

DISSERTATION

Messung der Viskosität von Aluminium
und Aluminiumlegierungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der technischen Wissenschaften von

Dipl. Ing. Alois Schwaiger
A 5771 Leogang 36

Mai 1967

Ich danke Herrn Prof. Dr. F. Lihl für die Betreuung dieser Arbeit und die vielen Anregungen sehr herzlich.

Der Werksleitung der Vereinigte Metallwerke Ranshofen-Berndorf AG, insbesondere dem Leiter der Versuchsanstalt, Herrn Doz. Dr. Dipl. Ing. E. Nachtigall, danke ich für die Ermöglichung und Förderung dieser Arbeit, dem Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Unternehmungen für die finanzielle Unterstützung.

KURZFASSUNG DER DISSERTATION

MESSUNG DER VISKOSITÄT VON ALUMINIUM UND ALUMINIUMLEGIERUNGEN

Zur Messung der Viskosität von Aluminium und Aluminiumlegierungen wurde eine bereits bestehende Versuchsanlage in wesentlichen Teilen ergänzt und verbessert. Das Viskosimeter, welches nach der Schwingtiegelmethode arbeitet, gewährleistet eine Temperaturkonstanz im Tiegel über lange Zeiten und ermöglicht die Bestimmung des logarithmischen Dämpfungsdekrementes mit sehr hoher Genauigkeit, sodaß auch kleine Änderungen der Viskosität mit Sicherheit erfaßt werden können. Als Schutzgas diente hoch gereinigtes Argon mit einem Gehalt an aggressiven Gasen unter 1 ppm, als Eichmetall Zinn.

Die Untersuchungen wurden an Reinstaluminium (Al 99,985) sowie an Aluminium-Silizium-, Aluminium-Kupfer-, Aluminium-Zink- und Aluminium-Magnesium-Legierungen durchgeführt. Bei den Aluminium-Zink- und den Aluminium-Magnesium-Legierungen wurde der gesamte Legierungsbereich erfaßt, während die Untersuchungen im System Aluminium-Silizium mit 23,4 Gew.% Silizium und im System Aluminium-Kupfer mit 39,2 Gew.% Kupfer begrenzt waren.

Aus der Abhängigkeit der Dämpfung von der Temperatur ergaben sich zunächst die Viskosität-Temperatur-Kurven, welche die Grundlage für die Aufstellung der Viskosität-Konzentration-Isothermen bildeten. Diese Kurven ließen klare Zusammenhänge mit dem Zustandsschaubild erkennen. Es konnte festgestellt werden, daß alle Veränderungen im festen Zustand, wie Löslichkeitsgrenzen, eutektische Punkte, Verbindungen und sogar Mischungslücken sich in den Viskosität-Konzentration-Isothermen in ganz charakteristischer Weise äußern.

Besonders interessante Ergebnisse würden bei den Viskositätsmessungen an Reinstaluminium erhalten. In der Viskosität-Temperaturkurve treten bei 775°C und 855°C Unstetigkeiten auf, die aufgrund der Ergebnisse differentialthermischer Messungen als un stetige Änderungen der spezifischen Wärme und somit un stetige Änderungen der Koordinationszahl gedeutet werden können. Durch diese Untersuchungen sind somit erstmalig Umwandlungen im flüssigen Zustand eindeutig nachgewiesen worden, die zu polymorphen Umwandlungen im festen Zustand in Analogie zu setzen sind.

Die genannten Unstetigkeiten in den Viskosität-Temperatur-Kurven konnten auch bei den aluminiumreichen Legierungen der binären Systeme Aluminium-Silizium, Aluminium-Kupfer und Aluminium-Magnesium beobachtet werden. Für das System Aluminium-Zink können deshalb keine diesbezüglichen Aussagen gemacht werden, da der untersuchte Temperaturbereich, bedingt durch den hohen Dampfdruck des Zinks mit 750°C begrenzt werden mußte. Die Unstetigkeiten, die beim Erreichen einer vom Zusatzelement abhängigen Zusammensetzung verschwinden, sind eine Eigenschaft des Aluminiums. Die Stufenhöhe ändert sich in allen Fällen mit der Höhe des Legierungszusatzes. Ferner ist auch die Lage der Unstetigkeitsstellen von der Konzentration abhängig. Im System Aluminium-Silizium konnte die Verschiebung der Stufen und die Änderung der Stufenhöhe im Einklang mit dem Zustandsschaubild festgestellt werden.

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|--|-------|
| Einleitung | 1 |
| 1. Meßverfahren | 2 |
| 1.1 Aufbau der Apparatur zur Bestimmung der Viskosität von Aluminiumschmelzen | 3 |
| 1.11 Schmelzofen und Schwingsystem | 4 |
| 1.12 Schutzgasreinigung | 5 |
| 1.13 Elektrische Einrichtungen | 6 |
| 1.14 Einrichtungen zur Dekrementmessung | 7 |
| 1.2 Eichung des Viskosimeters | 8 |
| 1.21 Temperaturmessung | 8 |
| 1.22 Nulldekrement | 9 |
| 1.23 Zinneichung | 10 |
| 1.3 Herstellung der Proben | 11 |
| 1.31 Reinstaluminium | 11 |
| 1.32 AlSi-Legierungen | 11 |
| 1.33 AlCu- und AlZn-Legierungen | 12 |
| 1.34 AlMg-Legierungen | 12 |
| 1.4 Analyse der Proben | 12 |
| 1.41 Probennahme | 12 |
| 1.42 Reinstaluminium | 12 |
| 1.43 AlSi-Legierungen | 13 |
| 1.44 AlCu-Legierungen | 13 |
| 1.45 AlZn-Legierungen | 13 |
| 1.46 AlMg-Legierungen | 13 |
| 1.5 Bemessung des Einsatzgewichtes | 13 |
| 1.51 Dichte und Liquidustemperaturen | 14 |
| 1.511 Reinstaluminium | 14 |
| 1.512 AlSi-Legierungen | 14 |
| 1.513 AlCu-Legierungen | 14 |
| 1.514 AlZn-Legierungen | 15 |
| 1.515 AlMg-Legierungen | 16 |
| 1.6 Versuchsdurchführung | 16 |
| 2. Schrifttum über die Viskosität von Aluminiumlegierungen | 18 |
| 2.1 Reinstaluminium und AlSi-Legierungen | 18 |

| | Seite |
|---|-------|
| 2.2 AlCu-Legierungen | 19 |
| 2.3 AlZn-Legierungen | 20 |
| 2.4 AlMg-Legierungen | 20 |
| 3. Versuchsergebnisse | 22 |
| 3.1 Reinstaluminium | 22 |
| 3.2 AlSi-Legierungen | 25 |
| 3.3 AlCu-Legierungen | 30 |
| 3.4 AlZn-Legierungen | 34 |
| 3.5 AlMg-Legierungen | 38 |
| 4. Diskussion der Versuchsergebnisse | 42 |
| 4.1 Unstetige Temperaturabhängigkeit der Viskosität | 42 |
| 4.11 Reinstaluminium | 42 |
| 4.12 Aluminiumlegierungen | 43 |
| 4.2 Differential-thermoanalytische Untersuchungen | 44 |
| 4.3 Zusammenhang zwischen Viskosität und Zustands- schaubild | 46 |
| 4.31 Maximale Löslichkeit | 46 |
| 4.32 Eutektische Konzentration | 47 |
| 4.33 Intermetallische Verbindungen | 47 |
| 4.34 Mischungslücke im festen Zustand | 48 |
| 5. Zusammenfassung | 49 |
| 6. Literaturnachweis | 50 |
| 7. Tabellen | 53 |

EINLEITUNG

Der Aufbau von Metallschmelzen war in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Arbeiten. Einerseits wurde die Änderung verschiedener physikalischer Eigenschaften, wie der elektrischen Leitfähigkeit, der magnetischen Suszeptibilität, beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand untersucht. Ferner gibt es auch einige Arbeiten, welche die Erfassung des Ordnungszustandes in Schmelzen zum Gegenstand haben und schließlich liegen auch zahlreiche Arbeiten über die Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten der inneren Reibung vor. Im letzten Fall interessiert vor allem die Frage, in welcher Weise die Viskosität einer Metallschmelze durch Zulegen verschiedener Elemente beeinflusst wird und inwiefern sich die nach der Erstarrung der Legierung sich ausbildenden Gefügestände bereits im schmelzflüssigen Zustand äußern. Die Ergebnisse der in dieser Richtung von verschiedenen Forschern durchgeführten Viskositätsmessungen sind jedoch nicht in allen Punkten widerspruchsfrei.

Im Anschluß an frühere Untersuchungen, die nur die Wirkung geringer Zusätze von Eisen und Titan auf die Viskosität des Aluminiums betrafen, wurde daher der gesamte Fragenkomplex einer neuerlichen Bearbeitung unterzogen. Als Basismetall diente wieder Reinstaluminium, als Legierungspartner Silizium, Kupfer, Zink und Magnesium. Die gewählten Legierungselemente haben im Aluminium sehr unterschiedliche Löslichkeit; ferner treten in diesen Systemen Eutektika und metallische Verbindungen auf.

Ob und in welcher Weise sich der Gefügebau im festen Zustand bereits in der Schmelze in den Viskosität-Konzentration-Isothermen abzeichnet, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Außerdem erwies es sich im Laufe der Untersuchungen als notwendig, auch die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Reinstaluminiums einer genaueren Untersuchung zu unterziehen.

1. MESSVERFAHREN

Der Koeffizient der inneren Reibung η , auch Viskosität oder Zähigkeit genannt, ist durch die Newtonsche Gleichung

$$K = \eta \cdot F \cdot \frac{dV}{dz}$$

definiert und hat die Dimension ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

Die Einheit der Viskosität ist 1 Poise (P).

Während für niedrige Temperaturen die Ausflußmethode oder die Kugelfallmethode Anwendung finden, ist für aggressive und leicht oxidierbare Metallschmelzen die Methode des schwingenden, mit der Versuchsschmelze gefüllten Tiegels am zweckmäßigsten. Der frei an einem Draht aufgehängte Tiegel erfährt dabei zufolge der inneren Reibung der Schmelze eine Dämpfung.

In zahlreichen Arbeiten (1, bis 7) wird die Eignung dieser Relativmethode untersucht und als am besten geeignet für die besonderen Gegebenheiten des Aluminiums bestätigt. Die Apparatur wird dabei mit Metallen geeicht, deren Viskosität aus Absolutverfahren bekannt ist. Die Bestimmung der Viskosität einer Schmelze erfordert dann nur eine genaue Dekrementbestimmung des schwingenden Tiegels.

Diese Methode wurde in jüngerer Zeit von A. Knappwost (8) und von E. Gebhardt und M. Becker (9) entwickelt.

Nach (9) ergibt sich die Viskosität gemäß

$$\eta = \frac{(\lambda - \lambda_0)^2 \cdot \rho_t}{K^2 \cdot \rho_{ts}^2 \cdot \tau}$$

Darin bedeuten:

λ logarithmisches Dekrement des schmelzegefüllten Tiegels

λ_0 logarithmisches Dekrement des leeren Tiegels

K Eichkonstante

ρ_t Dichte der Metallschmelze bei Versuchstemperatur

ρ_{ts} Dichte der Metallschmelze beim Schmelzpunkt

τ Schwingungsdauer

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Gleichung ist ein kleiner Verhältniswert von Tiegelradius zu Füllhöhe.

Das logarithmische Dekrement ist definiert als der natürliche Logarithmus des Quotienten zweier aufeinanderfolgender Amplituden des schwingenden Systems. Da zur Bestimmung der Amplituden zuerst die Nullage berechnet werden muß, ist dieses Verfahren sehr aufwendig. Daher wurde eine andere Methode herangezogen, die auf der Bestimmung der gleichseitigen Umkehrpunkte A_n beruht. Nach F. Kohlrausch (10) gilt dann für das logarithmische Dekrement:

$$\lambda = \frac{1}{n-1} \cdot \ln \frac{A_1 - A_n}{A_n - A_{2n-1}}$$

Die Schwingungszahl n wird je nach Größe der Dämpfung gewählt. Der Ausgangsschlag A_1 braucht dabei wegen der Linearität der Dämpfung nicht konstant zu sein.

1.1 AUFBAU DER APPARATUR ZUR BESTIMMUNG DER VISKOSITÄT VON ALUMINIUMSCHMELZEN

Für die vorliegenden Untersuchungen konnte eine auf der Schwingtiegel-Methode beruhende Apparatur übernommen werden, die schon für die Durchführung der früheren Untersuchungen (11) diente. Da jedoch mit dieser Anlage mehrere Jahre nicht mehr gearbeitet worden war, mußte sie weitgehend erneuert und ergänzt werden.

Das Viskosimeter besteht aus folgenden Teilen:

Schmelzofen mit vakuumdicht eingebautem Schwingsystem

Schutzgasreinigung und Vakuumpumpe

Elektrische Einrichtungen des Schmelzofens und der Gasreinigung

Einrichtung zur Dekrementmessung

1.11 Schmelzofen und Schwingsystem

Der Schmelzofen und das vakuumdicht eingebaute Schwingsystem konnten zur Gänze übernommen werden. Es wurden keine konstruktiven Veränderungen vorgenommen, sondern nur die Dichtungsflächen neu bearbeitet, die Vakuumausführung zur Verringerung des Saugwiderstandes vergrößert und einige abgenutzte Teile erneuert. In Bild 1 links ist der für eine Grenztemperatur von 1000°C geeignete Schmelzofen mit Einbau zu sehen. Das Schwingsystem besteht aus einem Sinterkorundtiegel in einer Halterung, ferner Spiegel und Torsionsdraht. Die Schwingungsanregung erfolgt durch zwei gegenläufig geschaltete Elektromotore (siehe Bild 4 oben).

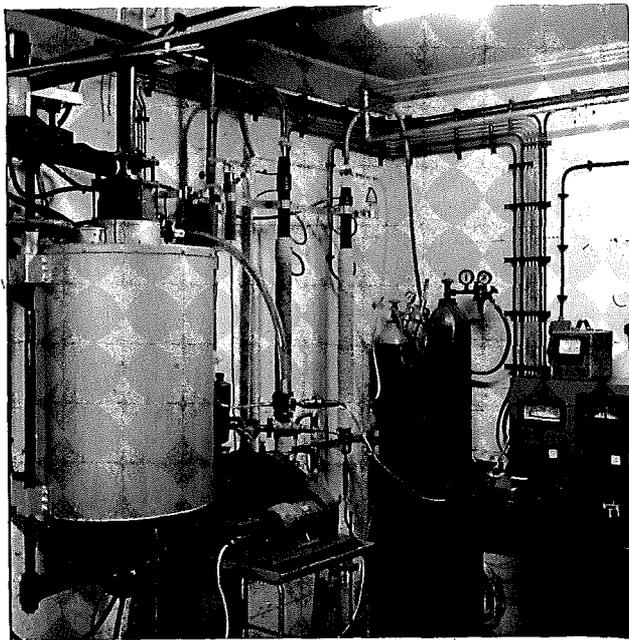


Bild 1:
Gesamtansicht der
Versuchseinrichtung

1.12 Schutzgasreinigung

Als Schutzgas wurde Argon gewählt. Da dieses Gas nur in einem Reinheitsgrad von 99,95 % (Schweißargon) zur Verfügung stand, mußte eine weitere Feinreinigung erfolgen. Dazu wurde eine Gasreinigungsanlage nach H.R. Kirchmayr (12) gebaut (siehe Bild 2).

Das Flaschenargon wird über ein Reduzierventil und einen Blasenähler durch einen Kupferkatalysator (BTS-Katalysator) geleitet, der sich in einem röhrenförmigen, auf einer Temperatur von 150°C gehaltenen Ofen befindet. Der mit Wasserstoff reduzierte Katalysator entfernt dabei die im Argon vorhandenen Sauerstoffreste. Über ein mit Silikagel gefülltes Trockenrohr gelangt das Gas zur Entfernung des Stickstoffes in einen Magnesiumspäne enthaltenden Ofen. Die Reaktion des Magnesiums mit Stickstoff erfolgt bei ungefähr 600°C . Mit Hilfe dieser Einrichtung können die Sauerstoff- und Stickstoff-Verunreinigungen auf weniger als 1 ppm gesenkt werden.

Zur Evakuierung diente eine zweistufige Ölrotationspumpe von Leybold mit einem Ventilblock und Vakuummeßgerät (Thermotron). Das erzielte Vakuum war besser als 10^{-2} Torr.

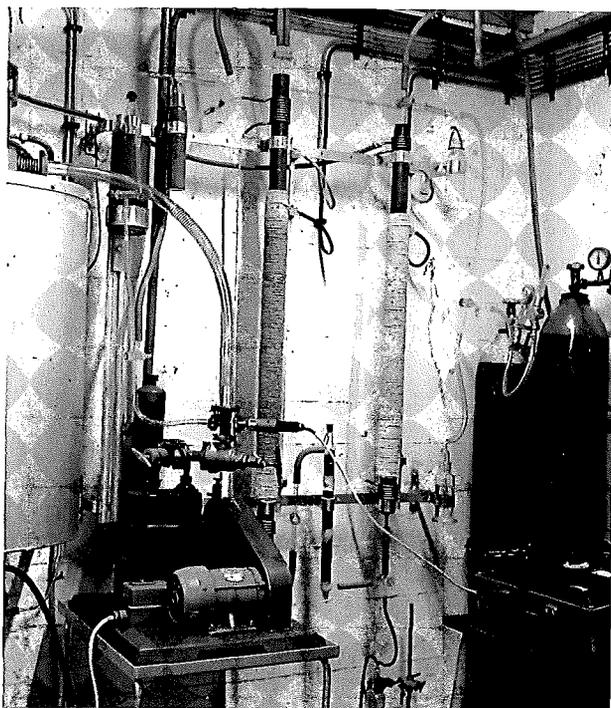


Bild 2:
Gasreinigung

1.13 Elektrische Einrichtungen des Schmelzofens und der Gasreinigung

Der Schmelzofen hat eine Leistung von 7 kW und kann wahlweise bei 220 V oder 380 V betrieben werden. Die Leistung der beiden Öfen für die Gasreinigung beträgt 0,6 und 0,8 kW bei 220 V.

Die mit Thermoelementen gesteuerten Ofenregler, die Schalter und die Kontrolllampen wurden in einen gemeinsamen Schaltkasten eingebaut (Bild 3). Die Temperatur der Versuchsschmelze kann über ein unterhalb des Tiegels im Schmelzofen angebrachtes Thermoelement mit Hilfe eines Thermokompensators gemessen werden (Bild 3 links vorne).

Außerdem kann mit einem Kompensationsschreiber gleichzeitig der Temperaturverlauf an mehreren Meßstellen im Ofen verfolgt werden (Bild 3 rechts). In Bild 3 sind noch das Thermotron, auf dem Tisch das Schaltkästchen für die Steuerung der Motoren des Schwingsystems sowie rechts die Stromschienenverteilieranlage, die im Zusammenhang mit der übrigen elektrischen Anlage neu erstellt wurde, zu sehen.

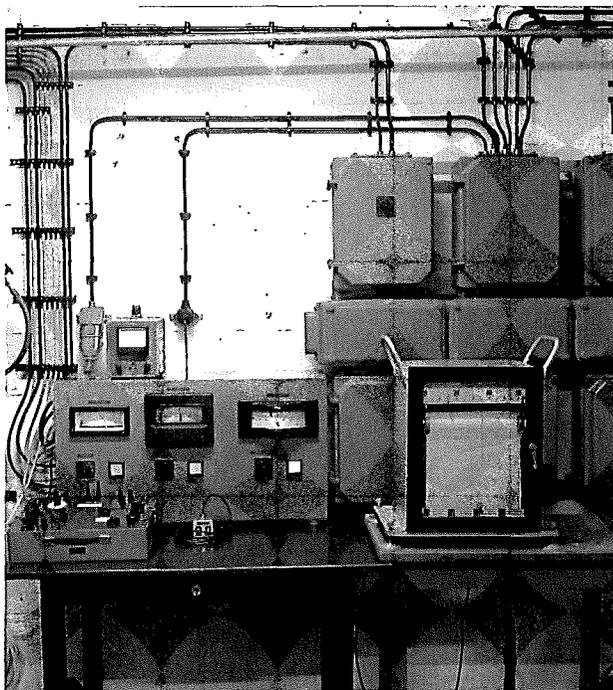


Bild 3:
Stromversorgung
und Steuerung

1.14 Einrichtung zur Dekrementmessung

Für die Dekrementmessung wurde ein Lichtspalt mit einer geeigneten Optik (siehe Bild 4 links) auf den Spiegel des Schwingsystems projiziert und nach Reflexion auf einer 150 cm langen Rundskala (Radius 258 cm) beobachtet. Mit dieser Anordnung ist es möglich, die durch die Dämpfung der Metallschmelze bewirkte Abnahme der Amplituden der Tiegelschwingung auf der Skala mit sehr hoher Genauigkeit abzulesen.

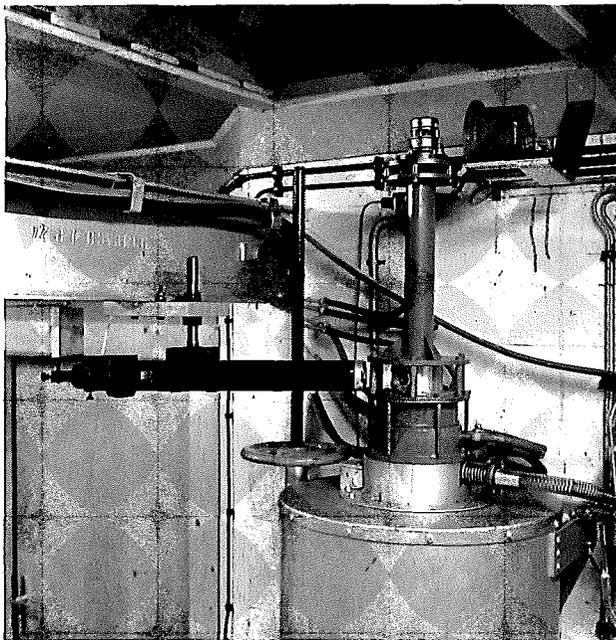


Bild 4:
Einrichtung zur
Dekrementmessung

1.2 EICHUNG DES VISKOSIMETERS

1.21 Temperaturmessung

Da die Viskosität einer Metallschmelze stark temperaturabhängig ist, stellt die Kenntnis der Temperatur der Schmelze zum Zeitpunkt der Messung einen wesentlichen Faktor dar. Außerdem gilt es zu untersuchen, nach welcher Zeit in der Schmelze nach Übergang von einer auf eine andere Temperatur eine Temperaturkonstanz eintritt.

