

# Das Verhalten cristobalhaltiger Einbettmassen beim Vorwärmen

---

von Dipl.-Ing. Andreas Hilburg

Tersteegenstr. 15  
D-46045 Oberhausen  
Telefon 0208 / 85 37 49  
Telefax 0208 / 80 34 22

---

Die Elektronik ist in der Zahntechnik vielfältig einsetzbar. Im vorliegenden Beitrag werden komplizierte, bisher nur unvollkommen dargestellte Reaktionen zahntechnischer Einbettmassen beschrieben.

Für die Ermittlung der tatsächlichen Verhaltensmechanismen assistierte ein Computer. Das Ergebnis beschreibt Erkenntnisse, die gut geeignet sind, die Gußergebnisse zu verbessern und zuverlässiger zu machen. Ohne Computerhilfe wären diese Untersuchungen fast nicht möglich gewesen.

Zuletzt wird ein Gerät beschrieben, mit dem über Computerprogramme und elektronische Regelung Vorwärmöfen individuell gesteuert werden können. Besser als bisher, variantenreicher und sicherer reproduzierbar. Dabei muß der verwendete Vorwärmofen nicht über eigene Programmier- und Steuereinheiten verfügen.

Auch beim Einsatz mehrerer Öfen wird jeder angeschlossene Ofen individuell mit dem auf Legierung und Einbettmasse abgestimmten Programm gesteuert, jeder der Vorwärmöfen kann mit einem anderen Programm geregelt werden - aber es ist nur ein einziges Steuergerät erforderlich.

Dieses Beispiel zeigt, daß moderne Elektronik und die Computerisierung auch im zahntechnischen Bereich sehr vorteilhaft und qualitätssteigernd eingesetzt werden können. („Die Quintessenz der Zahntechnik“ 5/87)

---

---

## Einleitung

Über das Verhalten von Einbettmassen während des Vorwärmens ist in der einschlägigen Literatur relativ wenig zu finden. In der Dentalbranche ist das Wissen um diesen Bereich der Werkstoffkunde meist rein empirisch gebildet und nur auf bestimmte Produkte bezogen.

Mit diesem Aufsatz soll der Versuch unternommen werden, dieses komplexe Gebiet zusammenhängend von der physikalisch-technischen sowie von der werkstoffkundlichen Seite zu betrachten. Vor der Untersuchung des Verhaltens cristobalithaltiger Einbettmassen sollte man sich einmal die Physik des Wärmetransports im allgemeinen anschauen.

## Wärmetransport

Wärme ist eine Energieform und kann deshalb nicht verbraucht werden. Sie wird auf unterschiedliche Art vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur transportiert. Die unterschiedlichen Transportarten sind Strömung, Strahlung und Leitung.

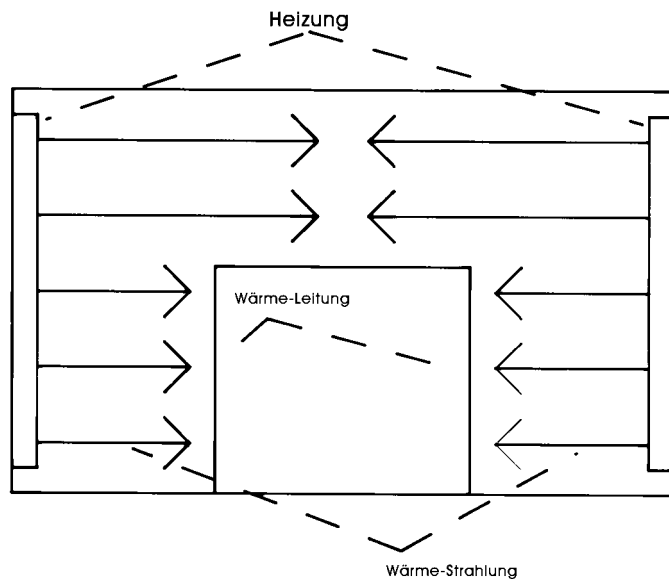
### *Strömung*

Temperierte Gase oder Flüssigkeiten haben eine geringere Dichte als kalte, sie sind also leichter und bewegen sich auf Grund des Auftriebs nach oben. Dieser Vorgang findet z.B. in Schornsteinen, beim Aufwind (Segelflug) und auch in der Warmwasserheizung statt. Die Strömung nimmt dabei die Wärme mit sich und transportiert sie nach oben.

