

## Viskositätsmessungen an binären Legierungen des Aluminiums mit Silizium, Zink, Kupfer und Magnesium \*)

Von Franz Lihl, Eduard Nachtigall und Alois Schwaiger

(Aus dem Institut für Angewandte Physik der Technischen Hochschule Wien und der Forschungsanstalt der Vereinigten Metallwerke Ranshofen-Berndorf)

Im Anschluß an frühere Untersuchungen<sup>1)</sup>, die die Wirkung geringer Zusätze von Eisen und Titan auf die Viskosität des Aluminiums betrafen, wurde der Einfluß von Silizium, Kupfer, Zink und Magnesium untersucht. Die gewählten Legierungselemente haben im Aluminium sehr unterschiedliche Löslichkeit; ferner treten in diesen Systemen Eutektika und metallische Verbindungen auf. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, ob und in welcher Weise sich der Gefügebau im festen Zustand bereits in der Schmelze in den Viskosität-Konzentration-Isothermen abzeichnet.

### Versuchsdurchführung

Meßverfahren. 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<sup>1) bis 8)</sup> 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.

Zur Berechnung der dynamischen Viskosität wurde die Gleichung<sup>9)</sup>

$$\eta = \frac{(A - A_0)^2 \cdot \rho_t}{K^2 \cdot \rho_{ts}^2 \cdot \tau}$$

verwendet.

\*) Aus einer von der Fakultät für Naturwissenschaften der Technischen Hochschule Wien approbierten Doktordissertation des Herrn Dipl.-Ing. Alois Schwaiger.

<sup>1)</sup> F. Lihl, E. Nachtigall und G. Pointner, Metall 18 (1964) 1054.

<sup>2)</sup> A. Knappwost, Z. physik. Chemie (Leipzig) 200 (1952) 81.

<sup>3)</sup> E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner, Z. Metallkde. 44 (1953) 510.

<sup>4)</sup> E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner, Z. Metallkde. 45 (1954) 83.

<sup>5)</sup> E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner, Aluminium 31 (1955) 315.

<sup>6)</sup> E. Gebhardt und K. Detering, Z. Metallkde. 50 (1959) 379.

<sup>7)</sup> T. P. Yao, Forschg. Ber. Wirtsch.- u. Verkehrsminist. Nordrhein-Westfalen, Nr. 336 (1956).

<sup>8)</sup> V. M. Glazow und Y. C. Chystjakov, Bull. Acad. Sci. UdSSR 7 (1958) 141.

<sup>9)</sup> E. Gebhardt und M. Becker, Z. Metallkde. 42 (1951) 111.

Darin bedeuten:

$\eta$  = dynamische Viskosität (Poise)

$A$  = logarithmisches Dekrement des mit der Schmelze gefüllten Tiegels

$A_0$  = logarithmisches Dekrement des leeren Tiegels

$K$  = Eichkonstante

$\rho_t$  = Dichte der Metallschmelze bei der Versuchstemperatur

$\rho_{ts}$  = Dichte der Metallschmelze beim Schmelzpunkt

$\tau$  = Schwingungsdauer

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

Versuchsanlage. Für die vorliegenden Untersuchungen diente die gleiche Versuchsanlage, die schon für die Durchführung der früheren Untersuchungen<sup>1)</sup> Verwendung fand. Als Schutzgas diente Argon. Da dieses Gas nur in einem Reinheitsgrad von 99,95% (Schweißargon) zur Verfügung stand, mußte eine Feinreinigung<sup>10)</sup> erfolgen. Dazu wird das Flaschenargon 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 den in Argon vorhandenen Sauerstoff. Über ein mit Silikagel gefülltes Trockenrohr gelangt das Gas zur Entfernung des Stickstoffes in einen Magnesiumspäne enthaltenden Ofen (Temperatur 600 °C). Mit Hilfe dieser Einrichtung konnten die Sauerstoff- und Stickstoff-Verunreinigungen auf weniger als 1 ppm gesenkt werden.

Bei der gewählten Anordnung ist es 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 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

<sup>10)</sup> H. R. Kirchmayr, Österr. Chemiker Ztg. 65 (1964) 72.

bestimmt werden konnte. Eine zusätzliche Kontrolle ergab sich durch Messung der Differenz zwischen der Regeltemperatur und der Temperatur der Schmelze.

