

## **Abschlußbericht**

### 1. Thema

Mikroporosität beim Feinguß nach dem Wachsausschmelzverfahren (Investment Casting)

### 2. Ergebnis

Der Einfluß verschiedener Parameter auf die Erstarrungsporosität beim Gießen kleinformatiger Gußstücke nach dem Wachsausschmelzverfahren wurde untersucht. Als Gußmodelle wurden Kugeln mit zylinderförmigen Angüssen verschiedener Formfaktoren verwendet.

Voraussetzungen für eine sinnvolle Auswertung waren:

- a) Objektive Messung der Porosität (quantitative Bildanalyse).
- b) Anwendung statistischer Methoden auf eine große Anzahl von Meßwerten.
- c) Berücksichtigung von Wechselwirkungen.

Ergebnisse:

#### 1. Formmasse

Die Formmasse übt einen deutlichen Einfluß auf die Porosität aus. Die häufig verwendete gipsgebundene Formmasse führt infolge chemischer Reaktionen zu einer durch Gasentwicklung verstärkten Porosität. Durch Verwendung von phosphatgebundener Formmasse konnte der störende Einfluß der Gasporosität vermieden werden.

#### 2. Formtemperatur

Zu niedrige und zu hohe Formtemperaturen sind ungünstig. Das Optimum liegt im mittleren Bereich (500-600°C beim Gießen von Zinnbronze CuSn10). Je nach Gießtemperatur wirkt sich die Formtemperatur in unterschiedlichem Maße aus.

Hohe Form- und niedrige Gießtemperatur war sehr ungünstig.

#### 3. Gießtemperatur

Insgesamt ist der direkte Einfluß der Gießtemperatur geringer als bei der Formtemperatur. Im Mittel nimmt die Porosität der Kugel mit der Gießtemperatur zu. Es treten jedoch Wechselwirkungen mit anderen Parametern auf, die gegenteilige Tendenzen bewirken (vgl. 2.)

#### 4. Modellform

Es wurde u.a. ein Formfaktor eingeführt, der neben Kugeldurchmesser auch die Form des Zylinders berücksichtigt. Die Beschreibung des Formeinflusses auf die Porosität der Kugel war damit gut möglich. Es sind zahlreiche Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Nur in sehr grober Näherung gilt, daß ein großer Kugeldurchmesser zu größerer Porosität führt.

5.

Die Porosität der Kugel nimmt mit der Erstarrungszeit (Zeit bis zur vollständigen Erstarrung) ab. Die Erstarrungszeit wird wesentlich von der Formtemperatur, weniger von der Gießtemperatur beeinflusst.

#### 6. Legierungseinfluß

Der Vergleich von CuSn10 und CuMn5 zeigt, daß das Erstarrungsintervall einen geringeren Einfluß hat als ursprünglich angenommen. Die Erscheinungsform der Porosität der Legierungen CuAl7, CuAl8,5, CuAl11 unterscheidet sich stark von CuSn10 und CuMn5. Dabei treten zwischen den 3 CuAl-Legierungen wiederum wesentliche Unterschiede auf.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Anlage 14

Forschungsinstitut für Edelmetalle  
und Metallchemie  
Katharinenstr. 17  
D 7070 Schwäb. Gmünd

Name der Forschungsstelle

Schwäbisch Gmünd, 19.10.92

Ort, Datum

Forschungsvorhaben Nr. 8070

Forschungsthema: Mikroporosität beim Feinguß nach dem Wachsausschmelzverfahren (Investment Casting)

Zwischenbericht\*) für die Zeit vom \_\_\_\_\_ bis \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_\_

Schlußbericht\*) Abschluß des Vorhabens am 28.02. 19 92

\*) Anmerkung: Nichtzutreffendes streichen.

## 1. Einleitung

### 1.1. Überblick

Der Feinguß mit dem Wachsausschmelzverfahren hat in bestimmten Bereichen der Technik eine wesentliche Bedeutung und kann durch keine andere Methode ersetzt werden.

Zu nennen sind:

Herstellung kleiner Serien in der Feinwerktechnik  
Modellguß  
Dentaltechnik und -Prothetik  
Schmuckherstellung

Die Vorteile sind u.a. die Möglichkeiten von Unikaten nach Wachs- oder Kunststoffmodellen (z.B. Modellguß, Dentaltechnik, Prothetik), die wirtschaftliche Fertigung kleiner Serien, die Flexibilität und Vielseitigkeit.

Die genannte Gießtechnik weist allerdings auch einige Fehlerquellen auf, die oftmals zu erheblichen Ausschußquoten führen z.B.

schlechte Formfüllung  
Maßungenauigkeit  
Oberflächenfehler  
Porosität.

Der Porosität dürfte dabei die größte Bedeutung zukommen. Im wesentlichen ist sie auf zwei Ursachen zurückzuführen:

- a) Gasporosität
- b) Mikroerstarrungslunker (Shrinkage Porosity).

Dabei ist es nicht möglich, beide Arten von Porosität strikt zu trennen. Aufgrund der runden Porenform kann zwar Gasporosität gut

erkannt werden (Abb. 1). Die typische dendritische Porosität (Abb. 2) dürfte zwar zum großen Teil durch den relativ großen Volumenschwund beim Übergang flüssig/fest bedingt sein (Shrinkage Porosity) jedoch ist auch die Ausscheidung von Gasen während der Erstarrung mehr oder weniger stark an dieser Mikrolunkerbildung beteiligt. In diesem Zusammenhang soll daher diese Form neutral als dendritische Porosität bezeichnet werden.

Während ausgeprägte Gasporosität in vielen Fällen vermieden werden kann, wenn die Ursachen erkannt sind, ist dies bei der dendritischen Porosität wesentlich schwieriger. Die Hauptursache, der Volumenschwund beim Erstarren ist (von einigen speziellen Legierungen abgesehen) nicht zu beseitigen. Der Idealfall, daß das Volumendefizit während der Erstarrung durch Nachspeisen von Schmelze bzw. durch homogenes Schrumpfen des Gußstückes ausgeglichen wird ist beim Formguß selten gegeben. Ausnahmen sind z.B. sehr dünnwandige Teile.

Das Nachspeisen der Schmelze wird

- a) bei ungünstiger Gestaltung des Angusses durch dessen vorzeitiger Erstarrung verhindert,
- b) insbesondere bei Legierungen mit größerem Erstarrungsintervall durch Ausbildung eines dendritischen Netzwerkes sowohl im Anguß als auch innerhalb des Gußstückes selbst zunehmend erschwert.

Diese grundsätzlichen Schwierigkeiten wirken sich besonders dann aus, wenn innerhalb des Gußstückes stärkere Querschnittsänderungen auftreten. Dendritische Porosität kann in diesem Fall (in Abhängigkeit von den Gießbedingungen) sowohl in Bereichen mit großem Querschnitt als auch in dünnwandigen Teilen verstärkt auftreten. Dies wurde in zahlreichen Untersuchungen von gegossenen Schmuckteilen festgestellt. Typischerweise treten dabei dendritische Poren im dünnwandigen Bereich in der Nähe des Überganges zum

starkwandigen Teil auf. Dieser Fehler ist bei mechanischer Beanspruchung des Teiles als besonders kritisch anzusehen.

Eine Erklärung ist das "Absaugen" der Restschmelze aus dem erstarrenden dendritischen Netzwerk durch den Volumenschwund im starkwandigen Teil.

Insgesamt wird sowohl der Gesamtumfang der Porosität als auch die Lage der Poren durch verschiedene Faktoren bestimmt, z.B. Gießtemperatur, Formtemperatur, Volumen/Oberflächenverhältnisse im Gußstück und bezüglich des Angusses, Wärmeleitfähigkeit des Formmaterials und Legierungseigenschaften.

Der in der Praxis übliche Weg zur Vermeidung einer starken Porosität ist eine empirische Optimierung der Gießbedingungen und der Angußmethode in einem konkreten Anwendungsfall. Diese Methode ist jedoch sehr zeitaufwendig, die Resultate der Versuche sind nur für einen speziellen Anwendungsfall gültig und selbst dabei nicht reproduzierbar. Darüber hinaus werden aus solchen Versuchen oft irreführende Verallgemeinerungen gezogen. Dies erklärt z.B. daß auf dem Schmuck- und Dentalgußsektor recht widersprüchliche Theorien bezüglich der günstigsten Form- und Gießtemperatur bestehen.

Auf der anderen Seite wurde verschiedentlich versucht, die Erstarrungsvorgänge in mathematischen Modellen zu behandeln. Diese Modelle können sich als sehr hilfreich erweisen, erlauben aber selbstverständlich keine "Berechnung" eines porenfreien Gusses.

Für das Forschungsvorhaben ergibt sich folgende Problemstellung:

Bestimmung des Einflusses auf verschiedene oben genannte Gieß-, Form- und Legierungsparameter auf den Grad und die Verteilung der dendritischen Porosität an kleinen Gußteilen, die nach dem Wachs-ausschmelzverfahren gefertigt wurden und die größere Querschnittsänderungen aufweisen. Typische Gußteile dieser Art stammen aus der

Dentaltechnik und -Prothetik, dem Schmuckguß, aber auch der Feinwerktechnik.

Zur Problemlösung ist es zweckmäßig die Einflußgrößen in Gruppen einzuteilen:

#### Gestalt (Stereometrie) der Gußstücke bzw. Probenkörper

Hierbei ist vor allem das Verhältnis Volumen/Oberfläche des Körpers maßgebend. Die Erstarrungszeit ist proportional dem Quadrat dieses Verhältnisses (1). Bei Körpern mit unterschiedlichen Querschnitten innerhalb des Gußstückes dürfte einerseits die Porosität in Umfang, Art und Verteilung wiederum von den Relationen der Verhältnisse dieser unterschiedlichen Querschnitte abhängen.

Geeignete Testmodelle müssen die Eigenschaften haben, komplexe reale Gußobjekte mit relativ einfachen Körpern zu simulieren, wobei Variationen der Volumen/Oberflächenverhältnisse unter Beibehaltung der prinzipiellen stereometrischen Form möglich sein sollen. Geeignete Körper sind dafür Kugel und Zylinder. In Vorversuchen wurde ein geeignetes Testmodell entwickelt, das sich als gut brauchbar erwiesen hat. Es konnte in den Vorversuchen mit diesem aus Zylinder und Kugel bestehenden Modell gut die Entstehung typischer, auf dendritischer Porosität beruhender, Fehler untersucht werden.

#### Legierungseigenschaften

Wesentliche Eigenschaften einer Legierung bezüglich der Ausbildung einer dendritischen Porosität sind (u.a.):

- a) Erstarrungsintervall
- b) Anzahl und Art der Phasen
- c) Korngröße
- d) Spez. Erstarrungswärme bzw. bis zum Erstarrungsende abgegebene spez. Wärmemenge

Insgesamt sind die Faktoren a-d nicht unabhängig voneinander und teilweise auch nicht unabhängig von den Gießbedingungen (z.B. Korngröße, Veränderung des Erstarrungsintervalls und der Phasenzusammensetzung durch Unterkühlung).

Für die grundsätzlichen Untersuchungen sollten relativ einfache (und preiswerte) Legierungen herangezogen werden. Hierzu eignen sich z.B. Bronze (Zinnbronze, Manganbronze und Aluminiumbronze) mit denen ein breites Spektrum von unterschiedlichem Erstarrungsverhalten abgedeckt werden kann.

#### Gießbedingungen und Formeigenschaften

Die Erstarrung des Gusses wird zunächst bei gleichen Legierungen und gleichem Gußmodell durch vier Faktoren beeinflusst:

- a) Temperatur der Schmelze bei Eintritt in die Form (Formeintrittstemperatur). Diese Temperatur weicht in Abhängigkeit von der Gießmethode und dem eingesetzten Gußgewicht oftmals erheblich von der im Tiegel gemessenen Temperatur der Schmelze vor dem Abguß ("Gießtemperatur") ab. Die Abweichung ist außerdem nicht reproduzierbar. Bei den Versuchen ist es daher unumgänglich die Temperatur der Schmelze bei Eintritt in die Form zu messen. Die Gießtemperatur bildet nur einen Anhaltspunkt für die gewünschte Temperatur (2).
- b) Temperatur der Form  
Auch diese Temperatur sollte durch Messung direkt in der Formmasse bestimmt werden (2).



c) Eigenschaften der Einbettmasse (Formmasse)

Das Abkühlverhalten der Schmelze wird durch die Wärmeleitfähigkeit der Formmasse beeinflusst (2). Der Materialfluß ist abhängig von der Gasdurchlässigkeit der gebrannten Einbettmasse sofern keine Entlüftungskanäle vorgesehen sind. Beide Größen sind meßbar und in beschränktem Maße variierbar (2, 6, 8, 7).

Neben diesen für das Vorhaben relevanten in die Untersuchungen direkt einbezogenen Eigenschaften sind auch weitere Einflüsse zu beachten. Am wichtigsten davon sind unterschiedliche Grenzflächenspannungen Schmelze/Einbettmasse (9) und chemische Reaktionen (9). Beide können die dendritische Porosität beeinflussen bzw. durch Bildung reiner Gasporosität (die nicht Gegenstand der Untersuchungen ist) verdecken. Gasporosität sollte daher soweit als möglich vermieden werden (Abstimmung der Einbettmasse auf die zu gießende Legierung).

## 1.2. Stand der bisherigen Forschung - Literaturübersicht

Die vorliegenden Veröffentlichungen lassen sich nach Themenkreisen ordnen:

- a) Erstarrung und die damit verbundene Lunkerbildung wird primär als eine Funktion des Wärmeflusses betrachtet (1, 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Als ein Ausgangspunkt für die geplanten Untersuchungen kann die seit langem bekannte und häufig benutzte Beziehung, daß die Erstarrungszeit proportional dem Quadrat des Verhältnisses Volumen/Oberfläche ist (1, 10, 11) benutzt werden. Damit ist der Formfaktor auf recht einfache Weise zu berücksichtigen. Insbesondere dürften sich daraus Beziehungen ableiten lassen, die die Querschnittsänderungen berücksichtigen.

- b) Porosität als Funktion des Materialflusses und der Druckverhältnisse (16,17,18,3,19).

Einige grundlegende Arbeiten (16,17) beschäftigen sich ausführlich mit dem Materialfluß in einem Gußstück im Verlauf der Erstarrung. Am wesentlichsten für die Porosität erscheint dabei das Speisen des Gußstückes mit Schmelze bei bereits gebildeten dendritischem Netzwerk (Interdendritic Feeding). Der dabei auftretende Strömungswiderstand muß durch externen Druck überwunden werden. In diesem Zusammenhang spielt auch die Entlüftung der Form (Entlüftungskanäle bzw. Porosität der Formmasse eine Rolle) (8).

Cambell (16) beschreibt neben den erwähnten Mechanismen anschaulich den Einfluß verschiedener Formtemperaturen und Gußquerschnitte auf Umfang und Lage der Porosität.

Von Liu et al (3) wurden Modellversuche durchgeführt, die den Einfluß von Kapillarkräften auf den interdendritischen Flüssigkeitsfluß ermittelten. Insgesamt weisen die Arbeiten darauf hin, daß der durch das dendritische Netzwerk entstehende Strömungswiderstand eine ausschlaggebende Rolle bei der Bildung der Erstarrungsporosität spielt. Hinzuzufügen ist aufgrund eigener Erfahrung und von Vorversuchen noch, daß Porosität in dünnwandigen Abschnitten von komplexen Gußteilen auch durch "Absaugen" von Restschmelze aus dem Netzwerk durch Volumenschwund im dickwandigen Abschnitt entsteht.

- c) Porosität als Funktion von Materialstruktur und Keimbildung (z.B. 1, 18, 17, 3, 19).

Aus dem vorhergehenden ist ohne weiteres klar, daß die Gefügestruktur der erstarrenden Schmelze ein sehr wesentlicher Faktor für die Bildung von dendritischer Porosität ist.

Grobkörniges Gefüge mit erheblichem Anteil von primären Dendriten und einem nennenswerten Anteil an Restschmelze mit relativ niedrigem Erstarrungsbereich (bzw. -Punkt) dürfte am kritischsten sein. Es ist daher unbedingt notwendig, daß der

Legierungsfaktor mit in die Untersuchungen einbezogen wird.

Ein besonderer Gesichtspunkt ist, daß ebenso wie bei der Kristallisation auch bei der Porenbildung das Vorhandensein von Keimen erforderlich ist. Dies deckt sich auch mit den praktischen Erfahrungen z.B. beim Schmuckguß. Umgeschmolzenes, verunreinigtes Altmaterial neigt oftmals stärker zur Ausbildung dendritischer Lunker als Neumaterial.

d) Stereometrische Verhältnisse und ihr Einfluß auf die Porosität

Es ist selbstverständlich nicht möglich, diesen Punkt getrennt von den übrigen Faktoren zu behandeln. Dies ist weder im beantragten Vorhaben geplant noch in den vorliegenden Veröffentlichungen erfolgt.

Einige Arbeiten (20, 21, 14, 13, 22) beschäftigen sich jedoch verstärkt mit dem Design des Gußstückes wozu auch die Anguß- und Entlüftungskanäle gerechnet werden. Zwei Arbeiten davon (20,21) betreffen insbesondere die Dentaltechnik (z.B. Gestaltung der Angüsse). Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Verwendung von mathematischen Modellen bzw. Expertensystemen zur Formgestaltung (14,22).

e) Einfluß der Formmasse (8,7,6,)

Zwei Faktoren spielen eine wesentliche Rolle:

1. Gasdurchlässigkeit

Die Gasdurchlässigkeit der Formmasse kann die Druckverhältnisse beim Füllen der Form und somit die Entstehung von Poren beeinflussen.

2. Thermische Leitfähigkeit

Die thermische Leitfähigkeit beeinflusst die Erstarrungsgeschwindigkeit. Sie ist wiederum abhängig von der Porosität (8). Genauere Angaben über den Einfluß beider Größen auf die Bildung von (dendritischen) Lunkern liegen nicht vor.

#### f) Mathematische Behandlung

In einer Reihe von z.T. bereits zitierten Arbeiten wird versucht, den Erstarrungsverlauf und/oder die Entstehung von Poren mit Hilfe mathematischer Beziehungen (und Einsatz von Computern) zu behandeln (23, 1, 17, 24, 14, 25, 22). Die Lösungsvorschläge beziehen sich generell auf relativ einfache Gußkörper bzw. sind rein theoretischer Natur (z.B. 24). Sie geben jedoch oft wertvolle Hinweise auf die grundlegenden Vorgänge bei der Entstehung der Porosität.

## 2. Vorarbeiten

Zur Vorbereitung des Vorhabens wurden Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel hatten, Grundlagen für die experimentelle Vorgehensweise zu erarbeiten.

Die Resultate dieser Vorarbeiten wurden nachfolgend wiedergegeben. Die wichtigsten Folgerungen sind:

- a) Die visuelle Bewertung ("Benotung") der Porosität ist unzureichend. Für das Vorhaben selbst mußte die Möglichkeit einer objektiven Quantifizierung der Porosität geschaffen werden (quantitative Bildanalyse).
- b) Die (objektive) Bestimmung der Dichte als Maß für die Porosität kann ergänzende Informationen liefern, ist jedoch nicht genügend aussagefähig.
- c) Bei Verwendung von gipsgebundener Formmasse besteht der Verdacht, daß Gasbildung die Erstarrungsporosität verstärkt ohne daß typische Gasporosität erkennbar ist. Der diesbezügliche Einfluß der Formmasse war im Rahmen des Vorhabens näher zu untersuchen.

## 2.1. Durchführung der Vorversuche

### 2.1.1. Probekörper

Erfahrungen aus früheren Arbeiten und Vorversuche zeigten, daß durch eine Kombination von Kugel und Zylinder (Stab) eine einfache Simulation der Verhältnisse in realen ungleichwandigen Gußstücken erfolgen kann.

Variabel sind Kugeldurchmesser, Stabdurchmesser und Länge.

Gewählt wurden: Kugeldurchmesser: 7; 10 mm

Stabdurchmesser: 2; 2,5; 3; 3,5 mm

Stablänge: 20; 30; 40 mm

Die einzelnen Abmessungen wurden teilweise miteinander kombiniert, so daß sich im Rahmen der Vorversuche 12 Versuchsmodelle (Wachsmodelle) ergaben. Die Modelle wurden an einem zentralen Einguß zu einem Gußbaum montiert. Auf diese Weise konnte mit einem Versuch unter annähernd gleichen Bedingungen, der Einfluß verschiedener stereometrischer Verhältnisse auf die Porosität getestet werden.

### 2.1.2. Formherstellung

Unter Verwendung der beschriebenen Wachsmodelle wurden nach der beim Schmuckguß üblichen Methode Formen hergestellt. Als Formmasse diente eine handelsübliche gipsgebundene Einbettmasse auf Quarz- bzw. Cristobalit-Basis. In einigen Versuchen wurde auch phosphatgebundene Einbettmasse verwendet (erhöhte thermische Beständigkeit). Die Formen wurden in üblicher Weise gebrannt (Brenntemperatur 730°C). Die Formtemperatur wurde zwischen 200°C und 700°C variiert.

### 2.1.3. Gießverfahren

Als Gießverfahren wurde das druckunterstützte statische Gießen in geschlossener Kammer (Argonatmosphäre) gewählt (4).

Schmelzmethode: Induktionsschmelzen in Grafittiegel  
Temperaturmessung: In der Schmelze vor dem Abguß, teilweise auch  
in zentralem Einguß der Form  
Druckdifferenz: 500 mbar  
Druck v.d. Gießen: 200 mbar  
nach dem Gießen: 700 mbar  
Gießtemperatur: 1000°C bis 1200°C.

#### 2.1.4. Verwendete Legierung

Als Modell-Legierung wurde Zinnbronze CuSn10 verwendet.

#### 2.1.5. Auswerteverfahren

Die Beurteilung der Porosität eines Probekörpers erfordert unterschiedliche Prüfkriterien für

- a) Gesamtanteil an Porosität (ohne Berücksichtigung von Art und Lage)
- b) Bestimmung der Art der Porosität (hierbei ist nur eine Unterscheidung von reiner Gasporosität und dendritischer Porosität möglich).
- c) Lage und Bewertung der Poren.

zu a)

Die Dichte stellt ein objektives und zuverlässiges Maß für die Porosität dar, mit Ausnahme der offenen Oberflächenporosität (9).

zu b) und c)

Beide Kriterien erfordern im vorliegenden Fall eine metallographische Untersuchung mit vorgegebenen Auswertungsrichtlinien. Eine wesentliche Aufgabe der Vorversuche war die Erstellung derartiger Richtlinien. Nachteile der metallographischen Untersuchung sind:

- a) es wird nur eine Ebene untersucht
- b) die Beurteilung wird subjektiv beeinflusst
- c) die Untersuchung ist zeitaufwendig.

Eine Alternative wäre prinzipiell die röntgenographische Prüfung. Sie erfordert jedoch bei kugelförmigen Objekten die Herstellung einer Scheibe, läßt die bei den kleinen Gußobjekten ebenfalls kleinen Poren kaum und die Art der Poren nur schwer erkennen. Die Auswertung ist ebenfalls subjektiv beeinflusst. Es wurde daher die metallographische Auswertung erprobt.

## 2.2. Versuchsergebnisse

### 2.2.1. Typische Erscheinungsbilder der Porosität und Entwicklung einer Beurteilungsmethode

Die Abb. 3-6 zeigen typische Formen der Porosität in Übersichtsaufnahmen. In der folgenden Tabelle sind die dazugehörigen Gießbedingungen aufgeführt.

Tabelle: Gießbedingungen zu Abb. 3-6

Abb.	Kugeldurchmesser mm	Stabdurchmesser mm	Stablänge mm	T <sub>K</sub> °C	T <sub>G</sub> °C
3	10	2,5	40	200	1100
4	10	3	40	600	1100
5	10	3	20	600	1100
6	10	2,5	20	400	1100

Abb. 3 zeigt typische Oberflächenlunker

Abb. 4 gibt die häufig auftretende Porosität im Übergangsbereich zwischen Kugel und Stab wieder

Abb. 5 beide Formen gemischt

Abb. 6 zeigt einen recht großen Lunker im Übergangsbereich Kugel/Stab

Abb. 7 bis 9 geben die Struktur der typischen Fehler bei stärkerer Vergrößerung wieder

Diese Fehlerbeispiele zeigen, daß zur Charakterisierung eines Gußstückes eine pauschale Bestimmung der Porosität z.B. durch die Dichte nicht ausreichend ist. Zahlreiche weitere Gießversuche zeigten, daß die Qualität eines Gußstückes durch die Angabe der Porosität in den drei Zonen Kugelrand, Kugelkern, Übergangszone + anschließender Stab beschrieben werden kann.

Die Wertung erfolgte durch Vergabe von Noten 1 bis 6. Wobei 1 die geringste und 6 die stärkste Porosität angibt. Außerdem wird der Flächenanteil des Fehlers im Schliff abgeschätzt. Zur praxisgerechten Gewichtung wurden die vergebenen Noten (N) wie folgt zur Berechnung einer Wertungszahl verwendet

$$W = s^N \times \text{Flächenanteil.}$$

Zwischen den Wertungszahlen und der jeweiligen Dichte der Gußstücke eines Gußbaumes besteht eine Korrelation (meist 2. Ordnung). In Abb. 10 und 11 sind als Beispiele jeweils die Auswertungen von mehreren Versuchen unter gleichen Bedingungen aufgeführt. Die nicht lineare Abhängigkeit der Wertung von der Dichte ist erwünscht, da bei abnehmender Dichte der negative Einfluß der Porosität auf die Qualität überproportional zunimmt.

## 2.2. Ergebnisse

In den Vorversuchen wurden unter weitgehender Konstanzhaltung anderer Faktoren im wesentlichen der Einfluß der Formtemperatur und der Gießtemperatur auf die Porosität an einigen Beispielen getestet. Die wesentlichsten Ergebnisse sind:

### 2.2.1.

Der kritischste Bereich des Gußstückes ist der Übergang zwischen den unterschiedlichen Querschnitten (Kugel-Stab) und im anschließenden Bereich des dünnen Querschnittes.



### 2.2.2.

Variation der stereometrischen Verhältnisse (Kugeldurchmesser, Stabdurchmesser, Stablänge) wirkt sich vor allem auf die Porosität im kritischen Bereich aus (Abb. 12,13).

### 2.2.3.

Ein eindeutiger Einfluß der Gießtemperatur konnte in diesen Versuchen noch nicht nachgewiesen werden. Ein Grund ist, daß die im Schmelztiegel vor dem Ausgießen gemessene Temperatur mehr oder weniger stark von der Eintrittstemperatur der Schmelze in die Form abweicht. (Einige Messungen ergaben Abweichungen bis zu 100°C). Bei weiteren Untersuchungen ist stets die Eintrittstemperatur zu messen und als Parameter zu verwenden.

### 2.2.4. Einfluß der Formtemperatur

Bereits die bisher vorliegenden Untersuchungen ergaben interessante Aspekte. Die Abb. 14 und 15 geben die Summenhäufigkeit der Gesamtbewertungszahlen von Gießversuchen mit stets den gleichen Modellkombinationen wieder. Ein flacher Anstieg der Kurve bis zu hohen Bewertungszahlen bedeutet

- a) eine im allgemeinen schlechte Qualität
- b) einen verstärkten Einfluß der stereometrischen Verhältnisse auf die Porosität.

Weitere Folgerungen können aus den Ergebnissen der Vorversuche nicht gezogen werden.

### 2.2.5.

Einige Versuche mit phosphatgebundener Einbettmasse im Vergleich zu gipsgebundener zeigen bessere Resultate. Dies würde - soweit weitere Versuche dies bestätigen - darauf hinweisen, daß die im Kontakt mit der Schmelze stattfindende thermische Zersetzung des Calciumsulfates (u.a. SO<sub>2</sub>-Bildung) auch einen deutlichen Einfluß

auf die dendritische Porosität hat (Shrinkage Porosity + Gasporosität).

### 3. Hauptuntersuchung, Versuchsdurchführung

#### 3.1. Versuchsplanung

Die durchgeführten Arbeiten lassen sich in folgende Abschnitte gliedern:

##### A) Vorstudien

- a) Auswahl geeigneter Meßmethoden für die Porosität
- b) Auswahl geeigneter Meßgrößen und Überprüfung der Eignung zur Charakterisierung der Porosität
- c) Statistische Analyse erster Meßergebnisse zur Auswahl geeigneter Auswerteverfahren
- d) Bestimmung des Einflusses von Gasporosität auf die Gesamtporosität  
Vergleich gipsgebundener mit phosphatgebundener Formmasse

##### B) Einfluß der Form der Gußstücke (Modelle) und der Verfahrensparameter auf die Porosität

- a) Modellform
- b) Anordnung der Modelle am Gußbaum  
Zusammenstellung einer größeren Zahl von Objekten zu einer gemeinsamen Gußform
- c) Gieß- und Formtemperatur
- d) Druckverhältnisse
- e) Einfluß von Erstarrungszeit etc.
- f) Abhängigkeit der verschiedenen Verfahrensparameter zueinander

##### C) Legierungseinfluß (an exemplarischen Beispielen)

#### 3.2. Experimentelles (vgl. auch 2.1.)

##### 3.2.1. Gießverfahren

Für die Versuche wurde das im Schmuck- und Dentalgußbereich häufiger benutzte druckunterstützte, statische Gießverfahren ver-

wendet. Schmelzen und Gießen erfolgen in einem gemeinsamen Kessel. Vor dem Gießen herrscht im Kessel verminderter Druck (typisch 200 mbar). Unmittelbar nach dem Einfluß der Schmelze in die Form wird der Druck auf etwa 1000 mbar erhöht.

Die Gießbedingungen im einzelnen sind:

Schmelzen: induktiv in kipprer Spule (Mittelfrequenz)

Tiegel: Grafit

Atmosphäre: Argon

Temperaturmessung: Thermoelement (NiCr/Ni), eingetaucht in die Schmelze.

### 3.3. Auswahl der Formmassen/Formherstellung

Für die Versuchsreihen wurden 2 Typen von Formmassen verwendet:

#### a) gipsgebundene Formmasse

Durch die thermische Zersetzung von Calciumsulfat unter Bildung von Schwefeldioxid ist eine Erhöhung der Gesamtporosität durch gleichzeitig mit der Erstarrungsporosität sich bildenden Gasporosität nicht auszuschließen. Der negative Einfluß der zu vermutenden Gasbildung sollte durch Vergleich mit einer

#### b) phosphatgebundenen Formmasse

ermittelt werden. Untersuchungen aus früheren Forschungsvorhaben haben gezeigt, daß bei den vorliegenden Versuchsbedingungen mit einer thermischen Zersetzung dieser Formmasse nicht zu rechnen ist. Daher ist auch keine Gasporosität zu erwarten. (Andere Ursachen für Gasporosität wie z.B. eingeschlossenes Gas aus der Atmosphäre der Gußkammer, Feuchtigkeit im Schmelzgut usw.) können aufgrund von Erfahrungen aus zahlreichen früheren Arbeiten unter den gegebenen Bedingungen ausgeschlossen werden.

Mit Ausnahme einer Versuchsreihe, die dem Vergleich beider Formmasstypen diente, wurden alle Versuche mit phosphatgebundener Formmasse durchgeführt. Eine Trennung von Erstarrungs- und Gasporosität war dadurch gewährleistet.

Die Verarbeitungsbedingungen entsprechen den Angaben der Hersteller. Details sind aus nachfolgender Aufstellung zu entnehmen.

	Gipsgebundene Formmasse	Phosphatgebundene Formmasse
Typ	Investrite	Dentsply
Hersteller	Hoben Davis	R & R
Ausbrennbedingungen	750°C/2 Std.	750°C/2 Std.
getestete Arbeitstemperaturen	200/400/600/700°C	

### 3.4. Gußmodelle

Aus bereits einleitend besprochenen Gründen wurden Kugeln mit zylindrischen "Angüssen" gewählt. Die Kugeldurchmesser betragen 7 und 10 mm, die Zylinderdurchmesser 2,5 und 3,5 mm und die Zylinderlänge variierte von 10 bis 40 mm. In der Tabelle 1 sind die verschiedenen verwendeten Kombinationen und die dazugehörenden charakteristischen Daten aufgeführt. Für einen Gießversuch wurden verschiedene Gußmodelle wie beim Feinguß kleiner Teile üblich an einem gemeinsamen Anguß befestigt und zu einer Form zusammengestellt.

Nach der gebräuchlichen Anordnung (Abb. 16) wird die Form als "Baum" bezeichnet. Die baumartige Struktur mit einem stammartigen zentralen Anguß ermöglicht in der Praxis das Gießen einer maximalen Anzahl von Teilen zu gleicher Zeit.

Alternativ kann eine Form verwendet werden, bei der die Teile an einem gemeinsamen knopfartigen Anguß befestigt sind (Abb. 17 "Igel"). Der Vorteil dieser Anordnung ist die Füllung aller befestigten Teile unter gleichen Bedingungen und ein gleichmäßigerer Materialfluß. Nachteilig ist die geringe Zahl der Teile pro Guß. In der Praxis wird daher diese Form nur in Sonderfällen und beim Gießen von Einzelstücken (Dentalguß) angewandt. Für die Versuchsarbeiten wurde überwiegend der "Igel" verwendet um homogenere Versuchsbedingungen zu erreichen. In einer Versuchsreihe wurden jedoch beide Formen hinsichtlich des Einflusses auf die Porosität miteinander verglichen.

### 3.5. Temperaturmessungen

Während des Gießvorgangs wurden an folgenden Stellen Temperaturmessungen vorgenommen:

- a) Temperatur der Schmelze im Tiegel
- b) Temperatur der Schmelze beim Eintritt in Form (am Kopf des zentralen Eingusses)

Dieser Wert wird als "wahre" Gießtemperatur bezeichnet. Er ist einem von der Gießmethode abhängigen Betrag geringer als die im Tiegel gemessene Temperatur.

- c) Temperatur der Schmelze im Zentrum einer Kugel (7 und 10 mm Ø). Diese Messung ermöglichte nicht nur die Bestimmung des Temperaturverlustes während des Fließens der Schmelze in die Form, sondern auch die Bestimmung der Liquiduszeit (= Zeit bis zum Beginn der Erstarrung) und der Soliduszeit (= Zeit bis zum Ende der Erstarrung)
- d) Temperatur der Form, gemessen im Zentrum der Formmasse

- e) Temperatur der Form in der Nähe des Hohlraums einer Kugel (10 mm  $\varnothing$ ).

Durch unterschiedliche Abkühlung in der Zeit zwischen Entnahme der Form aus dem Vorwärmofen und dem Gießbeginn können Unterschiede zwischen den beiden Meßstellen auftreten.

Die Elemente sind nur einmal zu verwenden, da während des Versuchs die Isolation zerstört wird. Der Temperaturverlauf während des Gußvorgangs wurde mit Hilfe eines Meßcomputers aufgezeichnet.

### 3.6. Messung der Porosität

#### 3.6.1. Bestimmung der Dichte

Die Dichte wurde in üblicher Weise nach dem Archimedischen Prinzip bestimmt. Sie gibt rasch einen Anhaltswert für die Porosität der Probe.

Die Dichte gibt keine Aussagen über :

- a) örtliche Verteilung der Porosität
- b) Größe und Form der Poren

Außerdem wird bei Poren, die die Oberfläche erreichen, der Meßwert durch in die Poren eindringendes Wasser verfälscht.

#### 3.6.2. Metallographische Untersuchung und Meßung der Porosität

Die Gußmodelle wurden durch Abdrehen so präpariert, daß ein Längsschliff durch das Zentrum von Kugel und Zylinder hergestellt werden konnte. Die Schliffherstellung erfolgte nach dem Einbetten in Kunstharz mit den üblichen metallographischen Methoden.

Die Voruntersuchungen hatten gezeigt, daß eine visuelle Beurteilung der Porosität am Mikroskop unzureichend ist:

- a) Die Beurteilung wird subjektiv beeinflusst.
- b) Es wurden keine für die weitere Auswertung erforderlichen numerischen Daten erhalten.

Auch die Anfertigung von Richtreihen entsprechend den ASTM-Reihen zur Bestimmung von nichtmetallischen Einschlüssen in Stählen o.ä. erwies sich als unbrauchbar. Aufgrund des ausgeprägten schwarz-weiß Gegensatzes werden die Beurteilungen anhand von Mikrofotografien durch optische Täuschungen erheblich verfälscht.

Die einzige sinnvolle Möglichkeit zur Bestimmung der Porosität war die quantitative Bildanalyse.

Die Ergebnisse der Messungen sollten folgende Anforderungen erfüllen:

- a) Bestimmung der Porosität nach Porenanteil, Porengröße und Porenform.
- b) Bestimmung der örtlichen Verteilung der Porosität und Clusterbildung.  
(Der Porenanteil im Gußstück insgesamt kann durch die Dichtemessung besser bestimmt werden, ist aber wenig aussagefähig).

Zur Bestimmung der lokalen Verteilung der Porosität wurde der Kugelquerschnitt in 9 Meßzonen eingeteilt (Abb. 18). Eine weitere, wichtige Zone, bildete der Übergang von der Kugel zum Zylinder (Anguß). Die bei der Auswertung der ersten Versuchsreihen gemachten Erfahrungen zeigten, daß für eine ausreichende Beurteilung der Gußqualität die Ergebnisse der Meßbereiche 1-7 als "Randzone" (oder kurz "Rand") zusammengefaßt werden können.

Für die endgültige Auswertung wurden daher (die teilweise zusammengefaßten) Ergebnisse

- Kugelrand (Rand) Meßbereich 1-7
- Kugelzentrum (Mitte) Meßbereich 8
- Übergang Kugel-Zylinder (Anguß, Meßbereich u)

verwendet.

Die quantitative Bestimmung der Porosität erfolgte mit dem Bildanalysensystem Vidas plus (Kontron-Zeiss) in Verbindung mit einem Zeiss-Mikroskop Axiophot. Als Standardvergrößerung wurde 100fach gewählt. Bei sehr großen Poren wurde 50fache Vergrößerung angewendet, in Einzelfällen wurden auch Mikroobjektive eingesetzt.

### 3.7. Die Meßgrößen und ihre Definition

#### 1. Mittlerer Flächenanteil $F_p$ und Volumenanteil $V_p$

Flächenanteil in % der Poren im Meßfeld. Bei Auswertung mehrerer Meßfelder:

mittlerer Flächenanteil

#### 2. Mittlere Porenfläche $A$

Mittelwert der Schnittflächen der Poren aus allen Messungen. Bei Messungen mehrerer Felder:

Gesamtmittelwert

$$A = \frac{\sum A_i}{n}$$



Bei jeder Messung wurde die zugehörige Standardabweichung bestimmt:

$$S_A = \sqrt{(A_i - A)^2 / (n-1)}$$

Es gilt:

Der Volumenanteil der Poren entspricht im Rahmen der statistischen Streuung dem Flächenanteil:  $V_p = F_p$

3. Mittelwert des maximalen Durchmessers der Schnittflächen der einzelnen Poren

(D bzw. Dmax)

$$D_{\max} = \sum D_i / n$$

$D_i$  größte Schnittlänge einer Porenfläche

n Anzahl der ausgemessenen Poren

4. Formfaktor R

R ist ein Maß für die Form. Eine perfekte Kugel (kreisförmige Schnittfläche) hat einen Formfaktor  $R = 1$ . Je stärker die Abweichung von der Kugelform und je zerklüfteter die Oberfläche der Pore ist, desto kleiner wird R. Die Bestimmung von R war im Meßprogramm enthalten; da jedoch die Porosität stets in dendritischer Form auftrat, waren die Werte für R klein und ohne Aussagekraft. Der Formfaktor wurde daher nicht in die Auswertungen einbezogen. Eine Ausnahme bildeten die Legierungen auf der Basis CuAl. Diese wurden jedoch gesondert ausgewertet.

3.8. Abgeleitete Größen

Es zeigte sich, daß die Anwendung dieser Meßgrößen für eine sinnvolle Charakterisierung der Gußqualität nicht ausreichend war.

a)

Die mittlere Porenfläche  $A$  charakterisiert nur unzureichend den Einfluß der Porengröße auf die Qualität. Der gleiche Wert für  $A$  wird erhalten, bei relativ harmlosen Poren mittlerer Größe oder auch bei Vorhandensein vieler kleiner (bedeutungsloser) und einiger weniger, aber kritischer, großer Poren.

Es wurde eine Größe  $A_S$  eingeführt, die sowohl Mittelwert als auch Streuung der Porengröße berücksichtigt.

$$A_S = A + 3.S_A$$

Entsprechend berechnet sich für den maximalen Durchmesser  $DM$  eine Größe

$$DM_S = DM + 3.S_{DM}$$

Für alle Auswertungen wurden die mit der Streuung korrigierten Größenmaße verwendet.

b)

Zur Bestimmung der Gußqualität müssen sowohl Porenanteil als auch Porengröße (z.B. als  $A_S$ ) verglichen werden.

In Anbetracht der großen Anzahl von Meßwerten und Auswertungen nach verschiedenen Gesichtspunkten erwies sich dieses Vorgehen als unzweckmäßig.

Es mußte ein Parameter entwickelt werden, der sowohl Porenanteil als auch Porengröße berücksichtigt.

Er wurde kurz als "Porosität" bezeichnet.

$$\begin{aligned} \text{Porosität (P)} &= \sqrt[3]{300000 \mu\text{m}^2 \cdot F_p/100 \cdot A_S^3 \cdot 10^{-3}} \\ \text{bzw.} &= \sqrt[3]{300000 \mu\text{m}^2 \cdot F_p/100 \cdot (A+S_A)^3 \cdot 10^{-3}} \end{aligned}$$

Zur Ableitung:

Der Porenanteil wird unter Benutzung der Meßfeldgröße ( $300\ 000\ \mu\text{m}^2$ ) in die absolute Porenfläche umgerechnet. Aus absoluter Porenfläche und maximaler Porengröße wird das geometrische Mittel errechnet.

Der Faktor  $10^{-3}$  dient der Angleichung der Zahlenwerte. (Die Größenordnung von  $F_p$  und  $P$  ist damit gleich).

Die nach obiger Formel berechnete "Porosität" stellte die für Auswertungen wichtigste Bezugsgröße dar.

In einer gesonderten Untersuchung wurden die Relationen der verschiedenen Meßgrößen zueinander untersucht.

#### 4. Probleme der Auswertung, Statistische Methoden

##### 4.1. Stereologische Fragen

Zur Charakterisierung der Porosität erschienen folgende Meßgrößen notwendig:

##### a) Volumenanteil $V_v$ der Poren

Der Gesamt-Volumenanteil läßt sich aus der Dichte ermitteln. Der wesentlich wichtigere örtlich lokalisierte Volumenanteil ergibt sich aus dem relativen Flächenanteil  $F_p$  wie er im Querschliff gemessen werden kann:

$$V_v = F_p$$

##### b) Porengröße und Größenverteilung

Die Porengröße kann sowohl durch die (mittlere) Porenfläche (Schnittfläche) als auch durch den maximalen mittleren Durchmesser (der Schnittfläche) charakterisiert werden. Die Meßgrößen wurden erfaßt und direkt (Durchmesser) oder indirekt (Porenfläche) in der abgeleiteten Meßfläche "Porosität" ausgewertet. Die Größenver-

teilung wurde durch die Einbeziehung der Standardabweichung berücksichtigt.

c) Porenform, Grenzflächendichte u.ä.

Sowohl Perimeter als auch Formfaktor wurden bestimmt. Auf eine Auswertung wurde jedoch verzichtet, da die Poren stets die charakteristische dendritische Form hatten und die genannten Meßgrößen ohne Aussagekraft waren. Eine Ausnahme machten die eutektische und übereutektischen CuAl-Legierungen, die jedoch getrennt ausgewertet werden mußten.

d) Clusterbildung

Die Verteilung der Poren über den Querschnitt des Modells ist eine wichtige Größe für die Beurteilung der Qualität. Die Einteilung des Meßfeldes in relativ kleine Segmente sollte die Bestimmung der Verteilungsform ermöglichen. Erste Auswertungen haben gezeigt, daß nur bei sehr geringer, praktisch bedeutungsloser Porosität die (wenigen, kleinen) Poren regellos verteilt sind.

Bei zunehmender Porosität treten die Poren stets in Nestern auf.

Es kann daher stets von Bildung von Clustern ausgegangen werden. Je nach Gießbedingungen und Modell treten die Cluster bevorzugt am Kugelrand in der Kugelmitte oder am Anguß auf. Bei der Auswertung müssen daher diese 3 Zonen getrennt betrachtet werden. Die Zusammenfassung entsprechender Segmente zu diesen Zonen ermöglichte dies. Eine weitere Unterteilung, wie sie aufgrund der Einteilung des Meßfeldes in Segmente möglich gewesen wäre, hätte die ohnehin große Datenflut vergrößert ohne weitere sinnvolle Aussagen zu ergeben.

b)

Die stereologische Meßgröße Kontiquität (bzw. Kontinuität) (als Maß für die Skelettbildung) konnte nach eingehender Prüfung nicht zur Anwendung kommen. Kontiquität ist zur Kennzeichnung des Grades der Skelettbildung einer Phase geeignet. Im vorliegenden Fall von

Porenclustern sind die zur Bestimmung notwendigen Voraussetzungen nicht gegeben.

#### 4.2. Statistische Auswertungen

Bereits die Auswertung von Zwischenergebnissen zeigte, daß eine Auswertung der großen Anzahl von stark streuenden Daten nur mit statistischen Methoden möglich ist. Es waren im wesentlichen 3 Problemkreise zu berücksichtigen.

- a) Bestimmung der Verteilungsform der Meßwerte als Grundlage für alle weiteren Auswertungen
- b) Ermittlung signifikanter Einflüsse
- c) Signifikanz und Größe der Korrelation von Einflußgröße und Porosität

zu a).

Die Verteilungsform wurde exemplarisch mit dem Kolmogorov-Smirnow-Test in einigen geeigneten homogenen Meßreihen geprüft. Es wurde festgestellt, daß die Meßwerte einer logarithmischen Normalverteilung folgen. Diese wurden daher für alle weiteren Auswertungen als zutreffend herangezogen (vgl. 5.1.6.).

zu b):

Die Signifikanz von Einflüssen wurde mit Hilfe der Varianzanalyse geprüft.

Die Methode ermöglicht es sowohl Hauptwirkungen einer Einflußgröße als auch Wechselwirkungen mehrerer Faktoren zu erkennen. Letztere sind in vielen Fällen von entscheidender Bedeutung.

Als Grenzwert wurde durchwegs eine Irrtumswahrscheinlichkeit für Annahme "es liegt eine Wirkung vor" von  $p = 0,05$  (5%) angesehen. Ergebnisse mit  $p \leq 5 \%$  werden als signifikant bezeichnet.

(In Kurzform wird diese Irrtumswahrscheinlichkeit auch als Signifikanz bezeichnet.)

zu c):

Die Abhängigkeit zweier Parameter (eine Meßgröße für die Porosität und ein Verfahrensparameter) wurde durch Korrelationsanalyse überprüft.

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten sind jedoch bei geringer Anzahl von Meßwerten (etwa  $< 100$ ) nur bedingt aussagefähig. Es mußte jeweils bei gegebener Anzahl von Meßwerten geprüft werden, ob ein berechneter Korrelationskoeffizient noch eine signifikante Korrelation beinhaltet.

Zu diesem Zweck wurden analog zur Varianzanalyse die Irrtumswahrscheinlichkeiten berechnet (Signifikanzen, Grenzwert  $< 0,05$ ). In einigen Fällen wurde der Einfluß mehrerer Parameter durch Anwendung der multiplen Korrelationsanalyse überprüft. Bei signifikanter Korrelation wurde in einzelnen Fällen der lineare Regressionskoeffizient zur Quantifizierung des Einflusses berechnet.

Alle Berechnungen wurden unter Verwendung des Statistikprogramm-pakets PSTAT durchgeführt. Mit diesem Programm konnte gleichzeitig die Datenerfassung und Aufbereitung erfolgen.

## 5. Versuchsergebnisse

### 5.1. Vergleich der verschiedenen Meßgrößen

Zu Beginn der Auswertungen war festzustellen, inwieweit die gewählten Meßgrößen zur Charakterisierung der Gußqualität geeignet sind.

Insbesondere war zu prüfen, ob die zu definierende Meßgröße "Porosität" ein brauchbares Maß darstellt. Diese Größe berücksichtigt sowohl den relativen Porenanteil (Porenanteil in %) und die Porengröße (einschließlich deren Streuung vgl. 3.7). Dadurch sollte vermieden werden, daß getrennte Auswertungen z.B. für Porengröße und Porenanteil notwendig werden. Dies hätte zu einer unübersichtlichen Datenflut geführt.

#### 5.1.1. Relation Dichte/Porosität bzw. Dichte/rel. Porenanteil

Für die Auswertung wurde anstelle der Dichte eine nach folgender Gleichung aus der Dichte errechnetes relatives Porenvolumen Pd (Porosität aus Dichte, %) verwendet.

$$Pd = (1-d/d_0) \cdot 100 (\%)$$

Pd Porosität (Vol.%)

d Dichte der Probe

d<sub>0</sub> Dichte des porenfreien Materials

Für die Legierung CuSn10 wurde d<sub>0</sub> = 8,93 g/cm<sup>3</sup> verwendet.

Diese abgeleitete Meßgröße ist im Vergleich mit den übrigen Meßgrößen anschaulicher.

Die Abb. 19 und 20 zeigen die Abhängigkeit der Porosität von der aus der Dichte berechneten Porosität. Es besteht zwar eine signifikante Korrelation, die Korrelationskoeffizienten sind allerdings relativ niedrig (R = 0,50 bzw. 0,55). Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Dichte nur den Porenanteil jedoch nicht

die Porengröße berücksichtigt. Die Streuung der Werte steigt mit zunehmender Porosität erheblich.

Für die Beziehung rel. Porenanteil (%) = f(Pd) wurden die linearen Regressionskoeffizienten berechnet.

$$\text{rel. Porenanteil} = 1,08 \text{ Pd} + 0,34$$

(Abb. 21 und 22)

Mit relativ guter Näherung ergibt sich, daß im Mittel der aus der Dichte ermittelte Porenanteil (%) dem aus der Schnittflächenmessung an der Kugel ermittelten Anteil entspricht.

(Umrechnungsfaktor ca. 1).

#### 5.1.2. Relation Porosität/rel. Porenanteil

(Abb. 23 und 24)

Nach der Definition der Meßgröße "Porosität" muß eine gewisse Korrelation zum relativen Porenanteil bestehen. Die aus den Abb. 23 und 24 (als Beispiele ersichtlichen Abweichungen und Streuungen sind darauf zurückzuführen, daß die Porosität zusätzliche Einflußgrößen berücksichtigt.

#### 5.1.3. Mittlerer, max. Porendurchmesser / Porosität bzw. rel. Porenanteil

Für diese Untersuchung wurden stets die Quadrate des Porendurchmessers verwendet um einen adequaten Vergleich mit auf Flächenmessung beruhenden Meßwerten zu ermöglichen. Zwischen Porosität und Porendurchmesser (im Quadrat) besteht eine recht gute Korrelation (Abb. 25-28).

Die Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,85 und 0,96.



Damit kann gezeigt werden, daß die definierte Meßgröße Porosität neben dem relativen Porenanteil auch die Porendurchmesser (Porengröße) ausreichend berücksichtigt.

Zwischen relativem Porenanteil (%) und Porengröße besteht eine schwach ausgeprägte Korrelation ( $R$  ca. 0,5 vgl. Abb. 29 und 30).

#### 5.1.4. Multiple Korrelation

Obwohl zwischen den mit "Porosität" bezeichnete abgeleiteten Meßgrößen und den Flächenanteilen bzw. dem Quadraten der maximalen Durchmesser bereits eine gute Korrelation besteht, ( $R > 0,70$ ) erhöht sich die Korrelation zwischen Porosität unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Flächenanteile und der maximalen Durchmesser(quadrate). In nachfolgender Tabelle sind die entsprechenden Korrelationskoeffizienten der Einzelkorrelation und der multiplen Korrelation aufgeführt.

Korrelationskoeffizienten bei Einzel- und multipler Korrelation zwischen Porosität und Flächenanteil bzw. maximale Durchmesser

Meßstelle	Korrelationskoeffizienten		
	R1	R2	Rm
Kugel gesamt	90	82	92
Kugelmitte	93	87	96
Kugelrand	89	89	96
Anguß	75	80	83

Korrelationskoeffizient für

R1 (%) Porosität = f (Porenanteil)

R2 (%) Porosität = f (Porendurchmesser)

Rm Multiple Korrelation Porosität = f (Porenanteil, Durchmesser)

#### 5.1.5. Folgerungen

a)

Die Dichte ist lediglich als sehr grobes Maß für die Güte eines Gußstückes zu betrachten.

Die Korrelation zwischen Dichte und den übrigen Meßgrößen für die Porosität der Kugel ist signifikant jedoch nicht sehr hoch. Auf Fehler im besonderen kritischen Bereich des Angusses spricht die Dichte nicht an. Dichtwerte können daher nur sehr beschränkt zur Beurteilung herangezogen werden.

b)

Die übrigen Meßgrößen (Flächenanteil, maximaler Durchmesser, Porosität) stehen in Korrelation zueinander und können daher auch wahlweise zur Auswertung verwendet werden.

Die abgeleitete Meßgröße "Porosität" berücksichtigt sowohl Porenanteil als auch Porengröße und gibt damit das zuverlässigste Beurteilungskriterium für die Qualität.

#### 5.1.6. Prüfung der Verteilungsform der Meßwerte

Der Einsatz der meisten statistischen Prüfverfahren geht von einer (zumindest ungefähren) Normalverteilung der Meßwerte aus.

Es war daher zunächst zu prüfen, ob diese Voraussetzungen bei den Versuchen und Messungen gegeben ist. Bei einer Meßreihe mit ausreichend vielen Meßwerten (unter gleichen Bedingungen) wurde die Verteilungsform geprüft. Als Prüfmethode wurde der Kolmogorov-Smirnow-Test verwendet.

In Tabelle 2 sind die Signifikanzniveaus der Testgröße für das Vorliegen einer Normalverteilung aufgeführt. Es wurden 2 Meßreihen mit 2 Modellen ausgewertet. Der Test wurde auf die Originalwerte

und auf die logarithmierten Meßwerte angewandt. Es wurden die verschiedenen Meßparameter geprüft. In einem weiteren Rechengang wurden für die beiden Modelle eine gemeinsame Auswertung vorgenommen, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Einfluß der Modelle unter den gegebenen Bedingungen erkennen ließ.

Das Ergebnis ist:

Setzt man einen Grenzwert von 0,10 für die Signifikanz an, so kann für die Mehrzahl der Meßreihen bzw. Meßgrößen eine Normalverteilung nicht ausgeschlossen werden.

Bei der Prüfung der logarithmierten Werte ist die Annahme einer Normalverteilung in jedem Fall gerechtfertigt. Insbesondere sind die bei den Auswertungen vorzugsweise benutzten Kennwerte für die Porosität (P) logarithmisch normalverteilt.

Fazit:

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe zeigen, daß die Verteilung der Meßwerte sehr gut durch eine logarithmische Normalverteilung angenähert werden kann.

Bei den Auswertungen wurden daher die verschiedenen statistischen Tests mit den logarithmierten Werten durchgeführt. Dementsprechend wird anstelle des arithmetischen Mittelwerts stets das geometrische Mittel verwendet.

## 5.2. Einfluß des Formmassetyps auf die Porosität

Verglichen wurden eine gipsgebundene und eine phosphatgebundene Formmasse.

Für die Versuche wurden 2 Modelle verwendet:

	Modell 5	Modell 8
Kugeldurchmesser (mm)	10	7
Zylinderdurchmesser (mm)	3,5	2,5
Zylinderlänge (mm)	30	30

Die Gießbedingungen waren:

Formtemperatur: 400°C

Gießtemperatur: 1100°C

### 5.2.1. Varianzanalyse

Insgesamt wurden 34 Versuchsstücke vermessen und ausgewertet. Sie wurden je zur Hälfte unter Verwendung der beiden Typen Formmasse gegossen. Varianzanalytisch wurde auf signifikante Einflüsse von Formmasse und Modell (Kugeldurchmesser) geprüft.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Signifikanzwerte  $< 5\%$  wurden als Bestätigung eines Einflusses angesehen. Die Angaben in Tabelle 3 zeigen, die Formmasse stets einen hochsignifikanten Einfluß hat. Demgegenüber tritt der Einfluß des Modells (hier im wesentlichen des Kugeldurchmessers) völlig zurück.

Der bei Versuchen mit einer Formmasse fast stets signifikante Einfluß des Modells (s. weitere Auswertungen) kann hier nicht beobachtet werden.

Allerdings treten u.a. in der Kugelmitte und statistisch gesicherte Wechselwirkungen zwischen Formmasse und Modell auf.

### 5.2.2. Vergleich der Meßwerte

Die Abb. 31-33 zeigen den Vergleich vom (geometrischen) Mittelwert und Streubereich der Meßgrößen, Porosität, relativer Flächenanteil und maximaler Porendurchmesser für beide Formmassen.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte unter Verwendung der logarithmischen Normalverteilung. Die Mittelwerte entsprechen dem geometrischen Mittel. Die Streubereiche wurden mit statistischer Sicherheit von 95 % berechnet. Die Verwendung gipsgebundener Formmasse führt generell zu größerer Porosität. Die Meßgröße "Porosität" der Kugel nimmt bei gipsgebundener Formmasse etwa um den Faktor 2 zu.

Die Porosität des Angusses erhöht sich bei Verwendung der gipsgebundenen Formmasse gegenüber der phosphatgebundenen etwa um das zehnfache.

Relativer Porenanteil und maximaler Porendurchmesser zeigen eine ähnliche, jedoch etwas schwächer ausgeprägte Tendenz. Der Einfluß der Formmasse auf die Porosität von Kugelmittel bzw. - Rand ist abhängig vom Kugeldurchmesser des Modells (Wechselwirkung Formmasse/Modell).

Formmasse	Porosität (Mittelwerte)			
	Kugel 10 mm Ø		Kugel 7 mm Ø	
	Mitte	Rand	Mitte	Rand
phosphatgeb.	0,9	0,5	1,5	0,7
gipsgebunden	3,4	1,0	1,5	0,8

Diese Unterschiede erklären sich durch die unterschiedliche Wärmekapazität der Gußteile. Eine höhere Wärmekapazität führt zu einer stärkeren Aufheizung der Formmasse. Die Zersetzung von Calciumsulfat wird dadurch begünstigt. Freiwerdendes Schwefeldioxid führt zu verstärkter Gasporosität.

Um den störenden Einfluß von Gasporosität auszuschalten, wurden alle weiteren Versuche mit phosphatgebundener Formmasse durchgeführt.

### 5.3. Übersicht über den Einfluß der Verfahrensparameter

Einen ersten Überblick gibt die Varianzanalyse. Zur Auswertung wurden die logarithmischen Werte der Porosität herangezogen. In Tabelle 4 sind signifikante Wirkungen und Wechselwirkungen der Verfahrensparameter angegeben. Es sind jeweils die Irrtumswahrscheinlichkeiten  $P$  angegeben für die Entscheidung "Es ist ein gesicherter Einfluß des Parameters oder der Parameterkombination vorhanden". Die Entscheidung ist umso eindeutiger, je kleiner  $P$  ist. Im folgenden wird  $P$  kurz, jedoch nicht ganz korrekt als Signifikanz bezeichnet. Für  $P < 0,05$  (5%) wird ein signifikanter Einfluß angenommen. Die statistische Sicherheit der Aussage beträgt dann  $S = 1-p = 95$  %. In der Tabelle 4 sind lediglich signifikante Einflüsse ( $p < 0,05$ ) durch Angabe des  $p$ -Wertes gekennzeichnet. (Vermutete Einflüsse mit  $p < 0,10$  sind in Klammern angegeben). Kein Eintrag bedeutet daß kein gesicherter Einfluß vorliegt. Wechselwirkungen sind nur bis zu 3 Faktoren angegeben. Die Deutung mehrfacher Wechselwirkungen ist schwierig und mit vielen Unsicherheiten behaftet. In den Abb. 34-37 sind die Ergebnisse graphisch für die Hauptwirkungen und zweifachen Wechselwirkungen dargestellt. Markiert sind jeweils signifikante Felder. Mit Ausnahme des Einflusses der Gießtemperatur selbst wurde die Auswertung für die Gesamtwerte für niedrige bzw. hohe Gießtemperaturen getrennt durchgeführt. Bei der ausgewerteten Versuchsreihe wurden die Parameter wie folgt variiert.

Gießtemperatur Tg: 1100 / 1200°C  
Formtemperatur Tk: 200/400/600/700°C  
Kugeldurchmesser Kd: 7/10 mm  
Zylinderdurchmesser Ad: 2,5/3,5 mm  
Zylinderlänge Al: 20/30/40 mm

(Die Formparameter wurden zu 12 verschiedenen Modellen kombiniert).

Die Auswertung ergibt zusammengefaßt:

a)

Die Formtemperatur beeinflusst die Porosität der Kugel (Gesamt, Rand und Mitte) mit Sicherheit. Der Anguß weist nur bei niedriger Gußtemperatur einen gesicherten Einfluß der Formtemperatur direkt auf.

b)

Die Gießtemperatur beeinflusst die Porosität der Kugelmitte direkt. Wechselwirkungen werden vermutet, lassen sich aber nicht mit Sicherheit nachweisen.

Für Kugelrand und Anguß läßt sich kein direkter Einfluß (Hauptwirkung) der Gießtemperatur nachweisen.

c)

Bei den Formparametern zeigt der Kugeldurchmesser den stärksten unmittelbaren Einfluß.

Ebenso wirkt sich der Zylinderdurchmesser auf die Porosität der Kugel direkt aus. Die Zylinderlänge beeinflusst den Kugelrand nur im Zusammenwirken mit der Formtemperatur bzw. dem Kugeldurchmesser.

d)

Bei der Beurteilung der Porosität des Angusses sind stets die Wechselwirkungen mit anderen Parametern zu beachten. Die Verhältnisse sind unübersichtlicher und die Streuung der Meßwerte ist größer.

Bei niedrigerer Gießtemperatur zeigen sich Einflüsse am deutlichsten.

Die Varianzanalyse ist nur in der Lage einen groben Überblick zu geben. Es wird nur festgestellt, ob signifikante Einflüsse vorhanden sind. Über die Größenordnung in der sie sich bewegen wird nichts ausgesagt.

In Tabelle 5 sind die geometrischen Mittelwerte in Abhängigkeit von den verschiedenen Parametern und das dazugehörige Verhältnis zwischen Größt- und Kleinstwert aufgeführt. In Klammern gesetzte Verhältniswerte zeigen an, daß die Unterschiede nicht statistisch gesichert sind. Neben den Hauptwirkungen sind zwei Beispiele für Wechselwirkungen auf die Porosität des Angusses aufgeführt. Sie zeigen deutlich, daß häufig das Zusammenwirken verschiedener Faktoren ausschlaggebend für die Gußqualität ist.

Die Einflüsse der einzelnen Faktoren und ihre Wechselwirkungen sind daher im Detail zu untersuchen (s. nachfolgende Abschnitte).

Eine weitere Methode zur Ermittlung von Wirkungen ist die Bestimmung der Korrelation zwischen Einflußgröße und Porosität.

In folgender Tabelle 6 sind für 2 Modelle die Korrelationskoeffizienten und die dazugehörigen Signifikanten für die Abhängigkeit der Porosität von einigen Parametern aufgeführt. Die Auswertungen wurden gesondert für 2 Modelle durchgeführt.

Wechselwirkungen können mit der gewählten Auswertemethode nicht erkannt werden, die Ergebnisse können nur Tendenzen aufzeigen. Bei



Modell a) mit der kleineren Kugel erhöht steigende Gießtemperatur die Porosität der Kugel. Für den Anguß zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Allerdings ist die Aussage nicht mehr ausreichend statistisch gesichert ( $p > 5 \%$ ).

Die Formtemperatur hat dagegen keinen signifikanten Einfluß.

Bei dem Modell mit der größeren Kugel (Modell b) liegen die Verhältnisse anders. Hier hat vor allem die Formtemperatur Einfluß: Je höher sie ist, desto geringer ist die Porosität der Kugel bzw. ihrer Teile und umso größer ist die Porosität des Angusses.

Diese Ergebnisse gelten jedoch nur im ausgewerteten Temperaturbereich von 200-600°C (vgl. 5.4.1.).

#### 5.4. Einfluß und Form- und Gießtemperatur

##### 5.4.1. Formtemperatur

In Abb. 38 ist summarisch der Einfluß der Formtemperatur auf die Porosität der einzelnen Bereiche eines Gußteils dargestellt.

(Mittelwerte der Porosität aufgetragen über die am Ofen eingestellte Soll-Temperatur).

Im Bereich zwischen 200 und 600°C nimmt mit steigender Temperatur die Porosität der Kugel (besonders der Kugelmitte) deutlich ab und die Porosität des Angusses leicht zu. Über 600°C erhöht sich die Porosität in jedem Fall. Für die Gesamtqualität des Gusses dürfte das Optimum für die Formtemperatur zwischen 500 und 600°C liegen. Zu niedrige und zu hohe Formtemperaturen sind ungünstig.

Dieser Untersuchungsbefund sollte detaillierter betrachtet werden. So zeigt sich am Beispiel der Porosität des Angusses, daß sich eine zu hohe Formtemperatur besonders bei niedriger Gießtemperatur schädlich auswirkt (Abb. 39).

Einen wesentlichen Einfluß hat die Zylinderlänge (wiederum auch beeinflusst von der Gießtemperatur, Abb. 40 und 41).

Folgerungen zur Verminderung der Porosität des Angusses sind:

- a) die günstigste Formtemperatur zur Verminderung extremer Porosität dürfte bei 500-600°C liegen
- b) sehr kurze Zylinder sind zu vermeiden. Hier sind Variationen in Form- und Gießtemperatur besonders kritisch.
- c) Höhere Gießtemperaturen sind etwas günstiger. Da sie jedoch die Qualität der Kugel in umgekehrter Weise beeinflussen, kann hier nur ein Kompromiß gesucht werden.

Die Abb. 42-46 geben den Einfluß der Formtemperatur auf die Dichte bzw. die Porosität der einzelnen Teile eines Modells mit einem Kugeldurchmesser von 10 mm wieder. Es sind die einzelnen Meßwerte eingezeichnet. Die Formtemperatur wurde unmittelbar vor dem Gießvorgang in der Formmasse gemessen. Die Dichte steigt mit zunehmender Formtemperatur bis 600°C an. Dies entspricht einer Verringerung der Porosität. Allerdings streuen die Werte stark.

Die Porosität der Kugel (gesamt, als auch nach Mitte und Rand getrennt) nimmt mit zunehmender Formtemperatur ab. Wegen der großen Streuung der Meßwerte können wiederum nur mit Hilfe der Statistik Trends angegeben werden. Mit ähnlich großer Streuung zeigt der Anguß eine mit der Formtemperatur zunehmende Porosität. In Abb. 47 sind Tendenzen (Regressionsgerade) ohne Meßpunkte zusammengefaßt.

Entsprechend einer Vorauswertung sollte bei kleinen Kugeldurchmessern die Formtemperatur keinen oder nur einen kleinen Einfluß auf die Porosität der Kugel haben.

In Abb. 48 ist die Abhängigkeit der Dichte von der Formtemperatur für ein Modell mit 7 mm Kugeldurchmesser dargestellt.

