

12 / 81

Mch P, 14. Dezember 1981
Bearb.: Dr. Falckenberg
(FL OPT 33)
Dr. Föll
(B DH SMS SME)

Verteiler

Hr. Dr. Grabmaier, FL OPT 3/B DH SMS SME
Hr. Dr. Aulich, FL OPT 33
Hr. Freienstein, FL OPT 33
Fr. Bernewitz, B DH SMS SME
Hr. Geim, B DH SMS SME
Hr. Hoyler, B DH SMS SME
Hr. Windisch, B DH SMS SME

vertraulich

N o t i z

über mögliche Vorgehensweisen beim S-Web

Inhalt: Im folgenden wird ein systematischer Überblick über denkbare Beschichtungsanordnungen und Kristallisationsarten beim S-Web-Bandziehen gegeben. Überlegungen zur Auswahl eines Verfahrens führen nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse zur Kombination von kontinuierlicher und Maschenkristallisation, wobei die Beschichtungsanordnung so gewählt werden kann, daß beide Arten der Kristallisation gleichzeitig eintreten oder aufeinander folgen.

I. Systematik der Beschichtungsanordnungen

.1 Zur systematischen Darstellung der Beschichtungsanordnungen in den Abbildungen 2 - 37 wird folgende Einteilung gewählt:

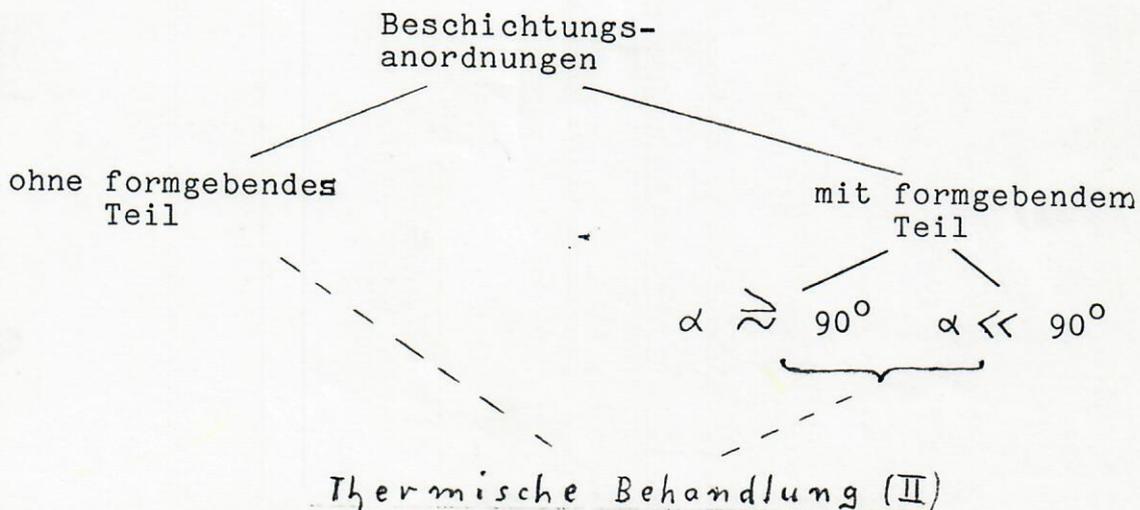


Fig. 12
Bei den Verfahren mit formgebendem Teil wird als Unterscheidungsmerkmal die Größe des Benetzungswinkels α , der sich zwischen Si-Schmelze und Formmaterial einstellt, herangezogen. Ist $\alpha \gtrsim 90^\circ$ (z.B. bei Quarz), so ist die Spaltöffnung selbst bestimmend für die Form des Schmelzenmeniskus, der zur Kristallisationsfront überleitet. Ist $\alpha \ll 90^\circ$ (z.B. bei Graphit), so ist die äußere Umrandung der Ebene, in welcher sich die Spaltöffnung befindet, maßgebend. Bei solchen Materialien kann zusätzlich die Kapillarkraft für den Schmelzentransport genutzt werden *. Für die Form des Meniskus ist weiterhin von Bedeutung die Symmetrie der Form relativ zur Bundebe; dementsprechend wird in der Systematik noch zwischen symmetrischen und asymmetrischen Formteilen unterschieden. Generell werden sowohl Anordnungen mit senkrechtem als auch mit horizontalem und schrägem Bandabzug aufgeführt.

.2 Ziehen ohne Form

Die Abbildungen 2 - 4 zeigen Möglichkeiten, ein Gewebe senkrecht aus einer Schmelze zu ziehen, Abbildungen 7 - 10 einige technische Ausführungsmöglichkeiten. Der Ziehwinkel kann bei den meisten Anordnungen variiert werden. Horizontales Ziehen zeigen die Abbildungen 5, 6 und 11; eine gleichmäßige Beschichtung würde wahrscheinlich ein geringfügiges Abweichen von der Horizontalen erfordern (Ablaufen bzw. Zurückbleiben von am Band hängenden Tropfen).

* Bemerkung: Beim EFG-Verfahren, gekennzeichnet durch ein Formmaterial mit $\alpha \ll 90^\circ$, werden 2 Effekte genutzt: 1) Die Schmelze wird durch eine Kapillare dem Kristallisationsgebiet zugeführt 2) Die Lippen, d.h. die äußere Umrandung der horizontal liegenden Ebene, in welche die Kapillare mündet, dienen zur Formgebung des entstehenden Bandes. Beim Stepanov-Verfahren, gekennzeichnet durch ein Formmaterial mit $\alpha \gtrsim 90^\circ$, dient die Spaltöffnung als formbestimmendes Teil; hier ist der Kapillaranstieg ≈ 0 und die Schmelze muß dem Kristallisationsgebiet durch Anwendung von Druck oder mittels einer geeigneten Mechanik zugeführt werden. In beiden Fällen ist die Querschnittsform des entstehenden Bandes dem formgebenden Teil ähnlich; die Banddicke hängt von der Ziehgeschwindigkeit ab (Abb. 1).

Fußnote zur Benetzung

Für fest-flüssige Grenzflächen ist neben der Oberflächenspannung der Benetzungswinkel von Bedeutung. Der Benetzungswinkel bestimmt

1. die Gestalt der Flüssigkeitsoberfläche längs der Umrandung,
2. die Benetzbarkeit. Benetzungswinkel 0° bedeutet, daß die Flüssigkeit sich über die feste Unterlage ausbreitet ("spreitet") und sie benetzt. Benetzungswinkel 180° zeigt vollständige Nichtbenetzbarkeit an (Abb. 12a),
3. die Haftarbeit, d.h. diejenige Arbeit, die aufzuwenden ist, um 1 cm^2 Flüssigkeitsoberfläche entgegen der Wirkung der zwischenmolekularen Kräfte vom unterliegenden Festkörper abzulösen. Es ist

$$\left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right. s_f = \sigma_f (\cos \alpha + 1)$$

(σ_f : Oberflächenspannung der Flüssigkeit),

4. die selektive Anreicherung gelöster Stoffe an Grenzflächen (Adsorption). Die sich dabei im Gleichgewicht einstellende Überschußkonzentration n_g des adsorbierten Stoffes ist, wenn seine Konzentration in der Lösung n_i ist, eine Funktion von

$$\frac{\sigma_f \cdot d \cos \alpha}{d n_i}$$

5. ponderomotorische Wirkungen in Flüssigkeitsoberflächen. Z.B. werden kleine Gegenstände, die auf einer Flüssigkeit schwimmen, je nach der Größe des Randwinkels entweder zum Rand des Gefäßes oder in die Mitte der Oberfläche

getrieben. (Beispiel: Dichte Teppiche von Pflanzen auf Wasser, die aufgrund der durch den Randwinkel zwischen Blättern und Wasser verursachten ponderomotorischen Kräfte aufeinander zutreiben.)

Der Benetzungswinkel kann durch folgende Einflüsse verfälscht werden:

1. Kontamination

- durch Verunreinigung der Oberfläche, insbesondere adsorbierte Gas- oder Wasserschichten
- durch Reaktionsprodukte, die an der Grenzfläche flüssigfest entstehen.

2. Oberflächenunebenheiten

- unregelmäßige Rauigkeiten, Porosität
- Riefen oder Rillen mit Kapillarwirkung
- Hohlräume, z.B. in Faserbündeln.

3. Kristalline Ordnung des Festkörpers

- amorpher Zustand
- kristalliner Zustand, ungeordnet
- Kristallorientierung (Abb. 12b).

Die meisten dieser Einflüsse machen sich in einer Hysterese des Benetzungswinkels bemerkbar. Als Maß der Hysterese dient der Unterschied zwischen Vorrück- und Rückzugswinkel (siehe Abb. 12c und d). Das Verschwinden dieses Unterschiedes ist das Kriterium dafür, daß man echte Gleichgewichtsbenetzungswinkel mißt. - Die generelle Ursache der Hysterese ist ein "Reibungswiderstand".

Ein Spezialfall eines Benetzungswinkels ist der Meniskuswinkel, den ein Festkörper mit seiner eigenen Schmelze bildet (für Si 11°). Die Existenz dieses Winkels bedeutet z.B., daß ein Kristall nur dann mit konstantem Querschnitt aus einer Schmelze gezogen werden kann, wenn längs der Grenzlinie flüssig-fest dieser charakteristische Winkel eingehalten wird. Das gilt unabhängig vom Ziehverfahren.

Vorteile: Die Anordnungen sind einfach. Die Schmelzpegelregelung ist verhältnismäßig unkritisch. Beim horizontalen Ziehen muß das Gewebe nicht durch die Schmelze gezogen werden.

Nachteile: Der Meniskus kann nicht variiert werden. (Die Form in Abb. 3 dient nicht zur Gestaltung des Meniskus sondern soll verhindern, daß die Schmelze ausläuft). - Beim vertikalen Ziehen besteht auch bei Ausnützung der Kapillardepression die Gefahr des Ablaufens der Schmelze durch den Spalt entlang dem Gewebe; das Verhalten der Rollen bzw. Rutschen in der Schmelze ist nicht bekannt.