Der maximale Fehler bei der Temperaturmessung (Messung mit sinkender Temperatur) beträgt für Temperaturen unter  $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturunterschiede in axialer Richtung liegen unter  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Zur Bestimmung der ebenfalls temperaturabhängigen Konstante  $K$  wählt man ein Metall, dessen Viskosität aus Absolutverfahren bekannt ist und 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  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Eichung wurden Viskositätswerte von J. Budde, K. Fischer, W. Menz und F. Sauerwald<sup>11)</sup> sowie Dichtewerte von E. Gebhardt, M. Becker und H. Sebastian<sup>12)</sup> zugrunde gelegt.

Herstellung der Proben. Die Beimengungen des als Basismetall dienenden Reinstaluminiums lagen zwischen folgenden Grenzen: Eisen 0,0056 bis 0,0072 Gew.-%, Silizium 0,0045 bis 0,0065 Gew.-%, Kupfer 0,0025 bis 0,0026 Gew.-%, Bor 0 bis 0,003 Gew.-%. Die Legierungen mit Kupfer- und Zinkzusatz konnten ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen erschmolzen werden. Bei den Aluminium-Silizium-Schmelzen war hingegen eine Entgasung mit Stickstoff erforderlich. Wegen der großen Oxydationsbereitschaft 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.

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  $60\text{ cm}^3$  berechnet. Bei Temperaturerhöhung muß die Füllhöhe durch den Faktor  $\frac{Q_t}{Q_{ts}}$  korrigiert werden. Die Einwaage und die Berechnung der Viskosität erfordern ferner eine genaue Kenntnis der Dichte und der Liquidustemperaturen.

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  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  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 höheren Temperaturen sein. Die Legierungen wurden daher nach Erreichen der Temperaturkonstanz bei der höchsten Versuchstemperatur meist einige Stunden abstehen gelassen; sodann 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.

<sup>11)</sup> J. Budde, K. Fischer, W. Menz und F. Sauerwald, Z. physik. Chemie (Leipzig) 218 (1961) 100.

<sup>12)</sup> E. Gebhardt, M. Becker und H. Sebastian, Z. Metallkde. 46 (1955) 669.

### Schrifttum über die Viskosität des Aluminiums und von Aluminiumlegierungen

Reinstaluminium. Neben den bereits gegebenen Schrifttumhinweisen<sup>1)</sup> bis<sup>8)</sup> ist vor allem auf die Unstetigkeiten im Viskosität-Temperatur-Verlauf bei  $775$  und  $855\text{ }^{\circ}\text{C}$  hinzuweisen (Bild 1), die auf Grund der Ergebnisse differentialthermischer Messungen als un stetige Änderungen der spezifischen Wärme und somit un stetige Änderungen der Koordinationszahl gedeutet werden konnten<sup>13)</sup>. Diese Unstetigkeiten sind analog den polymorphen Umwandlungen im festen Zustand aufzufassen. Hinweise auf solche Umwandlungen finden sich bereits bei D. Saito und T. Matsukawa<sup>14)</sup> sowie W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>15)</sup>.

Aluminium-Silizium-Legierungen. Nach W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>15)</sup> sowie E. V. Polyak und S. V. Sergeev<sup>16)</sup> 17) erreicht die Viskosität bei der maximalen Löslichkeit des Siliziums in Aluminium ein Maximum und bei der eutektischen Konzentration ein Minimum. Hingegen haben E. Gebhardt und K. Detering<sup>6)</sup> im Konzentrationsbereich bis 23 Gew.-% Si einen stetigen, nahezu parallelen Verlauf der Viskosität-Temperatur-Kurven festgestellt. Auch die eutektische Zusammensetzung wäre demnach weder durch ein Extremum noch durch eine Richtungsänderung gekennzeichnet.

Aluminium-Zink-Legierungen. Nach Untersuchungen von W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>15)</sup>, die sich nur bis 30 Gew.-% Zn erstrecken, fällt die Viskosität bei konstanter Temperatur von Aluminium bis etwa 5 Gew.-% Zn ab und steigt dann wieder an. E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner<sup>4)</sup> stellten jedoch bei den Viskositätsisothermen einen geringen Anstieg von der Aluminiumseite her 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 späteren Untersuchungen von E. Gebhardt und K. Detering<sup>6)</sup> nicht in Erscheinung.

Über die Viskosität des reinen Zinks liegen Arbeiten von T. P. Yao und V. Kondic<sup>18)</sup> sowie von D. Ofte und L. J. Wittenberg<sup>19)</sup> vor.