Es zeigt sich hier zwar ebenfalls eine Tendenz zu höheren Dichtewerten (geringerer Porosität) bei höherer Formtemperatur, diese ist jedoch geringer als bei dem Modell mit 10 mm Kugeldurchmesser. Bei Betrachtung der Einzelwerte fällt außerdem auf, daß ab etwa 500°C die Streuung der Meßwerte deutlich kleiner wird. Trotz der im Mittel nur wenig höheren Dichte ist in diesem Temperaturbereich wegen der größeren Gleichmäßigkeit mit einem besseren Gießergebnis zu rechnen.

Der ungünstige Temperaturbereich über 600°C wurde bei diesen Versuchen nicht mehr berücksichtigt.

#### 5.4.2. Einfluß der Gießtemperatur

Ein Einfluß der Gießtemperatur auf die Porosität ist aufgrund erster Auswertungen (vgl. 5.3.) vor allem bei kleinem Kugeldurchmesser zu erwarten.

Dies zeigt der Vergleich von Abb. 49 mit Abb. 50.

Trotz der großen Streuung läßt sich bei der 7 mm Kugel eine abnehmende Tendenz der Dichte mit steigender Gießtemperatur feststellen.

Der Korrelationskoeffizient beträgt - 41%. Die Korrelation ist statistisch gesichert ( $p = 0,005$ ).

Bei der 10 mm-Kugel ist die Korrelation zwischen Gießtemperatur und Dichte nicht mehr gesichert.

Die Abb. 51 - 54 geben den Einfluß der Gießtemperatur auf die Porosität der verschiedenen Bereiche eines Modells mit einer 7 mm Kugel wieder.

Während Kugelrand, Kugelmitte und demzufolge die Kugel gesamt mit zunehmender Gießtemperatur im Mittel an Porosität zunehmen, läßt sich für den Anguß gleichartiger Temperatureinfluß nur vermuten.

Auffallend ist wiederum, daß bei hoher Gießtemperatur nicht nur die Porosität der Kugel im Mittel höher, sondern daß in diesem Temperaturbereich auch die Streuung der Werte größer ist. Die Fertigungsqualität ist ungleichmäßiger.

Insgesamt ist der Einfluß der Gießtemperatur direkt auf die Porosität geringer als die Wirkung der Formtemperatur. In Wechselwirkung mit anderen Parametern ist der Einfluß der Gießtemperatur durchaus nachweisbar (vgl. Abb. 40 und 41).

#### 5.4.3. Folgerungen

Unter Berücksichtigung aller z.T. gegensätzlichen Einflüsse von Form- und Gießtemperatur bei verschiedenen dimensionierten Modellen erscheint als günstigster Kompromiß:

- a) Formtemperatur als wesentlichster Faktor:  
500 bis 600°C
- b) Gießtemperatur relativ niedrig:  
1050-1100°C

#### 5.5. Einfluß der Modellform

##### 5.5.1. Vorbemerkungen

Zur Beschreibung der verwendeten Gießmodelle genügen 3 Parameter:

Kugeldurchmesser:  $K_d$

Zylinderdurchmesser:  $A_d$  und

Zylinderlänge  $A_l$ .

Die Ergebnisse der Varianzanalyse geben einen ersten Überblick über signifikante Einflüsse vgl. Abb. 34 - 37.

Neben den Hauptwirkungen der Formparameter existieren zahlreiche Wechselwirkungen zweier Form- und Gießparameter (besonders ausgeprägt bei der Porosität des Angusses).

Eine erste Auswertung der Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen geben die Abb. 55 bis 58 wieder.

Es ist daraus ersichtlich, daß - wie zu erwarten war - die Porosität insgesamt mit dem Kugeldurchmesser zunimmt. Der Zylinderdurchmesser hat einen geringeren Einfluß. Die Zylinderlänge beeinflusst die Porosität der Kugelmitte negativ, die des Angusses dagegen positiv. Demzufolge kann ein längerer Anguß durchaus einen positiven Einfluß auf die Gußqualität haben.

Abb. 58 gibt eine detaillierte Auswertung über den Einfluß von Zylinderlänge auf die Porosität des Angusses unter Berücksichtigung von Kugel- und Zylinderdurchmesser.

Es ist daraus ersichtlich, daß die Zylinderlänge in Abhängigkeit der zusätzlichen Parameter sich unterschiedlich auswirkt. Insgesamt läßt sich nur feststellen, daß ein längerer Zylinder für die Porosität des Angusses einen eher positiven Einfluß hat. Die Wirkung von Gieß- und Formtemperatur wurde dabei nicht berücksichtigt.

Um aussagefähigere Daten zu erhalten, werden im folgenden detaillierte Auswertungen vorgenommen.

## 5.5. Einfluß des Verhältnisses Volumen/Oberfläche (Formfaktoren)

### 5.5.2. Übersicht

Es ist zu vermuten, daß das Volumen/Oberflächenverhältnis des zu gießenden Teils einen wesentlichen Einfluß auf die Porosität hat. Nach Literaturangaben ist die maßgebende Größe das Quadrat des Volumen/Oberflächenverhältnisses ( $V/O$ ) des Teils.

Für eine systematische Auswertung wurden Formfaktoren (R) eingeführt. Die Faktoren R1 und R2 geben Volumen/Oberflächenverhältnisse wieder:

$$R_1 = (V/O)^2 \text{ der Kugel}$$

$$R_2 = (V/O)^2 \text{ des gesamten Gußstückes}$$

Zur Beurteilung des Einflusses des Zylinders muß neben dem längenunabhängigen V/O-Verhältnisses die Zylinderlänge berücksichtigt werden, wie zahlreiche Ergebnisse aus früheren Untersuchungen zeigten.

Es wurde daher der Formfaktor des Zylinders wie folgt definiert:

$$R_3 = \frac{(V/O)^2}{l}$$

(Das Nachfließen der Schmelze wird umso stärker behindert, je kleiner das Verhältnis V/O und je größer die Länge ist).

Einen entscheidenden Einfluß auf die Porosität dürfte das Verhältnis der Formfaktoren von Kugel (R1) und Zylinder (R3) haben:

$$R_4 = R_1/R_3$$

Die Kennzahl R4 dürfte von größerem Interesse sein, da sie den Einfluß von Querschnittsänderungen innerhalb eines Gußstückes erfaßt.

Die gesamten vorliegenden Meßergebnisse wurden zur ersten Orientierung mit Hilfe der Korrelationsanalyse ausgewertet. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten sind in Tab. 7 aufgeführt. Die Korrelationskoeffizienten sind insgesamt relativ niedrig, jedoch ist bis auf 2 Fälle eine Korrelation signifikant ( $S = 0,95$ ). Die niedrigen Werte sind u.a. auch dadurch bedingt, daß für eine

erste Übersicht der Einfluß weiterer Faktoren (z.B. Guß- und Formtemperatur nicht berücksichtigt wurde).

Die Folgerungen sind:

- a) Die positive Korrelation zwischen  $R_1$  (Kugel) und Porosität war zu erwarten vgl. 5.5.1..
- b) Der direkte Einfluß des Formfaktors des Zylinders ist gering und im Falle des Angusses ohne Berücksichtigung der Arbeitstemperatur nicht signifikant.

Erst bei hoher Gieß- und niedriger Formtemperatur zeigt der Formfaktor  $R_3$  einen deutlichen Einfluß (Abb. 59). Kleinerer Zylinderdurchmesser mit kürzerer Länge verstärkten hier die Porosität deutlich. Die Abhängigkeit ist exponential.

Die deutlichste Wirkung zeigt der Faktor  $R_4$ . Dieser Faktor stellt eine Kombination der verschiedenen Abmessungen dar und berücksichtigt die Querschnittsänderungen. Der Faktor  $R_2$  für das Gesamtmodell ist von geringerem Aussagewert, da er keine Informationen über die Modellgestaltung enthält.

An einigen Beispielen wurde die Abhängigkeit der Porosität von den Formfaktoren und gleichzeitig den Arbeitstemperaturen unter Anwendung der multiplen Regression geprüft.

Für die Porosität (logarithmisch) der Kugel (gesamt) ergab sich z.B. ein signifikanter Effekt von  $R_4$  und  $R_1$  jedoch kein gesicherter Effekt von Gieß- und Formtemperatur. D.h. das Ergebnis der Varianzanalyse, wonach die beiden Temperaturen keine signifikante Hauptwirkung zeigen, wird bestätigt. Wechselwirkungen können mit dieser Methode nicht festgestellt werden. Die (Haupt-)

Wirkung der Formfaktoren ist dominant, wobei  $R_4$  wiederum den größten Einfluß hat, die zusätzliche Berücksichtigung von  $R_1$  bewirkt eine geringere Verbesserung der Korrelation:

Faktor	Korrelations- koeffizient
$R_4$	0,2832
$R_1 + R_4$	0,2919

Die Regressionsgleichung lautet:

$$k = 0,43 R_4 + 0,22 R_1 - 0,82$$

Für den Anguß ergeben sich andere Verhältnisse:

Die Gieß- und Formtemperatur und der Formfaktor  $R_4$  beeinflussen die Porosität mit etwa der gleichen Signifikanz.

Der Einfluß jeder Größe einzeln (besonders der Formfaktoren) ist an der Grenze der Nachweisbarkeit.

Faktor	Korrelationskoeffizient
Formtemperatur	0,130
Form- und Gießtemperatur	0,1739
zusätzlich $R_4$	0,2052

Gleichung:

$$a = 0,0029 TF - 0,0041 TG + 0,486 R_4 + 5,1$$

TF = gemessene Formtemperatur

TG = gemessene Gießtemperatur

Für eine genauere Auswertung ist eine Berücksichtigung der Arbeitstemperaturen notwendig.



### 5.5.3. Einfluß der Formfaktoren in Abhängigkeit von Gieß- und Formtemperatur

Ausgewertet wurden Versuche mit Formtemperaturen von 200 bis 700°C und Gießtemperaturen von 1100 und 1200°C (jeweils Sollwerte). Der Einfluß des Volumen/Oberflächenverhältnisses der Kugel ( $R_1$ ) ohne Berücksichtigung des Angusses ist nicht unter allen Bedingungen gegeben. Die Abb. 60 und 61 zeigen einige Beispiele. Bei einer Formtemperatur von 700°C läßt sich eine schwache jedoch gesicherte Abhängigkeit der Porosität von  $R_1$  (und damit vom Kugeldurchmesser) nachweisen. Bei 400°C Formtemperatur ist ein Einfluß von  $R_1$  (ohne Berücksichtigung der Zylinderabmessungen) nicht mehr feststellbar. Die Abhängigkeit der Porosität der Kugel bzw. ihrer Teile (Rand und Mittel vom Formfaktor  $R_4$  ist in den Abb. 62-82 dargestellt. Versuchsreihen mit nicht signifikanten Korrelationen wurden weggelassen. Trotz der starken Streuung der Meßwerte ergibt sich in der überwiegenden Anzahl der Fälle eine statistisch gesicherte annähernd lineare Korrelation zwischen Porosität und Formfaktor  $R_4$ . Wie der Vergleich von Abb. 78 mit Abb. 79 zeigt, ist allerdings in manchen Fällen die Anpassung besser wenn die Porosität im Logarithmus aufgetragen wird. Es wird vermutet, daß bei Variation des Formfaktors generell eine exponentiale Abhängigkeit zutrifft.

Ein Vergleich der Regressionsgeraden am Beispiel einer Versuchsreihe zeigt, daß die Kugelmitte stärker vom Formfaktor  $R_4$  beeinflusst wird als der Rand (Abb. 83).

Eine genauere Analyse der Korrelationskoeffizienten ergibt, daß die Formtemperatur einen deutlichen Einfluß hat.

Dies geht aus den Abb. 84 und 85 hervor. In diesen Abbildungen ist anstelle der Korrelationskoeffizienten die Signifikanz der Koeffizienten aufgetragen. Als Schwelle wurde, wie bei allen Auswertungen  $p = 0,05$  gewählt. Diese Darstellung hat den Vorteil,

daß die Korrelation von Versuchsreihen unterschiedlicher Anzahl von Meßwerten miteinander verglichen werden kann. (Direkter Vergleich der R-Werte führt in diesem Fall zu Fehlschlüssen).

Bei hoher Formtemperatur läßt sich keine signifikante Korrelation zwischen Randporosität und Formfaktor mehr nachweisen, während der Kern der Kugel in jedem Fall durch den Formfaktor beeinflusst wird.

Die Korrelation ist stets positiv: je größer  $R_4$  wird desto größer ist die Porosität.

Während die Korrelation eine Aussage über die Qualität der Abhängigkeit zweier Variablen macht ist der Regressionskoeffizient bei einem vermuteten linearen Abhängigkeit

$$\text{Porosität} = a + b (R_4)$$

ein Maß für die quantitative Beziehung.

Die Koeffizienten  $b$  wurden bestimmt, sie sind jedoch wegen der großen Streuung der Meßwerte mit einem erheblichen Fehler behaftet und können daher nur Tendenzen aufzeigen. In diesem Sinne ist die Abb. 86 zu verstehen. Es zeigt sich, daß der Einfluß des Formfaktors  $R_4$  auf die Kernzone des Gußstücks mit zunehmender Formtemperatur größer wird, während die Randzone weniger beeinflusst wird.

Bezüglich des Angusses werden die Feststellungen der Übersichtsanalyse bestätigt. Eine signifikante Abhängigkeit der Porosität von Formfaktor  $R_4$  liegt in keinem Fall vor.

Abb. 87 zeigt ein Beispiel zur Meßwerteverteilung.

Die Meßwerte sind völlig unregelmäßig verteilt, z.T. wurde eine extreme Porosität beobachtet.

#### 5.5.4. Einfluß der Formfaktoren auf Solidus- und Liquiduszeit (vgl. Abschnitt 5.7.)

In Tabelle 8 sind die Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeit der Erstarrungszeiten von Formfaktoren (und zum Vergleich zusätzlich von den Arbeitstemperaturen) aufgeführt.

Das Volumen/Oberflächenverhältnis der Kugel  $R_1$  hat erwartungsgemäß den ausgeprägtesten Einfluß.

Der Formfaktor für den Anguß ( $R_3$ ) weist lediglich bezüglich der Liquidustemperatur einen schwachen, statistisch jedoch gesicherten Einfluß auf. Faktor  $R_4$  korreliert in ähnlicher Weise wie  $R_1$ . Zum Vergleich ist die Korrelation zwischen Gießtemperatur und Liquiduszeit bzw. Formtemperatur und Soliduszeit wesentlich ausgeprägter.

Durch Anwendung der multiplen Regression lassen sich die Einflüsse der verschiedenen Faktoren in einer Gleichung zusammenfassen:

Es wurden getestet:

$$\begin{aligned} \text{a) } Z_l &= f(T_g, T_k, R_4) \\ &= 0,054 \times T_g + 0,01 \times T_k + 2,3 R_4 - 62 \\ R &= 0,83 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } Z_s &= f(T_k, R_4) \\ &= 0,26 \times T_k + 20,9 \times R_4 - 25 \\ R &= 0,69 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } Z_l &= f(R_1, R_3, T_g, T_k) \\ &= 0,05 \times T_g + 0,01 T_k + 1,93 R_1 - 0,38 R_3 - 63 \\ R &= 0,83 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d) \quad Z_s &= f(R_1, R_3, T_g, T_k) \\
 &= 0,257 T_k + 24,7 R_1 - 58 \\
 R &= 0,71
 \end{aligned}$$

$R_3$  erweist sich als nicht signifikant und wurde daher nicht in die Berechnung einbezogen

( $Z_s, Z_l$  : Solidus-, Liquiduszeit  
 $T_g, T_k$ : Gieß-, Formtemperatur)

Die Auswertungen zeigen, daß bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Temperaturen und der Formfaktoren eine recht gute Korrelation zu den, den Erstarrungsverlauf kennzeichnenden Zeiten besteht.

Folgerungen sind:

- Die Liquiduszeit wird durch alle maßgebenden Größen beeinflusst. Der Einfluß jeder Größe für sich ist jedoch weniger stark ausgeprägt.
- Die Soliduszeit wird wesentlich durch die Formtemperatur und den Formfaktor der Kugel ( $R_1$ ) beeinflusst. (Gießtemperatur und Faktor  $R_4$ ) zeigten keinen signifikanten Einfluß und wurden daher aus der Gleichung eliminiert).

(Weitere Beziehungen zwischen den Erstarrungszeiten und Porosität s. Abschnitt 5.7.).

#### 5.5.5. Folgerungen

Die Porosität der Kugel wird teilweise durch das Volumen/Oberflächenverhältnis  $(V/O)^2$  der Kugel selbst und wesentlich durch das Verhältnis  $R_4$  bestimmt.

$R_4$  hat den entscheidenden Anteil.  $R_4$  berücksichtigt Größenverhältnisse zwischen Kugel und Zylinder.

Die verschiedenen Zonen der Kugel werden temperaturabhängig unterschiedlich beeinflusst. Bei hoher Formtemperatur wird die Porosität des Kugelrandes durch den Formfaktor  $R_4$  nicht signifikant beeinflusst, bei sehr niedriger Formtemperatur ist der Einfluß am deutlichsten. Die Porosität der Kugelmitte wird in jedem Fall durch  $R_4$  wesentlich mitbestimmt. Die Porosität des Angusses läßt sich mit den untersuchten Formfaktoren nicht ausreichend korrelieren. Die Temperatureinflüsse überwiegen den Einfluß der Formfaktoren. Zudem erschwert die starke Streuung der Werte die Auswertung.

#### 5.6.1. Einfluß des Formaufbau

Für die Untersuchungen wurde zunächst der bei der Schmuckherstellung und der Fertigung von Kleinteilen übliche Gußbaum verwendet (vgl. 2.4.). Nach Auswertung der ersten Versuchsreihen wurde vermutet, daß der beim "Baum" ungleichmäßige Materialfluß teilweise für die große Streuung der Meßwerte verantwortlich ist. Aus diesem Grunde wurden weitere Versuchsreihen mit dem igelartigen Formaufbau (Abb. 17) durchgeführt. Der Vergleich der mit beiden Formaten erhaltenen Ergebnisse zeigt beim Kugelrand (und als Folge bei der Kugel gesamt) einen kleinen jedoch signifikanten Einfluß der Baumform (Abb. 88). Der Standardbaum bringt etwas günstigere Werte der Randporosität. Die Unterschiede sind nicht groß und können u.a. auch durch unterschiedliche Zusammenstellung der verwendeten Modelle bewirkt worden sein.

Für die meisten Untersuchungen wurde die zweite Art des Formaufbaus beibehalten, da sie das Anbringen der Miniaturthermoelemente erleichterte.

#### 5.6.2. Einfluß von Entlüftungskanälen

Der Abbau der Druckspitzen in der Form während des Gießvorgangs fördert die Formfüllung und könnte auch die Porosität beeinflussen. Die Entlüftung der Form erfolgt normalerweise durch die

Poren der Formmasse. Poröse Formmasse fördert ebenso wie das Anbringen von Entlüftungskanälen den Druckausgleich. Entlüftungskanäle stellen den Extremfall dar. Es wurden daher Versuche mit Entlüftungskanälen durchgeführt und die Ergebnisse mit den unter normalen Bedingungen erhaltenen Werten verglichen.

Die statistische Auswertung für die Porosität der Kugel (unter Benutzung der logarithmischen Werte) ergab:

	Entlüftungskanäle	
	ohne	mit
Mittelwert (geometrisch)	1,06	0,84
Verbrennungsbereich (S = 95%)	0,87 - 1,28	0,61-1,17
Streufaktor	2,28	1,84

Der Vergleich der geometrischen Mittelwerte (t-Test) und der (log.) Standardabweichungen (Streufaktoren, t-Test) ergab keine signifikanten Unterschiede (s = 95 %).

Die Versuche ließen keinen Einfluß einer besseren Entlüftung auf die Porosität erkennen.

### 5.6.3. Abhängigkeit der Porosität von Standzeit der Form außerhalb des Ofens

Längere Verweilzeit der Form außerhalb des Ofens sollte zu einer Abkühlung der Oberfläche der Formmasse führen. Es war zu vermuten, daß dadurch das Erstarrungsverhalten der Schmelze und damit die Porosität beeinflußt wird. In der Praxis wird mitunter versucht, in recht unkontrollierter Weise damit die Porosität zu beeinflussen.

Um einen möglichen Einfluß der Standzeit auf die Porosität zu prüfen, wurden die Formen in die Gießanlage eingesetzt, der Kessel wie üblich mit 200 mbar Argon gefüllt und die Schmelze nach Wartezeiten bis zu 300 s abgegossen. Eine Wartezeit von "1 s" bedeutet Abgießen der Schmelze sofort nach dem Abschluß der Vorarbeiten. Selbstverständlich ist von der Entnahme der Form aus dem Ofen bis zu diesem Zeitpunkt bereits einige Zeit vergangen (ca. 2-3 min). Eine stärkere Abkühlung der Form während der Vorbereitung (u.a. Anschließen der Thermoelemente) sollte durch Isolation der Form und Abdecken vermieden werden.

Die statistische Auswertung der Meßwerte ergibt eine schwache Korrelation der Porosität in Abhängigkeit von der Standzeit. Die Korrelationskoeffizienten betragen für die einzelnen Meßgrößen (logarithmische Funktion):

	Modell 1	Modell 6
Kugel (gesamt):	- 0,24	- 0,04
Kugel (Rand):	- 0,24	- 0,03
Kugel (Mitte):	- 0,37	- 0,14
Anguß:	- 0,22	- 0,07
Dichte	0,18	- 0,12

(Modell 1 7  $\emptyset/3,5$   $\emptyset/20$ mm  
 2 10  $\emptyset/3,5$   $\emptyset/40$ mm)

Statistisch gesichert ist nur der Koeffizient für Mitte der Kugel bei Modell 1 (S = 95%).

Im allgemeinen zeigt sich bei der kleinen Kugel eine schwache Tendenz zu etwas geringerer Porosität mit steigender Standzeit.

Der Einfluß ist jedoch so gering, daß er bei graphischer Darstellung der Meßwerte nicht erkennbar ist (Abb. 89,90). Eine praktische Auswirkung ist nicht zu erwarten.

## 5.7. Verfahrenskenngrößen, Temperaturverlust, Liquidus- und Soliduszeit

### 5.7.1. Temperaturverlust beim Gießen

Eine sehr wesentliche Größe bei der Beurteilung von Gießverfahren ist der Wärmeverlust während des Gießvorganges (Abb. 91).

Entscheidend für den Erstarrungsverlauf ist die Temperatur der Schmelze beim Eintritt in den Formenhohlraum. Normalerweise ist jedoch nur die Temperatur der Schmelze vor dem Gießen bekannt.

Während des Gießvorganges tritt ein Wärmeverlust auf, der sich aus folgenden zwei Teilbeträgen zusammensetzt:

- a) Abkühlung der Schmelze bis zum Erreichen der Form, abhängig vom Gießverfahren, der Ofengeometrie, der Gießgeschwindigkeit, und evtl. der Atmosphäre in der Gießkammer
- b) Abkühlung der Schmelze beim Fließen durch die Gießkanäle in der Form bis zum Erreichen des Modellhohlraumes.

Sie wird u.a. bestimmt durch

- das Gießverfahren (Fließgeschwindigkeit)
- Geometrie der Gußkanäle.

### 5.7.2. Untersuchung des Erstarrungsverhaltens

Der Erstarrungsverlauf kann durch 2 Meßgrößen charakterisiert werden:

- a) Liquiduszeit: Zeit bis zum Erstarrungsbeginn
- b) Soliduszeit: Zeit bis zum Ende des Erstarrungsvorganges

Beide Zeiten wurden mit im Zentrum der Kugeln angebrachten Miniaturthermoelementen gemessen.



Im folgenden wurden die Messungen in der größeren Kugel (10 mm  $\emptyset$ ) ausgewertet. Die in der kleineren Kugel (7 mm  $\emptyset$ ) gemessenen Werte werden vermutlich durch die Wärmekapazität der Thermoelemente zu stark beeinflusst. Die Liquiduszeit wird durch die Gießtemperatur (Temperatur der Schmelze, gemessen am Einguß der Form) in recht guter Korrelation bestimmt. (Abb. 92 bis 94). Dies gilt bei jeder Formtemperatur zwischen 200 und 600°C allerdings ist der Einfluß bei 600°C am stärksten, wie aus einer zusammenfassenden Darstellung gut zu erkennen ist (Abb. 95).

Die Formtemperatur beeinflusst dagegen die Liquiduszeit erst bei der höchsten untersuchten Gießtemperatur signifikant (Abb. 96 bis 99). Bei niedrigeren Gießtemperaturen ist die Korrelation statistisch nicht gesichert ( $p > 0,05$ ).

Andererseits wird die Soliduszeit durch die Gießtemperatur nur bei den Formtemperaturen von 200°C und 400°C beeinflusst. Bei 600°C ist die Soliduszeit unabhängig von der Gießtemperatur (Abb. 100 bis 102).

Den größeren Einfluß hat die Formtemperatur auf die Soliduszeit (Abb. 103-105). Bei niedriger Gießtemperatur ist der Einfluß der Formtemperatur am ausgeprägtesten. Im Mittel bewirkt bei einer Gießtemperatur von 1050°C eine Erhöhung der Formtemperatur von 200°C auf 600°C eine Verlängerung der Soliduszeit um das zehnfache (von ca. 20 s auf ca. 180 s). (Die in Abb. 105 eingezeichnete Gerade für 1150°C ist unsicher, da für eine statistisch gesicherte Berechnung zu wenig Meßwerte vorlagen).

### 5.7.3. Einfluß von Liquidus und Soliduszeit auf die Porosität

Ein Einfluß der Liquiduszeit auf die Porosität konnte nicht nachgewiesen werden (Korrelationsanalyse).

Die Soliduszeit beeinflusst dagegen die Porosität deutlich wie für Kugel (10 mm  $\phi$ ) am Beispiel der Dichte gezeigt werden kann (Abb. 106).

Mit zunehmender Erstarrungszeit nimmt die Porosität der Kugel deutlich ab. Einen gegenteiligen Effekt hat die Soliduszeit auf die Porosität des Angusses. Die Porosität nimmt zu, allerdings weniger stark ausgeprägt (Abb. 107).

## 6. Einfluß der Legierungszusammensetzung auf die Porosität

### 6.1. Vorbemerkungen

Es war zu prüfen, inwieweit die Erstarrungsform und der Erstarrungsintervall die Ausbildung der dendritischen Porosität beeinflussen.

Um möglichst wenige zusätzliche Variablen einzuführen, wurden die Untersuchungen an Kupferbasislegierungen mit annähernd gleicher Liquidustemperatur durchgeführt.

Die ausgewählten Legierungen unterscheiden (CuSn10, CuMn5, CuAl7, CuAl8,5, CuAl11) sich in Erstarrungsform und -intervall.

Die wesentlichen Daten sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die Abb. 108 - 112 zeigen die Gußstruktur der verschiedenen Legierungen.

Bei der Legierung CuSn10 tritt infolge von Kornseigerungen ein nennenswerter Anteil Peritektikum auf. Dadurch wird der an und für sich große Erstarrungsintervall weiter vergrößert.

CuMn5 weist ein grobkörniges Gefüge mit dendritischen Kornseigerungen auf. CuAl8,5 zeigt eine ungewöhnlich grobkörnige eutektische Struktur.

Die Legierung CuAl7 zeigt ebenfalls verursacht durch Kornseigerungen, Anteile von Eutektikum in grobnadeliger Ausbildung.

Auch bei CuAl11 sind noch kleinere Anteile Eutektikum vorhanden, die allerdings bei der thermischen Analyse mit entsprechend langsamer Auf- bzw. Abkühlgeschwindigkeit nicht mehr auftreten. Sehr charakteristische Unterschiede treten in der Form der Porosität zwischen den Legierungen auf. Die Abb. 113 bis 117 zeigen typische Erscheinungsbilder bei sehr starker Porosität der verschiedenen Legierungen. Die Kupfer-Zinn und Kupfer-Mangan-Legierungen weisen jeweils mehr oder weniger stark ausgeprägte Nester dendritischer Mikrolunker auf. Auch bei höherer Vergrößerung zeigen beide Legierungen eine sehr ähnliche Struktur der Poren. Bei der CuSn10-Legierung treten die Poren, wie zu erwarten ist, bevorzugt im Bereich der peritektischen Restschmelze auf und sind etwas feiner (Abb. 118 und 119).

Die Ausbildung der Porosität der Kupfer-Aluminium-Legierungen unterscheidet sich in ihrer Form von beiden anderen Legierungstypen sehr wesentlich.

Die untereutektische Legierung (CuAl7) zeigt, sofern überhaupt Porosität auftritt, stellenweise grobe, unregelmäßige Erstarrungslunker (Abb. 115). Die eutektische Legierung weist in den meisten Fällen nahezu kreisrunde Poren beträchtlicher Größe in der Kugelmittle auf, während das übliche Gefüge nahezu fehlerfrei ist (Abb. 116).

Die Erstarrung hat offensichtlich konzentrisch von außen nach innen eingesetzt. Der Volumenschwund während des Erstarrens hinterläßt einen etwa kugelförmigen Hohlraum, in der Mitte der Kugel.

Die Legierung mit erhöhtem Aluminiumgehalt (die dem Phasendiagramm entsprechend wieder ein einphasiges Gefüge aufweisen sollte)

unterscheidet sich in der Porenform nicht sehr stark von der eutektischen Legierung (Abb. 117). Die Pore ist eher länglich, und zum Anguß hin verschoben (Kugel mit 10 mm  $\emptyset$ ).

Aufgrund der völlig unterschiedlichen Ausprägung der Porosität konnte ein gemeinsamer Vergleich aller Legierungen nicht durchgeführt werden.

Es wurden daher Versuche mit CuSn10 und CuMn5 getrennt von den Versuchen mit aluminiumhaltigen Legierungen ausgewertet.

## 6.2. Vergleich der Legierungen CuSn10 und CuMn5

Für die Versuche wurden zwei unterschiedliche Modelle ausgewählt:

Modell 1: 7 mm  $\emptyset$ /3,5 mm  $\emptyset$ /20 mm

Modell 2: 10 mm  $\emptyset$ /3,5 mm  $\emptyset$ /40 mm

Es wurden Gießtemperatur und Formtemperatur variiert. Die Versuchsbedingungen sind der Tabelle 10 zu entnehmen. Der Einfluß der verschiedenen Faktoren, insbesondere der Legierungszusammensetzung wurde varianzanalytisch unter Verwendung der logarithmierten Werte der Porosität geprüft. Die Ergebnisse sind in den Abb. 120 - 122 zusammengestellt. Es wurden nur Hauptwirkungen und Wechselwirkungen zwischen 2 Faktoren berücksichtigt. Wechselwirkungen höherer Ordnung sind schwer zu deuten und mit dem zur Verfügung stehenden Zahlenmaterial unsicher.

In den Tabellen sind jeweils die Irrtumswahrscheinlichkeiten  $p$  für die Hypothese "Einfluß vorhanden" aufgeführt. Als Grenzwert wurde  $p = 0,05$  gewählt. Keine Zahlenangabe ("-") bedeutet: Kein gesicherter Einfluß nachweisbar.

Die Auswertungen wurden getrennt für die Porosität als Gesamtbeurteilung, den mittleren maximalen Porendurchmesser und den Porenanteil jeweils für Kugel gesamt, Kugelrand und Anguß durchgeführt.

Auswertung:

a)

Der Legierungseinfluß ist zwar im allgemeinen gesichert, jedoch nicht sehr groß. Er ist je nach Meßgröße und Beurteilungsort unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei der Gesamtbeurteilung ergibt sich z.B. für die Kugel (gesamt) eine Porosität (geometrischer Mittelwert) von 1,2 bei CuSn10 und von 1,6 bei CuMn5.

Diesem geringen direkten Einfluß der Legierung (Hauptwirkung) überlagern sich Wechselwirkungen mit der Formtemperatur und Form des Modells.

Die Abb. 123 bis 125 geben für die Porosität der verschiedenen Legierungen die Mittelwerte (geometrisches Mittel) und für die entsprechenden Vertrauensbereiche ( $S = 95$ ) wieder. Als Parameter zur Untergliederung wurden Formtemperatur und Modell gewählt. Die Darstellungen erfolgten getrennt nach Temperaturbereich "niedrig" (1050 bzw. 1100°C) und "hoch" (1250°C). Die Legierung CuMn5 erbringt insbesondere bei Modell 2 (Kugeldurchmesser 10 mm) schlechtere Resultate. Die Tendenz ist jedoch nicht einheitlich und wird in jedem Fall von Wechselwirkungen zwischen den Parametern Formtemperatur/Modell/Gießtemperatur überlagert.

Auch diese Untersuchungen bestätigen, daß die Gießtemperatur keinen direkten Einfluß (Hauptwirkung) auf die Porosität hat.

Zusammenfassend ergibt sich: Die Legierung CuMn5 zeigt ein Mittel zu etwas stärker ausgeprägter Porosität als CuSn10. Die zuerst genannte Legierung neigt zur Ausbildung größerer Poren. Hier

scheint sich der günstige Einfluß der peritektischen Restschmelze bei CuSn10 auszuwirken.

Der zu vermutete starke Einfluß der sehr stark unterschiedlichen Erstarrungsintervalle konnte nicht bestätigt werden.

### 6.3. Verhalten der Kupfer-Aluminium-Legierung

Ein direkter Vergleich der aluminiumhaltigen Legierungen mit den vorher besprochenen Legierungen ist wegen der vollkommen anderen Erscheinungsform der Porosität nicht möglich. Interessant ist jedoch das unterschiedliche Verhalten der 3 Legierungen untereinander (Abb. 126 - 127).

Die Legierung CuAl7 weist insgesamt eine sehr geringe Porosität auf. Unterschiede zwischen den beiden Kugeldurchmessern bestehen nicht. Die Ursache dürfte vermutlich darin liegen, daß nach dem Erstarren der  $\alpha$ -Mischkristalle noch eutektische Schmelze (die wegen mangelhafter Einstellung des Gleichgewichts vorhanden ist) nachfließen kann.

Bei der eutektischen Legierung schreitet die Erstarrungsfront gleichmäßig von außen nach innen fort. Es erscheint lediglich eine Frage des Zufalls zu sein, ob ein Kanal für das Nachfließen der Schmelze offen bleibt oder nicht. Das Resultat ist eine sehr stark streuende Porosität, auf die die üblichen Faktoren wie Form- und Gießtemperatur kaum und der Kugeldurchmesser nur einen geringen Einfluß haben. Tritt Porosität auf, so bilden sich nahezu kugelförmige Hohlräume im Zentrum.

Die Legierung CuAl11 verhält sich wieder anders. Es treten bei dem größten Kugeldurchmesser mehr oder weniger kompakte kugel- bis birnenförmige Poren auf. Die kleinere Kugel ist (bis auf eine Ausnahme) nahezu frei von Poren. Die Kugel erstarrt - fast unabhängig von den Gießbedingungen - bevor das Nachfließen der Schmelze durch den Gießkanal unterbrochen wird.

#### 6.4. Auswertung

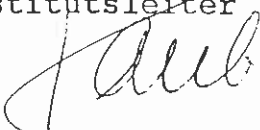
Die Mikroporosität kann - wie zu erwarten war - prinzipiell durch die Legierungszusammensetzung beeinflusst werden. Allerdings sind bei den untersuchten Legierungstypen die Ergebnisse im einzelnen sehr überraschend. Die sehr unterschiedlichen Erstarrungsintervalle bei CuSn10 und CuMn5 wirken sich nicht so gravierend aus wie ursprünglich vermutet wurde. Die zinnhaltige Legierung verhält sich etwas günstiger. Dies dürfte u.a. auf den Einfluß der peritektischen Restschmelze (bedingt durch Kornseigerungen) zurückzuführen sein.

Aluminiumhaltige Legierungen unterscheiden sich aufgrund der auftretenden  $Al/Sn$ -Eutektikum sehr wesentlich von der oben genannten Legierung. Es treten "zentrale" Lunker auf. Bei den anderen Legierungen oftmals stark porösen Randzonen sind einwandfrei. Am schlechtesten verhält sich die eutektische Legierung mit nicht reproduzierbar auftretenden großen Poren.

Die (im Gleichgewicht homogene) Legierung mit niedrigem Al-Gehalt zeigt durchwegs geringe Porosität. Die ebenfalls im Gleichgewicht homogene Legierung mit höherem Al-Gehalt weist eine sehr ausgeprägte Formabhängigkeit der Porosität auf. (Anzumerken bleibt, daß bei beiden Legierungen unter den gegebenen Bedingungen eutektische Restschmelze aufgetreten ist).

Die Beispiele zeigen, daß neben verfahrenstechnischen Verbesserungen, die Entwicklung spezieller für den Präzisionsguß geeignete Legierungen vorteilhaft ist. Jedoch müßte dieser Bereich noch eingehender untersucht werden.

Institutsleiter



Prof. Dr. Ch.J. Raub

Bearbeiter



Dipl.-Ing. (FH) D. Ott

- 1) Chvorinow, N.  
Control of the Solidification of Castings by Calculation  
Foundry Trade Journal, August 10, 1939, 95-98
- 2) Ott, D., Raub, Ch.J.  
Untersuchung verfahrensspezifischer Parameter zur Optimierung der Qualität gegossener Schmuckwaren aus Goldlegierungen  
Teil III: Temperaturen des Metalls und der Einbettmasse, ihre Bestimmung und ihre Bedeutung  
Metall 39 (1985), 3., 246-250
- 3) Liu, C.Y., Murakami, K., Okamoto, T.  
Effect of Capillary Pressure on Interdendritic Liquid flow  
Acta metall, Vol. 34 (1), 1986, 159-166
- 4) Ott, D., Raub, Ch.J.  
Untersuchung verfahrensspezifischer Parameter zur Optimierung der Qualität gegossener Schmuckwaren aus Goldlegierungen  
Teil II: Gasdruck in den Formen während des Gießens, ihre Messung und ihre Bedeutung für die Gußqualität  
Metall 39 (1985), 2, 150-158
- 5) Ott, D., Raub Ch.J.  
Investment Casting of Gold Jewellery  
Gold Bull. 18 (1985) 2, 58-68
- 6) Ott, D.  
Properties of Investment  
Santa Fe Symposium 1988 im Druck
- 7) Lang, W., Learmonth, D., Mc Callum, R.  
Hot Permeability of Shell Moulds; Its Measurement and Place in Process Technology  
7th World Conference on Investment Casting, München 1988
- 8) Friedrich, H., Hauschild, E.  
Veränderung der Gasdurchlässigkeit in Feingußformen und ihre Auswirkungen auf das gußtechnische Ergebnis  
Gießerei 68 (1981) 4, 90-93
- 9) Ott, D., Raub, Ch.J., Rapson, W.S.  
Investment Casting of Gold Jewellery Porosity in Castings; Its Causes and Prevention  
Gold Bull. 18 (1985) 3, 98-108
- 10) John, C. Mc Closky  
The Application of Commercial Investment Casting Principles to Jewelry Casting  
Proceedings of the first Santa Fe Symposium 1987, 203-222



- 11) Chvorinow, N.  
Theory of the Solidification of Castings  
Gießerei 27 (1940), 177-186, 201-208, 222-225
- 12) Berry, J.T., Kondic, V., Marlin, G.,  
Solidification Times of Simply Shaped Castings  
AFS Transactions 79 (1951) 449-479
- 13) Heine, R.W., Uicker, J.J., Gantenbein, D.  
Geometric Modeling of Mold Aggregate, Superheat, Edge  
Effects, Feeding Distance Chills and Solidification Micro-  
structure  
AFS Transactions, 92 (1984) 135
- 14) Piwonka, T.S., Jordan, C., Berry J.T.  
Process Modeling for Investment Casting: a state of the art  
assessment  
Seventh World Conference on Investment Casting  
Paper No. 12
- 15) Quichou, L., Lesoult, G., Lamanthe, G., Hamar, R.,  
Theret, J.M., Bachdet, E.  
Microporosity Formation in Investment Casting of Nickel-Base  
Superalloys  
Conference High Temp. Alloys for Gas Turbines 1982, Liege  
(Belgium)
- 16) Campbell, J.  
On the origin of porosity in long freezing range alloys  
Brith. Foundryman 62 (1969), 4, 147-158
- 17) Kubo, K., Pehlke, R.D.  
Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification  
Metallurgical Trans. B., 16 B (1985) 359-366
- 18) Campbell, J.  
Advanced casting technology AGARD Cpnf.Proc. Nr. 325 (1982)
- 19) Coviaux, J., Jeancolas, M.  
Feeding of Castings Poured in Ceramic Molds  
Cast Metals Res.J. 10 (1974), 21-25
- 20) Kolly, G.P.  
Study of Porosity and Voids in Dental Gold Casting  
Journal Dent.Res. 49 (1970) 986-993
- 21) Tuccillo, J.J., Nielsen, J.P.  
Sprue Design for Cast Gold Alloys  
Dent.Lab.Rev., 1964, June-July

- 22) Heine, R.W., Uickes, J.J.  
Risering by Computer Assisted Geometrie Modeling  
AES Transactions 91 (1983) 127
- 23) Ryabv, V.V., Romanov, N.T. et al  
Formation of a Shrinkage Cavity in the Solidification  
Russ.Meta.. (USA) 87, 2, 49-52
- 24) Zhuravlev, U.A., Bakumenk, S.B. et al  
Theory of formation of closed shrinkage cavities during  
solidification of alloys  
Russ.Meta.. (GB) 1983, 37-41
- 25) Sturm, J.C., Sahm, P.R.  
Computer simulation for the solidification of investment ca-  
sting process.  
Seventh World Conference on Investment Casting 1988  
Paper No. 13

Tabelle 1

Zusammenstellung der für die Versuche  
verwendeten Modelle

Lfd. Nr.	Code	Kugeldurchmesser (mm)	-durchmesser (mm)	Zylinder -durchmesser (mm)	-länge (mm)	Volumen $V(\text{mm}^3)$	Oberfläche $O(\text{mm}^2)$	V/O
1		7	2,5		10	228	227	1,00
2	7	7	2,5		20	277	305	0,90
3	8	7	2,5		30	326	384	0,85
4	9	7	2,5		40	375	462	0,81
5		7	3,5		10	273	254	1,08
6	1	7	3,5		20	369	363	1,02
7	2	7	3,5		30	465	473	0,98
8	3	7	3,5		40	562	583	0,96
9		10	2,5		10	572	388	1,48
10	10	10	2,5		20	621	466	1,33
11	11	10	2,5		30	670	544	1,23
12	12	10	2,5		40	719	623	1,15
13		10	3,5		10	618	414	1,49
14	4	10	3,5		20	714	523	1,36
15	5	10	3,5		30	810	633	1,28
16	6	10	3,5		40	906	743	1,22

Tabelle 2

Prüfung auf Vorliegen einer Normalverteilung  
Signifikanzniveaus des Kolmogorov-Smirnov-Tests

Meßgröße Meßreihe	Anzahl	Porosität lin	Porosität log	rel. Porenanteil lin	rel. Porenanteil log	Porendurchmesser lin	Porendurchmesser log
a) Kugel gesamt							
1	16	0,49	0,98	0,12	0,75	0,30	0,86
2	18	0,65	>0,99	0,23	0,96	0,80	0,97
gesamt	34	0,17	0,98	0,12	0,92	0,53	0,95
b) Anguß							
1	16	0,04	0,75	0,26	0,86	0,09	0,62
2	18	0,37	0,94	0,54	0,95	0,78	0,66
gesamt	34	<0,01	0,64	<0,01	0,98	0,05	0,97

Tabelle 3

Einfluß von Formmasse und Modell auf  
die Porosität  
Ergebnisse der Varianzanalyse

Einflußgröße	Formmasse	Modell	Signifikanzen (%) Wechselwirkung Formmasse/Modell
Meßgestell/Meßgröße			
Kugelmittle			
Porosität	< 0,1	(48)	0,4
rel. Anteil	1	(69)	0,1
max. Durchmesser	< 0,1	(64)	0,3
Kugelrand			
Porosität	< 0,1	(58)	5
rel. Anteil	2	(6)	(8,3)
max. Durchmesser	< 0,1	(94)	5
Anguß			
Porosität	< 0,1	(12)	(34)
rel. Anteil	< 0,1	(27)	(52)
max. Durchmesser	< 0,1	(20)	(50)

Bemerkung:

Grenzwert: 5%. Bei Werten > 5 % wird ein signifikanter Einfluß nicht vermutet (Werte in Klammern).

Tabelle 4

Zusammenstellung der signifikanten Wirkungen der verschiedenen Parameter auf die Porosität

Meßgrößen Einflußgrößen	Kugel (gesamt)	Kugelmitte	Kugelrand	Anguß
1. Gießtemperatur $T_G$	0,02	0,002 (T1)	-	-
Formtemperatur $T_K$	0,009 (T1)	0,001 (2)	0,005	- (0,08)
$T_G$ * $T_K$	-	-	-	-
2. Modell (summerisch)				
bei $T_G = 1$	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001
$T_G = 2$	0,013	-	0,001	-
Formtemperatur $T_K$	0,022	0,013	(0,066)	0,0004
$T_G = 1$	-	-	-	-
$T_G = 2$	-	-	-	-
3. Formparameter und Wechselwirkung				
Kugeldurchmesser (K)	0,0001	0,0001	0,0001	0,001
Zylinderdurchmesser (Ad)	0,0006	-	0,0005	0,04
Zylinderlänge (Al)	-	0,0003 (1)	-	0,0008 (1)
Wechselwirkungen:				
Al x Tk	-	-	0,001 (2)	0,05 (1)
Al x K	-	-	0,05 (2)	0,002 (1)
Ad x K	-	-	-	0,003 (1)
Ad x Tk	-	(0,09)	-	-
Tk x Ad x Al	-	-	-	0,05
Tk x K x Ad	-	-	-	0,05 (1)
K x Ad x Al	-	-	-	0,03

(1) bei 1100 °C Gießtemperatur

(2) bei 1200 °C Gießtemperatur

Tabelle 5  
Zusammenstellung der Porosität in Abhängigkeit von  
verschiedenen Einflußgrößen

Einflußgrößen	Beeinflusste Größen					
	Kugel gesamt K	Kugelmitte M	Kugelrand R	Anguß A	Porosität V2	Porosität V2
	Wert	Porosität V2	Porosität V2	Porosität V2	Porosität V2	Porosität V2
Kugeldurchmesser Kd	7 mm	0,89	1,06	0,71	1,32	1,32
	10 mm	2,11	2,82	1,69	3,08	3,08
		2,4	2,7	2,4	2,4	2,3
Zylinderdurchmesser Ad	2,5 mm	1,55	2,09	1,25	1,99	1,99
	3,5 mm	1,12	1,43	0,89	1,87	1,87
		1,4	1,5	1,4	1,4	1,4
Zylinderlänge Al	20 mm	1,21	1,29	0,99	2,79	2,79
	30 mm	1,21	1,52	1,00	1,95	1,95
	40 mm	1,61	3,05	1,21	1,09	1,09
		1,3	2,4	1,2	2,6	2,6
Formtemperatur TK	min	1,04 (600°C)	1,24 (600°C)	0,88 (600°C)	1,17 (200°C)	1,17 (200°C)
	max	1,63 (700°C)	2,94 (700°C)	1,51 (200°C)	4,57 (700°C)	4,57 (700°C)
		1,6	2,4	1,72	3,9	3,9
Gießtemperatur Tg	1100	1,22	1,40	1,07	1,79	1,79
	1200	1,43	2,22	1,25	2,11	2,11
		(1,2)	1,6	(1,2)	(1,2)	(1,2)

Tabelle 6

Einfluß der verschiedenen Parameter auf die Porosität  
Korrelation R und Signifikanz P

Modell Einflußgröße	gesamt		Kugel Mitte		Rand		Anguß		Dichte	
	R (%)	P (%)	R (%)	P (%)	R (%)	P (%)	R (%)	P (%)	R (%)	P (%)
a)										
Formtemperatur 1)	-	-	-	-	-	-	-	-	45	3
Gießtemperatur 2)	32	3	28	5	36	1	(28)	(6)	-41	1
Liquiduszeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soliduszeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Standzeit unter Argon	(-24)	(10)	-37	1	(-24)	(11)	(-22)	(13)	-	-
b)										
Formtemperatur 1)	-36	3	-35	3	-37	3	57	<1	54	<1
Gießtemperatur 2)	-	-	-	-	-	-	-	-	(-25)	(9)
Liquiduszeit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soliduszeit	-	-	-	-	-	-	48	<1	53	<1
Standzeit unter Argon	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) in der Form unmittelbar vor dem Gießen gemessen  
2) am Einguß gemessen

Model a): Kugel 7 mm O, Zylinder: 3,5 O x 20 mm  
Model b): Kugel 10 mm O, Zylinder: 3,5 O x 40 mm

Signifikanzgrenze P = 0,05 = 5 %  
Werte in Klammern P = 0,15  
Keine Angaben P > 0,15



Beispiele:  
Wechselwirkungen

Tk + Al	min	0,5 1)
	max	10,8 1)
		21,6 1)

---

Kd + Al	min	1,02
	max	7,16
		7,0 1)

---

1) Gießtemperatur 1100°C

2) V = Max/Min, Werte in Klammern: Einfluß nicht statistisch gesichert

Tabelle 7  
 Korrelationskoeffizienten für  
 die Abhängigkeit der Porosität von den  
 Formfaktoren

Formfaktoren	R <sub>1</sub> (Kugel)	Korrelationskoeffizienten (%) R <sub>2</sub> (Gesamt)	R <sub>3</sub> (Zylinder)	R <sub>4</sub> = R <sub>1</sub> /R <sub>3</sub>
Meßstelle				
Kugel gesamt	30	24	-19	35
Kugel, Rand	28	23	-15	32
Kugel, Mitte	22	14	-24	24
Anguß	20	23	(-8)	(6)

Werte in Klammern: nicht signifikant (S = 0,05)

Tabelle 8

Korrelationskoeffizienten (R%) für die Abhängigkeit von Liquidus- und Soliduszeit von verschiedenen Einflußgrößen

Formfaktor	Liquidus-	R (%)	Solidus-
	zeit		zeit
$R_1 [(V/O)^2 \text{ Kugel}]$	28		35
$R_2 [(V/O)^2 \text{ gesamt}]$	23		36
$R_3 [(V/O)^2/1, \text{ Anguß}]$	- 19		0 1)
$R_4 = R_1 / R_3$	22		21
Gießtemperatur (gemessen)	75		0 1)
Formtemperatur (gemessen)	36		78

1) nicht signifikant

Tabelle 9

## Charakterisierung der untersuchten Legierungen

Legierung	Struktur <sup>1)</sup>	(°C)	Solidus/Liquidustemperatur gemessen (°C)	Intervall (K)
CuSn10	homogen ( $\alpha$ -Mischkristalle) + Peritektikum im Ungleichgewicht	835 / 1001 786 / 1011	174 225	
CuMn5		1030/1060	30	
CuAl7	homogen ( $\alpha$ -Mischkristalle) + Eutektikum im Ungleichgewicht	1034/1041	7	
CuAl8,5	Eutektikum ( $\alpha/\beta$ )	1035	-	
CuAl11	homogen ( $\beta$ -Mischkristalle)	1046	< 2	

1) Bei Temperaturen knapp unter Solidustemperatur, Umwandlungen etc. bei tieferen Temperaturen nicht berücksichtigt.

Tabelle 10  
Versuchsbedingungen

a) Vergleich CuSn10, CuMn5

Gießtemperatur:	1050°C	CuSn10
	1100°C	CuMn5
	1250°C	CuSn10, CuMn5

Formtemperatur:	200°C
	400°C
	600°C

b) CuAl7, CuAl8,5, CuAl11

Gießtemperatur:

Formtemperatur:

Abb. 1  
Beispiel einer typischen  
Gasporosität  
18 ct-Gelbgold

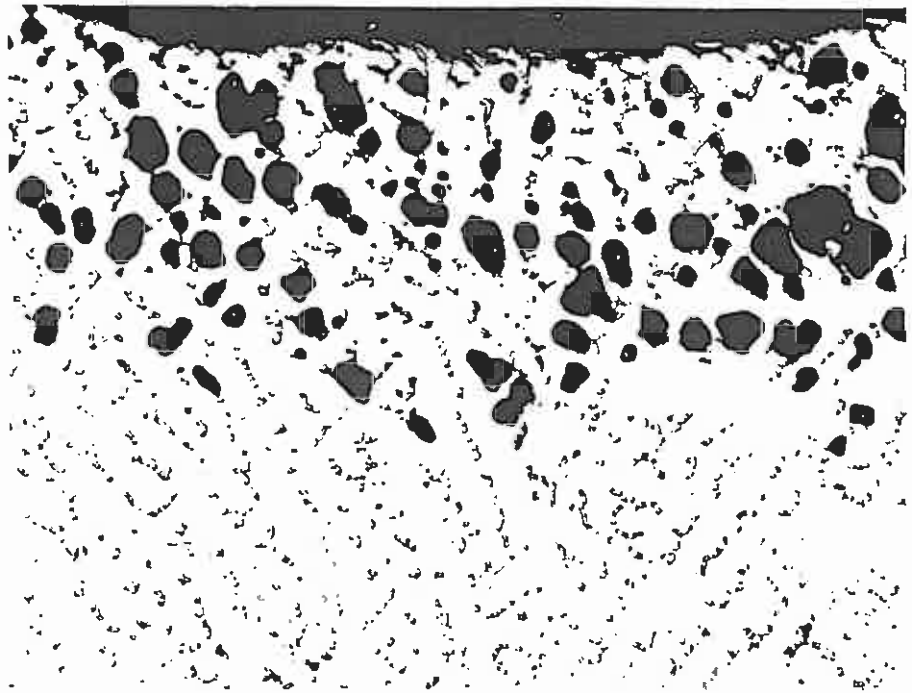


Abb. 2  
Beispiel einer typischen  
dendritischen Porosität  
18 ct-Gelbgold

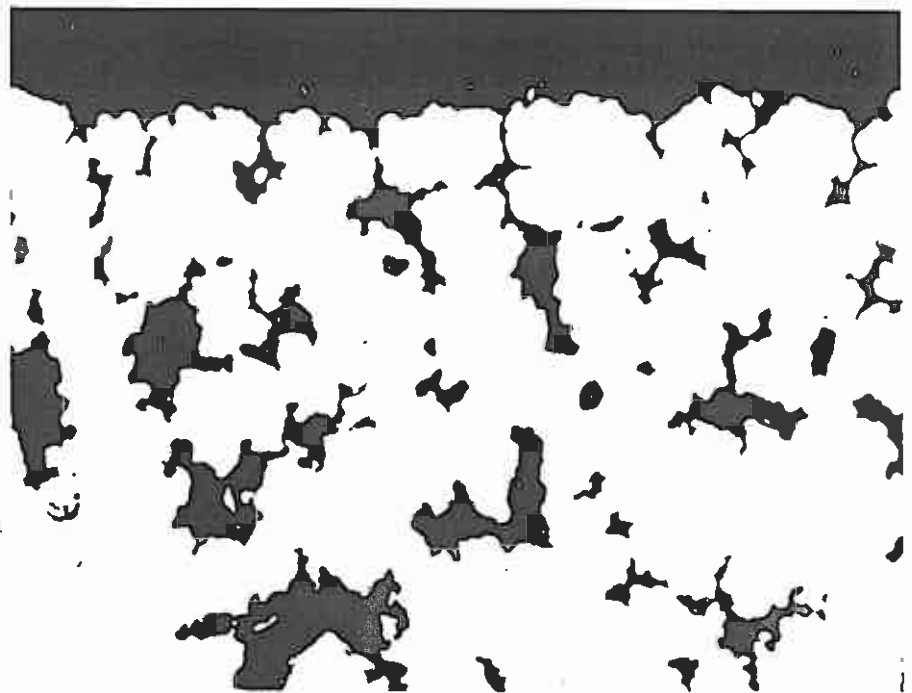


Abb. 3  
Gußmodell mit Poren  
an der Oberfläche  
der Kugel

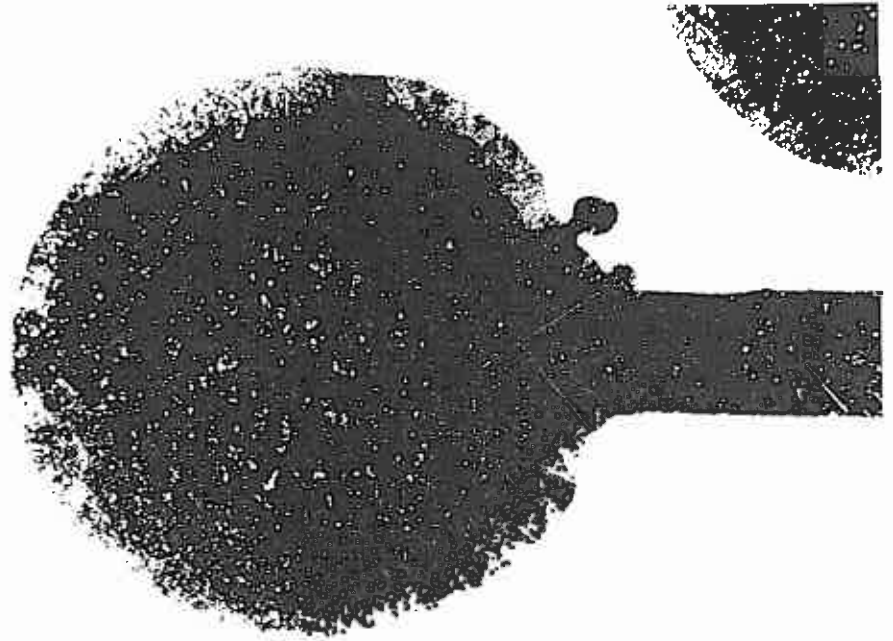
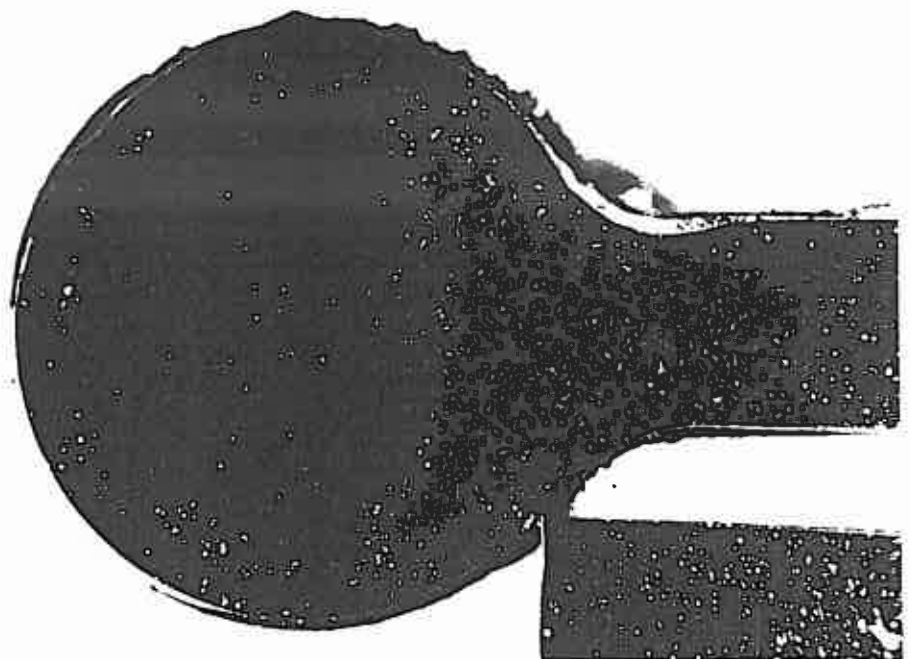


Abb. 4  
Poren überwiegend  
in der Übergangszone  
Kugel/Stab



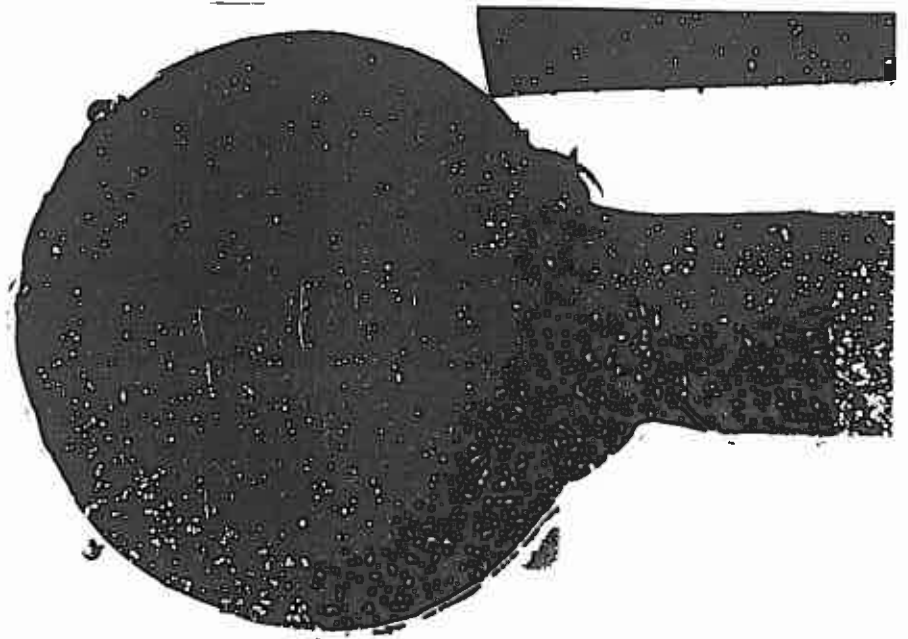


Abb. 5  
Poren in der Rand-  
zone der Kugel und  
in der Übergangszone

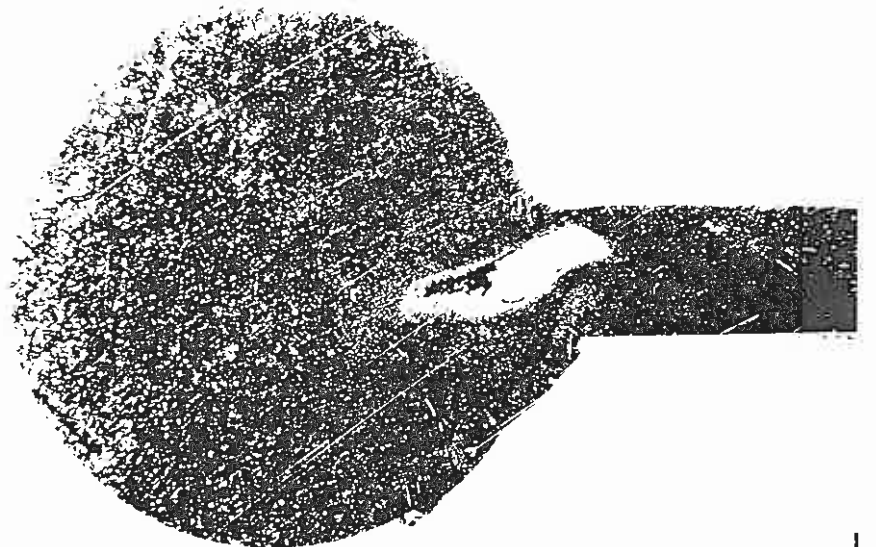


Abb. 6  
Lunker im Über-  
gangsbereich



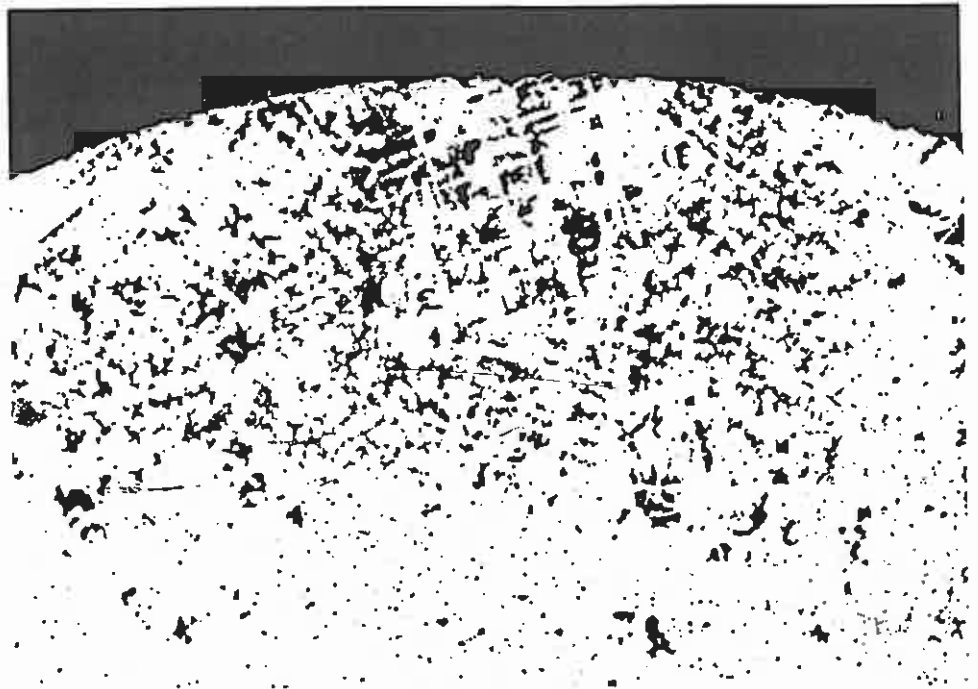


Abb. 7  
Detailaufnahme zu  
Abb. 3 (32 X)

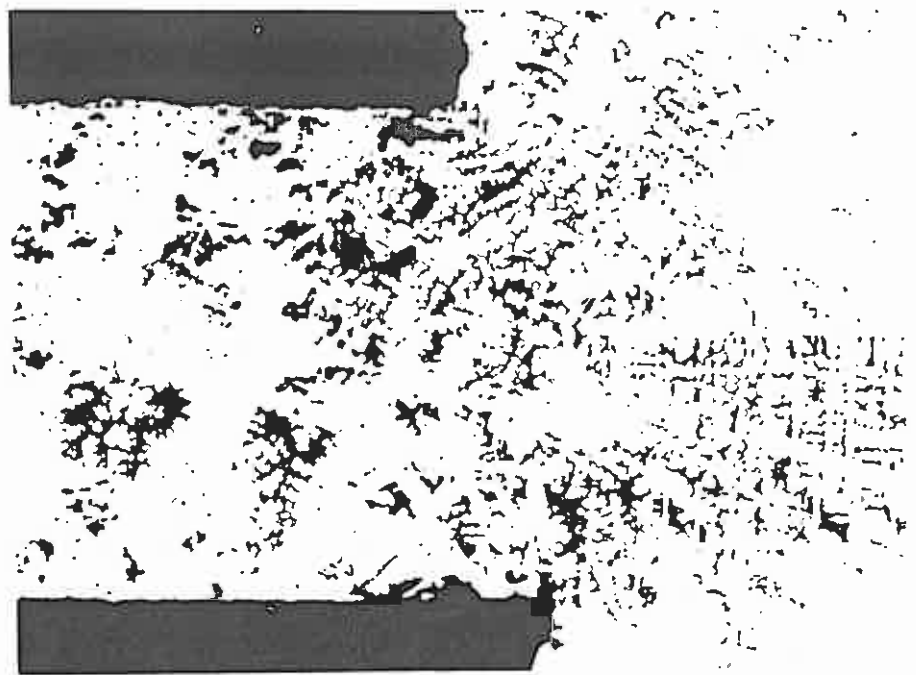
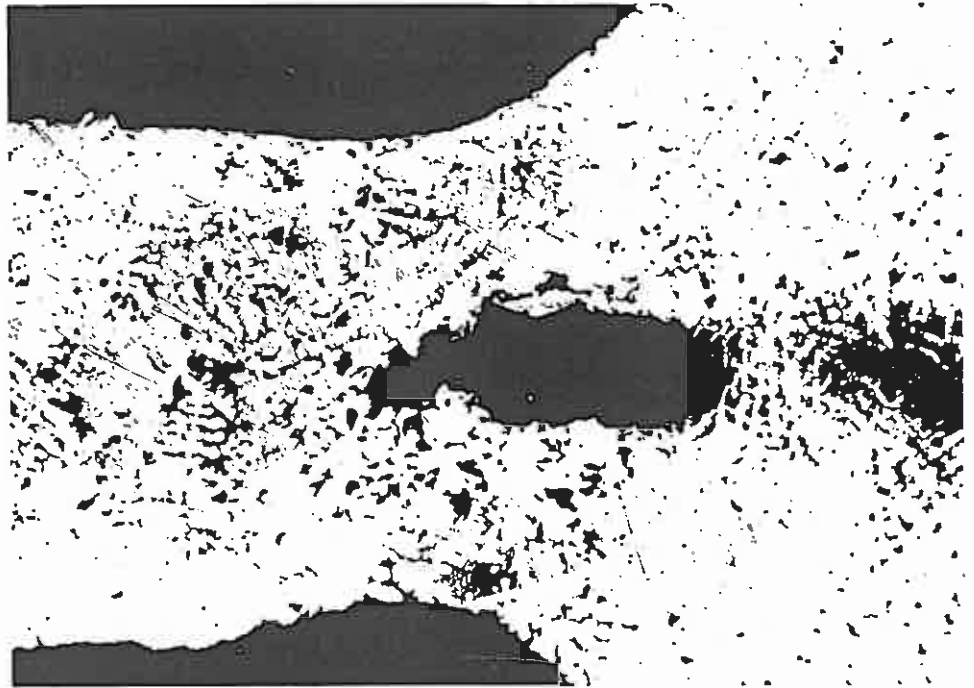