.3 Ziehen mit Form

.3.1. Formmaterial mit schlechter Benetzung, $\alpha \approx 90^\circ$

Die Abbildungen 13 - 17 zeigen Anordnungen mit symmetrischer und asymmetrischer Form für vertikales und horizontales Ziehen, Abb. 18 eine technische Ausführung. Die Meniskusform kann durch Änderung der Spaltbreite variiert werden; Asymmetrie der Meniskusform kann in einem symmetrischen Formteil dadurch erreicht werden, daß das Gewebe außerhalb der Symmetrieebene des Spaltes läuft (Abb. 15).

Vorteile: Es können reine Quarzanordnungen erprobt werden.

Nachteile: Asymmetrische Formen wie in Abb. 14 gezeigt, dürften nicht zu stabilen Meniskusformen führen. - Die Lage des Schmelzpegels in den Formen ist kritisch; die Nachführung der Schmelze ist kompliziert, weil kein wesentlicher Kapillaranstieg vorhanden ist.

.3.2. Formmaterial mit guter Benetzung, $\alpha \ll 90^\circ$

Senkrechtes Ziehen

Abb. 19, 20, 21 zeigen symmetrische, Abbildungen 22 - 26

asymmetrische Formen. Die Form Abb. 22 ist bezüglich der Lippenbreite, Form Abb. 23 bezüglich der Höhe, Form Abb. 24 bezüglich Lippenbreite und Höhe asymmetrisch. Abb. 25 zeigt eine Form mit abgerundeter asymmetrischer Kante, Abb. 26 eine nur aus einer Hälfte bestehenden Form, bei welcher die Kapillarkraft zwischen Gewebe und Wand genutzt wird. Technische Ausführungen zeigen die Abbildungen 33 - 37.

Vorteile: Die Meniskusform läßt sich innerhalb der durch die Benetzungswinkel Formmaterial/Schmelze und Schmelze/Kristall gegebenen Grenzen variieren. - Asymmetrische Formen erleichtern asymmetrische Kristallisation. - Die Schmelzpegelhöhe ist nicht besonders kritisch, weil Kapillarkräfte für die Heranführung der Schmelze benützt werden können.

Nachteile: Man ist an Graphit oder SiC/C-Verbundwerkstoffe gebunden. - Herstellung, Plazierung und Verbrauch der Formen bedeuten Mehraufwand gegenüber I.2.

Ziehen unter einem Winkel

Abbildungen 27 - 32 zeigen Anordnungen mit schrägem oder horizontalem Abziehen des Gewebes. Bei schrägem Abziehen kann das Band durch eine Form mit horizontal liegenden Lippen gezogen werden; die Lippen können sich noch in Höhe und Breite unterscheiden (Abb. 27). Besondere Ausführungsformen sind schräg liegende Formteile, die nur aus einer Hälfte bestehen. Die Schmelze wird durch Kapillaren hochtransportiert und vom Gewebe mitgenommen (Abbildungen 28-31).

Zusätzliche Vorteile: Die Umlenkrolle muß nicht in der Schmelze deponiert werden bzw. das Gewebe nicht durch den Tiegelboden gezogen werden (Ausnahme: das in Abb. 29 dargestellte Verfahren).

II. Thermische Behandlung beschichteter Gewebe

.1 Kristallisation

Auf das Füllen der Maschen mit Si-Schmelze folgt die Kristallisation, deren Geschwindigkeit hinsichtlich Richtung und örtlicher Verteilung in der Versuchsanordnung variierbar sein muß. Die hierzu erforderliche Temperaturkontrolle kann mittels zusätzlicher Heizung, durch Kühlung mittels Anblasen (Abb. 40) oder durch Anbringen von Kühlplatten oder durch Strahlungsabschirmung (Abb. 38 und 39) erfolgen. Abb. 41 zeigt eine Kombination von Heizung und Kühlung zur Erzeugung eines längs des Bandes variierbaren Temperaturgradientenfeldes. Bei Verwendung von Formen können Lippen oder Spalthälften asymmetrisch ausgebildet und die Strahlungsverluste beeinflußt werden (Abb. 23). Bei Störungen durch Konvektionsströme in der Schmelze kann versucht werden, die Schmelze durch Kapillaren zur Kristallisationsfront zu transportieren; bei entsprechend hoher Wärmekapazität der Kapillarwürfel (große Masse) sollten kurzzeitige Temperaturschwankungen ausgeglichen werden können (siehe Abb. 31). Bei speziellen Formen der Kristallisationsfront (siehe z.B. Abb. 42c) ist eine Temperaturkontrolle über eine Dickenmessung des Bandes (etwa über Infrarotinterferenz) unerlässlich.

.2 Abbau von Spannungen

Eingebaute Spannungen können nur sehr schwer wieder beseitigt werden; es ist zweckmäßig, schon die Kristallisationsbedingungen so zu optimieren, daß Spannungen nicht entstehen können. Das Auftreten elastischer Spannungen bei relativ niedrigen Temperaturen kann^{x)} durch langsames Abkühlen, also die Benutzung von Nachheizern oder einer guten Isolation, vermieden werden.

^{x)} wenn es zu Sprüngen führt,

III. S-Web-Kristallisation

Beim Ziehen des S-Web wird eine kritische Ziehgeschwindigkeit beobachtet. Unterhalb dieser Ziehgeschwindigkeit findet kontinuierliche, oberhalb Maschenkristallisation statt.

Im folgenden wird zunächst anhand konventioneller Bandziehverfahren die bei kontinuierlicher Kristallisation maximal erreichbare Ziehgeschwindigkeit diskutiert; anschließend wird die Maschenkristallisation behandelt.

.1 Kontinuierliche Kristallisation

Es gibt zwei prinzipiell unterschiedliche konventionelle Bandziehverfahren, das vertikale Bandziehen (VBZ) und das horizontale Bandziehen (HBZ). Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Verfahren besteht nicht in der unterschiedlichen Ziehrichtung, sondern in der Art wie die Kristallisationswärme freigesetzt und abgeführt wird. Das zeigen die Abb. 42a und b. Beim VBZ sind Ziehrichtung und Kristallisationsrichtung parallel, beim HBZ dagegen weicht die Kristallisationsrichtung erheblich von der Ziehrichtung ab. Zwischen Kristallisationsgeschwindigkeit V_K , Ziehgeschwindigkeit V_Z und Neigungswinkel γ des Bandes gegen die Schmelze besteht die Beziehung $V_Z = V_K / \sin \gamma$; so ist z.B. für ein Verhältnis $V_Z : V_K = 10 : 1$ der Winkel $\gamma = 6^\circ$. Der kleine Neigungswinkel hat zur Folge, daß bei gleicher Ziehgeschwindigkeit die pro Einheit der Kristallisationsfläche freiwerdende Kristallisationswärme geringer ist und ihre Abführung (durch Abstrahlung) auf kürzerem Wege erfolgt, als bei VBZ. Prinzipiell kann diese Art der Kristallisation auch vertikal erfolgen. Abb. 42c zeigt eine denkbare vertikale Version des "horizontalen" BZ.

Abb. 43a und b zeigen die aus der unterschiedlichen Wärmeabführung folgende unterschiedliche Abhängigkeit der Banddicke von der maximalen Ziehgeschwindigkeit für VBZ und HBZ. So ist z.B. bei einer Banddicke von 100 μm die max. Ziehge-

schwindigkeit bei VBZ ≈ 9 cm/min, bei HBZ ≈ 120 cm/min.

Tab. 1 zeigt thermische Charakteristika. Im Vergleich zum VBZ hat das HBZ zwei Nachteile, nämlich die in der Schmelze vorhandene Konvektionsströmung, die zu Temperaturschwankungen führt und die schwierige Kontrolle der Keilform des Bandes im Bereich der Kristallisationsfront. (Praktisch sind bisher beim HBZ ~~nur~~ Bandstücke bis zu einer Länge von (75 cm) bei Geschwindigkeiten bis zu (60) cm/min erhalten worden).³⁰⁻⁴⁰ In Versionen der in Abb. 42c gezeigten Art dürfte die Störung durch Konvektionsströmung wegen der geringen Dicke der Schmelze, die durch Kapillarkräfte herangeführt wird, weitgehend vermieden werden.

Den beschriebenen konventionellen Bandziehverfahren ist gemeinsam, daß bei Überschreitung der einer bestimmten Banddicke zugeordneten Ziehgeschwindigkeit das Band dünner wird und bei weiter zunehmender Geschwindigkeit schließlich abreißt. Beim S-Web hingegen wird die in den Maschen befindliche Schmelze mittransportiert; mit zunehmender Ziehgeschwindigkeit wird die kontinuierliche Kristallisation von der Maschenkristallisation abgelöst.

.2 Maschenkristallisation

Reine Maschenkristallisation tritt dann ein, wenn nach Verlassen der Meniskuszone innerhalb der Gewebemaschen noch keine Kristallisation stattgefunden hat. In diesem Zustand ist die Gestalt der Flüssigkeit in der Masche nur durch die Netzgeometrie, das in der Masche befindliche Si-Volumen und die Oberflächenspannung bestimmt. Die Lamelle ist im allgemeinen zur Netzebene symmetrisch; auf den Stegen wird sich nur wenig Schmelze befinden, weil dünnere Flüssigkeitsschichten zugunsten angrenzender dicker Schichten entleert werden (Oberflächenspannungseffekt). Die Kristallisation wird wegen der günstigen Keimbildung stets von der Maschenumrandung ausgehen. Jedoch werden im folgenden je nach der

Vorzugsrichtung der Kristallisationsgeschwindigkeit relativ zur Ziehrichtung 3 Fälle unterschieden: Vorzugsrichtung parallel, unter einem Winkel und senkrecht zur Ziehrichtung.

.2 1 Vorzugsrichtung der Kristallisationsgeschwindigkeit parallel zur Ziehrichtung

Innerhalb einer Masche werden im Laufe der Kristallisation die in Abb. 44a - e dargestellten Stufen durchlaufen. Ursache der Formänderung, die schließlich zu der bekannten Tropfenbildung führt, ist der von Null verschiedene *Meniskus* Winkel zwischen flüssigem und festem Si ($\alpha = 11^\circ$). Die Einstellung dieses Winkels bedingt, daß mit fortschreitender Erstarrung die kristallisierende Lamelle dünner wird. Die anfängliche Verdünnung führt zu einem Zusammenschieben der Restschmelze zu einem großvolumigen Tropfen, der schließlich in der Endphase mit spitzen Auswüchsen erstarrt.

