Eutektische Kompositstrukturen für Maschinenbau, Elektrotechnik und Elektronik

Autor(en): **Sahm, P.R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **62 (1971)**

Heft 8

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915814

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eutektische Kompositstrukturen für Maschinenbau, Elektrotechnik und Elektronik

Von *P. R. Sahm,* Baden

541.12.017:621

1. Geschichtlicher Abriss und Einengung des Themas

Es ist eigentlich nur ein in das Bewusstsein-Zurückrufen, wenn man feststellt, dass fast alles, was in der Natur existiert, Kompositstrukturen sind. Ob man pflanzliche oder tierische Gewebe betrachtet (Fig. 1), stets hat man es mit mehrphasigen

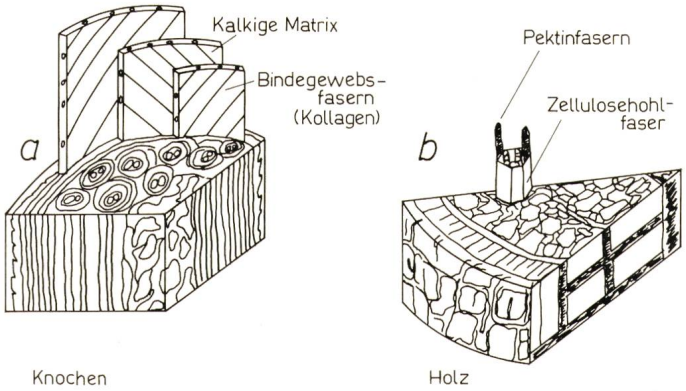


Fig. 1
Mehrphasige Strukturen

a Holzgewebe
b Knochengewebe

Strukturen zu tun: z. B. besteht Holzgewebe aus hohlen verstärkenden Cellulosefasern, Knochengewebe ist ein starres Apatitskelett mit einer elastischen Kollagenfasereinlagerung. Die Knochen bilden ihre anisotropen mechanischen Eigenschaften erst mit der Zeit, nach von der Umwelt aufgezwungenen Erfordernissen, aus , denn ihre Struktur formt sich erst mit dem Wachstum des jungen Tieres: Durch die mechanische Beanspruchung werden Druckunterschiede ausgelöst, die das Wachstum lenken und so ein selbstregulierendes System des Werkstoffaufbaues liefern (Fig. 2). Auf diese Weise werden jedoch nicht nur mechanische, sondern auch andere Eigenschaften von der Natur erstellt, etwa die des Gehirns: ein

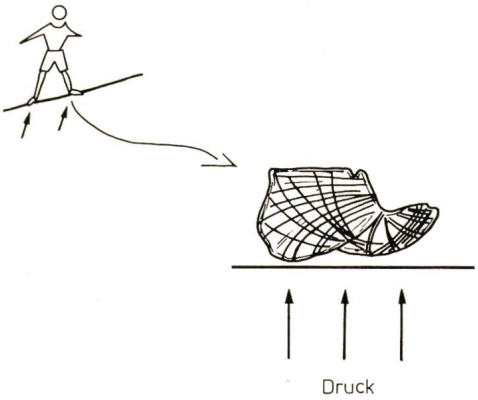


Fig. 2
Kollagenfaserausbildung im Fersenknochen des Kindes als Folge auftretender Druckbeanspruchung

Komposit mit anisotropen bio-elektronischen Eigenschaften. Die biologischen Einheiten, Pflanze, Tier und Mensch, die sich aus solchen Grundelementen weiter zusammensetzen, sind gewissermassen ebenfalls Komposite, aber solche noch komplizierterer und weiter übergeordneter Natur.