Abb. 8  
Detailaufnahme starke  
Porosität im Übergangs-  
bereich (32 X)

Abb. 9  
Lunker im Übergangs-  
bereich (Detailauf-  
nahme zu Abb. 6)  
(32 X)



# Zusammenhang zwischen Dichte und Bewertung

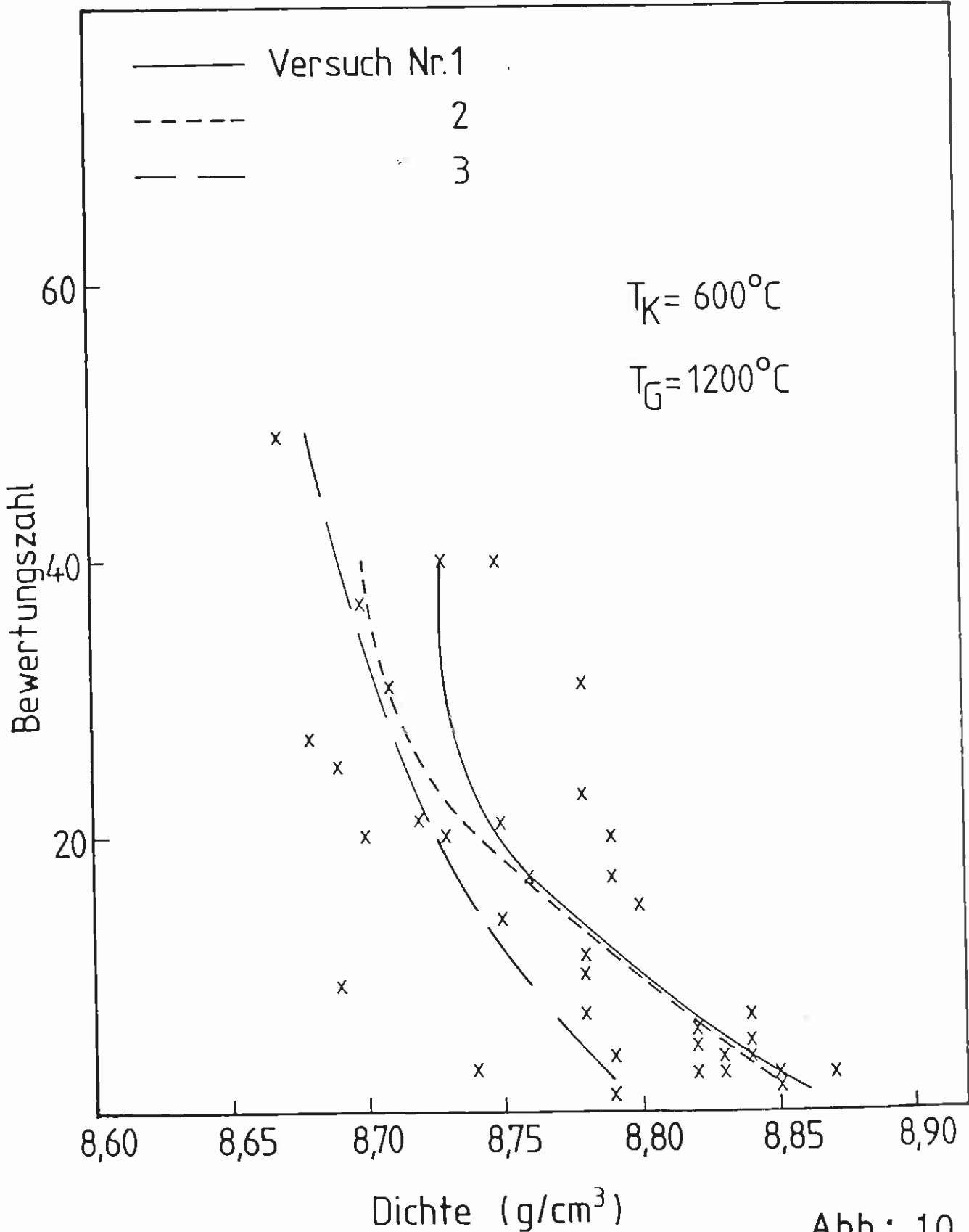


Abb.: 10

# Zusammenhang zwischen Dichte und Bewertung

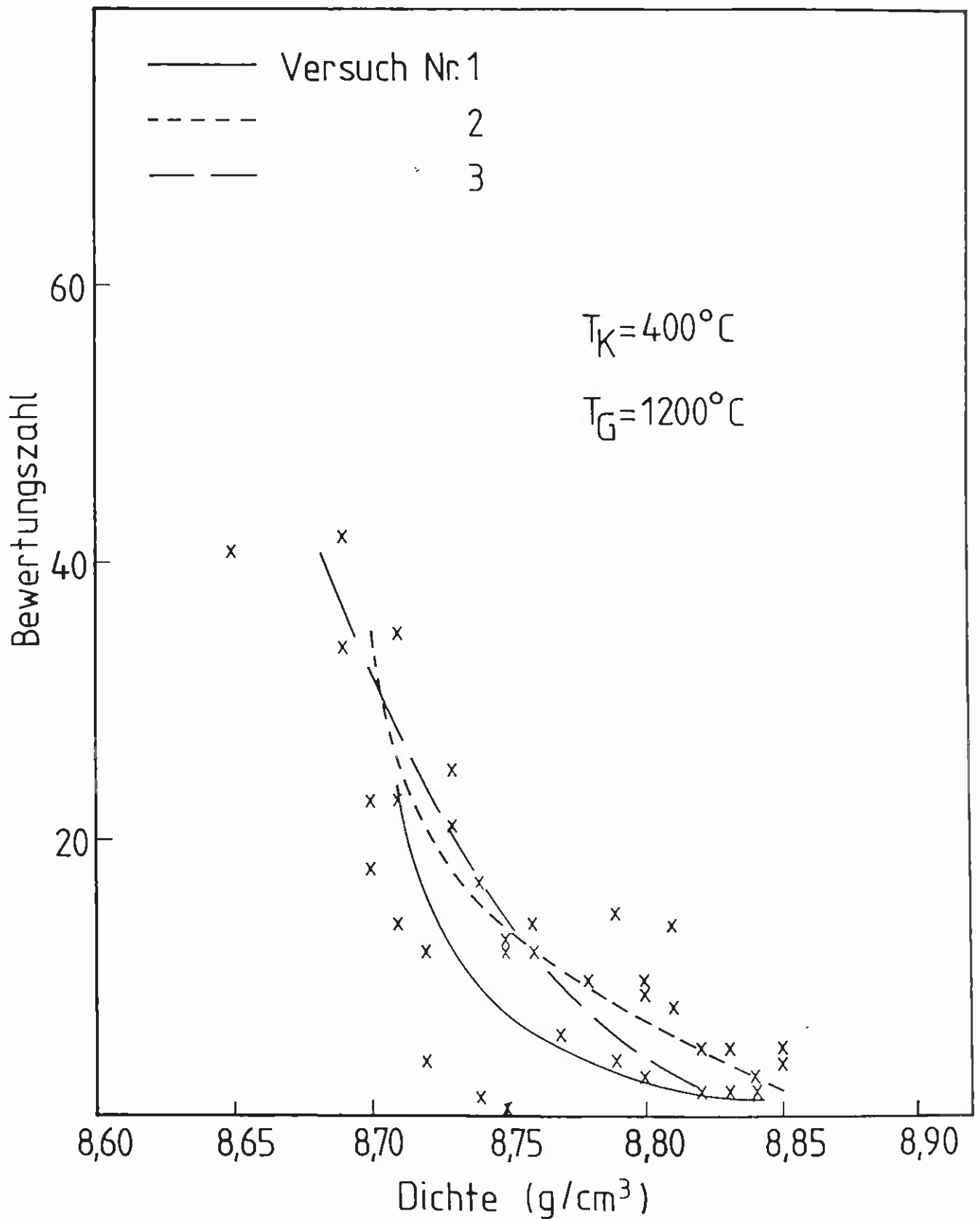
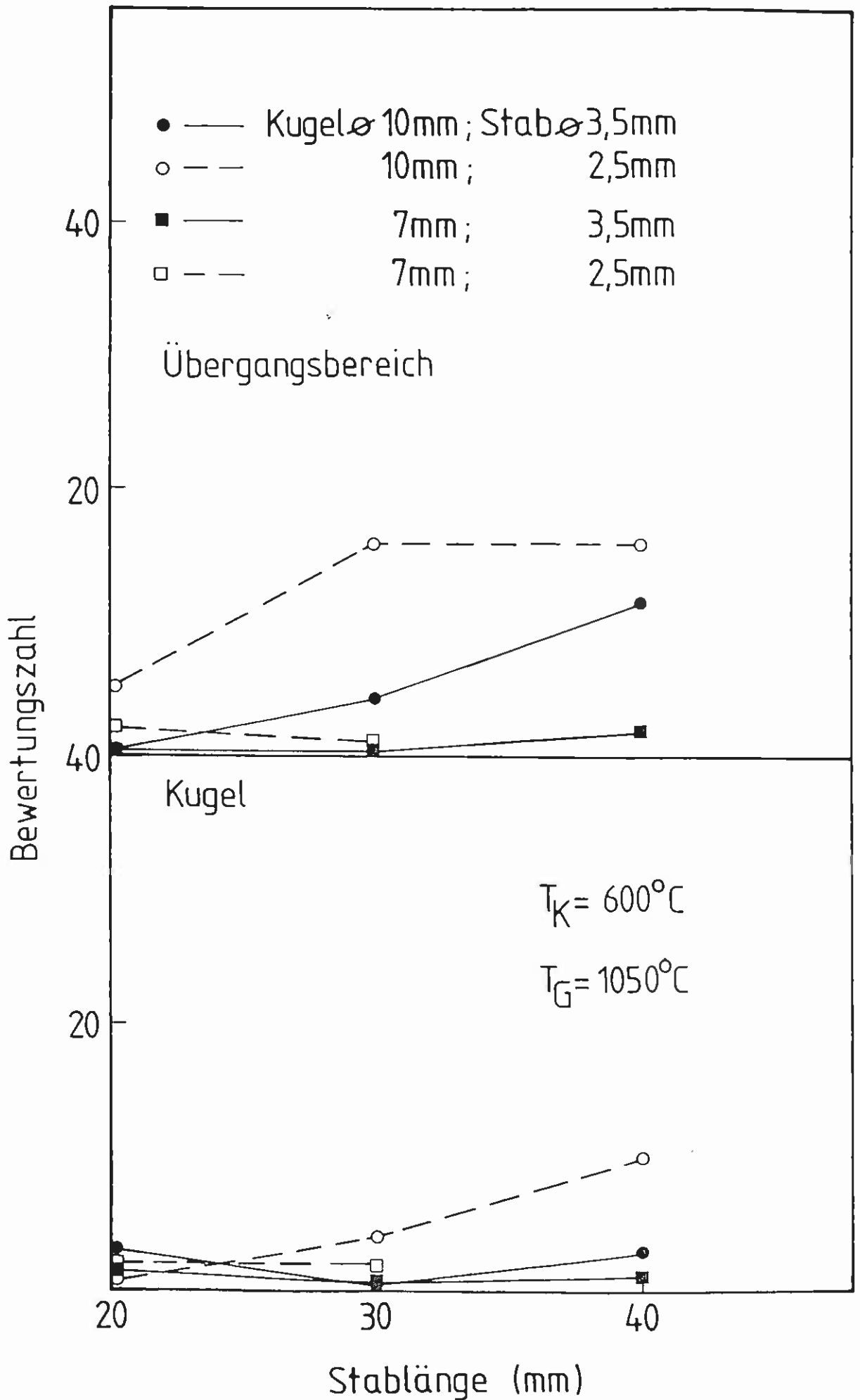


Abb.: 11

# Einfluß der Stablänge auf die Porosität von Übergangszone und Kugel gesamt



# Einfluß der Stablänge auf die Porosität von Übergangszone und Kugel gesamt

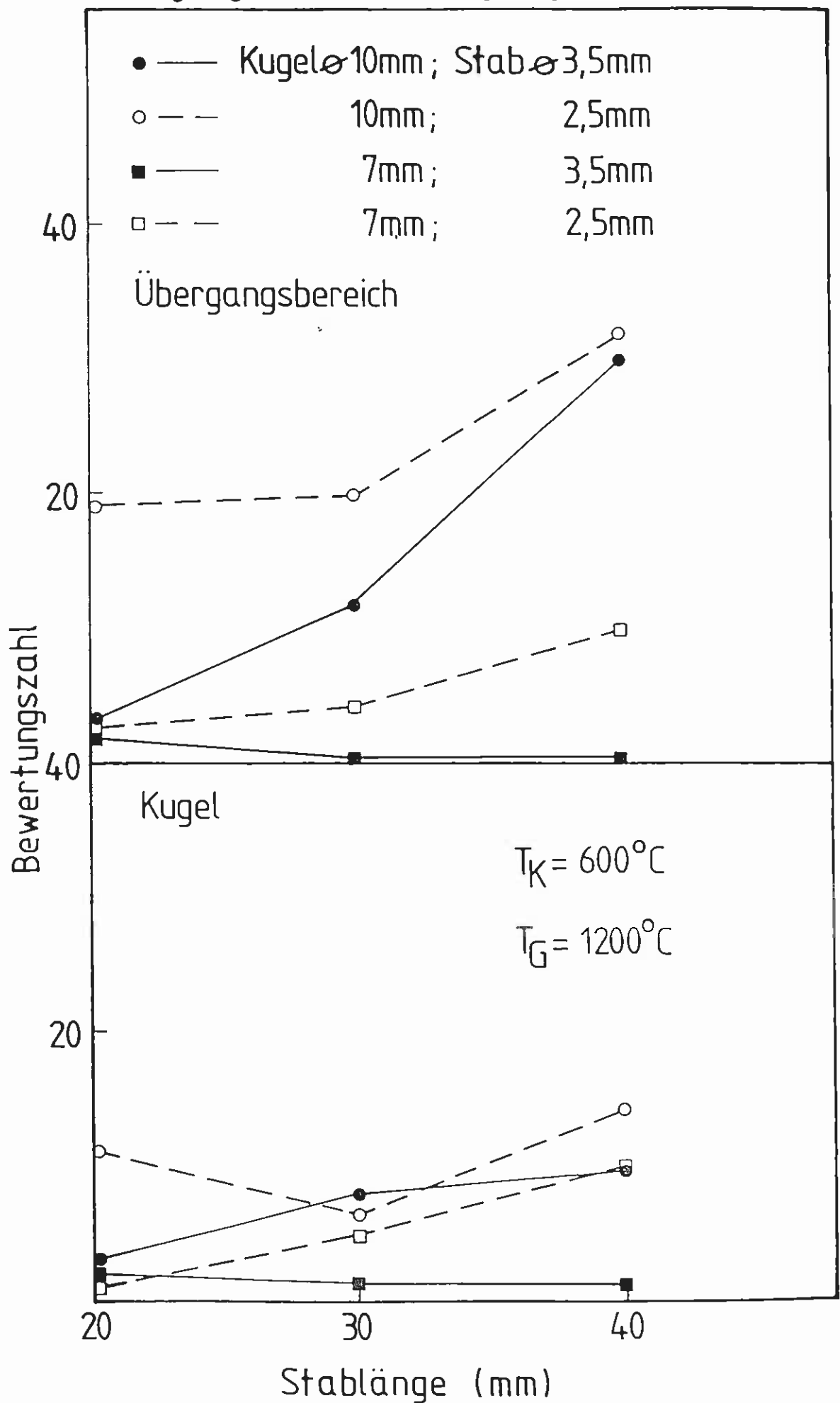
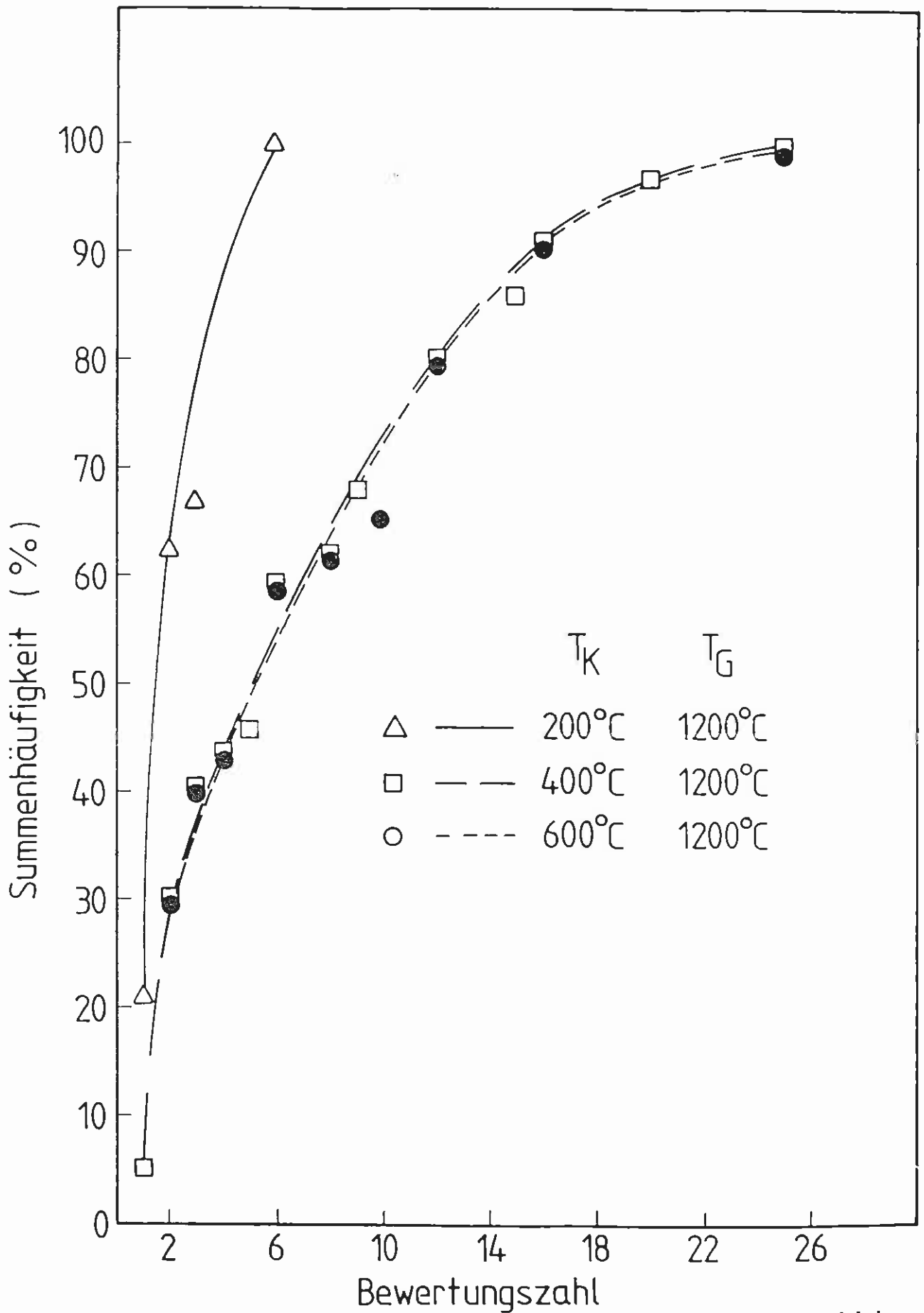


Abb.: 13

# Gußqualität in Abhängigkeit von der Formtemperatur

Gießtemperatur: 1200°C



# Gußqualität in Abhängigkeit von der Formtemperatur

Gießtemperatur: 1100°C

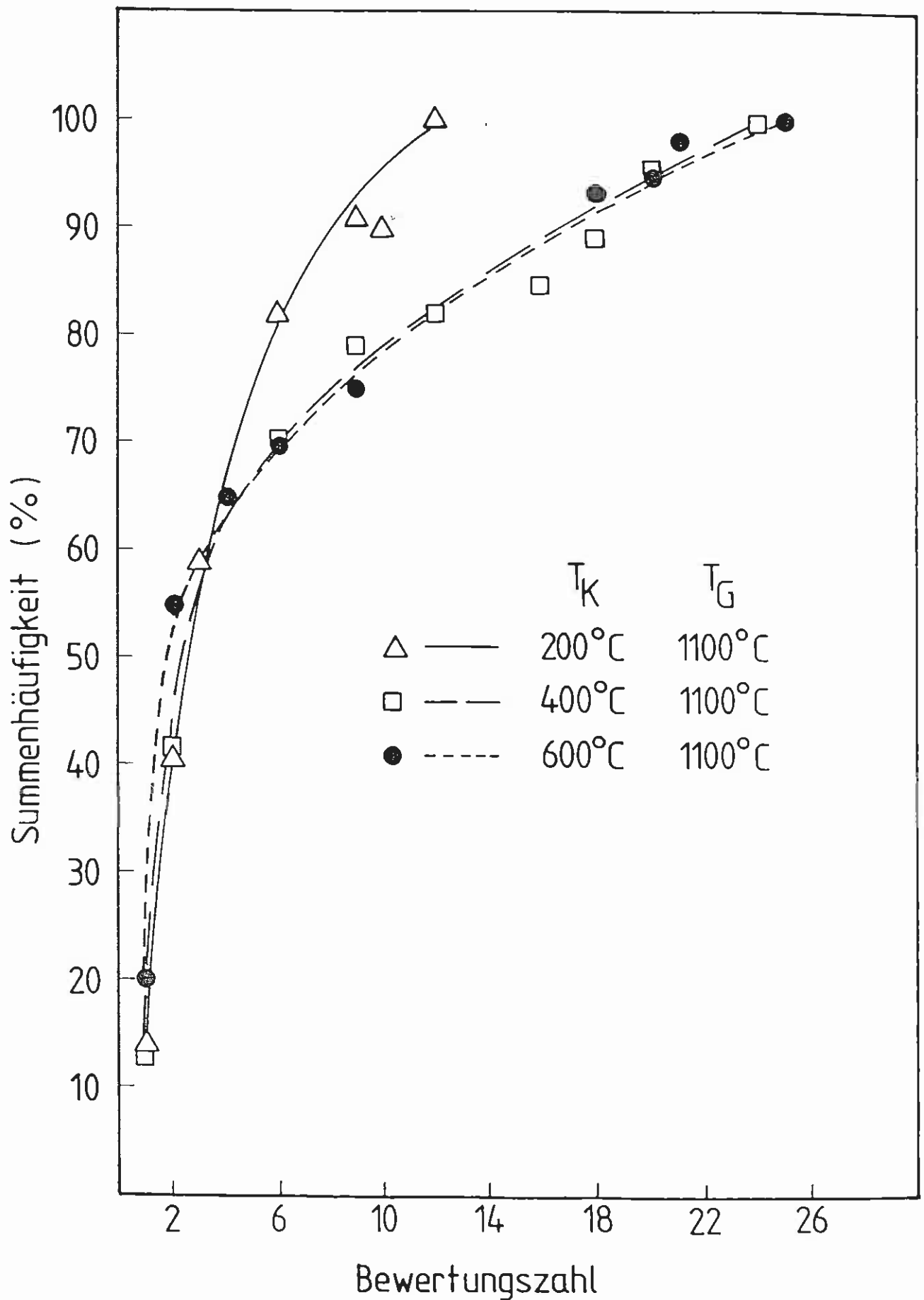


Abb.: 15



Abb. 16  
Typische Anordnung  
der Gußmodelle ("Baum")

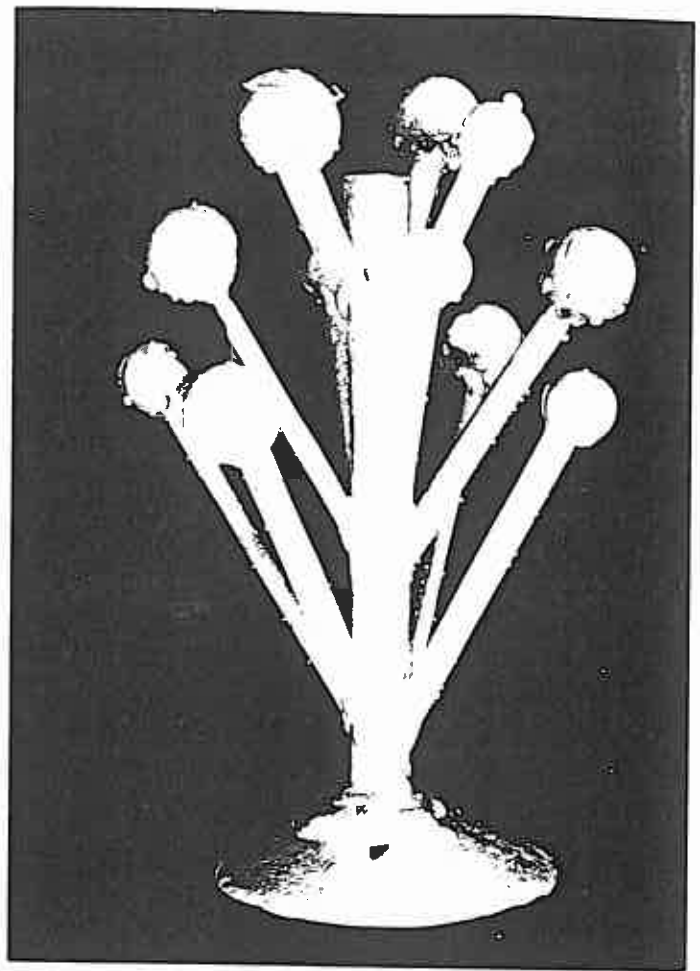
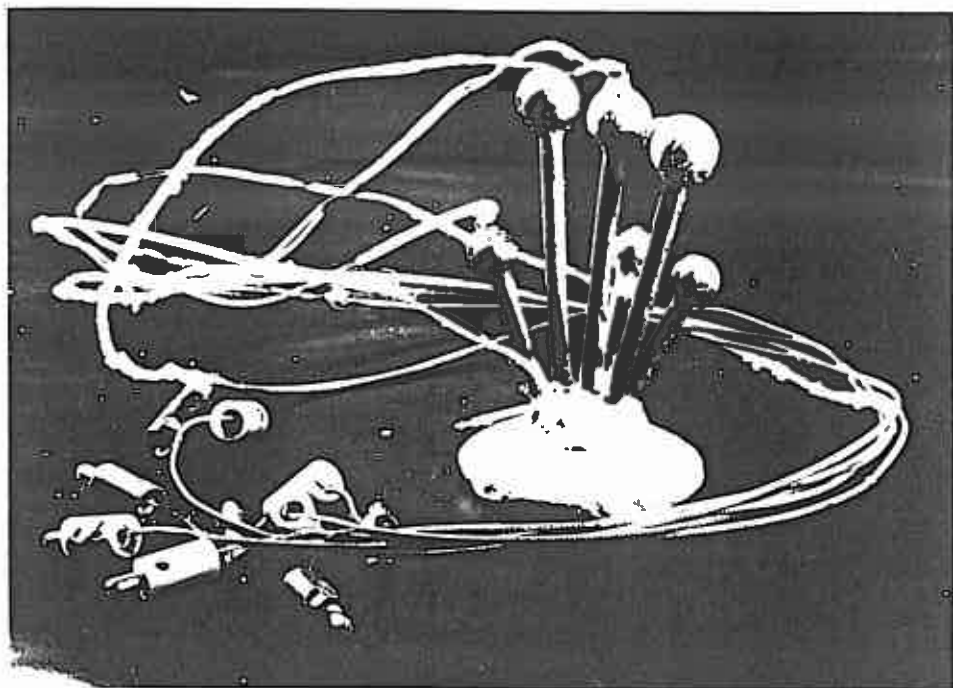
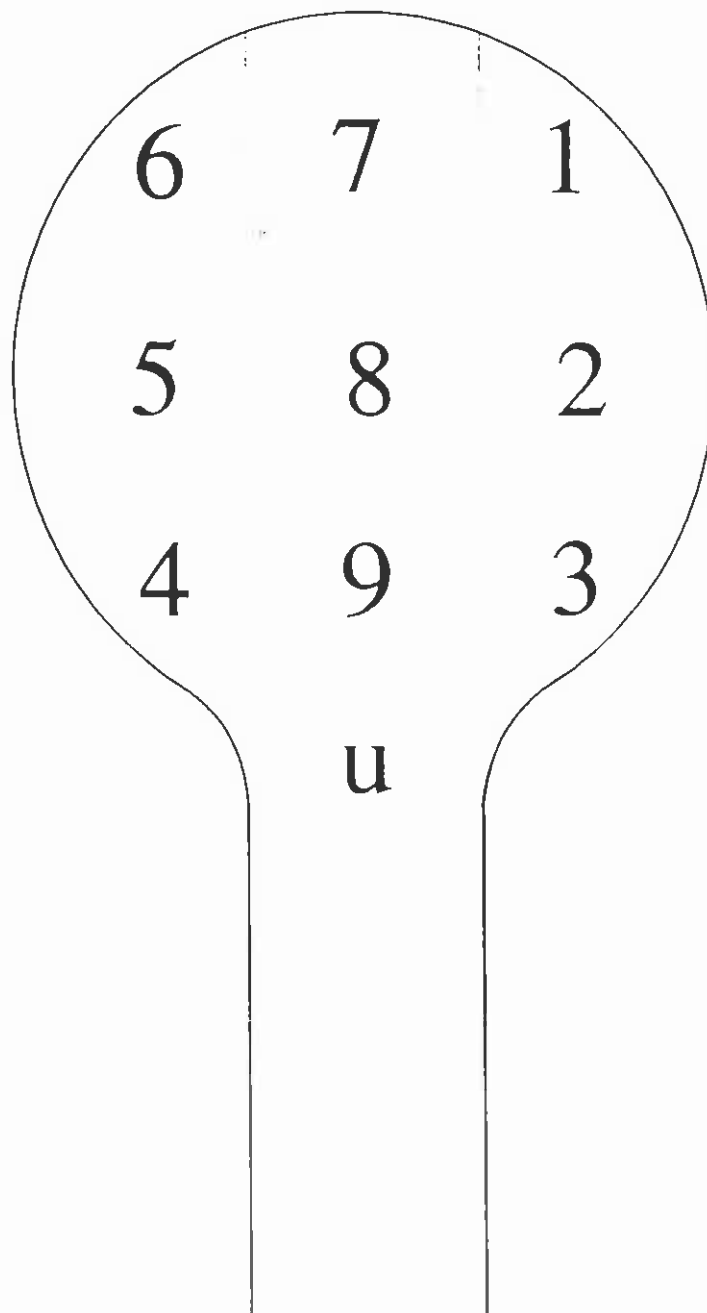


Abb. 17  
Modelle zentral am  
Einguß ("Igel")



Querschnitt durch ein Gußmodell mit der Segmentierung für die Messung der Porosität

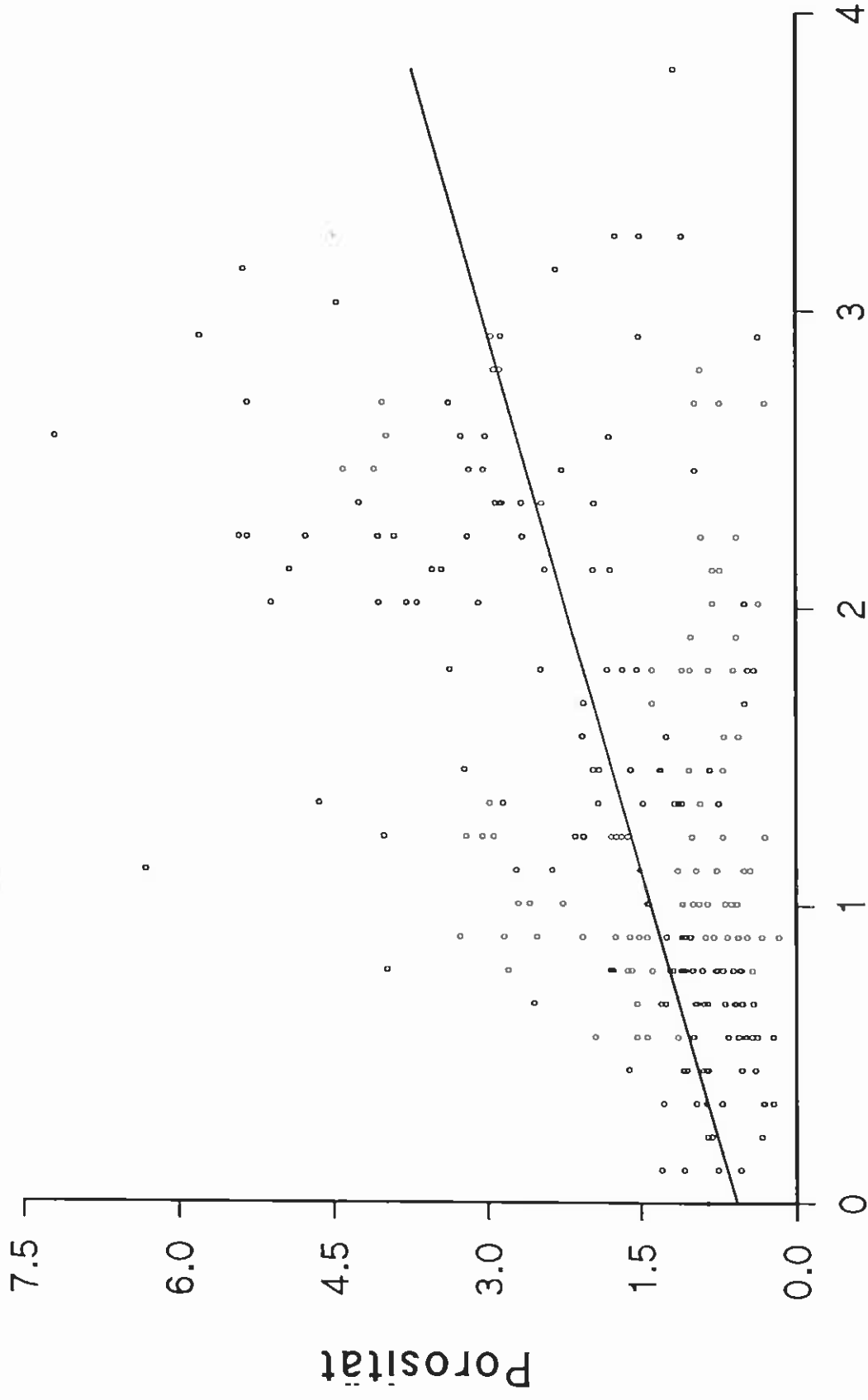


Segment 1-7 wurde zum Abschnitt Randzone zusammengefaßt

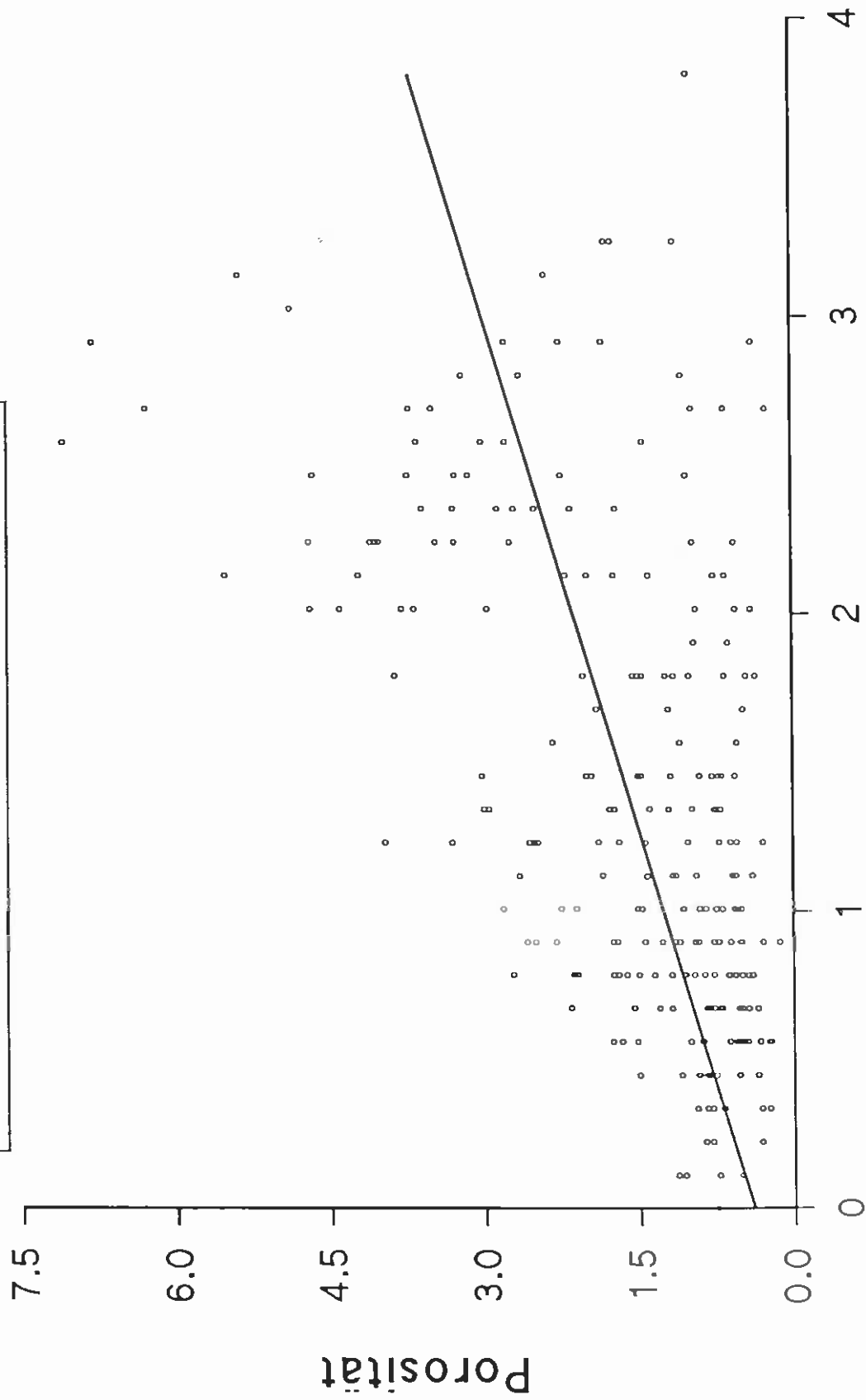
Segment 8 entspricht "Kugelmitte"

und Abschnitt u entspricht dem Anguß

Abhängigkeit der Porosität Kugel gesamt  
von der Porosität aus Dichte

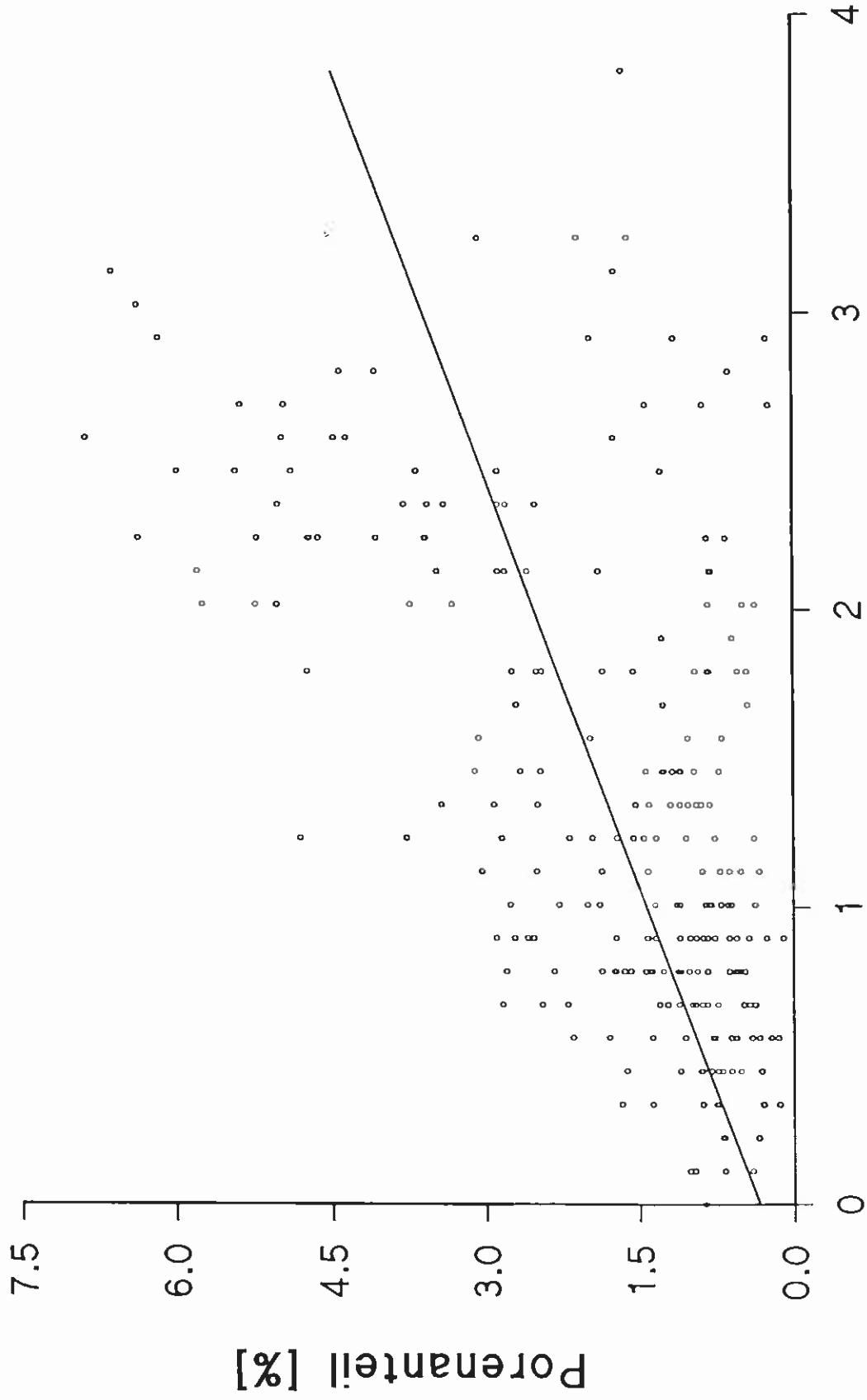


Abhängigkeit der Porosität Kugelrand  
von der Porosität aus Dichte



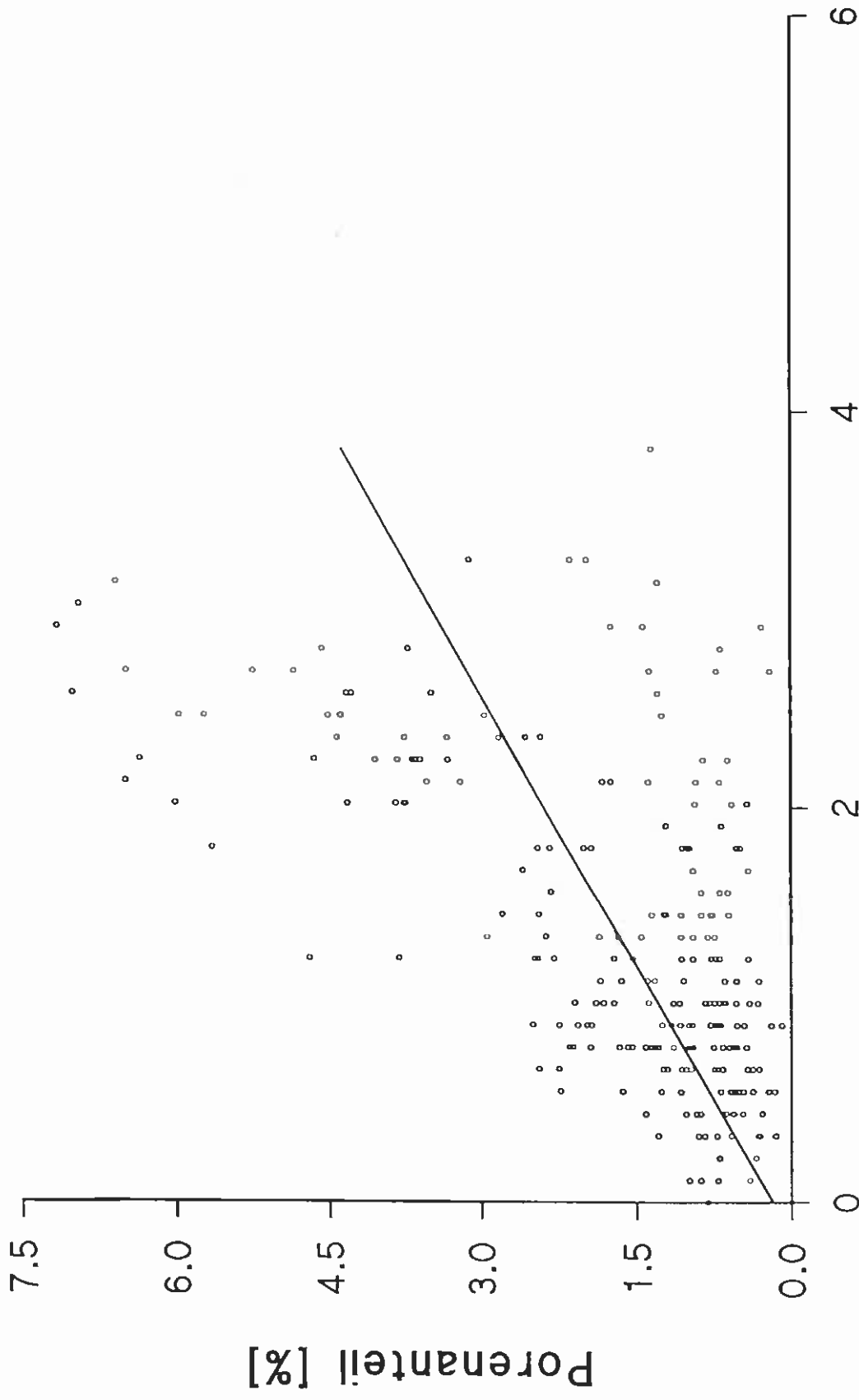
Porosität aus Dichte [%]

Abhängigkeit des Porenanteils Kugel gesamt  
von der Porosität aus Dichte

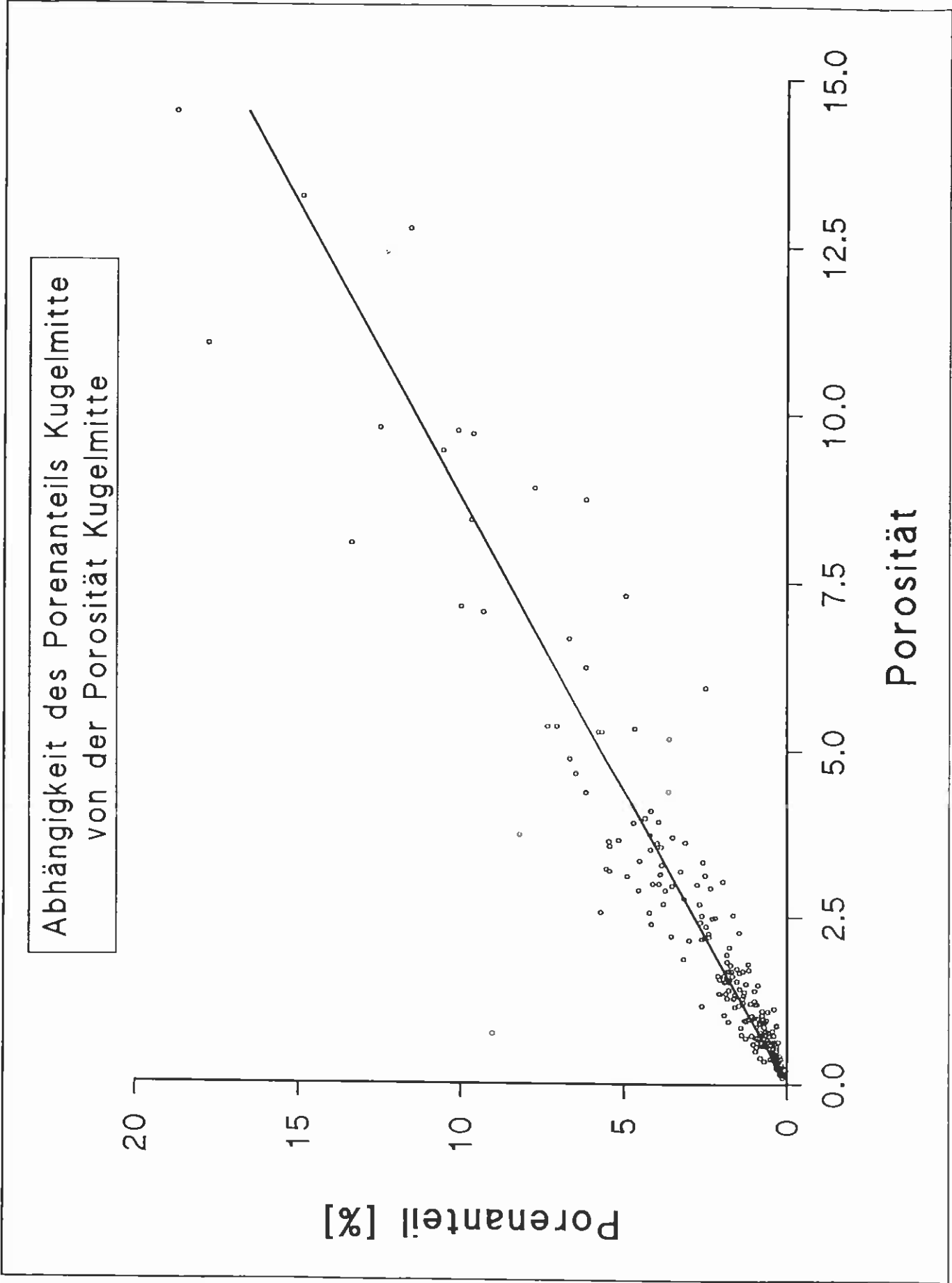


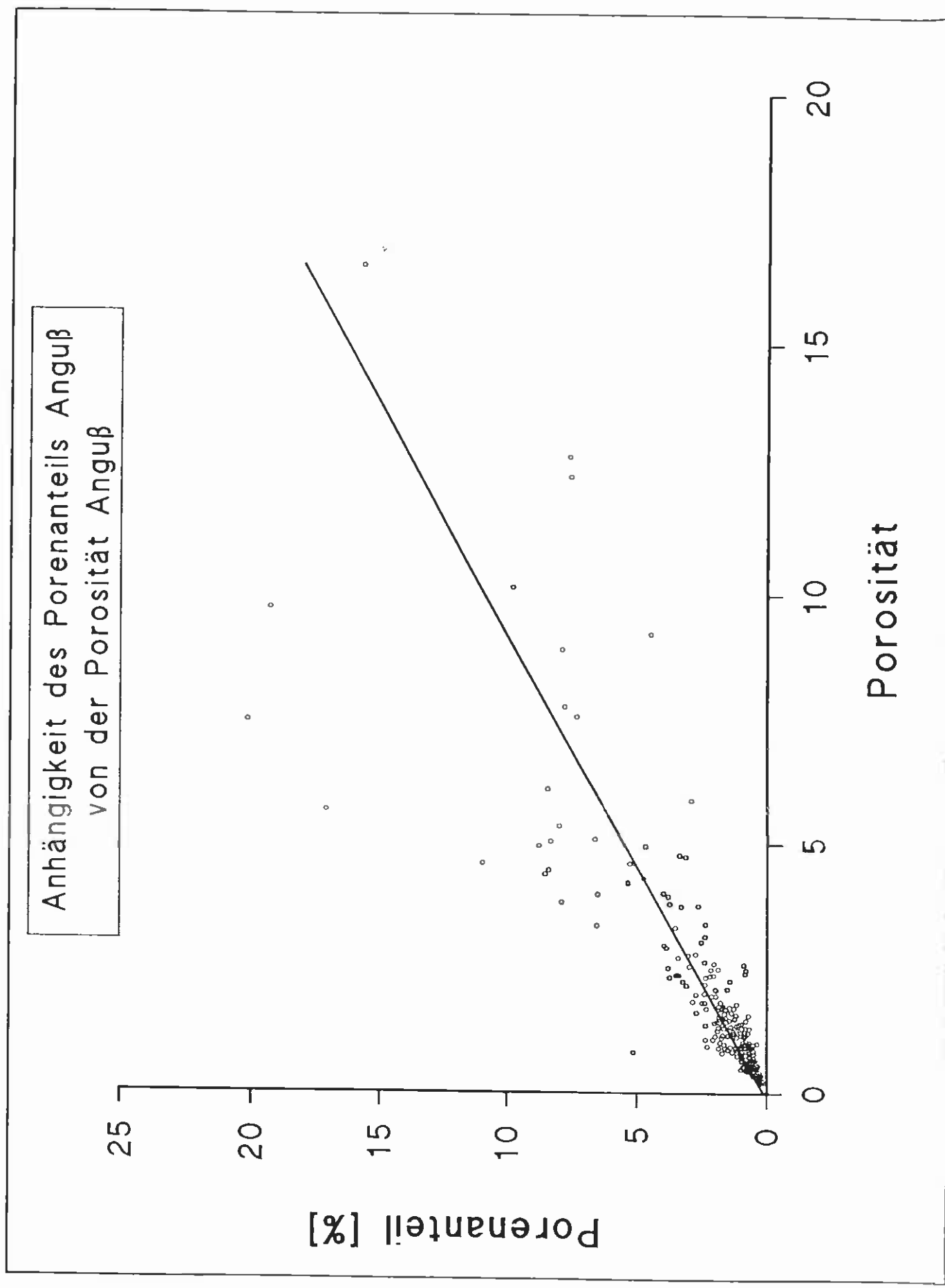
Porosität aus Dichte [%]

Abhängigkeit des Porenanteils Kugelrand  
von der Porosität aus Dichte



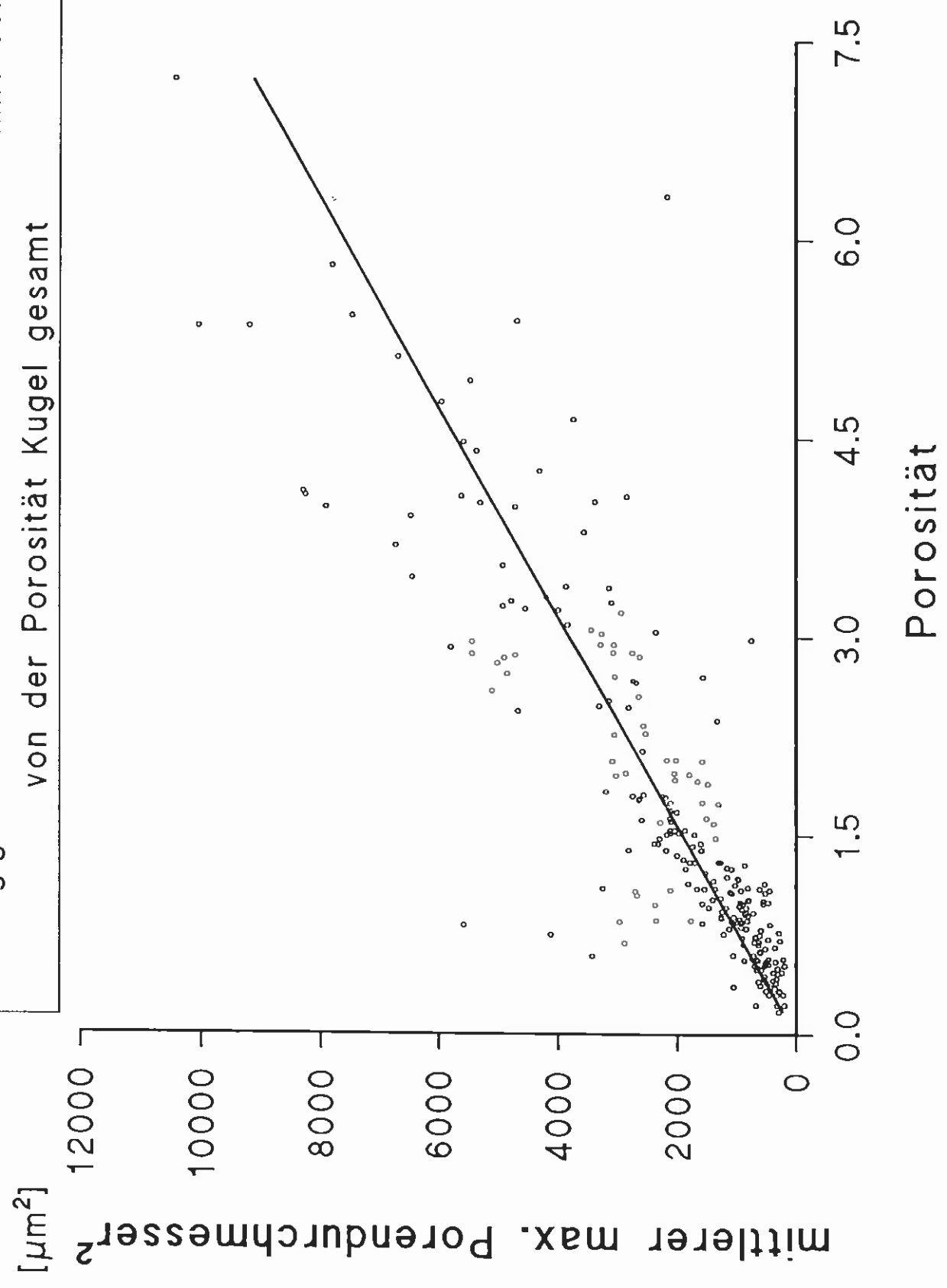
Porosität aus Dichte [%]



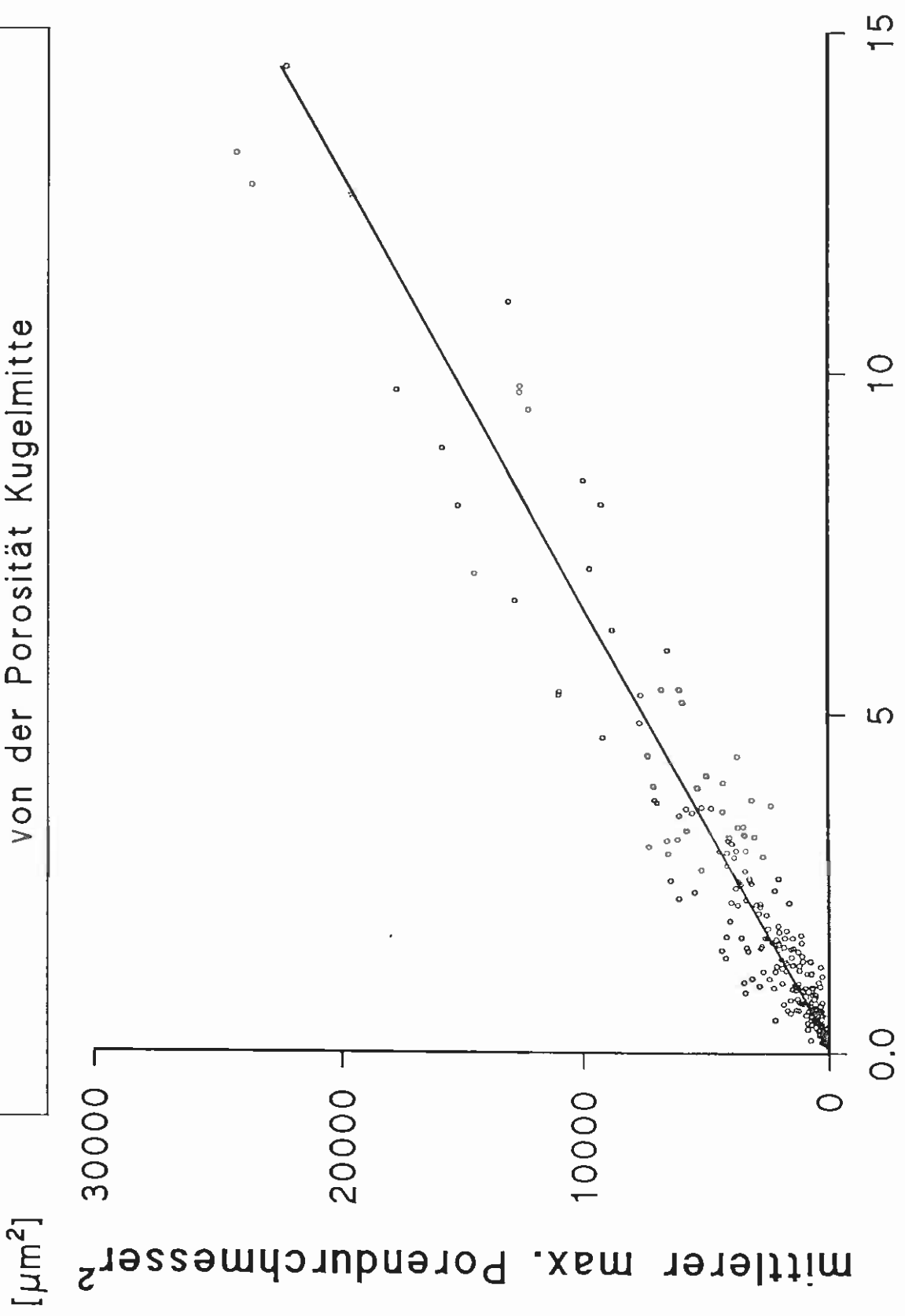




Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmessers  
von der Porosität Kugel gesamt

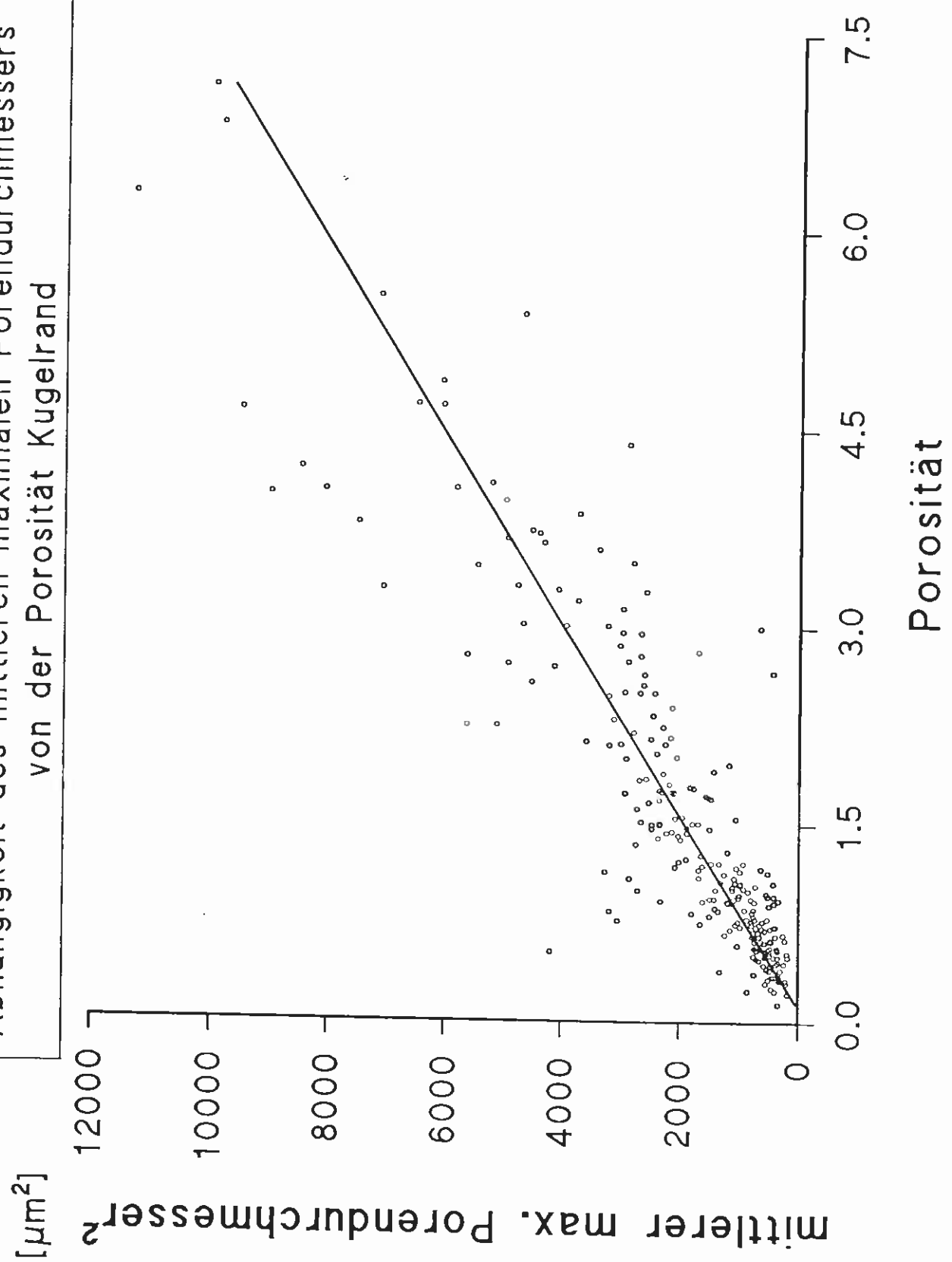


Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmessers  
von der Porosität Kugelmitte