Der Tiegel mit der Versuchsschmelze ist in der Mitte des Viskosimeters an einem Torsionsdraht frei aufgehängt. Bei dieser Anordnung ist es nun kaum möglich, ein Thermoelement zur Messung der Temperatur ohne eine empfindliche Störung der Torsionsschwingung durch die Thermoelementdrähte in die Schmelze einzuführen. Man ist deshalb auf eine Temperaturmessung knapp unterhalb des Schwingtiegels angewiesen. Zu diesem Zweck wurde ein Ni-NiCr Thermoelement von unten vakuumdicht bis etwa 5 cm unterhalb des Tiegels eingeführt. Auf Grund des unvermeidbaren axialen Temperaturgefälles im Ofeninneren besteht natürlich eine Temperaturdifferenz zwischen diesem Meßthermoelement und der Schmelze, die außerdem - wie die Versuche zeigten - eine Funktion der Regeltemperatur ist. Zur Feststellung dieser Temperaturdifferenz diente ein in die Schmelze des ruhenden Tiegels eingeführtes Thermoelement, mit dessen Hilfe nach Erreichen der Temperaturkonstanz (bei Regelschritten von 50° C nach 100 Min.) die Temperaturdifferenz zwischen Schmelze und Meßstelle unterhalb des Tiegels im Temperaturbereich von 500° bis 900° C bestimmt werden konnte.

Das Ergebnis dieser Messungen ist in Kurve 1 des Bildes 5 zusammengefaßt. Man erkennt daraus, daß bedingt durch die Wärmeträgheit des Ofens ein Unterschied zwischen Erhitzen (durchgezogene Kurve) und Abkühlen (strichlierte Kurve) besteht. Eine zusätzliche Kontrolle kann durch Messung der Temperaturdifferenz zwischen Regeltemperatur und der Temperatur der Schmelze erreicht werden. Die Temperaturabhängigkeit dieser Differenz ist in den Kurven 2 des Bildes 5 dargestellt. Die Erhitzungs- und Abkühlungskurven liegen annähernd zueinander parallel. Daß die Temperatur der Schmelze höher liegt als die Regeltemperatur ist darin begründet, daß das Regelthermoelement nicht genau an der heißesten Stelle des Ofens angebracht ist.

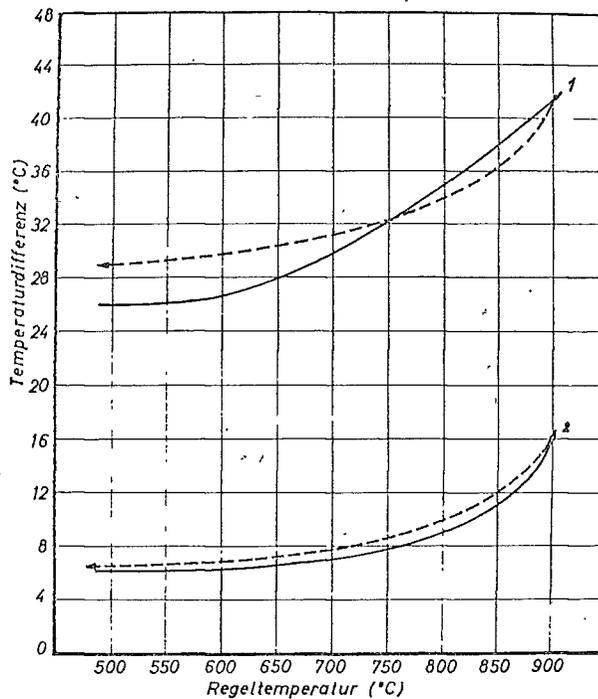


Bild 5:

Eichkurven zur Bestimmung der Temperatur der Versuchsschmelze

— Erhitzung
- - - Abkühlung

Die Thermospannungen der Thermoelemente in der Schmelze und unterhalb des Tiegels sowie des Regelthermoelementes in der Heizwicklung des Ofens wurden bei diesen Versuchen mit einem Kompensation-Punktschreiber gleichzeitig aufgezeichnet. Auf diese Weise war es auch möglich, visuell die Erreichung der Temperaturkonstanz nach Erhöhung oder Senkung der Regeltemperatur festzustellen.

Der Fehler bei der Temperaturmessung mit Hilfe dieser Eichung beträgt weniger als $\pm 0,5\%$. Bei der Abkühlung ist der Fehler kleiner; er beträgt $\pm 2^\circ\text{C}$ unter 800°C . Es empfiehlt sich daher, die Viskosität mit sinkender Temperatur zu messen. Die axiale Temperaturverteilung in der Versuchssubstanz wurde gesondert gemessen. Es ergaben sich dabei maximale Temperaturunterschiede von weniger als $1,5^\circ\text{C}$.

1.22 Nulldekrement

Da neben der inneren Reibung des Torsionsdrahtes auch die mit der Temperatur

ansteigende Gasreibung auf das System dämpfend wirkt; hängt das Nulldekrement von der Temperatur ab (Bild 6 und Tabelle 1).

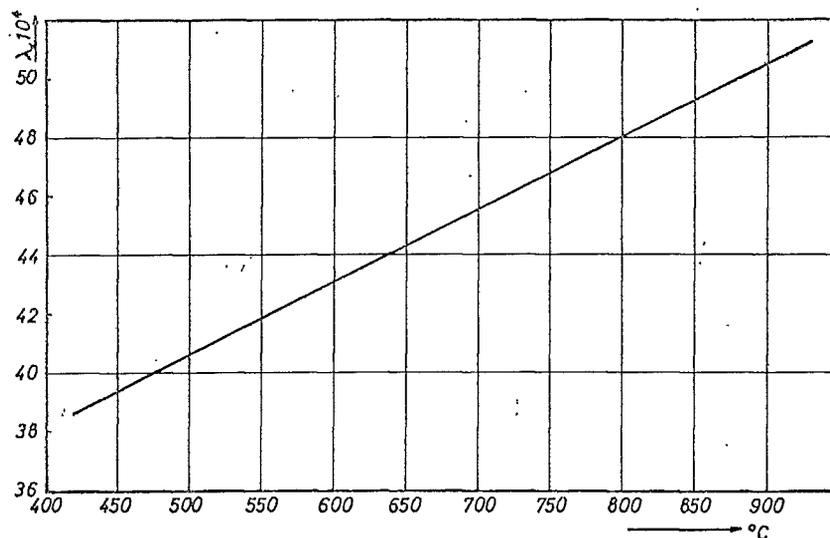


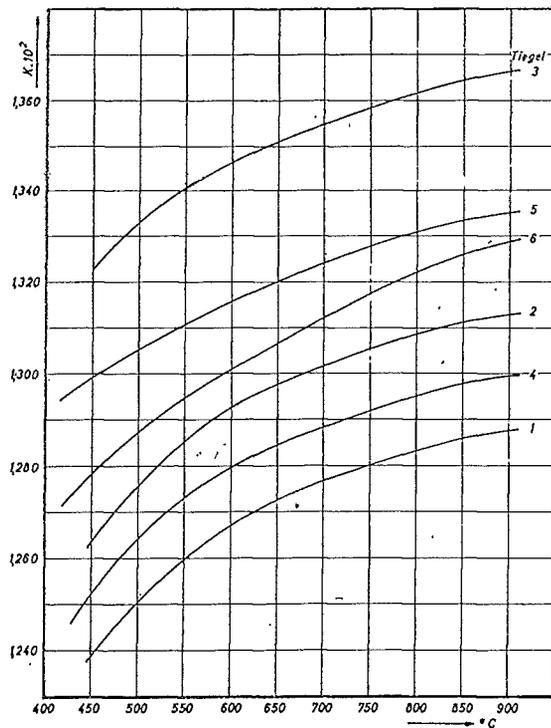
Bild 6: Temperaturabhängigkeit des Nulldekrementes

1.23 Zinneichung

Zur Bestimmung der ebenfalls temperaturabhängigen Konstante K wählt man ein Eichmetall, dessen Viskositätswerte aus Absolutverfahren bekannt sind und dessen Viskosität in der Größenordnung der Viskosität des zu messenden Metalls liegt. Im vorliegenden Fall ist Zinn gut geeignet, nicht zuletzt wegen seines geringen Dampfdruckes bei Temperaturen bis 900°C . Der Eichung wurden Viskositätswerte von J. Budde, K. Fischer, W. Menz und F. Sauerwald (13) sowie Dichtewerte von E. Gebhardt, M. Becker und H. Sebastian (14) zugrunde gelegt.

In Bild 7 ist die Temperaturabhängigkeit der Eichkonstanten der verwendeten Tiegel dargestellt (siehe auch Tabelle 2).

Bild 7:
Temperaturabhängigkeit
der Eichkonstanten K
für verschiedene Tiegel



1.3 HERSTELLUNG DER PROBEN

Alle Legierungen wurden in einem Silitstabofen erschmolzen und sodann in eine Stabkockille abgegossen. Als Basismetall diente Reinstaluminium der in 1.42 angeführten Zusammensetzung.

1.31 Reinstaluminium

Die Reinstaluminiumproben wurden ohne Umschmelzen aus dem Raffinadeblech geschnitten und daraus Rundstäbe hergestellt.

1.32 AlSi - Legierungen

Die AlSi-Schmelzen wurden mit Stickstoff entgast und gereinigt.

1.33 AlCu- und AlZn- Legierungen

Diese Legierungen konnten ohne besondere Vorkehrungen erschmolzen werden.

1.34 AlMg - Legierungen

Wegen der großen Oxidationsbereitschaft des Magnesiums verursacht die Herstellung magnesiumreicher Legierungen ohne eine Schutzgasschmelzanlage beträchtliche Schwierigkeiten. Ein befriedigender Schutz gegen Abbrand wurde schließlich durch Abdecken der Schmelze mit Aluminiumfluorid erreicht. Auf diese Weise konnten die Legierungen ohne wesentlichen Abbrand hergestellt werden.

1.4 ANALYSE DER PROBEN

Die Analysen wurden in dankenswerter Weise in der chemischen Abteilung der Versuchsanstalt Ranshofen durchgeführt.

1.41 Probennahme

Zur Analyse dienten die beim Abdrehen der gegossenen Stäbe von verschiedenen Stellen des Stabes anfallenden Späne. Auf diese Weise konnte die Probe hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung geprüft werden.

1.42 Reinstaluminium

Die Reinstaluminiumproben wurden mit einem Quantometer analysiert. Die Zusammensetzung des verwendeten Reinstaluminiums schwankt demnach zwischen folgenden Grenzen:

| | Fe | Si | Cu | B |
|--------|--------|--------|--------|-------|
| Gew. % | 0,0056 | 0,0045 | 0,0025 | 0,003 |
| | bis | bis | bis | |
| | 0,0072 | 0,0065 | 0,0026 | |

1.43 AlSi - Legierungen

Für die Zusammensetzung des Siliziums wurden folgende Werte ermittelt:

| | Si | Fe | Al | Ca | P |
|--------|-------|------|------|------|-------|
| Gew. % | 98,75 | 0,47 | 0,65 | 0,12 | 0,003 |

Die Analyse der AlSi-Legierungen erfolgte auf photometrischem Wege.

1.44 AlCu - Legierungen

Legiert wurde mit Kathodenkupfer (99,95 Gew. % Cu). Die Bestimmung des Kupfergehaltes der Legierungen erfolgte wie bei den AlSi-Legierungen photometrisch.

1.45 AlZn - Legierungen

Der Reinheitsgrad des Legierungsmetalle betrug 99,9 Gew. % Zn. Die Analyse der Proben wurde nach der Methode der Vakuumverdampfung des Zinks vorgenommen.

1.46 AlMg - Legierungen

Der Reinheitsgrad des Magnesiums betrug 99,9 Gew. % Mg. Analysenverfahren wie bei AlZn-Legierungen.

1.5 BEMESSUNG DES EINSATZGEWICHTES

Da die Dämpfung von der Füllhöhe im Tiegel abhängt, muß diese konstant gehalten werden. Die Einwaage wurde für ein Volumen der Proben bei der Liquidustemperatur von 60 cm^3 berechnet. Bei Temperaturerhöhung muß die Füllhöhe durch den Faktor $\frac{\eta_t}{\eta_{ts}}$ korrigiert werden. Die Einwaage und die Berechnung der Viskosität $\frac{\eta_t}{\eta_{ts}}$ erfordern ferner eine genaue Kenntnis der Dichte und Liquidustemperaturen.

1.51 Dichte und Liquidustemperaturen

1.511 Reinstaluminium

Die Dichtewerte wurden einer Arbeit von S. Dorner (15) entnommen. Sie sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

1.512 AlSi-Legierungen

Die Dichtewerte stammen von E. Gebhardt und K. Detering (5) (siehe Tabelle 4), die Liquidustemperaturen aus dem Zustandsdiagramm nach (16).

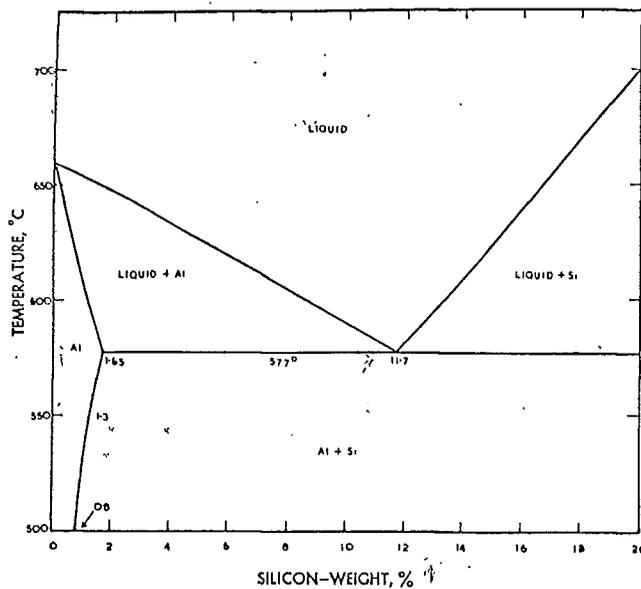


Bild 8: Aluminiumseite des Zustandsdiagrammes AlSi nach (16)

1.513 AlCu-Legierungen

Den Einsatzgewichten sind die Dichtewerte nach K. Bornemann und F. Sauerwald (17) sowie E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner (2) (4) zugrunde gelegt (siehe Tabelle 5). Die Liquidustemperaturen wurden dem in Bild 9 dargestellten Zustandsdiagramm nach (18) entnommen.

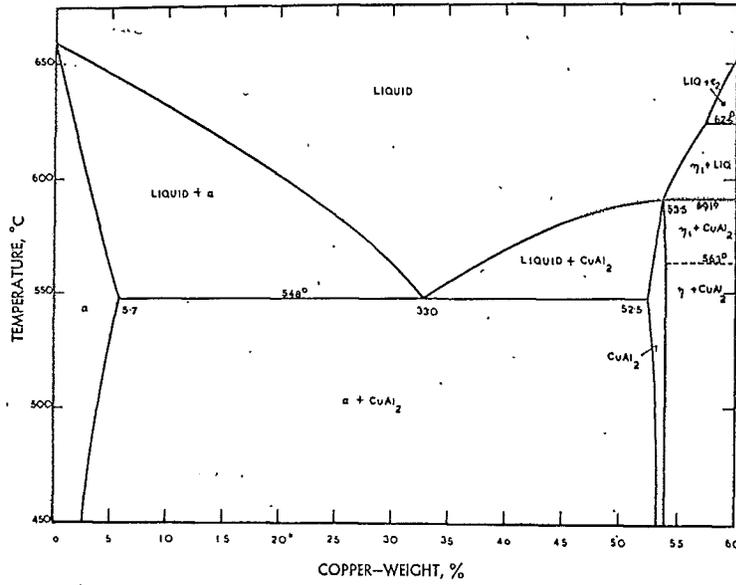


Bild 9: Aluminiumseite des Zustandsschaubildes AlCu nach (18)

1.514 AlZn-Legierungen

Dichtewerte nach E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner (3) (siehe Tabelle 7),
Liquidustemperaturen nach (20) auf Bild 10.

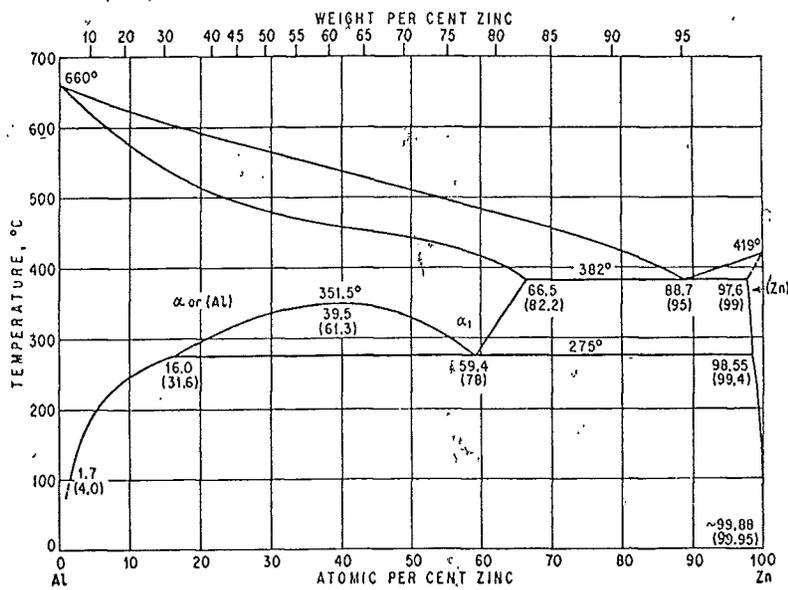


Bild 10: Zustandsschaubild AlZn nach (20)

1.515 AlMg-Legierungen

Dichtewerte nach E. Pelzel (19) (siehe Tabelle 6), Liquidustemperaturen auf Grund des Zustandsdiagrammes Bild 11.

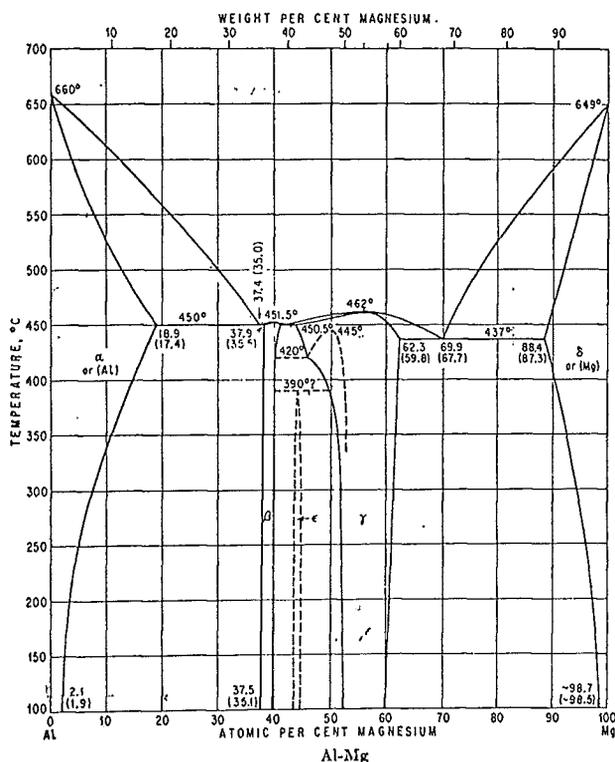


Bild 11:
Zustandsschaubild
AlMg nach (20)

1.6 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Nach Einsetzen der Probe in das Viskosimeter wurde dieses während des Erhitzens mehrmals evakuiert, dazwischen mit Argon gespült und zum Schluß mit Argon gefüllt. Durch Vorversuche war festgestellt worden, daß die Meßwerte weniger streuen, wenn zuerst auf 900°C erhitzt und die Messung mit sinkender Temperatur erfolgt. Erst dann kann auch eine Messung mit steigender Temperatur vorgenommen werden. Der Grund dafür dürfte eine bessere Anpassung der Schmelze an die Tiegelwand bei einer Überhitzung sein. Die

Legierungen wurden also nach Erreichen der Temperaturkonstanz bei der höchsten Versuchstemperatur meist einige Stunden abstehen gelassen und so dann wurde in kleinen Regelschritten jeweils bei konstanter Temperatur in der Abkühlung das logarithmische Dekrement gemessen. Zur Kontrolle dienten Messungen bei steigender Temperatur. Die Übereinstimmung der Meßergebnisse war sehr gut.

2. SCHRIFTTUM ÜBER DIE VISKOSITÄT VON ALUMINIUM-LEGIERUNGEN

2.1 REINSTALUMINIUM UND ALUMINIUM-SILIZIUM-LEGIERUNGEN

Eine ausführliche Besprechung der Literatur über das genannte Gebiet findet sich bei F. Lihl, E. Nachtigall und G. Pointner (11). Besonders sei erwähnt, daß alle Autoren einen glatten Verlauf der Viskosität-Temperatur-Kurven angeben, mit Ausnahme von D. Saito und T. Matsukawa (21) (siehe Bild 12) sowie W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) (siehe Bild 13).

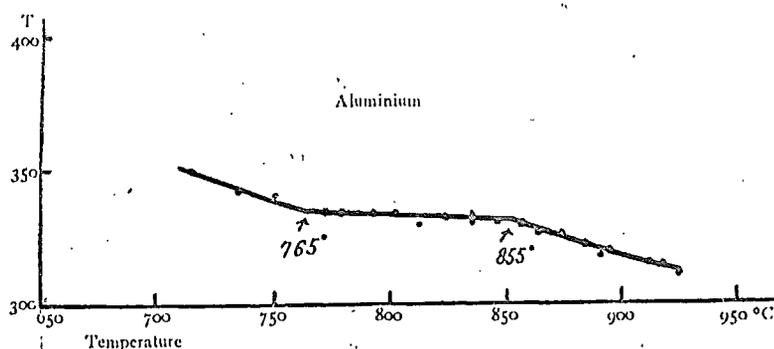


Bild 12: Viskositätsverlauf nach D. Saito und T. Matsukawa (21) von Reinstaluminium

D. Saito und T. Matsukawa fanden zwei Richtungsänderungen in diesen Kurven bei 765°C und 855°C, während W.R.D. Jones und W.L. Bartlett nur einen Knick zwischen 750 und 800°C feststellten. Den zweiten Knick konnten die letztgenannten Autoren offenbar deshalb nicht finden, da sie den Temperaturbereich ihrer Messungen mit 850°C begrenzt hatten. Diese Richtungsänderungen wurden als Umwandlungen in der Schmelze gedeutet und auch bei AlSi-Legierungen festgestellt. Jones und Bartlett hatten ferner beobachtet, daß sich die Lage des sog. Umwandlungspunktes von Reinstaluminium bei 765°C durch Legieren mit Silizium im Einklang mit dem Zustandsschaubild ändert. Die Umwandlungstemperatur steigt bis zur Kon-

zentration der maximalen Löslichkeit an und fällt gegen den eutektischen Punkt wieder ab, um mit weiter steigendem Siliziumgehalt erneut anzusteigen. Bemerkenswert sei, daß das Auftreten solcher Umwandlungspunkte von (21) und (22) auch bei AlCu-, AlZn-, AlMg- und AlNi-Legierungen beobachtet wurde.