Aluminium-Kupfer-Legierungen. Nach E. Gebhardt, M. Becker und S. Dorner<sup>3)</sup> 5) wird die Viskosität des Aluminiums bis zur untersuchten Grenzkonzentration von 12 Gew.-% Cu linear erhöht. W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>14)</sup> untersuchten die Viskosität bis zu einem Kupfergehalt von 33 Gew.-% (eutektische Zusammensetzung) und einer Temperatur von  $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Danach steigt die Viskosität bis zur Konzentration der maximalen Löslichkeit des Kupfers in

<sup>13)</sup> F. Lihl und A. Schwaiger, Z. Metallkde. (1967) 777.

<sup>14)</sup> D. Saito und T. Matsukawa, Mem. Coll. Engng. Kyoto Imp. Univ. 7 (1932) 49.

<sup>15)</sup> W. R. D. Jones und W. L. Bartlett, J. Inst. Metals 81 (1952) 145.

<sup>16)</sup> E. V. Polyak und S. V. Sergeev, DAN SSSR 30 (1941) 136.

<sup>17)</sup> E. V. Polyak und S. V. Sergeev, DAN SSSR 33 (1941) 244.

<sup>18)</sup> T. P. Yao und V. Kondic, J. Inst. Metals 81 (1952) 17.

<sup>19)</sup> D. Ofte und L. J. Wittenberg, Trans. metallurg. Soc. AIME 227 (1963) 706.

Aluminium (5,7 Gew.-% Cu) an und fällt dann mit zunehmendem Kupfergehalt bis zur eutektischen Zusammensetzung ab. Die Absolutwerte der Viskosität betragen etwa das Vierfache der Werte von <sup>3)</sup> und <sup>5)</sup>.

Aluminium-Magnesium-Legierungen. Nach E. Gebhardt, M. Becker und S. Dörner <sup>8)</sup> bewirken geringe Zusätze von Magnesium eine geringe Viskositäts-erhöhung. Diese Angaben werden auch von

Über die Viskosität des reinen Magnesiums liegen Angaben von E. Gebhardt, M. Becker und H. Sebastian <sup>12)</sup> vor.

**Versuchsergebnisse**

Aluminium-Silizium-Legierungen. Die Viskosität-Temperatur-Kurven der untersuchten Aluminium-Silizium-Legierungen sind in Bild 1 wiedergege-

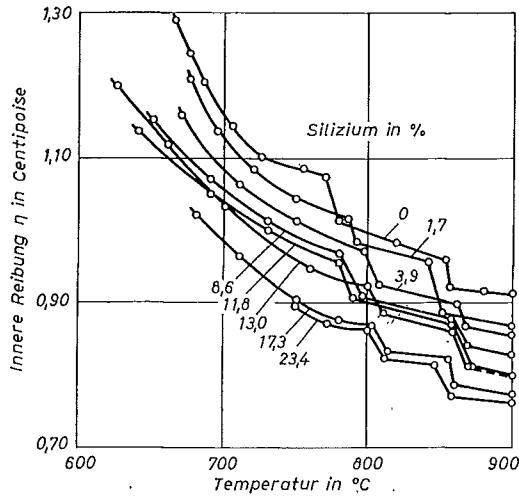


Bild 1. Viskosität-Temperaturkurven von Aluminium-Silizium-Legierungen

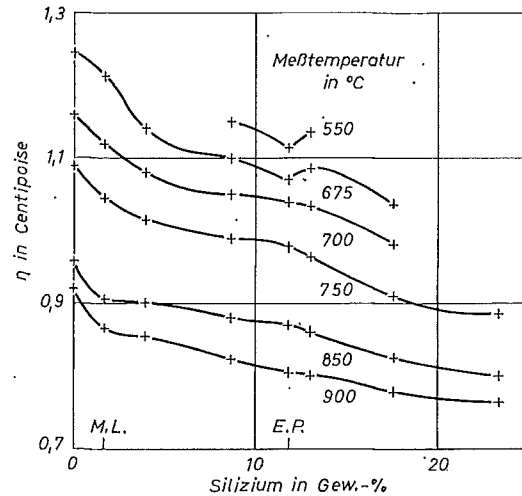


Bild 2. Viskosität-Konzentration-Isothermen von Aluminium-Silizium-Legierungen

L. A. Koledow und A. P. Ljubimov <sup>20)</sup> bestätigt. Von K. Detering <sup>21)</sup> liegen Messungen der Viskosität bis zu 43 Gew.-% Mg 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 <sup>15)</sup> berichten dagegen 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 Aluminium-Kupfer-Legierungen etwa das Vierfache der von den vorgenannten Autoren angegebenen Zahlen. Magnesiumreiche Aluminiumlegierungen wurden bisher – soweit bekannt – nicht untersucht.