.2 2 Vorzugsrichtung der Kristallisationsgeschwindigkeit unter einem Winkel zur Ziehrichtung

Innerhalb einer Masche werden im Laufe der Kristallisation die in Abb. 45a - e dargestellten Stufen durchlaufen. Die Komponente der Kristallisationsgeschwindigkeit senkrecht zur Ziehrichtung bewirkt bei ausreichender Größe, daß die gegen Ende der Kristallisation noch vorhandene Restschmelze nicht mehr symmetrisch zur Bandebene erstarrt; der entstehende Auswuchs wird dann ganz auf eine Seite des Bandes verschoben.

.2 3 Vorzugsrichtung der Kristallisationsgeschwindigkeit senkrecht zur Ziehrichtung

Die Kristallisation ist in den Abb. 46a - e dargestellt. Auf einer Seite der Flüssigkeitslamelle bildet sich eine dünne kristalline Schicht, die wegen der günstigen Keimbildung von der Maschenumrandung ausgeht. Die Oberfläche der Schmelze ist auf dieser "kalten" Seite eben, weil die

Oberflächenspannung hier größer als auf der "warmen" Seite ist. Hat die Kristallisationsfront die Größe der Maschenfläche erreicht, so schreitet sie senkrecht zur Ziehrichtung vorwärts. Schließlich ist der ganze Mascheninhalt gleichmäßig erstarrt, die Oberfläche beidseitig eben.

IV. Überlegungen zur Auswahl eines S-Web-Verfahrens

.1 Kombination von kontinuierlicher und Maschenkristallisation

An das S-Web sind folgende Forderungen zu stellen:

- 1 - Vollständige Überschichtung aller Stege mit Si, Dicke $\geq 20 \mu\text{m}$
- 2 - Verunreinigungen im wesentlichen nur auf der systemabgewandten Seite
- 3 - Ebene Oberflächen
- 4 - Wenig Korngrenzen, Kolumnarstruktur
- 5 - Ziehgeschwindigkeit $\approx 1 \text{ m/min}$

Die in Abschnitt III beschriebenen Kristallisationsarten wurden nach diesen Kriterien beurteilt. Wie Tab. 2 zeigt, erfüllt nach dem derzeitigen Kenntnisstand keine Kristallisationsart sämtliche Forderungen. Dagegen könnten Kombinationen von kontinuierlicher und Maschenkristallisation zu günstigen Ergebnissen führen. Als Beispiele für die Realisierung einer solchen Kombination wurden aus Abschnitt I Beschichtungssysteme gewählt, die mit asymmetrischer benetzender Form arbeiten (Abb. 47a,b,c). In jedem Fall hat der kontinuierlich erstarrende Teil des S-Web eine schräge Kristallisationsfront (siehe Abb. 42b und c) und eine sehr geringe Dicke von $\lesssim 100 \mu\text{m}$, so daß hohe Ziehgeschwindigkeiten möglich sind. Die kontinuierlich kristallisierende Schicht dient zur Stegüberschichtung und als nahezu einkristalline Keimschicht. Die Maschenkristallisation bringt das eigentliche Dickenwachstum und führt zu mecha-

nisch stabilen Bändern. Die Kristallisationsrichtung liegt senkrecht zur Ziehrichtung, so daß die Verunreinigungen in der zuletzt kristallisierenden, der Keimseite abgewandten Schicht zusammengedrängt werden. Mit Anordnungen dieser Art sollten sämtliche an das S-Web gestellten Bedingungen erfüllbar sein. Gegenüber dem reinen HBZ hat man den Vorteil weitaus größerer Stabilität des Verfahrens, weil auch beim Abreißen der (kritischen) kontinuierlichen Kristallisation weiterhin Maschenkristallisation erfolgt und Neubildung der kontinuierlich wachsenden Schicht nach Wiedereinstellung des thermischen Profils möglich ist. Dazu kommt der Vorteil, den die Zuführung der Schmelze über Kapillaren bringt: Man wird frei von den beim HBZ sehr kritischen Temperaturschwankungen, die auf Konvektion in der Schmelze zurückzuführen sind. Der Nachteil dieser Verfahren liegt in der Schwierigkeit, den schrägen Ansatz der Kristallisationsfront und die geringe Banddicke zu kontrollieren.

.2 Weitere Möglichkeiten

.2 1 Horizontales Ziehen, reine Maschenkristallisation

In Tab. 2 wurde angenommen, daß die nicht ausreichende Stegabdeckung bei hohen Ziehgeschwindigkeiten dem S-Web-Verfahren aufgrund der wirksamen Kapillarkräfte inherent sei. Es ist möglich, daß diese Annahme bei anderen Materialien als reinem Graphit oder bei horizontalem Ziehen nicht gültig ist. Abb. 48 zeigt die Möglichkeit einer kritischen Maschenfüllung beim horizontalen Ziehen, bei welcher gerade soviel Schmelze an der Unterseite des Bandes hängt, daß die Stege bedeckt sind, aber noch nicht soviel, daß sich ein Tropfen bildet.

.2 2 Doppelbeschichtungsverfahren

Der entscheidende Nachteil der reinen Maschenkristallisation, nämlich die Nichtbeschichtung der Stege, kann auch umgangen werden, indem in einem 2-Stufen-Verfahren eine zweite Si-Schicht aufgebracht wird. Diese kann konzeptionell entweder aus einem Tiegel durch Hilfe geeigneter Kapillardüsen, oder mit zwei getrennten Tiegeln erreicht werden (Abb. 49a,b).

Selbstverständlich kann ein Doppelbeschichtungsverfahren auch für horizontales Ziehen projektiert werden. Erhebliche Probleme sind jedoch zu erwarten. So muß, z.B., das durch die erste Beschichtung erzeugte S-Web zum größten Teil wieder aufschmelzen (um Oberflächenkontamination zu beseitigen), darf jedoch nicht völlig durchschmelzen. Abb. 50 zeigt mögliche Kristallisationsverläufe. Die Kristallisationsfront in Abb. 50a wäre zwar wünschenswert, dürfte aber nicht sehr stabil sein. In keinem Fall dürfte eine Abdrängung der Verunreinigungen an die Außenseite einfach zu erreichen sein.

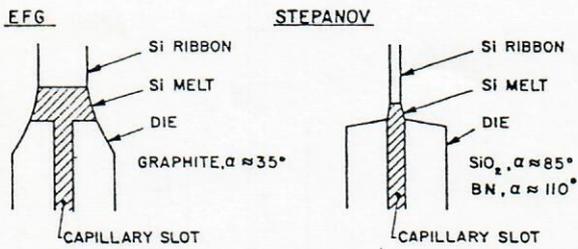


Fig. 1. Schematic representation of silicon ribbon growth in the EFG and Stepanov processes. α is the contact angle of the die material with the molten silicon.

Abb. 1

Table 1

Comparative thermal characteristics of HRG and VRG

Characteristic ^{a)}	HRG	VRG
(1) Latent heat removal	+	-
(2) Convective heat transport in solid	+	-
(3) Post-growth thermal stress relief	+	-
(4) Heat flux from melt	-	+
(5) Thickness (temperature) control	-	+

^{a)} + is superior, - is inferior; items (1)-(4) relate directly to growth rate.

Tabelle 1

	Stegüber- schichtung	Verun- reinigung	Ober- fläche	Korn- struktur	Ziehge- schwindigkeit
Kontinuierliche Kristallisation					
$V_K // V_Z$	+	-	+	+	-
$V_K \perp V_Z$	+	-	+	+	+
Maschen- kristallisation					
$V_K // V_Z$	-	-	-	+	+
$V_K \nabla V_K$	-	+	- +	+	+
$V_K \perp V_Z$	-	+	+	+	+

Tabelle 2: Beurteilung verschiedener Kristallisationsarten (Kristallisationsart brauchbar +, nicht brauchbar -). Stand Dez. 81.