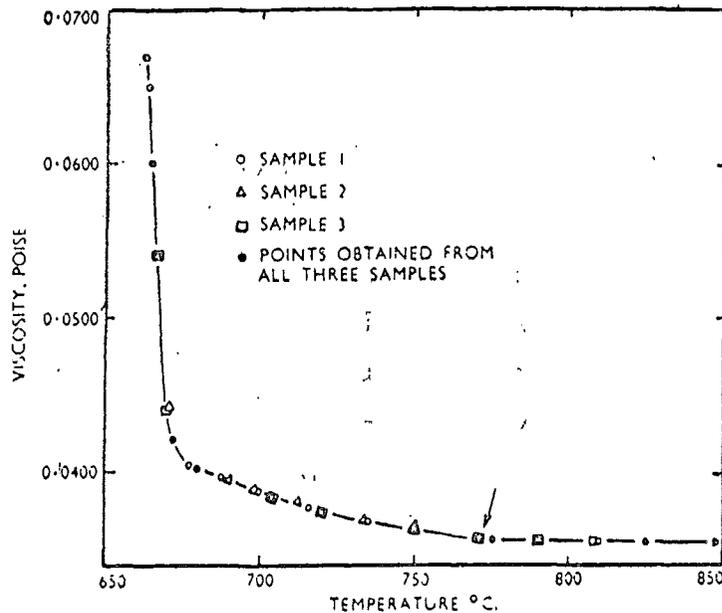


Bild 13: Viskositätsverlauf, von Reinstaluminium nach W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22)

2.2 ALUMINIUM-KUPFER-LEGIERUNGEN

Nach E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner (2) und (4) erfährt die Viskosität des Aluminiums bis zu der von den genannten Autoren untersuchten Konzentration von 12 Gew. % Cu eine lineare Erhöhung (z.B. für 700°C : Al 1,12 cP ----- AlCu12, 1,22 cP).

W.R.D. Jones, W.L. Bartlett (22) untersuchten die Viskosität bis zu einem Kupfergehalt von 33 Gew. % (eutektische Zusammensetzung) und eine Temperatur von 840°C. Nach diesen Autoren steigt die Viskosität bis zur Konzentration der maximalen Löslichkeit von Kupfer in Aluminium (5,7 Gew. % Cu) an und fällt dann mit zunehmendem Kupfergehalt bis zur

eutektischen Zusammensetzung ab. Außerdem tritt ein Knick in den Viskosität-Kurven bei etwa 770°C auf, der als Strukturänderung in der Schmelze gedeutet wird. Die Absolutwerte der Viskosität betragen etwa das Vierfache der Werte von (2) und (4).

2.3 ALUMINIUM-ZINK-LEGIERUNGEN

Nach W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) fällt die Viskosität bei konstanter Temperatur von Aluminium aus bis etwa 5 Gew.% Zn ab und steigt dann wieder an. Die Untersuchungen erstreckten sich bis 30 Gew.% Zn.

E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner (3) stellten jedoch bei den Viskositätsisothermen einen geringen Anstieg von der Aluminiumseite aus bis 85 Gew.% Zn fest. Daran schließt sich ein Steilanstieg zur Zinkseite. Die Konzentration der maximalen Löslichkeit und die eutektische Zusammensetzung treten in den Isothermen der Viskosität in diesen und auch in den jüngeren Untersuchungen von E. Gebhardt und K. Detering (5) nicht in Erscheinung.

Über die Viskosität des reinen Zinks liegen Arbeiten von T. P. Yao und V. Kondic (25), sowie von D. Ofte und L. J. Wittenberg (26) vor.

2.4 ALUMINIUM-MAGNESIUM-LEGIERUNGEN

Nach E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner (2) bewirken geringe Zusätze von Magnesium eine geringe Viskositäts-erhöhung (bei 3 Gew.% Mg und 700°C etwa 0,013 cP). Diese Angaben werden auch von L. A. Koledow und A. P. Ljubimov (23) bestätigt.

Von K. Detering (24) liegen Messungen der Viskosität bis zu 43 Gew.% Magnesium und Temperaturen von 700°C vor. Danach erniedrigt Magnesium bis etwa 35 Gew.% die Viskosität des Aluminiums gleichmäßig. Bei 37,5 Gew.% Mg, entsprechend der Zusammensetzung der Verbindung Al_3Mg_2 , wurde ein spitzes Maximum beobachtet.

W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) dagegen berichten von einem Anstieg der Viskosität bis zur Konzentration der maximalen Löslichkeit mit darauffolgendem Abfall. Diese Messungen erstreckten sich bis 20 Gew.% Mg und 800°C. Die Absolutwerte betragen jedoch wie bei den AlCu-Legierungen etwa das Vierfache der von den vorgenannten Autoren angegebenen Zahlen. Magnesiumreiche Aluminiumlegierungen wurden bisher - soweit bekannt - nicht untersucht.

Über die Viskosität von reinem Magnesium liegen Angaben von E. Gebhardt, M. Becker, H. Sebastian (14) vor (700°C 1,10 cP, 900°C 0,67 cP).

3. VERSUCHSERGEBNISSE

3.1 REINSTALUMINIUM

Zunächst wurde die Viskosität von Reinstaluminium in 50°C - Intervallen von 900°C abfallend gemessen. Es ergab sich dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen von F. Lihl, E. Nachtigall und G. Pointner (11) sowohl hinsichtlich des absoluten Betrages der Viskosität als auch bezüglich des Kurvenverlaufes.

Bei Messungen in kleineren Intervallen wurden jedoch merkliche Abweichungen der Meßwerte vom glatten Kurvenverlauf festgestellt. Da diese Abweichungen reproduzierbar waren, schien es notwendig die Meßpunkte enger zu legen. Dabei ergab sich der in Bild 14 dargestellte Dämpfungsverlauf. Er zeigt eine unstetige Änderung der Viskosität bei 855°C und bei 775°C . Diese Untersuchungen wurden mit verschiedenen Einsätzen wiederholt und mit steigender sowie fallender Temperatur durchgeführt. Die einzelnen Kurvenzüge deckten sich hierbei auch im Bereich der Unstetigkeiten ausgezeichnet.

In Bild 15 ist gemäß Tabelle 3 die berechnete Viskosität-Temperatur-Kurve dargestellt.

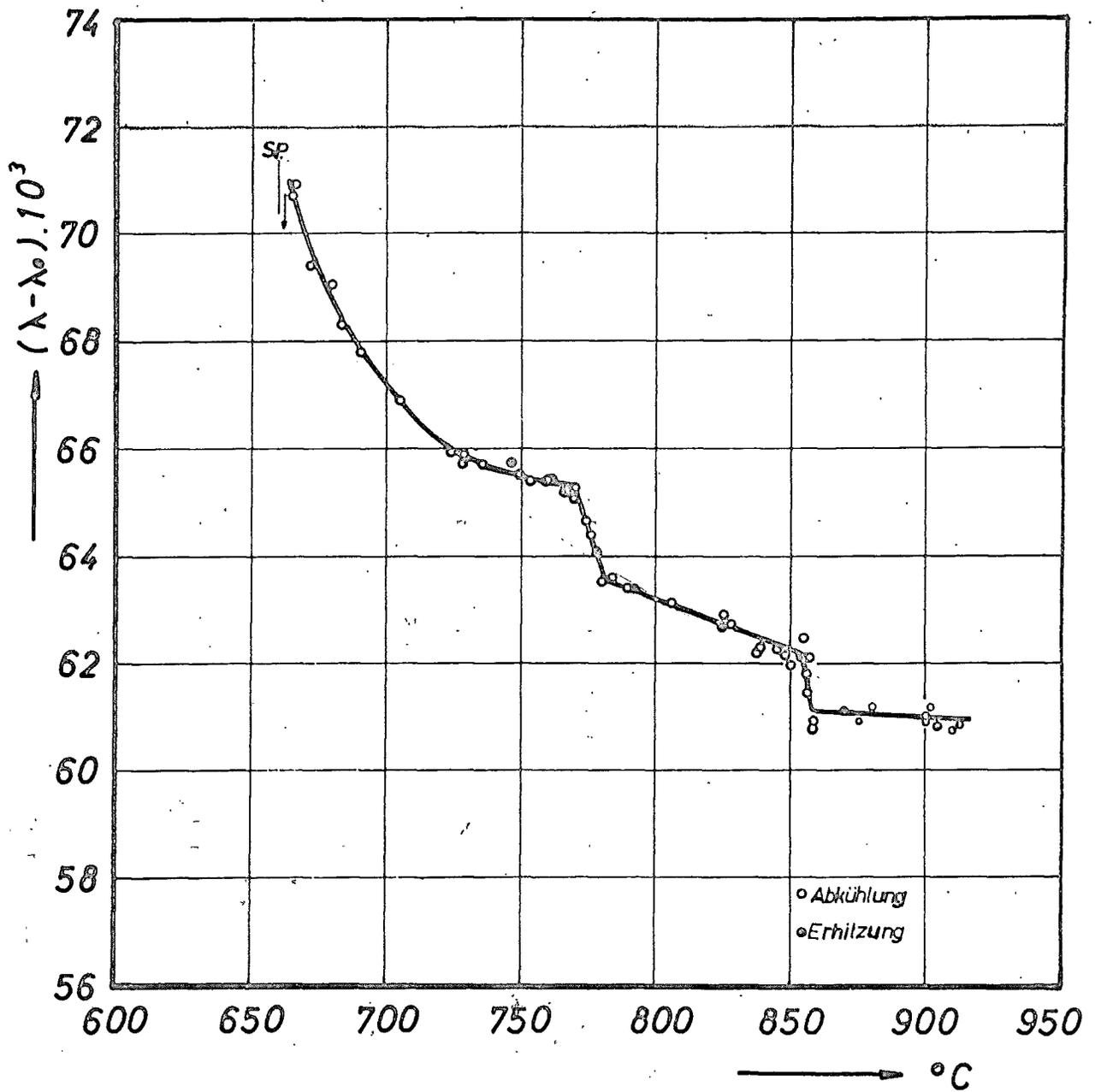


Bild 14: Abhängigkeit der Dämpfung des Reinstaluminiums von der Temperatur

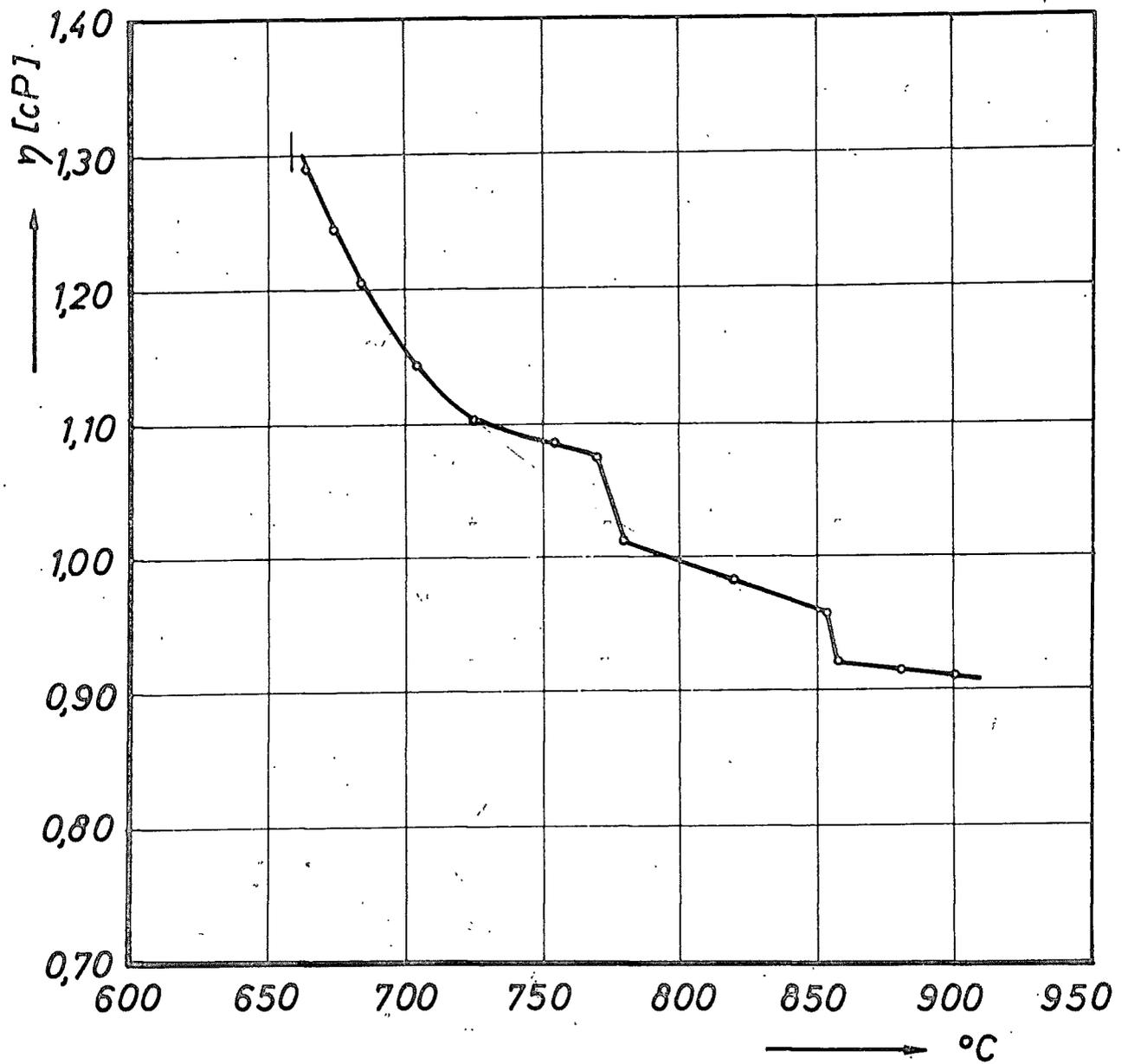


Bild 15: Viskosität - Temperaturkurve von Reinstaluminium

3.2 ALUMINIUM-SILIZIUM-LEGIERUNGEN

Nach dem Auffinden der Unstetigkeitsstellen im Viskosität-Temperatur-Verlauf von Reinstaluminium war natürlich eine ebenso eingehende Untersuchung bei den AlSi-Legierungen notwendig. Bild 16 veranschaulicht den sowohl bei Abkühlung als auch bei Erhitzung gemessenen Dämpfungsverlauf der untersuchten Legierungen. Die Ergebnisse der mehr als 1500 Einzelmessungen stimmen innerhalb des üblichen Streuspiegels der Messungen überein.

In Bild 17 sind gemäß Tabelle 4 die Viskosität-Temperatur-Kurven der AlSi-Legierungen wiedergegeben. Den Zusammenhang zwischen Viskosität und Konzentration zeigt Bild 20. Bei der eutektischen Konzentration tritt demnach bei Annäherung an die Liquidustemperatur ein temperaturabhängiges Minimum auf. Die Unstetigkeiten in den Viskosität-Temperatur-Kurven werden also in gleicher Weise bei den Aluminium-Silizium-Legierungen festgestellt. Die Höhe des Siliziumzusatzes äußert sich in der Verschiebung der Lage der Unstetigkeitsstellen im Einklang mit dem Zustandschaubild. Die 775°C - Unstetigkeit wandert gemäß Bild 18 bis etwa 4 Gew.% Si gegen höhere Temperaturen, um dann zum eutektischen Punkt abzufallen und mit weiterer Erhöhung des Siliziumzusatzes wieder anzusteigen. Für die 855°C - Unstetigkeit ist jedoch keine klare Gesetzmäßigkeit zu erkennen.

Ferner kann aus Bild 17 entnommen werden, daß die Höhe der Stufen sich mit steigendem Siliziumgehalt ändert. Dieser Zusammenhang ist in Bild 19 dargestellt. Man erkennt daraus ebenfalls einen Zusammenhang mit dem Zustandschaubild insoferne, als sich die Löslichkeitsgrenze abzeichnet (Minimum für die 775°C - Stufe bzw. Maximum für die 855°C - Stufe). Ferner entspricht auch der eutektischen Zusammensetzung ein Maximum in der Kurve für die 855°C - Stufe. Die Höhe der 755°C - Stufe erreicht hingegen beim eutektischen Punkt einen Tiefstwert, der bei weiterer Erhöhung des Siliziumgehaltes innerhalb des untersuchten Konzentrationsbereiches unverändert bleibt.