ben. Die Unstetigkeiten in den Viskosität-Temperaturkurven werden also in gleicher Weise bei den Aluminium-Silizium-Legierungen wie beim Reinaluminium festgestellt. Die Höhe des Siliziumzusatzes äußert sich in der Verschiebung der Lage der Stufen und auch einer Änderung ihrer Höhe im Einklang mit dem Zustandsbild <sup>13)</sup>. Den Zusammenhang zwischen Viskosität und Zusammensetzung veranschaulicht Bild 2. Bei der eutek-

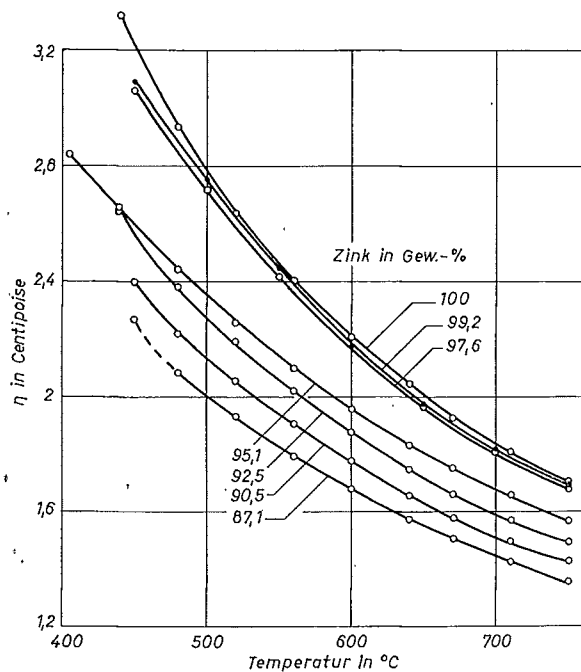
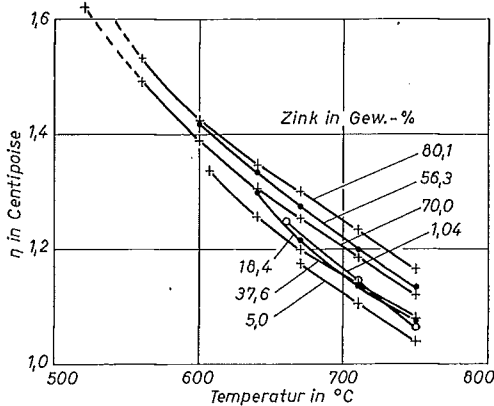


Bild 3 a und b. Viskosität-Temperaturkurven von Aluminium-Zink-Legierungen

<sup>20)</sup> L. A. Koledow und A. P. Ljubimov, Hochschulschrift. (Moskau), Eisenmetallurgie 6 (1963), Nr. 9, 136.  
<sup>21)</sup> K. Detering, Dissertation TH Stuttgart (1959).

tischen Konzentration tritt demnach bei Annäherung an die Liquidustemperatur ein temperaturabhängiges Minimum auf.

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 durch-

geführt. Bei dieser Temperatur trat innerhalb der Versuchszeit keine nennenswerte Verdampfung auf. Im Konzentrationsbereich 50 bis 90 Gew.-% Zn 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.

Die Bilder 3 a und 3 b vermitteln die aus der Dämpfung berechneten Viskositätswerte in Abhängigkeit von der Temperatur, während Bild 4 den Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Zink-Konzentration mit der Temperatur als Parameter veranschaulicht. Demnach erfolgt nach einem Abfall bis 5 Gew.-% Zn ein schwacher Anstieg bis 70 Gew.-% Zn mit einem wenig ausgeprägten temperaturabhängigen Zwischenmaximum bei 60 Gew.-% Zn. Über 80 Gew.-% Zn steigen die Viskosität-Konzentration-Isothermen steil an, wobei zwischen 93 und 96 Gew.-% Zn eine temperaturabhängige Richtungsänderung im Kurvenverlauf festzustellen ist. In diesen Konzentrationsbereich fällt aber gerade die eutektische Zusammensetzung. Das Zwischenmaximum bei 60 Gew.-% Zn entspricht dem Maximum der Mischungslücke im festen Zustand.

Aluminium-Kupfer-Legierungen. Die Viskosität-Temperatur-Kurven veranschaulichen die Bilder 5 a und 5 b. Auch hier treten wieder dieselben Stufen in den gleichen Temperaturbereichen wie bei den Aluminium-Silizium-Legierungen auf, werden jedoch mit steigendem Kupfergehalt immer weniger gut ausgeprägt. Im übereutektischen Bereich, d. h. oberhalb 33 Gew.-% Cu sind sie nicht mehr feststellbar.