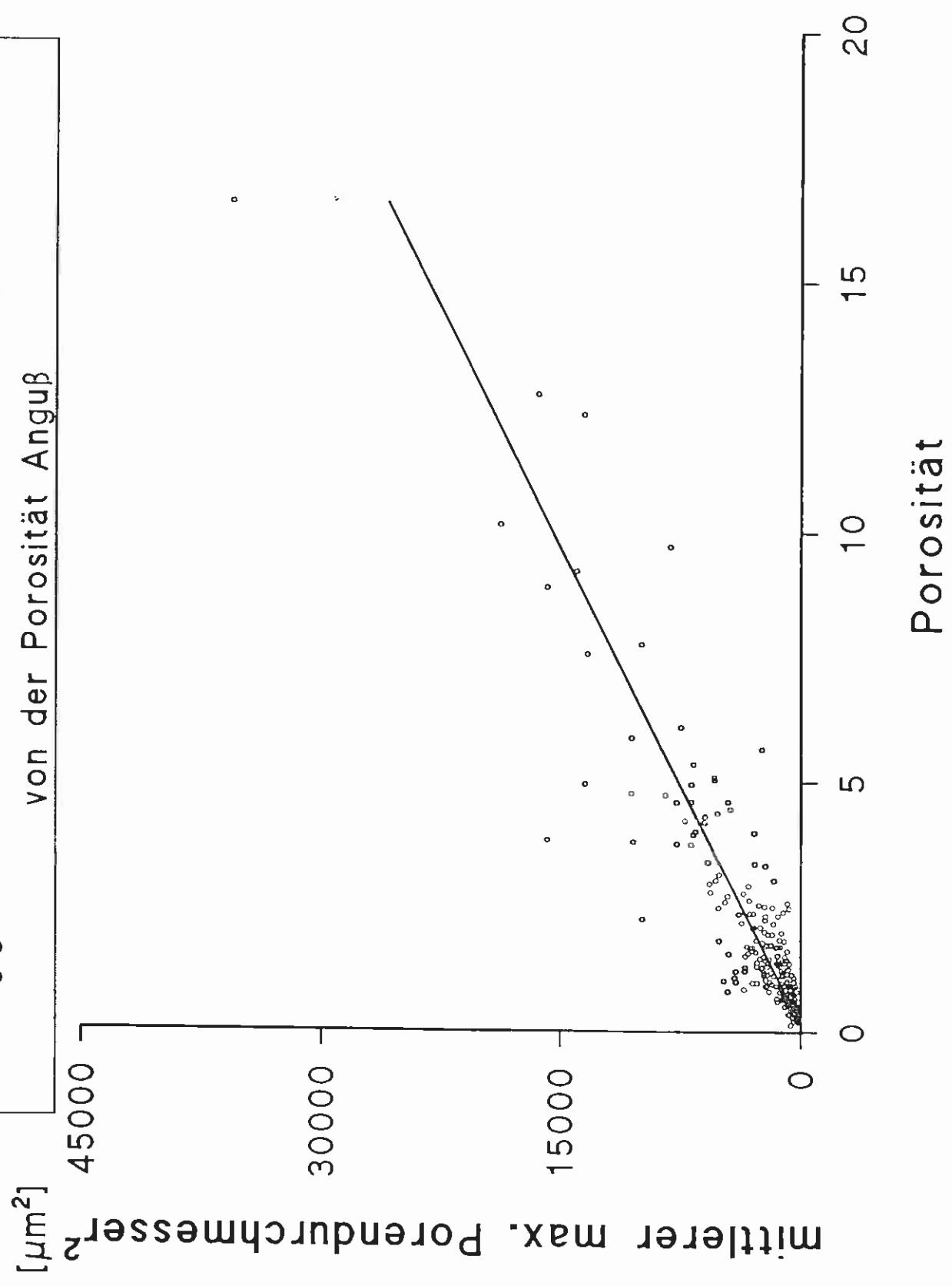


Porosität

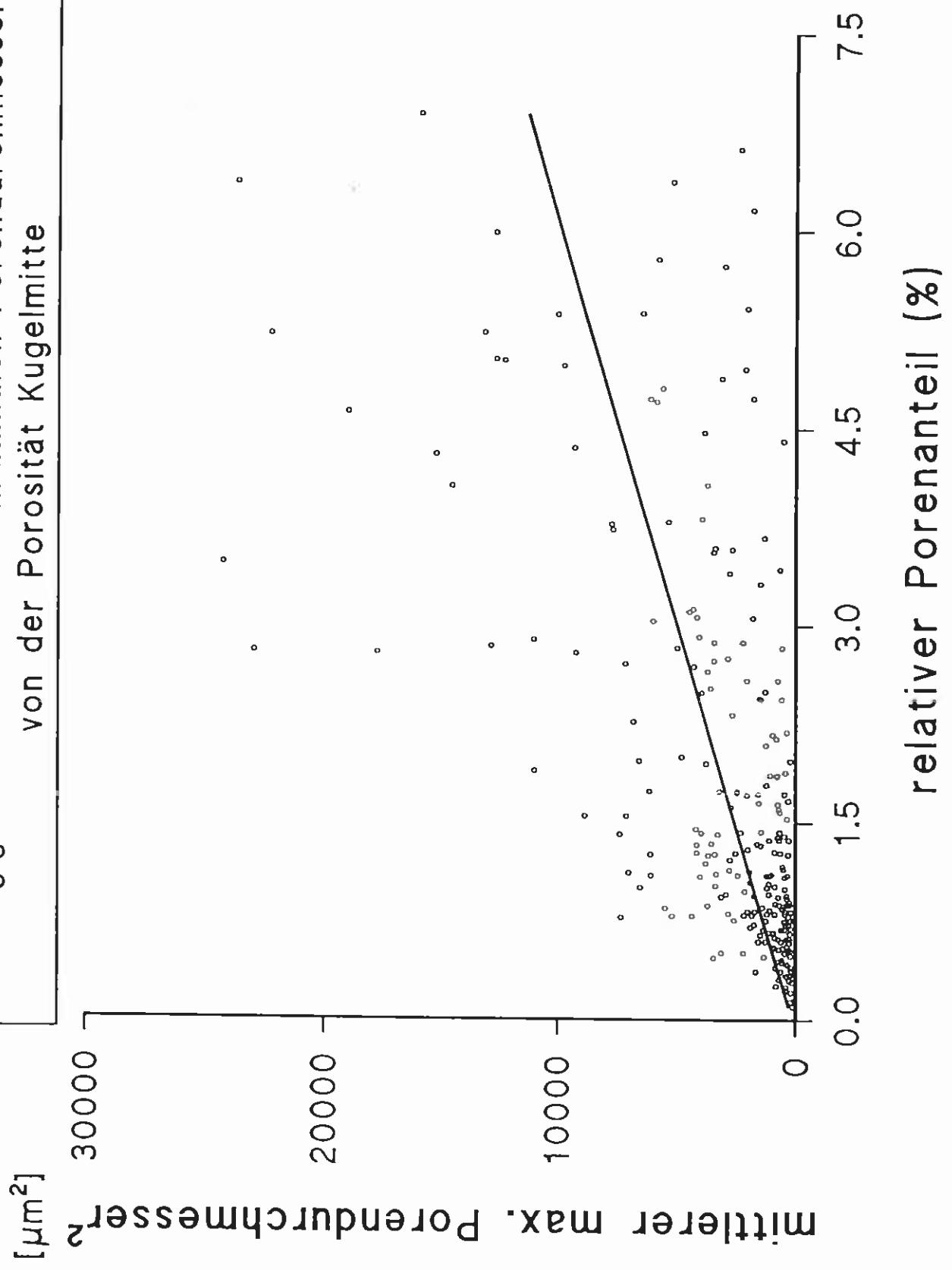
Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmessers  
von der Porosität Kugelrand



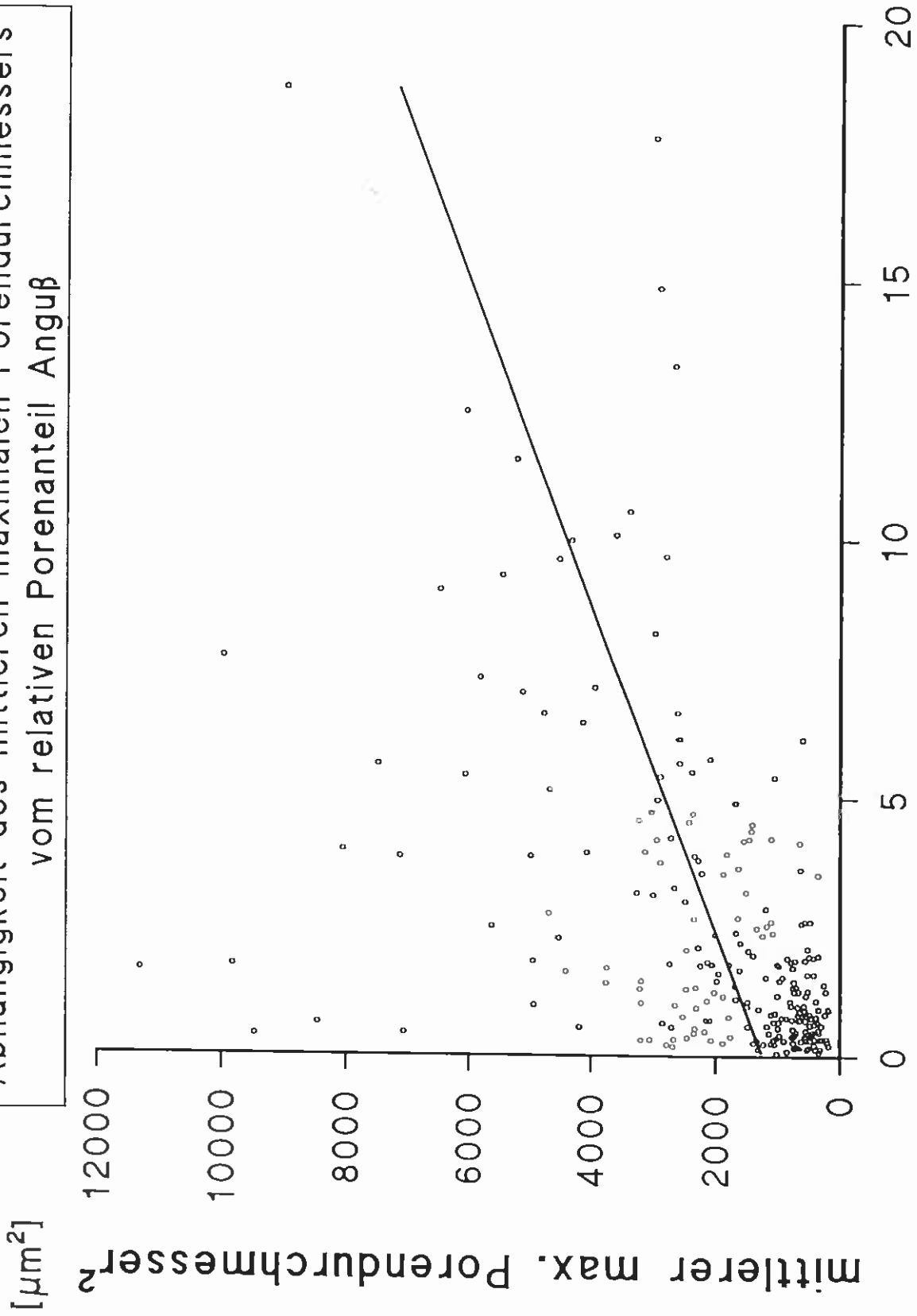
Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmessers  
von der Porosität Anguß



Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmesser  
von der Porosität Kugelmitte



Abhängigkeit des mittleren maximalen Porendurchmessers vom relativen Porenanteil Anguß

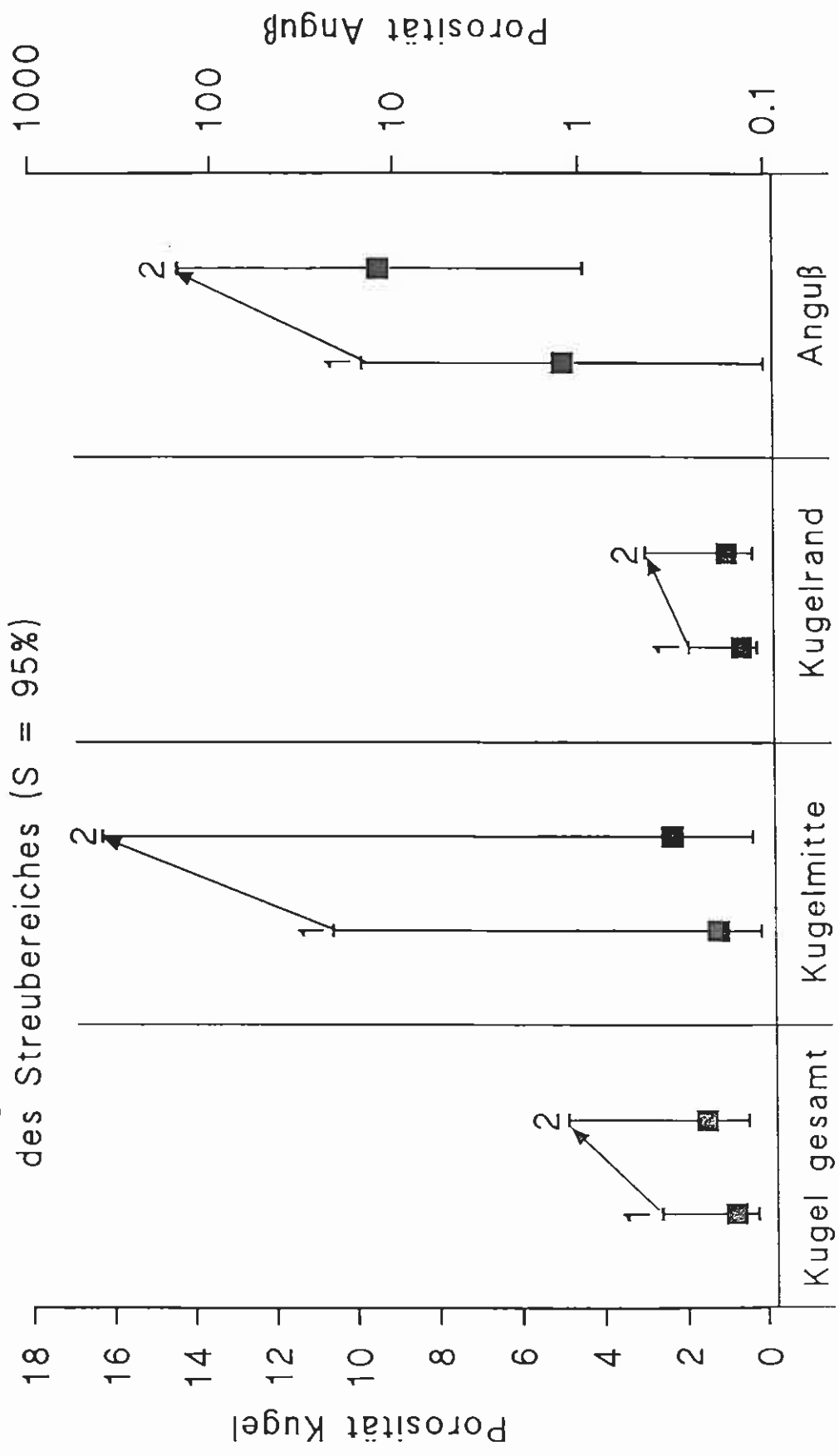


relativer Porenanteil [%]

## Einfluß der Formmasse auf die Porosität

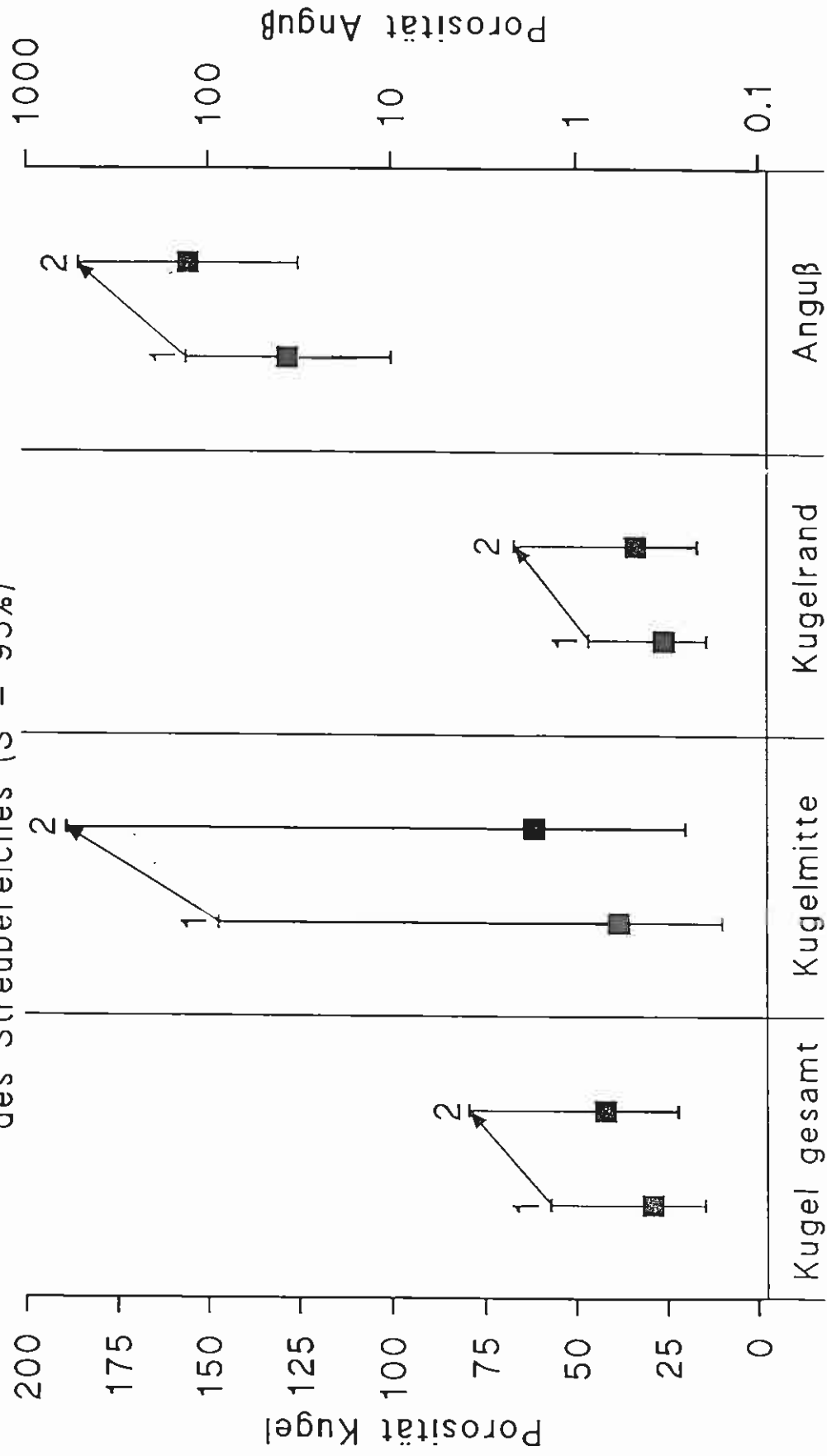
- 1 - Einbettmasse 1: phosphatgebunden
- 2 - Einbettmasse 2: gipsgebunden

Angabe des geometrischen Mittelwertes und des Streubereiches (S = 95%)



# Einfluß der Formmasse auf den maximalen Porendurchmesser

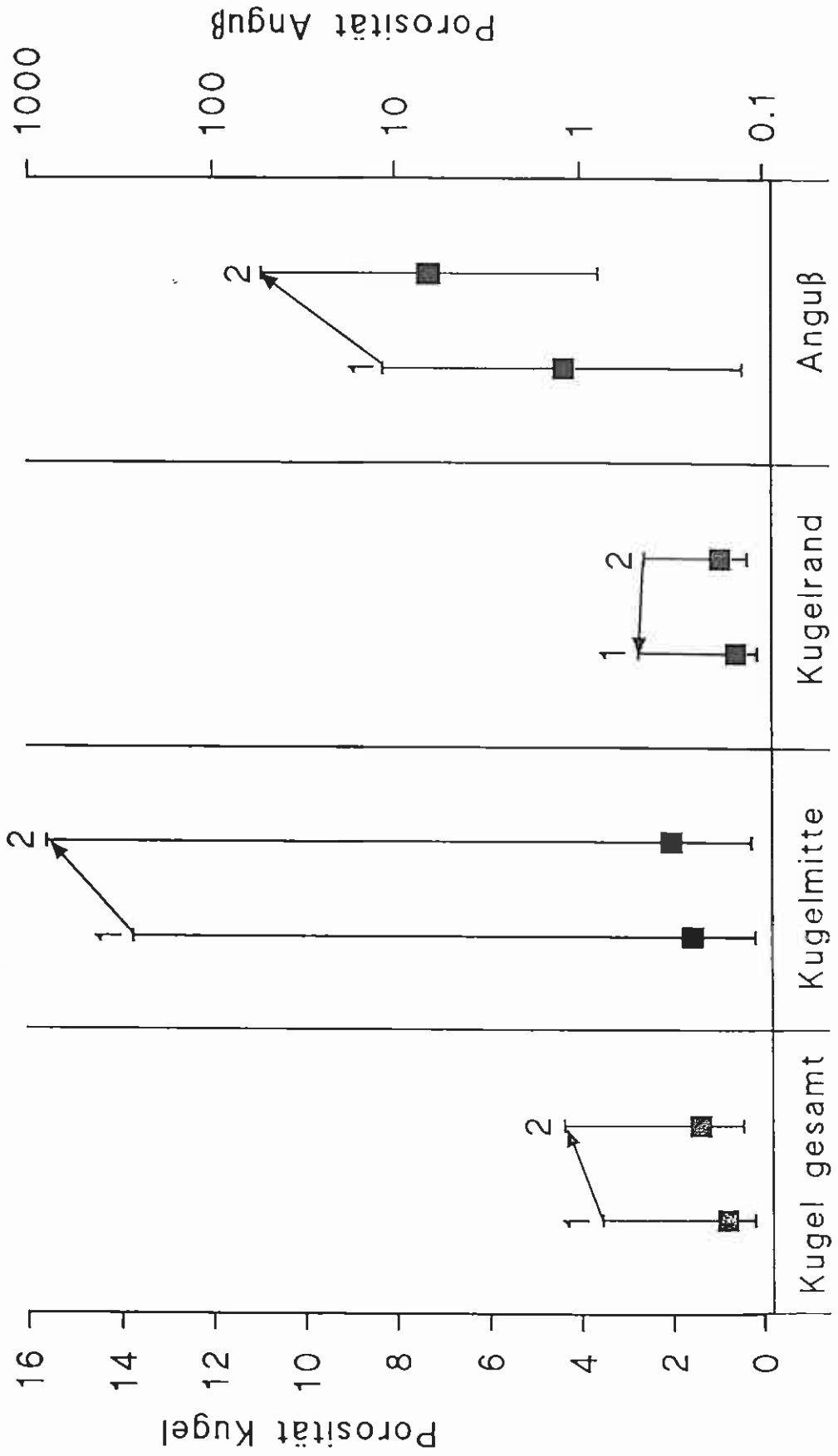
- 1 - Einbettmasse 1: phosphatgebunden
  - 2 - Einbettmasse 2: gipsgebunden
- Angabe des geometrischen Mittelwertes und des Streubereiches (S = 95%)





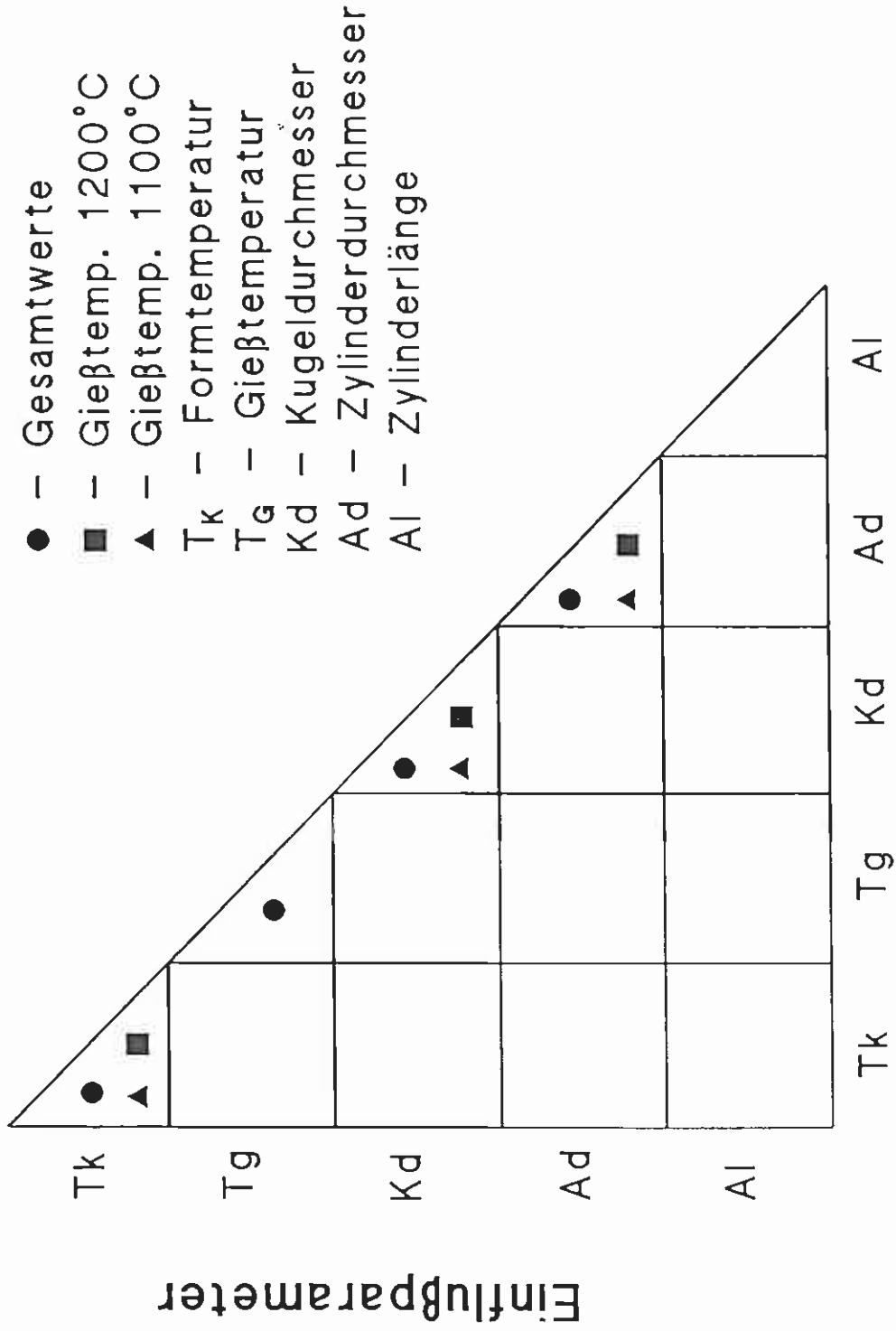
## Einfluß der Formmasse auf den relativen Porenanteil

- 1 - Einbettmasse 1: phosphatgebunden
  - 2 - Einbettmasse 2: gipsgebunden
- Angabe des geometrischen Mittelwertes und des Streubereiches ( $S = 95\%$ )



# Varianzanalyse der Porosität der Kugel

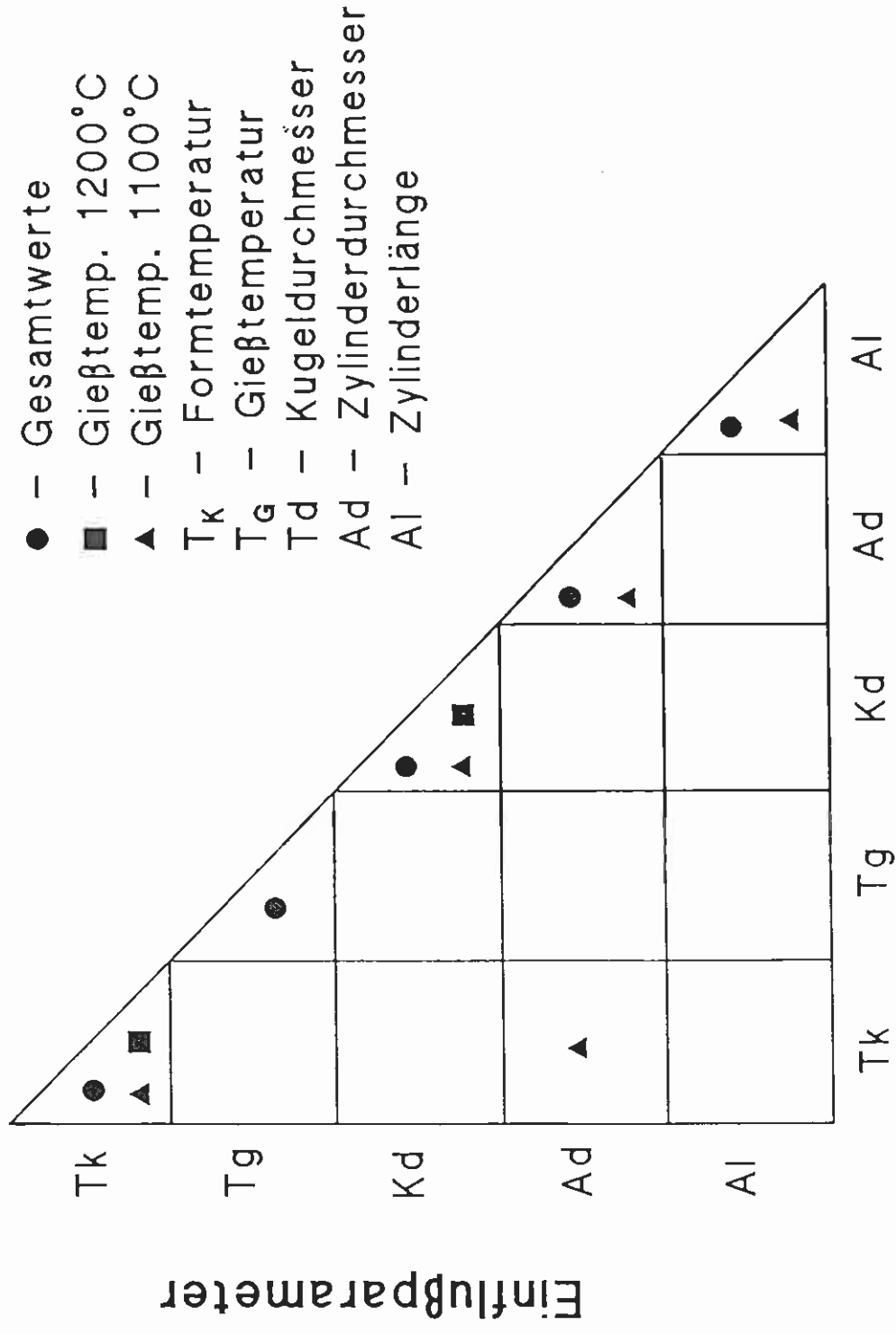
Signifikante Einflüsse ( $p \leq 0.05$ )



Einflußparameter

# Varianzanalyse der Porosität der Kugelmitte M

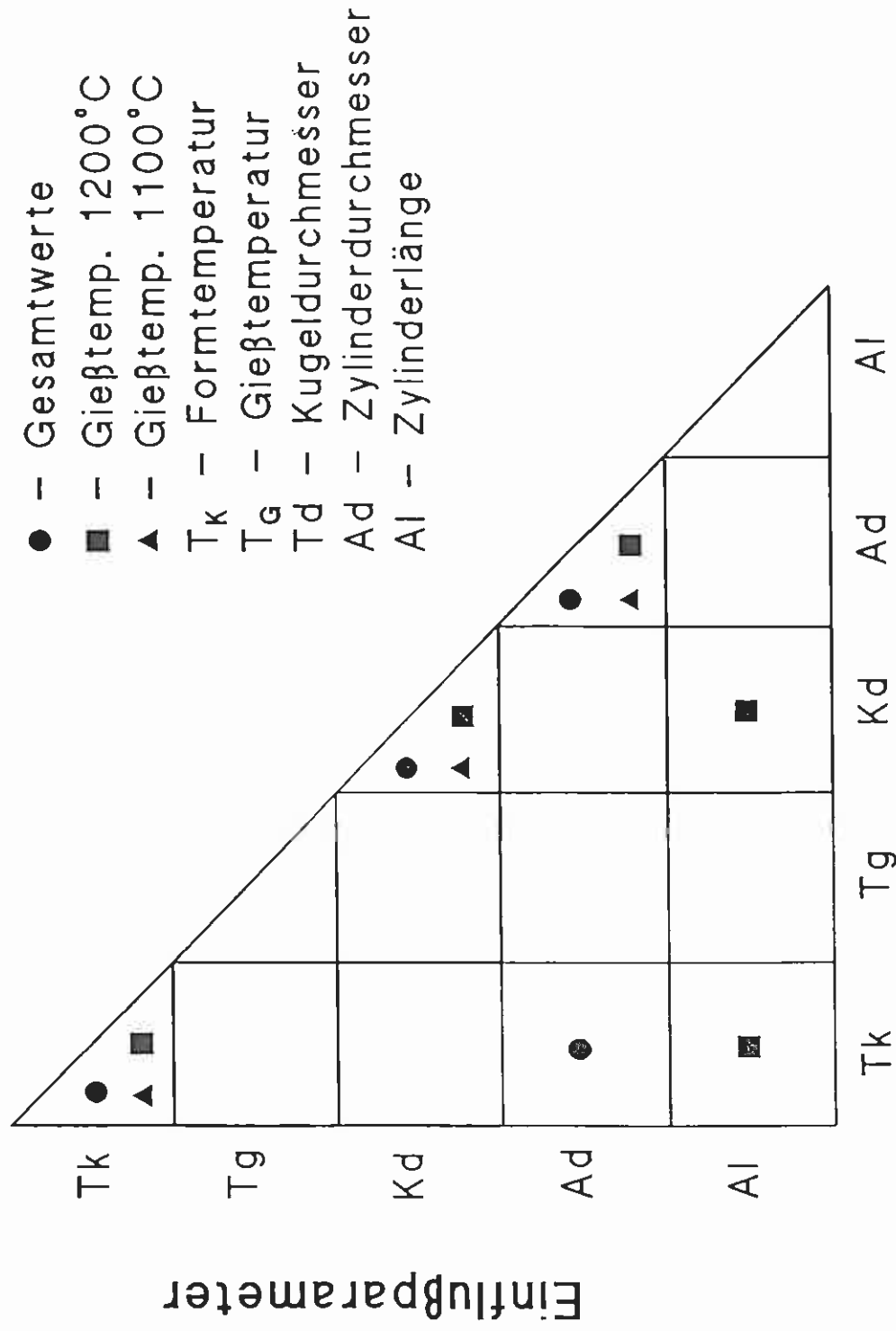
Signifikante Einflüsse ( $p \leq 0.05$ )



Einflußparameter

# Varianzanalyse der Porosität der Randzone R

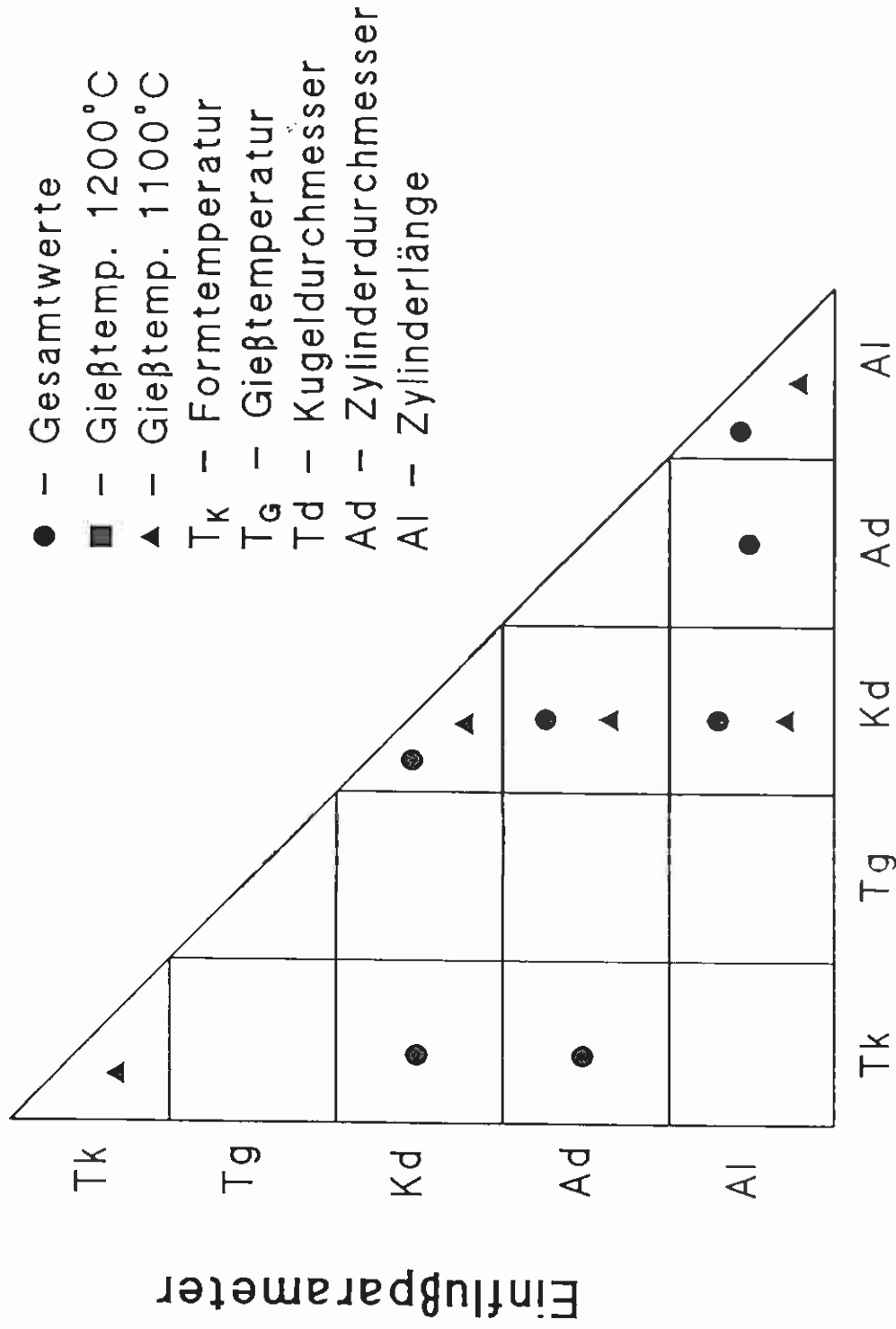
Signifikante Einflüsse ( $p \leq 0.05$ )



Einflußparameter

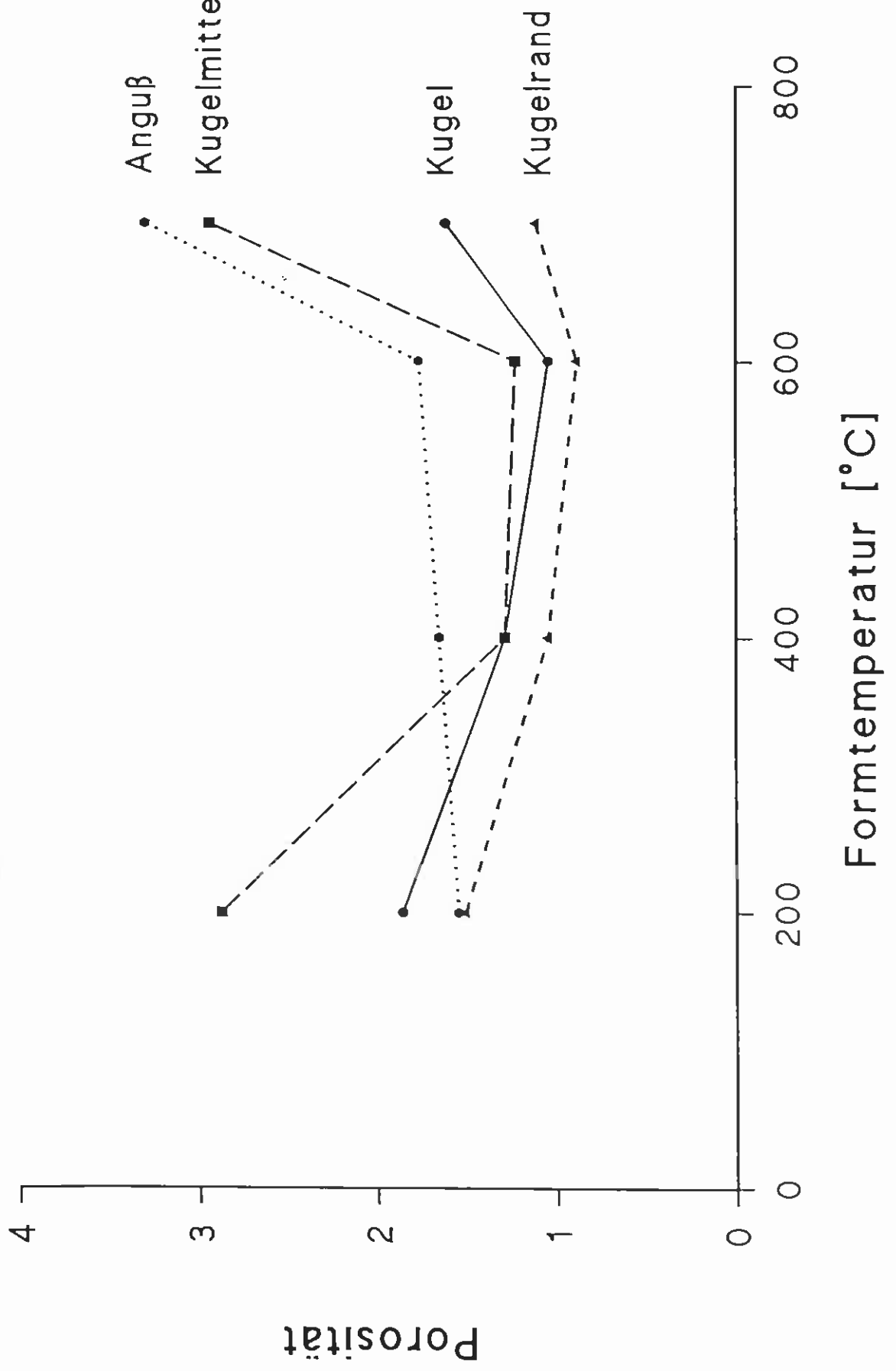
# Varianzanalyse der Porosität des Angusses A

Signifikante Einflüsse ( $p \leq 0.05$ )

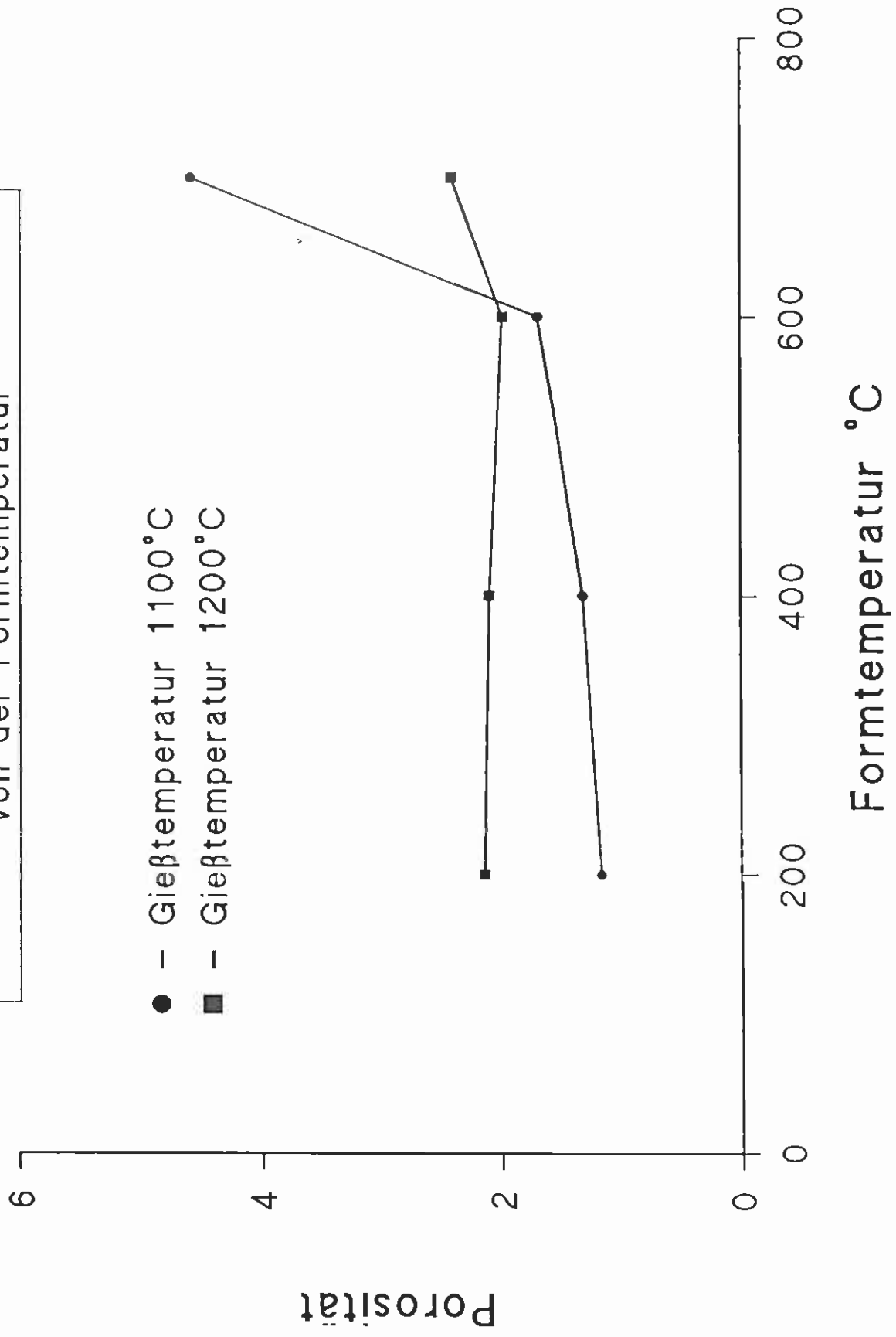


Einflußparameter

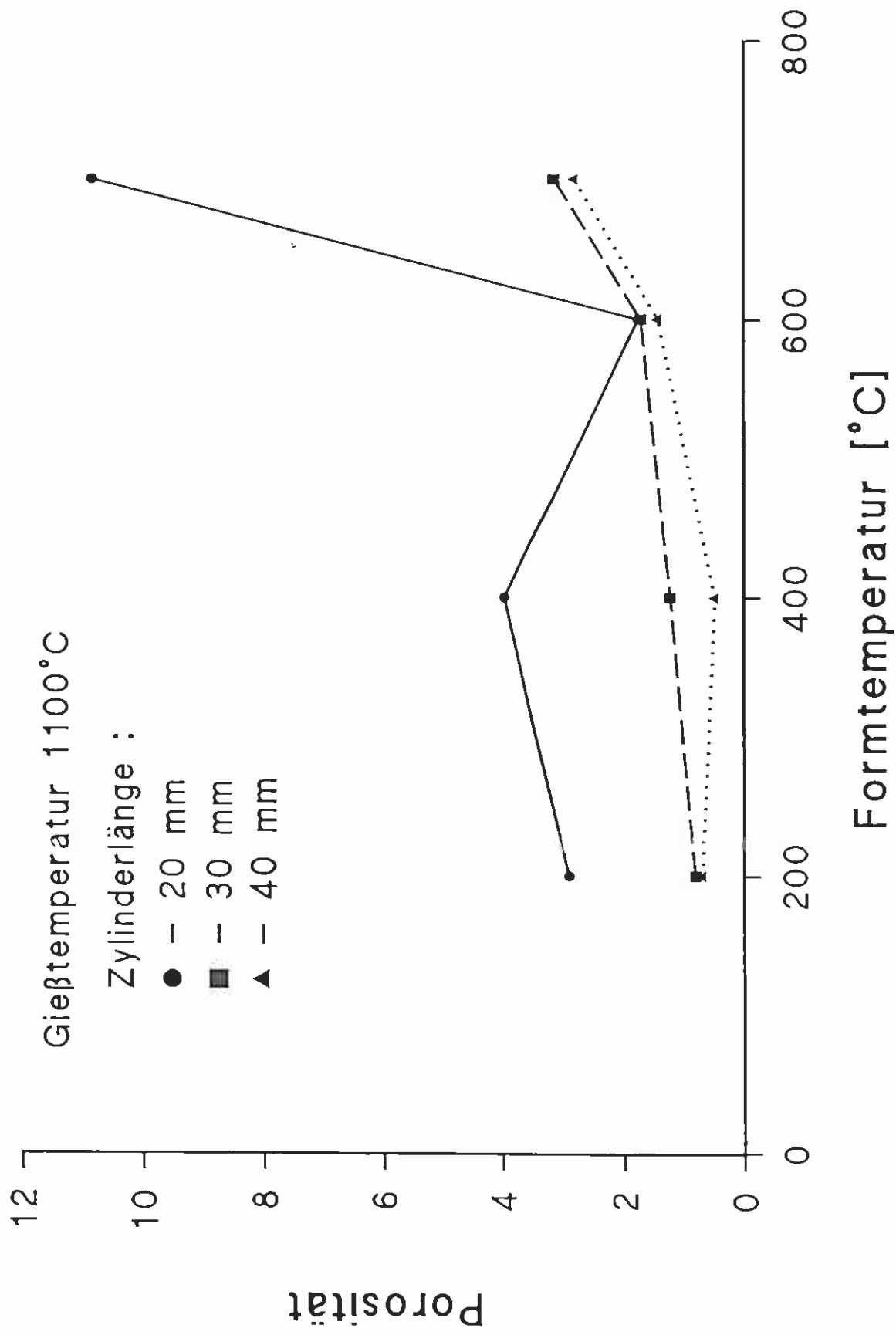
Einfluß der Formtemperatur auf die Porosität



Abhängigkeit der Porosität des Angusses  
von der Formtemperatur

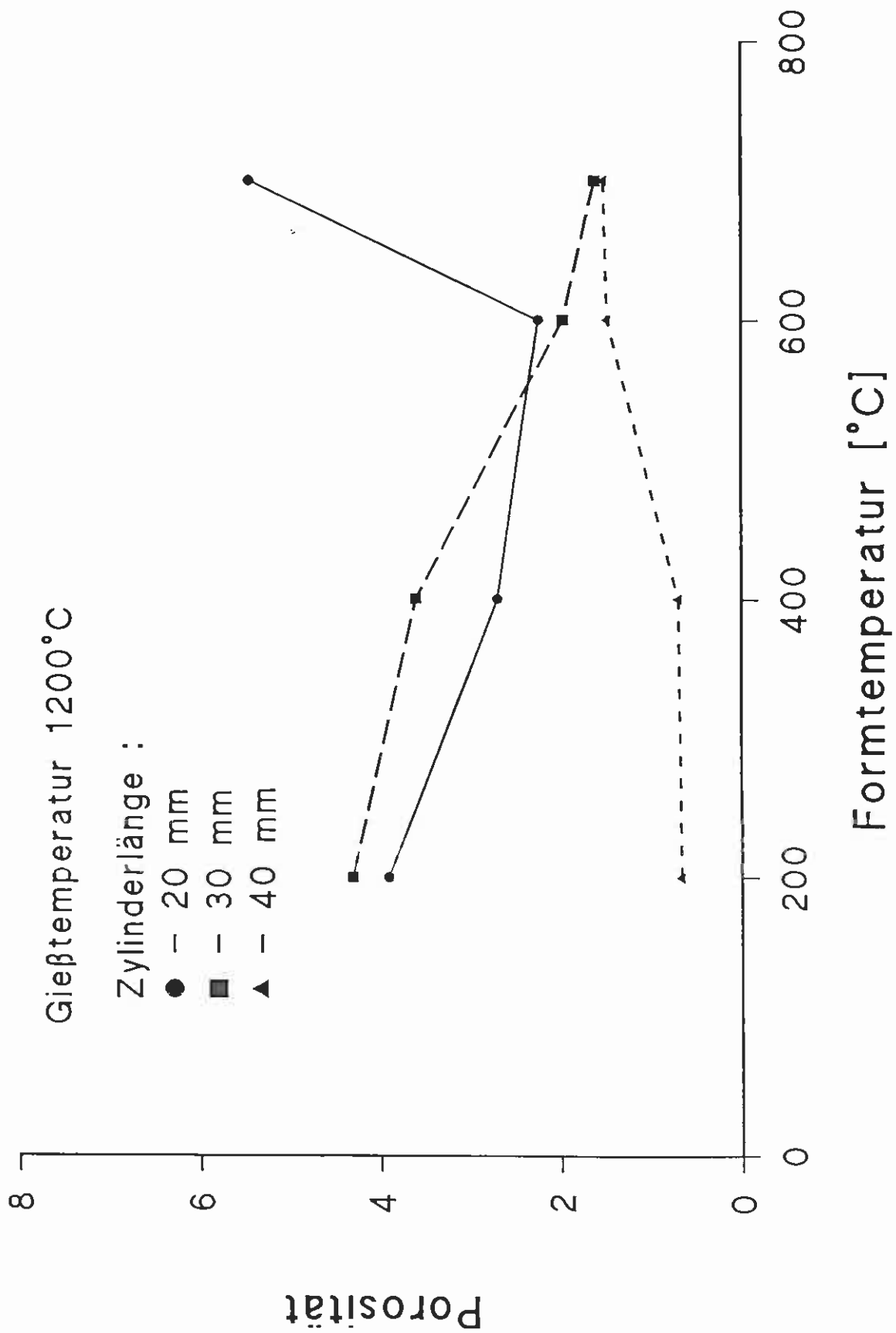


# Porosität des Angusses

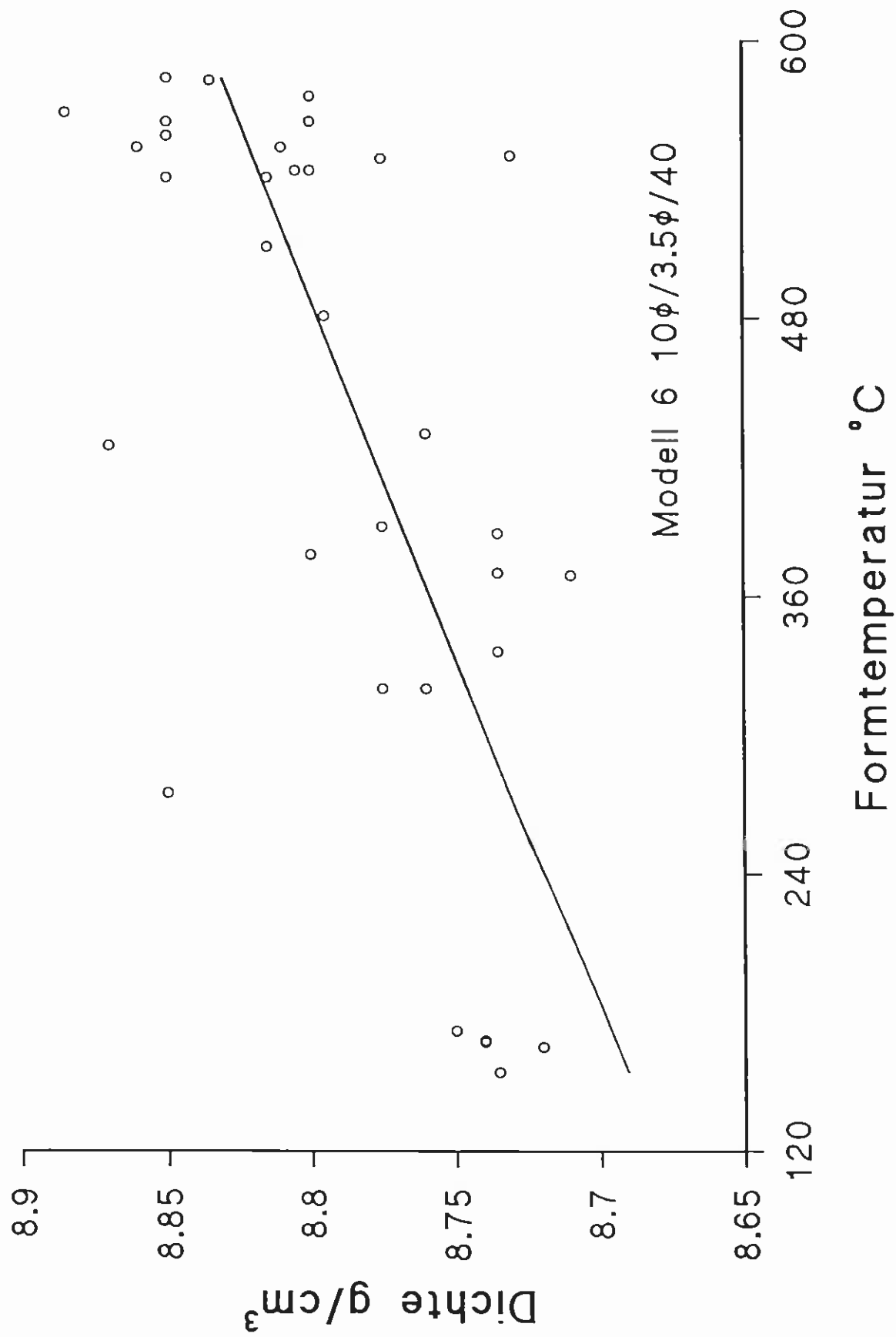




# Porosität des Angusses

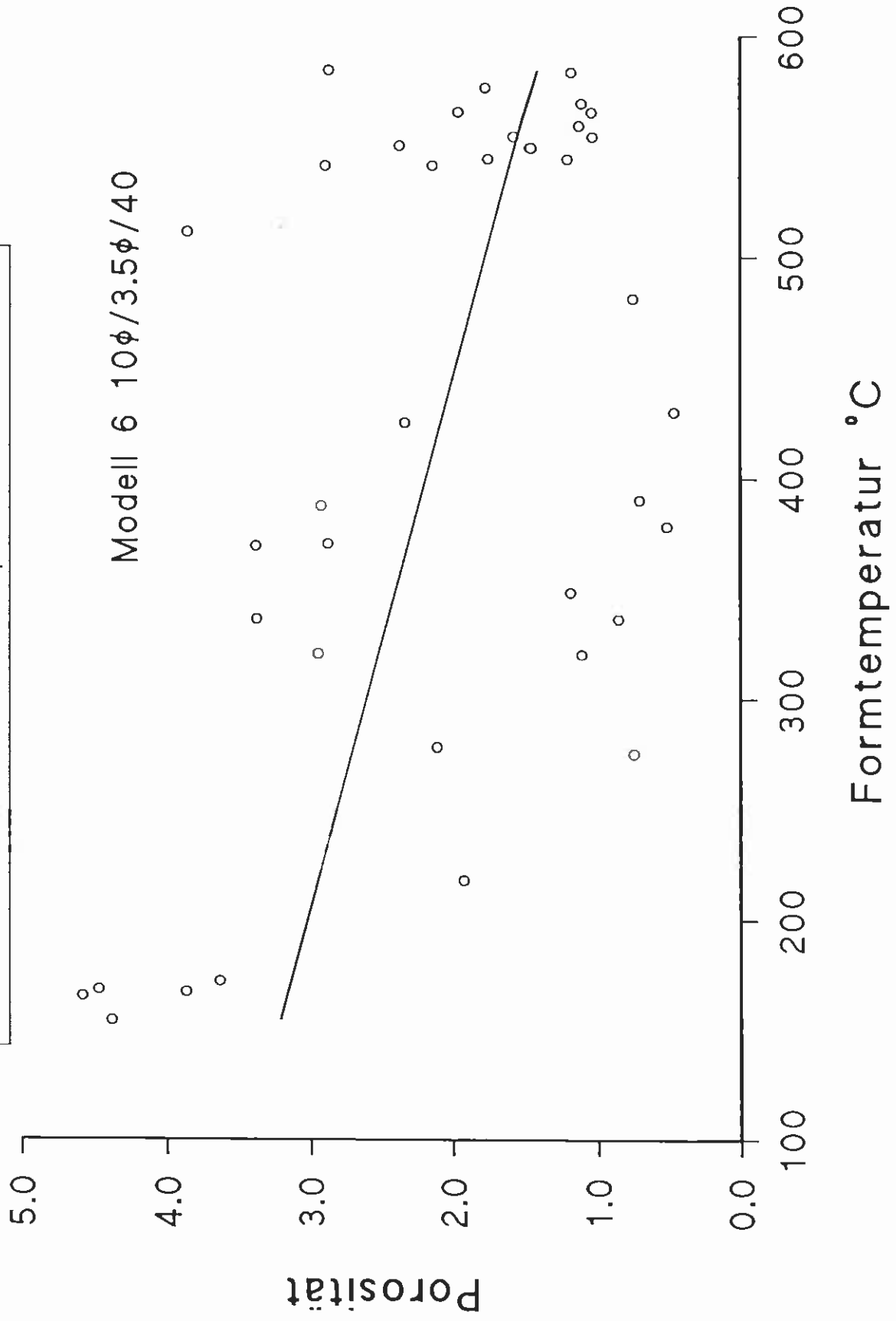


Abhängigkeit der Dichte von der Formtemperatur



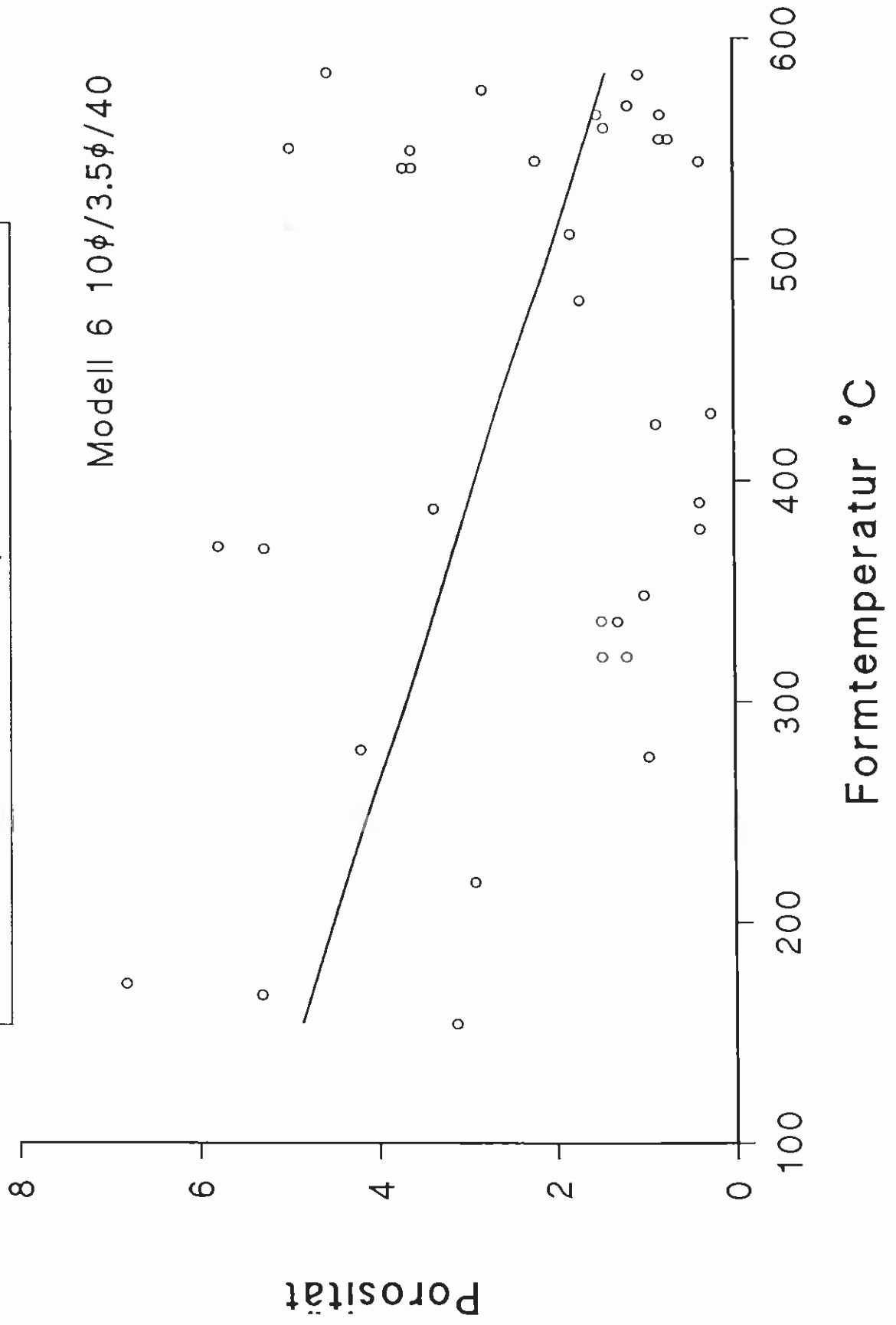
Abhängigkeit der Porosität Kugel gesamt  
von der Formtemperatur