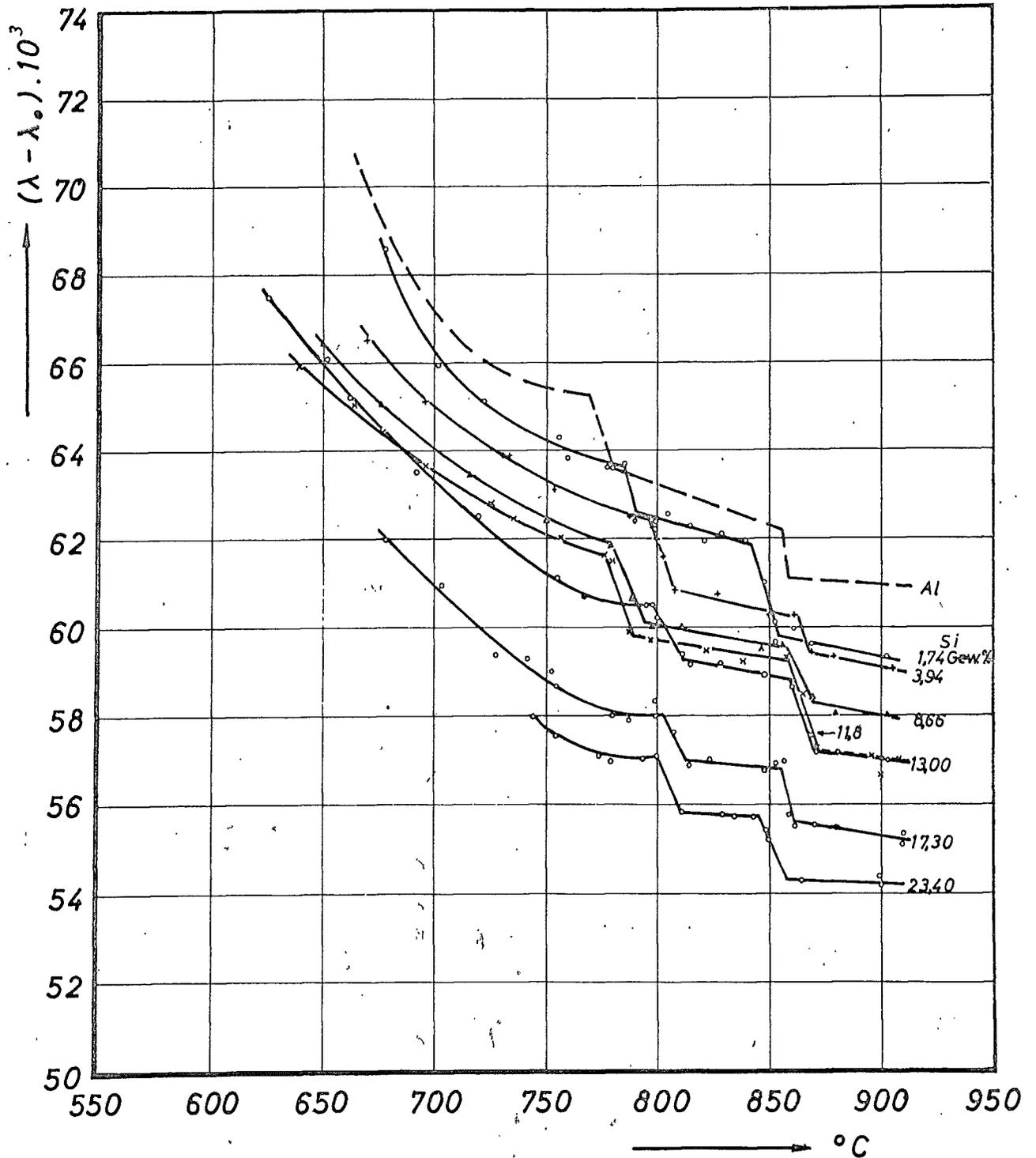


Bild 16: Dämpfungsverlauf von AlSi-Legierungen

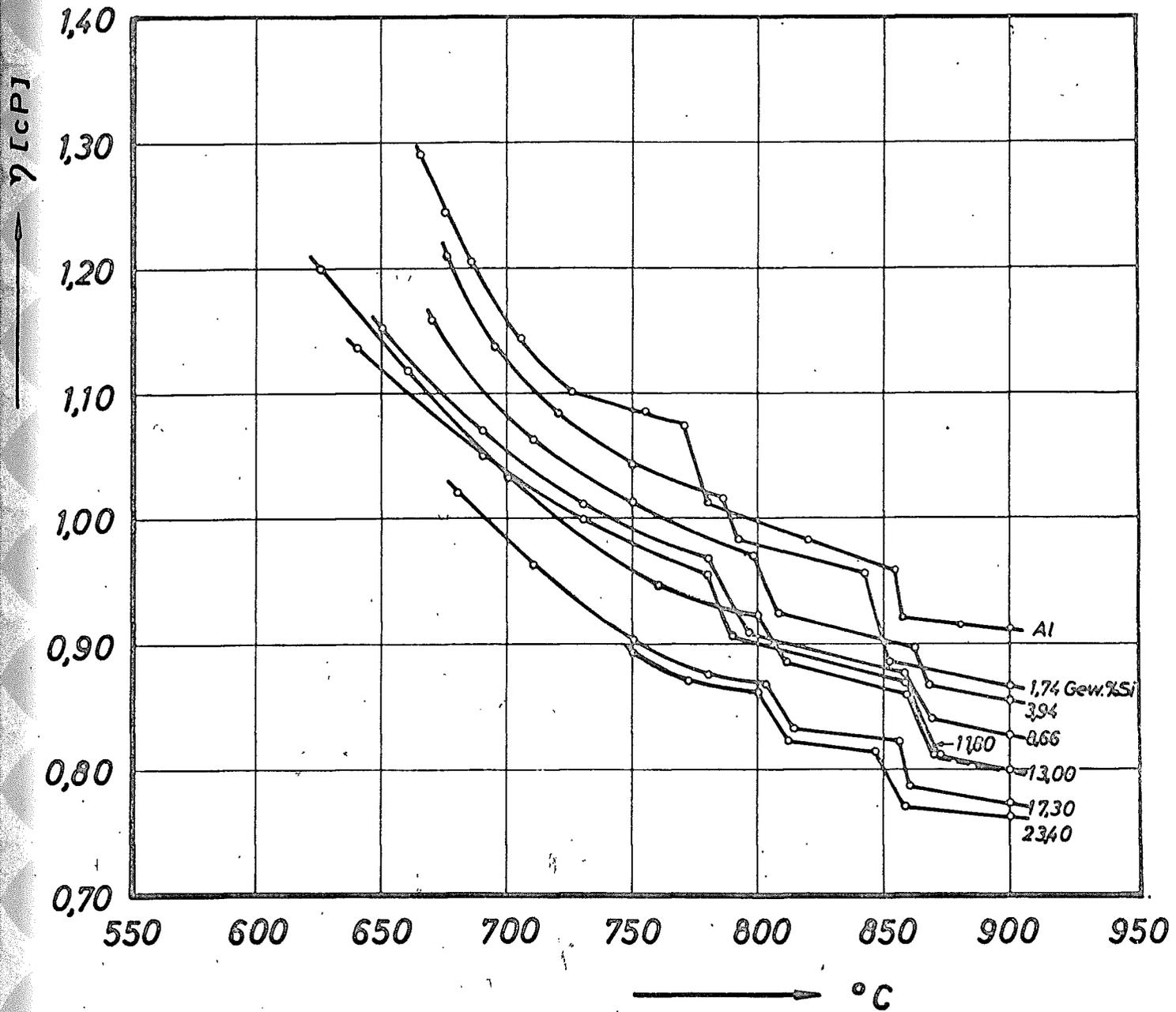


Bild 17: Viskosität-Temperatur-Kurven von AlSi-Legierungen

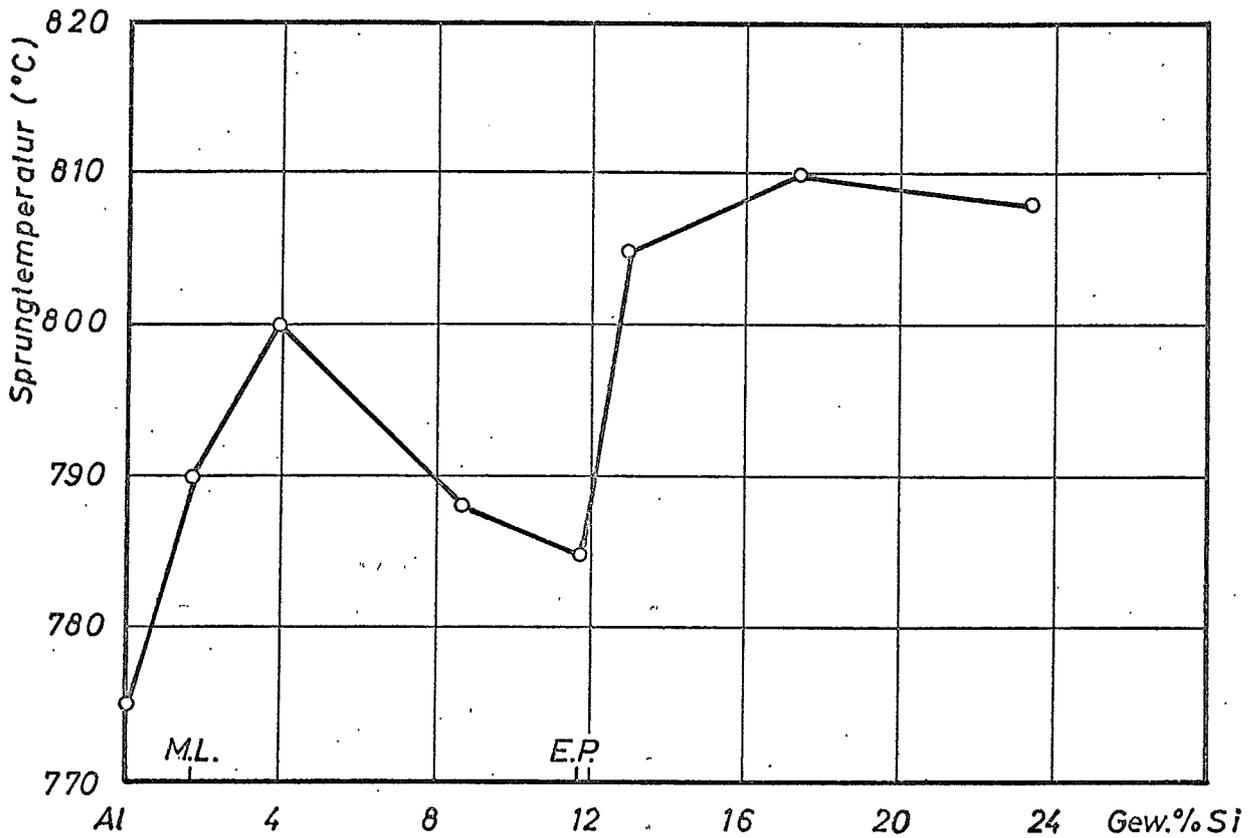


Bild 18: Temperaturabhängigkeit der 775° C - Unstetigkeit bei AlSi-Legierungen

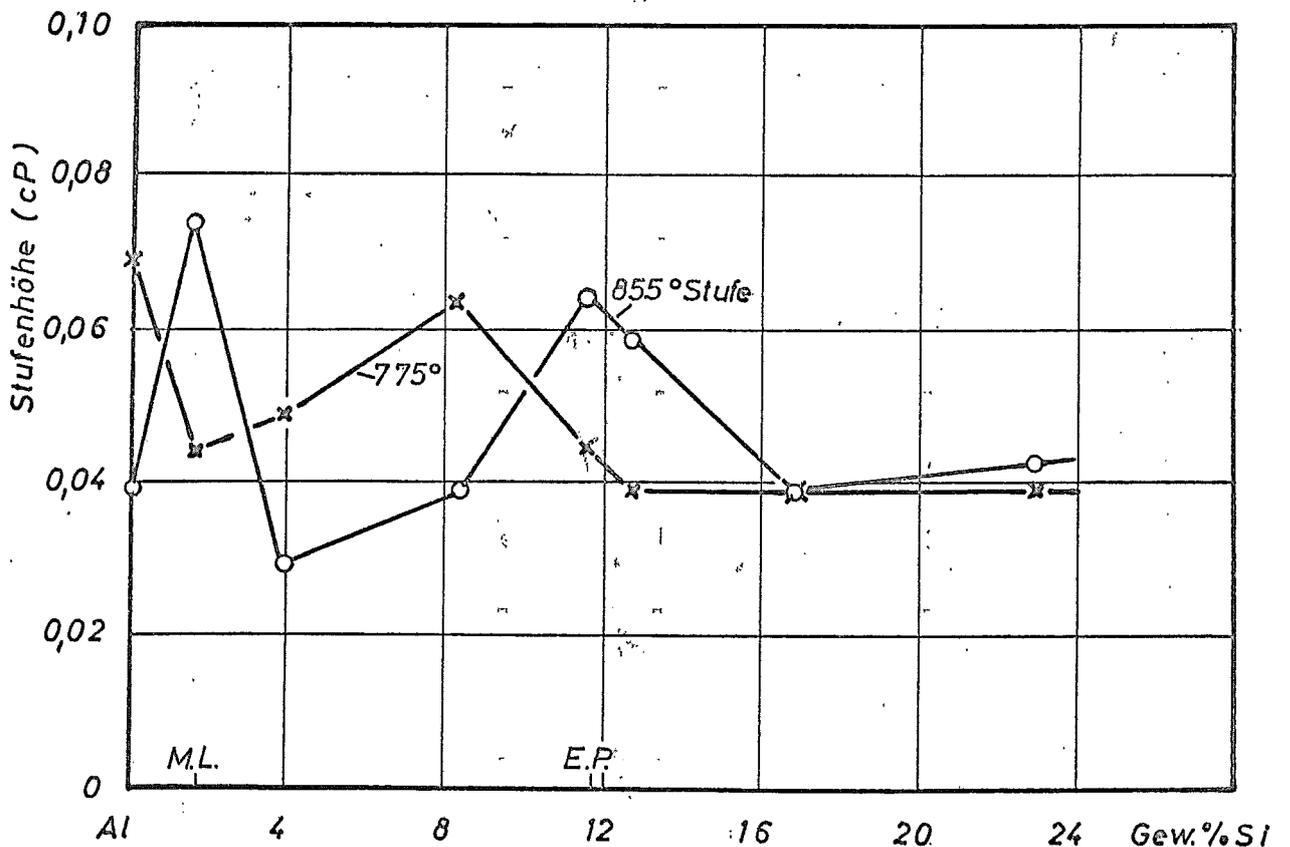


Bild 19: Abhängigkeit der Stufenhöhe vom Siliziumgehalt

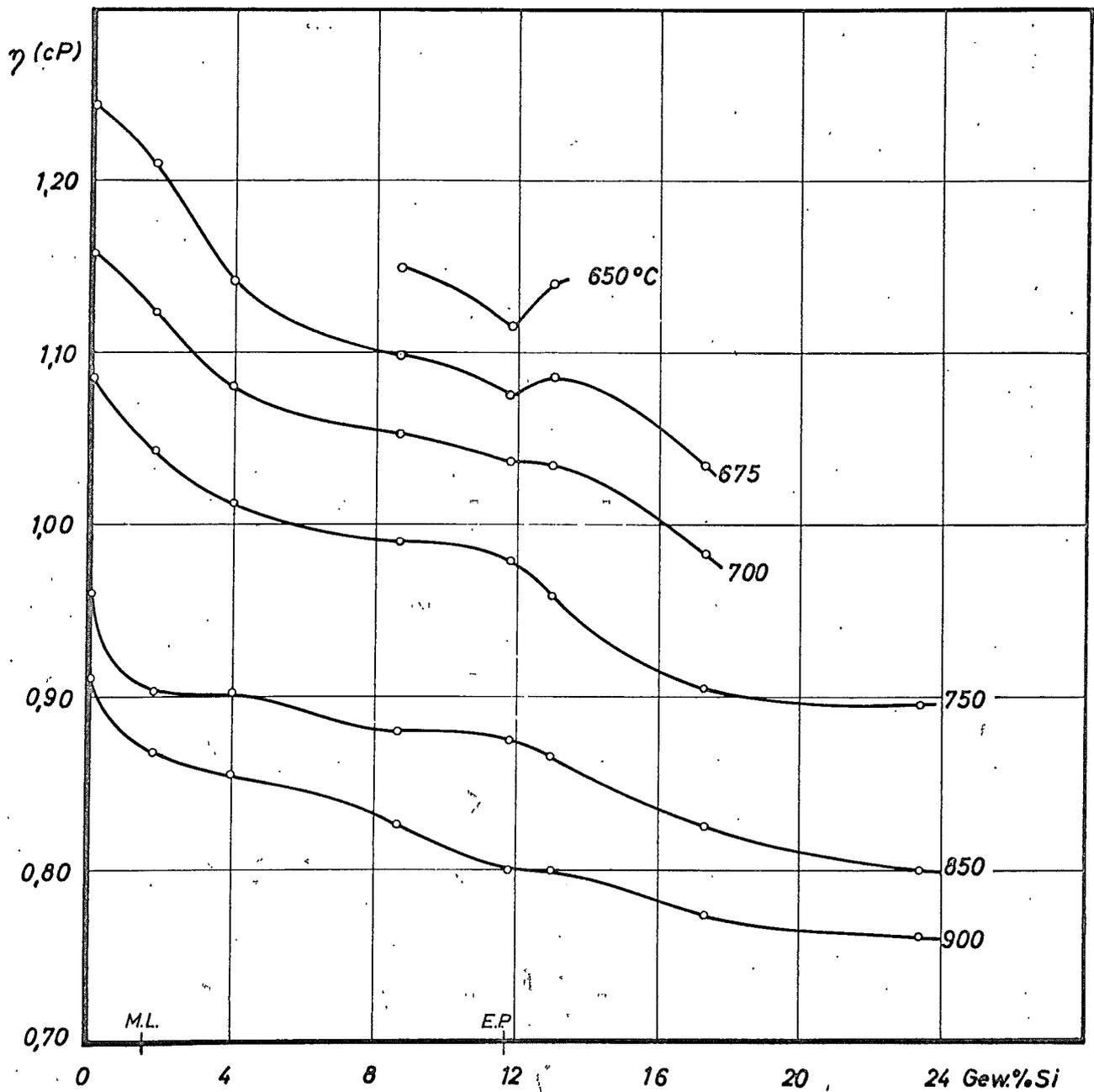


Bild 20: Viskosität-Konzentration-Isothermen von AlSi-Legierungen

3.3 ALUMINIUM-KUPFER-LEGIERUNGEN

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Bild 21 gibt den Dämpfungsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur mit der Kupferkonzentration als Parameter und Bild 22 die daraus errechneten Viskosität-Temperatur-Kurven wieder. Wie aus diesen Diagrammen zu erkennen ist, treten auch hier wieder dieselben Unstetigkeitsstellen in den gleichen Temperaturbereichen wie bei AlSi-Legierungen auf. Mit steigendem Kupfergehalt werden jedoch diese Unstetigkeiten immer weniger gut ausgeprägt. Im übereutektischen Bereich, d. h. oberhalb 33 Gew.% Cu sind sie nicht mehr feststellbar.

Die den Legierungen 35,8, 30,3 und 9,06 Gew.% Cu entsprechenden Kurven sind nicht in Bild 21 eingezeichnet, da bei diesen andere Tiegel verwendet wurden und daher die Eichkurven gegenüber den anderen Legierungen unterschiedlich sind.

Trägt man die Viskosität gegen die Kupferkonzentration mit der Temperatur als Parameter auf (Bild 23), dann sieht man, daß sowohl die maximale Löslichkeit, als auch die eutektische Zusammensetzung im Kurvenverlauf deutlich hervortreten. Die maximale Löslichkeit äußert sich in einem Maximum, die eutektische Konzentration als Sattelpunkt der Viskosität-Konzentration-Isothermen.

