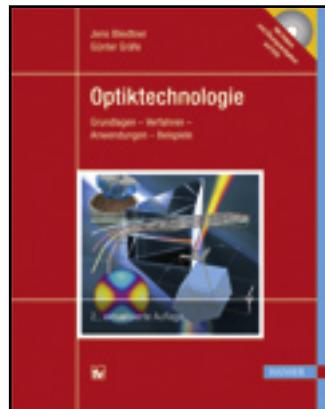


# HANSER



Leseprobe

Jens Bliedtner, Günter Gräfe

Optiktechnologie

Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele

ISBN: 978-3-446-42215-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42215-5>

sowie im Buchhandel.

# 5 Urformen von optischem Glas

Urformende Verfahren stehen am Anfang des **Wertschöpfungsprozesses** und sind die Voraussetzung für den Einsatz aller übrigen Fertigungsverfahren. Hierbei steht das Ziel, einem formlosen Stoff erstmals eine Gestalt zu geben. I. d. R. werden identische Verfahrensschritte genutzt, um den Prozess des Urformens durchzuführen. Beginnend mit der Rohstoffgewinnung schließt sich der Verfahrensschritt Aufbereitung der Rohstoffe an. Das Einfüllen in Formen oder die quasi endlose Formgebung des Ausgangsmaterials führt über einen Abkühlprozess zum Erreichen eines festen Aggregatzustandes des ungeformten Produktes. Es schließt sich eine letzte Prozessstufe, die Entnahme oder Konditionierung des Erzeugnisses, an.

Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus einem formlosen Stoff durch Schaffen eines Stoffzusammenhaltes. Als formlose Stoffe werden Gase, Flüssigkeiten, Pulver, Fasern oder Granulat verwendet (DIN ISO 8580).

Die entstehenden Urformerzeugnisse können generell in zwei Gruppen unterteilt werden:

1. Die ungeformten Erzeugnisse sind Zwischenprodukte (**Halbzeuge**) und werden mit weiteren Fertigungsverfahren endbearbeitet, wobei sich Größe und Form ändern.
2. Die ungeformten Erzeugnisse sind **Endprodukte** bzw. **endformnahe Produkte**, wobei keine bzw. geringe weitere Arbeitschritte zur Fertigstellung erforderlich sind.

Tendenziell werden kurze Prozesswege von den Ausgangszuständen zum Endprodukt angestrebt. Besondere Prozesseffizienz ist möglich, wenn Verfahrensschritte substituiert werden können. Somit bestehen hohe Qualitätsanforderungen an die urformenden Verfahren, um möglichst auf direktem Weg zum Endprodukt zu gelangen (z. B. Spritzgießen oder Blankpressen). Bei der Herstellung von Bauteilen mit großen Stückzahlen kommt es in erster Linie darauf an, Halbzeuge (Presslinge etc.) bei jedem Bearbeitungsschritt mit hoher Formtreue bei minimalem Aufmaß zu ferti-

gen, um einerseits eine optimale Materialausnutzung zu gewährleisten und andererseits die Folgeprozesse effizient zu gestalten.

Im Ergebnis der Glasschmelze stehen seitens der Glashersteller verschiedene Lieferformen für eine weitere Verarbeitung zur Verfügung:

1. **Rohglas** (z. B. Barrenglas, Profilstäbe)
2. **Halbzeuge** (z. B. Plattenglas, Flachglas, Blockglas, Presslinge, Gobs)
3. **Rohlinge mit vor- bzw. angearbeiteten Flächen** (z. B. Linsen, Spiegel, Prismen).

Sehr wirtschaftlich werden dabei bspw. direkt aus der Schmelze Halbzeuge auf Rundtaktautomaten gepresst (z. B. Brillenglas- oder Fernglaslinsen). In der Regel müssen einfach optisch gepresste Gläser (insbesondere die optischen Funktionsflächen) aufgrund der nach dem Pressvorgang vorhandenen Rauigkeiten und Formabweichungen noch weiter bearbeitet werden. Im Unterschied hierzu können mittels Spritzgießens optische Bauelemente mit einem hohen Fertigstellgrad direkt durch das Urformen hergestellt werden. Hohe Genauigkeiten können auch beim Gießen von Kunststoffen in Glasformen erzielt werden, da die Werkzeugoberflächen aus Glas mit sehr hohen Genauigkeiten hergestellt werden.