Ziehen ohne Form

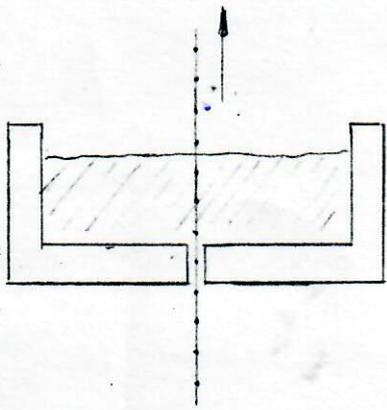


Abb. 2

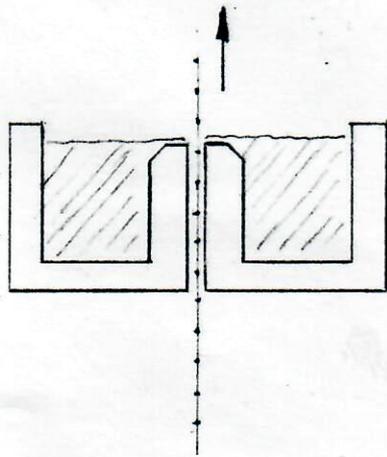


Abb. 3

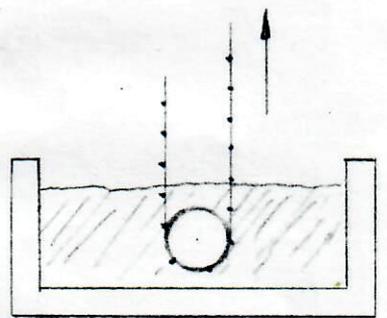


Abb. 4



Abb. 5

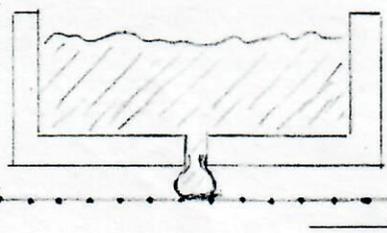


Abb. 6

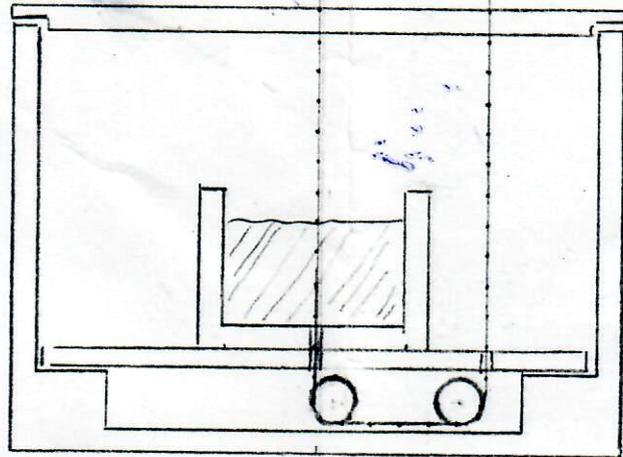


Abb. 7

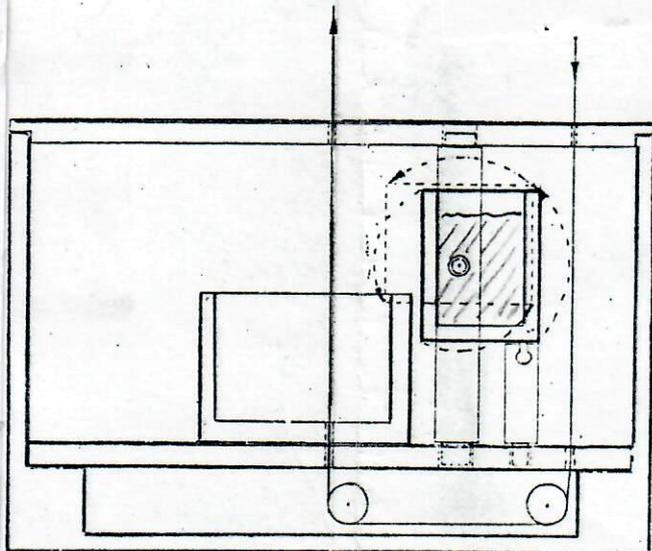


Abb. 8

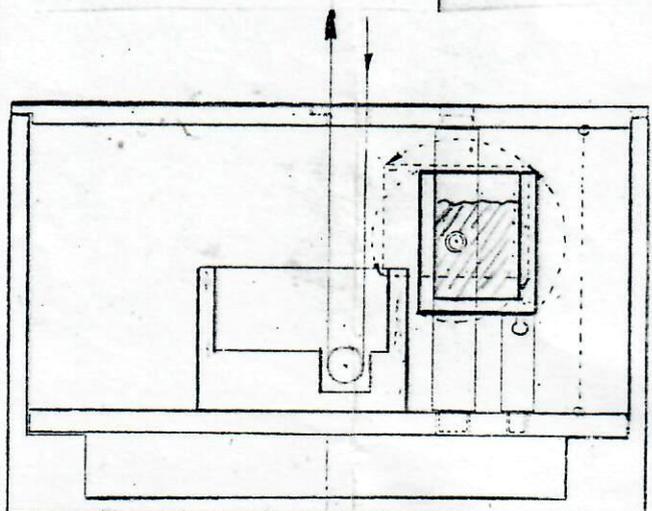


Abb. 9

7

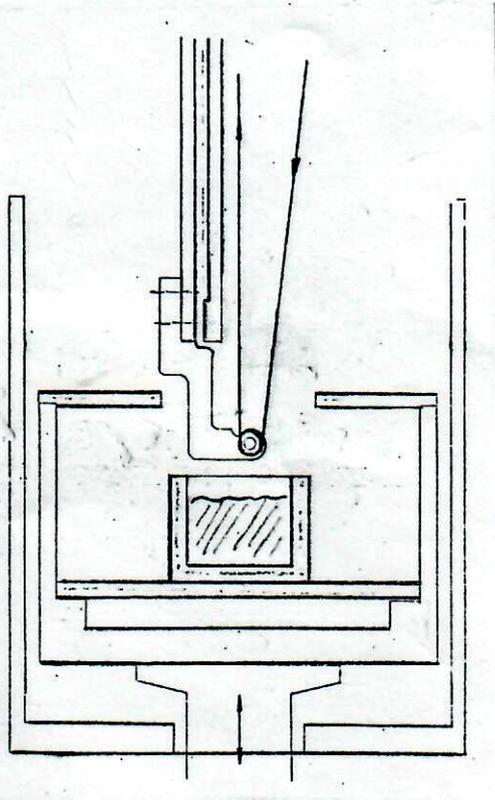


Abb. 1

Gewebe
tangiert

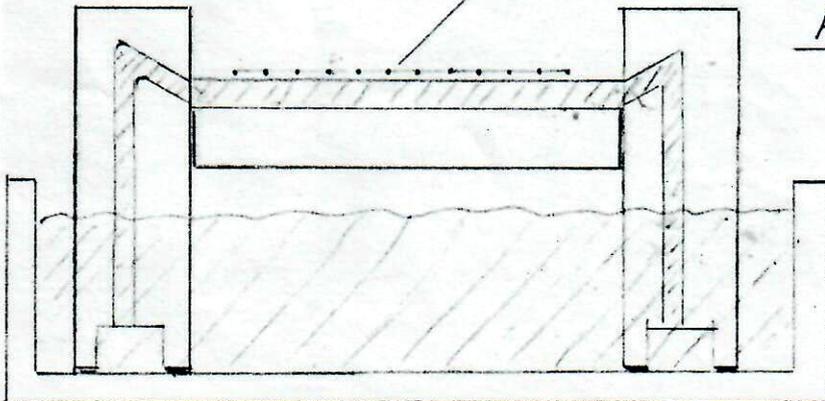


Abb. 11
(+ 12)

Benetzungswinkel

(\equiv Randwinkel)

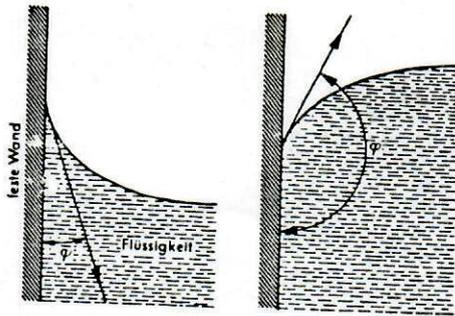
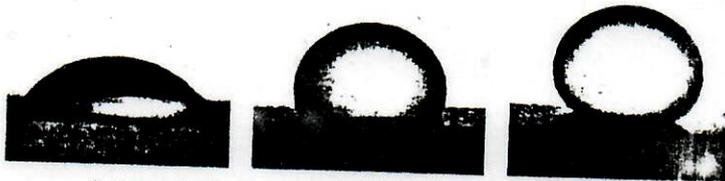


Abb. 12 a

Ist der Randwinkel 0° , so spricht man von einer vollkommen benetzenden Flüssigkeit, die Flüssigkeit „kriecht“ an der Gefäßwand hoch, z. B. Alkohol in einem Glasgefäß. Die Oberfläche einer nicht benetzenden (unvollkommen benetzenden) Flüssigkeit steht an den Wänden niedriger als in der Mitte (Randwinkel $\varphi > 90^\circ$).



Anisotropie des Randwinkels auf verschiedenen Flächen eines Alauns

Abb. 12 b



Randwinkelhysterese am schräg liegenden Tropfen

Abb. 12 c



Aussaugen liegender Tropfen mit und ohne Hysterese

Abb. 12 d

Tabelle 3 Benetzungswinkel

Si-Schmelze/Graphit	20-35°
" /Quarz	85°
" /Bornitrid	110°
" /Si-Einkristall für konstanten Kristallquerschnitt (Ziehprozess)	11°