### *Strahlung*

Bei der Wärmestrahlung wird die Wärmeenergie von einem strahlenden Körper zu einem absorbierenden Körper transportiert. Die Strahlung ist eine elektromagnetische Welle im infraroten Bereich.

Jeder Körper, der eine Temperatur über 0°K hat, sendet Wärmestrahlung aus. Diesen Vorgang nennt man Emission. Die auf einen Körper auftreffende Strahlung wird von diesem zum Teil absorbiert bzw. reflektiert. Die absorbierte Wärme wird im Inneren des Körpers weitertransportiert



#### *Leitung*

Bei der Wärmeleitung wird die Energie im Inneren des Körpers weitergeleitet. Dabei geben Teilchen höherer Temperatur ihre Energie an Teilchen niedrigerer Temperatur ab. Ein Stofftransport wie bei der Strömung findet nicht statt.

### Wärmetransport in kleinen Öfen

Der Wärmetransport in kleinen Öfen findet durch die Mechanismen Strömung, Strahlung und Leitung statt (Abb.1).

#### *Strömung*

Durch ihre geringe Dichte können Gase im Inneren von Öfen kaum Wärme transportieren.

#### *Strahlung*

Da die Strahlungsleistung mit der 4. Potenz der Temperaturdifferenz steigt, übernimmt die Strahlung den Hauptanteil des Temperaturtransports im Inneren von Öfen.

#### *Leitung*

An den Berührungsflächen der Muffel mit den umgebenden Ofenwänden speziell am Boden wird Wärmetransport durch Leitung erzeugt.

---

## Wärmetransport im Inneren von Muffeln

Der Wärmetransport im Inneren von Muffeln wird im wesentlichen durch Leitung erzeugt. Die Geschwindigkeit hängt dabei von der Wärmeleitfähigkeit des Materials ab. Die Wärmeleitfähigkeit von Cristobalit ist 900mal schlechter als die von Gold.

### Leitung

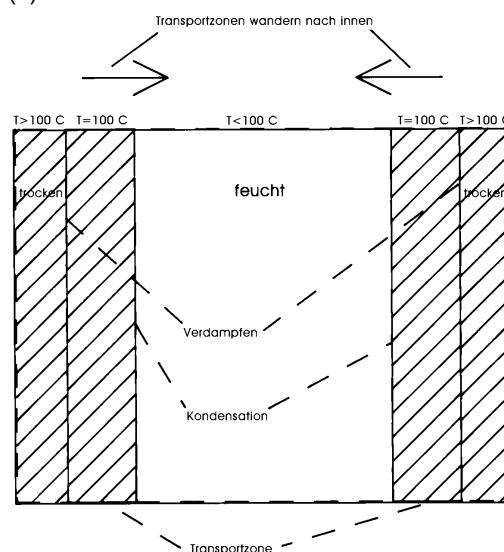
Die Wärmeleitfähigkeit von Cristobalitmassen ist als relativ schlecht zu bezeichnen. Durch den Wassergehalt ergibt sich ein komplizierter Transportvorgang, der im Bereich unter 100 Grad Celsius im wesentlichen von der physikalischen Eigenschaft des Wassers beeinflusst wird. Nach vollständigem Verdampfen des Wassers ist die Wärmeleitfähigkeit schlechter als vorher.