## 5.1 Urformende Verfahren für mineralische Gläser

### 5.1.1 Herstellung von Gobs und Presslingen

**Gobs** (engl. Glasposten/Tropfen) sind vorgeformte Glastropfen mit mindestens einer blanken Seite. Sie werden durch Abtropfen direkt aus der Glasschmelze hergestellt und reduzieren den Materialeinsatz in der Heißformgebung und in den anschließenden Bearbeitungsstufen auf ein Minimum. Aus Gründen des nachfolgenden Umformprozesses werden Gobs nur für

Gläser mit niedrigem Erweichungspunkt gefertigt. Im kontinuierlichen Prozess wird die Glasschmelze direkt aus dem Auslauf über einen Stutzen gefördert. Durch die Schwerkraft des austretenden Schmelzvolumens bewegt sich die zähe Glasmasse vertikal in Richtung einer planen Unterlage. Mit einem Scherensystem wird der flüssige Glasstrang getrennt. Man spricht von sogenannten freigetropften Gobs, die langsam erstarren und einen annähernd runden Querschnitt mit einer feuerblanken Oberfläche aufweisen. Durch die Ausflussmenge und den Takt des Scherensystems lassen sich die Masse bzw. das Volumen regulieren.

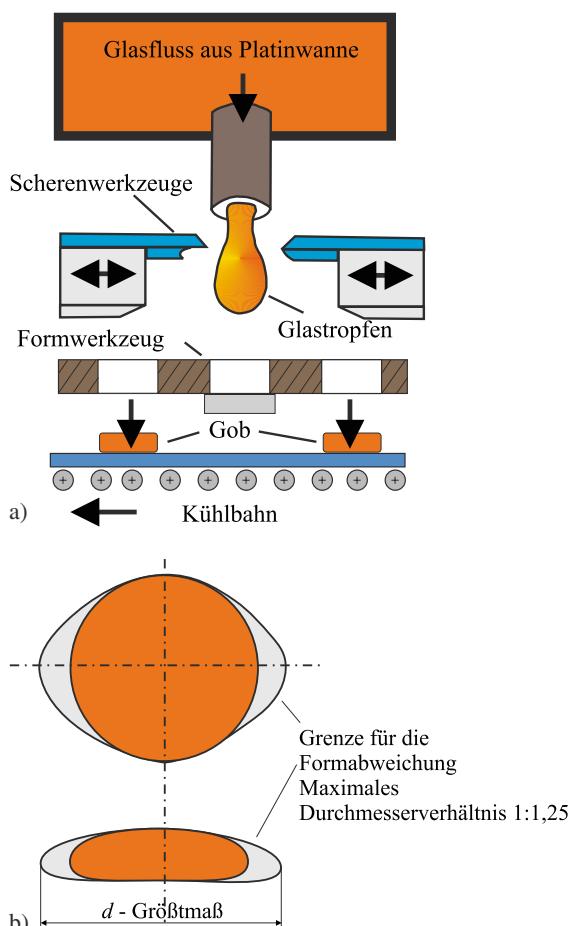


Abb. 5.1: Herstellung von Standardgobs. a) Anordnung zum Tropfvorgang, b) Formabweichung der Standardgobs

Heute werden sogenannte „Precision Gobs“ zur Herstellung von asphärischen Linsen in der Anwendung für Digitalkameras, Digitalprojektoren oder Camcorder in der Massenfertigung hergestellt. Die Precision Gobs wiegen zwischen 0,3 und 20 Gramm und werden in einem kontinuierlichen Prozess direkt aus der Schmelze gefertigt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Gewichtskonstanz und Qualität der feuerpolierten Oberflächen aus, so dass vor dem abschließenden Blankpressprozess keine Bearbeitung mehr erfolgen muss. Durch die hohe Genauigkeit ist ein Zentrierprozess nach der Formgebung ebenfalls nicht mehr nötig. Damit ist dieser Prozess – Urformen von Gobs und anschließendes Blankpressen – auch die wirtschaftlichste Methode, Asphären herzustellen.