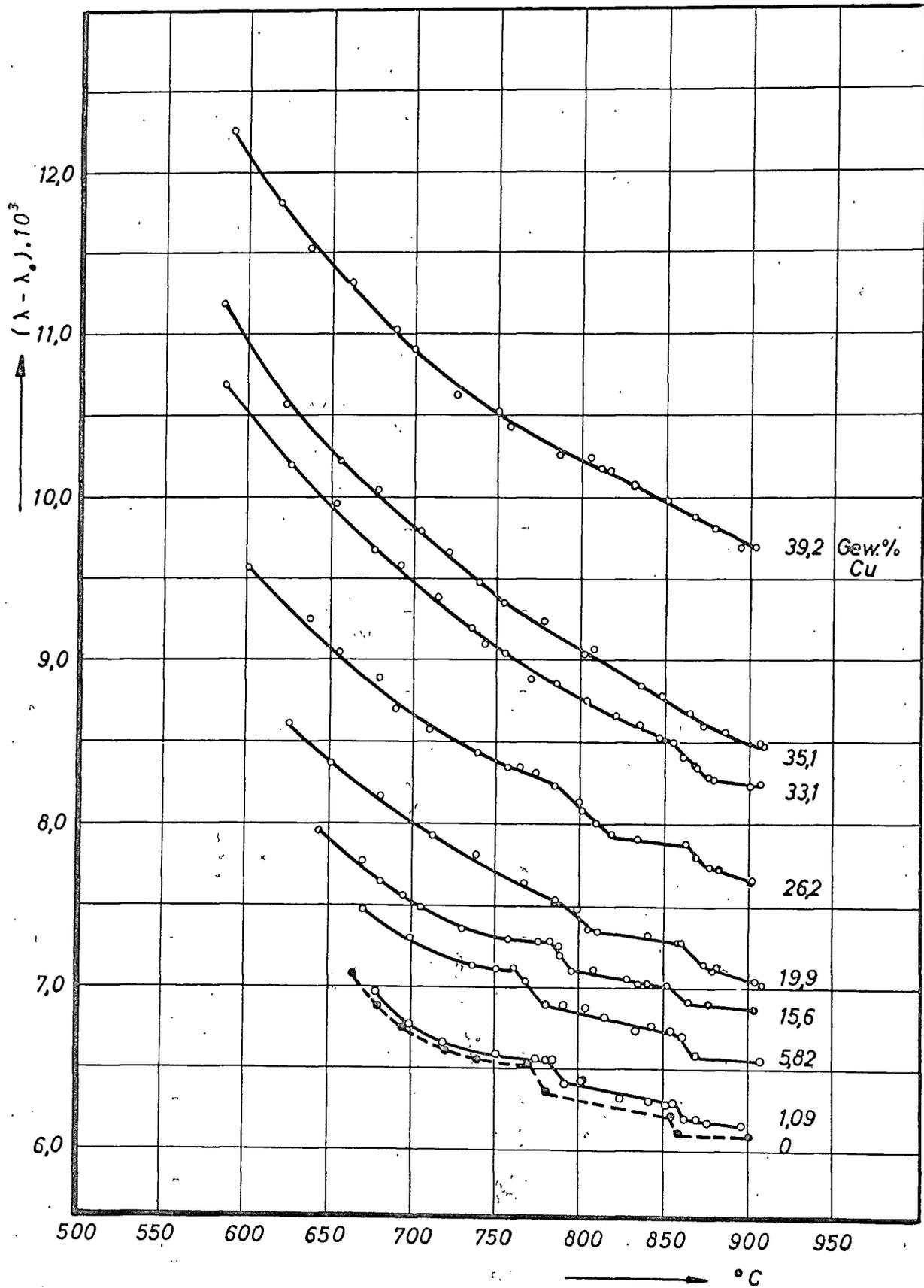


Bild 21: Abhängigkeit der Dämpfung der AlCu-Legierungen von der Temperatur

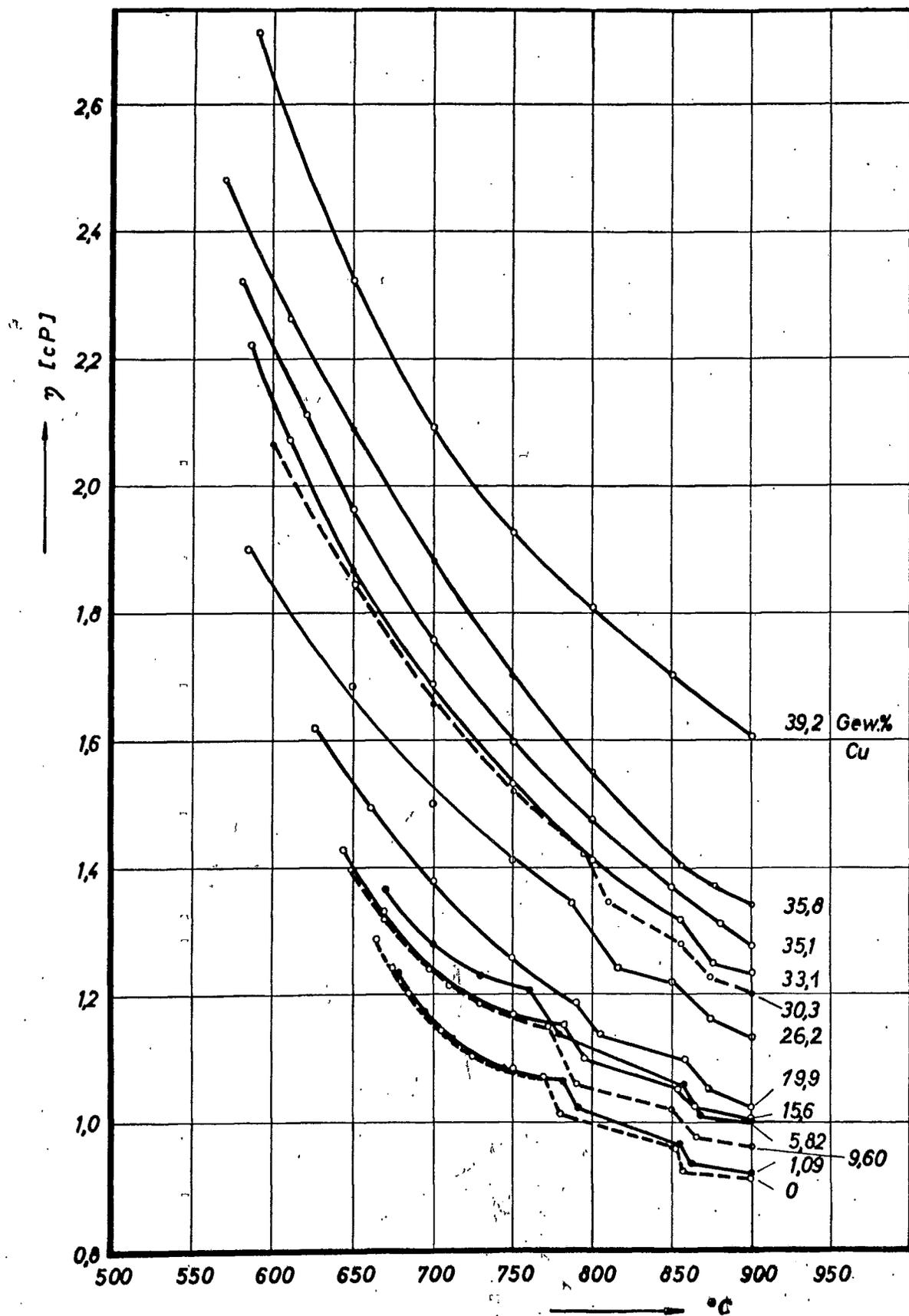


Bild 22: Viskosität-Temperatur-Kurven von AlCu-Legierungen

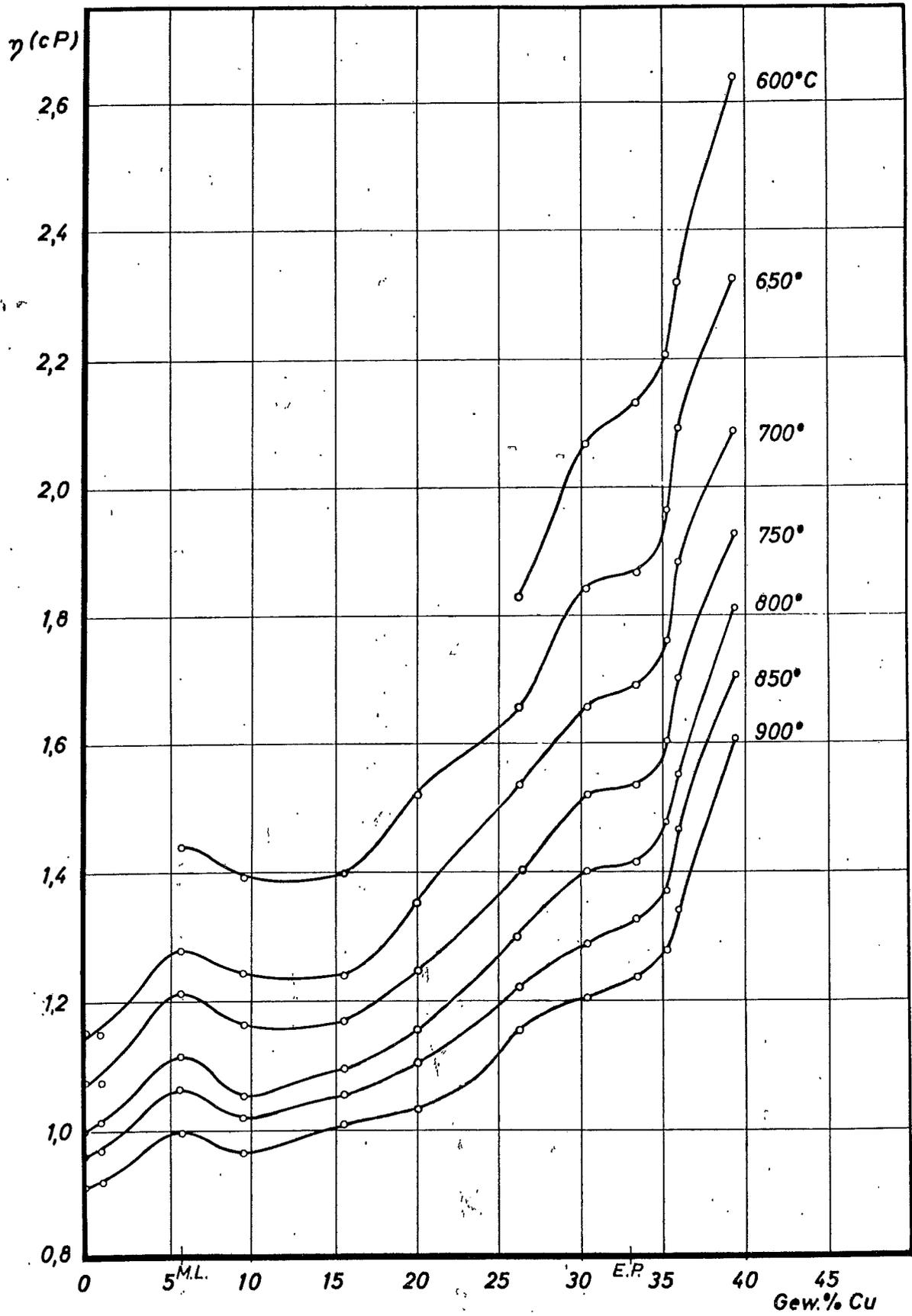


Bild 23: Viskosität-Konzentration-Isothermen von AlCu-Legierungen

3.4 ALUMINIUM-ZINK-LEGIERUNGEN

Um eine Konzentrationsverschiebung wegen des hohen Dampfdruckes des Zinks (Siedepunkt 906°C) während des Versuches möglichst gering zu halten, wurden die Versuche nur bis zu einer Temperatur von 750°C durchgeführt. Bei dieser Temperatur trat innerhalb der Versuchszeit keine nennenswerte Verdampfung auf. Im Konzentrationsbereich 50 bis 90 Gew.% Zink wurde jedoch bei Abkühlung in der Nähe des Erstarrungspunktes (bis 40°C oberhalb) ein nicht reproduzierbarer Dämpfungsabfall gemessen, der auf eine starke Seigerung innerhalb der Probe hinweist. In der Schmelze liegen daher wegen der Konzentrationsverschiebung zufolge der unterschiedlichen Liquidustemperaturen bereits Anteile einer festen Phase vor. In diesem Bereich wurden daher die Dämpfungswerte extrapoliert (in den Bildern 24 bis 26 strichliert). Die Dämpfung ändert sich somit in Abhängigkeit von der Temperatur stetig im untersuchten Temperaturbereich.

Bild 25 vermittelt die mit den entsprechenden Eichkonstanten aus der Dämpfung berechneten Viskositätswerte in Abhängigkeit von der Temperatur, während Bild 26 den Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Zink-Konzentration mit der Temperatur als Parameter veranschaulicht. Demnach erfolgt nach einem Abfall bis 5 Gew.% Zink ein schwacher Anstieg bis 70 Gew.% Zink mit einem wenig ausgeprägten temperaturabhängigen Zwischenmaximum bei 55 Gew.% Zink. Über 80 Gew.% Zink steigen die Viskosität-Konzentration-Isothermen steil an, wobei zwischen 93 und 96 Gew.% Zink eine temperaturabhängige Richtungsänderung im Kurvenverlauf festzustellen ist. In diesen Konzentrationsbereich fällt aber gerade die eutektische Zusammensetzung. Das Zwischenmaximum bei 55 Gew.% Zink könnte möglicherweise der Mischungslücke im festen Zustand entsprechen.

In Tabelle 7 sind die Werte für Dichte, log. Dekrement, Schwingungsdauer und Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur zusammengefaßt.

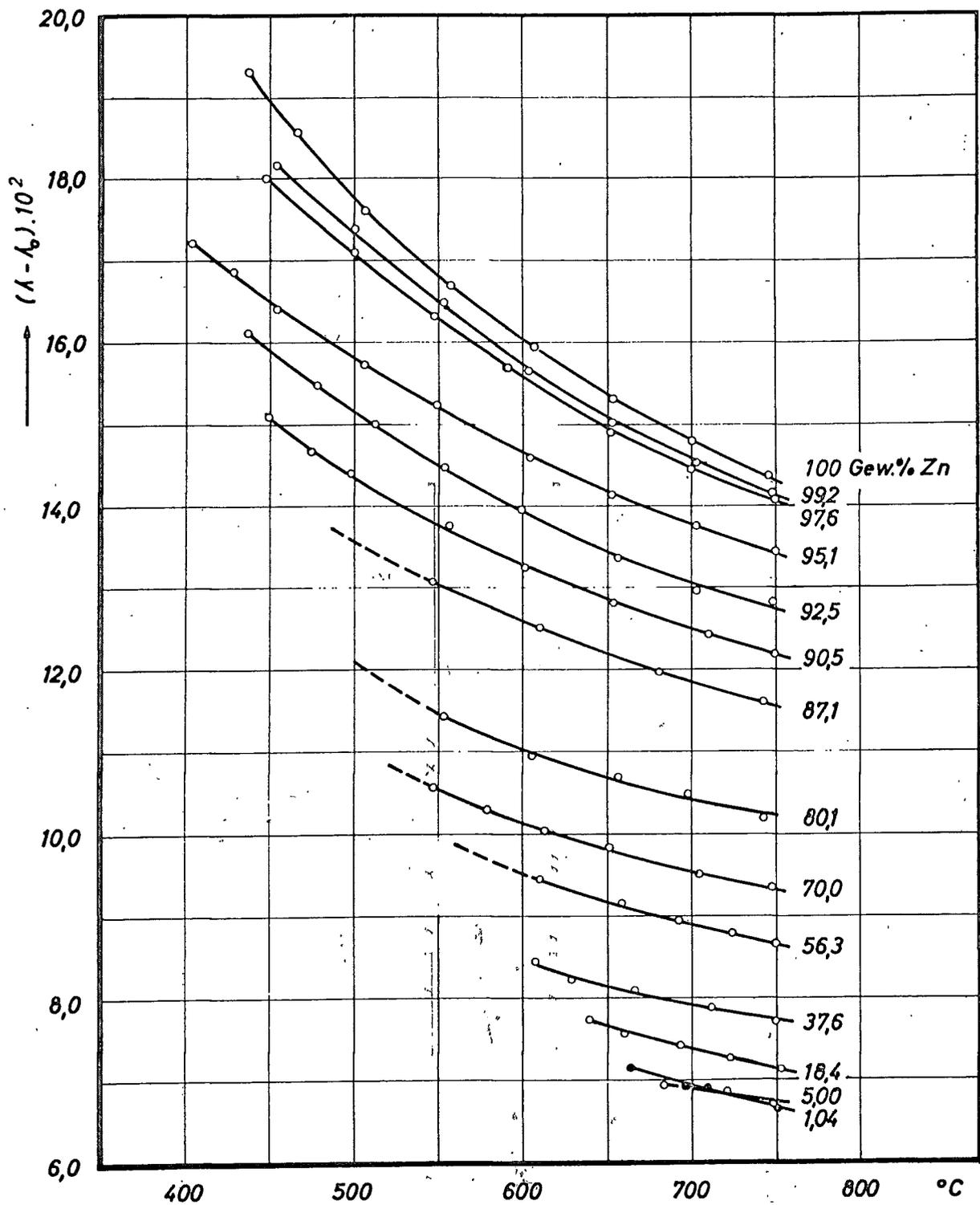


Bild 24: Abhängigkeit der Dämpfung der AlZn-Legierungen von der Temperatur

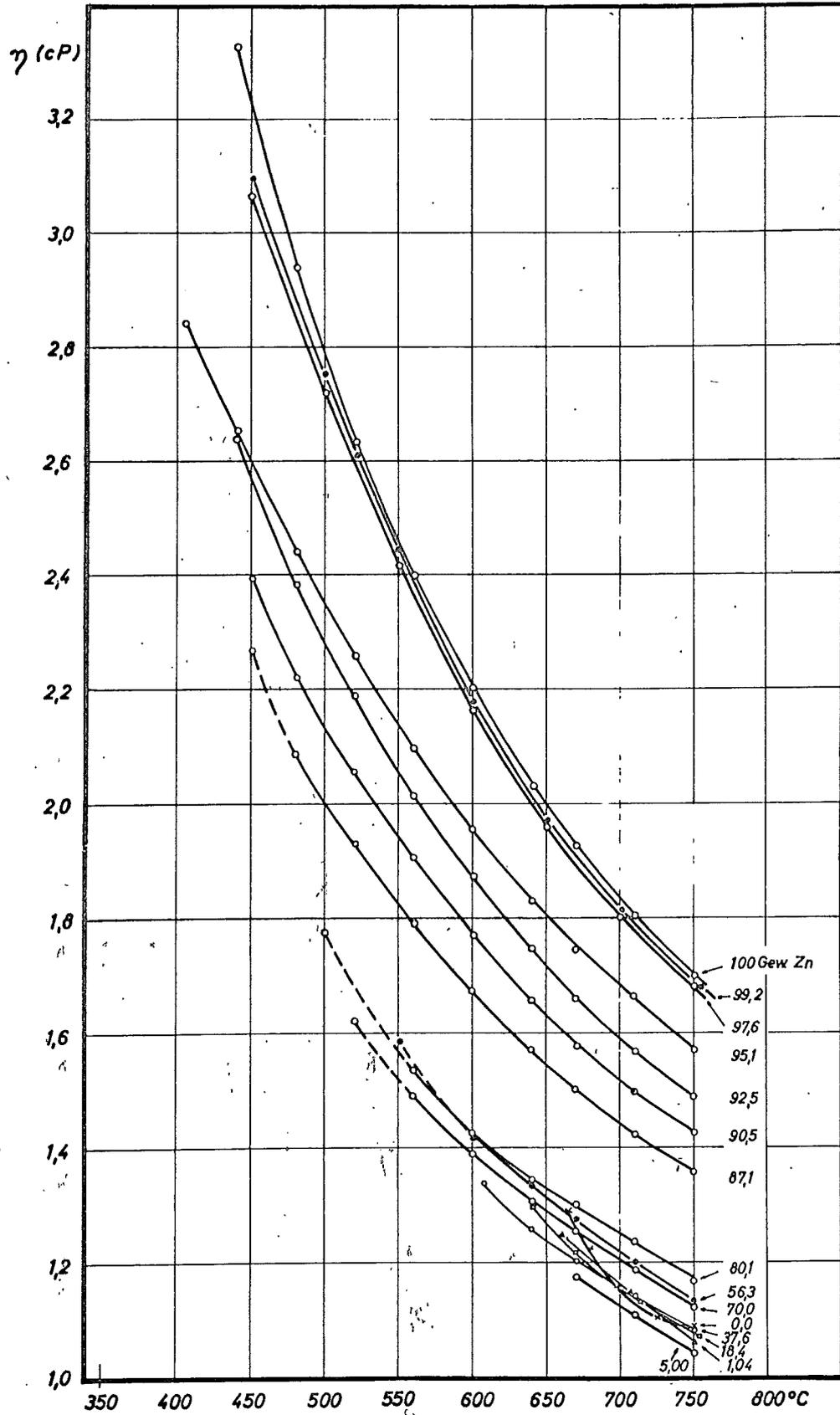


Bild 25: Viskosität-Temperatur-Kurven von AlZn-Legierungen

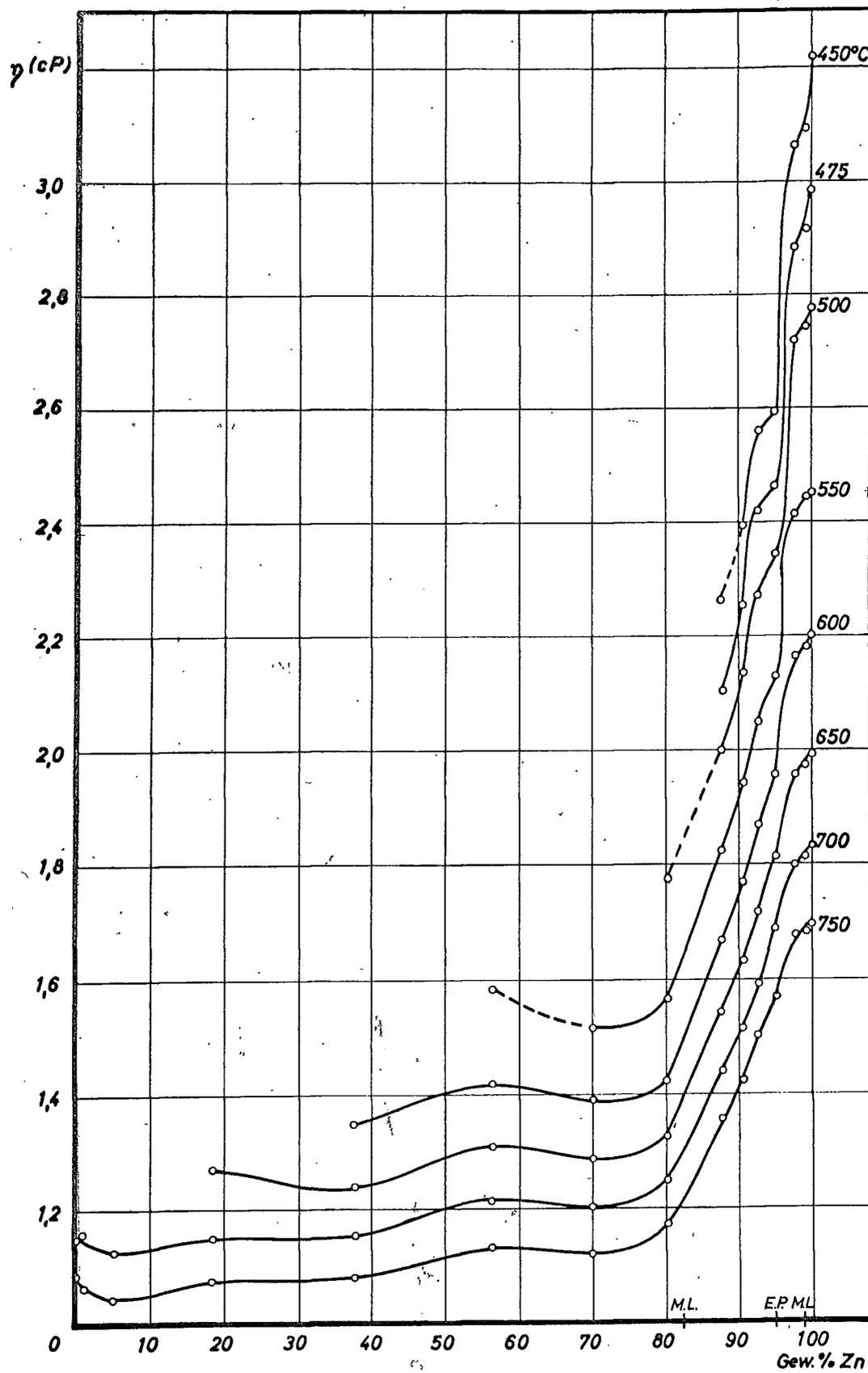


Bild 26: Viskosität-Konzentration-Isothermen von AlZn-Legierungen

3.5 ALUMINIUM-MAGNESIUM-LEGIERUNGEN

Wegen der schon früher erwähnten starken Oxidationsneigung der AlMg-Legierungen gestalteten sich die Messungen an Legierungen mit hohem Mg-Gehalt sehr schwierig. Auf die Reinheit des Argonschutzgases mußte deshalb besonders geachtet werden. Außerdem machte der hohe Dampfdruck des Mg in den AlMg-Legierungen bei höheren Versuchstemperaturen eine möglichst rasche Versuchsdurchführung notwendig, um eine Konzentrationsverschiebung während des Versuches auszuschalten. Als weitere Schwierigkeit kam hinzu, daß beim Ausschmelzen der Legierungen nach Beendigung einer Meßreihe 5 Tiegel durch Ribbildung unbrauchbar wurden. Es mußte deshalb jedesmal eine neue Eichung vorgenommen werden. Da die Dämpfungskurven auf Grund der 5 verschiedenen Tiegeleichungen kein anschauliches Bild des Zusammenhanges zwischen der Dämpfung und der Zusammensetzung der Legierungen ergeben, wird auf eine Wiedergabe verzichtet.

Die aus der Dämpfung gemäß Tabelle 6 berechneten Viskosität-Temperatur-Kurven sind aus Gründen einer übersichtlicheren Darstellung in zwei Diagramme aufgeteilt. Bild 27 gibt den Viskosität-Temperatur-Verlauf für die Legierungen bis 40 Gew. % Mg wieder, Bild 28 für die Mg-reicheren Legierungen. Auch bei AlMg-Legierungen treten somit Unstetigkeiten in der Temperaturabhängigkeit der Viskosität auf, jedoch nur bis etwa 15 Gew. % Mg.

Die Viskosität-Konzentration-Isothermen sind in Bild 29 dargestellt. Demnach steigt die Viskosität sowohl von Aluminium wie Magnesium ausgehend bis ungefähr zur maximalen Löslichkeit der beiden Metalle ineinander an. Auch die eutektische Zusammensetzung, entsprechend 67,7 Gew. % Mg, äußert sich in einem Maximum, das mit steigender Temperatur verflacht. Der zweite eutektische Punkt bei 35 Gew. % Mg tritt offenbar wegen der unmittelbaren Nähe der Verbindung Al_3Mg_2 nicht in Erscheinung.

Von besonderem Interesse ist das Gebiet in der Umgebung der intermetallischen Verbindungen Al_3Mg_2 und Al_2Mg_3 . Bei den diesen Verbindungen entsprechenden Zusammensetzungen treten bei Temperaturen unter 650°C Maxima der Viskosität auf, deren Höhe mit fallender Temperatur zunimmt.