### Transportzone

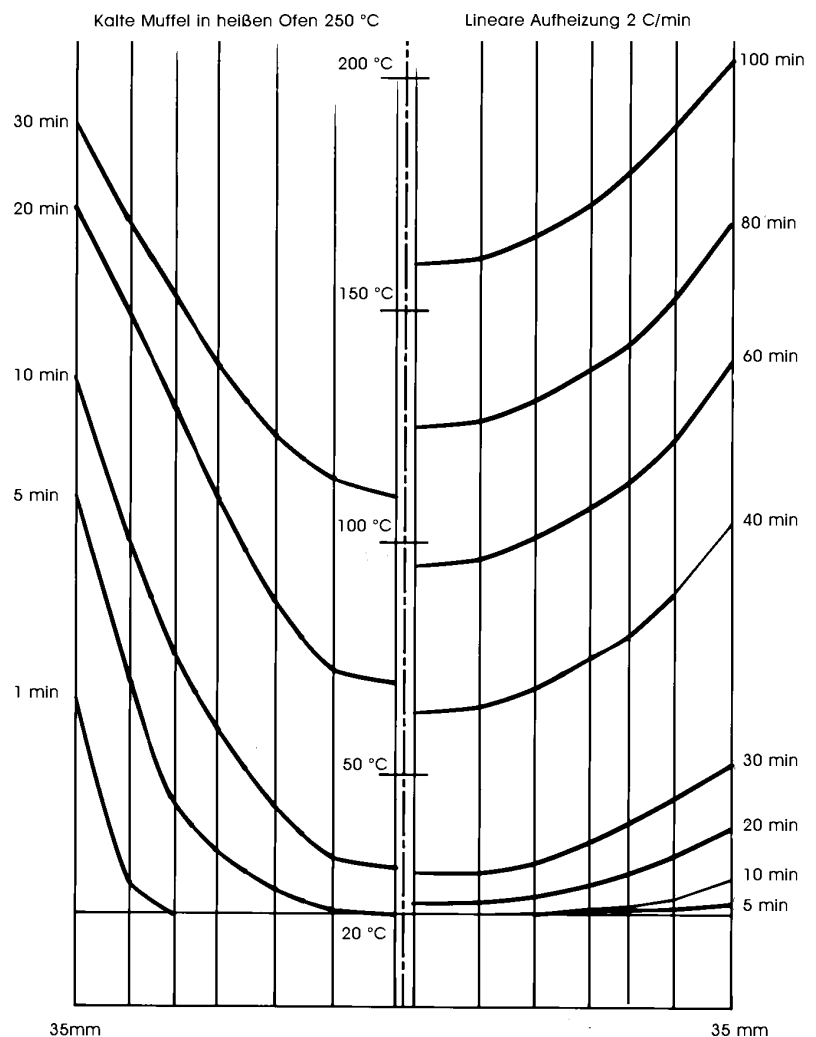
Um den Wärmeleitvorgang bei vorhandenem Wasser zu verstehen, ist die Betrachtung der Transportzone (Abb.2), d.h. der Bereich, der zwischen dem feuchten und dem vollständig getrockneten Material liegt, von größter Wichtigkeit.

Das Vorhandensein dieser Zone sowie die physikalischen Abläufe im Inneren dieser Zone sind Gegenstand eines Forschungsberichts, der von *M.P. Chowdiah* aus Bangalore in der „Gießerei“, einer Zeitschrift der Gießereitechnik, 1971 erstmalig veröffentlicht wurde.(2)

Im Inneren der Transportzone herrscht eine Temperatur von 100°C. Die Begrenzungen dieses Bereichs werden zum trockenen Material hin durch die Verdampfungsgrenzfläche und zum feuchten Material hin durch die Kondensationsfläche gebildet. Zwischen diesen Flächen liegt ein sich von der Wärmequelle wegbewegender Bereich, in dem sich ein Reaktionsablauf aus Dampftransport und Wassertransport ergibt. „Die gefährlichen Wirkungen dieses Reaktionsablaufes in der Transportzone verursachen Gußfehler, Oberflächenfehler, Schülpen, Beulen, Rattenschwänze, Fehler infolge Formwandbewegungen, Risse, Sprünge, Schwindungsrisse, Maßabweichungen und Formbruch.“ (2)



)



### Computersimulation der Aufheizung

Um die Temperaturverteilung sowie die Bewegung der Wärmefortpflanzung in der Muffel zu untersuchen, wurde auf einer Großrechenanlage eine Computersimulation durchgeführt (Abb.3). Mit der Methode der „finiten Elemente“ ist man in der Lage, auch so komplexe Vorgänge wie das Verhalten von Körpern in einer konstanten oder linear ansteigenden Temperaturumgebung zu untersuchen.