Parameter	
Volumen:	250 mm <sup>3</sup> ... 5 000 mm <sup>3</sup>
Brechzahltoleranz:	± 0,0005
Toleranz ABBE-Zahl:	± 0,8 %
Volumentoleranz:	0,5 % ... 2 %
Durchmessertoleranz:	± 0,2 %



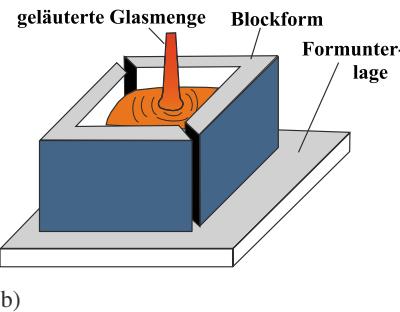
Abb. 5.2: Precision Gobs; Halbzeuge für asphärische Blankpresslinge /Hart04/

### 5.1.2 Herstellung von Glasblöcken

Das Urformen bzw. der Guss von optischen Glasblöcken erfolgt i. d. R. im diskontinuierlichen Betrieb (siehe auch Abschnitt 3.2.2). Geschmolzen wird traditionell in sogenannten **Häfen** (Schmelzgefäß) und aktuell mit deren Weiterentwicklung der **Wannenschmelze**. Für optisches Glas werden in **Schmelztiegeln** (oft platinbeschichtete Tiegel) oder in sogenannten **Tageswannen** meist kleinere Glasmengen erschmolzen. Typische Schmelzleistungen dieser Wannen liegen bei ca. 2 ... 10 Tonnen pro 24 Stunden.

Ablauf
1 Gemengeaufbereitung
2 Rauschmelzen
3 Läutern
4 Abstehen
5 Gießen
6 Kühlen
7 Entformen
8 Prüfen

a)



b)



c)

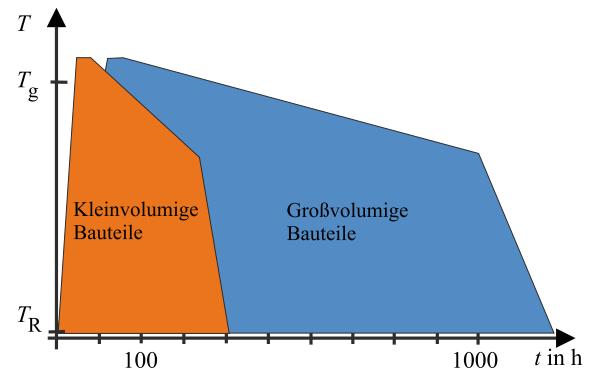
**Abb. 5.3:** Ablauf und Anordnung zum Guss von optischen Glasblöcken. a) Ablaufschritte, b) Glasform, c) Blockfertigung /Hart07/

Tageswannen erlauben auch das kurzfristige Wechseln von Glasarten; der Fachmann spricht vom „**Umschmelzen**“. Das eingelegte Glasgemenge wird geschmolzen und nach einem längeren Läuterungsprozess (Homogenisierung des erschmolzenen Materials) in Formen gegossen. Dem Läuterungsprozess kommt auch in der optischen Blockglasfertigung eine besondere Bedeutung zu, um Fehlerursachen wie Blasen, Schlieren und inhomogene Verteilungen der Bestandteile zu vermeiden. Für optische Gläser werden in dieser Phase auch Rührwerke eingesetzt und bei kleineren Glasmengen ein Unterdruck über der Glasbadoberfläche angelegt, um das Aufsteigen der Blasen zu fördern.

Nach dem Rauschmelz- und Läuterungsprozessschritt erfolgt das Abstehen bei niederen Arbeitstemperaturen, je nach Glas bei ca. 900 ... 1200 °C. Die Beseitigung der letzten noch vorhandenen kleinen Bläschen sowie das „Beruhigen“ des Glasmaterials führen zu einer weiteren Homogenisierung. Von besonderer Bedeutung für die Herstellung von optischem Glas ist das **temperatur-zeit-gesteuerte Abkühlen** der gegossenen Glasblöcke.