Trägt man die Viskosität gegen die Kupferkonzentration mit der Temperatur als Parameter auf (Bild 6), 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.

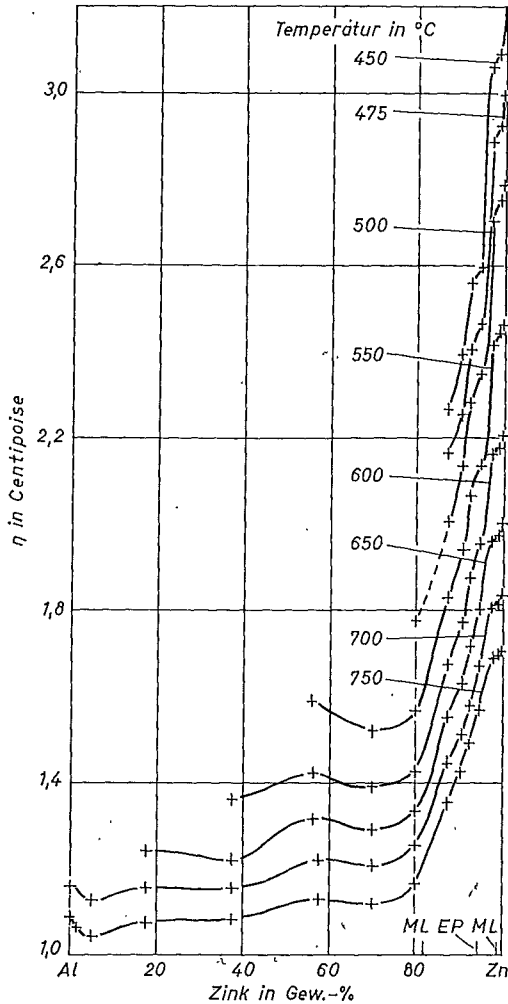


Bild 4. Viskosität-Konzentration-Isothermen von Aluminium-Zink-Legierungen

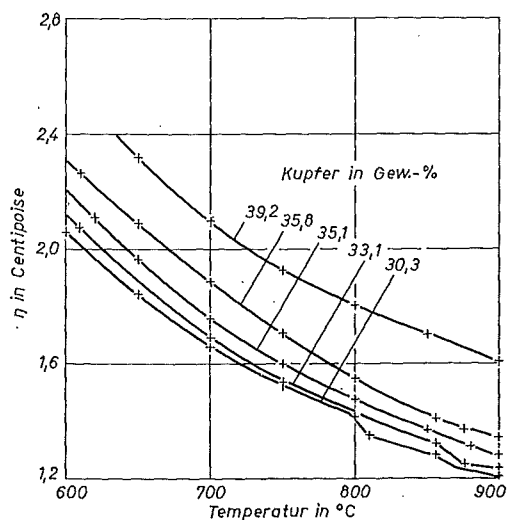
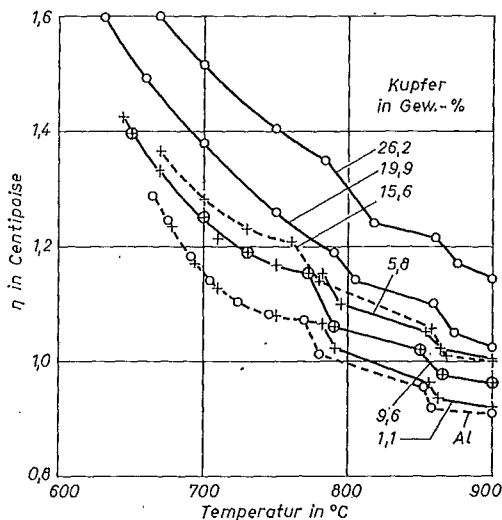