Modell 6  $10\phi/3.5\phi/40$

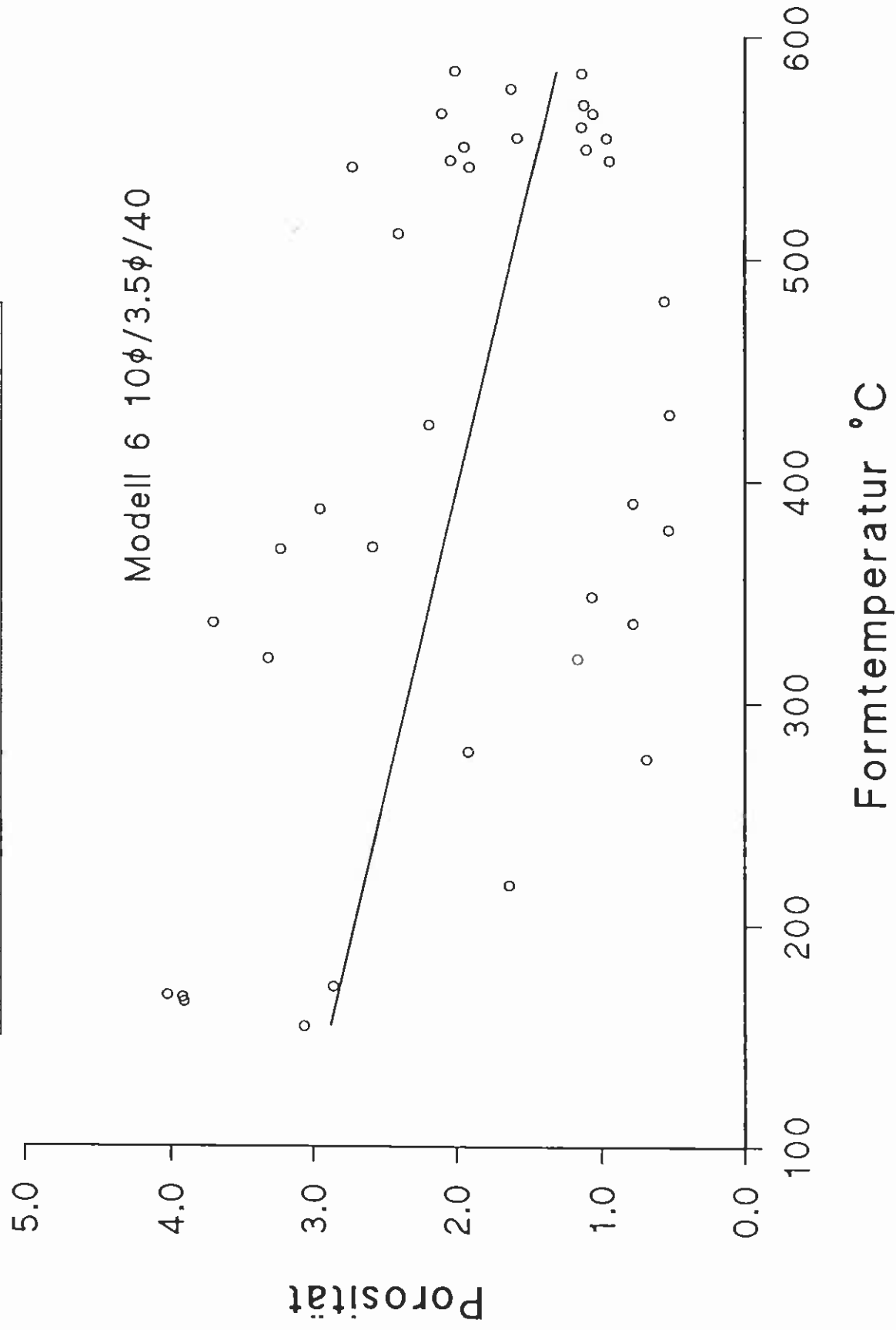


Abhängigkeit der Porosität der Kugelmitte  
von der Formtemperatur

Modell 6  $10\phi/3.5\phi/40$

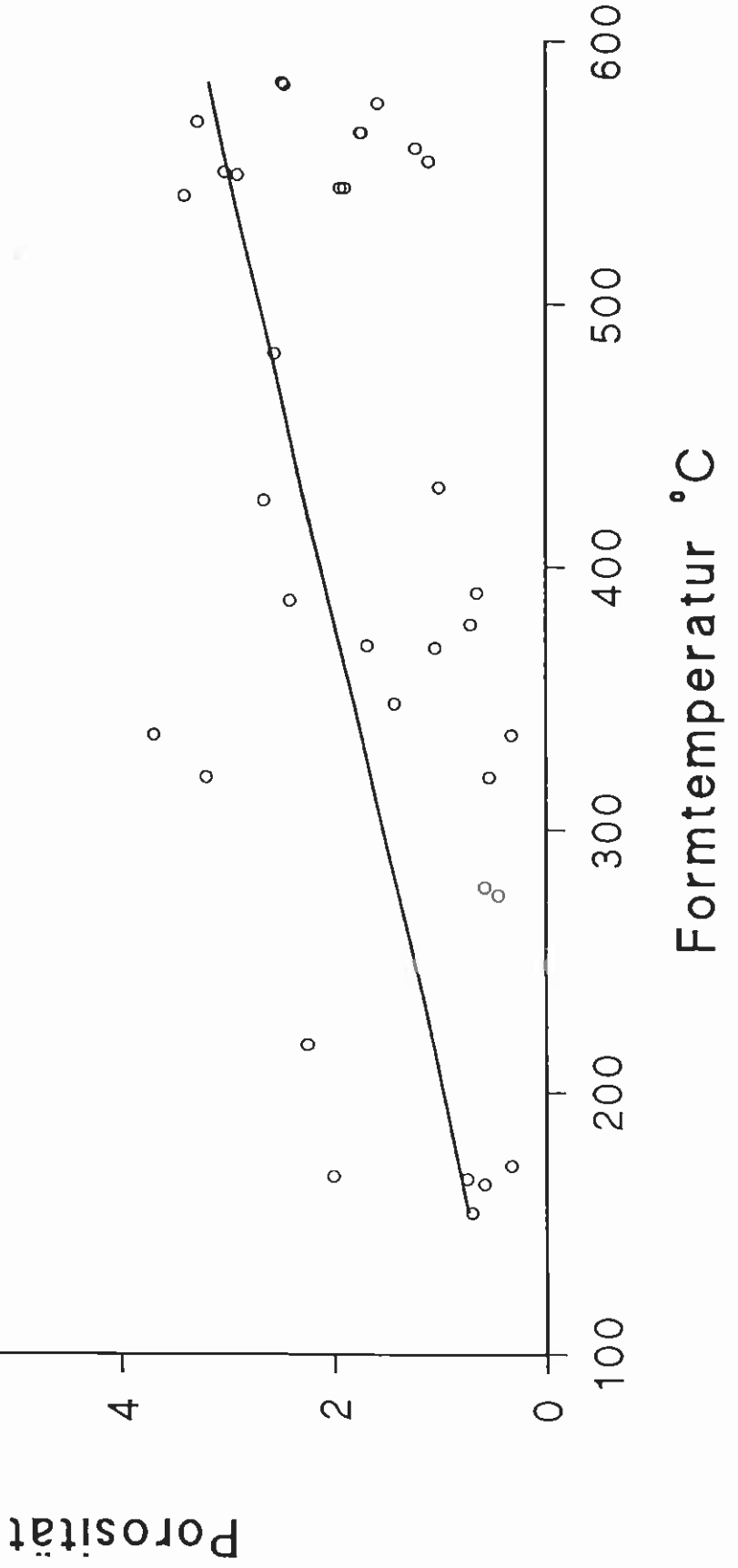


Abhängigkeit der Porosität Kugelrand  
von der Formtemperatur

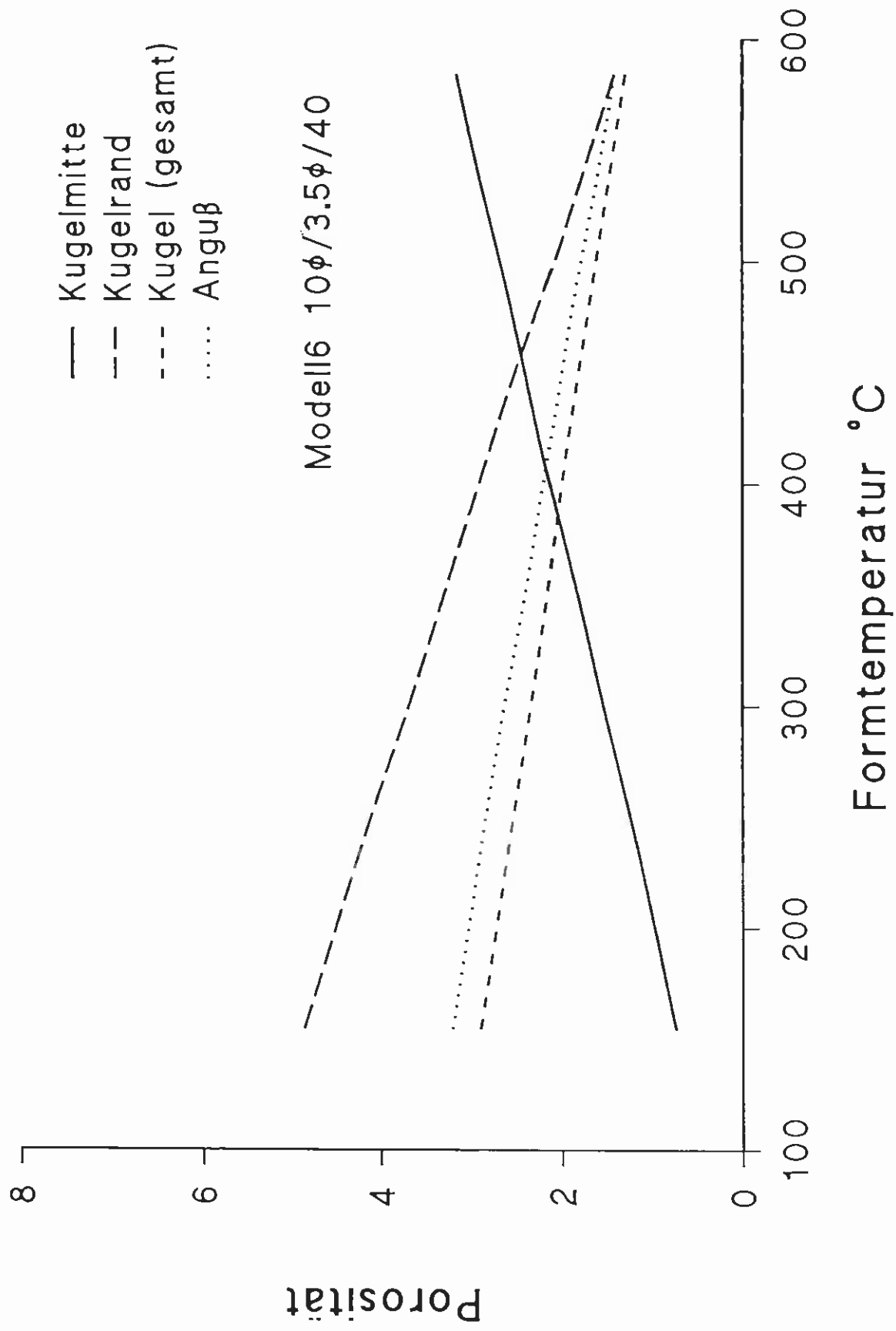


Abhängigkeit der Porosität des Angusses  
von der Formtemperatur

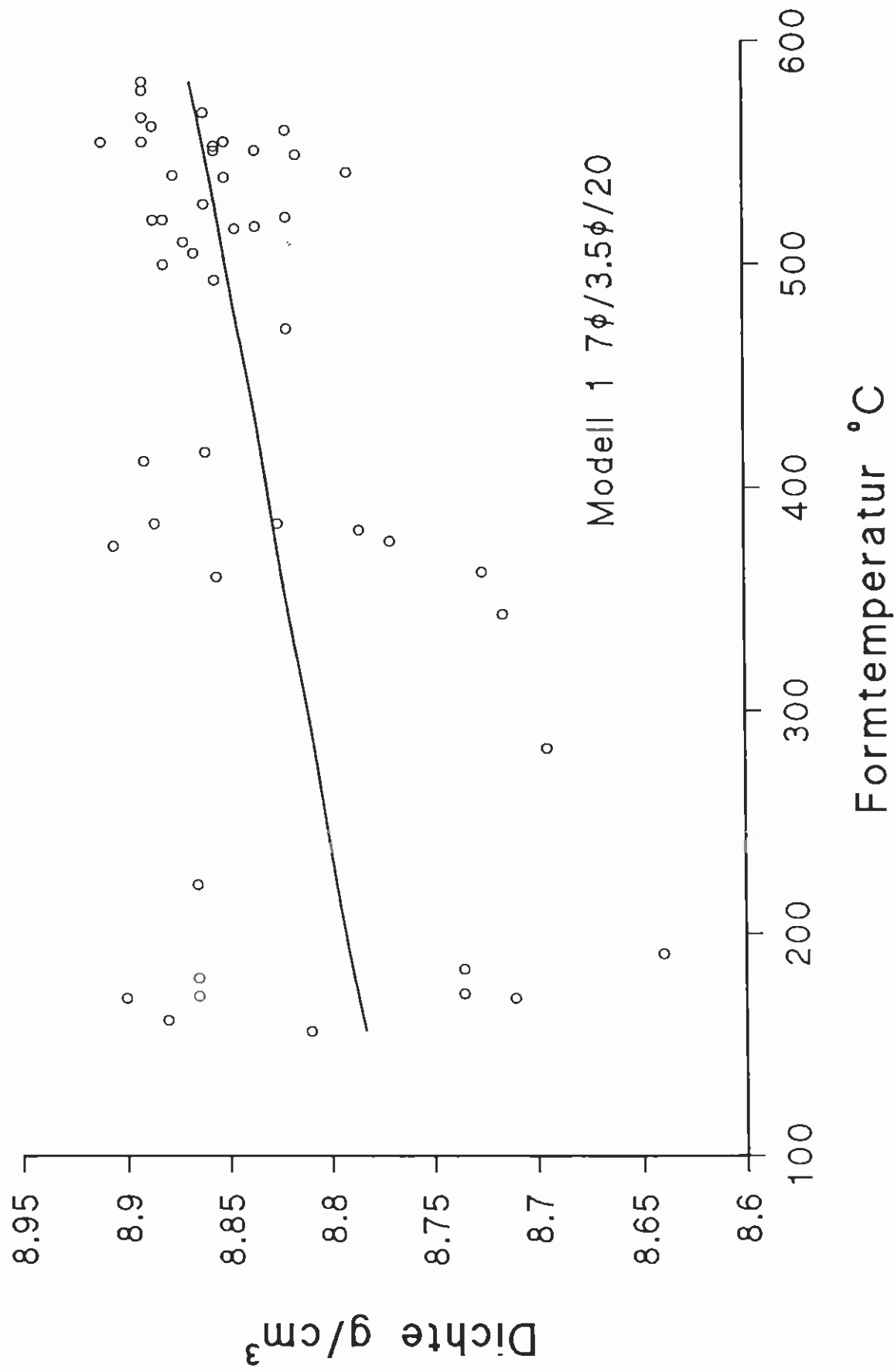
Modell 6  $10\phi/3.5\phi/40$



Abhängigkeit der Porosität von der Formtemperatur

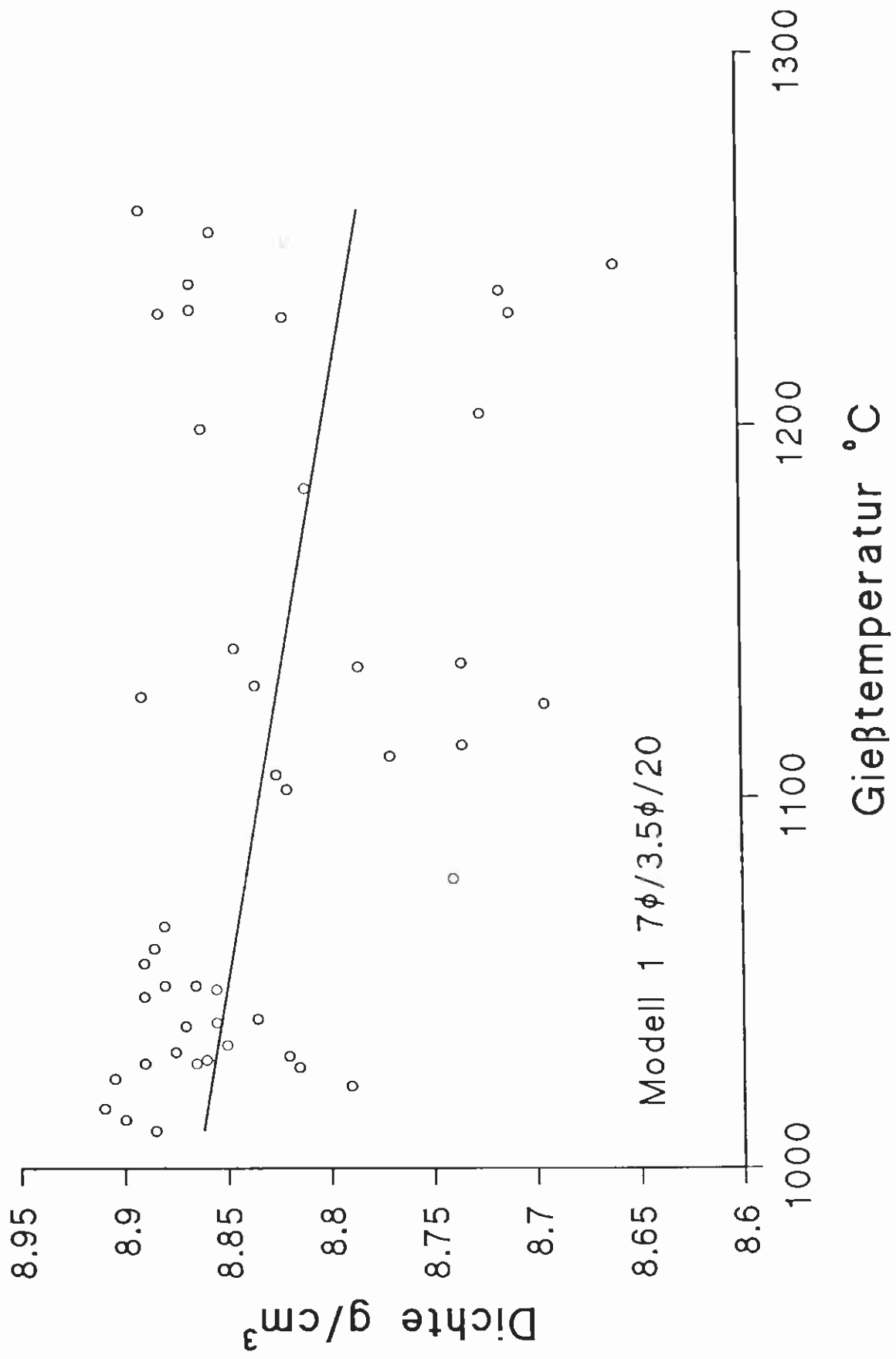


Abhängigkeit der Dichte von der Formtemperatur

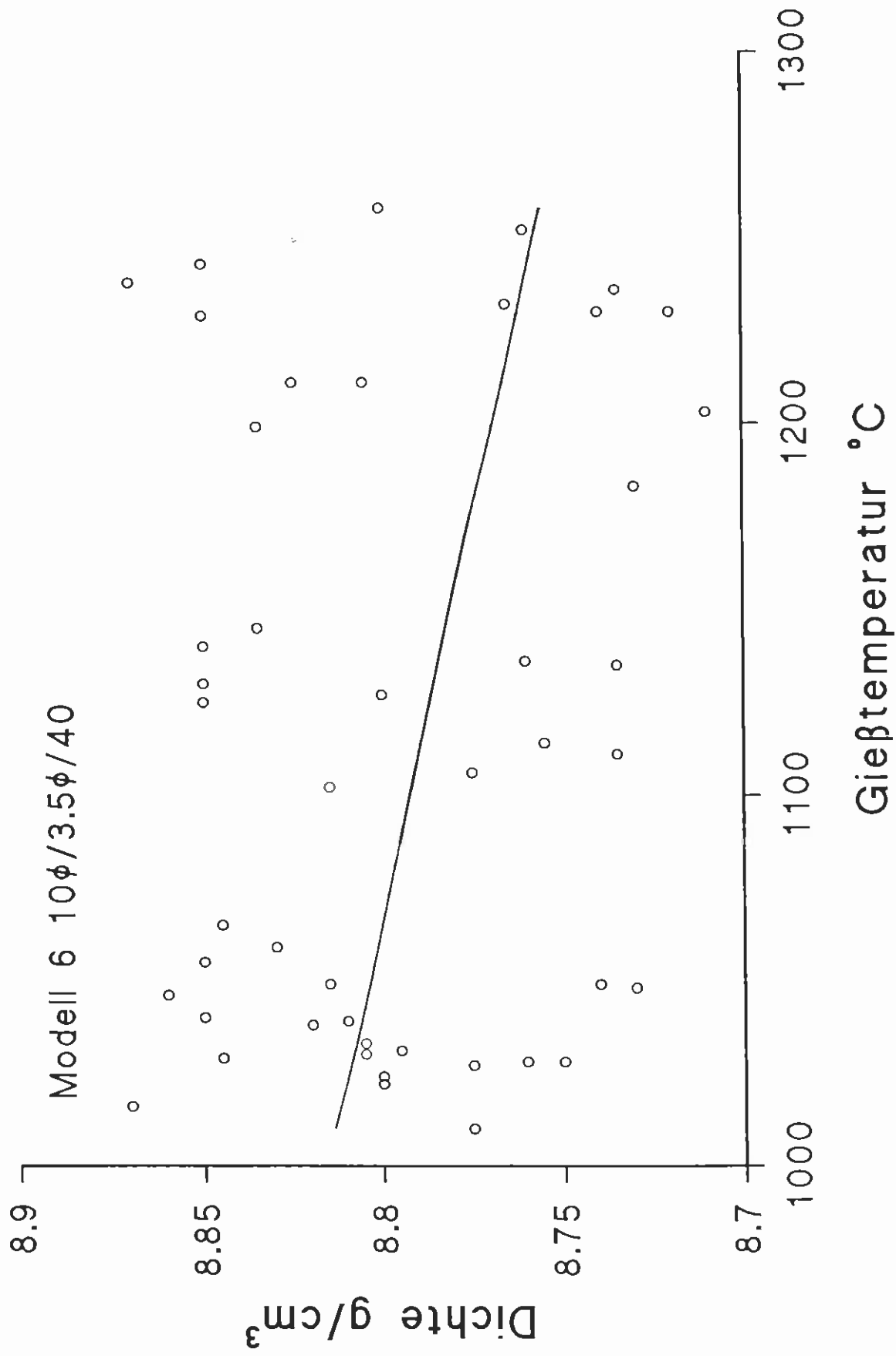




Abhängigkeit der Dichte von der Gießtemperatur

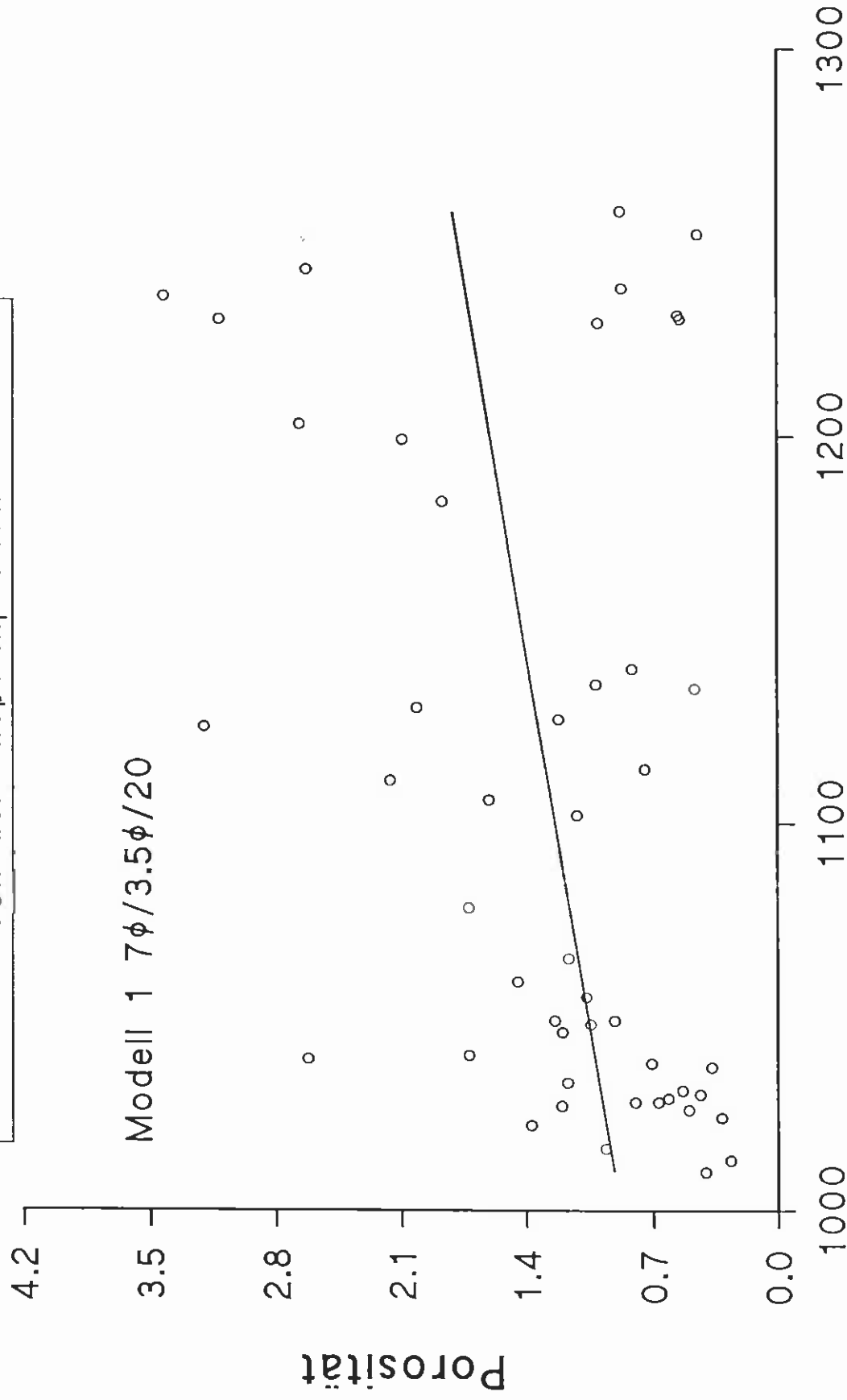


Abhängigkeit der Dichte von der Gießtemperatur



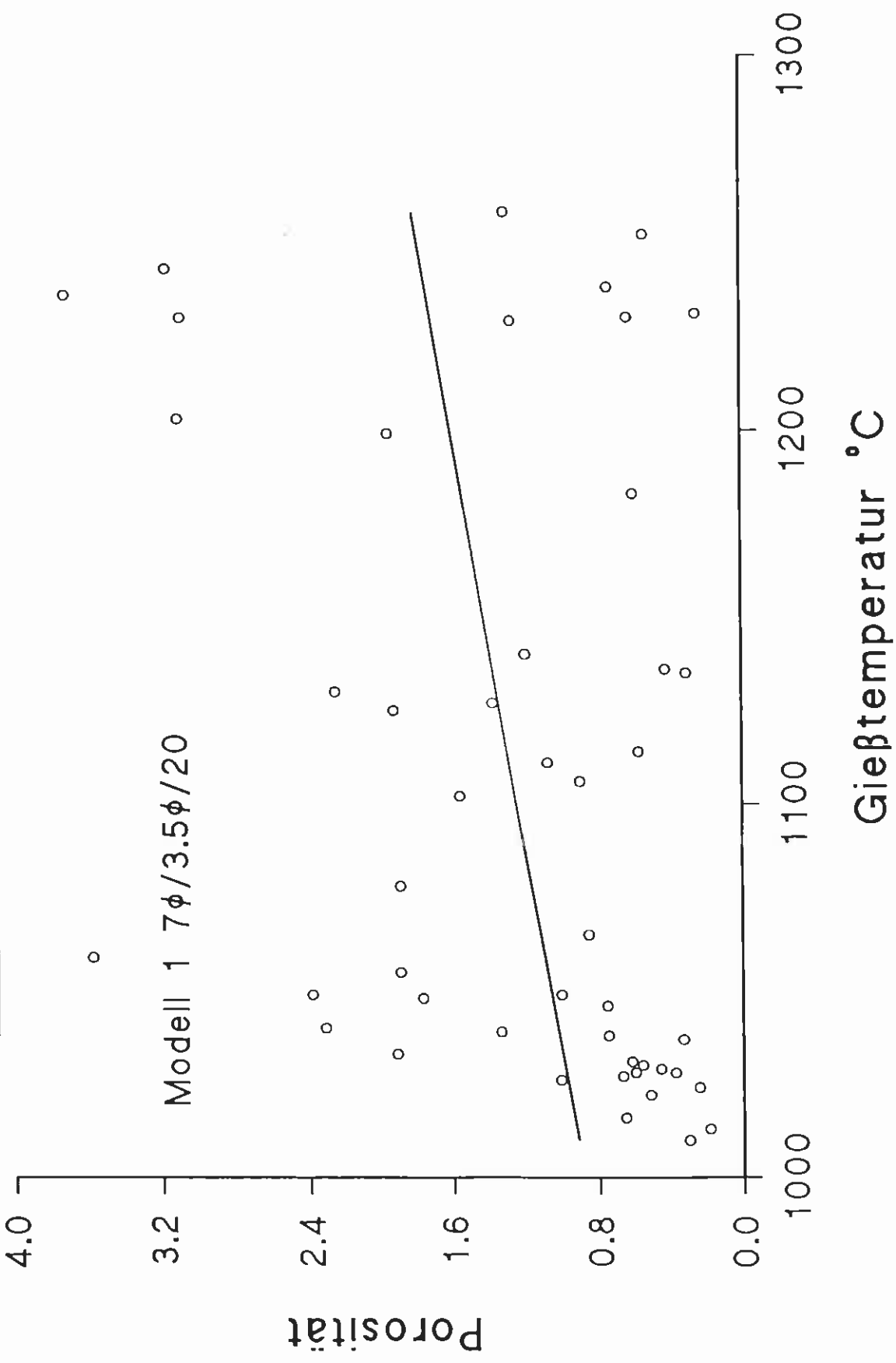
Abhängigkeit der Porosität Kugel gesamt  
von der Gießtemperatur

Modell 1 7φ/3.5φ/20



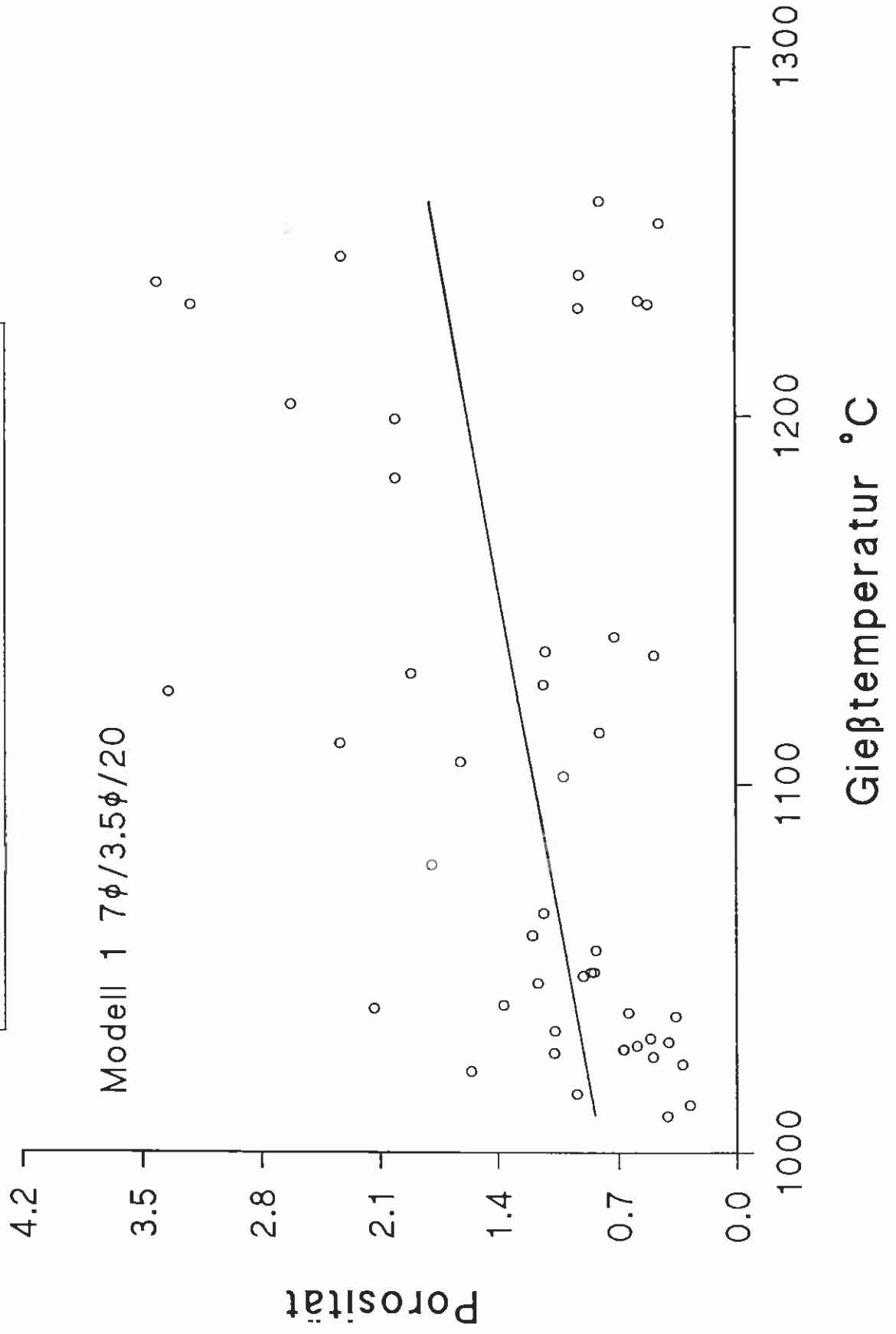
Gießtemperatur °C

Abhängigkeit der Porosität der Kugelmitte  
von der Gießtemperatur



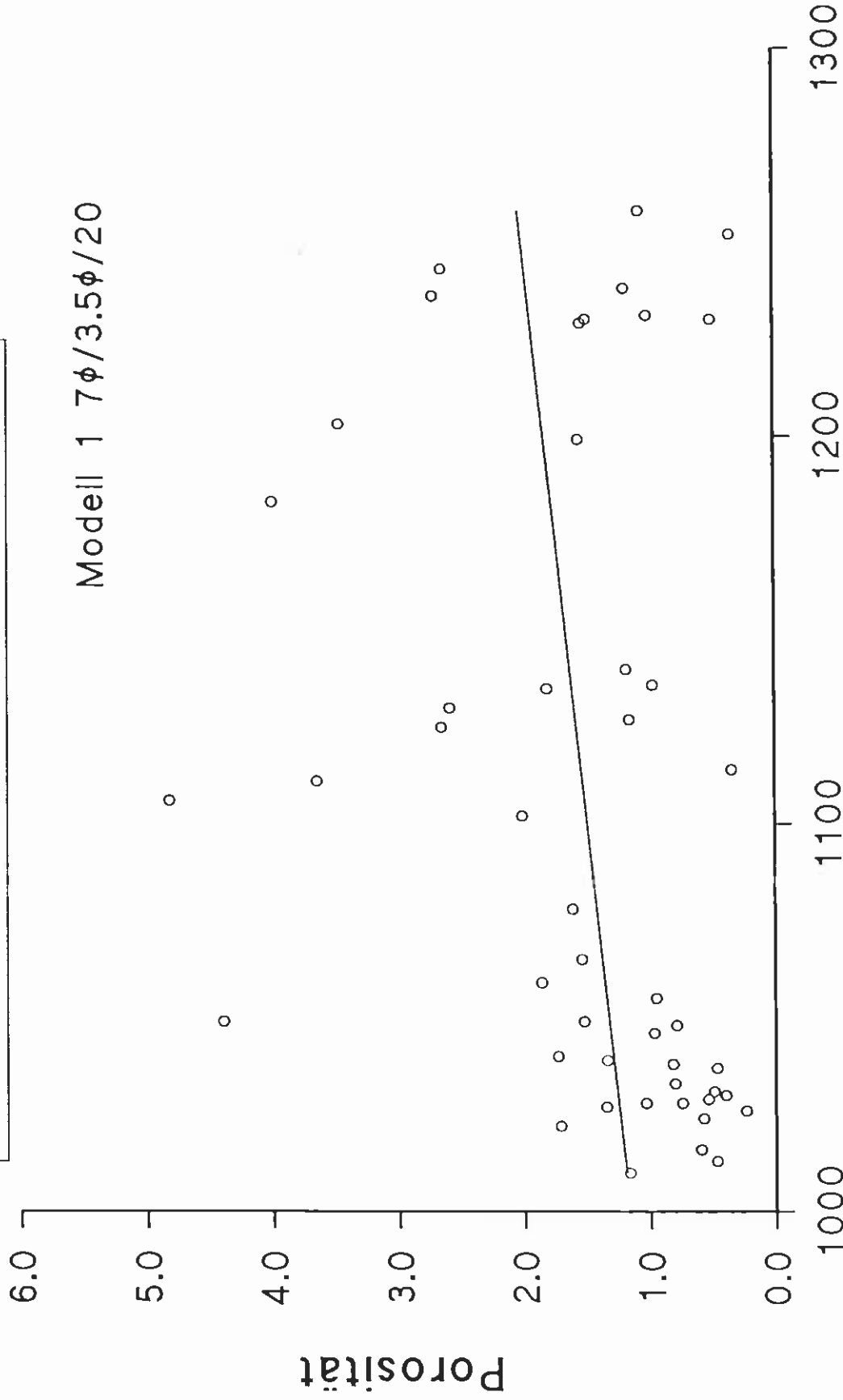
Abhängigkeit der Porosität Kugelrand  
von der Gießtemperatur

Modell 1  $7\phi/3.5\phi/20$

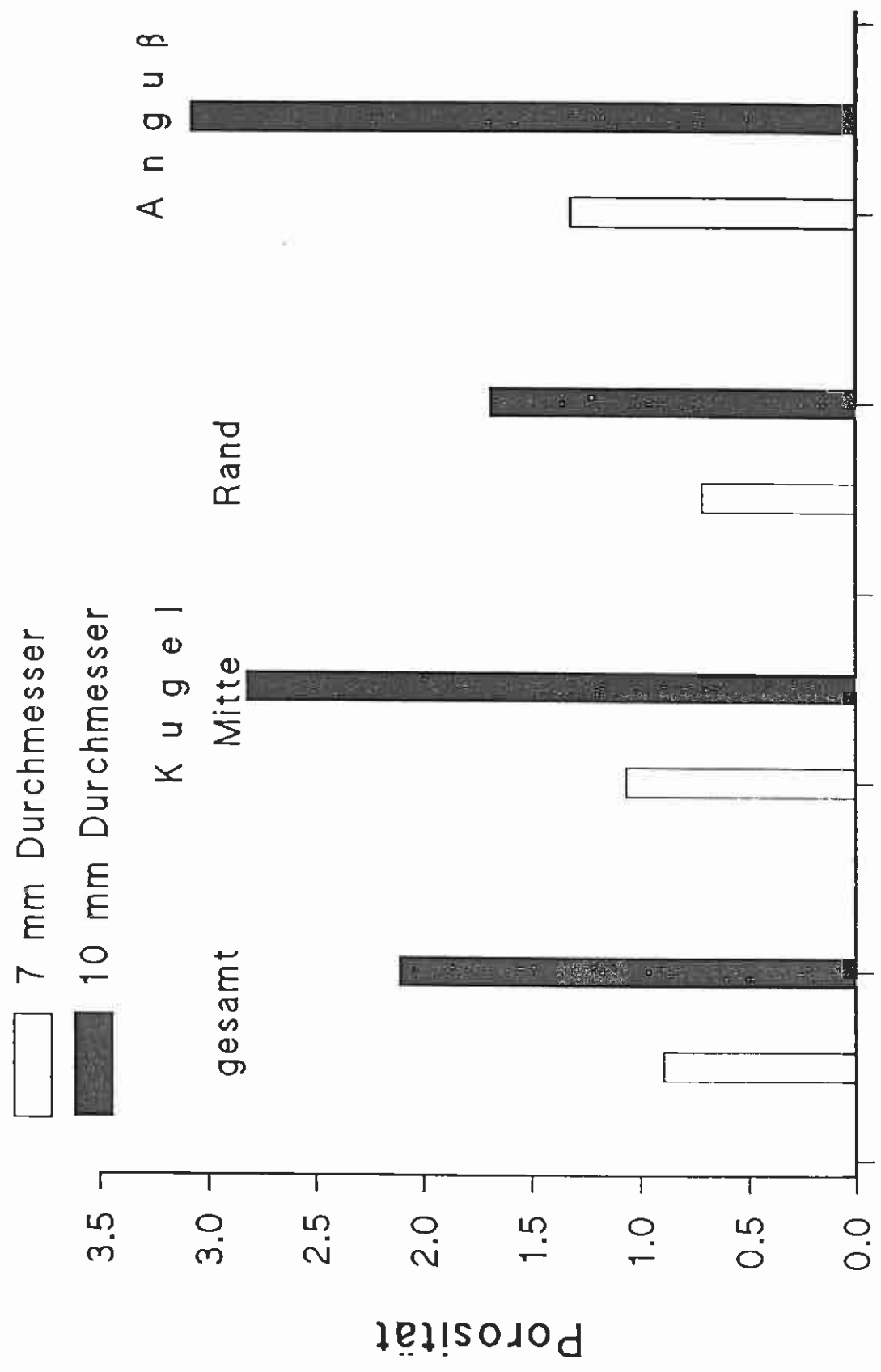


Abhängigkeit der Porosität des Angusses  
von der Gießtemperatur

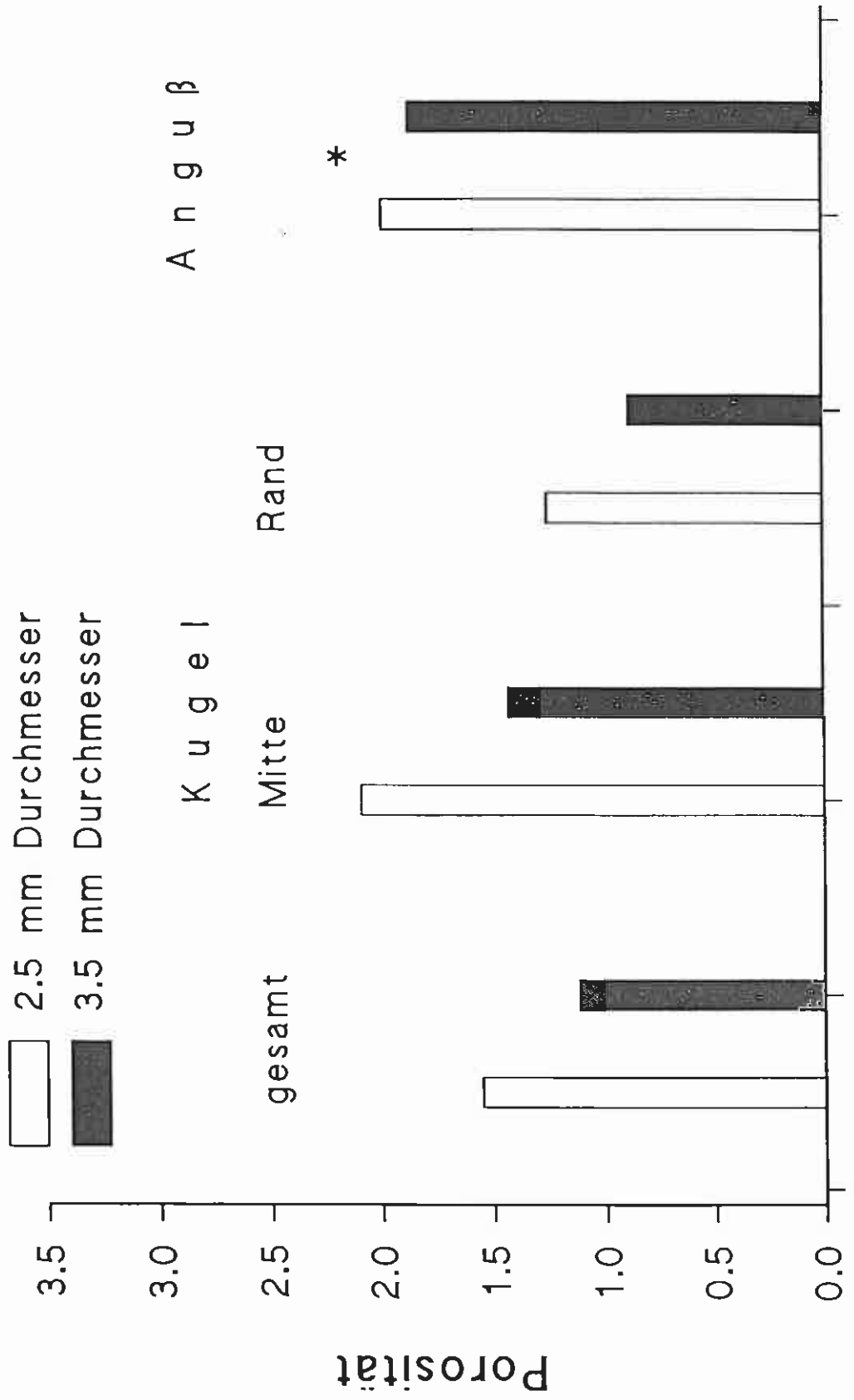
Modell 1  $7\phi/3.5\phi/20$



Einfluß des Kugeldurchmessers auf die Porosität



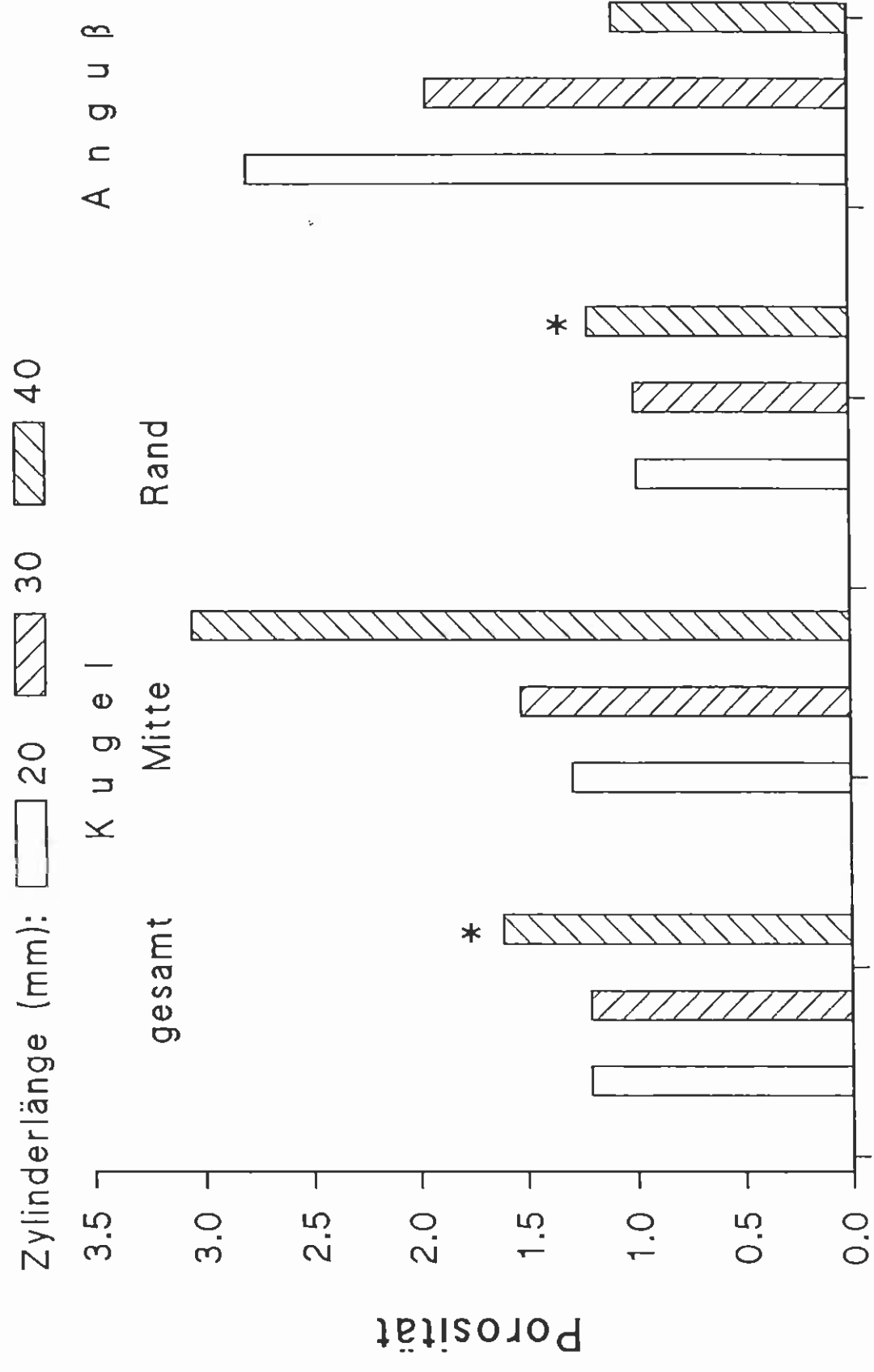
Einfluß der Zylinderdurchmessers auf die Porosität



\* nicht signifikant (S = 95%)

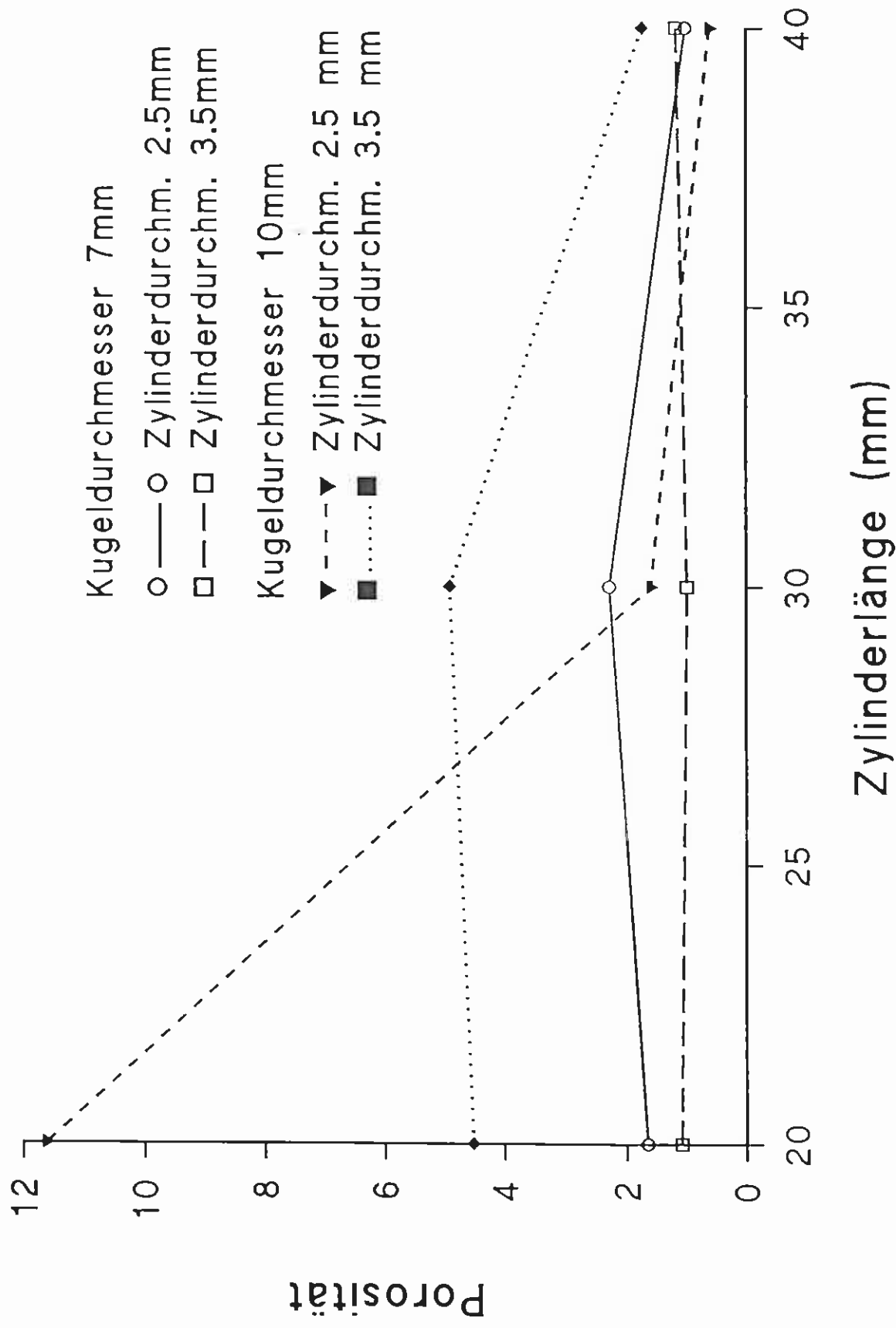


Einfluß der Zylinderlänge auf die Porosität



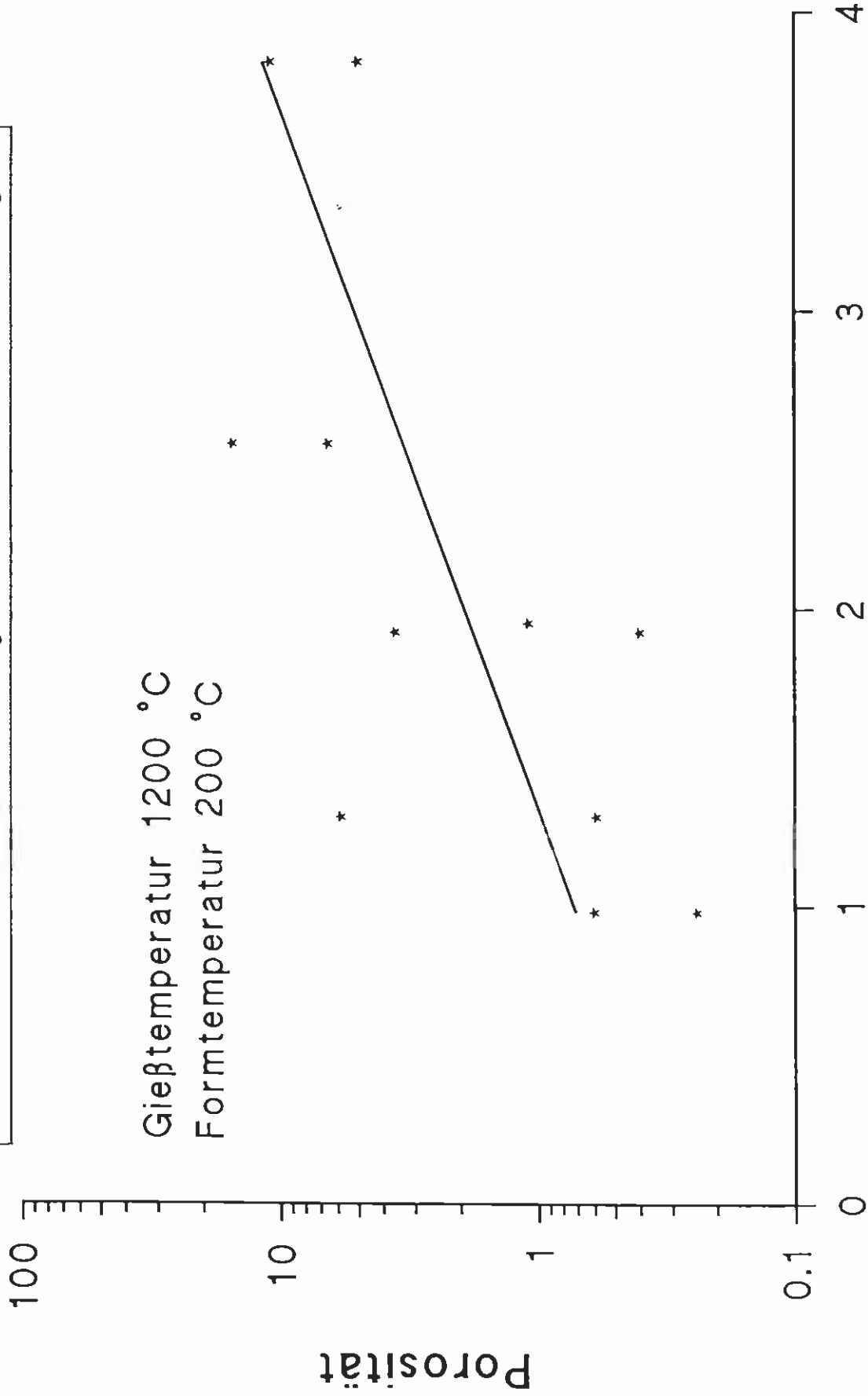
\* Einfluß nicht signifikant (S = 95%)

Einfluß der Zylinderlänge auf die Porosität des Angusses

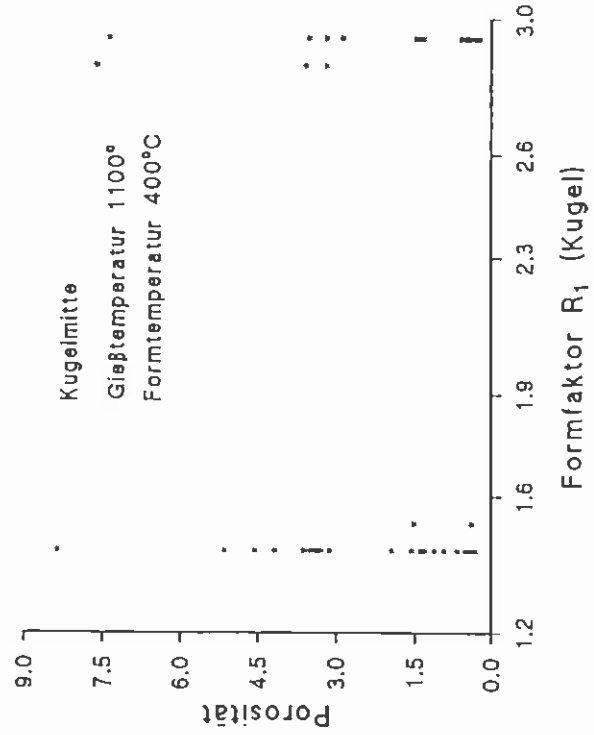
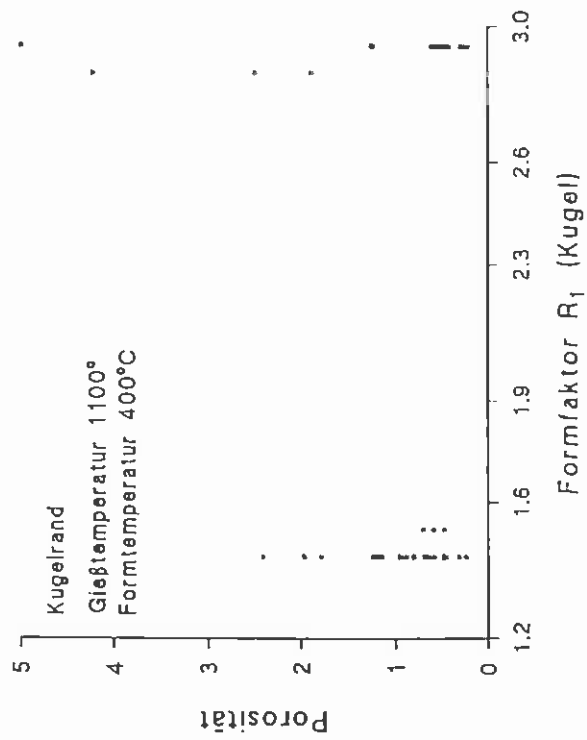
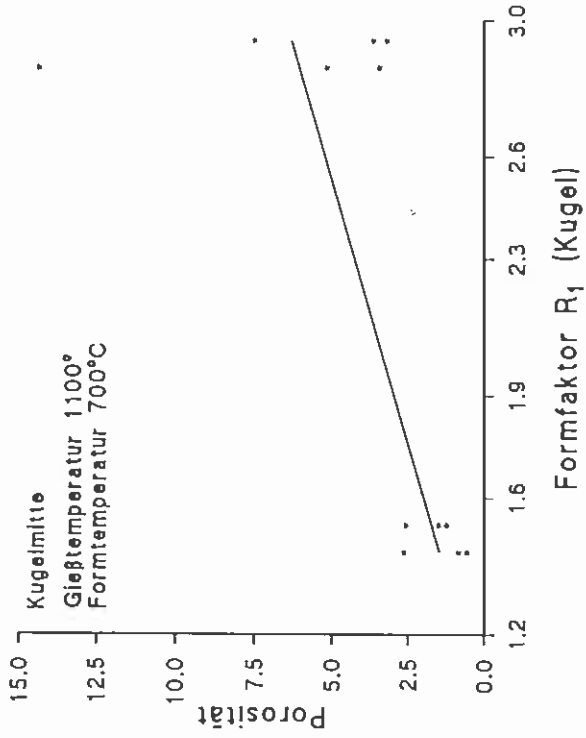
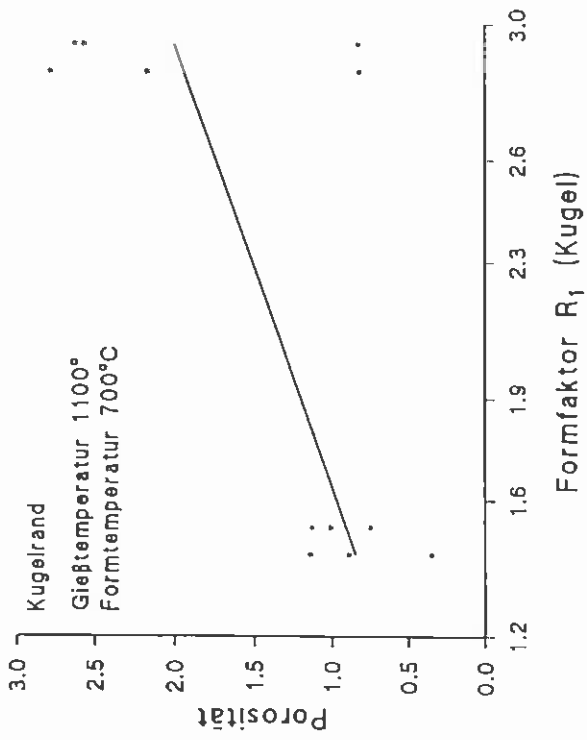


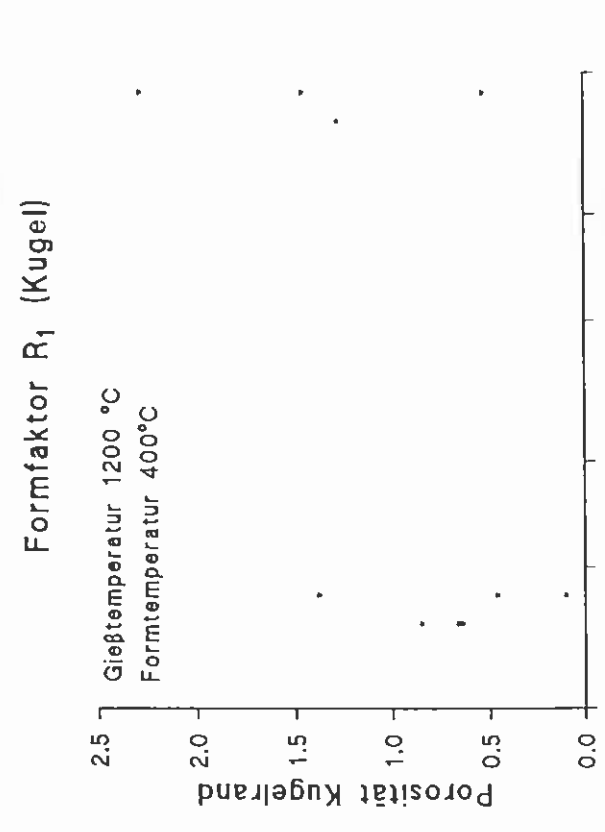
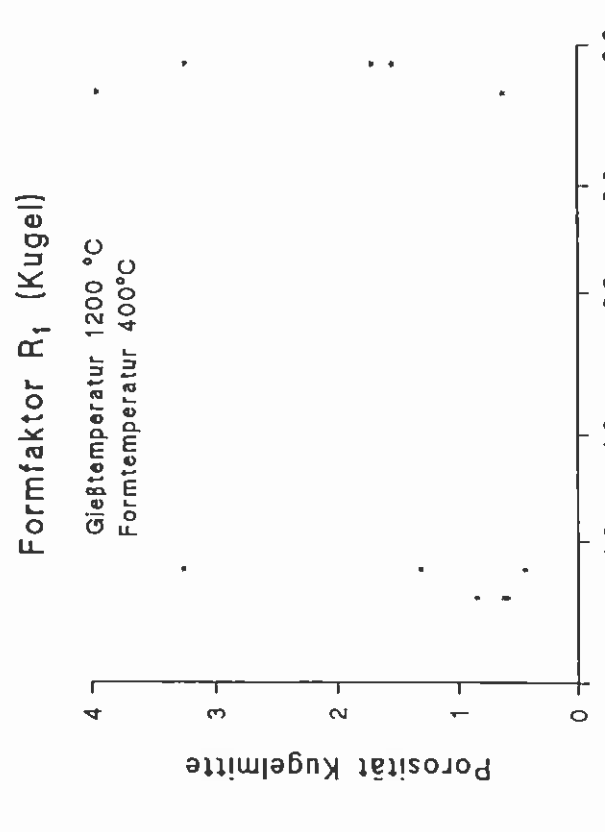
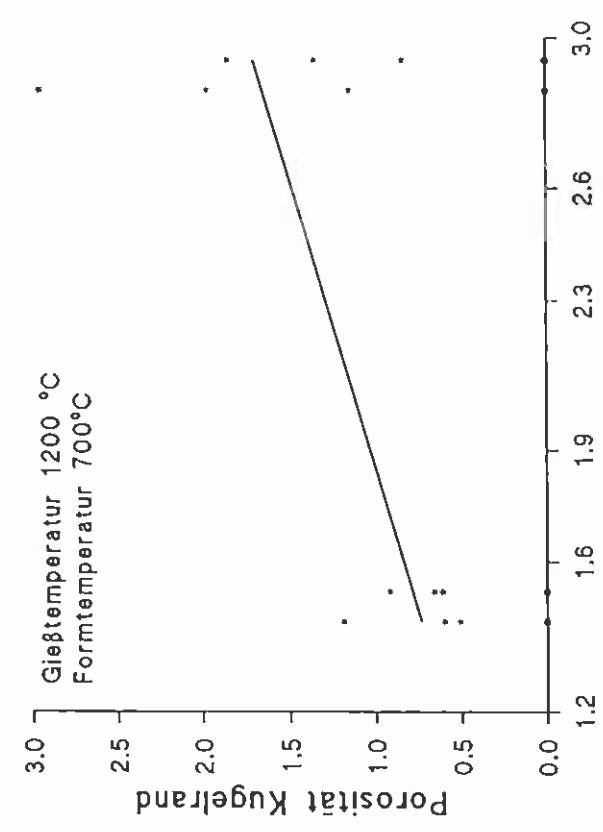
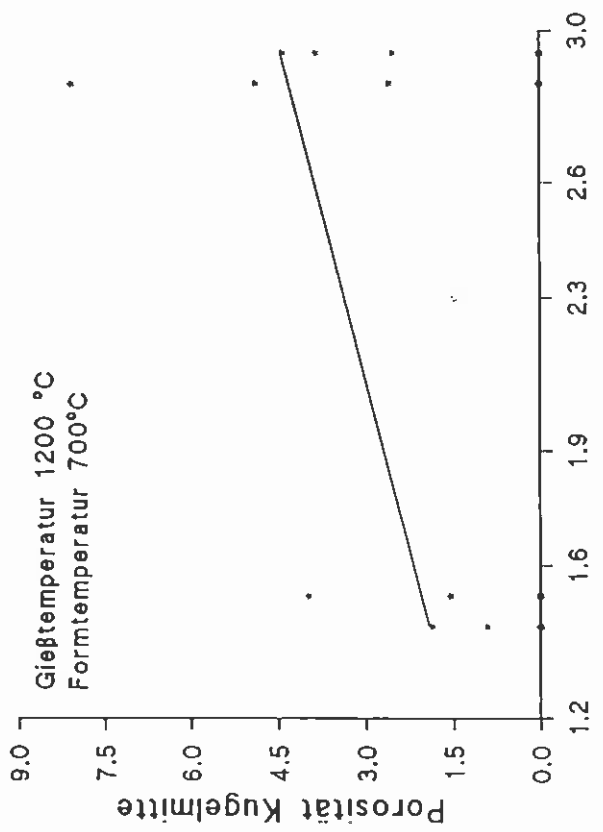
Einfluß von Formfaktor  $R_3$  auf die Porosität Anguß