Dieser Vorgang bestimmt entscheidend die Qualität des Glases hinsichtlich mechanischer (Restspannungen) und optischer Parameter (Brechzahl). Die einzuuhaltenden Kühlkurven sind abhängig von der Glasart und dem Glasvolumen. Die Abbildung 5.4 illustriert den letztgenannten Zusammenhang.

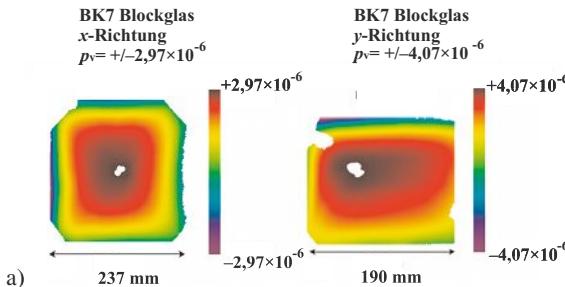
Eine zu schnelle Abkühlung würde die **Homogenität** durch Dichteänderungen und Spannungsdoppelbrechung verschlechtern.



**Abb. 5.4:** Abhängigkeit der Kühltemperatur von der Zeit nach /Hart07/

Die Prüfung der Glasblöcke nach dem Entformen erfolgt nach vielen Kriterien mit unterschiedlichen Prüf- bzw. Messmethoden. Ein wichtiges Kriterium zur Charakterisierung eines Glasblockes ist neben der Ermittlung von möglichen **Inhomogenitäten** (Schlieren und Blasen) auch die Bewertung der Brechzahlhomogenität sowie der Restspannungen im Glas.

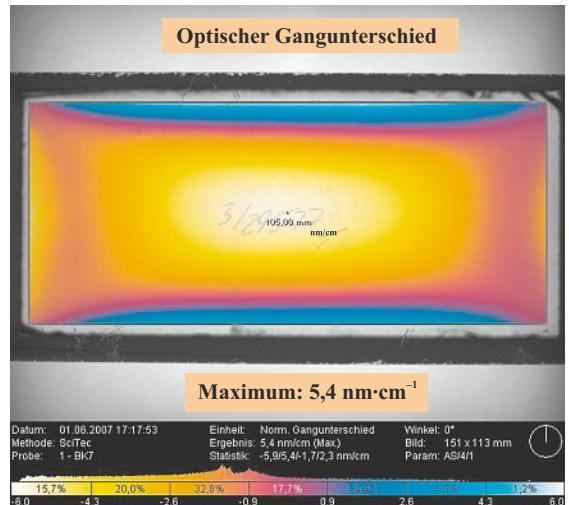
Für die Ermittlung von Brechzahl Schwankungen werden interferometrische Messverfahren eingesetzt. Die dabei ermittelte Wellenfrontabweichung kann in eine Brechzahl Schwankung umgerechnet werden /Jeda04/. Die Homogenitätsverteilung wird überwiegend durch das Gießformat vorgegeben. Diesbezüglich ist in Richtung der Randbereiche ein Ansteigen der Inhomogenitäten zu erwarten. Die Abbildung 5.5 zeigt einen Homogenitätsverlauf in der Falschfarbendarstellung für einen Glasblock aus BK7.



ISO-Klassen	Max. Brechzahlschwankung
0	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$
1	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$
2	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$
3	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
4	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$
5	$\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$

Abb. 5.5: Brechzahlhomogenitätsverlauf und Einteilung der ISO-Klassen /Jeda04/. a) Verlauf der Brechzahl in einem Glasblock, b) Einteilung der Klassen nach DIN ISO 10110-4

Die Festigkeit und die Bearbeitung von optischen Materialien werden stark durch die mechanischen Spannungen (auch als **Restspannungen** bezeichnet) beeinflusst, deren Größe ebenfalls sehr stark durch den Kühlprozess des Glases bestimmt wird. Die Überprüfung der Restspannungen sowie die Kontrolle von Spannungszuständen, die im weiteren Bearbeitungsprozess entstehen, ist unerlässlich und wird mit Methoden der Spannungsoptik (Polariskop oder Polarisometer) manuell oder automatisch durchgeführt. Mit polarisiertem Licht kann die Spannungsverteilung in transparenten Körpern untersucht werden, da mechanische Spannungen in Körpern eine Doppelbrechung bewirken. In Transmission entsteht in der Beobachtungsebene ein Bild von hellen und dunklen Streifen, die **Isochromaten** (stellen Linien mit konstanter Hauptspannungsdifferenz dar) und die **Isoklinen** (hier fällt die Richtung einer Hauptspannung mit der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes zusammen; sie repräsentieren die **Spannungstrajektorien** des Körpers).