Bild 5 a und b. Viskosität-Temperaturkurven von Aluminium-Kupfer-Legierungen

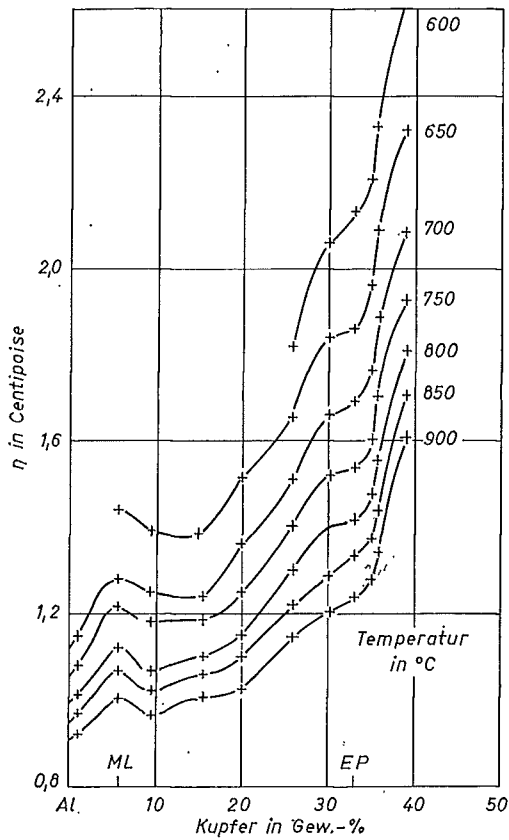


Bild 6. Viskosität-Konzentration-Isothermen von Aluminium-Kupfer-Legierungen

Aluminium-Magnesium-Legierungen. Wegen der schon früher erwähnten starken Oxydationsneigung der Aluminium-Magnesium-Legierungen gestalteten sich die Messungen an Legierungen mit hohem Magnesiumgehalt sehr schwierig. Auf die Reinheit des Schutzgases mußte deshalb besonders geachtet werden. Außerdem machte der hohe Dampfdruck des Magnesiums 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

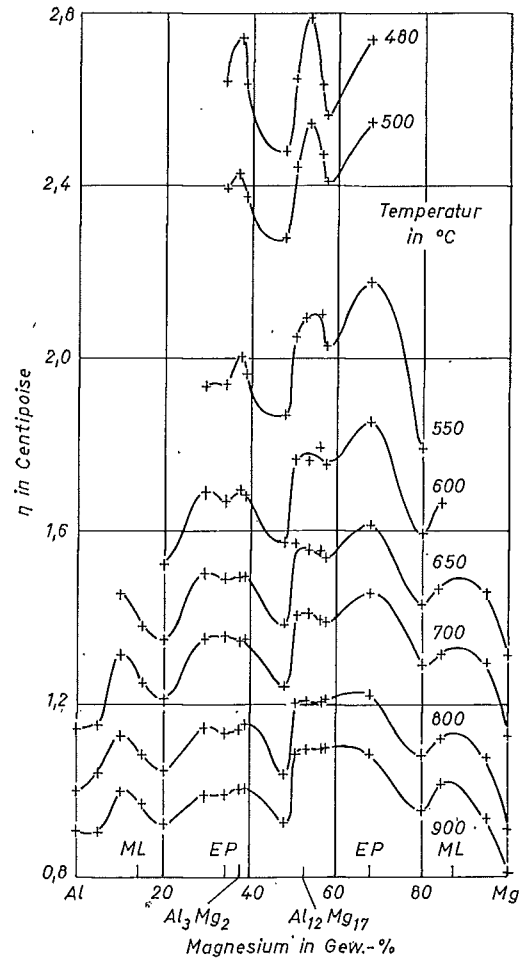


Bild 8. Viskosität-Konzentration-Isothermen von Aluminium-Magnesium-Legierungen

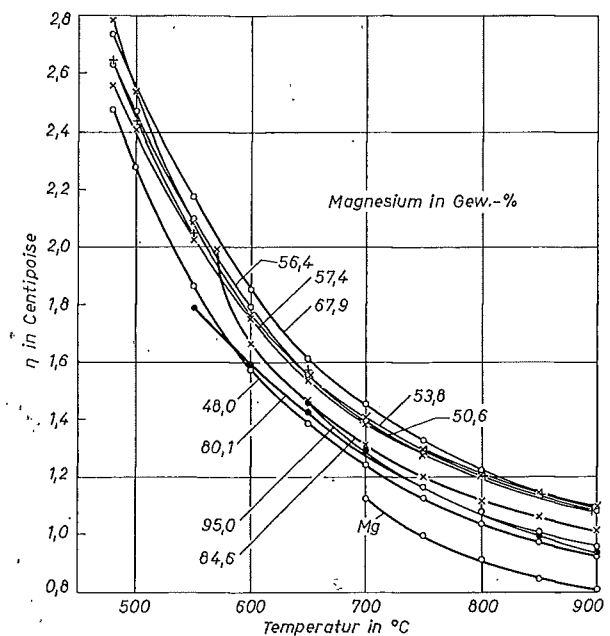
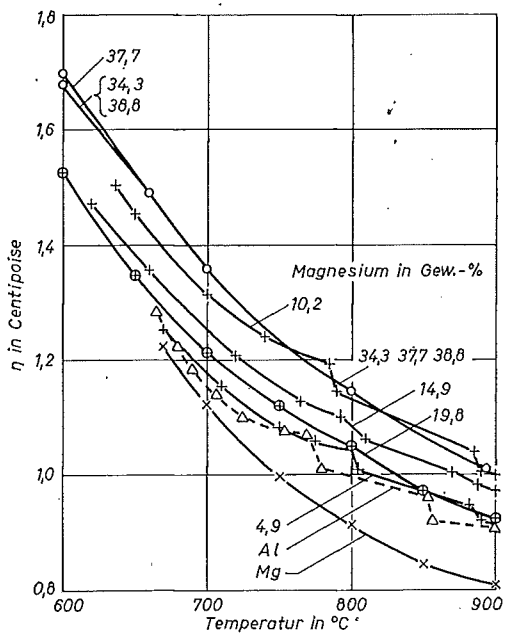