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 200 °C



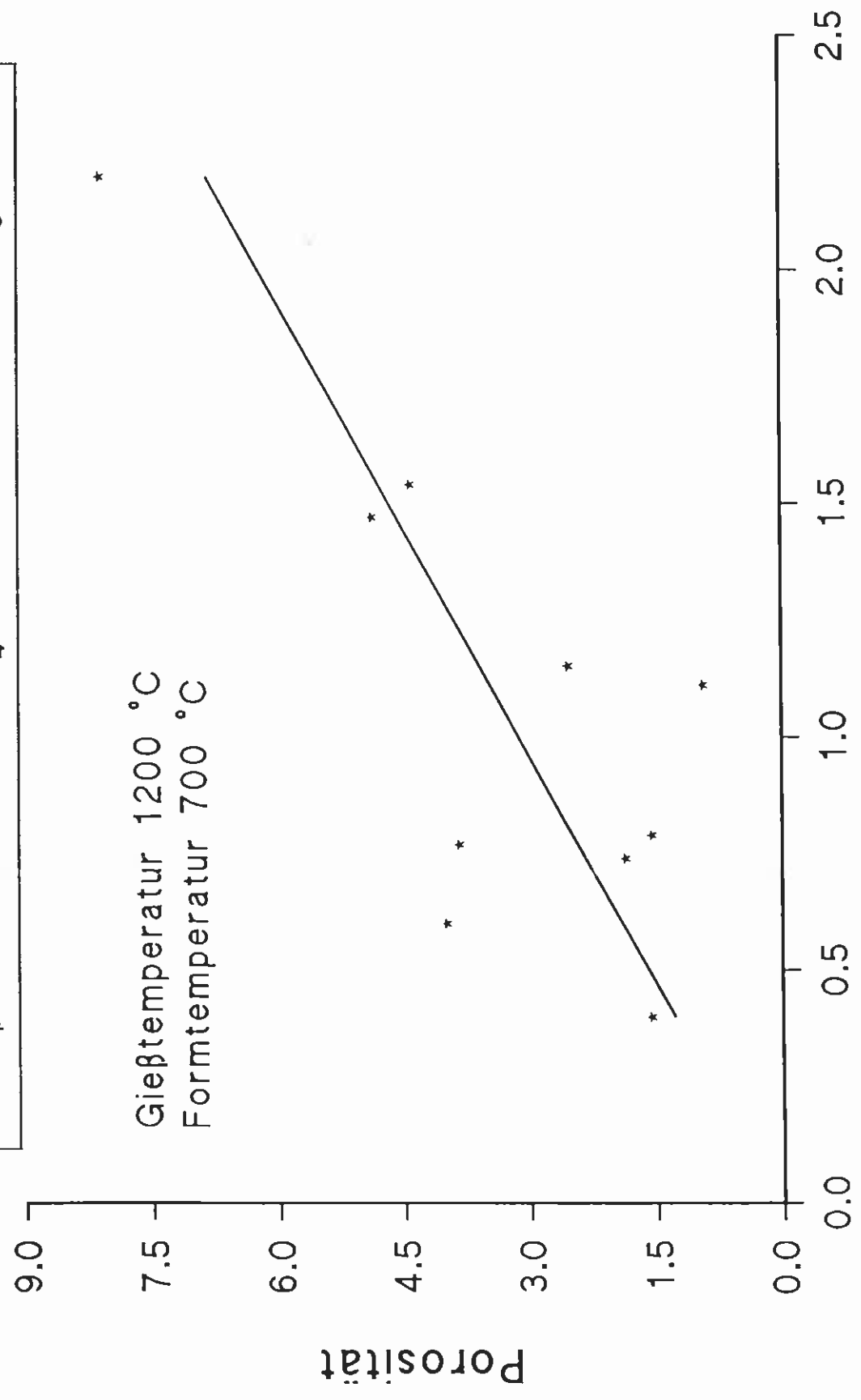
Formfaktor  $R_3$



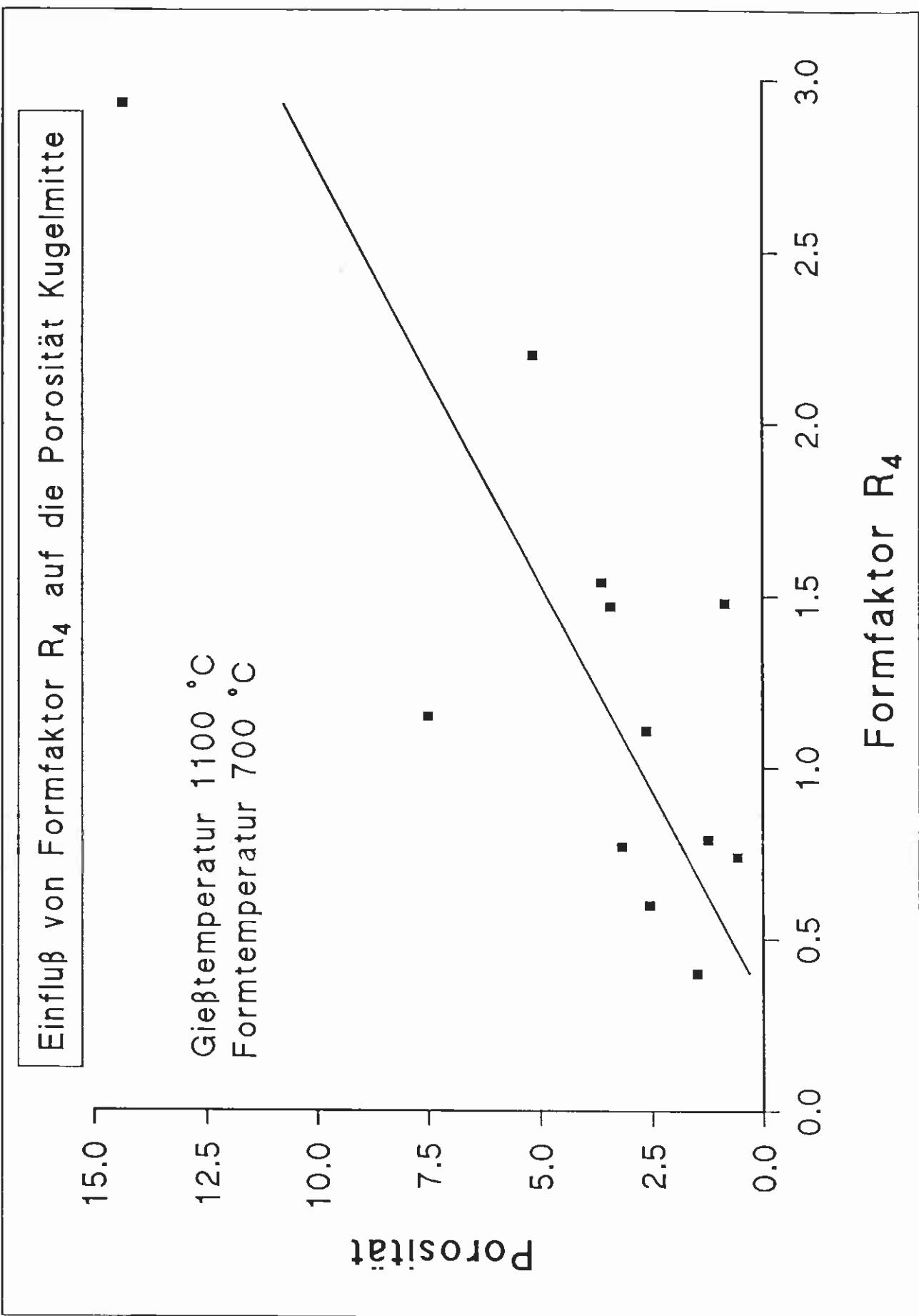


Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

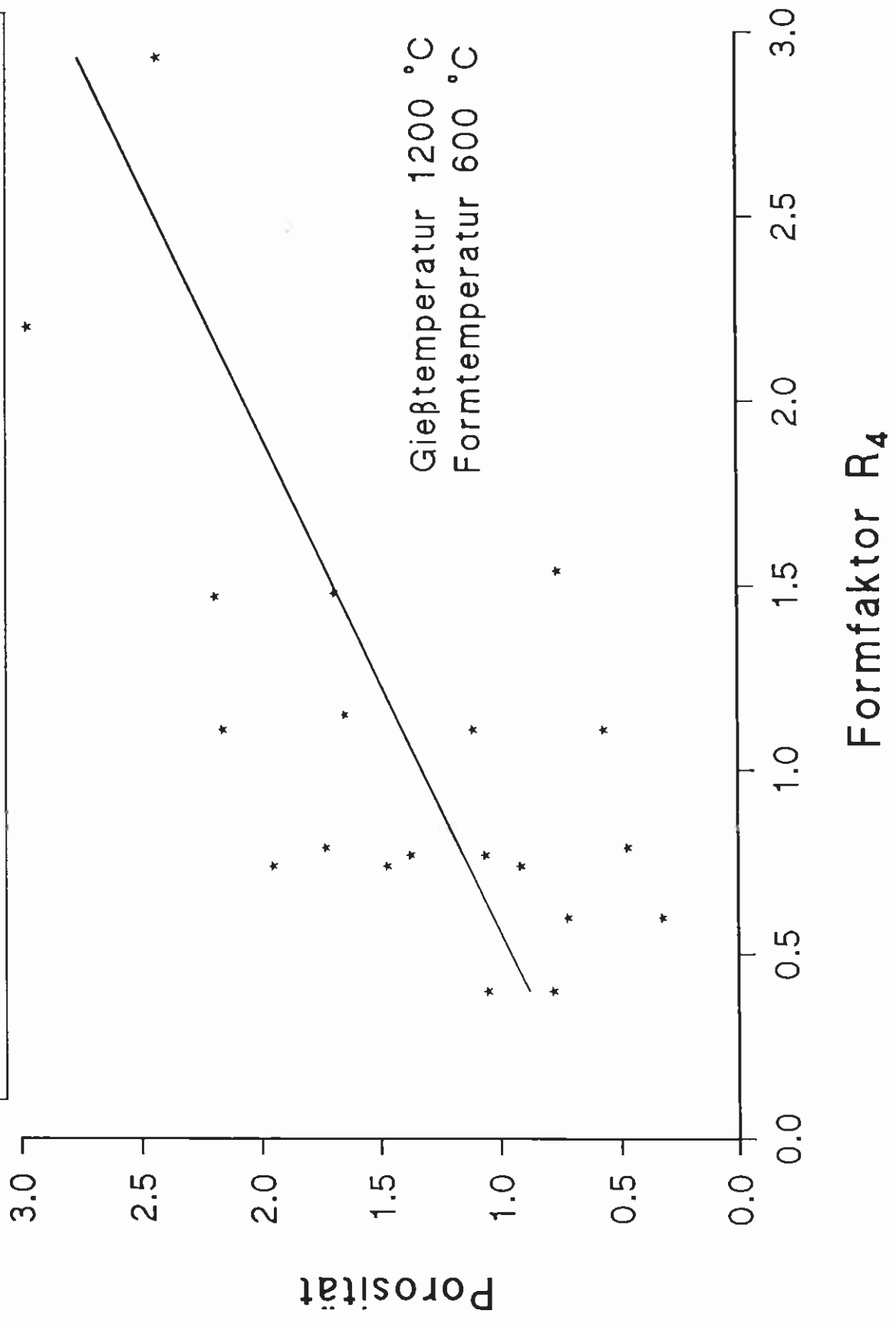
Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 700 °C



Formfaktor  $R_4$

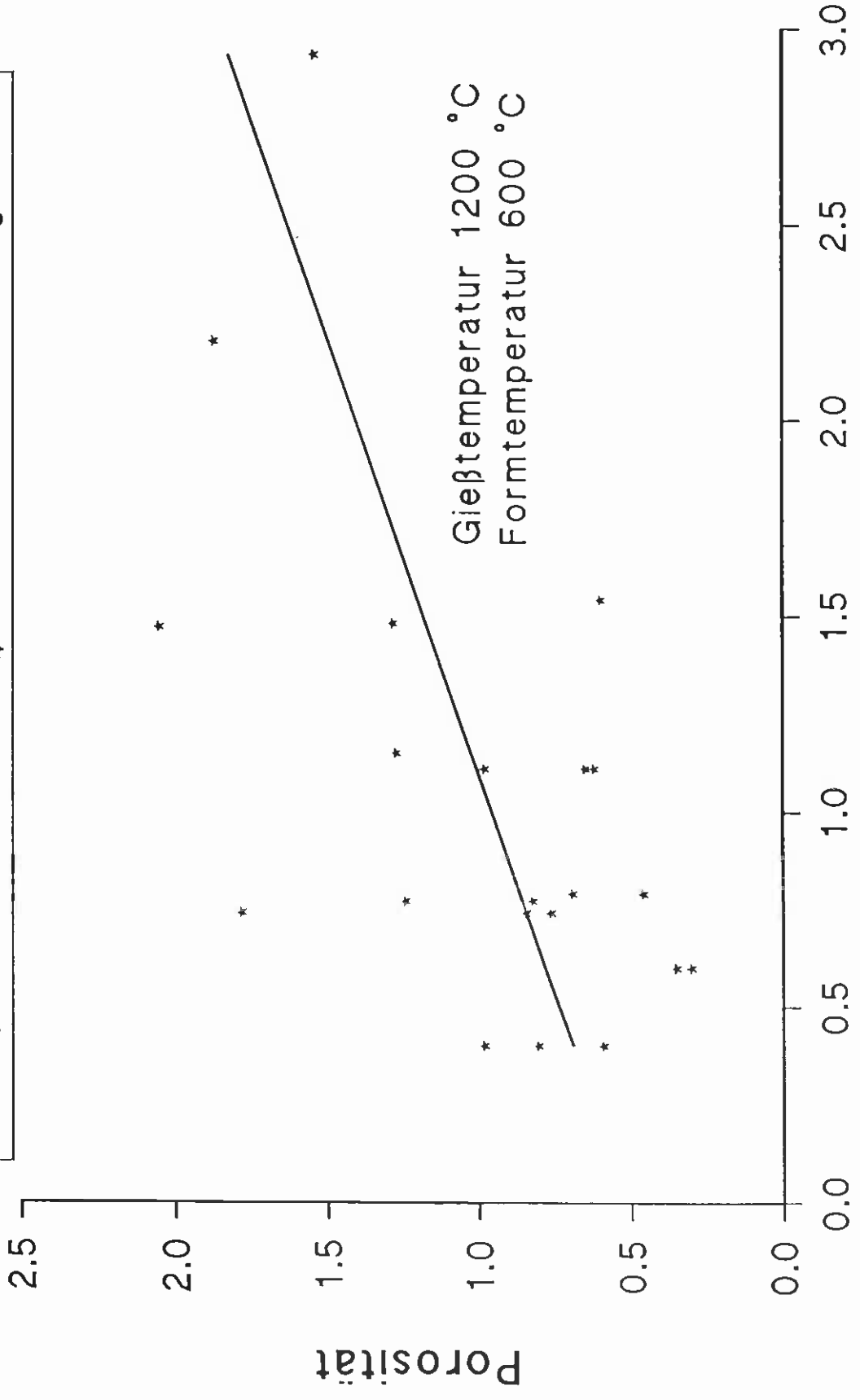


Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugel gesamt





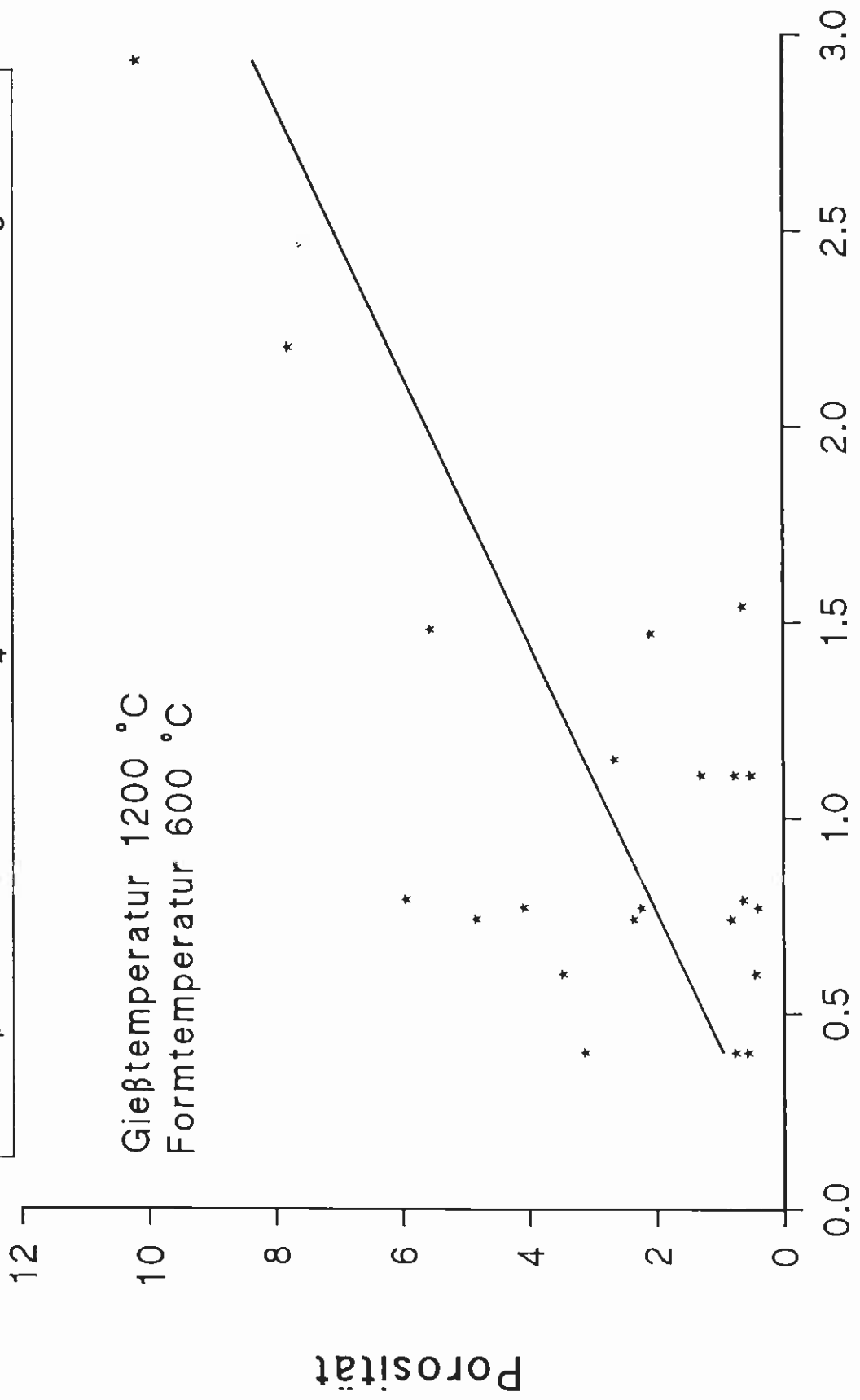
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand



Formfaktor  $R_4$

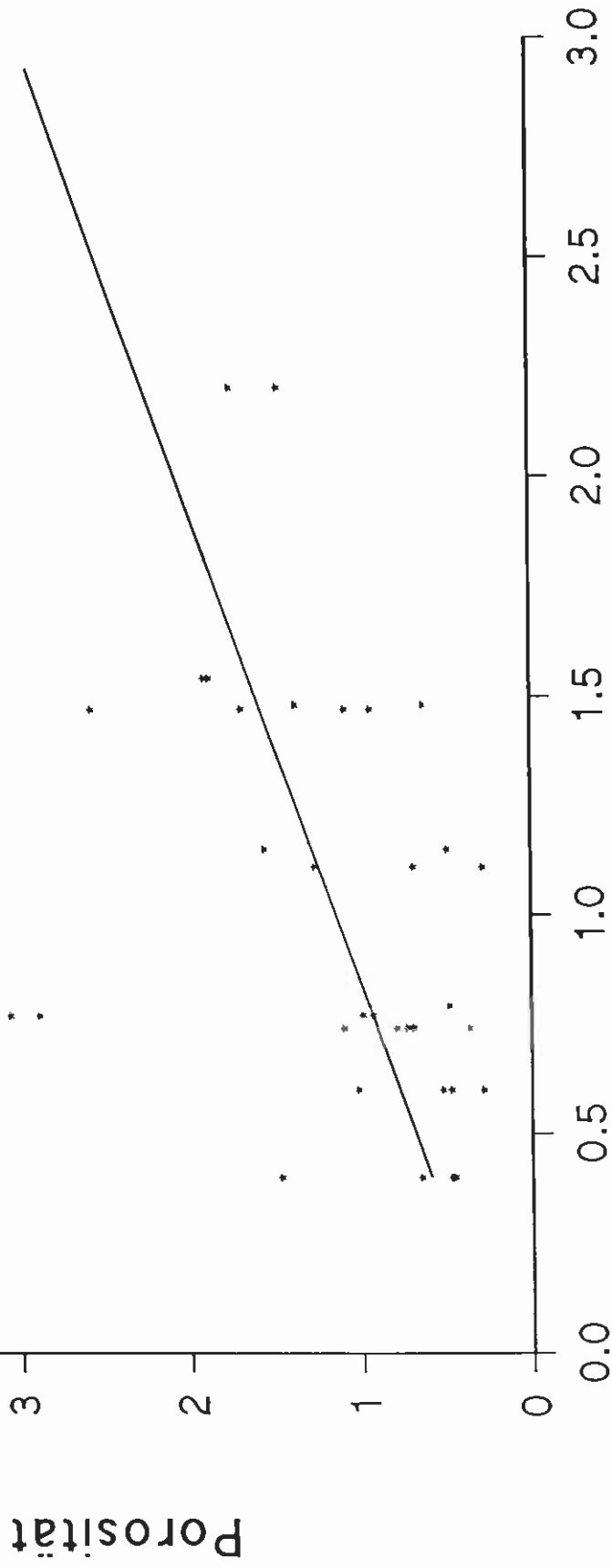
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 600 °C



Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugel gesamt

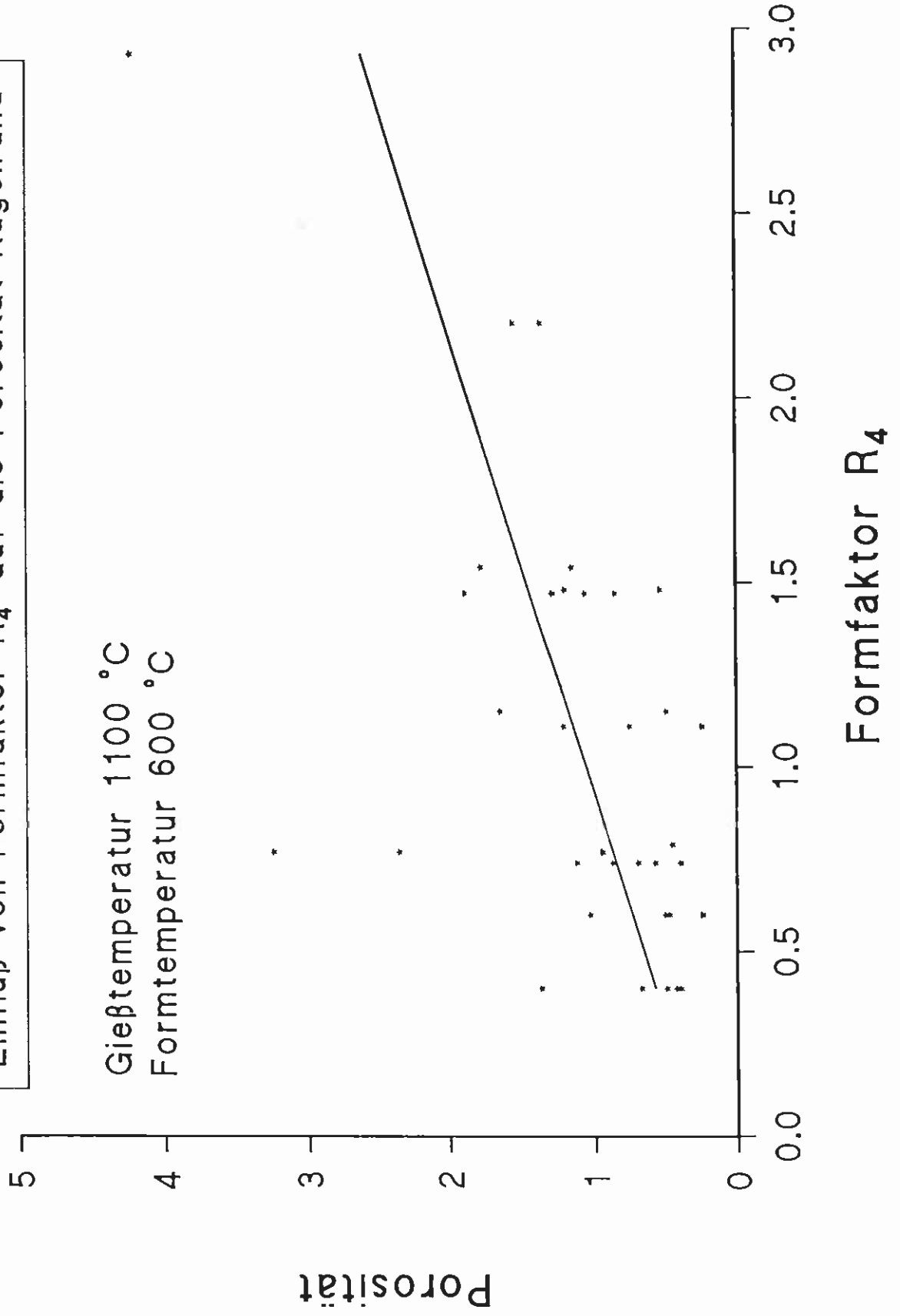
Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 600 °C



Formfaktor  $R_4$

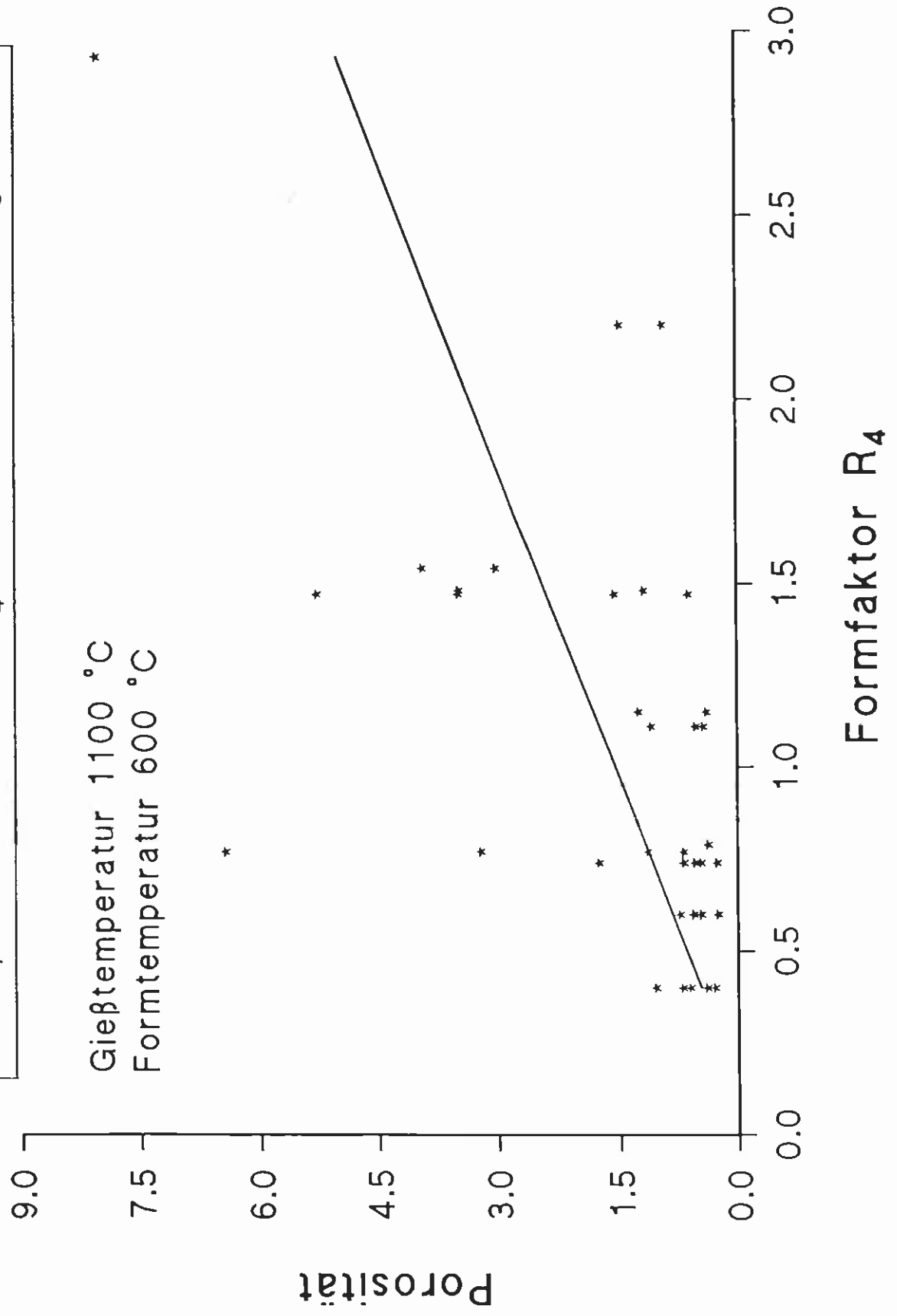
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand

Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 600 °C



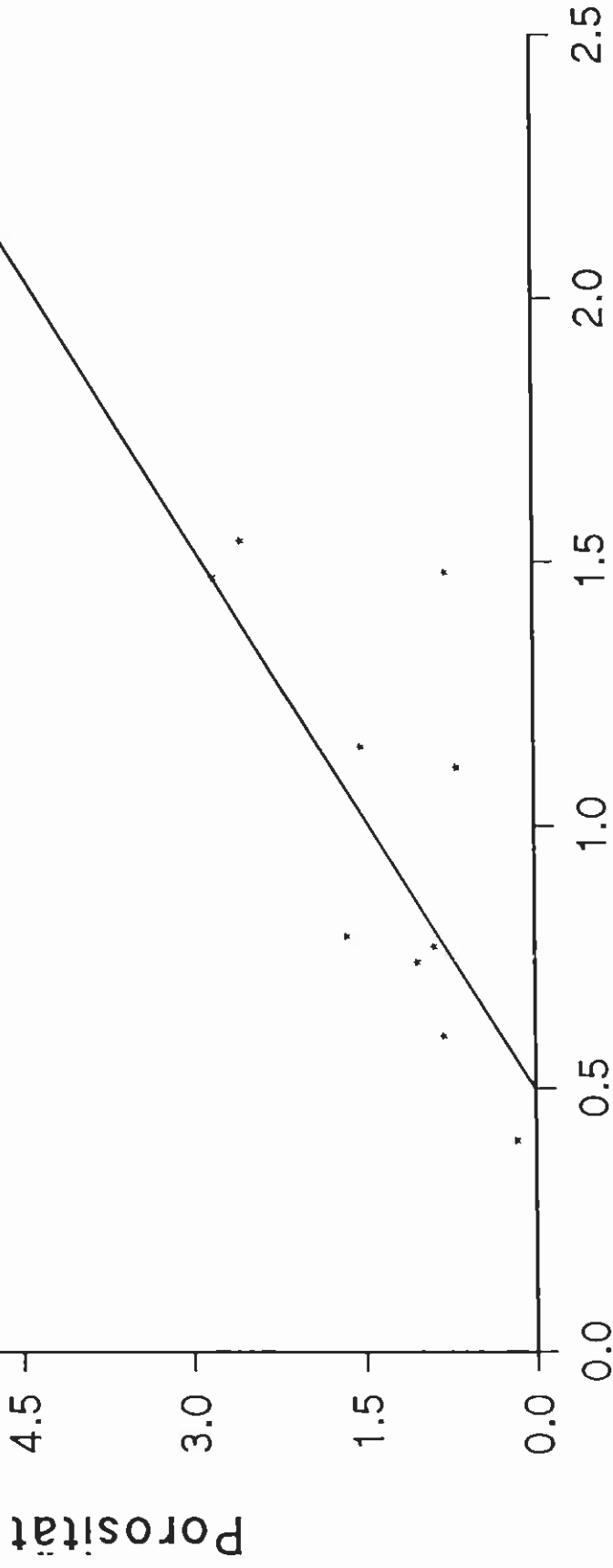
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 600 °C



Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugel gesamt

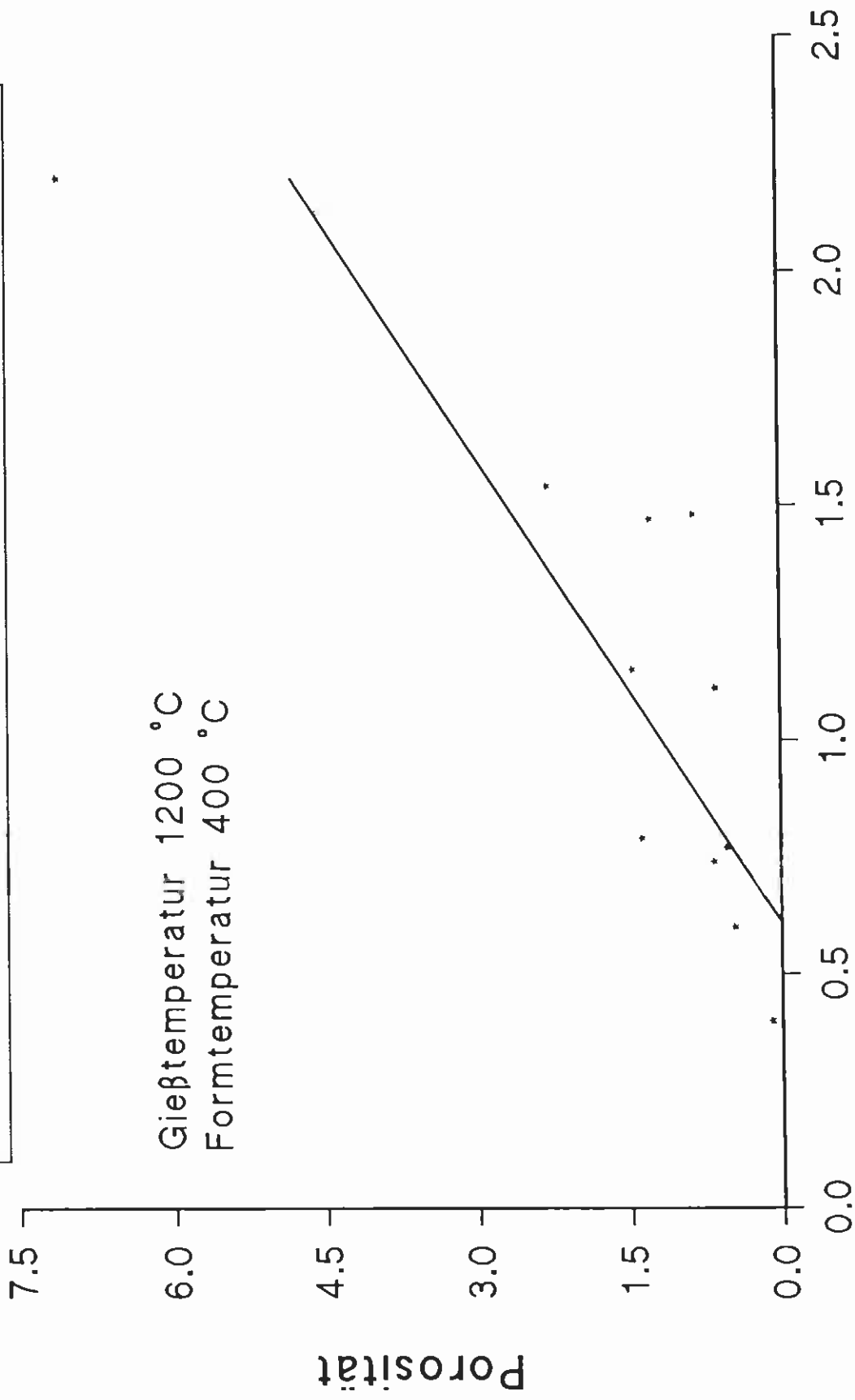
Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 400 °C



Formfaktor  $R_4$

Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand

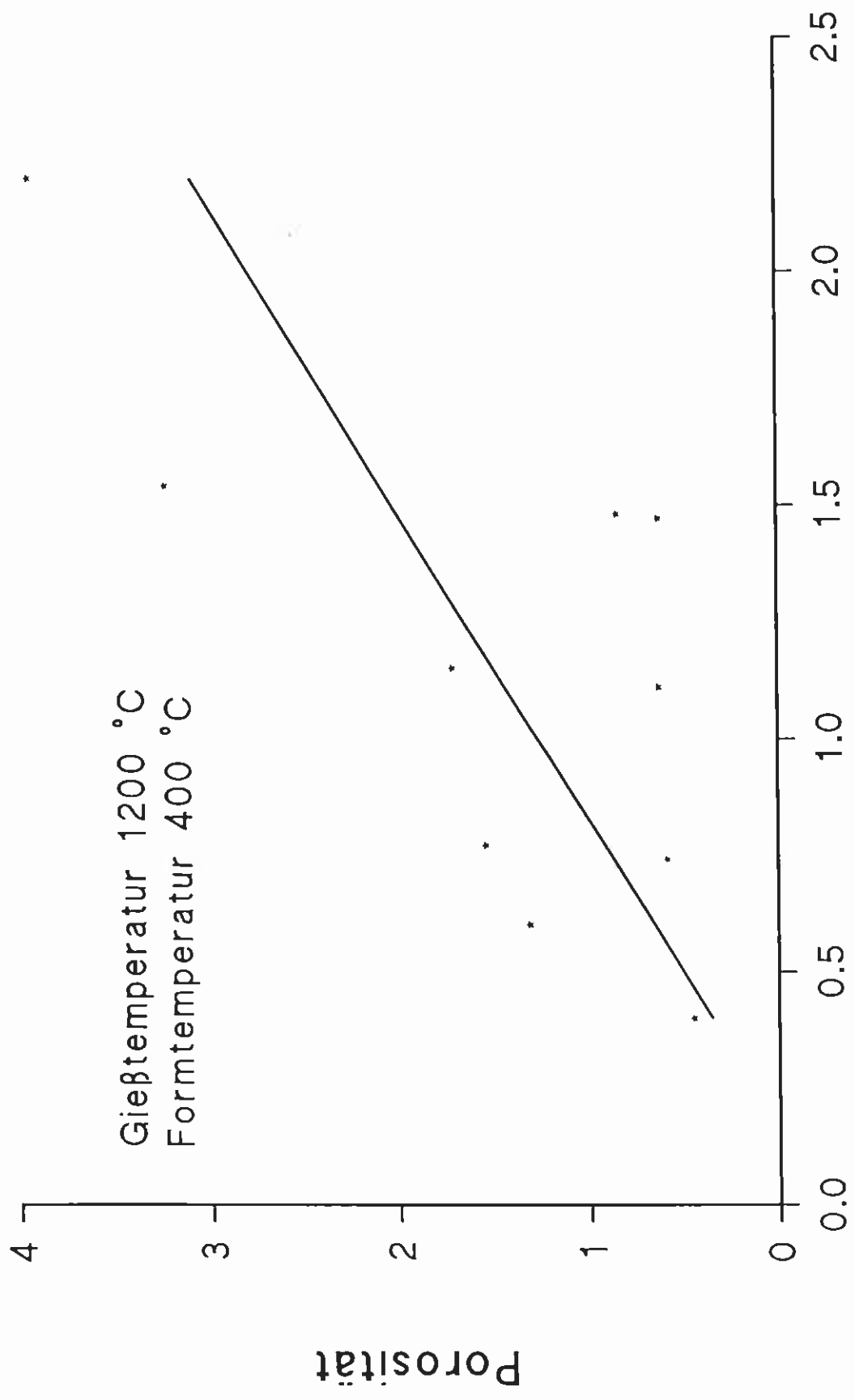
Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 400 °C



Formfaktor  $R_4$

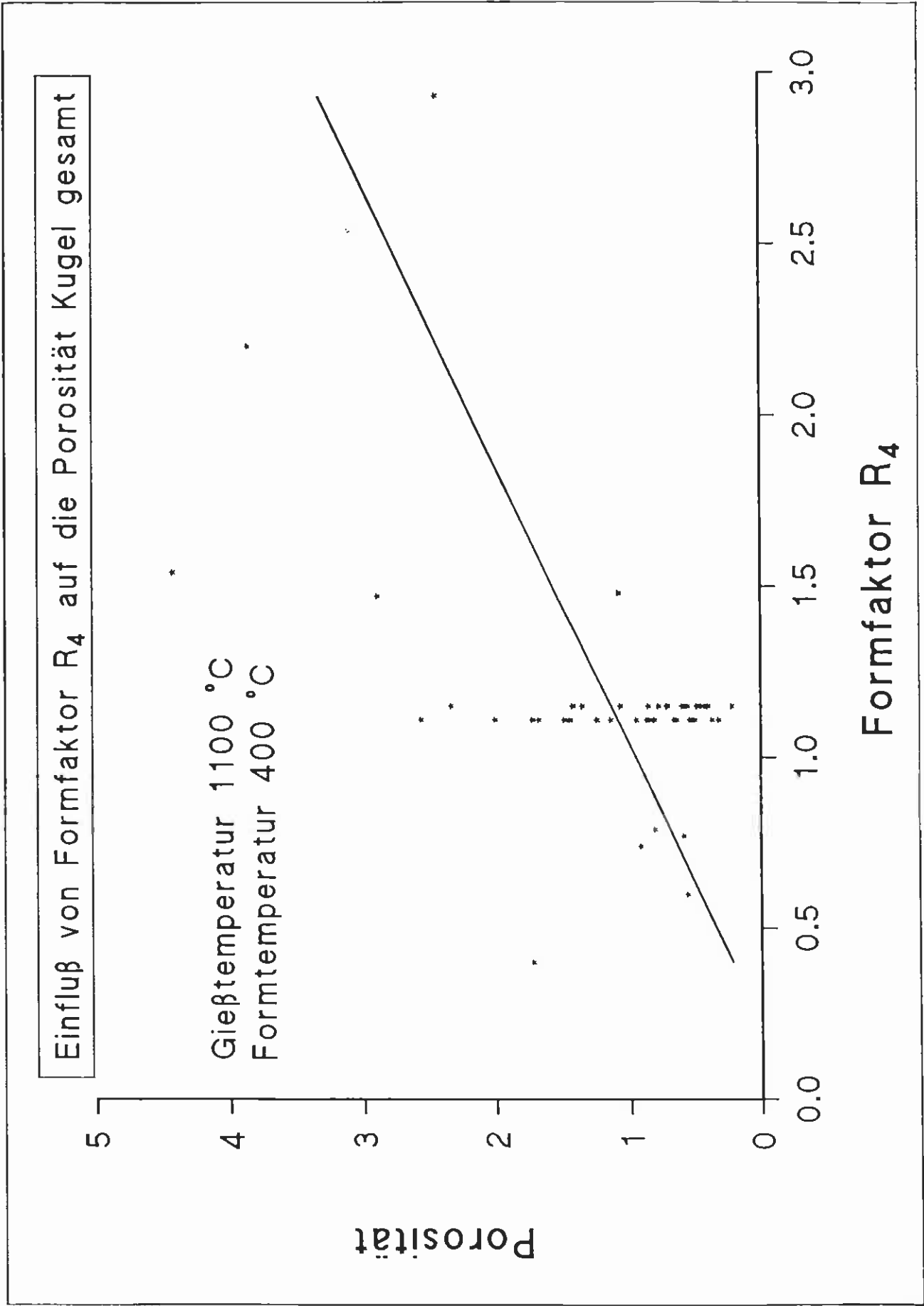
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 400 °C



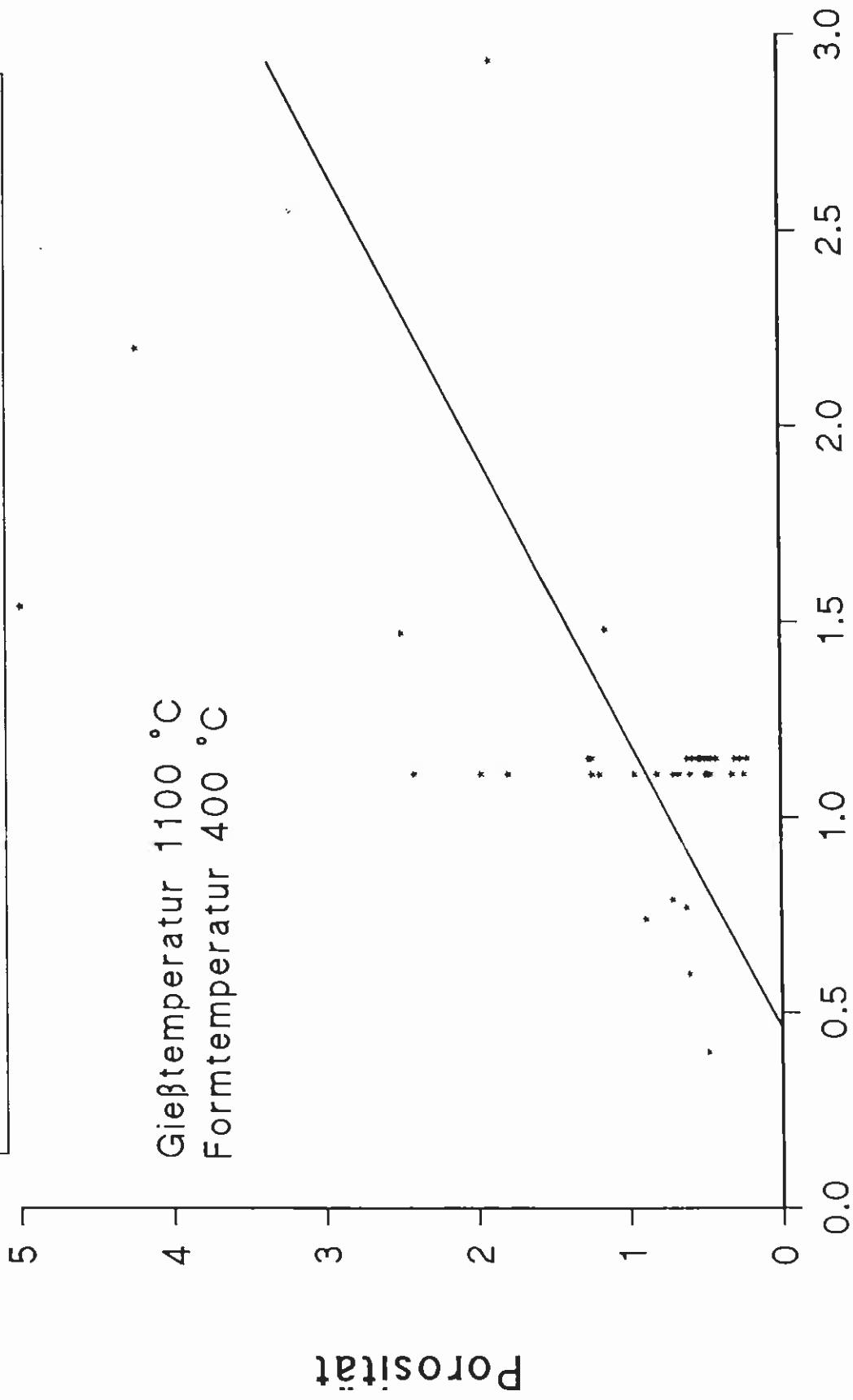
Formfaktor  $R_4$





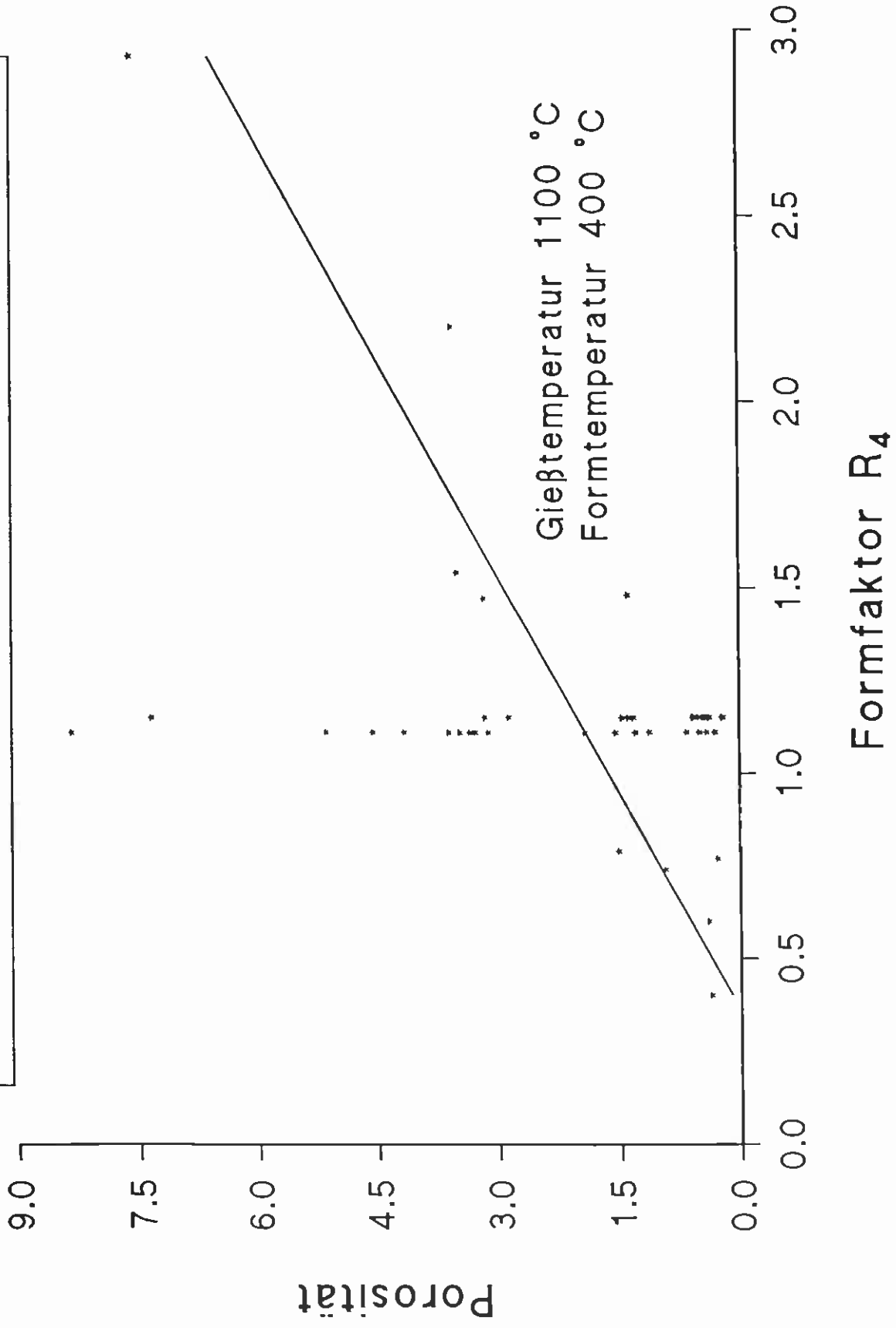
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand

Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 400 °C



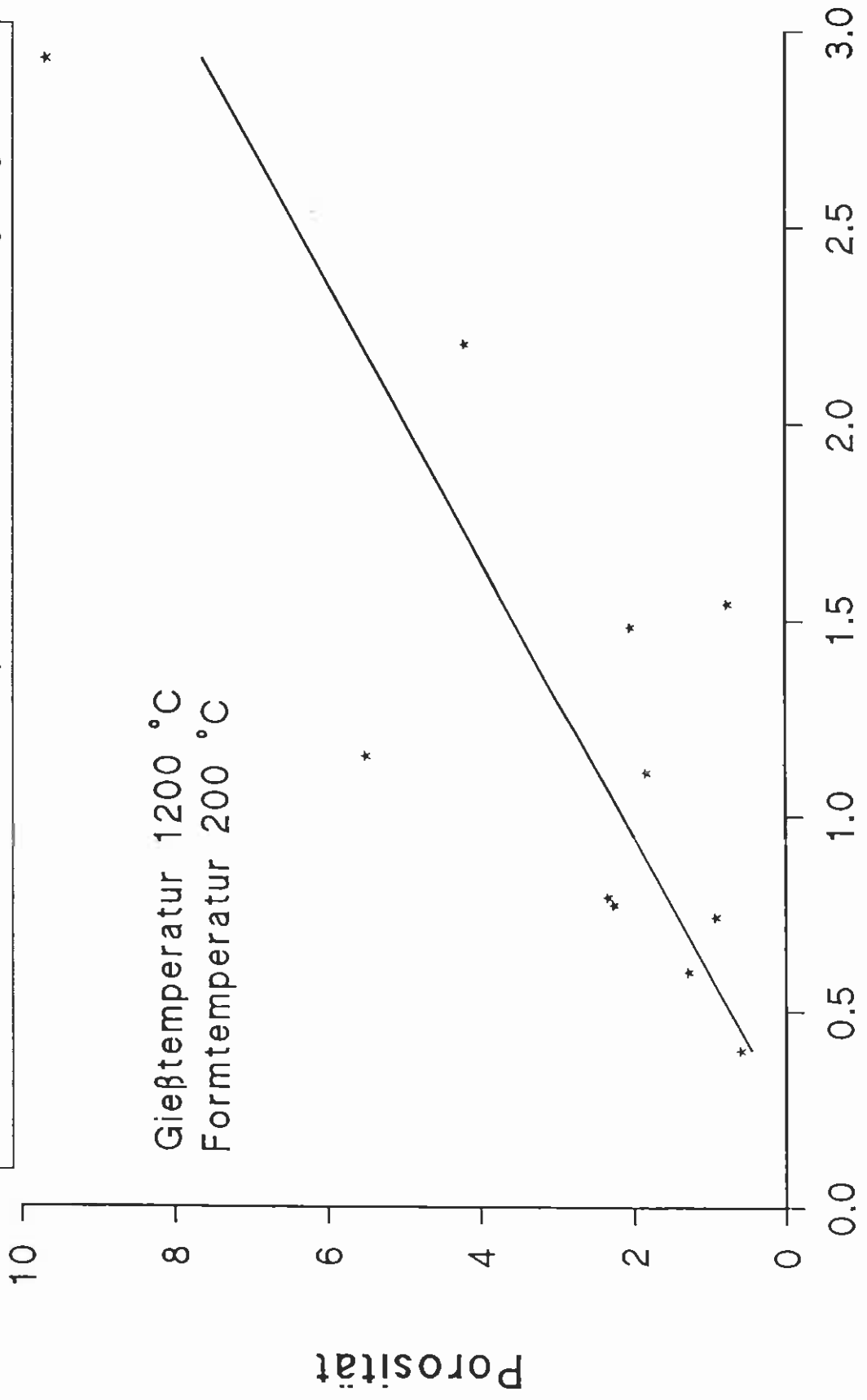
Formfaktor  $R_4$

Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte



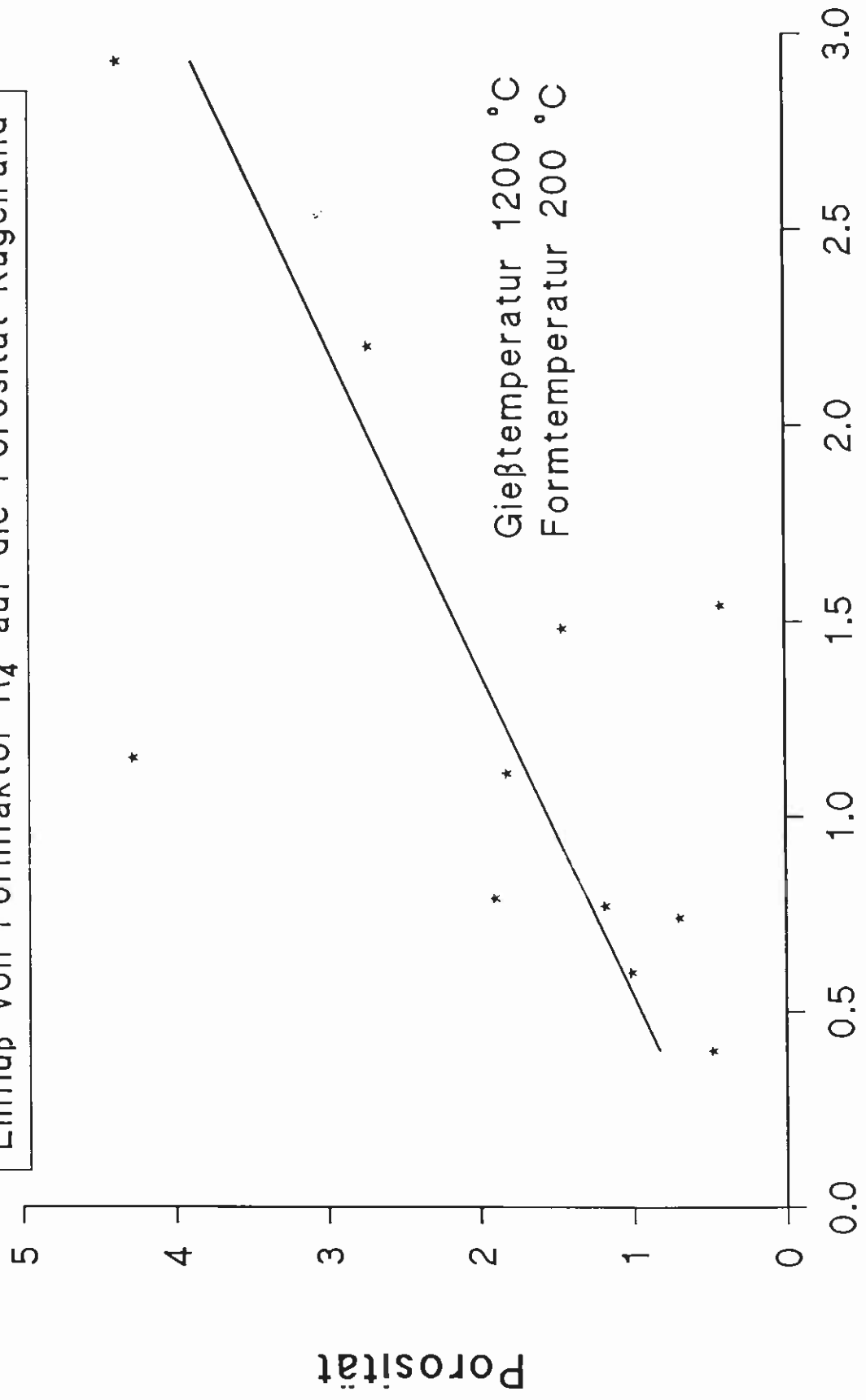
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugel gesamt

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 200 °C



Formfaktor  $R_4$

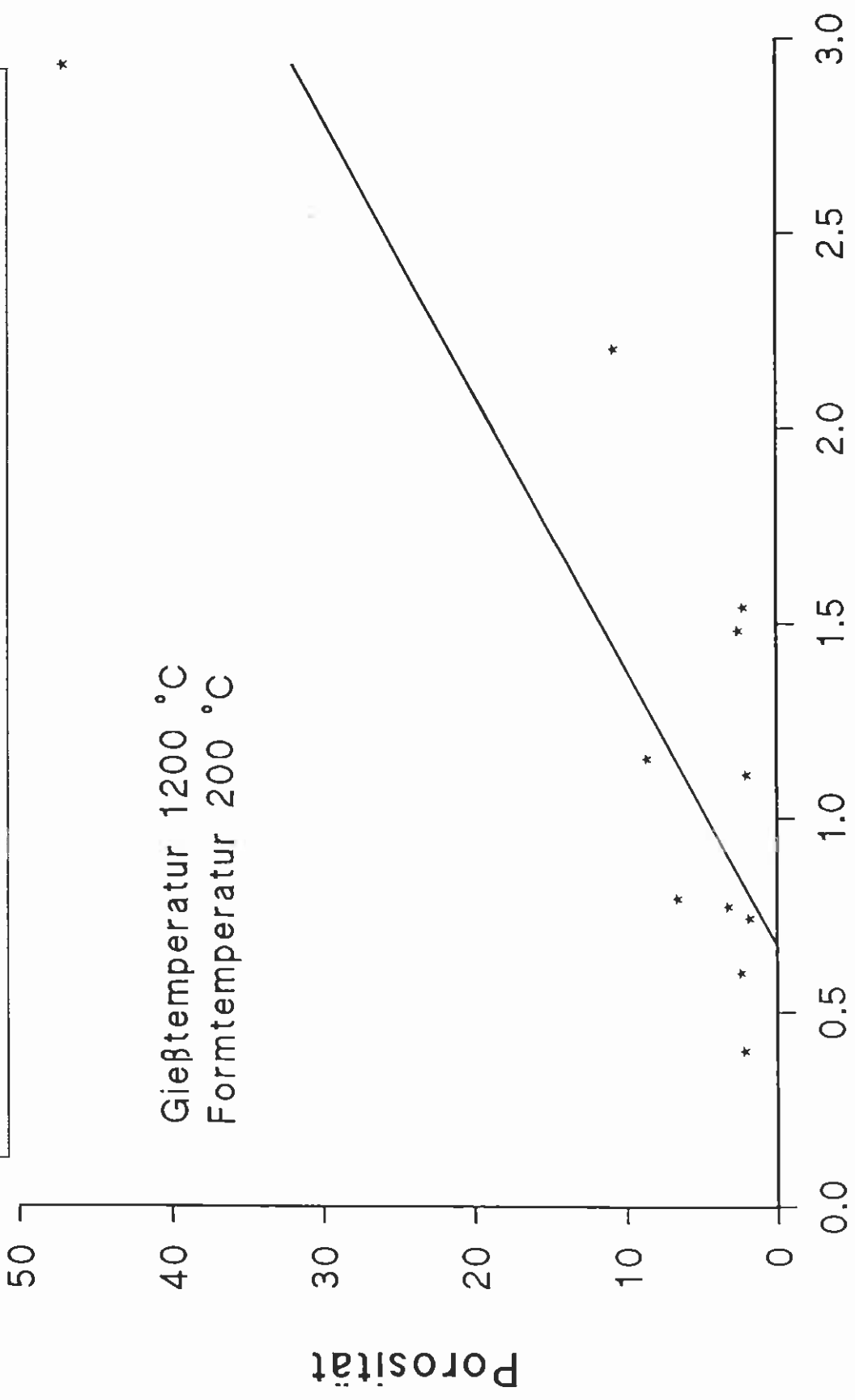
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand



Formfaktor  $R_4$

Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

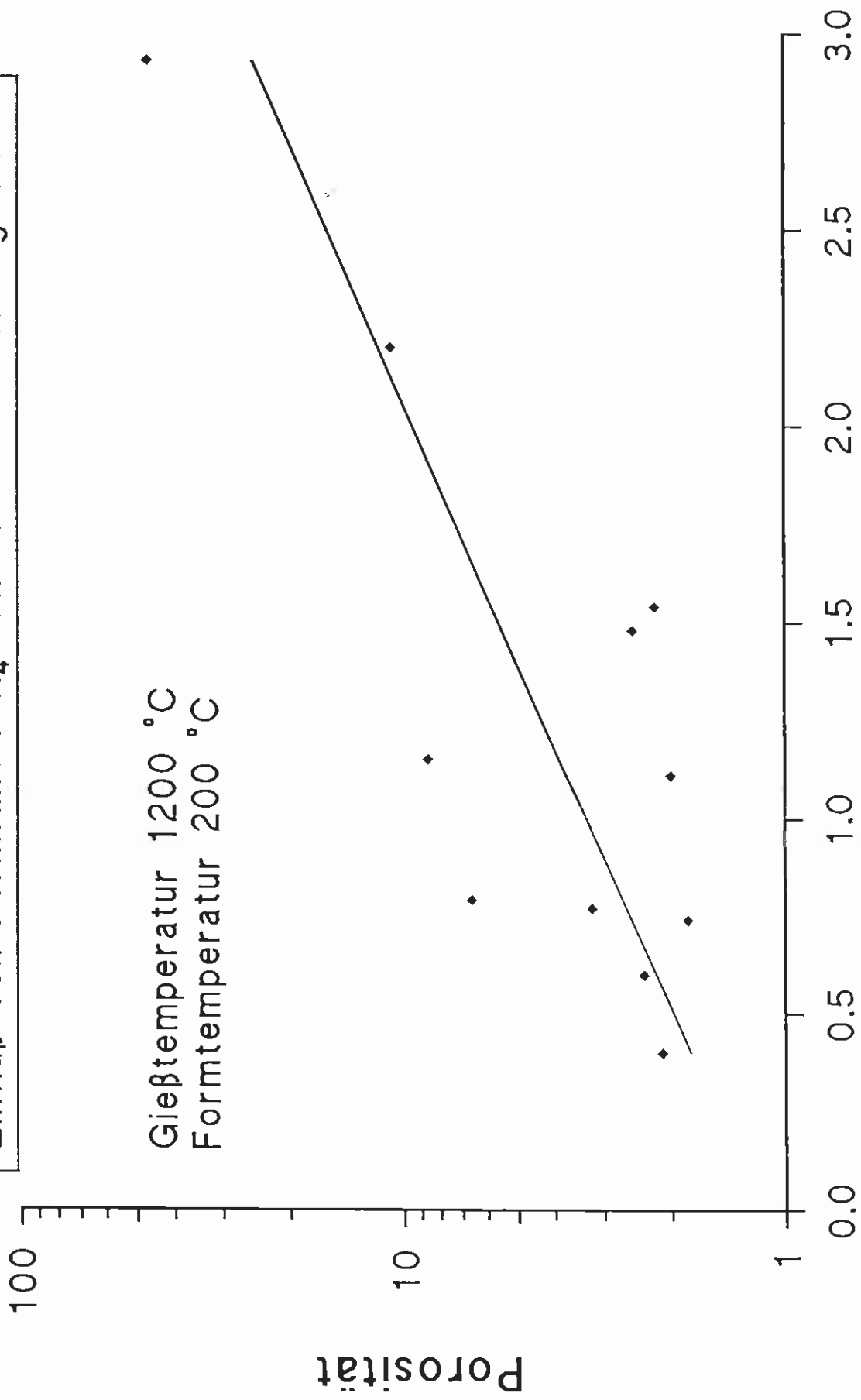
Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 200 °C