Es wurden mehrere Simulationen gefahren. Die zwei für die Anwendung wichtigsten seien hier vorgestellt: Die erste Simulation wurde unter der Voraussetzung einer konstanten Umgebungstemperatur von 250°C gerechnet, also mit einem sprunghaften Temperaturanstieg von 20°C auf 250°C. Die zweite Simulation wurde unter Annahme eines linearen Temperaturanstiegs von 2°C/min. gerechnet, also mit einer linearen Temperatursteigerung mit 2°C/min. von 20°C auf 250°C. Es wurden die Kurven gleicher Temperatur (Isothermen) im Inneren des

---

---

Materials in Abhängigkeit von der Zeit darstellt. Die Kurven verlaufen im Falle konstanter Umgebungstemperatur wesentlich steiler.

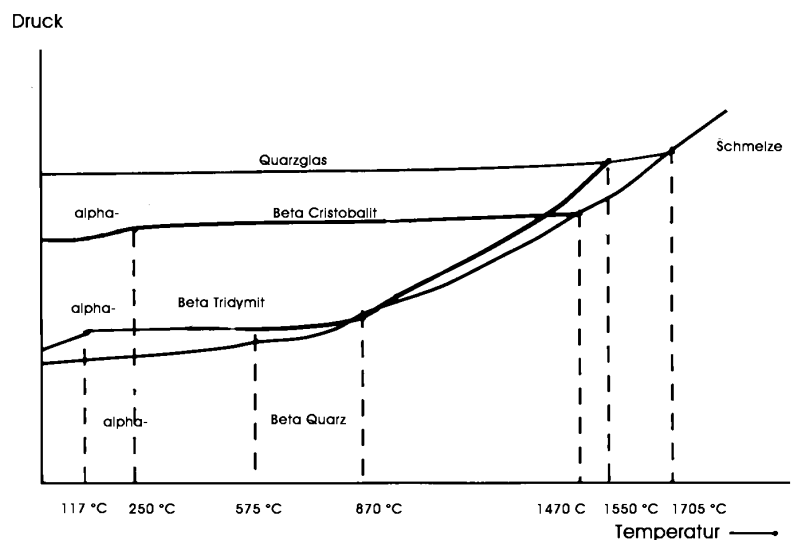
### Isothermen

Die Kurven gleicher Temperatur (Isothermen) geben über den Verlauf der Wärmefortpflanzung Aufschluß. Sie stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den aus der thermischen Expansion entstehenden Spannungszuständen.

Man kann aus den Isothermen bei bekanntem Expansionsverhalten die entstehenden Spannungen berechnen. Zur Verminderung von Spannungen müssen die Isothermen möglichst gleichmäßig verlaufen. Speziell an Kontaktflächen zum Ofen sollte der Einfluß der Wärmeleitung verringert werden, um das „Durchhängen“ der Isothermen zu verhindern.

### Zusammensetzung der Einbettmassen

Einbettmassen werden in der Gießereitechnik als „Formsande“ bezeichnet. Der größte Anteil der Masse besteht aus Sand in sehr reiner Form. Sand besteht aus Siliziumdioxid. Dieses Siliziumdioxid kommt in der Natur in unterschiedlichen Zustandsformen vor. Sie unterscheiden sich in ihrem Kristallgitteraufbau und sind alle aus der Unterkühlung des Stoffes bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken entstanden (Abb.4).