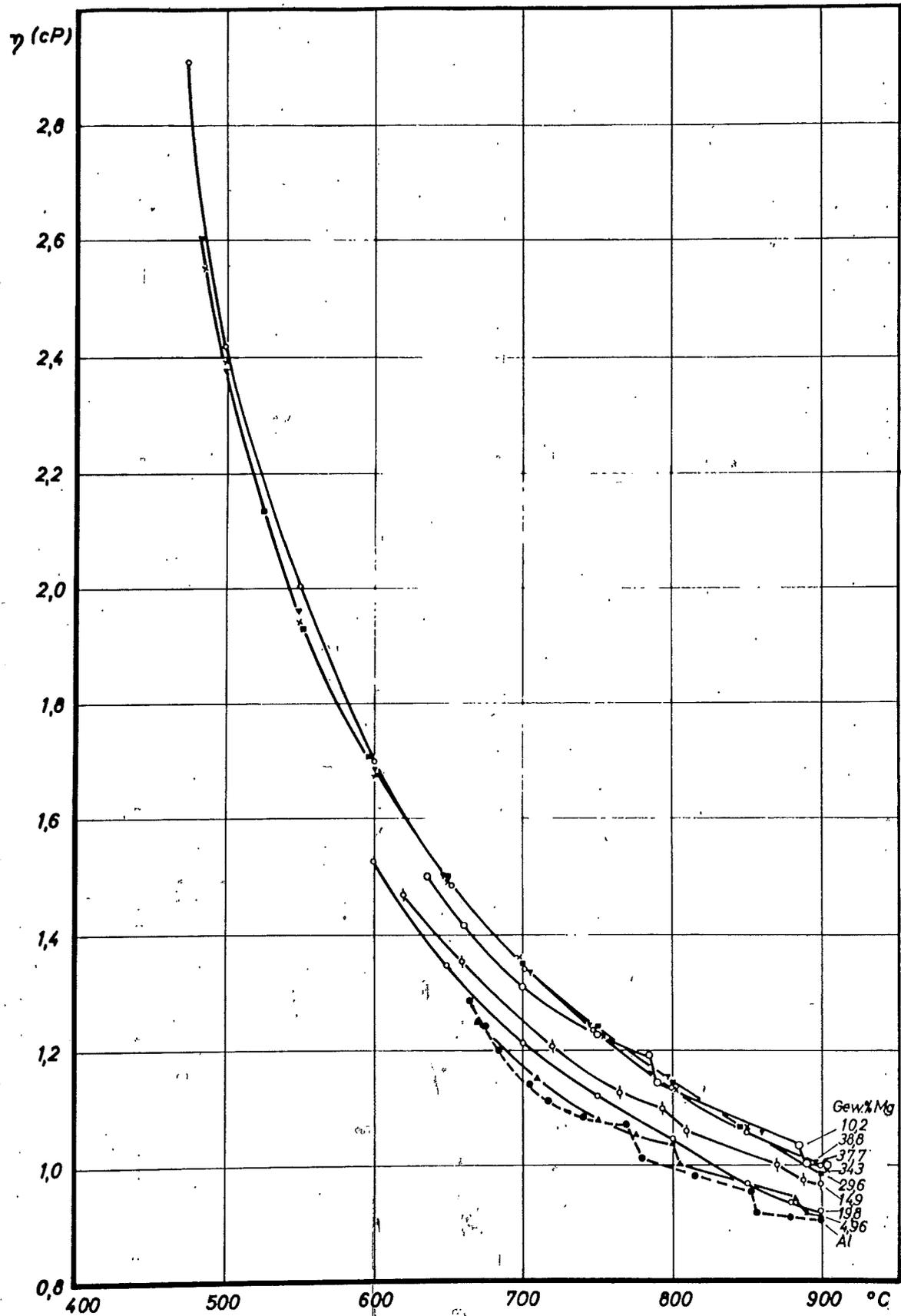


Bild 27: Viskosität-Temperatur-Kurven von AlMg-Legierungen (0 bis 40 Gew.% Mg)

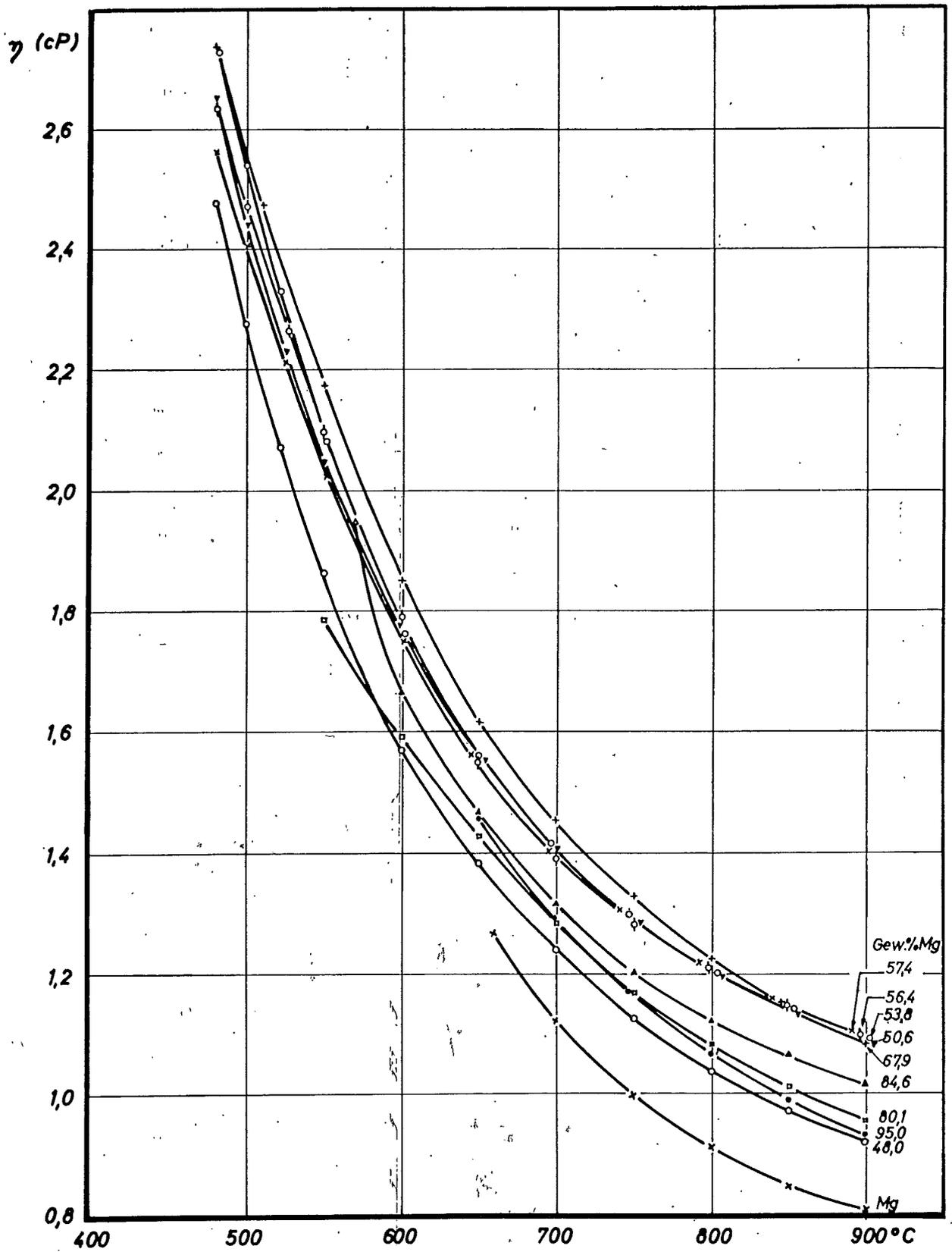


Bild 28: Viskosität-Temperatur-Kurven von AlMg-Legierungen (40 bis 100 Gew.% Mg)

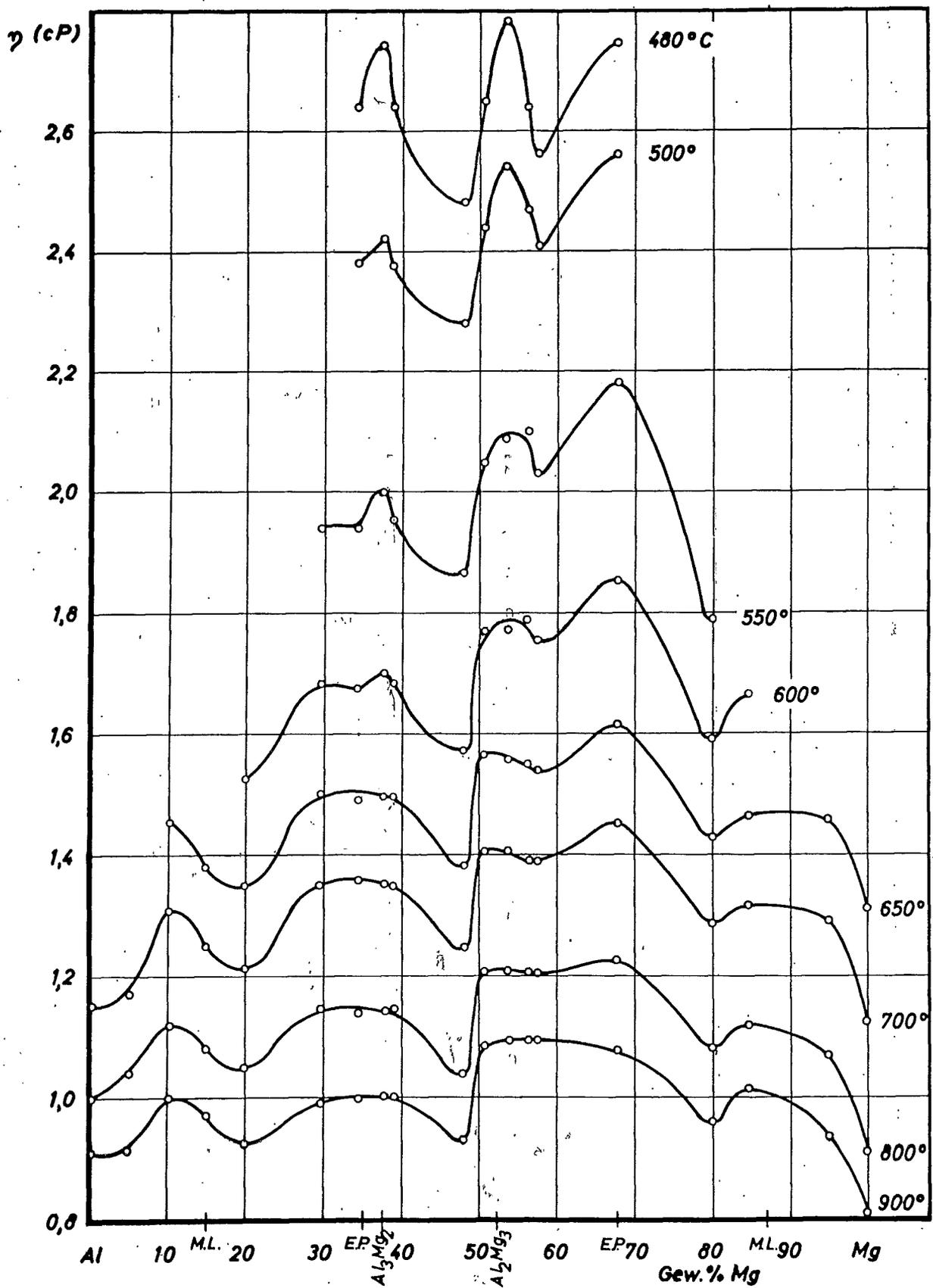


Bild 29: Viskosität-Konzentration-Isothermen von AlMg-Legierungen

4. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE

4.1 UNSTETIGKEITEN IN DEN VISKOSITÄT-TEMPERATUR-KURVEN

4.11 Reinstaluminium

Bei den Messungen an Reinstaluminium wurden Unstetigkeiten im Temperaturverlauf der Dämpfung und damit der Viskosität bei 775°C und 855°C festgestellt (siehe Bild 14 und 15). Die Lage dieser Stufen stimmt mit den Richtungsänderungen (Knicken) im Viskositätsverlauf überein, wie sie von D. Saito und T. Matsukawa (21) sowie von W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) gefunden wurden. Da die von diesen Autoren angegebenen Absolutbeträge der Viskosität ein Vielfaches der später gemessenen Werte betragen, fanden diese Arbeiten offenbar keine Beachtung. Die eigenen Werte für die Viskosität des Reinstaluminiums stimmen dagegen sehr gut mit den Ergebnissen von E. Gebhardt und Mitarbeitern (2) sowie F. Lihl und Mitarbeitern (11) überein, wenn man, wie dies in (11) geschehen ist, die Meßpunkte bei 700° , 800° und 900°C miteinander verbindet.

Diese Unstetigkeiten deuten darauf hin, daß die durch Röntgen- und Neutronenbeugungsuntersuchungen mit steigender Temperatur festgestellte Abnahme der Koordinationszahl bei Aluminium nicht stetig, sondern sprunghaft erfolgt. Die Aussagen auf Grund von Röntgenuntersuchungen sind übrigens noch keineswegs eindeutig. So finden z.B. P. J. Black und J. A. Cundall (27) für die Temperaturabhängigkeit der Koordinationszahl des flüssigen Aluminiums je nach der verwendeten Strahlung einen unterschiedlichen Verlauf:

| Temperatur $^{\circ}\text{C}$ | 670 | 800 | 1000 |
|---|------|-------------|------|
| Koordinationszahl gemessen mit $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ - Strahlung | 11,1 | <u>10,7</u> | 11,2 |
| $\text{Mo}_{\text{K}\alpha}$ - Strahlung | 9,7 | 9,2 | 8,7 |

Bei Verwendung von $\text{Mo}_{\text{K}\alpha}$ - Strahlung nimmt also die Koordinationszahl mit steigender Temperatur gleichmäßig ab, bei $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ - Strahlung dagegen erfolgt nach einem Abfall ein erneuter Anstieg der Koordinationszahl.

Eine ähnliche Unregelmäßigkeit der Koordinationszahl finden auch Je. Ss. Filipow und A. M. Ssamarin (28) bei Dichtemessungen an reinem Eisen. Im Bereich vom Schmelzpunkt bis 1700°C ist nach diesen Messungen die Koordinationszahl 8, über 1700°C jedoch 12.

4.12 Aluminium-Legierungen

Die Unstetigkeiten der Viskosität-Temperatur-Kurven sind auch bei Aluminium-Legierungen zu beobachten (siehe Bilder 17, 22 und 27). Am deutlichsten zeigen dies wohl die Untersuchungen an Aluminium-Silizium-Legierungen. Die Stufenhöhe nimmt in diesem Fall im erfaßten Konzentrationsbereich (bis 23 Gew. % Si) nur wenig ab, sie variiert jedoch im Einklang mit dem Zustandsschaubild (siehe Bild 19). Die Lage der Unstetigkeitsstellen ist bei diesen Legierungen ebenfalls konzentrationsabhängig, wobei für die 775°C -Unstetigkeit ebenfalls ein Zusammenhang mit dem Zustandsschaubild festzustellen ist (siehe Bild 18).

Im System Aluminium-Kupfer (Bild 22) können die Unstetigkeitsstellen bis knapp unter die eutektische Konzentration nachgewiesen werden, wobei die Tendenz einer Verschiebung gegen höhere Temperaturen zu erkennen ist. Im übereutektischen Gebiet verlaufen die Viskositätskurven stetig.

Bei Aluminium-Magnesium-Legierungen wurden die Unstetigkeiten nur bis ungefähr 15 Gew. % Mg beobachtet.

Da bei Aluminium-Zink-Legierungen die Versuchstemperatur wegen des hohen Dampfdruckes des Zinks im Temperaturbereich der Unstetigkeiten mit 750°C begrenzt war, konnte naturgemäß keine Aussage über Unstetigkeiten gemacht werden.

Die Stufen in den Viskosität-Temperatur-Kurven sind somit eine Eigenschaft des Aluminiums. Sie werden durch Legieren mit Metallen wie Kupfer und Magnesium immer weniger ausgeprägt und verschwinden schließlich. Von den untersuchten Legierungselementen wirkt (wenn man Zink außer Betracht läßt) in diesem Sinn am stärksten Magnesium, gefolgt von Kupfer. Bei Aluminium-Silizium-Legierungen nimmt, wie schon erwähnt, die Höhe der Stufen im untersuchten Konzentrationsbereich nur wenig ab.

4.2 DIFFERENTIAL-THERMOANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN AN REINSTALUMINIUM

Die un stetige Temperaturabhängigkeit der Viskosität kann als un stetige Änderung der Koordinationszahl in der Schmelze gedeutet werden. Eine solche Änderung der Koordinationszahl muß sich als Wärmetönung an den Unstetigkeitsstellen äußern, die jedoch, entsprechend dem gelockerten Bindungszustand in der Schmelze, im Vergleich zu einer Wärmetönung bei einer Umwandlung im festen Zustand nur sehr klein sein kann.

Der Nachweis solcher Wärmetönungen wird am sichersten differentialthermoanalytisch erbracht. In Zusammenarbeit mit W. Lugscheider wurde nach der von ihm entwickelten Methode (31) Reinstaluminium untersucht, wobei als Vergleichssubstanz die Aluminiumlegierung mit 39,2 Gew.% Cu verwendet wurde, die nach Bild 22 keine Unstetigkeiten im Viskositätsverlauf zeigt. Die Auswertung der DTA-Kurven ergab die in Bild 30 dargestellte Temperaturabhängigkeit der Differenztemperatur. Demnach ändert sich bei 773 und bei 858°C die Steigung der sonst linear von der Temperatur abhängigen Differenztemperatur un stetig (Knicke). Die Übereinstimmung der Lage der Unstetigkeiten der Viskosität-Temperatur-Kurven mit der Lage der Knicke ist als vollständig zu bezeichnen. Der Unterschied beträgt nur 2 bzw. 3°C. Aus der Richtung der Gradientenänderung in Bild 30 kann im vorliegenden Fall auf eine sprunghafte Zunahme der spezifischen Wärme bei beiden Temperaturen geschlossen werden.

Damit ist erstmals der Beweis für eine Umwandlung im flüssigen Zustand erbracht. Diese Umwandlung, bei der eine un stetige Änderung der Koordinationszahl erfolgt, kann in Analogie zu einer polymorphen Umwandlung im festen kristallinen Zustand gesetzt werden.

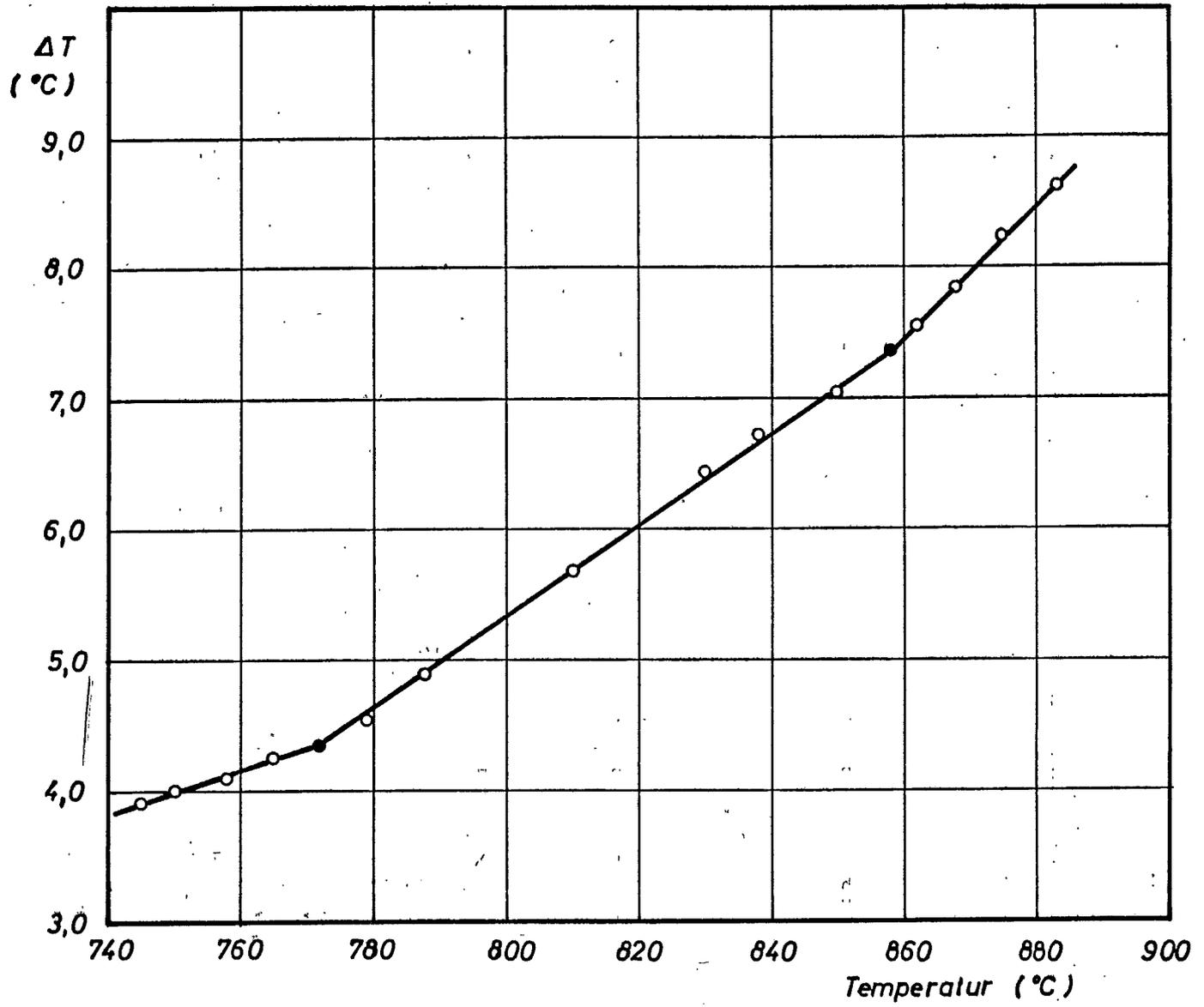


Bild 30: Temperaturabhängigkeit der Differenztemperatur zwischen Al und AlCu_{39,2}

4.3 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN VISKOSITÄT UND ZUSTANDSSCHAUBILD

Ein solcher Zusammenhang kommt in den Viskosität-Konzentration-Isothermen deutlich zum Ausdruck. Sowohl die maximale Löslichkeit, wie auch eutektische Punkte und intermetallische Verbindungen äußern sich in diesen Kurven in ganz charakteristischer Weise. Sogar Entmischungen im festen Zustand, wie im System Al-Zn, können nachgewiesen werden.

4.31 Maximale Löslichkeit

Die maximale Löslichkeit tritt bei den AlCu-Legierungen in den Viskosität-Konzentration-Isothermen als Maximum in Erscheinung (siehe Bild 23).

W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) stellten ebenfalls diese Gesetzmäßigkeit fest, während nach E. Gebhardt und Mitarbeiter (2) (4) bis 12 Gew.% Cu ein linearer Anstieg der Viskosität erfolgen soll. Die Absolutwerte der Viskosität stimmen unterhalb der maximalen Löslichkeit mit den von (2) und (4) angegebenen Zahlen hinreichend gut überein, während die von (22) ermittelten Werte etwa viermal so groß sind.

Auch in den Viskosität-Konzentration-Isothermen der Aluminium-Magnesium-Legierungen äußern sich die Löslichkeitsgrenzen sowohl auf der Aluminium- wie auf der Magnesiumseite als Maxima (siehe Bild 29). Das Maximum auf der Aluminiumseite liegt jedoch einige Gew.% tiefer als der von (20) angegebene Wert. Während der von W.R.D. Jones und W.L. Bartlett (22) erhaltene Kurvenverlauf grundsätzlich mit den eigenen Messungen übereinstimmt, ist in den von K. Detering (24) angegebenen Kurven kein Anzeichen für eine solche Gesetzmäßigkeit zu erkennen.

Im System Aluminium-Zink nimmt die Viskosität bis zur Löslichkeitsgrenze (82 Gew.% Zink) nur wenig zu, steigt jedoch oberhalb 82 Gew.% Zink sehr steil zum Viskositätswert des Zinks an. Dies findet auch K. Detering (24).

Bei Aluminium-Silizium-Legierungen ist die Konzentration der maximalen Löslichkeit im Viskositätsverlauf nicht klar zu erkennen. Dies ist vielleicht darin begründet, daß Silizium im Gegensatz zu den anderen hier unter-

suchten Legierungszusätzen die Viskosität des Aluminiums herabsetzt. K. Detering (24) findet ebenfalls keine Kennzeichen bei dieser Konzentration.

4.32 Eutektische Konzentration

F. Lihl und Mitarbeiter (11) haben bei Aluminium-Eisen-Legierungen bei der eutektischen Konzentration eine Abweichung vom monotonen Kurvenverlauf festgestellt. Knapp vor dem eutektischen Punkt lagen die Viskositätswerte etwas oberhalb, knapp nachher etwas unterhalb einer monotonen Kurve.

Bei Aluminium-Kupfer- und Aluminium-Zink-Legierungen (siehe Bild 23 bzw. 26) ist der gleiche Kurvenverlauf zu erkennen. Im System Al-Cu ist eine geringe Temperaturabhängigkeit dieses Effektes festzustellen, die im System Al-Zn stark ausgeprägt ist. Oberhalb 650°C ist im letzteren Fall der Kurvenverlauf nahezu monoton. K. Detering (24) untersuchte bei AlZn-Legierungen ebenfalls den Bereich um die eutektische Konzentration, konnte jedoch keine Abweichung vom monotonen Kurvenverlauf nachweisen.