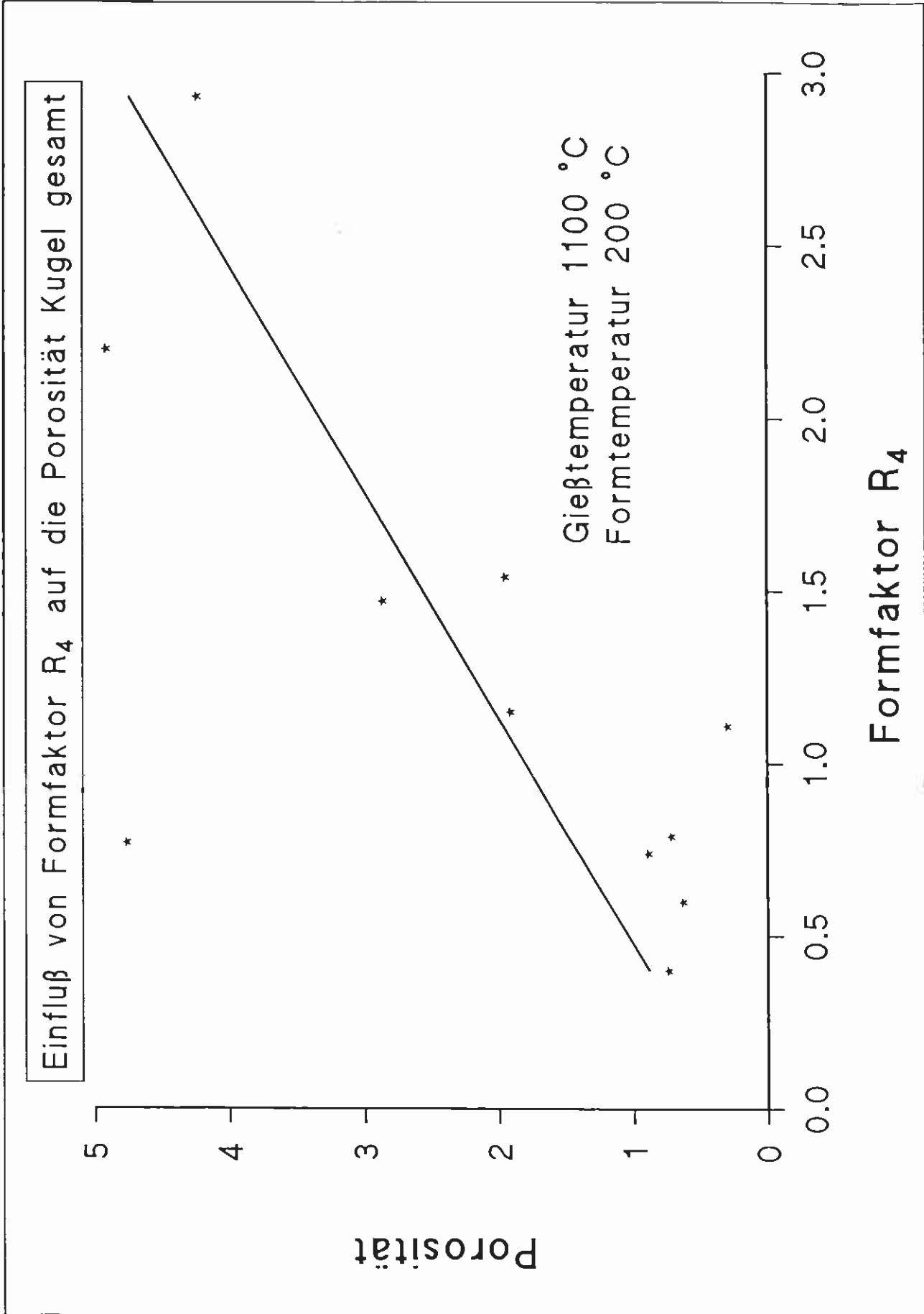
Formfaktor  $R_4$

Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 200 °C



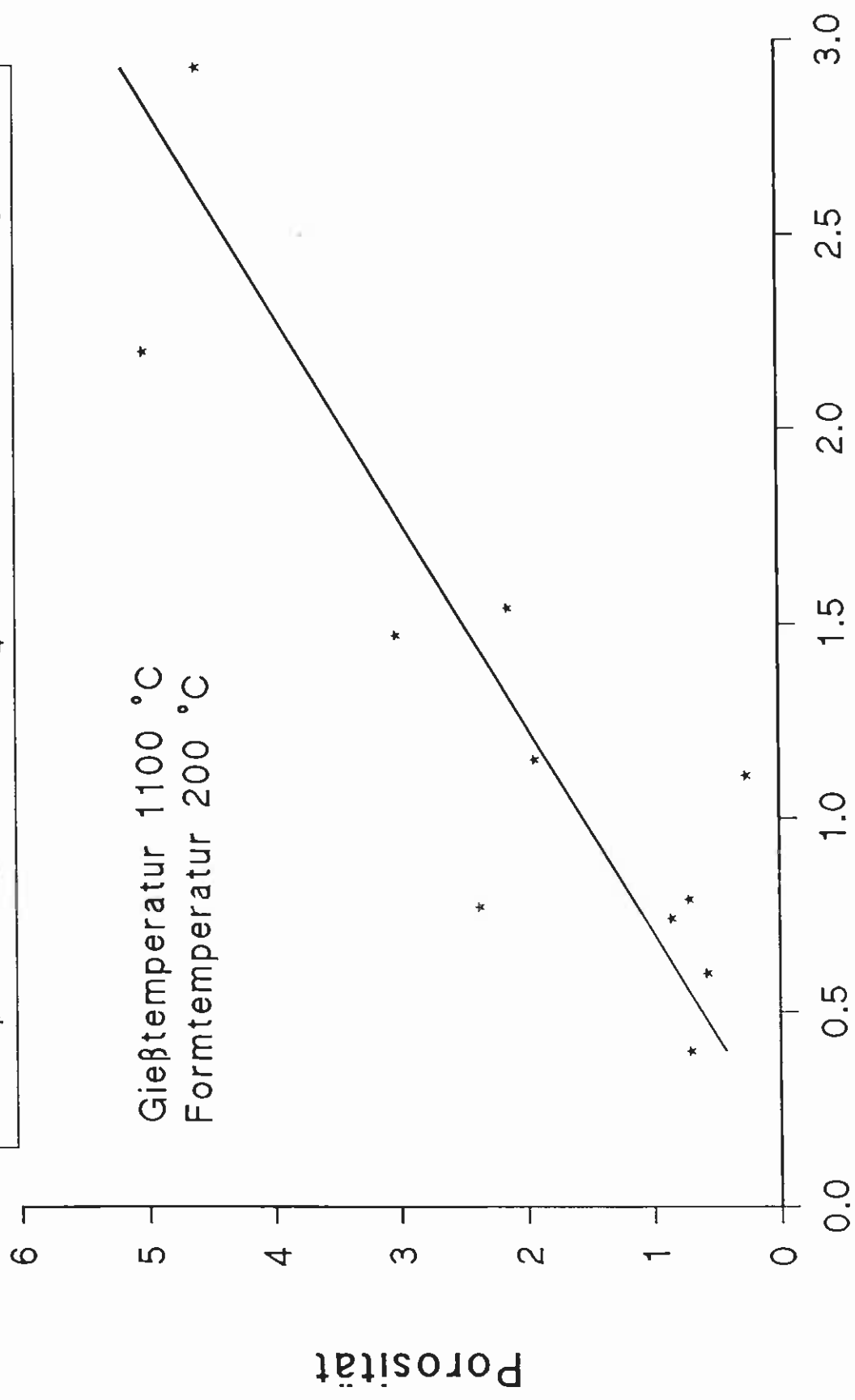
Formfaktor  $R_4$





Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelrand

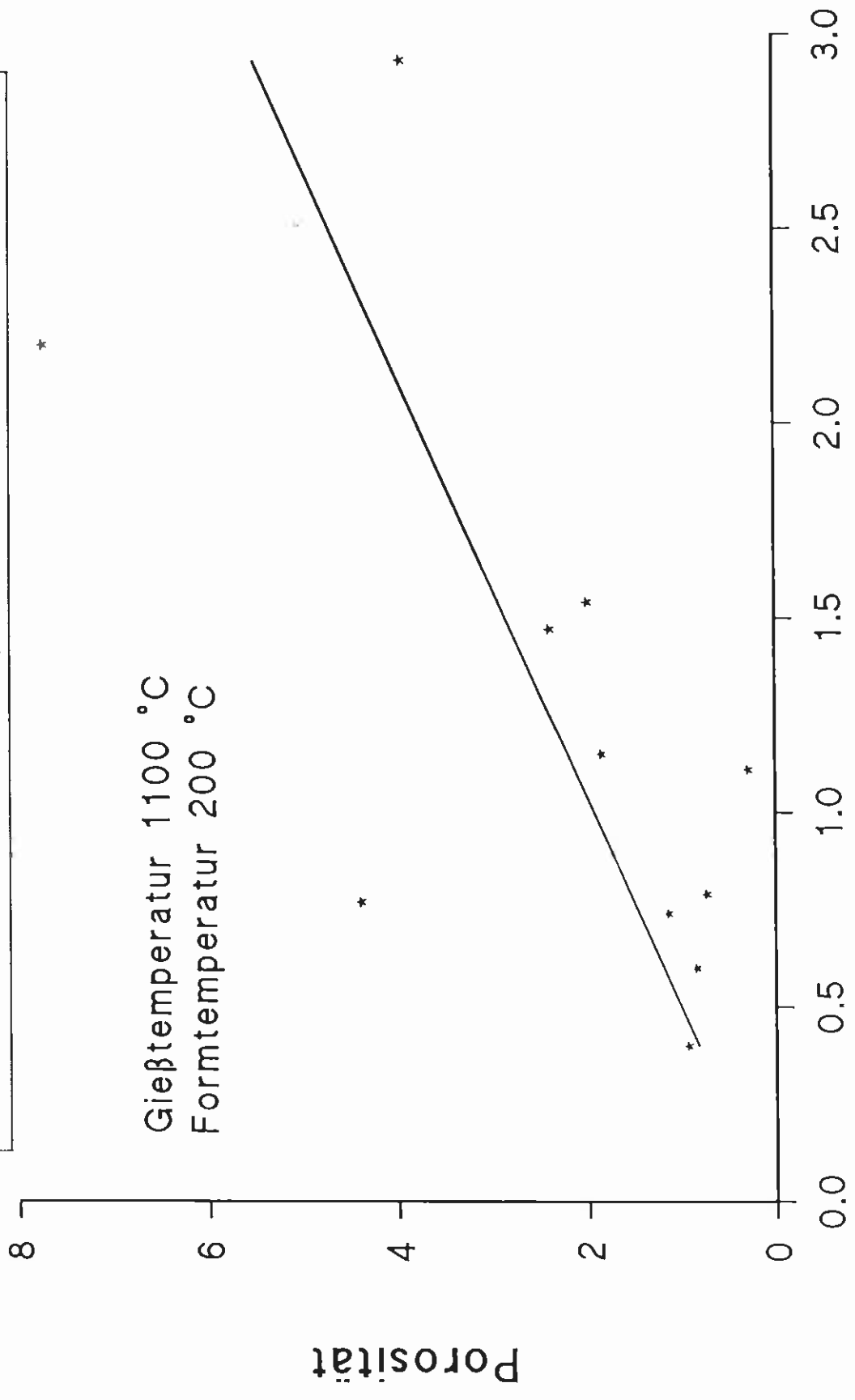
Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 200 °C



Formfaktor  $R_4$

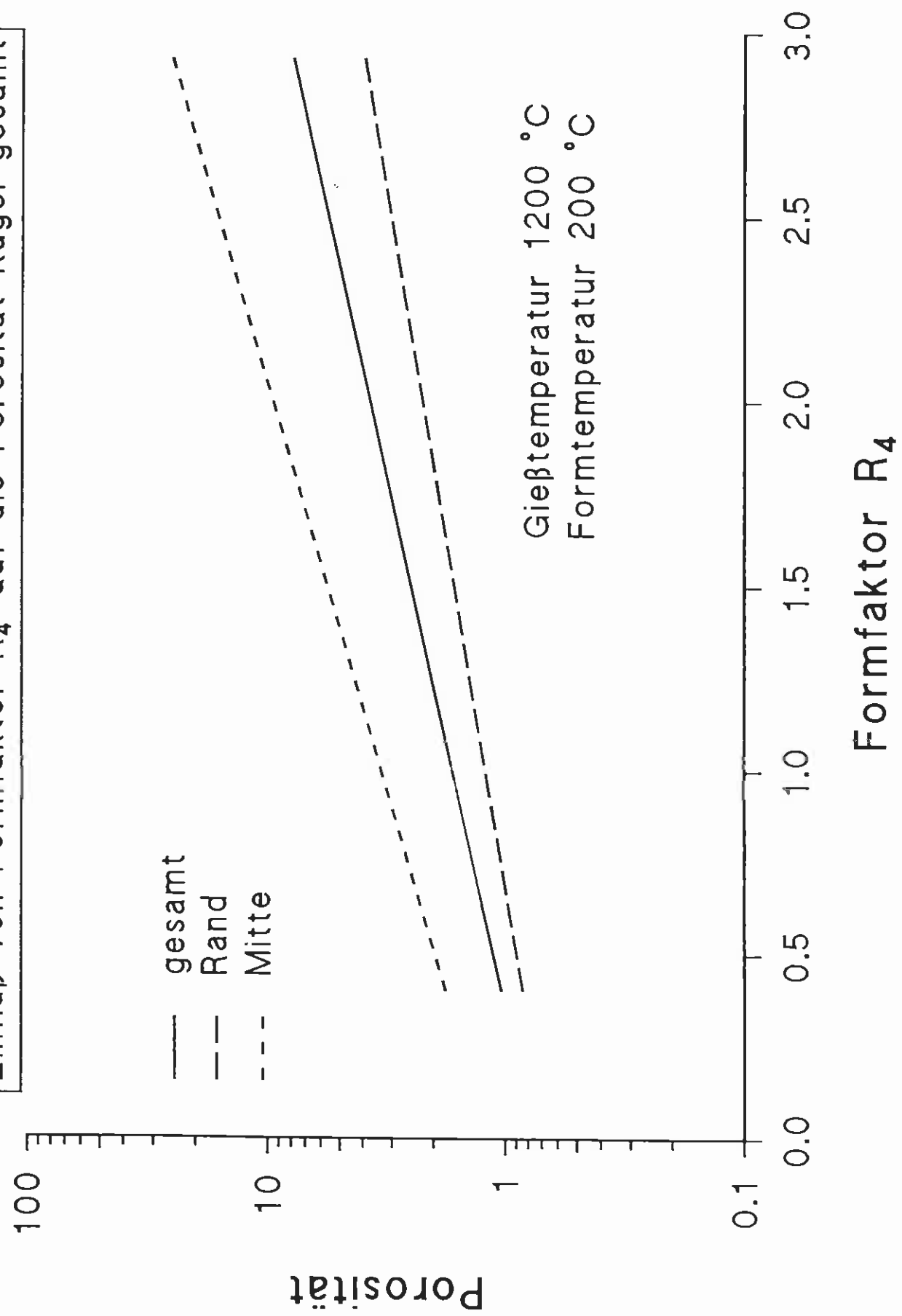
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugelmitte

Gießtemperatur 1100 °C  
Formtemperatur 200 °C

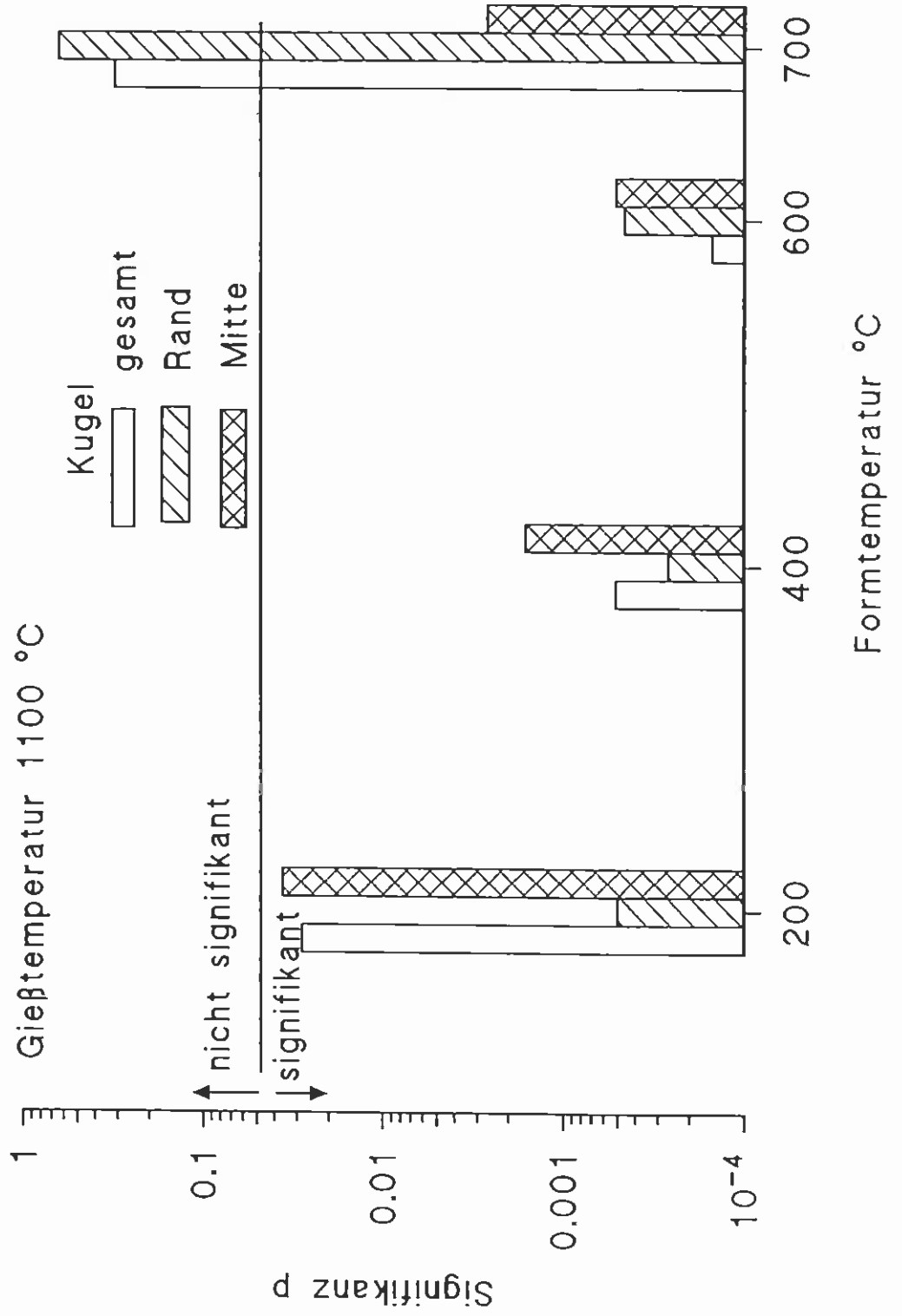


Formfaktor  $R_4$

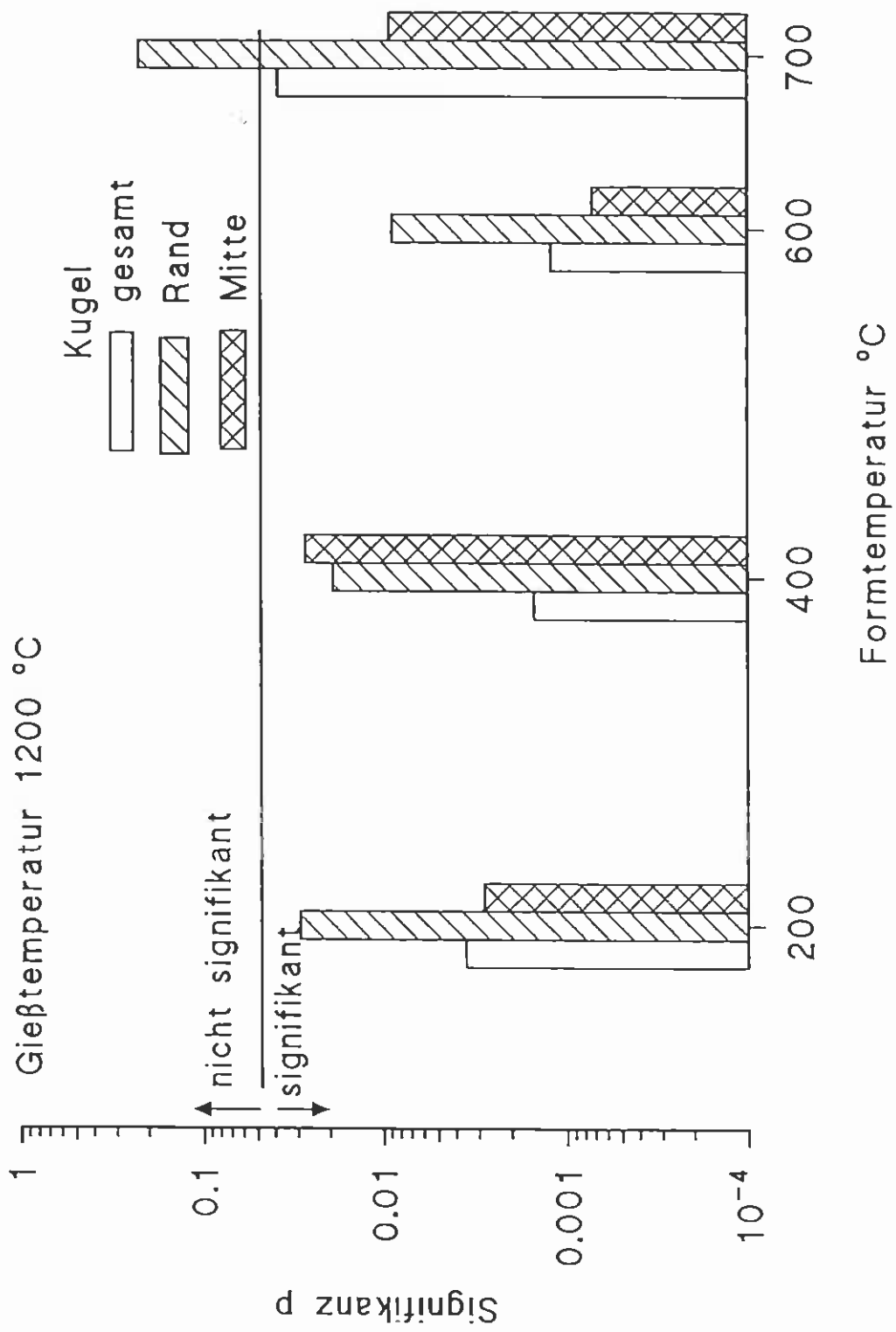
Einfluß von Formfaktor  $R_4$  auf die Porosität Kugel gesamt



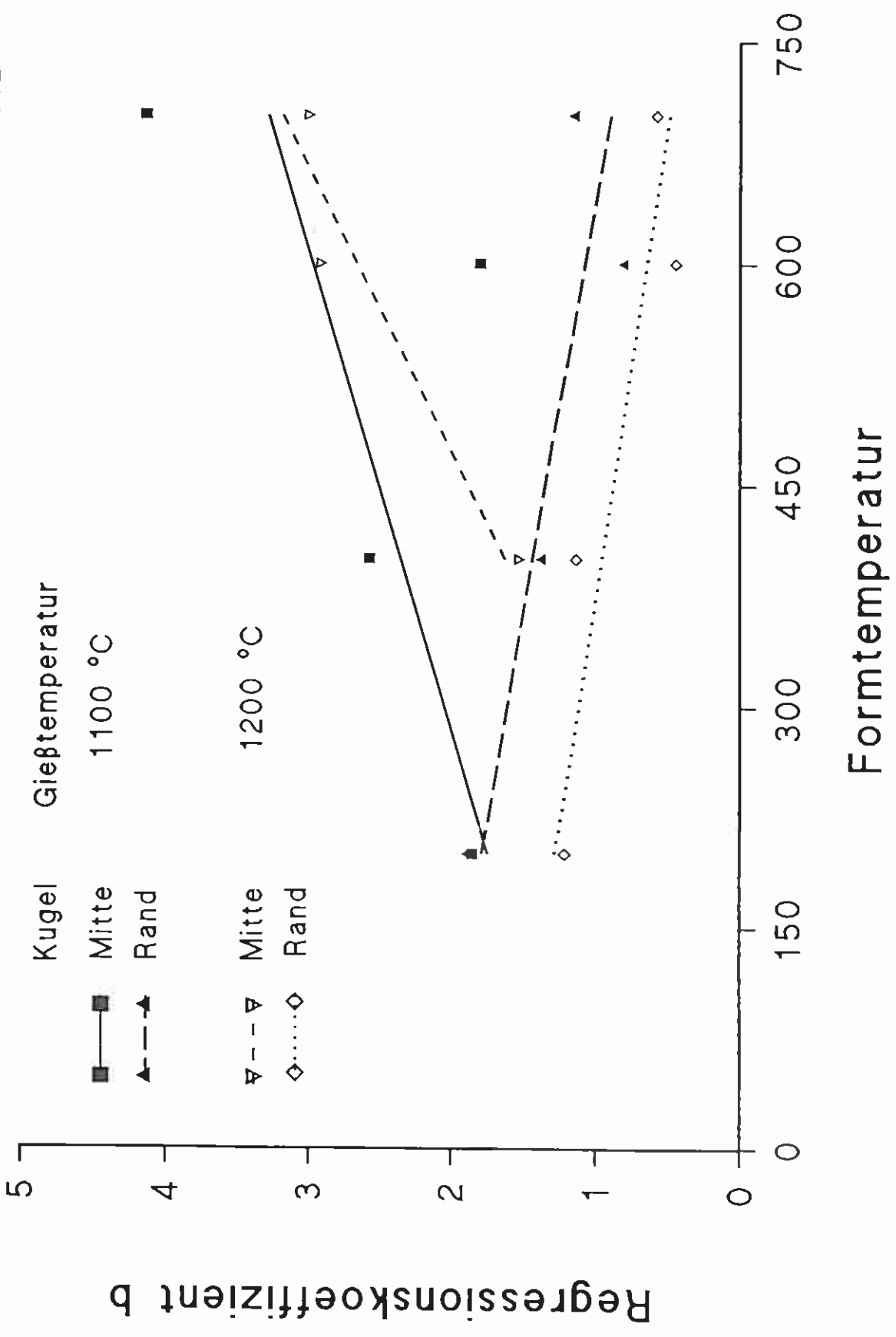
### Signifikanz der Korrelation zwischen Porosität und Formfaktor $R_4$



Signifikanz der Korrelation zwischen Porosität und Formfaktor  $R_4$

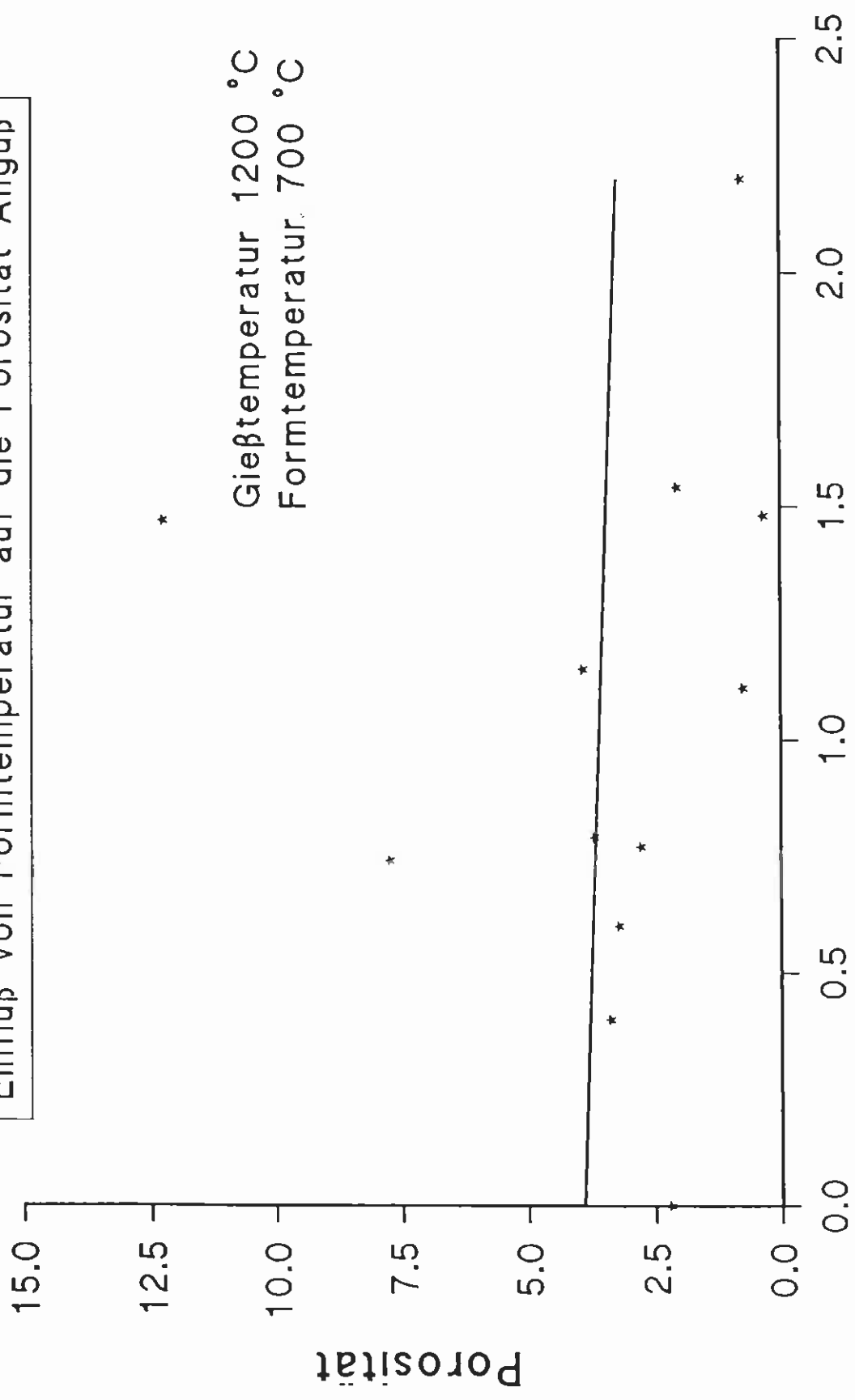


Zusammenstellung der Regressionskoeffizienten (Porosität =  $f(R_4)$ )



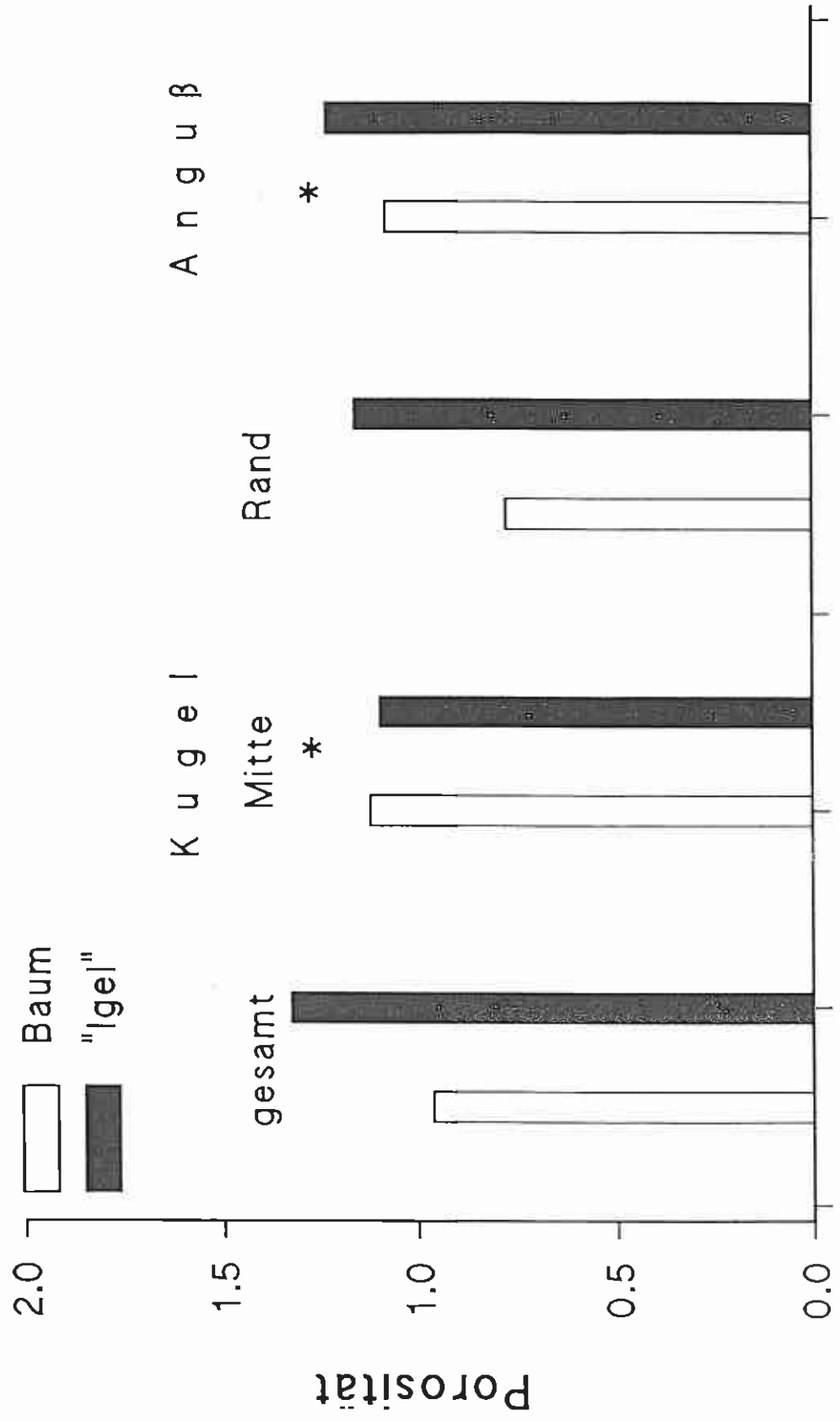
Einfluß von Formtemperatur auf die Porosität Anguß

Gießtemperatur 1200 °C  
Formtemperatur 700 °C



Formfaktor R4

Einfluß des Formaufbaus auf die Porosität



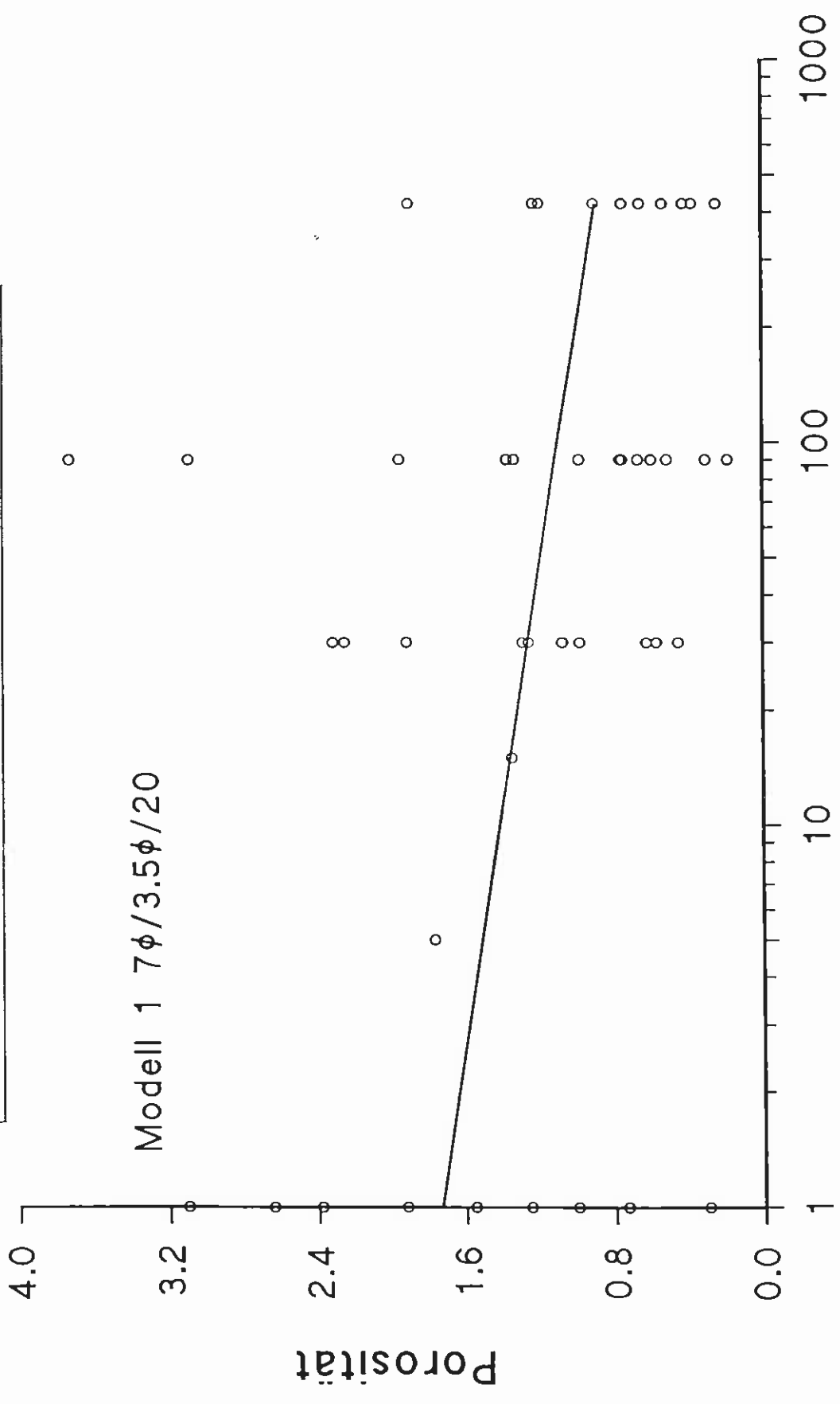
\* Einfluß nicht signifikant (S=95%)





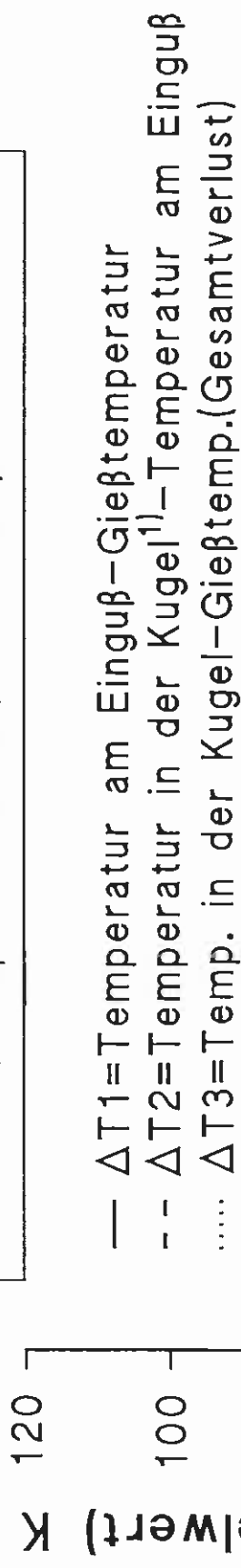
Abhängigkeit der Porosität der Kugelmitte  
von der Standzeit unter Argon

Modell 1  $7\phi/3.5\phi/20$



Standzeit unter Argon s

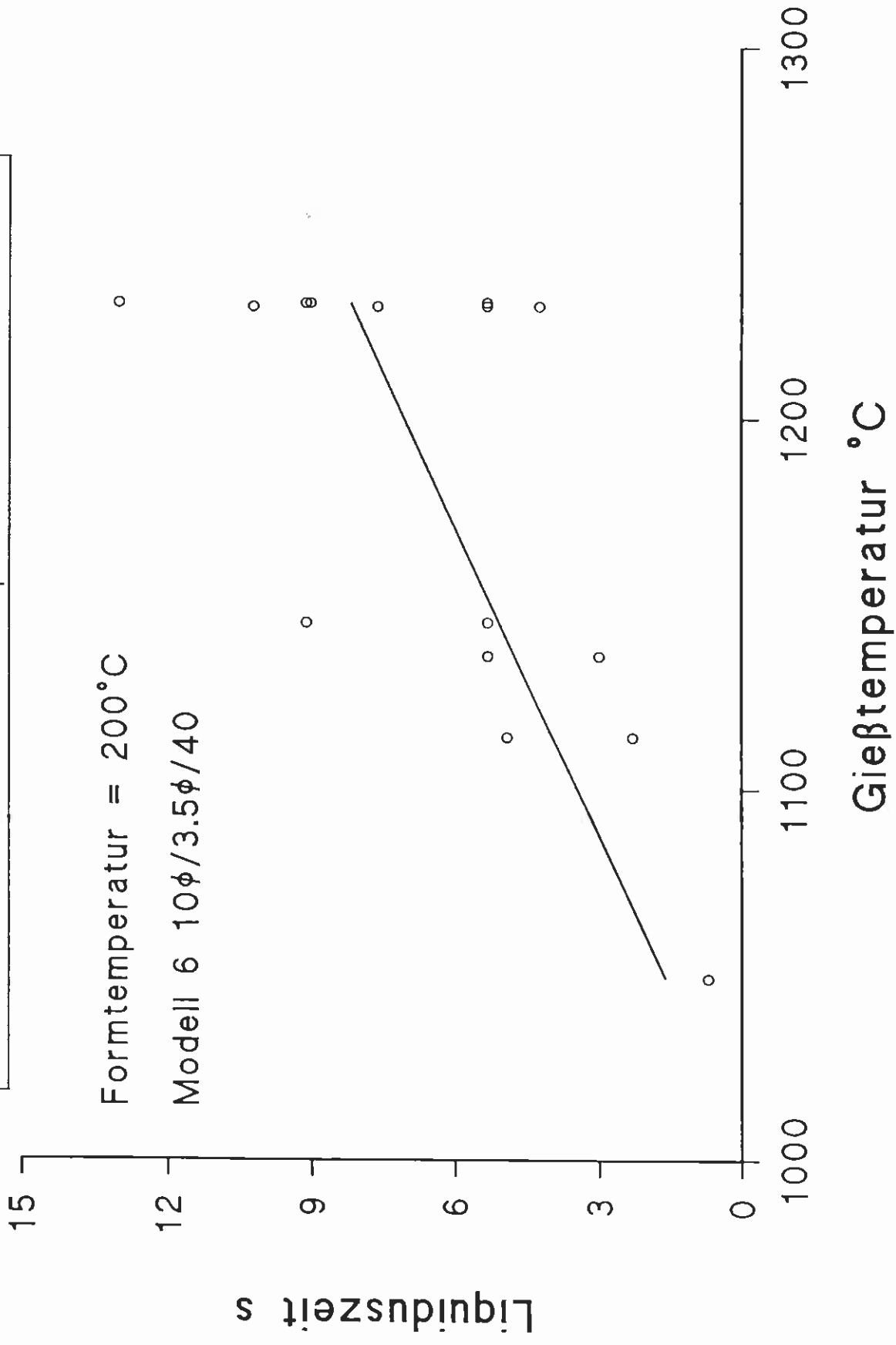
Einfluß der Gießtemperatur auf den Wärmeverlust  
(Temperaturabfall) beim Gießen



Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Liquiduszeit

Formtemperatur = 200°C

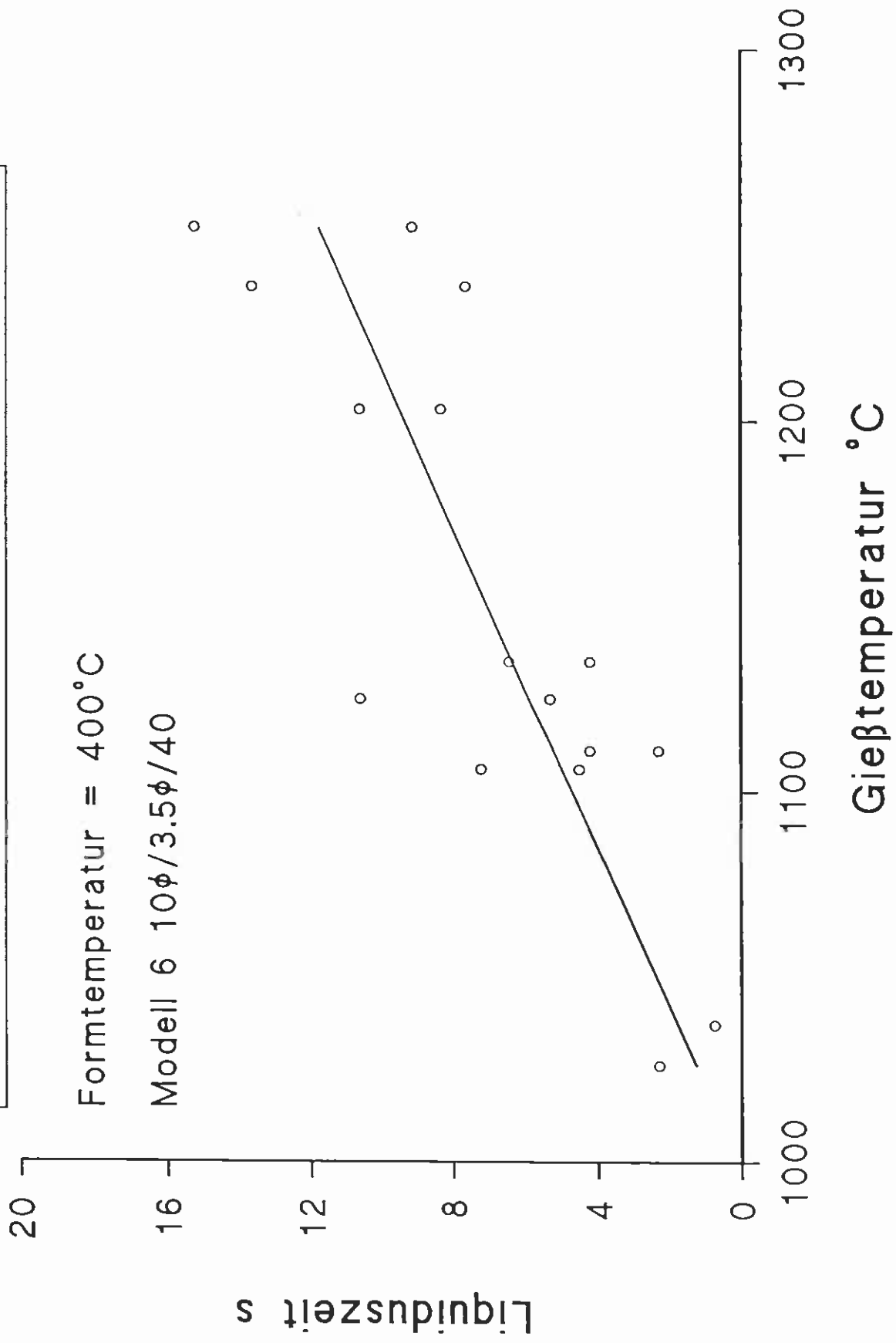
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Liquiduszeit

Formtemperatur = 400°C

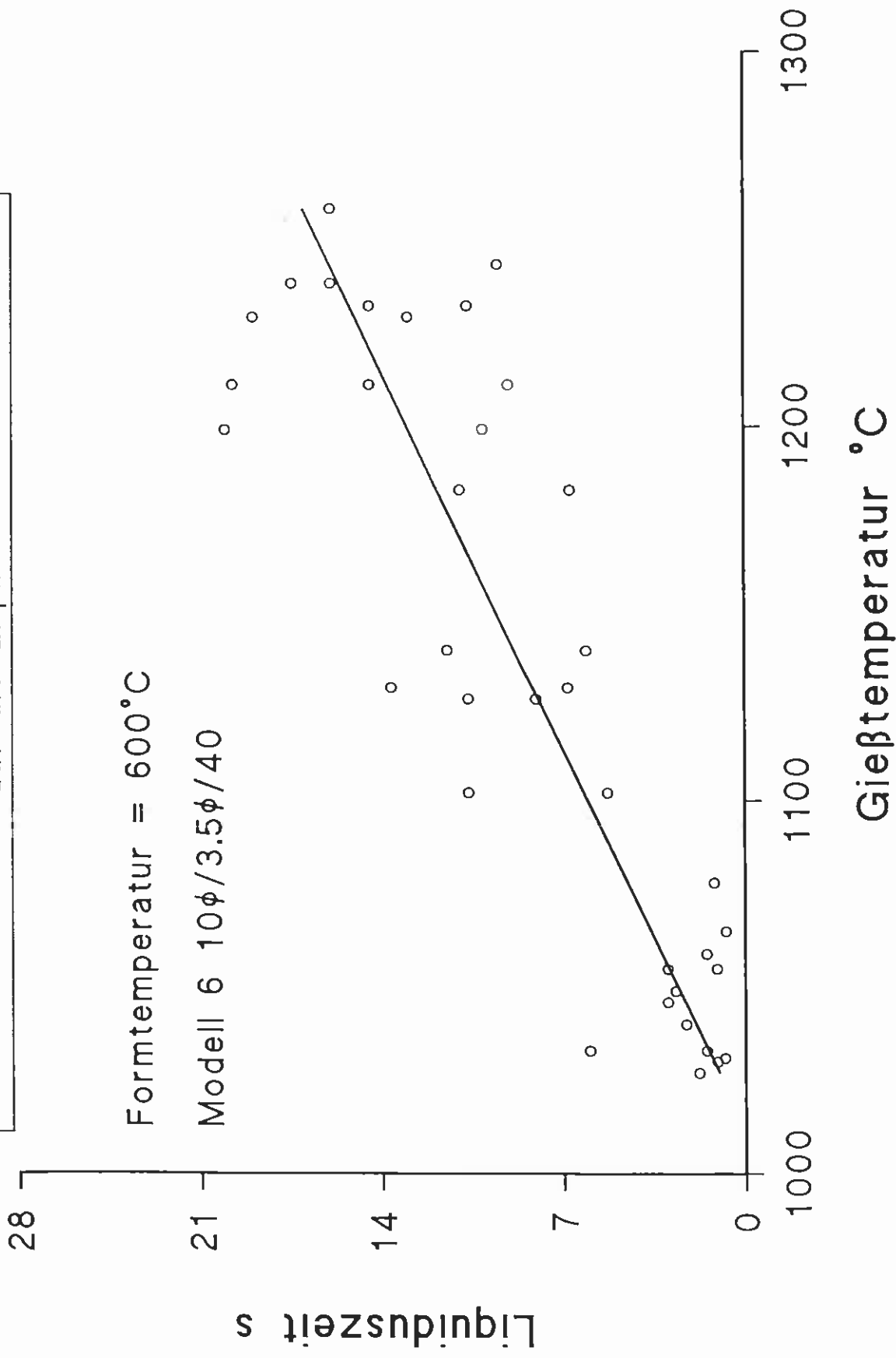
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Liquiduszeit

Formtemperatur = 600°C

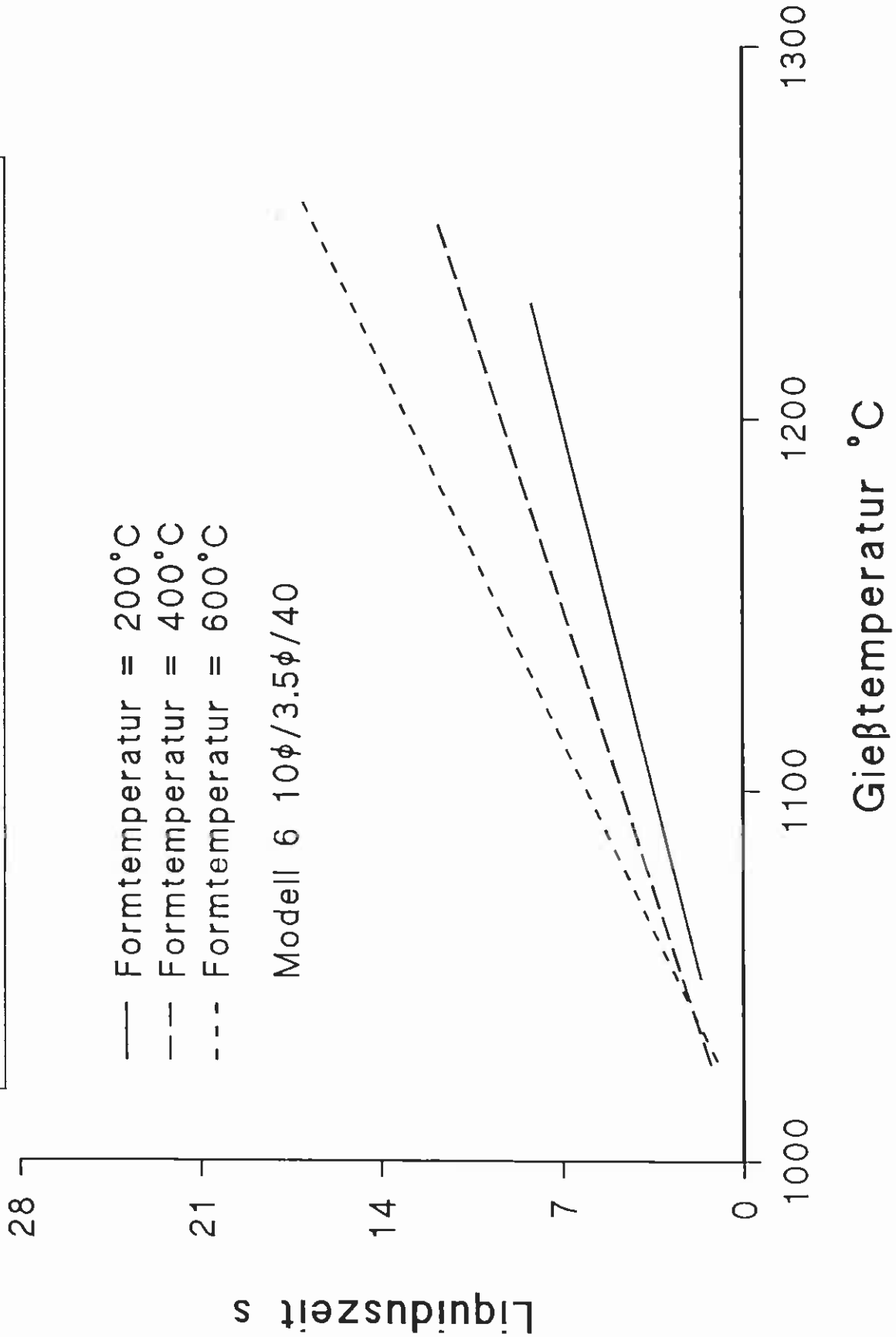
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Liquiduszeit

- Formtemperatur = 200°C
- - Formtemperatur = 400°C
- - - Formtemperatur = 600°C

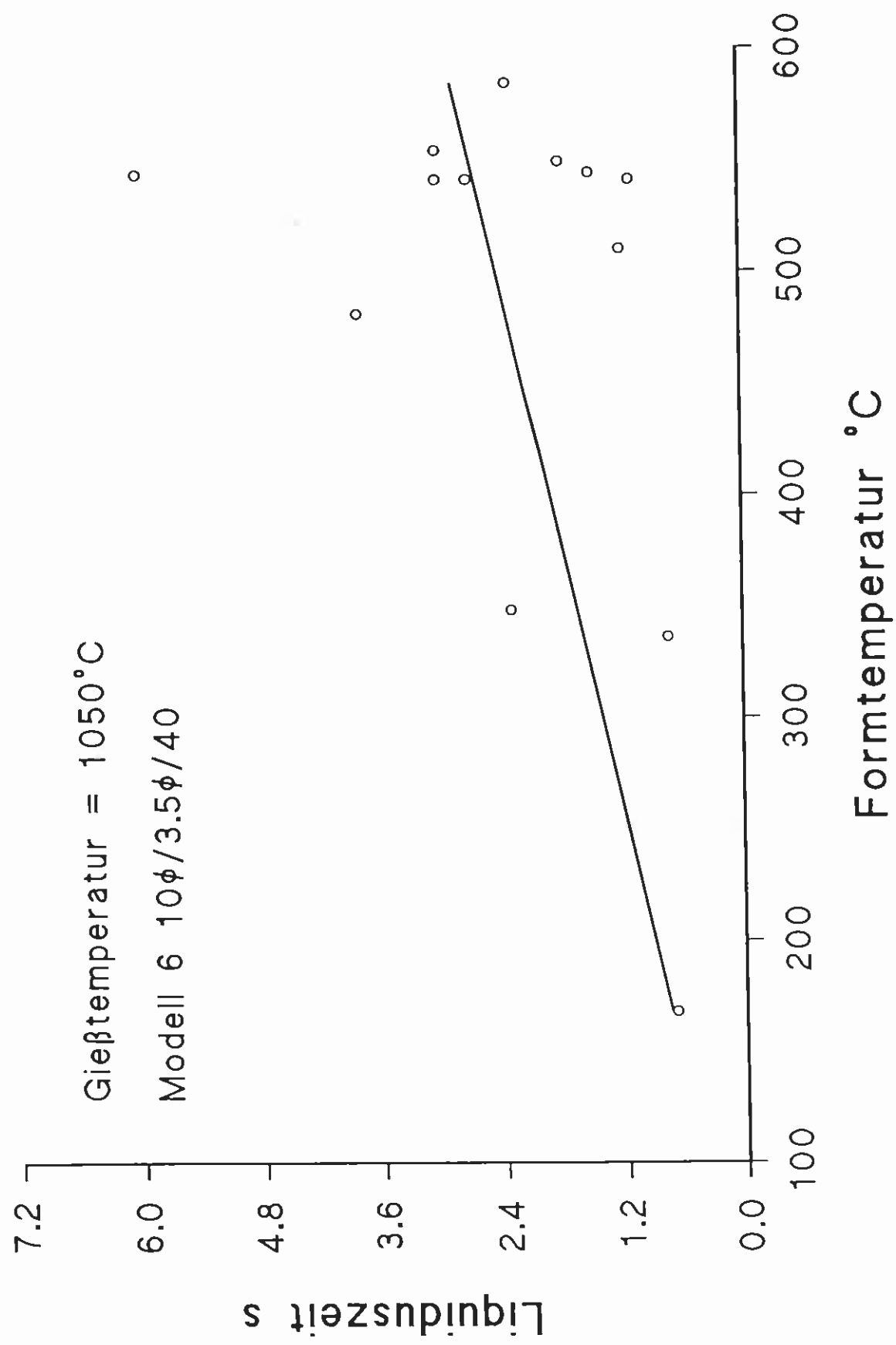
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Formtemperatur auf die Liquiduszeit

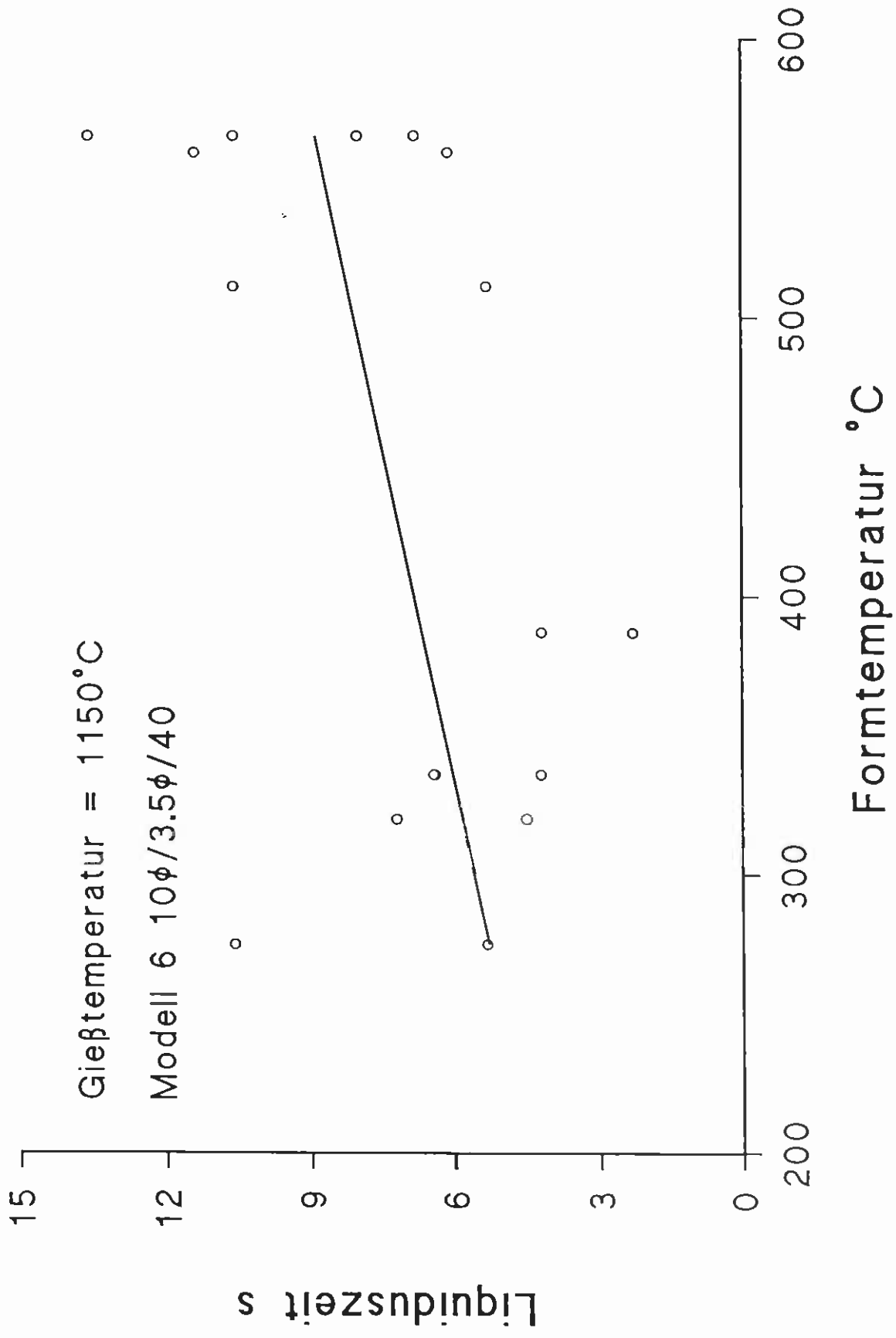
Gießtemperatur = 1050°C

Modell 6 10φ/3.5φ/40

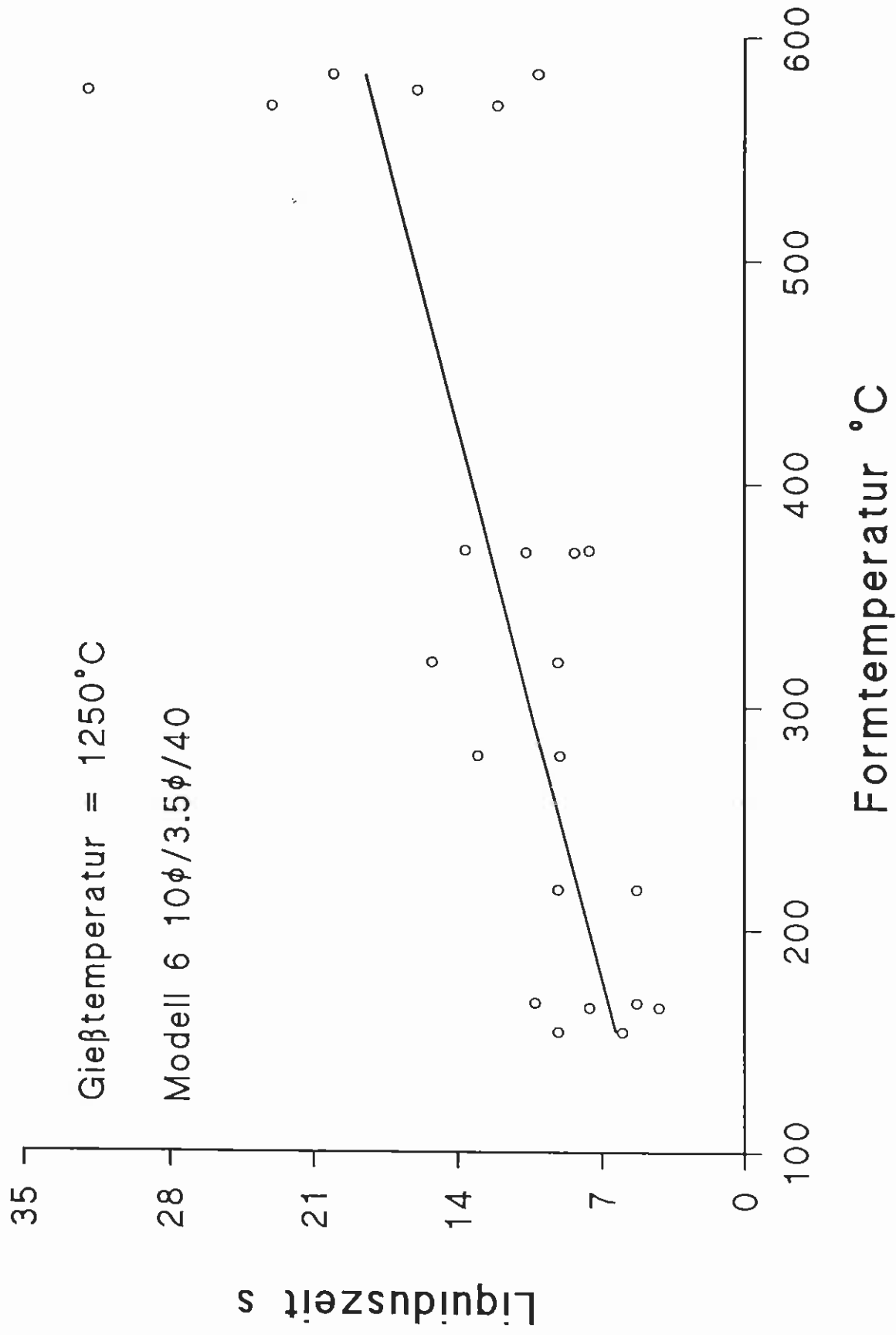




Einfluß der Formtemperatur auf die Liquiduszeit



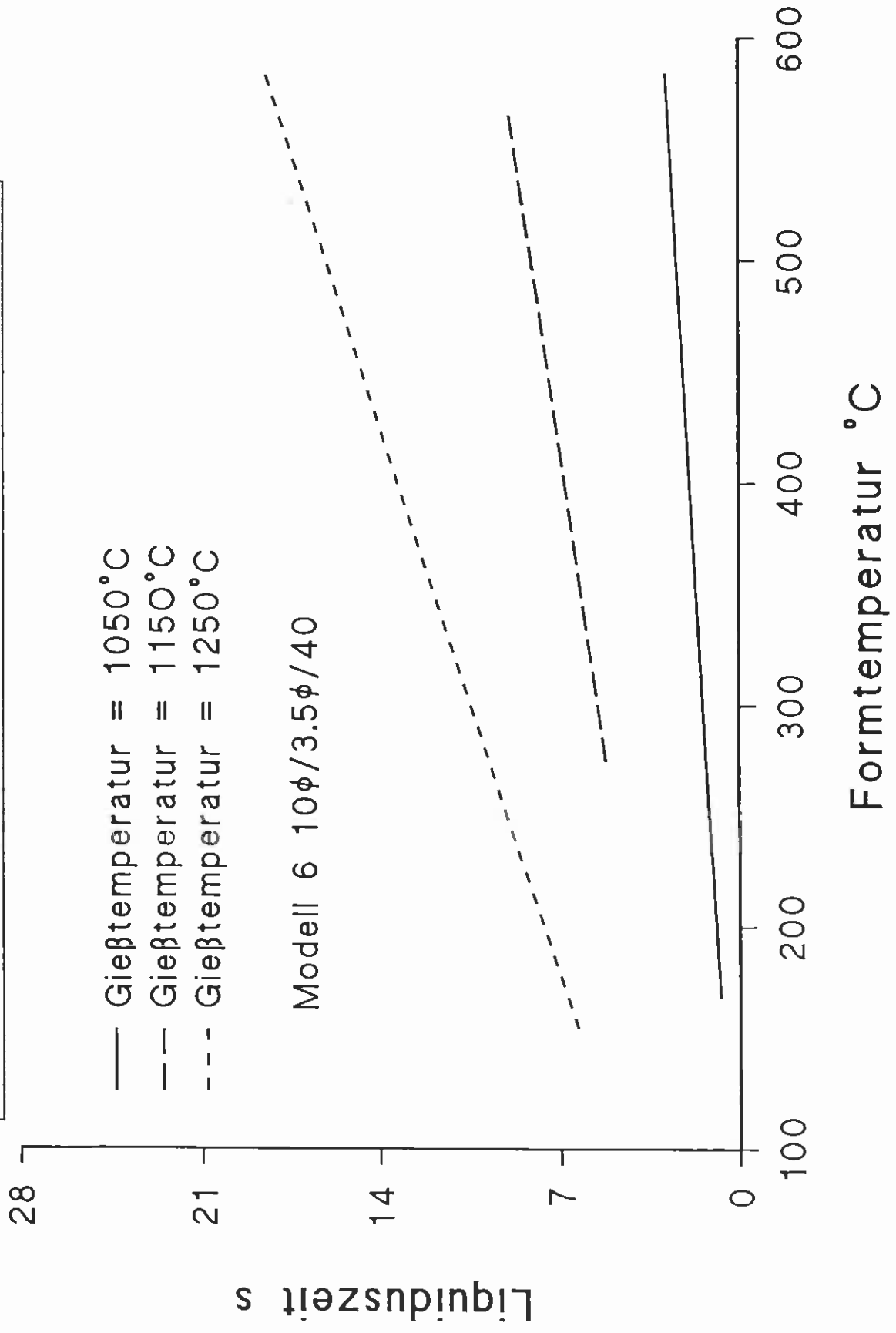
Einfluß der Formtemperatur auf die Liquiduszeit