Bild 7 a und b. Viskosität-Temperaturkurven von Aluminium-Magnesium-Legierungen

Meßreihe fünf Tiegel durch Ribbildung unbrauchbar wurden. Es mußte deshalb jedesmal eine neue Eichung vorgenommen werden.

Die aus der Dämpfung berechneten Viskosität-Temperatur-Kurven sind in den Bildern 7 a und 7 b dargestellt. Bild 7 a gibt den Viskosität-Temperatur-Verlauf für die Legierungen bis 40 Gew.-% Mg und Bild 7 b für die Magnesium-reicheren Legierungen wieder. Auch bei diesen Legierungen treten somit Unstetigkeiten in der Temperaturabhängigkeit der Viskosität auf, die jedoch nur bis etwa 15 Gew.-% Mg zu erkennen sind.

Die Viskosität-Konzentration-Isothermen sind in Bild 8 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  $Al_{12}Mg_{17}$ . Bei den diesen Verbindungen entsprechenden Zusammensetzungen treten bei Temperaturen unter 650 °C Maxima der Viskosität auf, deren Höhe mit fallender Temperatur zunimmt.

#### Zusammenhang zwischen Viskosität und Zustandsbild

In den Viskosität-Konzentration-Isothermen aller untersuchten Systeme kommt ein Zusammenhang mit dem Zustandsbild klar zum Ausdruck. Sowohl die maximale Löslichkeit wie auch eutektische Punkte und intermetallische Verbindungen äußern sich in diesen Kurven in charakteristischer Weise. Sogar Entmischungen im festen Zustand, wie im System Aluminium-Zink, können nachgewiesen werden. Im einzelnen konnten folgende Gesetzmäßigkeiten festgestellt werden.

**Maximale Löslichkeit.** Die maximale Löslichkeit tritt bei den Aluminium-Kupfer-Legierungen in den Viskosität-Konzentration-Isothermen als Maximum in Erscheinung (Bild 6). W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>15)</sup> stellten ebenfalls diese Gesetzmäßigkeit fest, während nach E. Gebhardt und Mitarbeiter<sup>3) 5)</sup> bis 12 Gew.-% Cu ein linearer Anstieg der Viskosität erfolgen soll. Die Absolutwerte der Viskosität stimmen unterhalb der maximalen Löslichkeit mit den von 3) und 5) angegebenen Zahlen hinreichend gut überein, während die von 15) 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 (Bild 8). Das Maximum auf der Aluminiumseite liegt jedoch einige Gew.-% tiefer als der in 22) angegebene Wert. Während der von W. R. D. Jones und W. L. Bartlett<sup>15)</sup> erhaltene Kurvenverlauf grundsätzlich mit den eigenen Messungen übereinstimmt, ist in den von K. Detering<sup>21)</sup> angegebenen Kurven kein Anzeichen für eine solche Gesetzmäßigkeit zu erkennen.

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

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 untersuchten Legierungszusätzen die Viskosität des Aluminiums herabsetzt.

**Eutektische Konzentration.** Bereits bei früheren Untersuchungen<sup>1)</sup> wurden für 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-Zink- und Aluminium-Kupfer-Legierungen (Bild 2 und 6) ist der gleiche Kurvenverlauf zu erkennen. Im System Aluminium-Kupfer ist eine geringe Temperaturabhängigkeit dieses Effektes festzustellen, die im System Aluminium-Zink stark ausgeprägt ist. Oberhalb 650 °C ist im letzteren Fall der Kurvenverlauf nahezu monoton. K. Detering<sup>21)</sup> untersuchte bei Aluminium-Zink-Legierungen ebenfalls den Bereich um die eutektische Konzentration, konnte jedoch keine Abweichung vom monotonen Kurvenverlauf nachweisen.