Ziehen mit Form, $\alpha \geq 90^\circ$

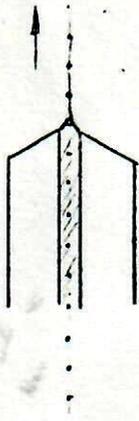


Abb. 13

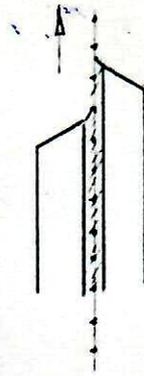


Abb. 14

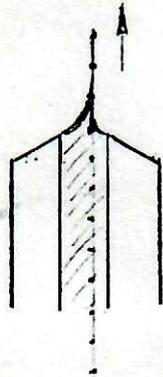


Abb. 15

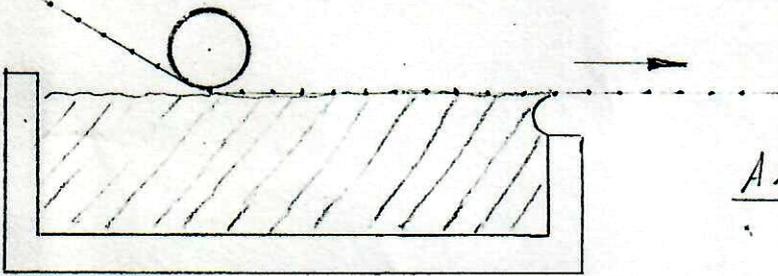


Abb. 16

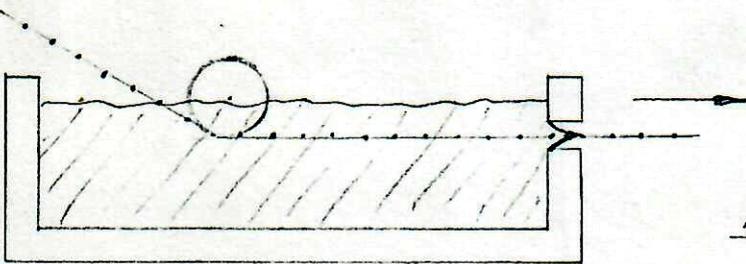


Abb. 17

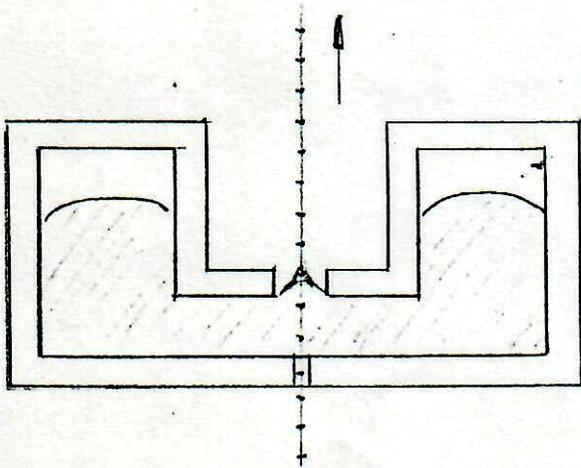


Abb. 18

Ziehen mit Form
 $\alpha \ll 90^\circ$

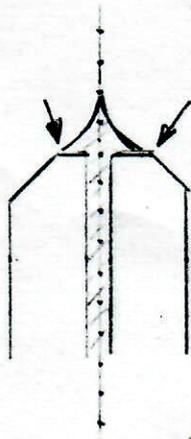


Abb. 19

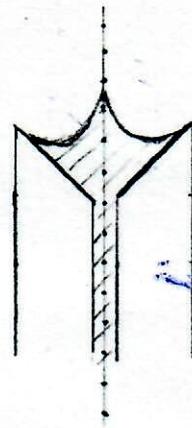


Abb. 20

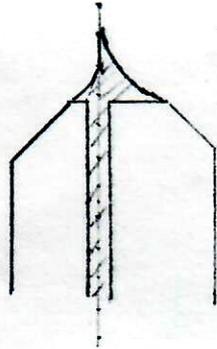


Abb. 22

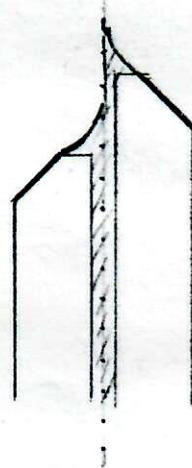


Abb. 23

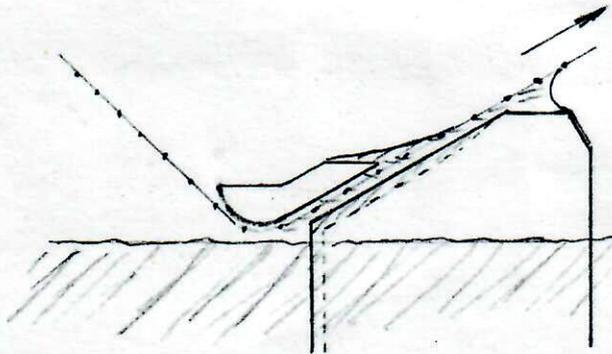


Abb. 27

Abb. 30



Kombination von
 Materialien mit
 $\alpha \geq 90^\circ$ und $\alpha \ll 90^\circ$