Einfluß der Formtemperatur auf die Liquiduszeit  
in Abhängigkeit von der Gießtemperatur

- Gießtemperatur = 1050°C
- Gießtemperatur = 1150°C
- Gießtemperatur = 1250°C

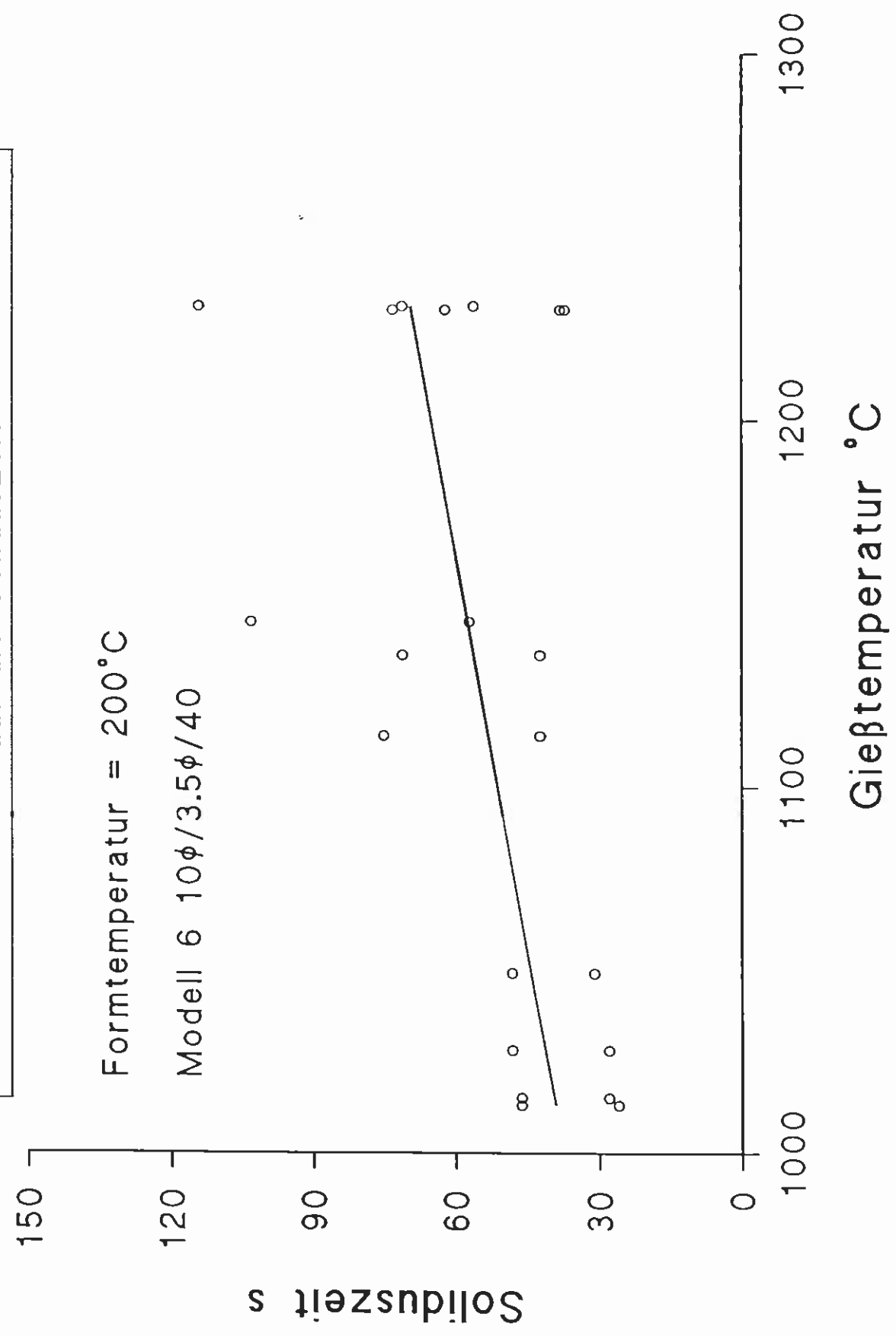
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Gießtemperatur , gemessen am Einguß  
auf die Soliduszeit

Formtemperatur = 200°C

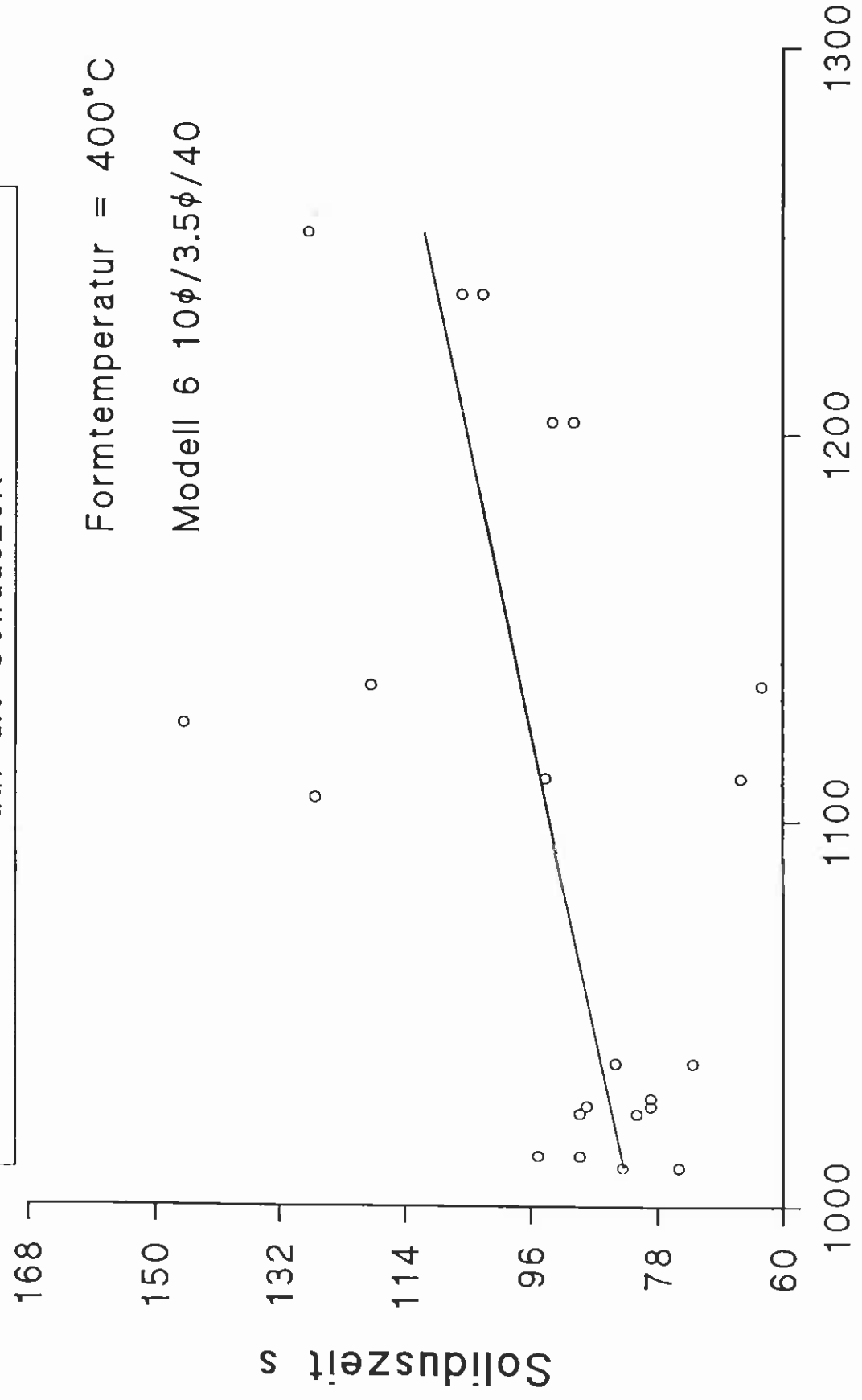
Modell 6 10φ/3.5φ/40



Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Soliduszeit

Formtemperatur = 400°C

Modell 6 10φ/3.5φ/40

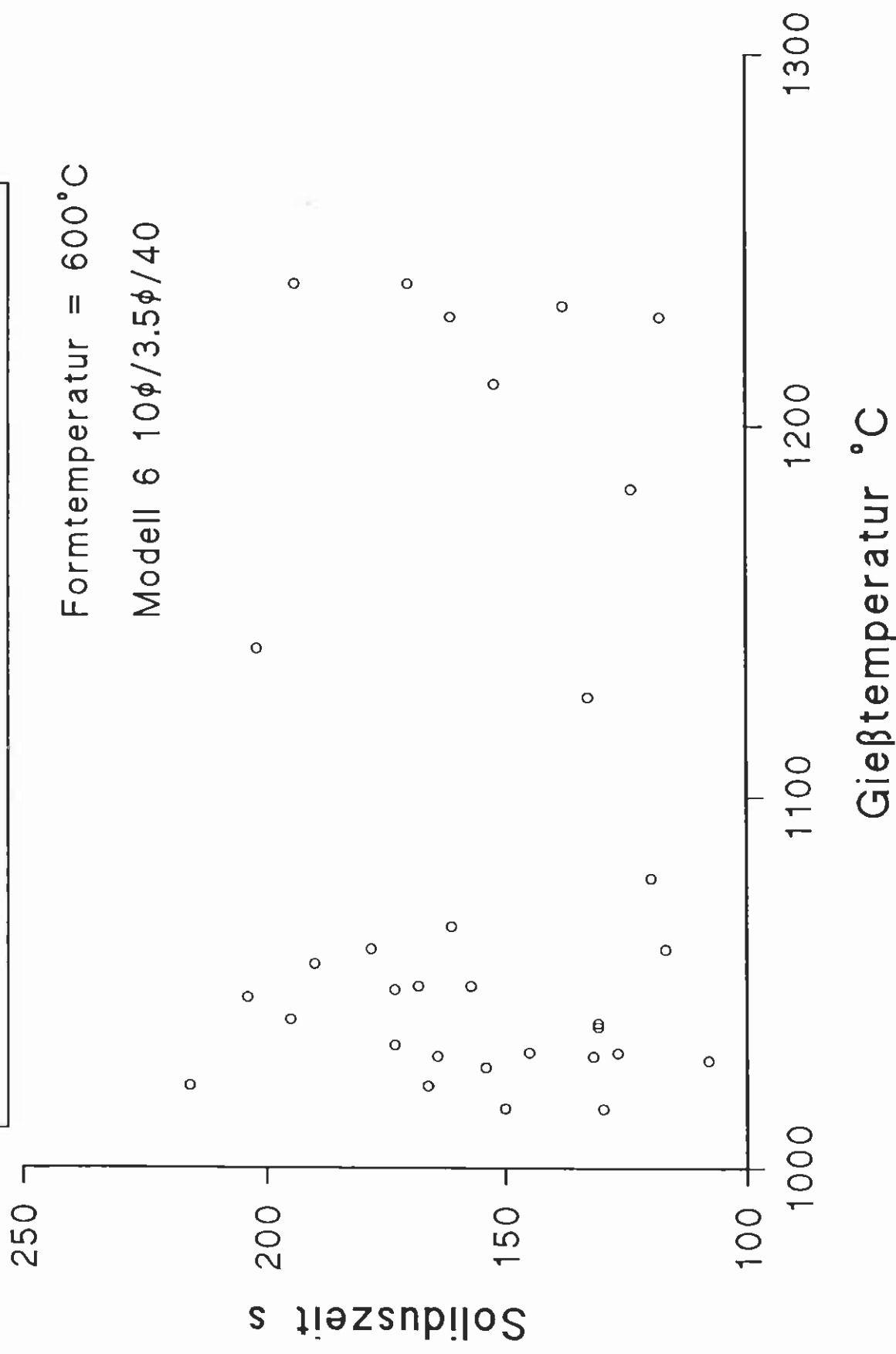


Gießtemperatur °C

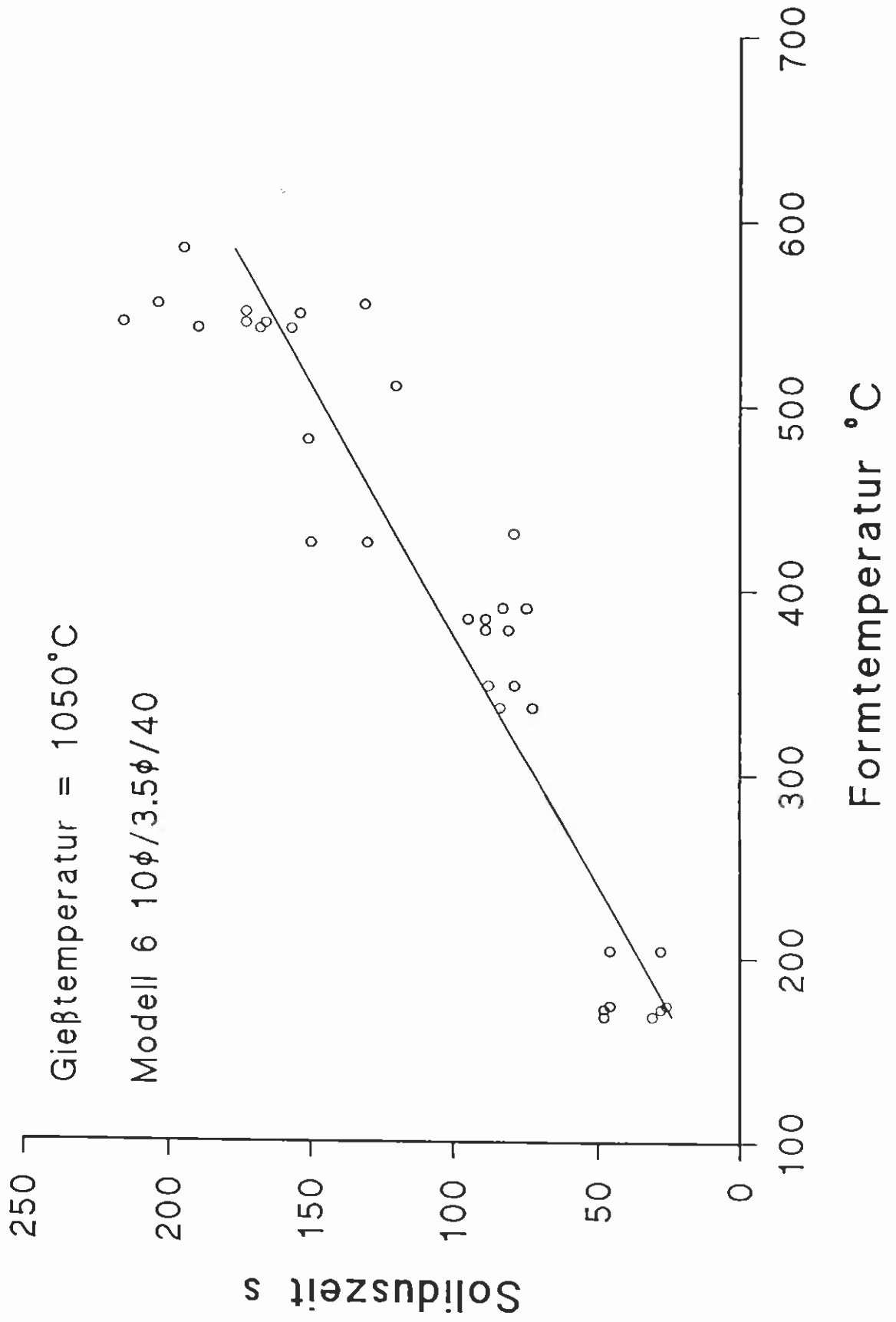
Einfluß der Gießtemperatur, gemessen am Einguß  
auf die Soliduszeit

Formtemperatur = 600°C

Modell 6 10φ/3.5φ/40



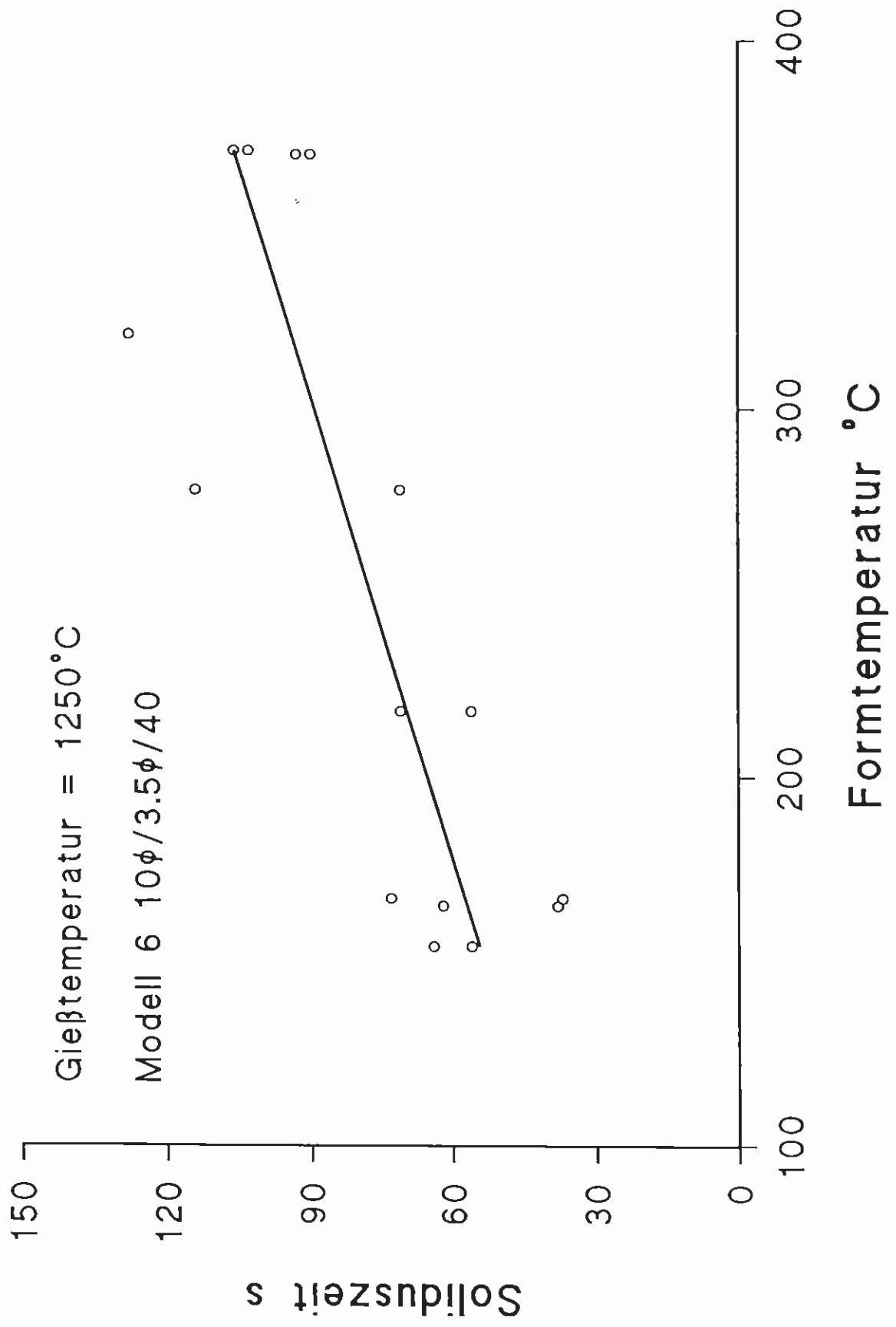
Einfluß der Formtemperatur auf die Soliduszeit



Einfluß der Formtemperatur auf die Soliduszeit

Gießtemperatur = 1250°C

Modell 6 10φ/3.5φ/40

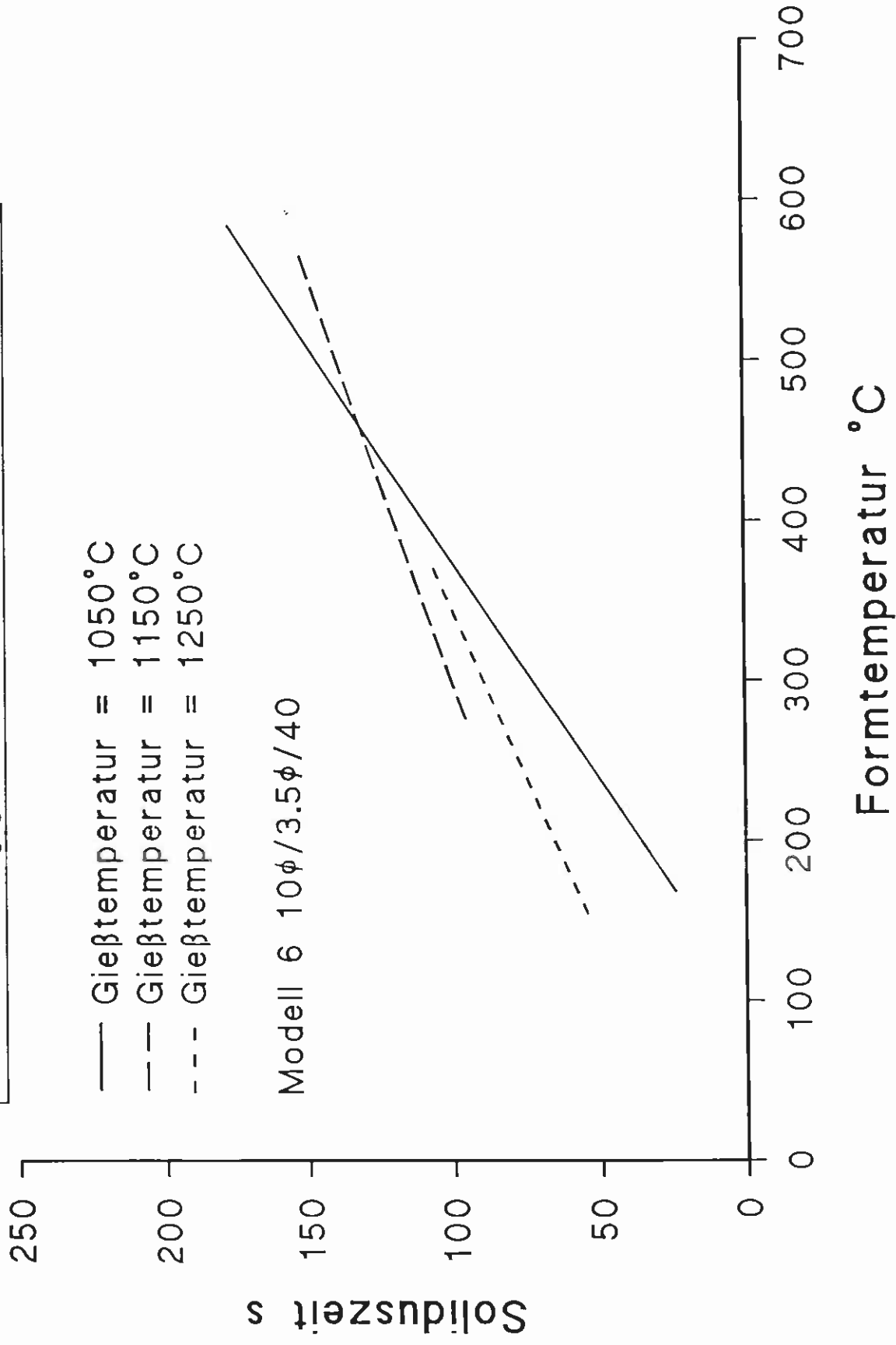




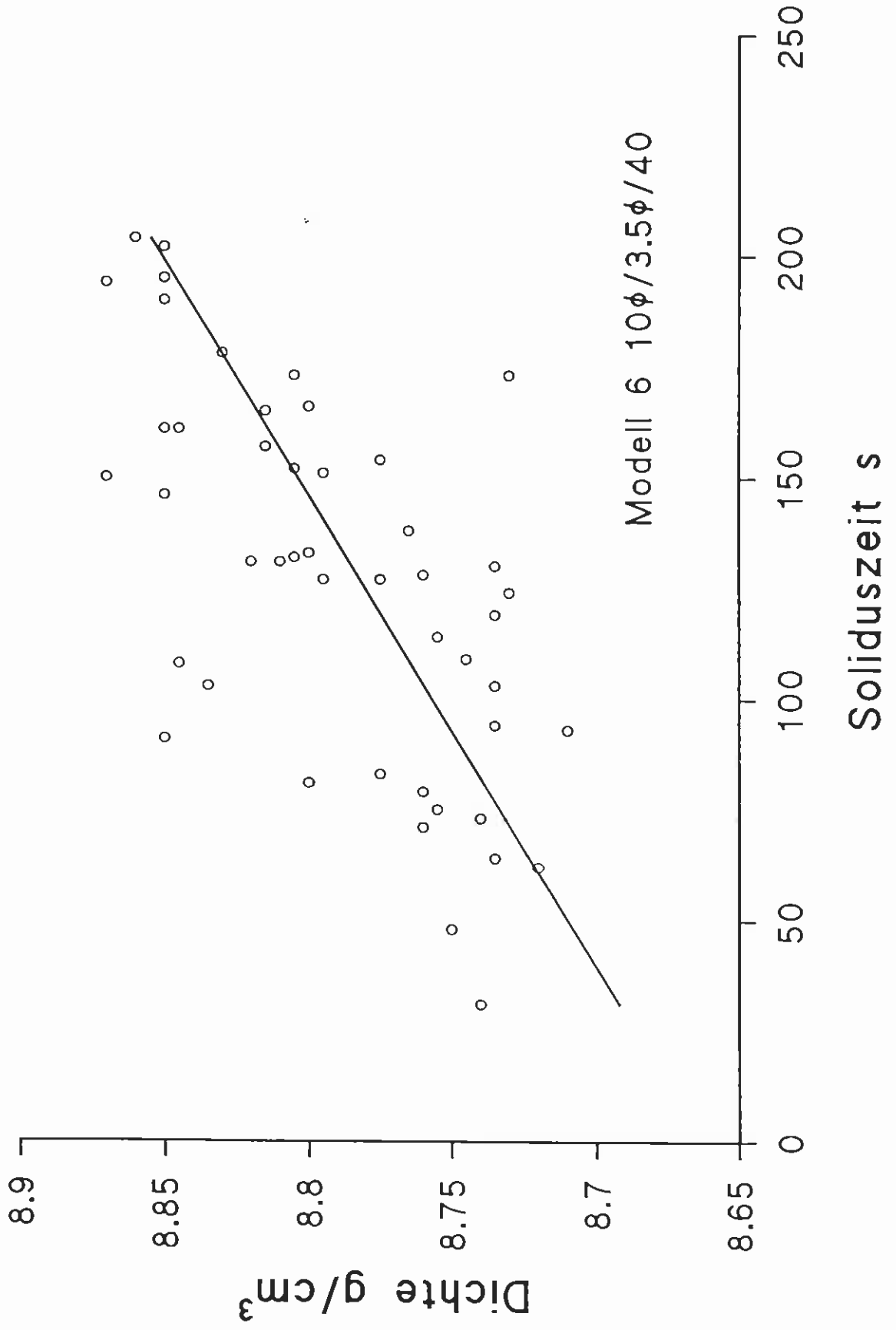
Einfluß der Formtemperatur auf die Soliduszeit  
in Abhängigkeit von der Gießtemperatur

- Gießtemperatur = 1050°C
- - Gießtemperatur = 1150°C
- - - Gießtemperatur = 1250°C

Modell 6 10φ/3.5φ/40



Dichte in Abhängigkeit von der Soliduszeit



Porosität des Angusses in Abhängigkeit  
von der Soliduszeit

Modell  $6 \cdot 10\phi / 3.5\phi / 40$

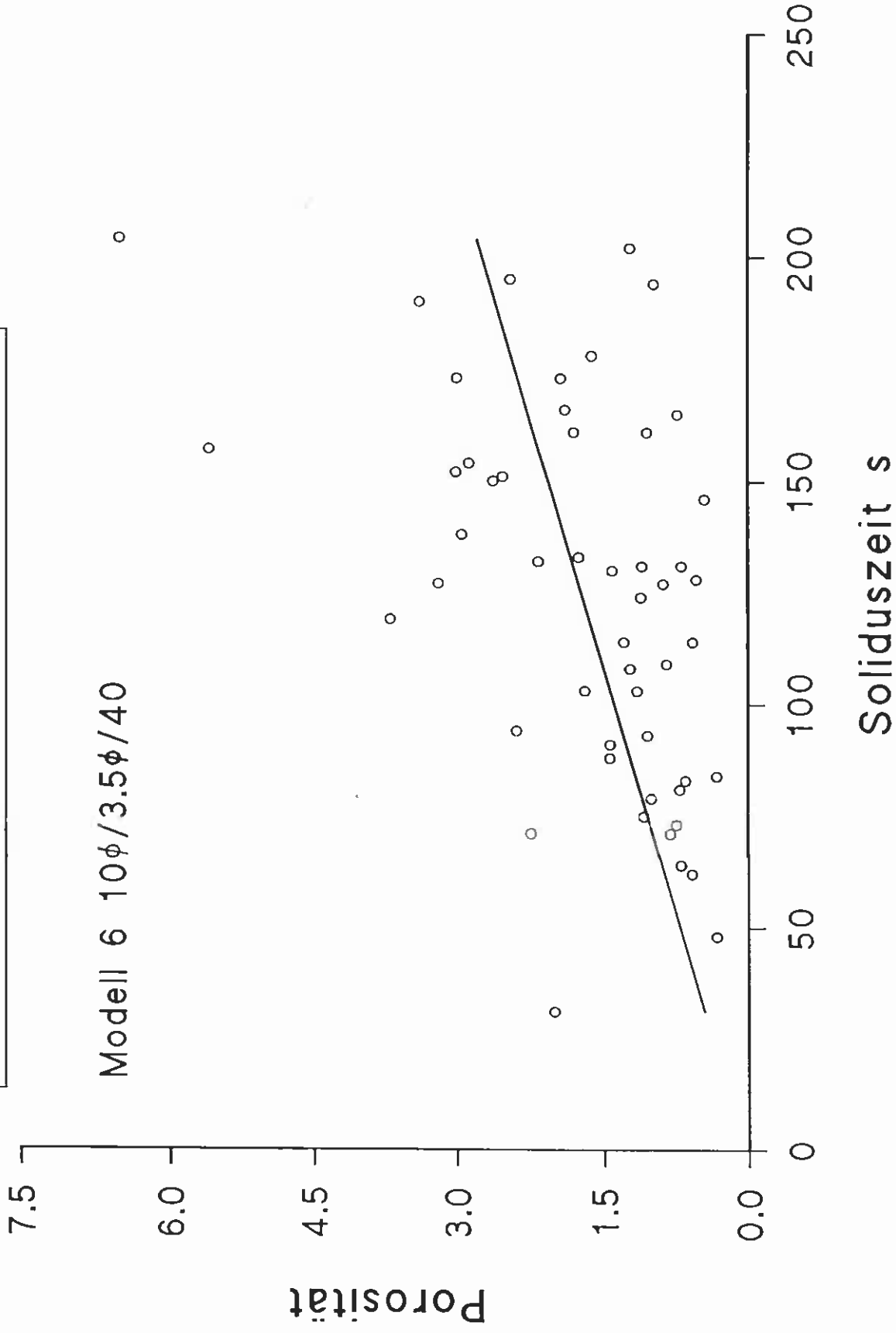


Abb. 108  
Struktur der Legierung  
CuSn10  
80 X

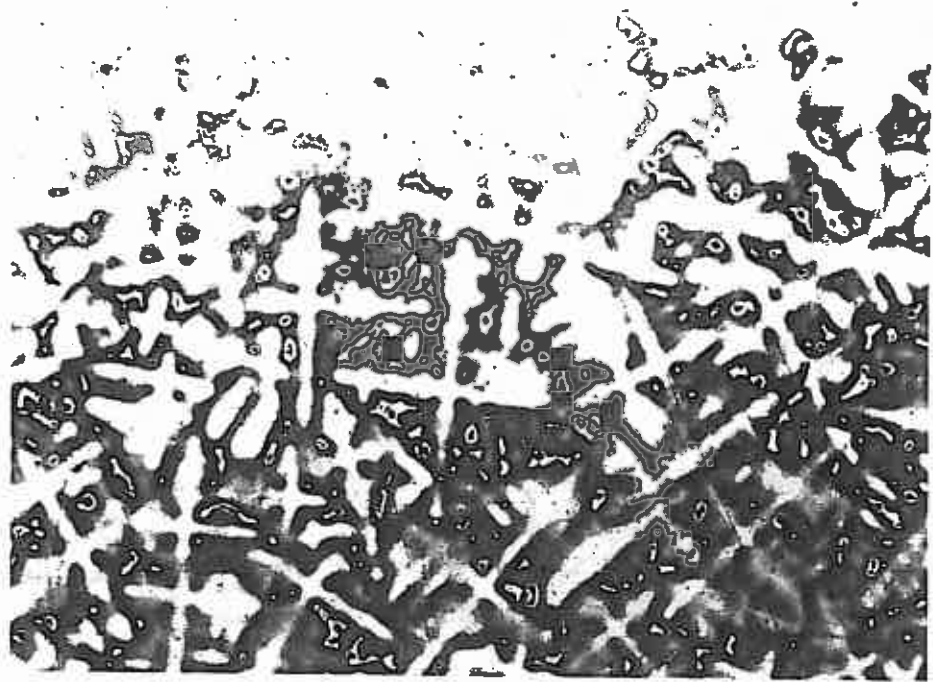


Abb. 109  
Struktur der Legierung  
CuMn5  
80 X

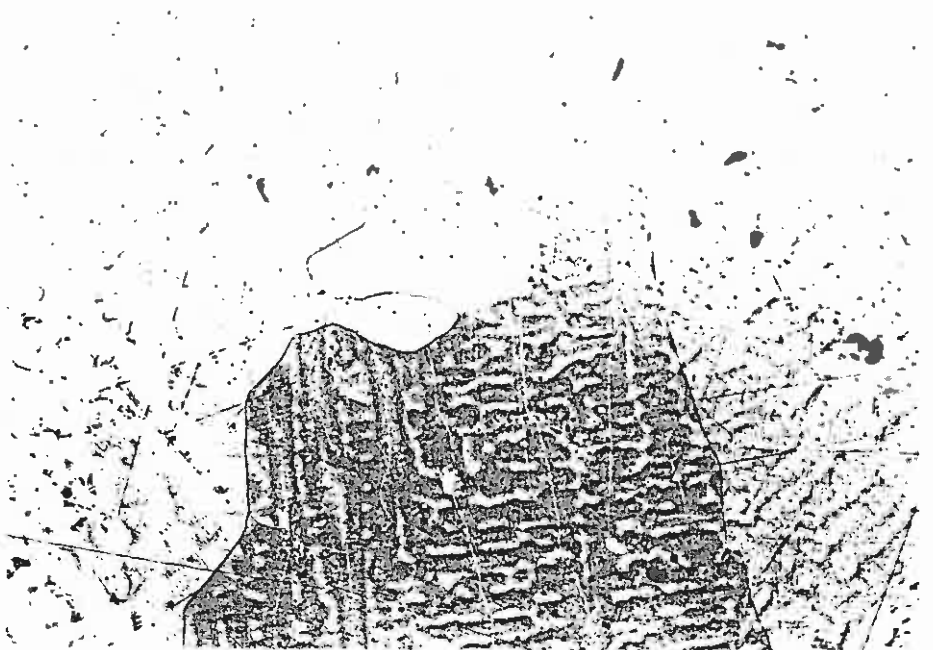


Abb. 110  
Struktur der Legierung  
CuAl7  
80 X

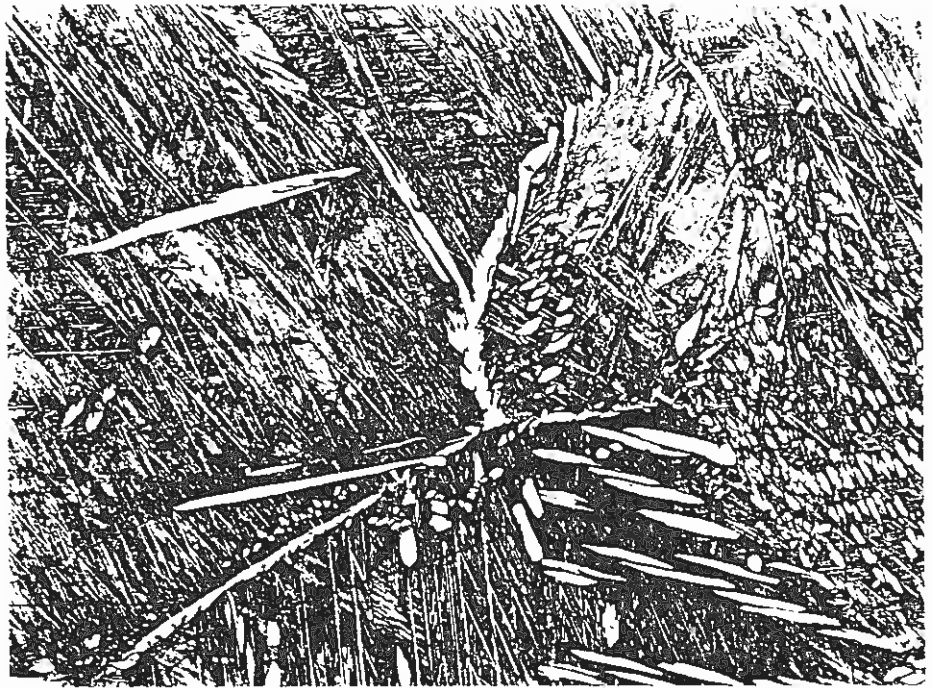


Abb. 111  
Struktur der Legierung  
CuAl8,5  
80 X

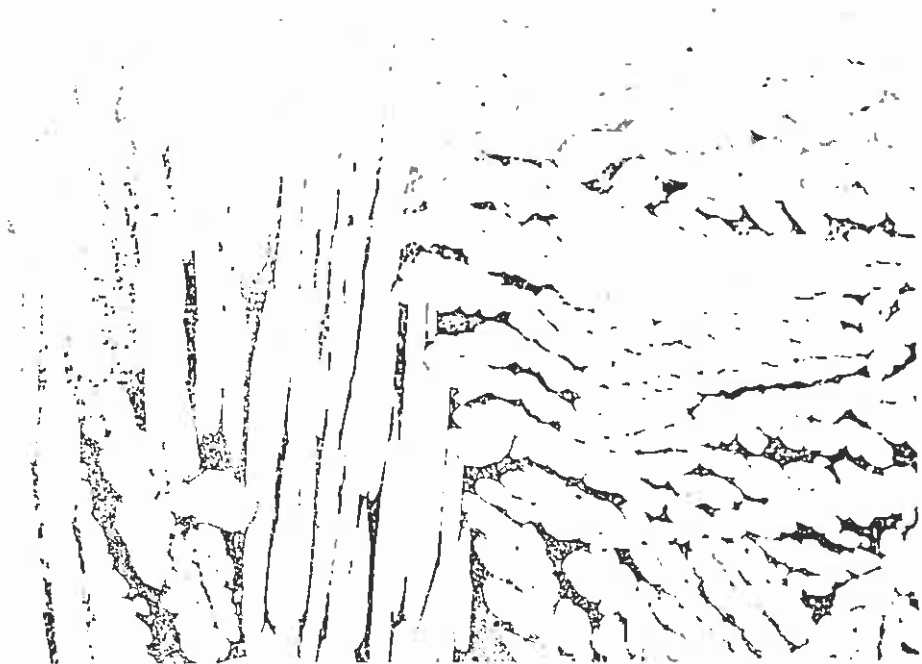


Abb. 112  
Struktur der Legierung  
CuAl11  
80 X

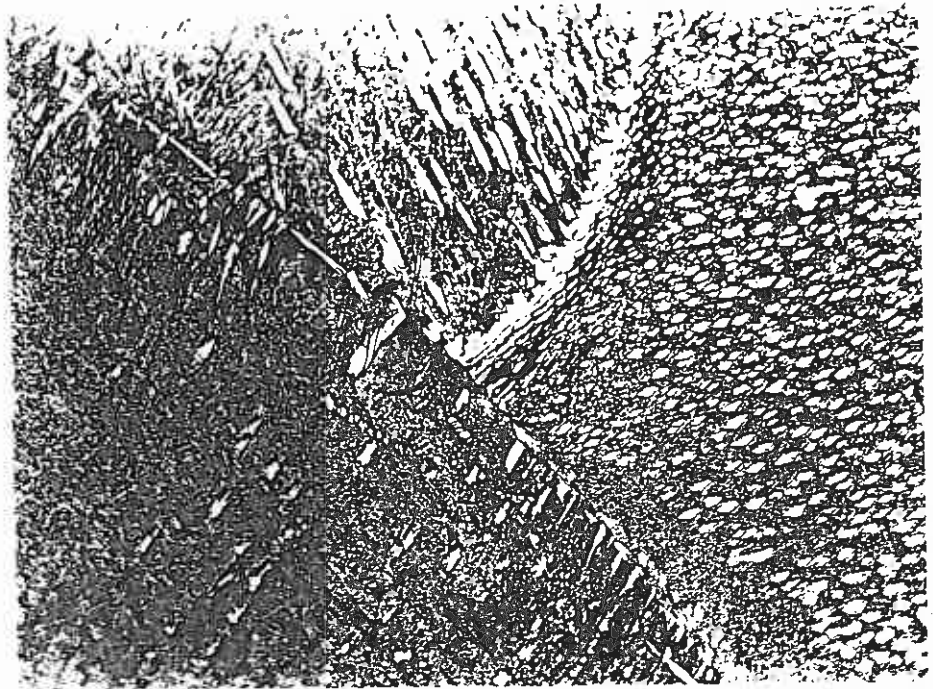


Abb. 113  
Typische Form der  
Porosität bei CuSn10  
7 X

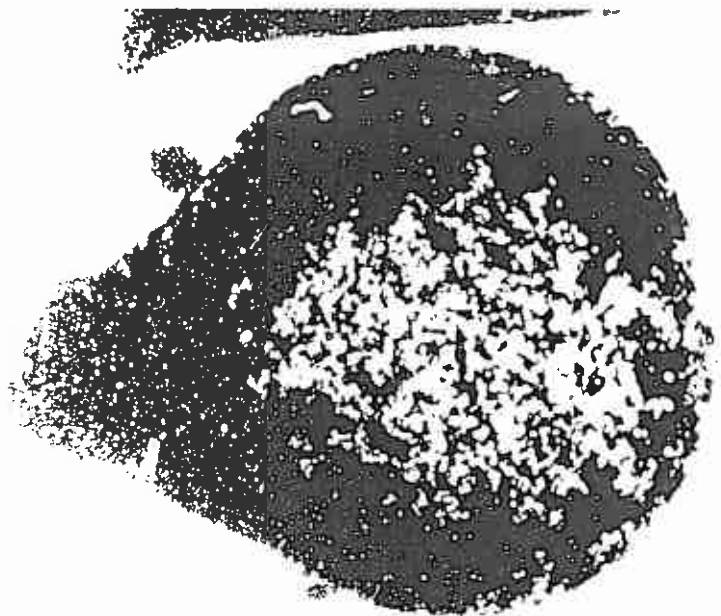


Abb. 114  
Typische Form der  
Porosität bei CuMn5  
7 X



Abb. 115  
Typische Form der  
Porosität bei CuAl5  
7 X

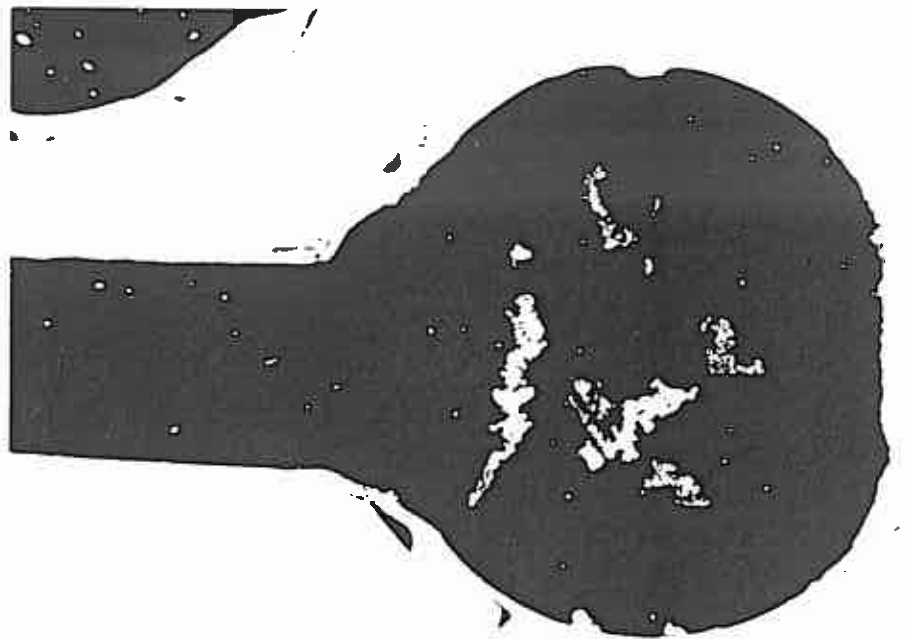


Abb. 118  
Struktur der Porosität  
bei CuSn10  
80 X



Abb. 119  
Struktur der Porosität  
CuMn5  
80 X





## Varianzanalyse zum Einfluß der Legierung auf die Porosität

Legierung		Formtemperatur				Modell				Gießtemperatur				
Legierung	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k
	0,8	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r
	0,2	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m
	-	a	0,3	r	0,3	r	0,3	r	0,3	r	0,3	r	0,3	r
Formtemperatur	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k
	3,0	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r
	-	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m
	-	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a
Modell	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k	-	k
	0,03	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r	0,01	r
	-	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m	0,01	m
	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a	0,1	a
Gießtemperatur	-	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k	0,1	k
	-	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r	0,1	r
	-	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m	0,1	m
	-	a	1,0	a	1,0	a	1,0	a	1,0	a	1,0	a	1,0	a

Vergleich: CuSn10 – CuMn5  
 Meßwert: Porosität  
 [angegeben sind die Irrtums-  
 wahrscheinlichkeiten in %  
 Grenzwert: 5%]

k Kugel, gesamt  
 r Kugelrand  
 m Kugelmitte  
 a Anguß

## Varianzanalyse zum Einfluß der Legierung auf die Porosität

Vergleich: CuSn10 - CuMn5  
 Meßgröße: Mittelwert des  
 maximalen Porendurchmesser  
 [angegeben sind die Irrtums-  
 wahrscheinlichkeiten in %, Grenzwert: 5%]

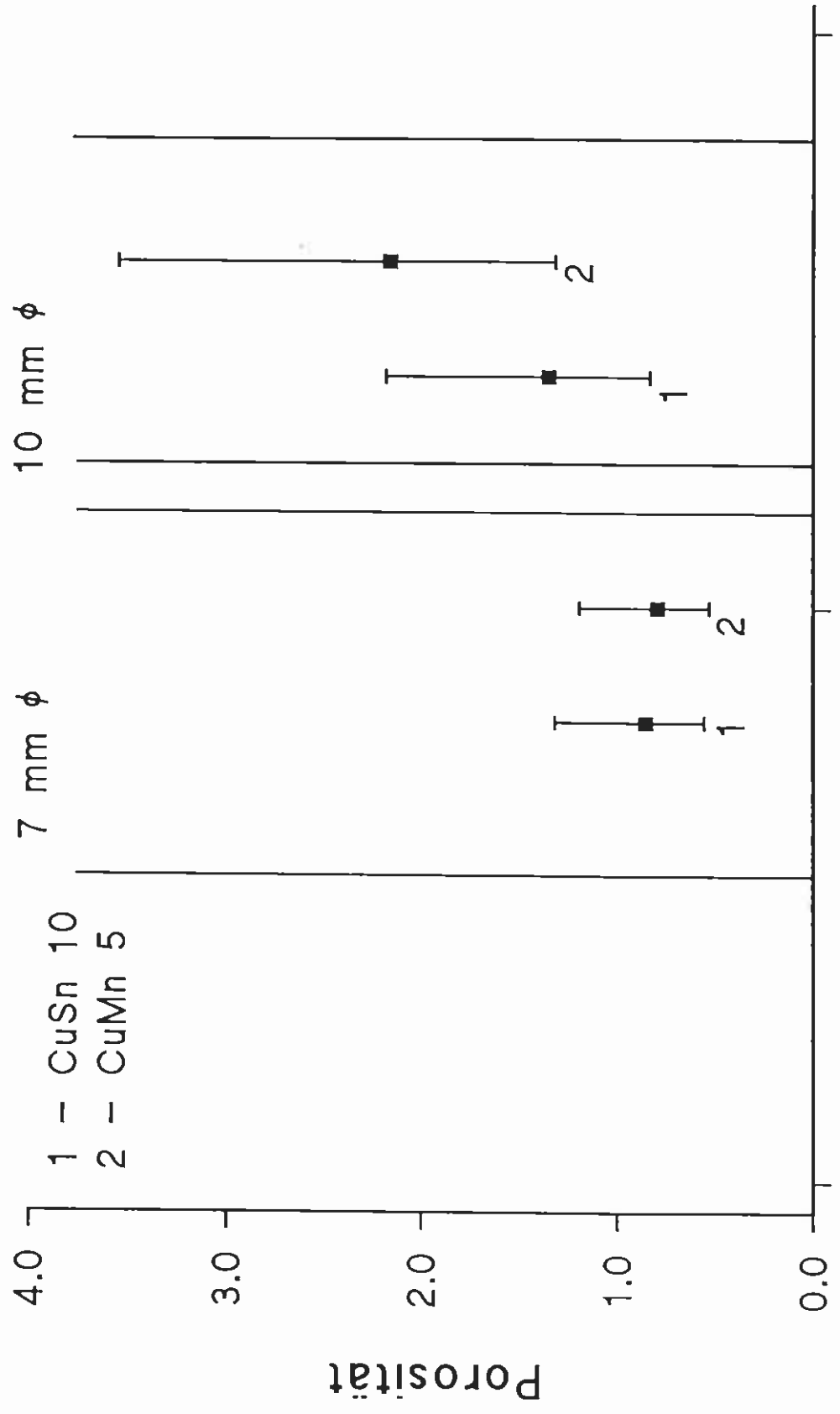
	Legierung				Formtemperatur				Modell				Gießtemperatur				
	k	r	m	a	k	r	m	a	k	r	m	a	k	r	m	a	
Legierung	0,1	0,1	-	0,1	3,0	1,0	-	5,0	-	(6,0)	3,0	0,1	-	-	-	-	-
Formtemperatur									0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Modell													0,1	0,1	0,1	-	-
Gießtemperatur																	

## Varianzanalyse zum Einfluß der Legierung auf die Porosität

Vergleich: CuSn10 – CuMn5  
 Meßgröße: Porenanteil (%)  
 [angegeben sind die Irrtums-  
 wahrscheinlichkeiten in %  
 Grenzwert: 5%]

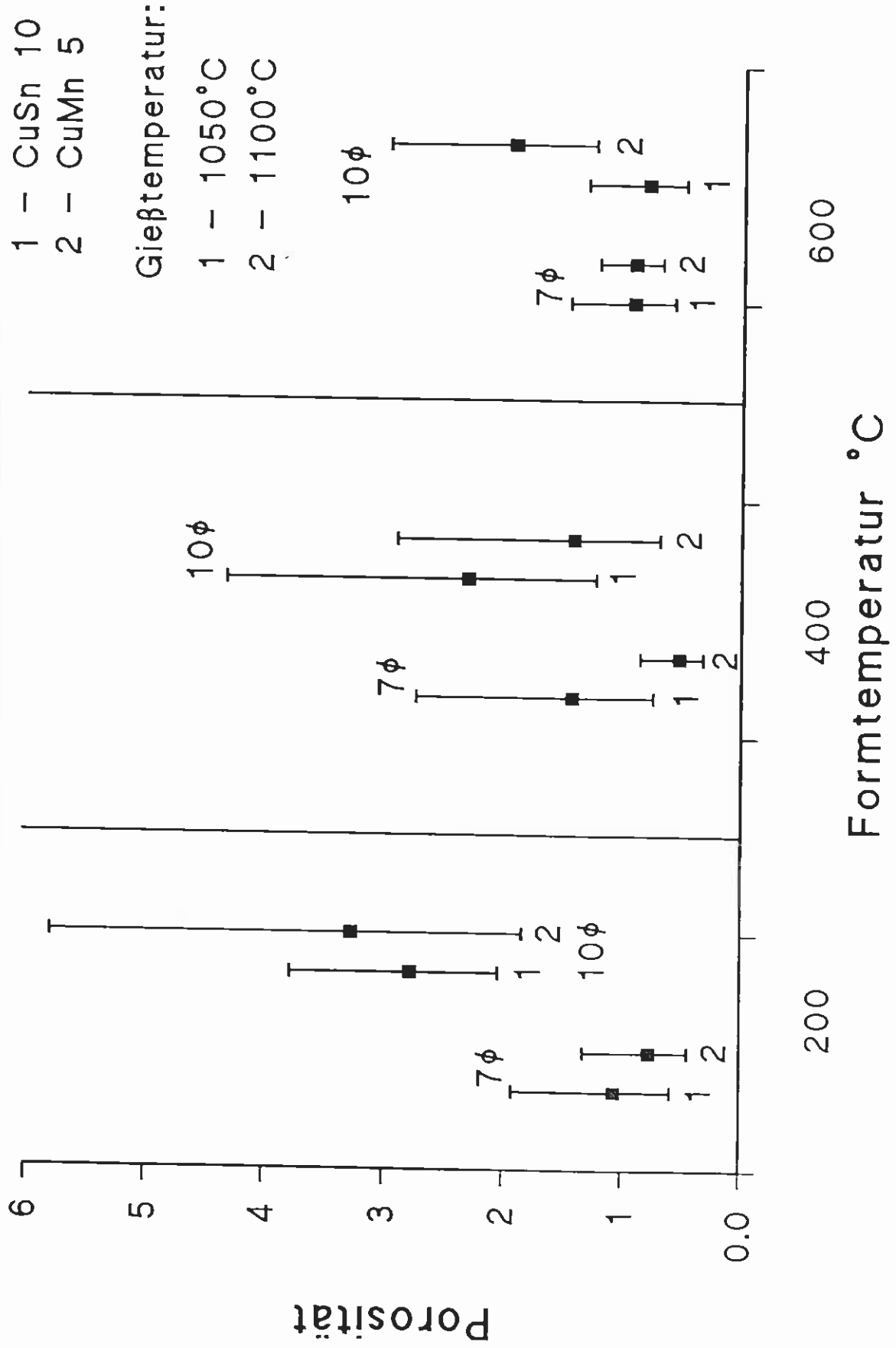
	Legierung	Formtemperatur				k Kugel, gesamt	r Kugelrand	m Kugelmittle	a Anguß
		0,1	0,1	0,1	0,7				
Legierung	1,8	k							
	–	r							
	0,1	m							
	–	a							
Formtemperatur	(6,0)	k	0,1						
	2,0	r	0,1						
	5,0	m	0,1						
	–	a	0,7						
Modell	–	k	–		0,1	k			
	0,1	r	0,5		0,1	r			
	(10,0)	m	–		0,1	m			
	0,1	a	0,1		0,2	a			
Gießtemperatur	–	k	0,1		–	k			
	–	r	0,1		–	r			
	–	m	0,1		–	m			
	4,0	a	0,1		–	a		0,5	

Einfluß der Legierung auf die Porosität  
des Randes (Gesamtwerte)

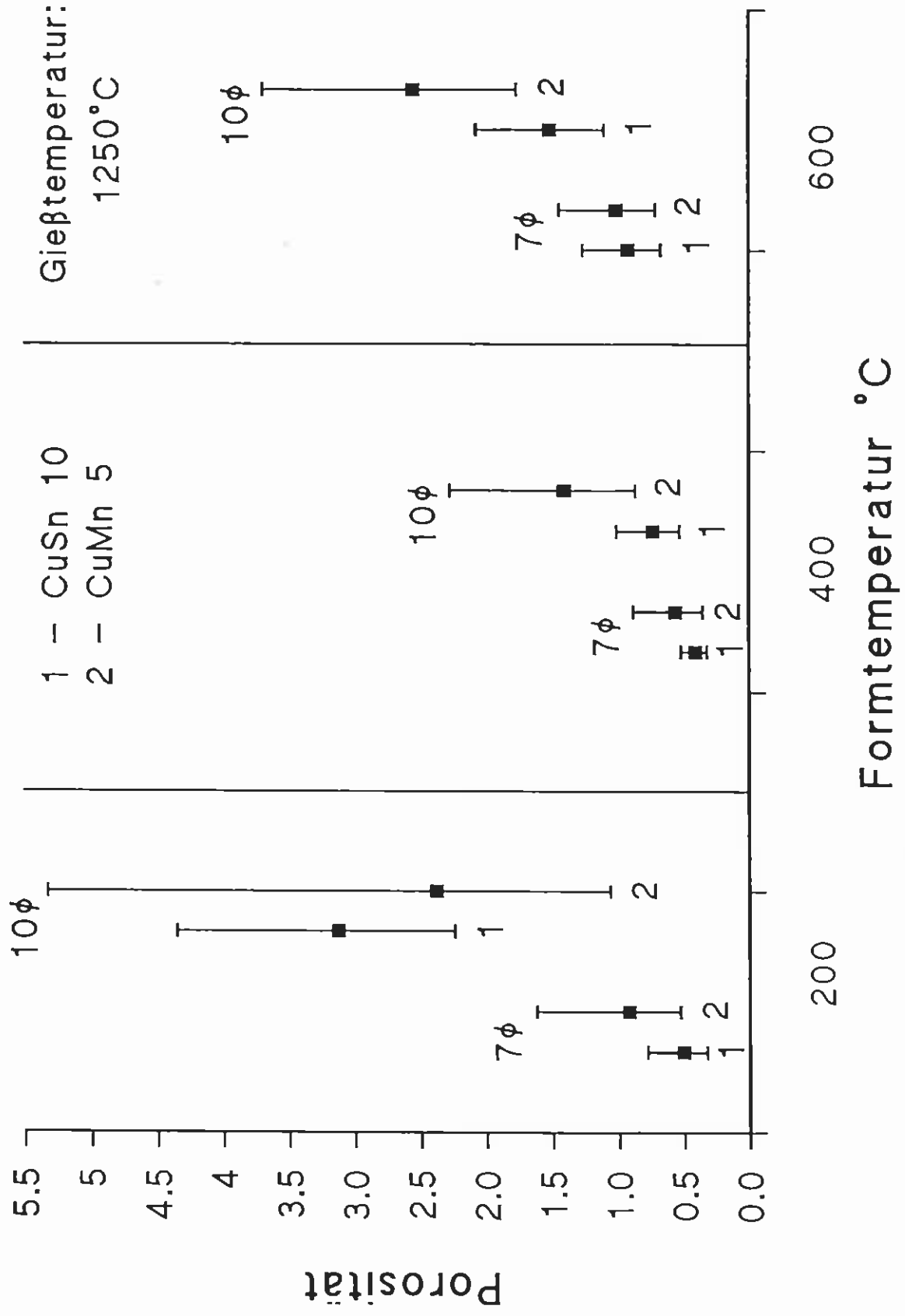


Legierung

Einfluß der Legierung auf die Porosität  
des Randes (niedrige Gießtemperatur)

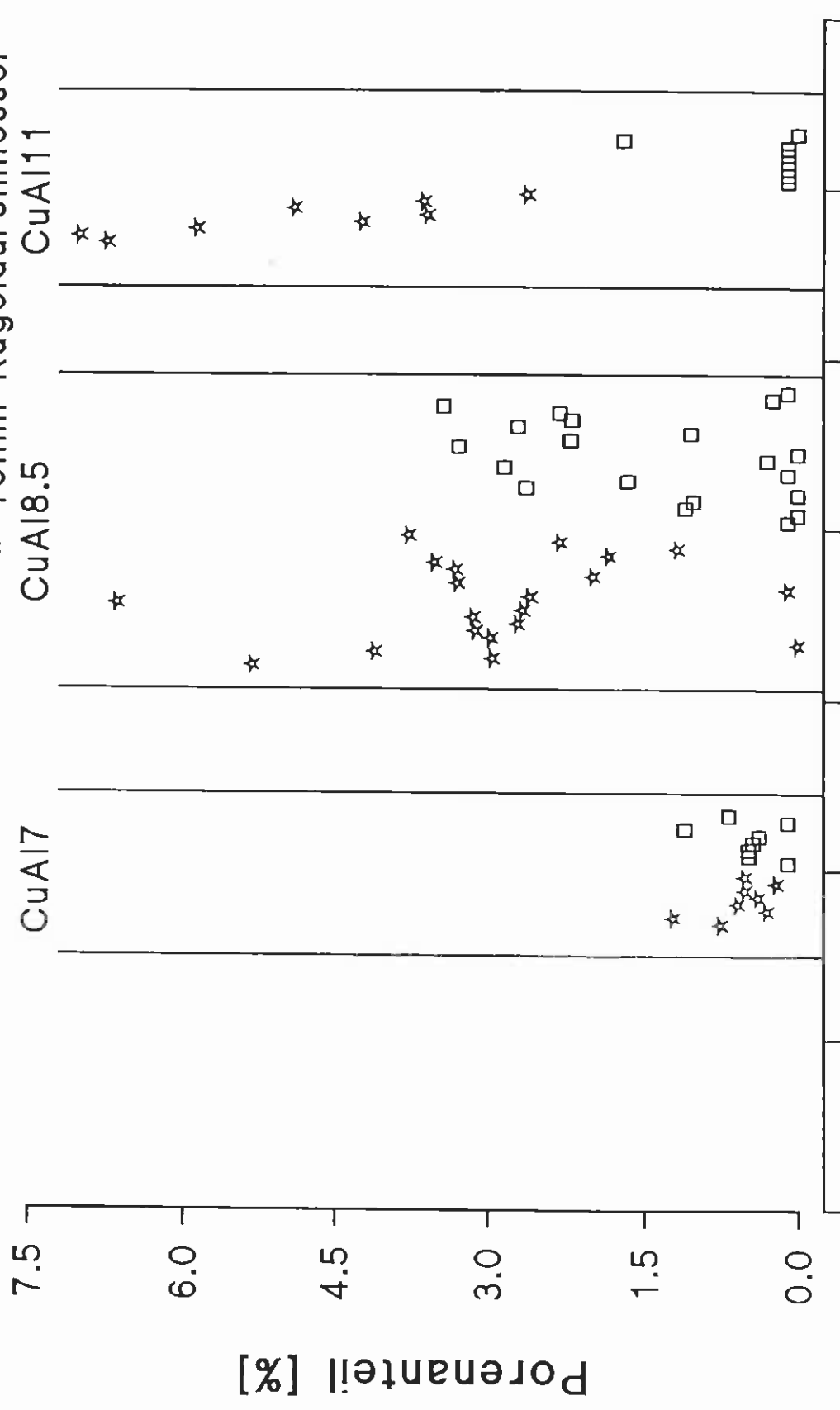


Einfluß der Legierung auf die Porosität  
des Randes (hohe Gießtemperatur)



Einfluß der Legierung auf den relativen Porenanteil (Flächen-%)

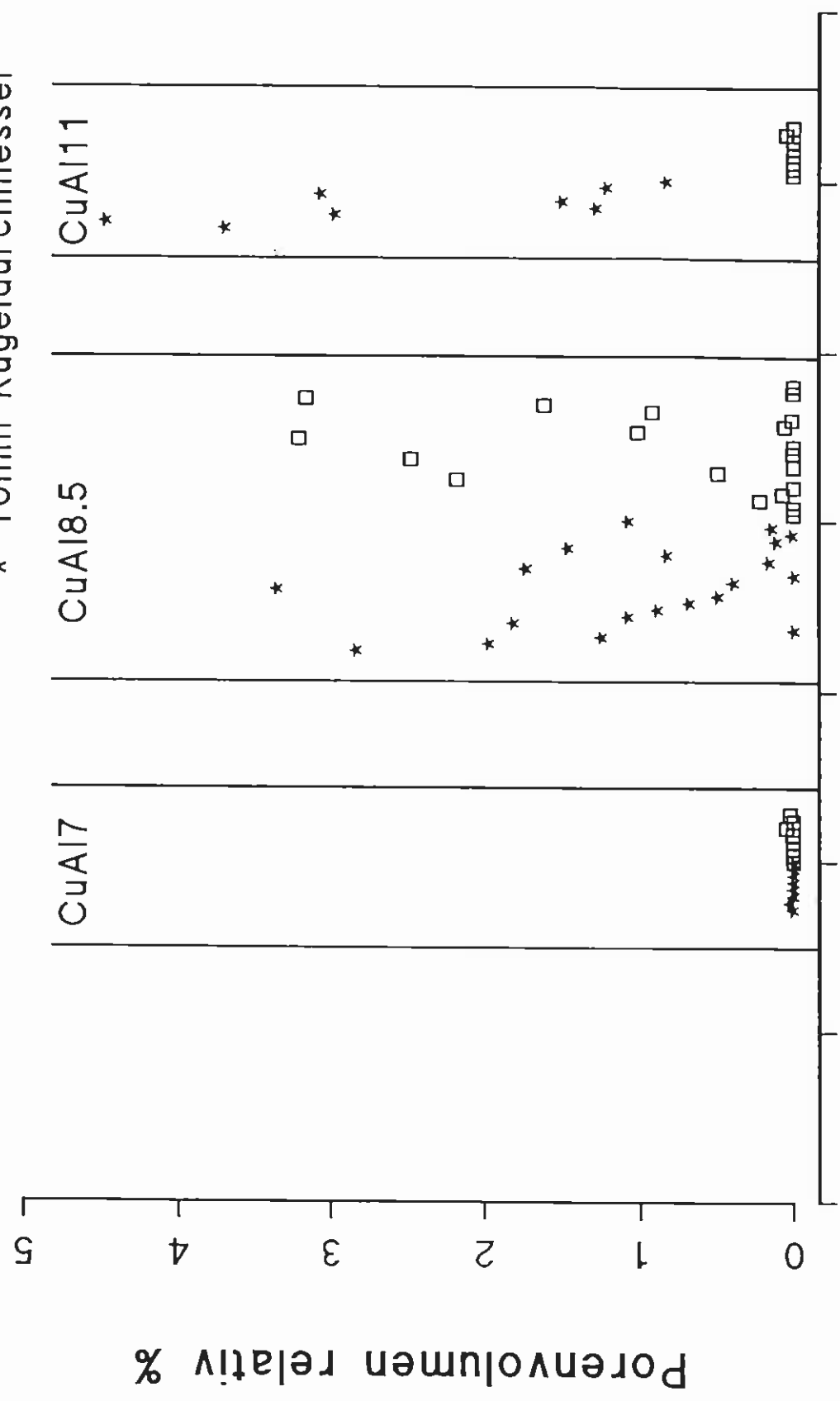
□ 7mm Kugeldurchmesser  
 \* 10mm Kugeldurchmesser  
 CuAl11



Legierung

Einfluß der Legierung auf das relative Porenvolumen

□ 7mm Kugeldurchmesser  
 \* 10mm Kugeldurchmesser



Legierung