a)

Zulässige optische Weglängendifferenz (OPD) pro cm Glasweg	Typische Anwendungen
< 2 nm · cm <sup>-1</sup>	Polarisationselemente
5 nm · cm <sup>-1</sup>	Präzisionsoptik Optik für Astronomie
10 nm · cm <sup>-1</sup>	Fotooptik Mikroskopoptik
20 nm · cm <sup>-1</sup>	Vergrößerungsgläser Sucheroptik
ohne Anforderung	Beleuchtungsoptik

b)

Abb. 5.6: Beispiele für die Spannungsdoppelbrechung.  
a) Spannungsbild eines Glasblockes BK7 /ilis07/,  
b) Toleranzen der Spannungsdoppelbrechung – DIN ISO 10110 Teil 2

Die Abbildung 5.6 illustriert den Spannungsverlauf in einem aufgetrennten Glasblock BK7. Das hier von der Firma ilis, Erlangen, verwendete StrainMatic-Polarimetersystem ermöglicht die farbcodierte Darstellung von Spannungswerten im Volumen eines Glaskörpers. Die automatische Vermessung des Prüflings erlaubt u. a. die Angabe des optischen Gangunterschiedes und der Spannungszustände. Der in Bild 5.6a gemessene Glasblock BK7 besitzt einen maximalen optischen Gangunterschied von  $5,4 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Dies entspricht einem Rohglas für die Präzisionsoptik.

### 5.1.3 Herstellung von Flachglas

Neben den vielfältigen Anwendungen von Flachgläsern im Hauswirtschafts- und Baubereich stellt das Urformen von Flachgläsern auch für optische Einsatzfälle eine wichtige Voraussetzung dar. Die vielfältigen Anwendungen reichen von einfachen Spiegelgläsern über Farbfilter bis hin zu Spezialdisplaygläsern. Auch aufgrund des prognostizierten enormen Entwicklungspotenzials der Solartechnik wird sich der Flachglasanteil weiter erhöhen.

Flachglas wird im Wesentlichen durch drei Verfahren hergestellt:

- A Gussverfahren** (meist teiltransparentes Glas)
- B Ziehverfahren** (transparentes Glas)
- C Floatverfahren** (transparentes Glas).

#### A Gussverfahren

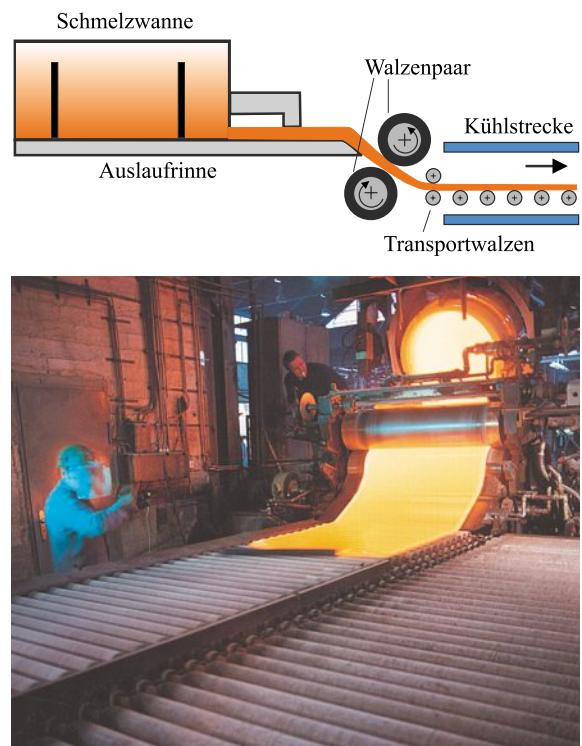
Das geschmolzene Glas läuft über den **Auslaufstein** der Schmelzwanne auf den **Maschinenstein** und wird im weiteren Verlauf zwischen zwei gekühlten Formwalzen geführt. Der einstellbare Walzenabstand bestimmt die Dicke des späteren Flachglases. Ein vorgelegter Schamotteschieber regelt die Menge des austretenden Glasflusses.