Ziehen mit Form

$\alpha \ll 90^\circ$

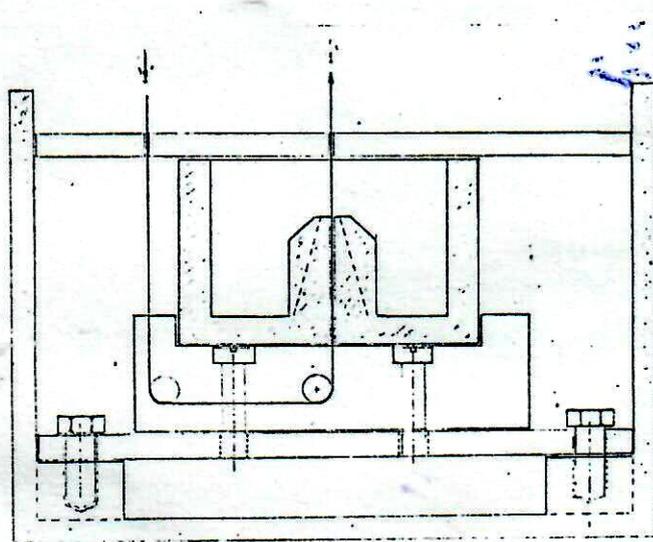


Abb. 33

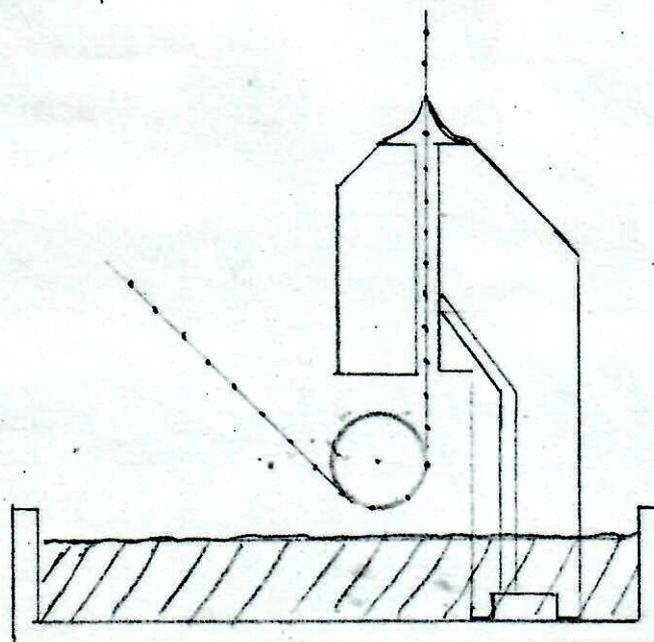


Abb. 36

Ziehen mit Form, $\alpha \ll 90^\circ$

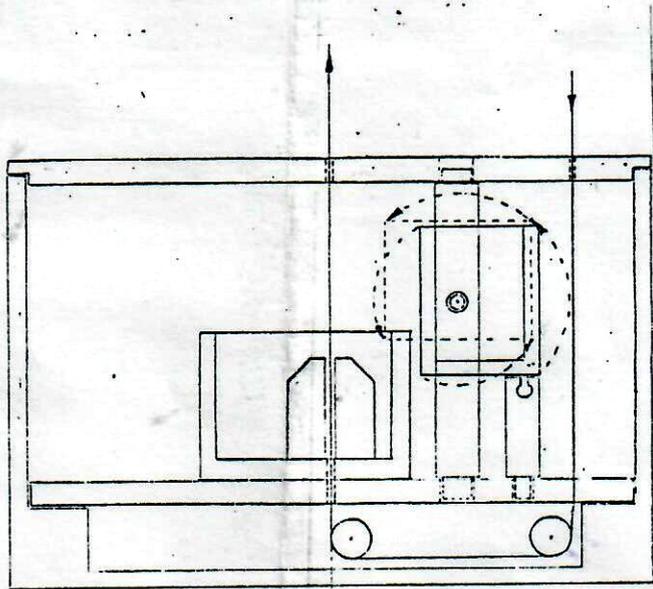


Abb. 34

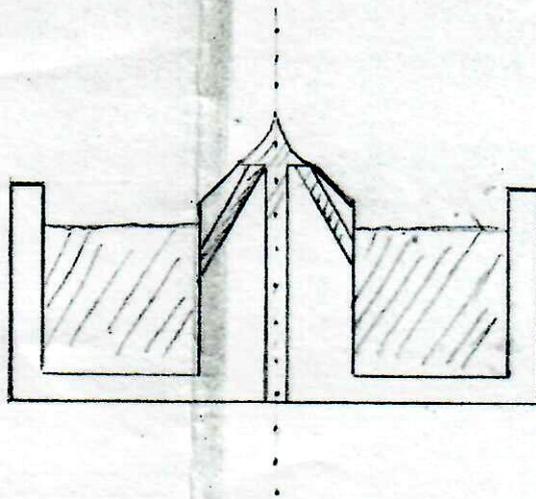


Abb. 37

Ziehen mit Form

$\alpha \ll 90^\circ$

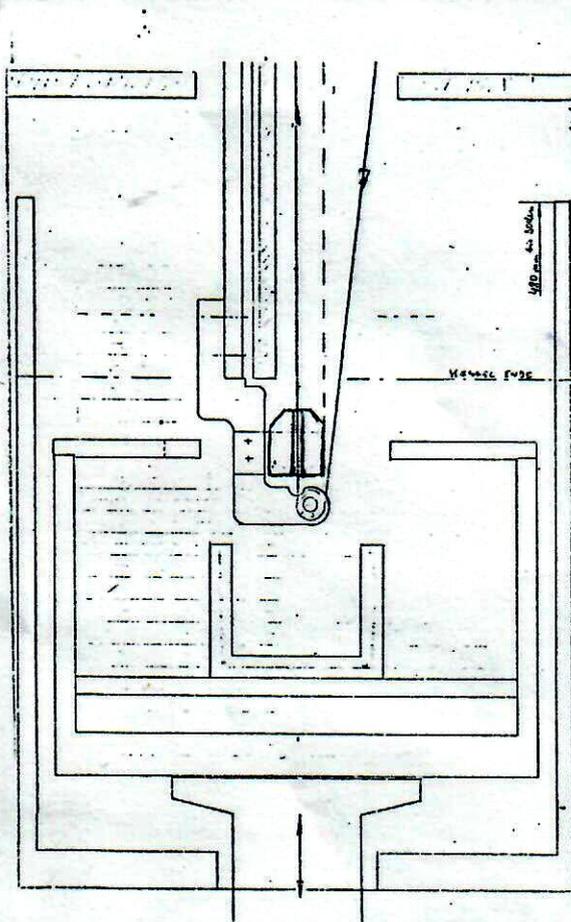


Abb. 35

Ziehen mit Form, $\alpha \ll 90^\circ$

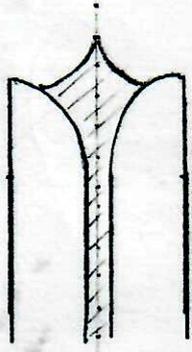


Abb. 21

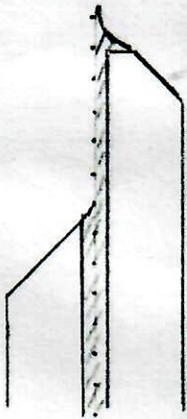


Abb. 24

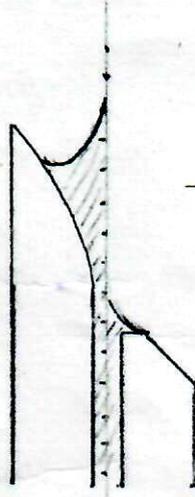


Abb. 25

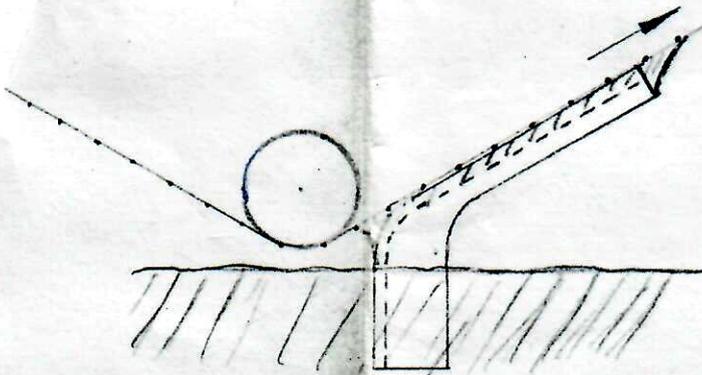
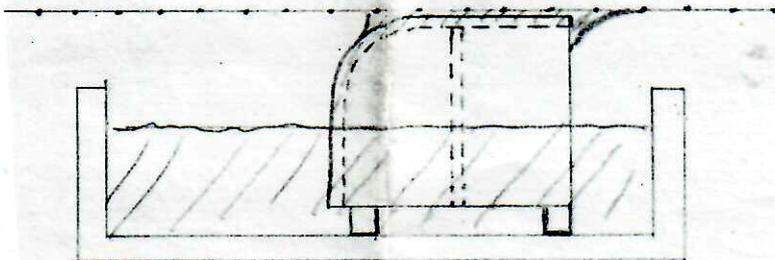


Abb. 28

Abb. 31



Ziehen mit Form

$\alpha \ll 90^\circ$

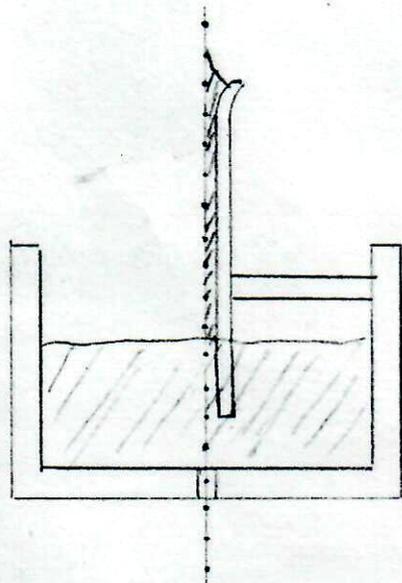


Abb. 26

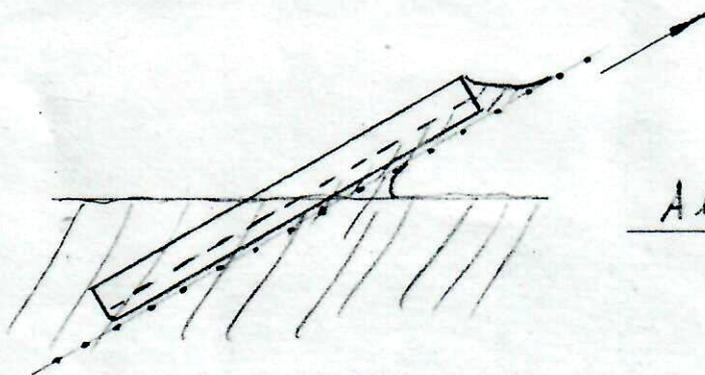
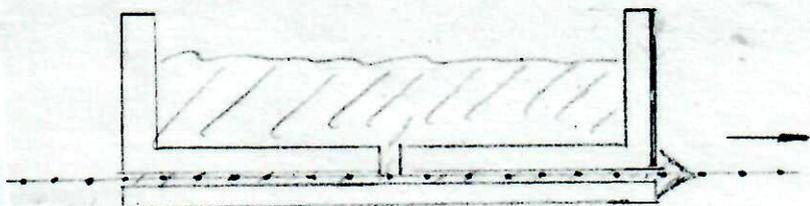


Abb. 29

Abb. 32



Einstellung von Temperaturgradienten

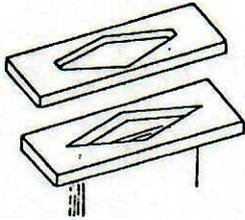


Abb. 38

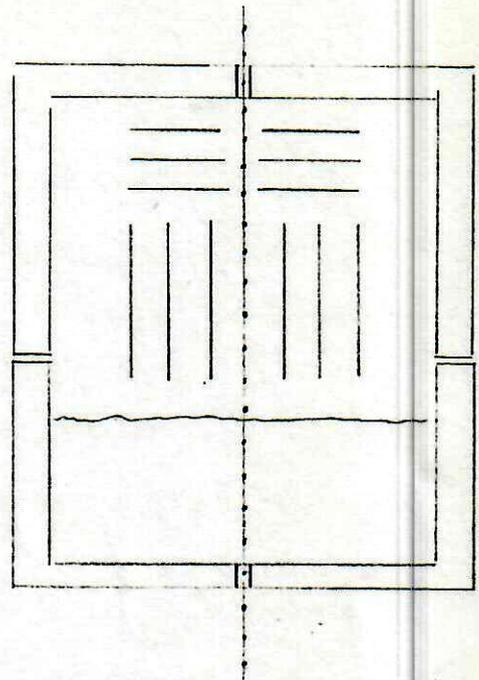


Abb. 39

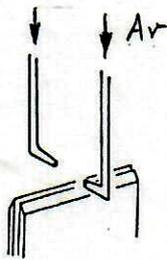
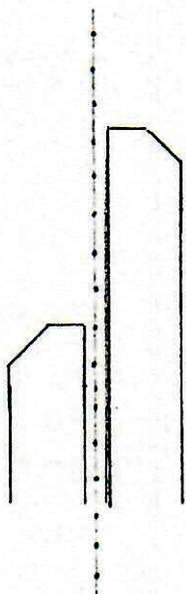


Abb. 40



siehe auch
Abb. 23-29

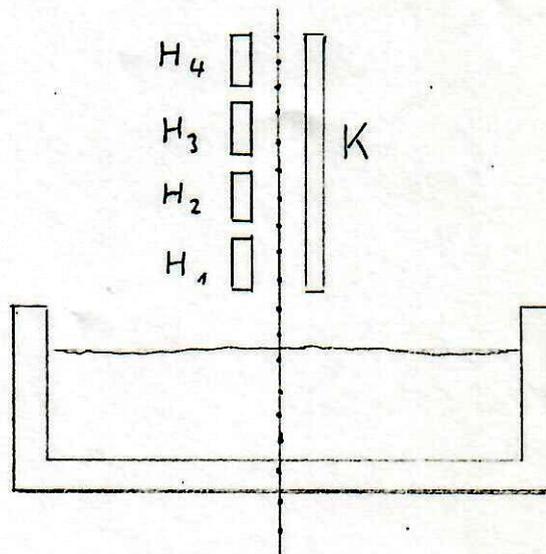
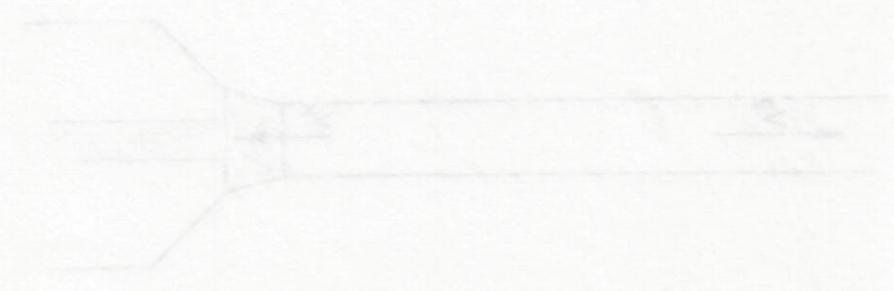


Abb. 41 (H = Heizer, K = Kühler)

YXX 050

AK H AS

AK 4111 (2 BS (1 BS))



YXX 05 R

AK H AS

AK 4111 (2 BS (1 BS))

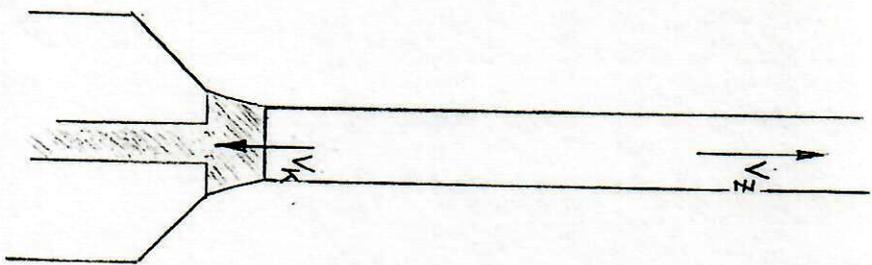


YXX 05 S

AK H AS

AK 4111 (2 BS)

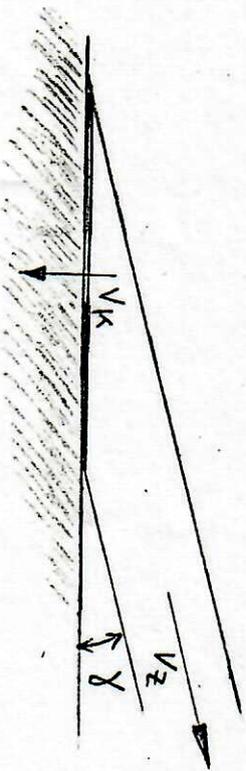




Vertikales BZ (VBZ)