Bei Aluminium-Magnesium-Legierungen (Bild 29) tritt der eutektische Punkt bei 35,5 Gew.% Mg wahrscheinlich wegen der Nähe der intermetallischen Verbindungen Al_3Mg_2 nicht in Erscheinung; bei 67,7 Gew.% Mg hingegen ist ein stark temperaturabhängiges Maximum zu erkennen.

Für die Aluminium-Silizium-Legierungen (Bild 20) kann ebenfalls bei der eutektischen Konzentration ein charakteristischer, temperaturabhängiger Kurvenverlauf, nämlich ein Viskositätsminimum, festgestellt werden. Eine Deutung als Meßwertstreuung, wie sie K. Detering (24) gibt, scheint im Hinblick auf die übrigen hier untersuchten Legierungen wohl nicht mehr vertretbar.

4.33 Intermetallische Verbindungen

Im System Aluminium-Magnesium treten die Verbindungen Al_3Mg_2 und Al_2Mg_3 auf. Bei den diesen Verbindungen entsprechenden Konzentrationen

zeigen die Viskosität-Isothermen unterhalb 650°C ausgeprägte Maxima, die als Vorordnung gedeutet werden können. Auch die verschiedene Breite der Homogenitätsbereiche der beiden Verbindungen spiegelt sich in den Viskosität-Konzentration-Isothermen wieder. Dem gegenüber der Verbindung Al_3Mg_2 breiteren Homogenitätsbereich der Verbindung Al_2Mg_3 entspricht ein breiteres Maximum in der Viskositätskurve.

K. Detering (24) konnte an der Stelle der Verbindung Al_3Mg_2 ein ähnliches Verhalten der Viskosität feststellen, wobei jedoch das Maximum der Viskosität bis etwa 1000°C beobachtbar sein soll. Diese Aussage kann nicht bestätigt werden, da auf Grund der eigenen Messungen sich Änderungen im festen Zustand, wie Verbindungen und eutektische Punkte, nur im Temperaturbereich bis rund 150°C über der Liquidustemperatur in den Viskosität-Konzentration-Isothermen kundtun.

Dichtemessungen von E. Pelzel (19) bestätigen ebenfalls das Bestehen einer Vorordnung in AlMg -Schmelzen an den Stellen der Verbindungen. Das spezifische Volumen erfährt dort eine starke Kontraktion gegenüber der Mischungsregel.

Hingegen geben Röntgenuntersuchungen von S. Steeb und S. Woerner (29) an Aluminium-Magnesium-Legierungen keinen Hinweis auf das Bestehen der beiden intermetallischen Verbindungen. Dies ist besonders verwunderlich, da S. Steeb und H. Entress (30) im System Magnesium-Zinn bei der Zusammensetzung Mg_2Sn ein deutliches Minimum des Radius der ersten Koordinationssphäre bis 150°C oberhalb der Liquidustemperatur gefunden haben. (Dieser Temperaturbereich von 150°C stimmt übrigens mit dem Vorordnungsbereich, wie er bei den gegenständlichen Untersuchungen bei Al_3Mg_2 und Al_2Mg_3 beobachtet wurde, überein.)

4.34 Mischungslücke im festen Zustand

Eine breite Mischungslücke tritt bei Aluminium-Zink-Legierungen mit einem Maximum bei rund 60 Gew.% Zn auf. Gerade an dieser Stelle besitzen aber auch die Viskosität-Konzentration-Isothermen ein schwaches, temperaturabhängiges Maximum (siehe Bild 26).

5. ZUSAMMENFASSUNG

Unter Anwendung der Schwingtiegelmethode werden Messungen an Reinstaluminium und an Legierungen des Aluminiums mit Silizium, Kupfer, Zink und Magnesium durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen können in folgende drei Punkte zusammengefaßt werden:

1. Der Verlauf der Viskosität-Konzentration-Isothermen hängt innig mit dem Schmelzdiagramm zusammen. Im einzelnen wurde festgestellt, daß sich alle Veränderungen im festen Zustand wie Löslichkeitsgrenzen, eutektische Punkte, Verbindungen und auch Mischungslücken schon weit oberhalb der Liquiduskurve in den Viskositätskurven in ganz charakteristischer Weise abzeichnen.
2. Bei den Messungen an Reinstaluminium wurden bei 775° und 855° C un-
stetige Änderungen der Viskosität festgestellt, die sich in scharf ausgeprägten Stufen in der Viskosität-Temperatur-Kurve äußern. Auf Grund der Ergebnisse differential-thermoanalytischer Untersuchungen sind diese Stufen auf un-
stetige Änderungen der Koordinationszahl also auf Umwandlungen zurückzuführen, die in Analogie mit polymorphen Umwandlungen im festen Zustand gesetzt werden können.
3. Die bei Reinstaluminium beobachteten Stufen wurden auch auf der Aluminiumseite der binären Legierungssysteme Aluminium-Silizium, Aluminium-Kupfer und Aluminium-Magnesium nachgewiesen. Bei den Aluminium-Zink-Legierungen waren wegen des hohen Dampfdruckes des Zinks Untersuchungen im interessierenden Temperaturbereich nicht möglich. An allgemeinen Gesetzmäßigkeiten konnte festgestellt werden, daß ab einer bestimmten, vom Zusatzelement abhängigen Konzentration, die Viskosität-Temperatur-Kurven den bisher bekannten glatten Verlauf zeigen und daß die Lage und die Höhe der Stufen ebenfalls von der Konzentration des Zusatzelementes abhängig sind.

6. LITERATURNACHWEIS

- (1) A. Knappwost
Z. physik. Chemie (Leipzig) 200 (1952) 81/89
- (2) E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner
Z. Metallkde. 44 (1953) 510/514
- (3) E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner
Z. Metallkde. 45 (1954) 83/85
- (4) E. Gebhardt, M. Becker, S. Dorner
Aluminium 31 (1955) 315/321
- (5) E. Gebhardt, K. Detering
Z. Metallkde. 50 (1959) 379/385
- (6) T. P. Yao
Forsch. Ber. Wirtsch.- u. Verkehrsminist.
Nordrhein-Westfalen Nr.336 (1956)
- (7) V. M. Glazow, Y. C. Chystiakov
Bull. Acad. Sci. UdSSR 7 (1958) 141/143
- (8) A. Knappwost
Z. Metallkde. 39 (1948) 314
- (9) E. Gebhardt, M. Becker
Z. Metallkde. 42 (1951) 111/117
- (10) F. Kohlrusch
Praktische Physik (1960), Bd. 1, S. 149
B. G. Teubner Verlagsgesellschaft (Stuttgart)
- (11) F. Lihl, E. Nachtigall, G. Pointner
Metall 18 (1964) 1054/1064
- (12) H. R. Kirchmayr
Österr. Chemiker Ztg. 65 (1964) 72/73
- (13) J. Budde, K. Fischer, W. Menz, F. Sauerwald
Z. physik. Chemie (Leipzig) 218 (1961) 100/107
- (14) E. Gebhardt, M. Becker, H. Sebastian
Z. Metallkde. 46 (1955) 669/672

- (15) S. Dorner
Dissertation T. H. Stuttgart (1952)
- (16) Information Bulletin 25
Equilibrium Diagrams of Aluminium Alloy Systems
The Aluminium Development Association
- (17) K. Bornemann, F. Sauerwald
Z. Metallkde. 14 (1922) 145/159
- (18) H. W. L. Phillips
Inst. Metals Monograph No. 25, (1959)
- (19) E. Pelzel
Z. Metallkde. 32 (1949) 7/9
- (20) M. Hansen
Constitution of Binary Alloys
McGraw-Hill Book Company, Inc. (1958)
- (21) D. Saito, T. Matsukawa
Mem. Coll. Engng. Kyoto Imp. Univ. 7 (1932) 49
- (22) W. R. D. Jones, W. L. Bartlett
J. Inst. Metals 81 (1952) 145/52
- (23) L. A. Koledov, A. P. Ljubimov
Hochschulnachr. (Moskau), Eisen-
metallurgie 6 (1963) Nr. 9, 136/41
- (24) K. Detering
Dissertation T. H. Stuttgart (1959)
- (25) T. P. Yao, V. Kondic
J. Inst. Metals 81 (1952) 17/24
- (26) D. Ofte, L. J. Wittenberg
Trans. metallurg. Soc. AIME
Vol 227 (1963) 706/711
- (27) P. J. Black, J. A. Cundall
Acta Cryst. (Copenhagen) 19 (1965) 807
- (28) Je. Ss. Filippow, A. M. Ssamarin
Doklady Akad. Nauk SSSR 165 (1965) 85/87

- (29) S. Steeb, S. Woerner
Z. Metallkde. 56 (1965) 771/775
- (30) S. Steeb, H. Entress
Z. Metallkde. 57 (1966) 803/807
- (31) W. Lugscheider
Ber. d. Bunsenges. f. physik. Chemie
im Druck

7. TABELLEN

Tabelle 1

Temperaturabhängigkeit des Nulldekrementes

| Temperatur (°C) | 900 | 800 | 700 | 600 | 500 | 400 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Nulldekrement $\lambda_0 \cdot 10^3$ | 5,05 | 4,80 | 4,55 | 4,31 | 4,06 | 3,81 |

Tabelle 2

Temperaturabhängigkeit der Eichkonstanten K
der verwendeten Tiegel
(Zinn-Eichung)

| Temperatur (°C) | Tiegel Nr. | | | | | |
|--------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 900 | 1,2875 | 1,3130 | 1,3665 | 1,2995 | 1,3350 | 1,3285 |
| 850 | 1,2860 | 1,3115 | 1,3645 | 1,2980 | 1,3335 | 1,3260 |
| 800 | 1,2835 | 1,3090 | 1,3620 | 1,2950 | 1,3310 | 1,3220 |
| 750 | 1,2800 | 1,3050 | 1,3580 | 1,2915 | 1,3280 | 1,3175 |
| 700 | 1,2765 | 1,3015 | 1,3545 | 1,2880 | 1,3240 | 1,3120 |
| 650 | 1,2725 | 1,2975 | 1,3510 | 1,2840 | 1,3200 | 1,3065 |
| 600 | 1,2670 | 1,2930 | 1,3465 | 1,2795 | 1,3155 | 1,3010 |
| 550 | 1,2595 | 1,2850 | 1,3410 | 1,2730 | 1,3105 | 1,2945 |
| 500 | 1,2500 | 1,2755 | 1,3330 | 1,2640 | 1,3050 | 1,2870 |
| 450 | 1,2385 | 1,2635 | 1,3230 | 1,2525 | 1,2990 | 1,2785 |

Tabelle 3

Temperaturabhängigkeit von Dichte, log.Dekrement,
Schwingungsdauer und Viskosität bei Aluminium

| Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log.Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungs- dauer (s) | Viskosität (cP) |
|--------------------|--------------------------------|--|------------------------------|--------------------|
| 658* | 2,368 | | | |
| 665 | 2,367 | 7,070 (1) | 10,10 | 1,290 |
| 675 | 2,364 | 6,950 | 10,09 | 1,243 |
| 685 | 2,362 | 6,845 | 10,09 | 1,204 |
| 705 | 2,356 | 6,690 | 10,09 | 1,144 |
| 725 | 2,351 | 6,585 | 10,09 | 1,102 |
| 745 | 2,345 | 6,550 | 10,09 | 1,087 |
| 770 | 2,341 | 6,525 | 10,09 | 1,072 |
| 780 | 2,336 | 6,360 | 10,10 | 1,013 |
| 820 | 2,325 | 6,285 | 10,10 | 0,984 |
| 854 | 2,316 | 6,220 | 10,11 | 0,960 |
| 857 | 2,315 | 6,110 | 10,11 | 0,922 |
| 880 | 2,309 | 6,105 | 10,11 | 0,916 |
| 900 | 2,304 | 6,100 | 10,11 | 0,913 |

Tabelle 4

Temperaturabhängigkeit von Dichte, log.Dekrement, Schwingungsdauer und Viskosität von Aluminium-Silizium-Legierungen

| Silizium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log.Dekrement $(\lambda - \lambda_0) \cdot 10^2$ (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|
| 1,74 | 649* | 2,366 | (1) | 10,08 | 1,208 |
| | 676 | 2,358 | | | |
| | 695 | 2,353 | | | |
| | 720 | 2,346 | | | |
| | 750 | 2,338 | | | |
| | 786 | 2,328 | | | |
| | 792 | 2,327 | | | |
| | 842 | 2,333 | | | |
| | 852 | 2,311 | | | |
| | 900 | 2,298 | | | |
| 3,94 | 630* | 2,363 | (1) | 10,07 | 1,158 |
| | 670 | 2,352 | | | |
| | 710 | 2,341 | | | |
| | 750 | 2,331 | | | |
| | 798 | 2,317 | | | |
| | 808 | 2,315 | | | |
| | 862 | 2,300 | | | |
| | 868 | 2,298 | | | |
| | 900 | 2,290 | | | |
| | 8,66 | 609* | | | |
| 650 | | 2,341 | | | |
| 690 | | 2,330 | | | |
| 730 | | 2,319 | | | |
| 780 | | 2,306 | | | |
| 796 | | 2,302 | | | |
| 858 | | 2,285 | | | |
| 869 | | 2,282 | | | |
| 900 | | 2,274 | | | |
| 11,8 | | 578* | 2,348 | (1) | 10,03 |
| | 640 | 2,331 | | | |
| | 690 | 2,318 | | | |
| | 730 | 2,307 | | | |
| | 780 | 2,294 | | | |
| | 790 | 2,291 | | | |
| | 858 | 2,273 | | | |
| | 872 | 2,269 | | | |
| | 900 | 2,262 | | | |
| | 13,0 | 596* | 2,338 | | |
| 625 | | 2,331 | | | |
| 660 | | 2,322 | | | |
| 700 | | 2,311 | | | |
| 760 | | 2,295 | | | |
| 800 | | 2,284 | | | |
| 811 | | 2,282 | | | |
| 860 | | 2,269 | | | |
| 870 | | 2,266 | | | |
| 900 | | 2,258 | | | |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 4

| Silizium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement $(\lambda - \lambda_0) \cdot 10^2$ (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|
| | 660* | 2,306 | | | |
| | 680 | 2,301 | 6,20 (1) | 10,04 | 1,020 |
| | 710 | 2,293 | 6,04 | 10,04 | 0,962 |
| | 750 | 2,283 | 5,88 | 10,04 | 0,903 |
| 17,3 | 780 | 2,275 | 5,81 | 10,04 | 0,876 |
| | 803 | 2,269 | 5,80 | 10,05 | 0,867 |
| | 814 | 2,266 | 5,70 | 10,06 | 0,835 |
| | 856 | 2,255 | 5,68 | 10,06 | 0,822 |
| | 860 | 2,254 | 5,56 | 10,07 | 0,787 |
| | 900 | 2,243 | 5,52 | 10,08 | 0,774 |
| | 739* | 2,265 | | | |
| | 740 | 2,265 | 5,85 (1) | 10,03 | 0,921 |
| | 750 | 2,262 | 5,77 | 10,02 | 0,895 |
| | 772 | 2,256 | 5,72 | 10,02 | 0,873 |
| 23,4 | 800 | 2,249 | 5,70 | 10,03 | 0,862 |
| | 812 | 2,246 | 5,58 | 10,04 | 0,824 |
| | 846 | 2,237 | 5,57 | 10,04 | 0,815 |
| | 858 | 2,234 | 5,43 | 10,05 | 0,773 |
| | 900 | 2,223 | 5,42 | 10,06 | 0,764 |

Tabelle 5

Temperaturabhängigkeit von Dichte, log.Dekrement, Schwingungsdauer und Viskosität bei Aluminium-Kupfer-Legierungen

| Kupfer Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log.Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|---------------|-----------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------|
| 1,09 | 656* | 2,389 | | | |
| | 678 | 2,383 | 6,97 | (1) | 10,12 |
| | 694 | 2,378 | 6,80 | | 10,12 |
| | 710 | 2,374 | 6,69 | | 10,13 |
| | 750 | 2,363 | 6,58 | | 10,13 |
| | 782 | 2,354 | 6,56 | | 10,13 |
| | 791 | 2,352 | 6,42 | | 10,13 |
| | 856 | 2,333 | 6,29 | | 10,14 |
| | 862 | 2,332 | 6,20 | | 10,14 |
| | 900 | 2,322 | 6,16 | | 10,15 |
| 5,82 | 645* | 2,480 | | | |
| | 670 | 2,473 | 7,48 | (1) | 10,15 |
| | 700 | 2,465 | 7,27 | | 10,15 |
| | 730 | 2,457 | 7,15 | | 10,15 |
| | 761 | 2,448 | 7,11 | | 10,15 |
| | 780 | 2,443 | 6,90 | | 10,16 |
| | 858 | 2,422 | 6,72 | | 10,16 |
| | 868 | 2,419 | 6,58 | | 10,16 |
| | 900 | 2,410 | 6,56 | | 10,16 |
| 9,60 | 632* | 2,564 | | | |
| | 650 | 2,557 | 7,77 | (6) | 9,83 |
| | 700 | 2,542 | 7,38 | | 9,84 |
| | 730 | 2,533 | 7,25 | | 9,84 |
| | 773 | 2,520 | 7,18 | | 9,84 |
| | 790 | 2,515 | 6,99 | | 9,84 |
| | 850 | 2,497 | 6,82 | | 9,84 |
| | 865 | 2,492 | 6,69 | | 9,85 |
| | 900 | 2,482 | 6,66 | | 9,85 |
| 15,6 | 610* | 2,699 | | | |
| | 644 | 2,688 | 7,96 | (1) | 10,15 |
| | 670 | 2,680 | 7,73 | | 10,15 |
| | 710 | 2,667 | 7,46 | | 10,15 |
| | 750 | 2,655 | 7,30 | | 10,15 |
| | 782 | 2,645 | 7,28 | | 10,15 |
| | 795 | 2,641 | 7,12 | | 10,15 |
| | 854 | 2,622 | 7,01 | | 10,16 |
| | 864 | 2,618 | 6,92 | | 10,16 |
| 900 | 2,607 | 6,87 | | 10,16 | |
| 26,2 | 575* | 2,952 | | | |
| | 600 | 2,946 | 9,58 | (1) | 10,16 |
| | 650 | 2,932 | 9,07 | | 10,16 |
| | 700 | 2,920 | 8,65 | | 10,16 |
| | 750 | 2,908 | 8,38 | | 10,16 |
| | 784 | 2,897 | 8,24 | | 10,16 |
| | 818 | 2,888 | 7,93 | | 10,16 |
| | 863 | 2,877 | 7,88 | | 10,16 |
| | 876 | 2,873 | 7,74 | | 10,16 |
| 900 | 2,867 | 7,66 | | 10,16 | |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 5

| Kupfer Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) | |
|---------------|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|-------|
| 30,3 | 558* | 3,094 | | | | |
| | 600 | 3,080 | 10,34 | (6) | 9,88 | 2,060 |
| | 650 | 3,064 | 9,86 | | 9,87 | 1,847 |
| | 700 | 3,046 | 9,42 | | 9,86 | 1,657 |
| | 750 | 3,030 | 9,07 | | 9,86 | 1,520 |
| | 795 | 3,015 | 8,83 | | 9,86 | 1,424 |
| | 810 | 3,010 | 8,60 | | 9,86 | 1,348 |
| | 855 | 2,993 | 8,43 | | 9,86 | 1,280 |
| | 870 | 2,990 | 8,28 | | 9,87 | 1,232 |
| | 900 | 2,980 | 8,21 | | 9,87 | 1,205 |
| 33,1 | 548* | 3,173 | | | | |
| | 585 | 3,171 | 10,69 | (1) | 10,14 | 2,220 |
| | 610 | 3,163 | 10,37 | | 10,13 | 2,075 |
| | 650 | 3,150 | 9,82 | | 10,12 | 1,845 |
| | 700 | 3,133 | 9,46 | | 10,12 | 1,690 |
| | 750 | 3,117 | 9,06 | | 10,12 | 1,533 |
| | 800 | 3,101 | 8,75 | | 10,12 | 1,415 |
| | 855 | 3,082 | 8,50 | | 10,12 | 1,320 |
| | 876 | 3,076 | 8,28 | | 10,12 | 1,250 |
| | 900 | 3,068 | 8,24 | | 10,12 | 1,234 |
| 35,1 | 554* | 3,252 | | | | |
| | 620 | 3,231 | 10,62 | (1) | 10,14 | 2,112 |
| | 650 | 3,221 | 10,27 | | 10,14 | 1,962 |
| | 700 | 3,205 | 9,80 | | 10,13 | 1,762 |
| | 750 | 3,189 | 9,39 | | 10,13 | 1,600 |
| | 800 | 3,173 | 9,06 | | 10,13 | 1,475 |
| | 850 | 3,158 | 8,77 | | 10,14 | 1,370 |
| | 880 | 3,148 | 8,57 | | 10,14 | 1,314 |
| | 900 | 3,141 | 8,50 | | 10,14 | 1,277 |
| | 35,8 | 555* | 3,284 | | | |
| 570 | | 3,278 | 11,78 | (5) | 9,89 | 2,478 |
| 610 | | 3,265 | 11,31 | | 9,89 | 2,263 |
| 650 | | 3,250 | 10,92 | | 9,88 | 2,089 |
| 700 | | 3,233 | 10,42 | | 9,88 | 1,883 |
| 750 | | 3,217 | 9,96 | | 9,88 | 1,700 |
| 800 | | 3,200 | 9,57 | | 9,88 | 1,552 |
| 855 | | 3,180 | 9,16 | | 9,89 | 1,407 |
| 876 | | 3,174 | 9,06 | | 9,90 | 1,370 |
| 900 | | 3,165 | 8,98 | | 9,90 | 1,341 |
| 39,2 | 565* | 3,385 | | | | |
| | 590 | 3,380 | 12,25 | (1) | 10,18 | 2,712 |
| | 650 | 3,364 | 11,41 | | 10,18 | 2,320 |
| | 700 | 3,351 | 10,89 | | 10,18 | 2,093 |
| | 750 | 3,338 | 10,50 | | 10,18 | 1,926 |
| | 800 | 3,325 | 10,22 | | 10,18 | 1,807 |
| | 850 | 3,311 | 9,96 | | 10,18 | 1,702 |
| | 900 | 3,298 | 9,70 | | 10,18 | 1,604 |

