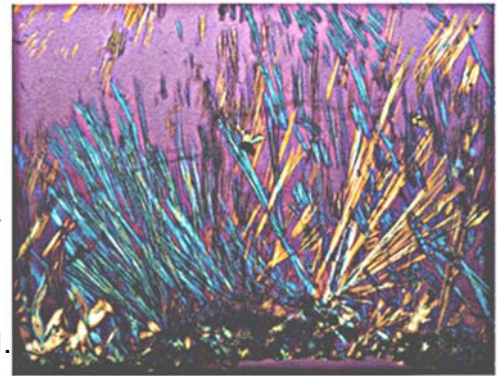
→ Reaumursches Porzellan



Quarzglas besonders gefährdet



Entglasungsschicht, die in das Material wächst (β -Cristobalit).



5

- Erklären was Glas ist
- Diskutieren des Glaszustands vs. Kristalliner Zustand
- Kennenlernen der Bestandteile und Rohstoffe von Baugläsern
- Verstehen des Temperaturverhaltens von Gläsern
- Charakterisieren und erklären typischer Schäden in Glas