V_K || V_Z

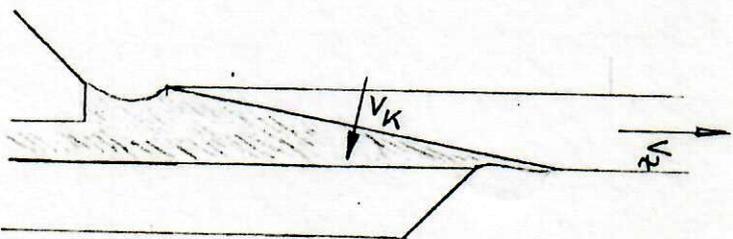
Abb. 42a



Horizontales BZ (HBZ)

V_K ⊥ V_Z

Abb. 42 b



Vertikales BZ

V_K ⊥ V_Z

Abb. 42 c

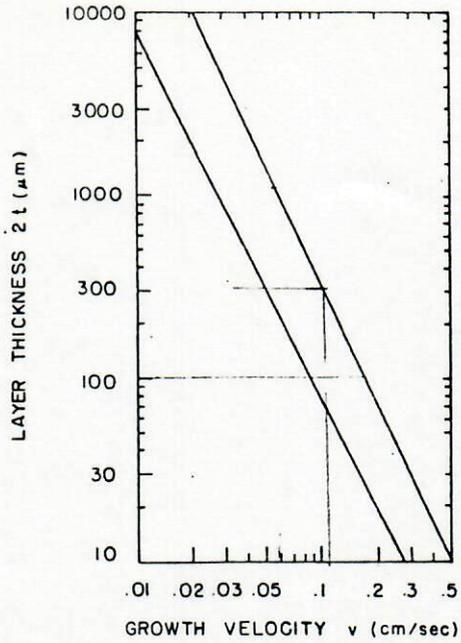


Fig. 4. Relationship between total silicon thickness $2t$ and growth velocity v . Both curves obey a constant v^2t relationship. The lower curve shows the relationship derived for the linearized case with $T_F - T_0 = 300$ K. The upper curve shows the relationship derived for the nonlinear case, assuming the parameters used by Bell [2].

Abb. 43 a, VBZ

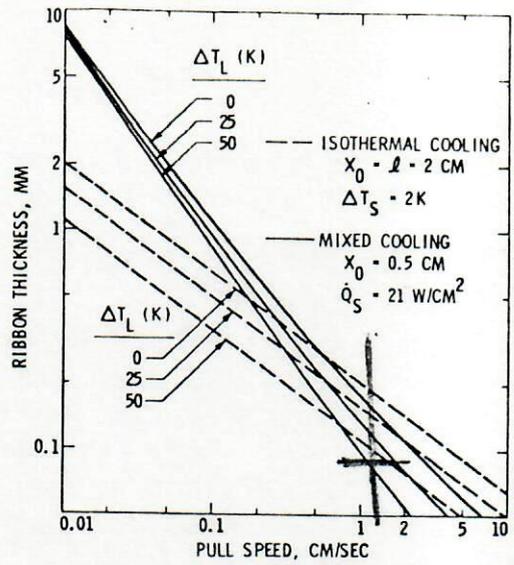


Fig. 6. Ribbon thickness versus pull speed.

Abb. 43 b, HBZ

Maschenkristallisation

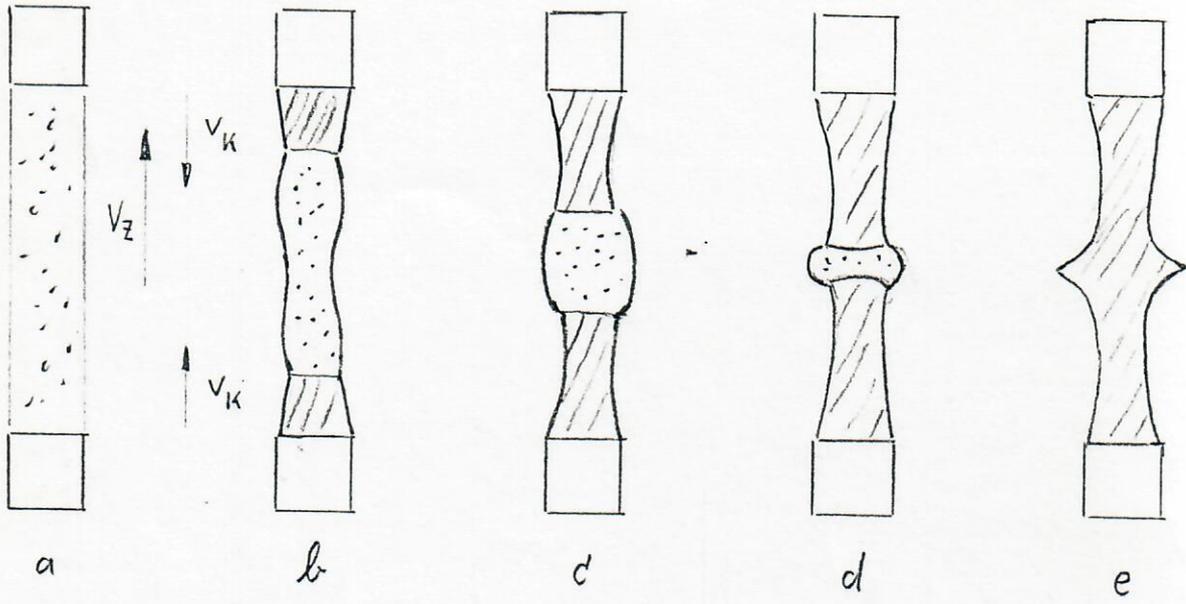


Abb. 44

$$v_k \parallel v_z$$

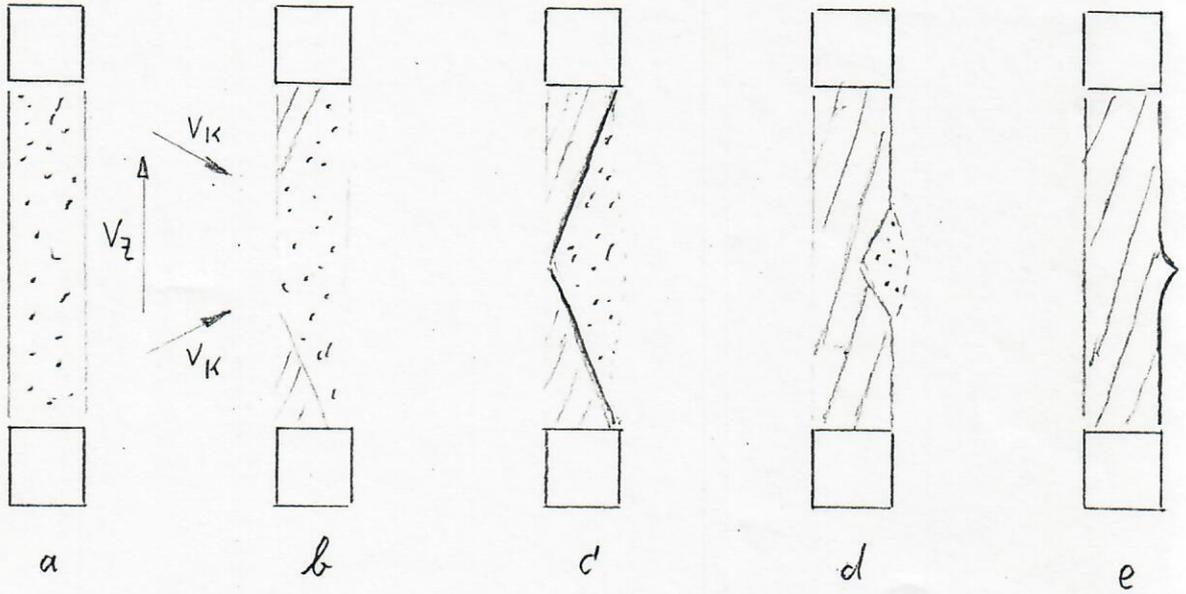
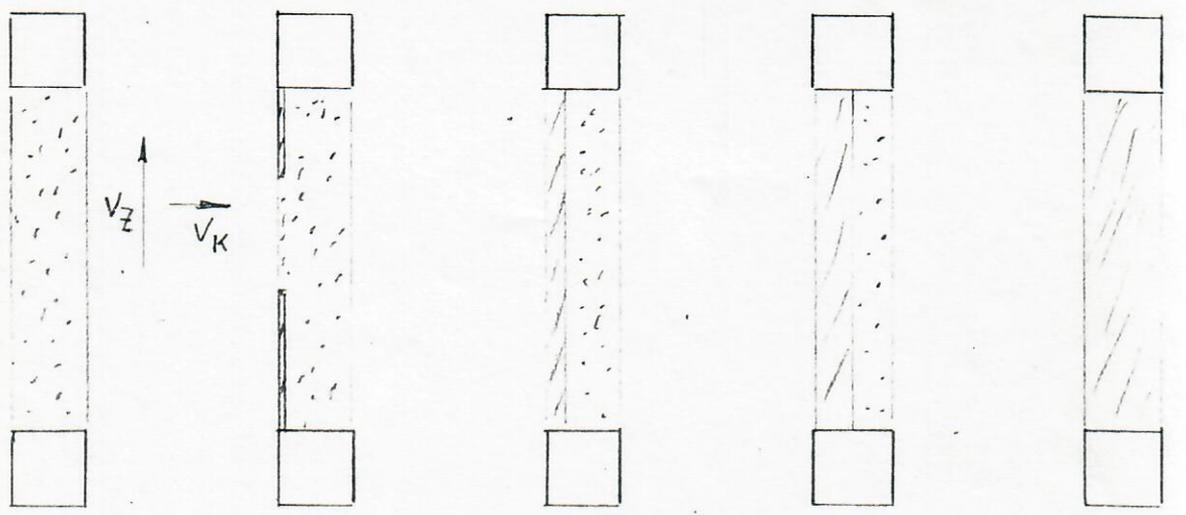