Nach erfolgter Formgebung durch die Walzen wird das Glas über Transportrollen oder -walzen in den Kühlofen gefördert. Zunächst wird das Glas auf eine bestimmte Temperatur über der Transformationstemperatur im Kühlofen erwärmt und im Anschluss über eine Temperatur-Zeit-Kurve langsam abgekühlt. So mit lassen sich Spannungen im Glasinnern weitestgehend vermeiden bzw. auf ein gefordertes Minimum reduzieren.

**Tab. 5.1:** Verfahrensschritte des Gussverfahrens

Ablauf Gussverfahren	
1	Gemenge schmelzen
2	Glasschmelze wird über eine Rinne aus dem Wannenbecken zur Walzeinrichtung geführt
3	Transport über zwei hohle, wassergekühlte Walzen, Einstellen der Glasdicke
4	Kühlung des Glases im Tunnelofen
5	Trennen

Am **kalten Ende** wird dann der Glasstrang auf Fertig- und Normmaße getrennt. Mittels mechanischem oder thermischem (lasergestütztem) Ritzen und anschließendem Brechen können computergesteuert die Glasposten flexibel in unterschiedliche Formate getrennt werden. Die Abbildung 5.7 illustriert schematisch und fotografisch das Gussverfahren.



**Abb. 5.7:** Prinzipdarstellung und Ablauf des Gussverfahrens /Scho06/

Gussgläser werden aufgrund ihrer Teiltransparenz (50 ... 80 %) vorwiegend für Spezialanwendungen eingesetzt, z. B. für Strahlenschutzgläser in der Medizintechnik und der Forschung.

#### B Ziehverfahren

Die Flachglasherstellung im **Ziehverfahren** gestaltet sich technisch wesentlich schwieriger als das zuvor beschriebene Gussverfahren. Die Verfahrensvarianten sind heute sehr vielgestaltig und bestimmen wesentlich die Qualität und die erreichbaren Glasparameter. Die bekanntesten Ziehverfahren sind:

### 1. FOURCAULT-Verfahren

(vertikales Ziehen mit einer Ziehdüse)

### 2. LIBBEY-OWENS-Verfahren

(horizontales Ziehen mittels Fangvorrichtung)

### 3. PITTSBURGH-Verfahren

(vertikales Ziehen über einen Schamotteleitkörper)

Nach dem ersten erfolgreichen Ziehversuch des Beligers FOURCAULT im Jahre 1905 mit einer auf dem flüssigen Glas schwimmenden etwa drei Meter langen Ziehdüse wurden Ziehverfahren stetig weiterentwickelt. Das PITTSBURGH-Verfahren vereint die Vorteile von FOURCAULT und dem LIBBEY-OWENS-Verfahren. Das Glasband wird dabei senkrecht nach oben gefördert. An der Aushebestelle der Glasschmelze wird ein Leitkörper aus Schamotte angebracht. Gekühlte Haltevorrichtungen übernehmen den Glasstrang. Mithilfe von Ziehwalzen wird das Glas durch einen ca. 12 Meter langen Kühlenschacht transportiert und am „kalten Ende“ zugeschnitten. Die Vorteile des Verfahrens liegen hauptsächlich in der hohen Ziehgeschwindigkeit, dem schnellen Wechsel auf andere Glasstärken und der erreichbaren Qualität.

Je nach vertikaler Ziehrichtung unterscheidet man das **Up-draw-** und **Down-draw-**Verfahren. Im Up-draw-Anordnungsprinzip (Abbildung 5.8) wird das Glas aus der Wanne in einem Ziehschacht nach oben gezogen.