*) Liquidustemperatur

Tabelle 6

Temperaturabhängigkeit von Dichte, log. Dekrement, Schwingungsdauer und Viskosität bei Aluminium-Magnesium Legierungen

| Magnesium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement $(\lambda - \lambda_0) \cdot 10^2$ (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------|
| 4,96 | 640* | 2,338 | | | |
| | 670 | 2,330 | 7,08 | (2) 10,12 | 1,251 |
| | 710 | 2,319 | 6,83 | 10,12 | 1,153 |
| | 750 | 2,308 | 6,64 | 10,12 | 1,080 |
| | 775 | 2,302 | 6,58 | 10,12 | 1,055 |
| | 800 | 2,296 | 6,56 | 10,12 | 1,042 |
| | 805 | 2,294 | 6,47 | 10,12 | 1,007 |
| | 882 | 2,273 | 6,30 | 10,12 | 0,946 |
| | 890 | 2,271 | 6,21 | 10,12 | 0,919 |
| | 900 | 2,268 | 6,19 | 10,12 | 0,912 |
| 10,19 | 615* | 2,308 | | | |
| | 637 | 2,302 | 7,55 | (1) 10,14 | 1,504 |
| | 650 | 2,298 | 7,44 | 10,14 | 1,455 |
| | 700 | 2,286 | 7,11 | 10,14 | 1,314 |
| | 750 | 2,272 | 6,91 | 10,14 | 1,228 |
| | 785 | 2,263 | 6,84 | 10,14 | 1,193 |
| | 790 | 2,262 | 6,71 | 10,14 | 1,145 |
| | 885 | 2,237 | 6,46 | 10,14 | 1,038 |
| | 890 | 2,236 | 6,34 | 10,14 | 1,005 |
| | 900 | 2,234 | 6,33 | 10,14 | 1,000 |
| 14,9 | 594* | 2,269 | | | |
| | 620 | 2,262 | 7,45 | (4) 10,08 | 1,471 |
| | 660 | 2,252 | 7,18 | 10,07 | 1,356 |
| | 720 | 2,237 | 6,80 | 10,07 | 1,208 |
| | 765 | 2,226 | 6,60 | 10,08 | 1,127 |
| | 793 | 2,220 | 6,54 | 10,08 | 1,100 |
| | 810 | 2,215 | 6,43 | 10,08 | 1,060 |
| | 870 | 2,200 | 6,30 | 10,08 | 1,005 |
| | 888 | 2,196 | 6,23 | 10,08 | 0,980 |
| | 900 | 2,193 | 6,22 | 10,08 | 0,971 |
| 19,8 | 565* | 2,231 | | | |
| | 584 | 2,226 | 7,61 | (1) - 10,12 | 1,600 |
| | 600 | 2,223 | 7,45 | 10,12 | 1,527 |
| | 650 | 2,210 | 7,05 | 10,11 | 1,349 |
| | 700 | 2,199 | 6,72 | 10,10 | 1,213 |
| | 750 | 2,186 | 6,50 | 10,11 | 1,121 |
| | 800 | 2,174 | 6,32 | 10,11 | 1,048 |
| | 850 | 2,162 | 6,11 | 10,12 | 0,970 |
| | 900 | 2,150 | 5,98 | 10,12 | 0,922 |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 6

| Magnesium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) | |
|------------------|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|-------|
| 29,6 | 496* | 2,163 | | | | |
| | 525 | 2,156 | 8,60 | (1) | 10,12 | 2,135 |
| | 550 | 2,150 | 8,23 | | 10,12 | 1,938 |
| | 600 | 2,139 | 7,75 | | 10,11 | 1,691 |
| | 650 | 2,128 | 7,35 | | 10,11 | 1,502 |
| | 700 | 2,116 | 7,02 | | 10,10 | 1,355 |
| | 750 | 2,105 | 6,75 | | 10,10 | 1,240 |
| | 800 | 2,094 | 6,53 | | 10,10 | 1,147 |
| | 850 | 2,082 | 6,32 | | 10,10 | 1,063 |
| | 900 | 2,071 | 6,12 | | 10,11 | 0,990 |
| 34,3 | 462* | 2,128 | | | | |
| | 486 | 2,122 | 9,48 | (2) | 10,20 | 2,553 |
| | 500 | 2,120 | 9,20 | | 10,17 | 2,393 |
| | 550 | 2,108 | 8,37 | | 10,16 | 1,940 |
| | 600 | 2,098 | 7,82 | | 10,15 | 1,670 |
| | 650 | 2,088 | 7,43 | | 10,15 | 1,488 |
| | 700 | 2,077 | 7,10 | | 10,15 | 1,358 |
| | 750 | 2,067 | 6,83 | | 10,15 | 1,233 |
| | 800 | 2,056 | 6,59 | | 10,15 | 1,133 |
| | 850 | 2,046 | 6,38 | | 10,15 | 1,070 |
| 900 | 2,036 | 6,19 | | 10,14 | 0,986 | |
| 37,7 | 453* | 2,102 | | | | |
| | 475 | 2,098 | 9,86 | (4) | 10,12 | 2,910 |
| | 500 | 2,092 | 9,20 | | 10,12 | 2,425 |
| | 550 | 2,082 | 8,30 | | 10,12 | 2,002 |
| | 600 | 2,072 | 7,70 | | 10,12 | 1,697 |
| | 650 | 2,062 | 7,26 | | 10,12 | 1,490 |
| | 700 | 2,052 | 6,94 | | 10,11 | 1,347 |
| | 750 | 2,042 | 6,67 | | 10,10 | 1,232 |
| | 800 | 2,032 | 6,45 | | 10,10 | 1,140 |
| | 850 | 2,022 | 6,25 | | 10,10 | 1,060 |
| 900 | 2,012 | 6,10 | | 10,10 | 1,002 | |
| 38,8 | 452* | 2,091 | | | | |
| | 484 | 2,090 | 9,38 | (2) | 10,18 | 2,605 |
| | 500 | 2,082 | 9,09 | | 10,18 | 2,375 |
| | 550 | 2,072 | 8,34 | | 10,18 | 1,961 |
| | 600 | 2,062 | 7,79 | | 10,17 | 1,684 |
| | 650 | 2,052 | 7,38 | | 10,16 | 1,495 |
| | 700 | 2,042 | 7,05 | | 10,16 | 1,350 |
| | 750 | 2,032 | 6,79 | | 10,16 | 1,242 |
| | 800 | 2,022 | 6,58 | | 10,15 | 1,152 |
| | 850 | 2,011 | 6,38 | | 10,15 | 1,073 |
| 900 | 2,001 | 6,19 | | 10,16 | 1,001 | |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 6

| Magnesium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------------|
| 48,0 | 462* | 2,012 | | | |
| | 480 | 2,009 | 9,04 | (6) | 9,90 |
| | 500 | 2,005 | 8,68 | | 9,89 |
| | 550 | 1,996 | 7,92 | | 9,88 |
| | 600 | 1,987 | 7,32 | | 9,87 |
| | 650 | 1,978 | 6,90 | | 9,86 |
| | 700 | 1,969 | 6,58 | | 9,86 |
| | 750 | 1,959 | 6,32 | | 9,86 |
| | 800 | 1,950 | 6,09 | | 9,86 |
| | 850 | 1,941 | 5,93 | | 9,86 |
| | 900 | 1,931 | 5,81 | | 9,86 |
| 50,6 | 465* | 1,992 | | | |
| | 480 | 1,989 | 9,28 | (6) | 9,88 |
| | 500 | 1,985 | 8,93 | | 9,86 |
| | 550 | 1,976 | 8,24 | | 9,85 |
| | 600 | 1,967 | 7,72 | | 9,85 |
| | 650 | 1,958 | 7,32 | | 9,84 |
| | 700 | 1,948 | 6,96 | | 9,84 |
| | 750 | 1,939 | 6,72 | | 9,84 |
| | 800 | 1,930 | 6,53 | | 9,84 |
| | 850 | 1,921 | 6,38 | | 9,85 |
| | 900 | 1,912 | 6,26 | | 9,86 |
| 53,8 | 462* | 1,965 | | | |
| | 480 | 1,962 | 9,46 | (6) | 9,88 |
| | 500 | 1,958 | 9,05 | | 9,84 |
| | 550 | 1,950 | 8,26 | | 9,84 |
| | 600 | 1,941 | 7,64 | | 9,83 |
| | 650 | 1,932 | 7,22 | | 9,83 |
| | 700 | 1,923 | 6,92 | | 9,82 |
| | 750 | 1,914 | 6,68 | | 9,82 |
| | 800 | 1,906 | 6,48 | | 9,82 |
| | 850 | 1,896 | 6,35 | | 9,83 |
| | 900 | 1,888 | 6,24 | | 9,84 |
| 56,4 | 460* | 1,945 | | | |
| | 480 | 1,941 | 9,12 | (6) | 9,84 |
| | 500 | 1,938 | 8,86 | | 9,82 |
| | 550 | 1,929 | 8,23 | | 9,80 |
| | 600 | 1,920 | 7,65 | | 9,79 |
| | 650 | 1,912 | 7,16 | | 9,78 |
| | 700 | 1,904 | 6,82 | | 9,78 |
| | 750 | 1,895 | 6,59 | | 9,78 |
| | 800 | 1,886 | 6,44 | | 9,78 |
| | 850 | 1,876 | 6,30 | | 9,79 |
| | 900 | 1,870 | 6,19 | | 9,80 |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 6

| Magnesium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungs- dauer (s) | Viskosität (cP) | |
|------------------|-----------------|-----------------------------|---|---------------------------|-----------------|-------|
| 57,4 | 460* | 1,936 | | | | |
| | 480 | 1,932 | 8,98 | (6) | 9,83 | 2,563 |
| | 500 | 1,928 | 8,70 | | 9,80 | 2,410 |
| | 550 | 1,920 | 8,06 | | 9,79 | 2,028 |
| | 600 | 1,912 | 7,55 | | 9,78 | 1,753 |
| | 650 | 1,903 | 7,11 | | 9,78 | 1,538 |
| | 700 | 1,895 | 6,80 | | 9,78 | 1,388 |
| | 750 | 1,886 | 6,58 | | 9,78 | 1,283 |
| | 800 | 1,878 | 6,42 | | 9,79 | 1,210 |
| | 850 | 1,870 | 6,30 | | 9,79 | 1,149 |
| 900 | 1,861 | 6,18 | | 9,79 | 1,097 | |
| 67,9 | 437* | 1,852 | | | | |
| | 480 | 1,844 | 8,97 | (4) | 10,15 | 2,740 |
| | 550 | 1,834 | 8,13 | | 10,10 | 2,178 |
| | 600 | 1,826 | 7,55 | | 10,09 | 1,852 |
| | 650 | 1,818 | 7,09 | | 10,08 | 1,616 |
| | 700 | 1,810 | 6,76 | | 10,08 | 1,453 |
| | 750 | 1,802 | 6,50 | | 10,08 | 1,329 |
| | 800 | 1,794 | 6,27 | | 10,08 | 1,225 |
| | 850 | 1,786 | 6,08 | | 10,08 | 1,142 |
| | 900 | 1,779 | 5,94 | | 10,08 | 1,082 |
| 80,1 | 530* | 1,748 | | | | |
| | 550 | 1,746 | 7,17 | (6) | 9,80 | 1,789 |
| | 600 | 1,736 | 6,81 | | 9,78 | 1,593 |
| | 650 | 1,728 | 6,49 | | 9,77 | 1,429 |
| | 700 | 1,719 | 6,20 | | 9,77 | 1,284 |
| | 750 | 1,710 | 5,95 | | 9,77 | 1,169 |
| | 800 | 1,702 | 5,76 | | 9,77 | 1,080 |
| | 850 | 1,694 | 5,60 | | 9,78 | 1,011 |
| | 900 | 1,685 | 5,46 | | 9,78 | 0,953 |
| | 84,6 | 560* | 1,710 | | | |
| 570 | | 1,709 | 7,44 | (3) | 9,98 | 1,795 |
| 600 | | 1,704 | 7,19 | | 9,97 | 1,668 |
| 650 | | 1,695 | 6,81 | | 9,97 | 1,468 |
| 700 | | 1,685 | 6,46 | | 9,97 | 1,315 |
| 750 | | 1,676 | 6,21 | | 9,97 | 1,202 |
| 800 | | 1,667 | 6,03 | | 9,97 | 1,120 |
| 850 | | 1,658 | 5,90 | | 9,98 | 1,064 |
| 900 | | 1,649 | 5,80 | | 9,98 | 1,016 |
| 95,0 | | 623* | 1,625 | | | |
| | 650 | 1,620 | 6,28 | (4) | 10,06 | 1,460 |
| | 700 | 1,610 | 5,95 | | 10,06 | 1,293 |
| | 750 | 1,600 | 5,69 | | 10,06 | 1,169 |
| | 800 | 1,590 | 5,49 | | 10,06 | 1,075 |
| | 850 | 1,580 | 5,30 | | 10,07 | 0,992 |
| | 900 | 1,570 | 5,17 | | 10,08 | 0,934 |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 6

| Magnesium Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement $(\lambda - \lambda_0) \cdot 12$ (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|------------------|-----------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------|
| | 649* | 1,586 | | | |
| 100 | 700 | 1,575 | 5,42 (1) | 10,07 | 1,122 |
| | 750 | 1,565 | 5,14 | 10,07 | 0,998 |
| | 800 | 1,554 | 4,95 | 10,08 | 0,912 |
| | 850 | 1,544 | 4,80 | 10,08 | 0,848 |
| | 900 | 1,534 | 4,71 | 10,09 | 0,809 |

Tabelle 7

Temperaturabhängigkeit von Dichte, log. Dekrement, Schwingungsdauer und Viskosität bei Aluminium-Zink-Legierungen

| Zink Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement $(\lambda - \lambda_0) \cdot 10^2$ (Tiegel Nr.) | Schwingungsdauer (s) | Viskosität (cP) |
|-------------|-----------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------|
| | 657* | 2,380 | | | |
| 1,04 | 660 | 2,380 | 7,14 (5) | 9,84 | 1,249 |
| | 710 | 2,365 | 6,86 | 9,80 | 1,146 |
| | 750 | 2,350 | 6,65 | 9,80 | 1,063 |
| | 650* | 2,450 | | | |
| 5,00 | 670 | 2,440 | 7,03 (5) | 9,81 | 1,176 |
| | 710 | 2,430 | 6,85 | 9,81 | 1,106 |
| | 750 | 2,420 | 6,68 | 9,82 | 1,040 |
| | 625* | 2,693 | | | |
| 18,4 | 640 | 2,690 | 7,74 (5) | 9,84 | 1,300 |
| | 670 | 2,680 | 7,52 | 9,84 | 1,217 |
| | 710 | 2,665 | 7,30 | 9,84 | 1,137 |
| | 750 | 2,650 | 7,14 | 9,84 | 1,075 |
| | 590* | 3,125 | | | |
| 37,6 | 607 | 3,120 | 8,43 (5) | 9,83 | 1,338 |
| | 640 | 3,110 | 8,20 | 9,82 | 1,258 |
| | 670 | 3,095 | 8,06 | 9,83 | 1,201 |
| | 710 | 3,080 | 7,89 | 9,83 | 1,142 |
| | 750 | 3,065 | 7,72 | 9,83 | 1,080 |
| | 550* | 3,695 | | | |
| 56,3 | 600 | 3,670 | 9,50 (5) | 9,90 | 1,418 |
| | 640 | 3,650 | 9,26 | 9,90 | 1,333 |
| | 670 | 3,635 | 9,10 | 9,90 | 1,276 |
| | 710 | 3,618 | 8,86 | 9,90 | 1,200 |
| | 750 | 3,600 | 8,66 | 9,91 | 1,133 |

*) Liquidustemperatur

zu Tabelle 7

| Zink Gew. % | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log. Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungs- dauer (s) | Viskosität (cP) |
|----------------|--------------------|--------------------------------|---|------------------------------|--------------------|
| 70,0 | 508* | 4,295 | | | |
| | 520 | 4,290 | 10,83 | (5) | 9,84 |
| | 560 | 4,265 | 10,45 | | 9,84 |
| | 600 | 4,240 | 10,14 | | 9,84 |
| | 640 | 4,220 | 9,88 | | 9,84 |
| | 670 | 4,200 | 9,72 | | 9,84 |
| | 710 | 4,175 | 9,50 | | 9,85 |
| | 750 | 4,150 | 9,32 | | 9,86 |
| 80,1 | 475* | 4,870 | | | |
| | 500 | 4,850 | 12,12 | (5) | 9,90 |
| | 560 | 4,810 | 11,35 | | 9,90 |
| | 600 | 4,780 | 11,00 | | 9,89 |
| | 640 | 4,750 | 10,77 | | 9,90 |
| | 670 | 4,730 | 10,61 | | 9,90 |
| | 710 | 4,700 | 10,40 | | 9,90 |
| | 750 | 4,670 | 10,17 | | 9,90 |
| 87,1 | 443* | 5,365 | | | |
| | 450 | 5,360 | 14,30 | (5) | 9,94 |
| | 480 | 5,330 | 13,80 | | 9,94 |
| | 520 | 5,295 | 13,36 | | 9,93 |
| | 560 | 5,260 | 12,94 | | 9,93 |
| | 600 | 5,230 | 12,58 | | 9,93 |
| | 640 | 5,190 | 12,26 | | 9,93 |
| | 670 | 5,160 | 12,04 | | 9,92 |
| | 710 | 5,125 | 11,78 | | 9,93 |
| 750 | 5,090 | 11,57 | | 9,93 | |
| 90,5 | 425* | 5,640 | | | |
| | 450 | 5,620 | 15,10 | (5) | 9,94 |
| | 480 | 5,590 | 14,60 | | 9,93 |
| | 520 | 5,555 | 14,16 | | 9,93 |
| | 560 | 5,515 | 13,70 | | 9,92 |
| | 600 | 5,480 | 13,28 | | 9,92 |
| | 640 | 5,440 | 12,92 | | 9,92 |
| | 670 | 5,415 | 12,66 | | 9,92 |
| | 710 | 5,380 | 12,40 | | 9,92 |
| 750 | 5,340 | 12,18 | | 9,92 | |
| 92,5 | 406* | 5,840 | | | |
| | 440 | 5,810 | 16,08 | (5) | 9,98 |
| | 480 | 5,770 | 15,45 | | 9,98 |
| | 520 | 5,730 | 14,90 | | 9,96 |
| | 560 | 5,690 | 14,38 | | 9,96 |
| | 600 | 5,650 | 13,95 | | 9,96 |
| | 640 | 5,620 | 13,54 | | 9,96 |
| | 670 | 5,580 | 13,26 | | 9,96 |
| | 710 | 5,540 | 12,96 | | 9,96 |
| 750 | 5,500 | 12,72 | | 9,95 | |

*) Liquidustemperatur

**) extrapoliertes Wert

zu Tabelle 7

| Zink Gew.% | Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | log.Dekrement ($\lambda - \lambda_0$) · 10 ² (Tiegel Nr.) | Schwingungs- dauer (s) | Viskosität (cP) |
|---------------|--------------------|--------------------------------|--|------------------------------|--------------------|
| | 382* | 6,120 | | | |
| | 405 | 6,090 | 17,25 | (5) | 1,02 |
| | 440 | 6,050 | 16,65 | | 1,01 |
| | 480 | 6,010 | 16,08 | | 1,00 |
| | 520 | 5,970 | 15,56 | | 9,99 |
| 95,1 | 560 | 5,930 | 15,07 | | 9,98 |
| | 600 | 5,890 | 14,65 | | 9,98 |
| | 640 | 5,850 | 14,26 | | 9,99 |
| | 670 | 5,815 | 14,00 | | 9,99 |
| | 710 | 5,775 | 13,70 | | 9,99 |
| | 750 | 5,730 | 13,44 | | 9,99 |
| | 400* | 6,360 | | | |
| | 450 | 6,300 | 17,94 | (6) | 10,02 |
| | 500 | 6,245 | 17,09 | | 10,01 |
| 97,6 | 550 | 6,190 | 16,26 | | 10,00 |
| | 600 | 6,135 | 15,53 | | 10,00 |
| | 650 | 6,080 | 14,92 | | 9,99 |
| | 700 | 6,020 | 14,45 | | 9,99 |
| | 750 | 5,970 | 14,10 | | 9,99 |
| | 412* | 6,490 | | | |
| | 450 | 6,455 | 18,22 | (6) | 10,06 |
| | 500 | 6,400 | 17,38 | | 10,05 |
| 99,2 | 550 | 6,345 | 16,53 | | 10,04 |
| | 600 | 6,290 | 15,72 | | 10,03 |
| | 650 | 6,240 | 15,08 | | 10,02 |
| | 700 | 6,180 | 14,60 | | 10,01 |
| | 750 | 6,130 | 14,18 | | 10,00 |
| | 419* | 6,560 | | | |
| | 440 | 6,540 | 19,26 | (5) | 10,05 |
| | 480 | 6,500 | 18,22 | | 10,04 |
| | 520 | 6,455 | 17,36 | | 10,03 |
| 100 | 560 | 6,410 | 16,65 | | 10,01 |
| | 600 | 6,370 | 16,04 | | 10,00 |
| | 640 | 6,300 | 15,50 | | 10,00 |
| | 670 | 6,290 | 15,15 | | 10,00 |
| | 710 | 6,250 | 14,74 | | 9,99 |
| | 750 | 6,205 | 14,40 | | 9,99 |

*) Liquidustemperatur

LEBENS LAUF

Am 7. März 1940 wurde ich als achttes Kind meiner Eltern Matthias Schwaiger, Gemeindesekretär, und Maria Schwaiger, in Leogang, Land Salzburg, geboren. Dort besuchte ich auch die Volksschule. 1950 trat ich in das humanistische Bundesgymnasium in Salzburg ein und maturierte im Juni 1958 an dieser Anstalt. Anschließend begann ich das Studium der Technischen Physik an der Technischen Hochschule in Wien. In den Ferialzeiten arbeitete ich jeweils als Vermessungstechniker bei der alpinen Landesvermessung. Im Februar 1965 beendete ich die Diplomarbeit und begann anschließend die Arbeit an dieser Dissertation im Rahmen eines Forschungsauftrages ("Viskosimetrische Messungen an Aluminiumlegierungen zur Klärung des Gießverhaltens") in der Vereinigte Metallwerke Ranshofen-Berndorf AG, erteilt vom Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Unternehmungen. Im Dezember 1966 heiratete ich Frl. Gudrun Winner. Im März 1967 waren die praktischen Arbeiten an Forschungsauftrag und Dissertation abgeschlossen. Im Mai 1967 legte ich die II. Staatsprüfung aus Technischer Physik an der Technischen Hochschule in Wien ab.