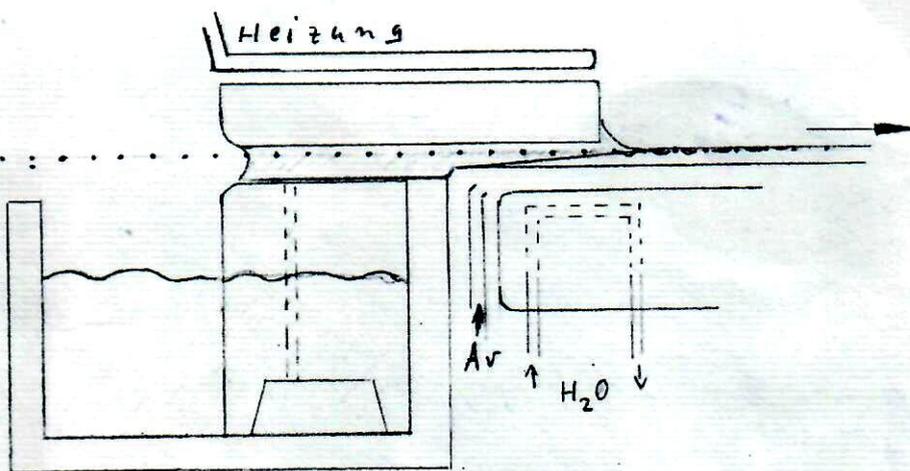
Abb. 45

$$v_k \neq v_z$$



Ab. 46

$$v_k \perp v_z$$



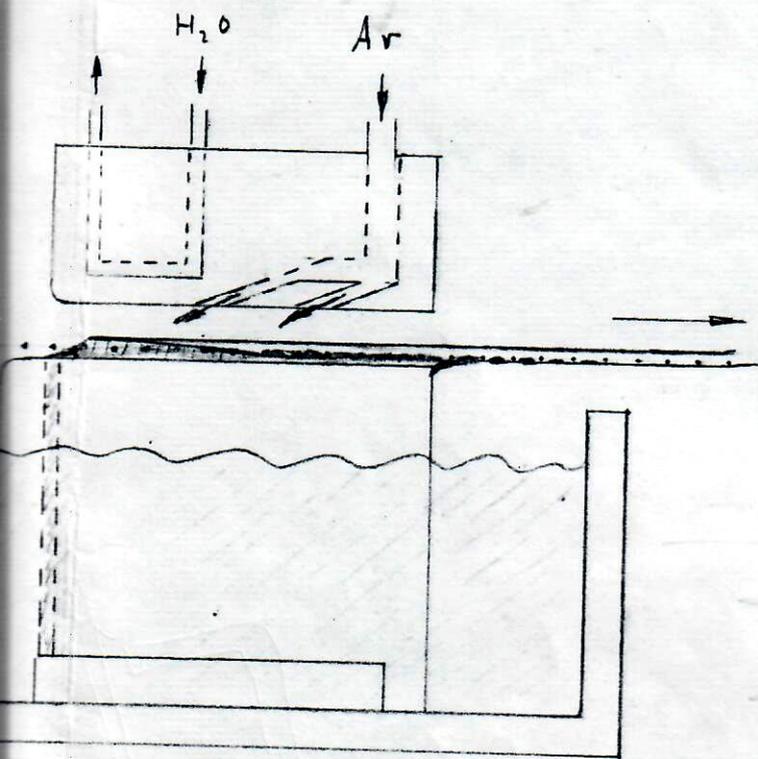
Bereich
der
kontin.
Kristallisation

Maschen-
kristallisation
 $v_{kr} \perp v_z$

Abb. 47 a

kontinuierl. Kristallisation
von unten

on kontinuierlicher und Maschen Kristallisation



Bereich
der
kontin.
Kristal-
lisation

← Maschen-
kristallisation,
 $v_{kr} \perp v_z$

Abb. 47 b

... von oben

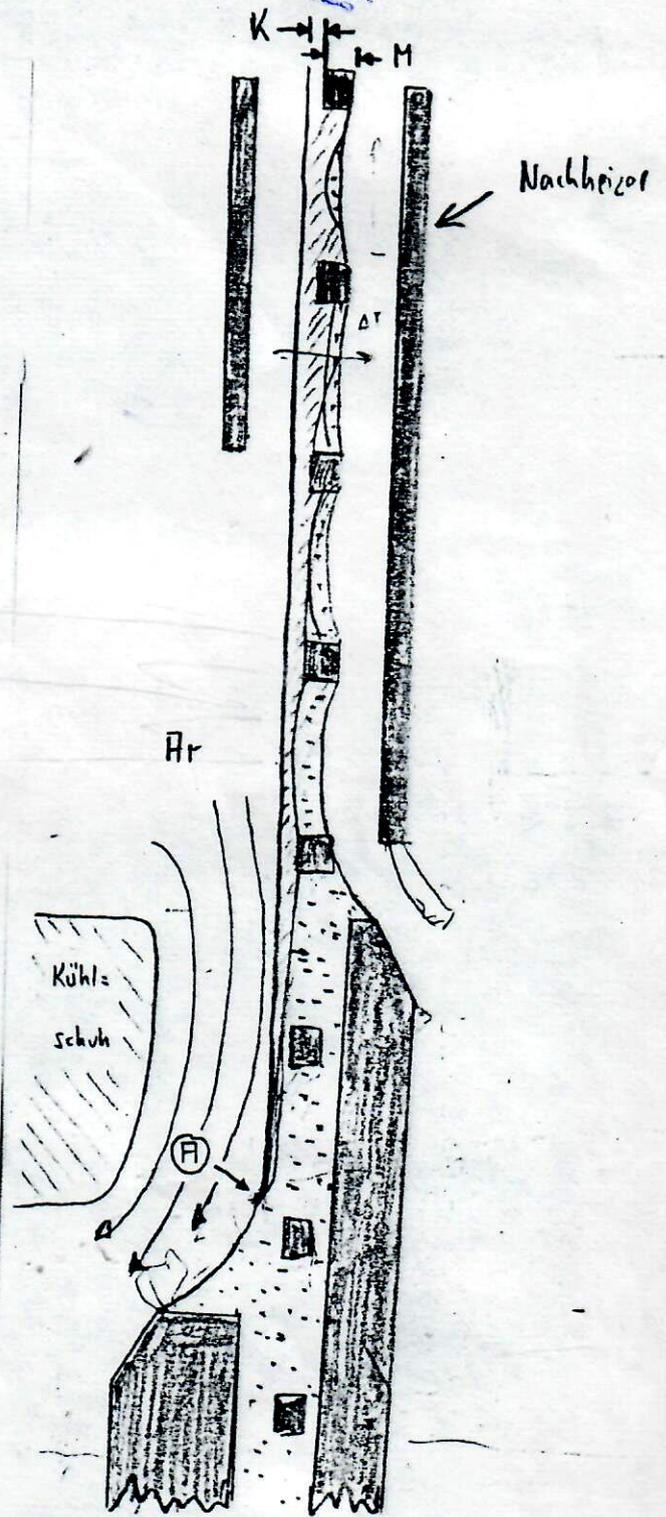


Abb. 47 d

... von der Seite

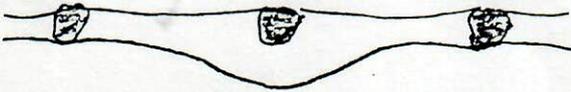
Weitere Beschichtungsmöglichkeiten



unterkritische Füllung



kritische Füllung



überkritische Füllung

Abb. 48

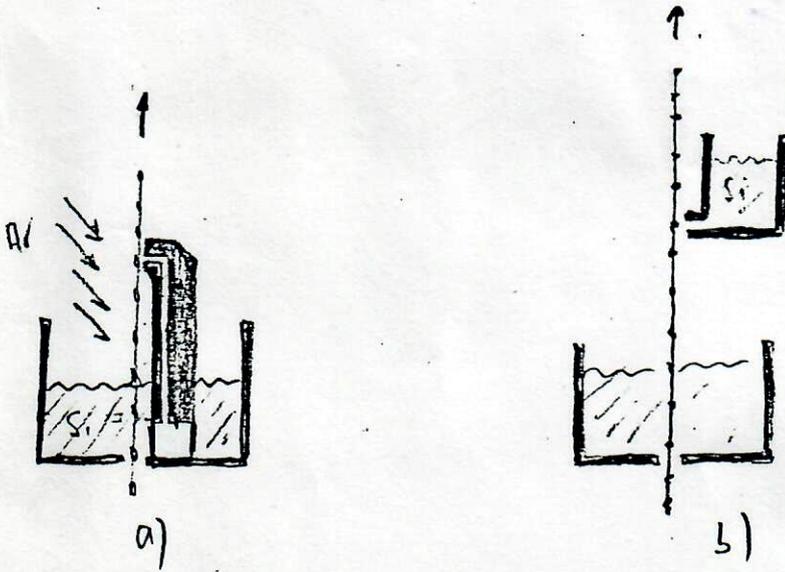


Abb. 49

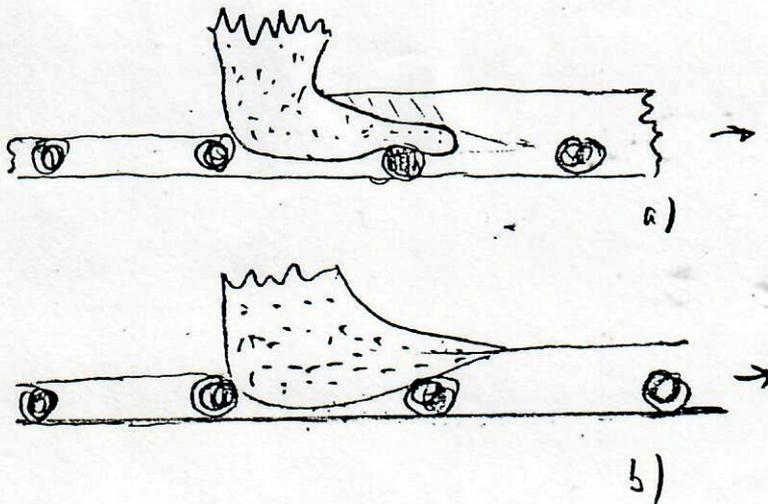


Abb. 50