Die Urform des Siliziumdioxids ist der Quarz. Quarz liegt bei Raumtemperatur als  $\alpha$ -Quarz vor. Bei 575 °C wandelt sich  $\alpha$ -Quarz in  $\beta$ -Quarz um. Bei 870 °C wandelt sich  $\beta$ -Quarz in  $\beta$ -Tridymit um. Die Unterkühlung von  $\beta$ -Tridymit führt zum Zustand  $\alpha$ -Tridymit.

Die weitere Aufheizung des  $\alpha$ -Tridymits führt zum  $\alpha$ -Cristobalit, der durch Unterkühlung ebenfalls in  $\beta$ -Cristobalit umgewandelt

---

---

werden kann. Weiteres Aufheizen ergibt dann die Schmelze, die durch Unterkühlung dann als Quarzglas vorliegt.

Der Umwandlungspunkt  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> -  $\beta$ -SiO<sub>2</sub> + Tridymit liegt bei 117°C. Der Umwandlungspunkt  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> -  $\beta$ -SiO<sub>2</sub> + Cristobalit liegt bei 250°C. Da die Umwandlungsgeschwindigkeiten des Materials sehr gering sind, liegt das Siliziumdioxid bei Raumtemperatur nicht nur in seiner stabilsten Form dem  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> - Quarz vor, sondern auch in den metastabilen Zuständen Tridymit sowie Cristobalit und Quarzglas. Um dem zu Pulver gemahlene Material bei Raumtemperatur zu einer Formbarkeit und Festigkeit zu verhelfen, wird ihm Bindemittel beigegeben. Je nach Binder unterscheidet man gips-, phosphat- und silikatgebundene Einbettmassen.

#### *Gipsgebundene Einbettmassen*

Als Binder verwendet man Gips. Der Vorteil liegt hier in der feinen Abdruckfähigkeit, der Nachteil in dem frühen Zerfall des Gipses bei 750°C, welcher zu Instabilitäten der Form führt.

#### *Phosphatgebundene Einbettmassen*

Phosphatgebundene Einbettmassen enthalten als Bindemittel Phosphat.

#### *Silikatgebundene Einbettmassen*

Silikatgebundene Einbettmassen enthalten als Bindemittel Silikat.

#### *Graphitbeimengungen*

Graphitbeimengungen dienen der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, haben aber den Nachteil, daß es zu unerwünschten chemischen Reaktionen mit der Legierung kommen kann.