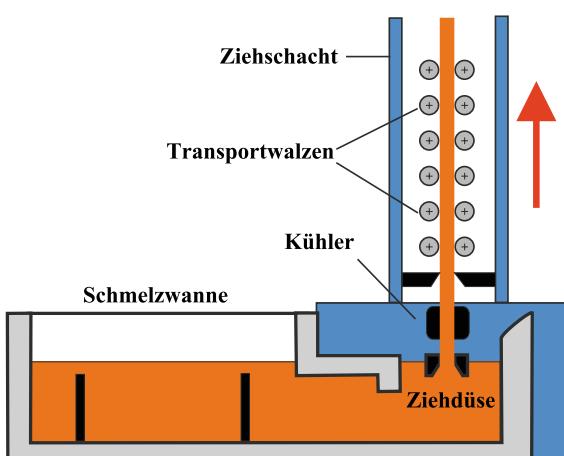


Abb. 5.8: Schematische Darstellung des Flachglasziehens im Up-draw-Verfahren

Im Down-draw-Verfahren kann das dünnste Flachglas bis zu einer minimalen Dicke von 30 µm, hergestellt werden. Der Zuschnitt am kalten Ende erfolgt bei diesen Glasstärken mit einem thermischspannungsinduzierten Laserverfahren (siehe Kapitel 7). Hergestellt werden mit dieser Technologie u. a. die Display- und Mikroskopiegläser /Pfae97/.

### C Floatverfahren

Im Jahre 1959 wurde von der Firma Pilkington das **Floatglasverfahren** zur Erzeugung von Flachgläsern entwickelt. Es ist auch heute noch konkurrenzloser Standard in der Produktion von hochwertigem Flachglas für den Bau- und Fahrzeugsektor sowie im optischen Bereich. Wesentliche Vorteile dieses Verfahrensprinzips liegen in der deutlich besseren Produktqualität bezogen auf die optischen Parameter, insbesondere die erreichbare Ebenheit, die Verringerung von Einschlüssen und Glasfehlern sowie die Homogenität und Transmission. Zudem konnte die Produktionsgeschwindigkeit um das fünf- bis zehnfache gegenüber den Ziehverfahren erhöht werden. Das aus der Schmelzwanne kommende flüssige Glas fließt mit einer Temperatur von ca. 1500 °C in ein Interface, wo der Läuterungsprozess sowie eine Beruhigung des Glasvolumens erfolgen. Mit ca. 1100 °C wird das beruhigte und homogenisierte Material über einen regulierbaren, schmalen Kanal auf das Zinnbad geführt (in einem Becken gefüllt mit flüssigem Zinn, Schmelzpunkt 232 °C), auf dem sich die leichtere Glasschmelze zu einem Band mit zwei parallelen Grenzflächen ausbreitet. Unter der Einwirkung der Schwerkraft und der Oberflächenenergie bildet sich eine völlig ebene Grenzfläche (**Badseite des Glases, Bottom Side**) aus. Bei dem abgebildeten Verfahren (Abbildung 5.9) sorgen sogenannte **Top-Roller** für eine variable Dicke des Glasbandes (siehe auch Abbildung 5.10). Die Atmosphäre in dem hermetisch abgeschlossenen Zinnbad besteht aus einem Stickstoff-Wasserstoff-Gemisch (88 ... 94 % N<sub>2</sub> und 6 ... 12 % H<sub>2</sub>), so dass eine mögliche Oxidation des flüssigen Zinns durch Kontakt mit Sauerstoff verhindert wird. Die zweite Glasseite (**Top Side**), der Atmosphäre zugewandt, wird durch eine Feuerpolitur geglättet. Nach dem Floatbad wird das **Glasband (Ribbon)** kontinuierlich mit Hilfe von **Lift-Out-Rollern** von der Zinnoberfläche abge-ge-