Bei Aluminium-Magnesium-Legierungen (Bild 8) tritt der eutektische Punkt bei 35,5 Gew.-% Mg wahrscheinlich wegen der Nähe der intermetallischen Verbindung  $Al_3Mg_2$  nicht in Erscheinung; bei 67,7 Gew.-% Mg hingegen ist ein stark temperaturabhängiges Maximum zu erkennen.

Für die Aluminium-Silizium-Legierungen (Bild 2) kann ebenfalls bei der eutektischen Konzentration ein charakteristischer, temperaturabhängiger Kurvenverlauf, nämlich ein Viskositätsminimum, festgestellt werden. Eine Deutung als Meßwertstreuung, wie sie K. Detering<sup>21)</sup> gibt, scheint im Hinblick auf die übrigen untersuchten Legierungen wohl nicht vertretbar.

**Intermetallische Verbindungen.** Im System Aluminium-Magnesium treten die Verbindungen  $Al_3Mg_2$  und  $Al_{12}Mg_{17}$  auf. Bei den diesen Verbindungen entsprechenden Konzentrationen zeigen die Viskosität-Konzentration-Isothermen unterhalb 650 °C ausgeprägte Maxima. Auch die verschiedene Breite der Homogenitätsbereiche der beiden Verbindungen spiegelt sich in den Viskosität-Konzentration-Isothermen wider. Dem gegenüber der Verbindung  $Al_3Mg_2$  breiteren Homogenitätsbereich der Verbindung  $Al_{12}Mg_{17}$  entspricht ein breiteres Maximum in der Viskositätskurve. K. Detering<sup>21)</sup> 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.

Dichtemessungen von E. Pelzel<sup>23)</sup> bestätigen ebenfalls das Bestehen einer Vorordnung in Aluminium-Magnesium-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. Woer-

<sup>22)</sup> M. Hansen, Constitution of Binary Alloys, McGraw-Hill Book Company Inc. (1958).

<sup>23)</sup> E. Pelzel, Z. Metallkde. 32 (1949) 7.

ner<sup>24)</sup> keinen Hinweis auf das Bestehen der beiden intermetallischen Verbindungen in der Schmelze. Dies ist besonders verwunderlich, da S. Steeb und H. Entress<sup>25)</sup> 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  $Al_{12}Mg_{17}$  beobachtet wurde, überein.)

**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 haben aber auch die Viskosität-Konzentration-Isothermen ein schwaches, temperaturabhängiges Maximum (Bild 7).

### Zusammenfassung

Unter Anwendung der Schwingtiegelmethode wurden Messungen der Viskosität an Reinstaluminium und an Legierungen des Aluminiums mit Silizium, Kupfer, Zink und Magnesium durchgeführt.

Der Verlauf der Viskosität-Konzentration-Isothermen hängt eng mit dem Zustandsbild zusammen. Alle Veränderungen im festen Zustand wie Löslichkeitsgrenzen, eutektische Punkte, Verbindungen und auch Mischungslücken zeichnen sich oberhalb der Liquiduskurve in den Viskositätskurven in charakteristischer Weise ab.

<sup>24)</sup> S. Steeb und S. Woerner, Z. Metallkde. 56 (1965) 771.

<sup>25)</sup> S. Steeb und H. Entress, Z. Metallkde. 57 (1966)

Die bei Reinstaluminium beobachteten Stufen in der Viskosität-Temperatur-Kurve wurden auch auf der Aluminiumseite der binären Legierungssysteme des Aluminiums mit Silizium, Kupfer und Magnesium nachgewiesen. Ab einer bestimmten, vom Zusatzelement abhängigen Konzentration zeigen die Viskosität-Temperatur-Kurven den bisher bekannten glatten Verlauf. Lage und Höhe der Stufen sind ebenfalls von der Konzentration des Zusatzelementes abhängig.

Dem Bundesministerium für Verkehr und Verstaatlichte Unternehmungen sei für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten unser besonderer Dank ausgesprochen.

### Summary

Viscosity Measurements on Binary Aluminium Alloys Containing Silicon, Zinc, Copper, and Magnesium. A rotating crucible method was applied to measure the viscosity of high purity aluminium and of aluminium alloys containing silicon, copper, zinc, and magnesium. The characteristics of the phase relations in the solid state are reflected in viscosity-concentration plots.

Steps in the viscosity-concentration curve which are found in high purity aluminium were also found in aluminium rich alloys containing silicon, copper and magnesium. Above specific solute concentrations the steps are no longer observed. The step position and height depend, also, on the solute concentration.

(Eingegangen am 21. August 1967)