#### *Das Gefüge der Einbettmassen - Zwischenräume, Korngrößen*

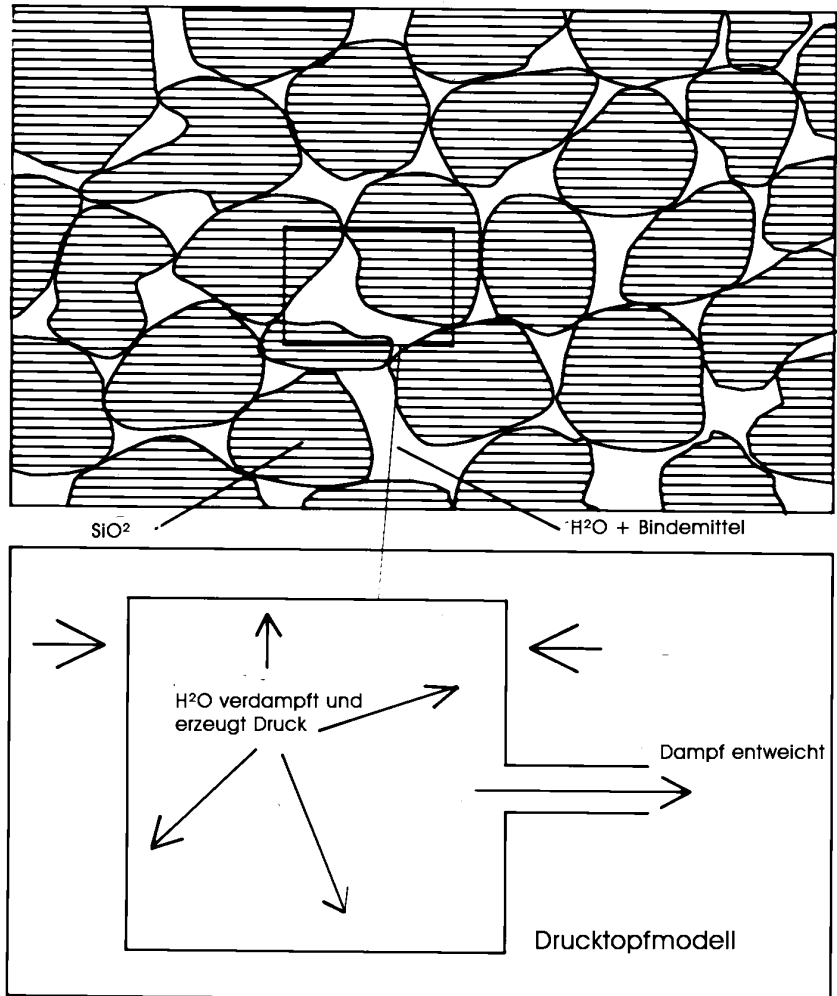
Durch die Körnigkeit des Pulvers kommt es beim Anmischen zum Einschluß von Wasser. Die einzelnen Körner des Sandes werden durch das Bindemittel verbunden. Je nach Korngröße des Sandes und der Beimengungen sind unterschiedliche Zwischenräume möglich.

#### *Entstehung von Druck, Drucktopfmodell*

Der Einschluß des Wassers führt nach den in Abschnitt „Transportzone“ gezeigten Untersuchungen bei Erwärmung zu Form-Instabilitäten. Dies läßt sich folgendermaßen erklären:

Wasser geht bei 100°C in den gasförmigen Zustand über. Für diese Umwandlung ist eine gewisse Energie notwendig, die nicht in Temperatur zur Erscheinung kommt, sondern in einer Volumenänderung. Das Volumen von Wasser vergrößert sich bei Normaldruck auf das 1700fache! Diese Gasexpansion erzeugt bei Einschluß Gasdruck.

In den Zwischenräumen des Gefüges entsteht also durch das Verdampfen des Wassers Druck, der sich durch das Material hindurch zu entlasten sucht(Abb.5).



Gleich einem Drucktopf, der durch sein Ablassventil den Druck abbaut, wird in der Einbettmasse der Wasserdampf durch die Zwischenräume herausgedrückt. Bei zu schneller Zufuhr der Wärme platzt das Material und es bilden sich feinste Risse.

#### Entstehung mechanischer Spannung

Immer dann, wenn auf ein Material Zug oder Druck wirken und es aufgrund seiner Formstabilität nicht zu Formänderungen kommen kann, entstehen Spannungen. Der Dampfdruck und die unterschiedlichen Expansionen sind die Ursache für die mechanischen Spannungen in Inneren von Muffeln.



---

---

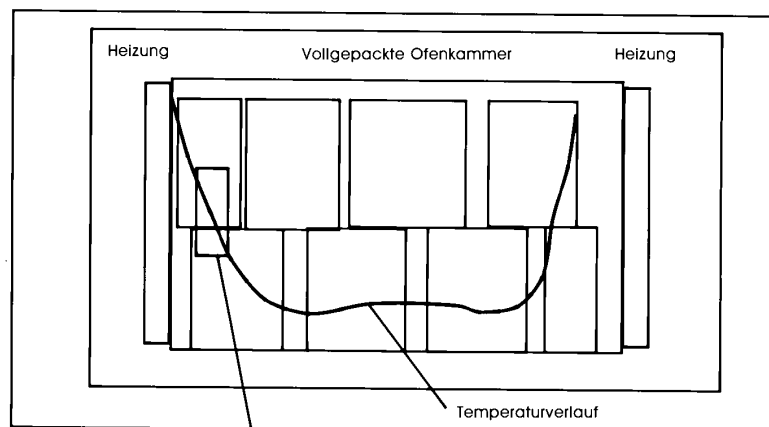
## Die mechanische Spannung im Inneren einer Muffel