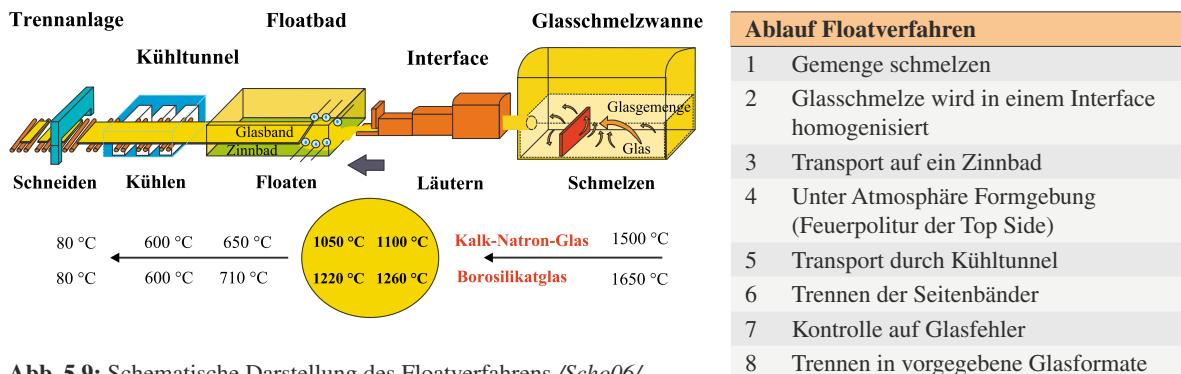


Abb. 5.9: Schematische Darstellung des Floatverfahrens /Scho06/

zogen und zur Abkühlung in den Kühlkanal weitertransportiert, an dessen Auslauf die Glastemperatur nahe der Raumtemperatur abgesunken ist. Der Glasschnitt in Tafeln von 6 m Länge und 3,21 m Breite (Standardmaß) erfolgt durch computergesteuerte Trennmaschinen oder Laserstrahlranlagen. Die abgetrennten Seitenstreifen werden im Recycling dem Gemenge wieder zugeführt /Pfae97/.

Die Glasdicke kann präzise eingestellt werden durch:

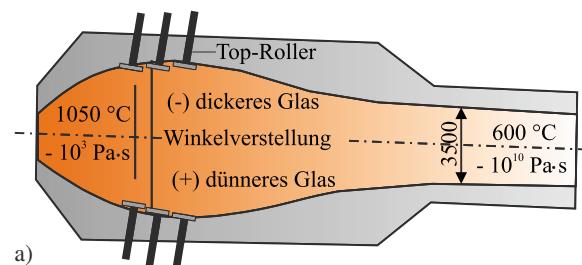
- Ziehgeschwindigkeit
- Anzahl, Geschwindigkeit und Winkel der Roller
- Leistungsverteilung der Floatbadheizer.

Allerdings muss bei der Änderung der Glasdicke in kleineren Abstufungen vorgegangen werden (ein Sprung von 28 mm auf 0,4 mm und umgekehrt ist nicht möglich).

Das beidseitige Eingreifen von Rollern bzw. Fendern in den noch flüssigen Glasrand des Bandes ermöglicht die Produktion von Flachglas in variablen Dicken zwischen 0,4 und 28 mm. Die Abbildung 5.10 zeigt das Wirkprinzip des Top-Roller-Verfahrens.

Insbesondere das chemisch hochresistente **Borosilikatglas** findet eine breite Verwendung. Es zeichnet sich darüber hinaus durch eine geringe thermische Ausdehnung und eine hohe Thermoschockbeständigkeit aus. Im optischen Bereich wird es vorzugsweise für Anwendungen der Beleuchtungstechnik als Filtermaterialien, für planparallele Platten, Displaygläser, Laserschutzgläser, fotovoltaische Anwendungen etc.

eingesetzt. Eine Zusammenstellung ausgewählter physikalisch-chemischer Eigenschaften fasst die Tabelle 5.2 zusammen.



a)

Top Rolling	Fender-Verfahren
– Glasdicke 0,4 ... 15 mm	– Glasdicke 15 ... 28 mm
– Gezackte Räder	– Carbon-Randleisten, die nicht benetzen
– Positive Winkeleinstel- lung bis 1 mm	– Vermeiden des Auf- spreitens der Schmelze
– Negative Winkeleinstel- lung bis 15 mm	– Aufwendiges Verfahren

b)

Abb. 5.10: Variable Glasdickeneinstellung und Gegenüberstellung typischer Methoden /Scha90/. a) Top-Roller-Anordnung, b) Vergleich der Verfahren