### *Abbindeexpansion*

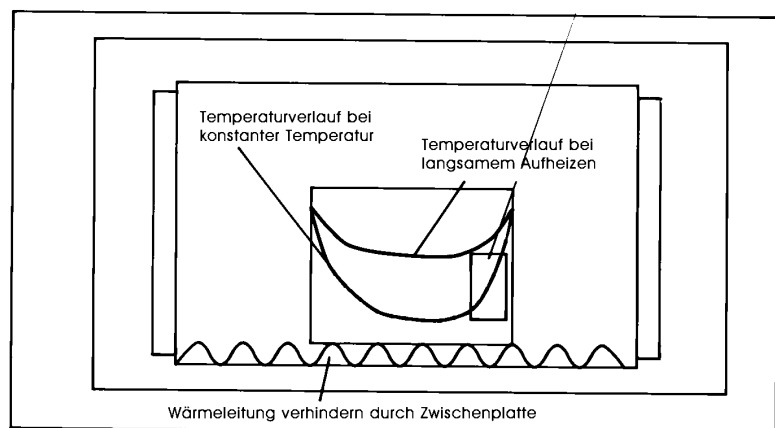
Beim Abbinden des Bindemittels kommt es zur Abbindeexpansion. Sie liegt bei etwa 1-1,5%. Durch Zwischenlegen von Vliesen in die Muffelringe muß dem Material Gelegenheit gegeben werden, diese Expansion ungehindert auszuführen.

### *Thermische Expansion*

Durch das Erwärmen kommt es zu einer thermischen Expansion (Abb.6), die bei ca. 0,5-1,5% liegt. Da der Temperaturverlauf im Inneren von Muffeln nicht gleichmäßig ist, werden einzelne Zonen an ihrer freien Expansion gehindert. Die Untersuchung durch Rechnersimulation zeigt, daß eine gleichmäßige und spannungsarme Aufheizung einer Muffel nur durch sehr langsames Erwärmen erfolgen kann. Beim „Vollpacken“ eines Ofens entstehen Isothermen, die unter Umständen quer durch die Muffeln gehen. Der Boden der Ofenkammer sollte mit einer gewellten Platte bedeckt werden, um die Kontaktfläche zu verkleinern. Dies führt zur Verringerung des Wärmeflusses durch Leitung.



Bereich erhöhter Spannung durch thermische Expansion



---

### *Kristallumlagerungsexpansion*

Durch die Kristallumlagerung bei den einzelnen Umwandlungspunkten des Siliziumoxids entstehen sprunghafte Expansionen, die großen Schaden anrichten können.

### *Expansion durch Rißbildung*

Durch die Rißbildung entstehen unkontrollierte, zufällige Expansionen, die die Maßhaltigkeit der Gußobjekte zerstören.

## Überlagerung der Einzelexpansionen

Die Gesamtexpansion einer Muffel ergibt sich aus der Summe der Einzelexpansionen. Ist eine Einzelexpansion unbestimmbar und zufällig, so wird die Gesamtexpansion ebenfalls unbestimmbar.

### *Zufällige Expansion*

Eine zufällige Expansion muß aus Gründen der Wirtschaftlichkeit vermieden werden. Hohe Anforderungen an die Produktivität verlangen heute, die Nacharbeiten zu reduzieren. Hohe Qualitätsansprüche erfordern eine große Maßhaltigkeit der Formen.

### *Programmierte Expansion*

Eine programmierte Expansion ist nur bei Kenntnis der Einzelexpansionen und ihrer Ursachen möglich. Durch eine Reduzierung der zufälligen Expansionen wird die gesteuerte Expansion möglich.

### *Die Vorwärmofenregelung Microtherm*

Die Vorwärmregelung Microtherm ist eine Mikroprozessorsteuerung, die speziell für Dentallaboratorien entwickelt wurde. Mit der Steuerung lassen sich bis zu 8 Öfen unabhängig voneinander steuern. Gerade im Hinblick auf die in diesem Aufsatz gezeigten Anforderungen ermöglicht das Gerät, alle für die Anwendung wichtigen Temperaturkurven zu erzeugen. Diese Temperaturkurven werden mit höchster Präzision eingehalten. Es lassen sich bis zu 99 Programme in das Gerät einspeichern. Diese 99 Programme können wahlweise auf unterschiedlichen Öfen gestartet werden. Durch den Einsatz der Elektronik ist das Gerät Microtherm in der Lage, einmal gefundene Kurvenformen, die optimale Ergebnisse liefern, immer wieder reproduzierbar einzusetzen. Beim Hersteller ist eine umfangreiche Bibliothek von Kurven vorhanden, die für 99% aller Einbettmassen die beste Aufheizkurve enthält. Durch die freie Programmierbarkeit der Microtherm sind auch zukünftige Anwendungen abgedeckt. Da das Gerät eugenständig und ofenunabhängig ist, muß bei Verschleiß eines Ofens nicht jedesmal eine neue Steuerung mitgekauft werden. Auch können Vorwärmöfen eingesetzt werden, die selbst über keinerlei Steuerelemente verfügen.

---

---

## Zusammenfassung

### *Forderung nach gesteuerter Expansion*

Gerade im Hinblick auf die Konkurrenz in der computergestützten Frästechnik ist es notwendig, die Gußtechnik in all ihren Möglichkeiten auszuschöpfen. Dies ist nur möglich durch die Reduzierung der zufälligen Einflüsse in der Gußtechnik.

Als zufällige Einflüsse sind bekannt:

1. Das Mischungsverhältnis der Einbettmassen schwankt.
2. Das Gewicht der Fertigpäckchen ist unterschiedlich.
3. Durch unsaubere Reagenzgläser und Anmischbecher variiert das Mischungsverhältnis Flüssigkeit - Pulver.
4. Durch unterschiedliche Lagerung der Massen schwanken Temperatur, Feuchtigkeit und Entmischung.
5. Bei nicht oder schlecht kontrollierter Aufheizung ergeben sich zufällige Expansionen der Form.
6. Durch ungenaue Regelung liegt die Gußtemperatur der Legierung nicht fest
7. Die verwendeten Wachse sowie Kunststoffmaterialien hinterlassen teilweise Rückstände, die sekundär Reaktionen auslösen.

Die Punkte 1,2 und 7 lassen sich durch erhöhte Qualitätsanforderung und Qualitätsprüfung reduzieren. Die Punkte 3 und 4 müssen durch ein hohes Qualitätsbewußtsein und große Sorgfalt des Zahntechnikers reduziert werden. Der Punkt 5 wird durch Einsatz einer hochwertigen Ofenregelung, die reproduzierbare Temperaturkurven ermöglicht, eliminiert. Der Punkt 6 wird durch den Einsatz genauer Temperaturregelungen eliminiert.

Bei Einhaltung dieser geforderten Maßnahmen wird der präzise Guß gesichert möglich.

### *Literatur*

*Berber, J., Karcher, H. und Langer, R.: Physik in Formeln und Tabellen. Bernhard Friedrich Voigt Verlag, 1971.*

*Chowdiana, M.P.: Die Feuchtigkeitszone und ihre Bewegung und tongebundenen Formen.*

*Gießerei: Zeitschrift für das gesamte Gießereiwesen, 582 ff.(1971).*

*Dobrinski, P., Krakau, G. und Vogel, A.: Physik für Ingenieure. Teubner Verlag, Stuttgart 1980.*

*Hollmann, A.F. und Wieberg, E.: Anorganische Chemie. Verlag Walter de Gruyter, Berlin 1958.*

*Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. Herr: Deutsch Verlag, Frankfurt a.M. 1979.*