Es nimmt daher nicht wunder, dass sich auch die menschliche Technologie über die geschichtlichen Jahrtausende der Komposite bediente. Zunächst handelte es sich um grobe Vorläufer des heutigen Komposits, etwa die Lehmhütte mit Holz oder Stroh als verstärkendem Bestandteil, gewissermassen Vorläufer des modernen Stahlbetons. Handelte es sich bei den Lehmhütten noch um makroskopische Komposite, so benutzten die Chinesen bereits um 500 v. Chr. mikroskopische Komposite in Form gusseiserner Sakralgefässe. Die Mitteleuropäer gossen im 14. Jahrhundert Kanonenrohre und die Römer löteten um 100 v. Chr. mit Pb-Sn Eutektikum ihre bleiernen

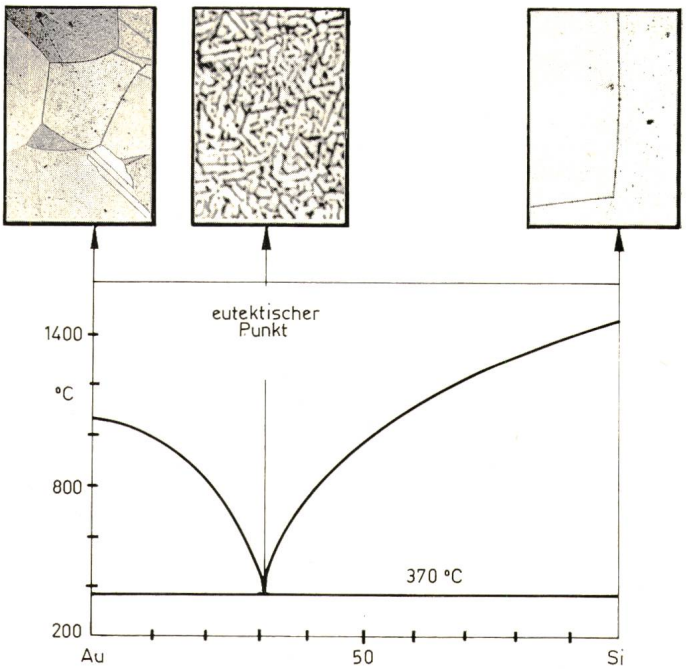


Fig. 3
Einfaches eutektisches 2-Stoffsystem Au-Si mit Strukturbeispielen

Wasserleitungsrohre zusammen. Natürlich haben unsere Altvordern diese mikroskopischen Komposite noch unbewusst gebraucht, insbesondere, was die letzten beiden Beispiele anbelangt, da es sich hier um nur im Mikroskop auflösbare eutektische Kompositstrukturen handelte (Fig. 3), die erst im vorigen Jahrhundert als solche erkannt worden sind. Diese Arbeit befasst sich vor allem mit solchen eutektischen Kompositen. Die wichtigsten Klassen der möglichen Kombinationen sind in Tabelle I zusammengefasst. Es sei etwas willkürlich, vorwiegend die Metall-Metall/Matrix-Faser-Kombinationen

Materialkombinationen in binären eutektischen Legierungen

Tabelle I

Kombination	Beispiel	Typ	Literatur	Interesante Eigenschaften und Anwendungen
Me – Me	Cr – Ni	f	1	Cr-faserverstärkte Ni-Matrix
Me – Ime	Co – Sm_2Co_{17}	f	–	hochkoerzitive Co-Fasern in Sm_2Co_{17}-Matrix für Permanent-
Me – Hl	–		–	magnete
Me – K	Cu_2O – Cu	f	2	Cu_2O-faserverstärkter elektrischer Leiter
Ime – Ime	Ni_3Al – Ni_3Nb	l	3	hoch T – hochfeste Legierung
Ime – Hl	NiAs – Cd_3As_2	f	4	magnetoresistives Bauelement
Ime – K	–		–	
Hl – Hl	SnSe – $SnSe_2$	l	5	hohe Packungsdichte von p-n Übergängen
Hl – K	–		–	
K – K	TiO_2 – Al_2O_3	l	6	höhere mechanische Zähigkeit
OV – OV	CBr_4 – C_2Cl_6	l	7	Studienobjekt zur Beobachtung der Erstarrungsfront
IV – IV	NaCl – NaF	f	8	faseroptisches Verhalten

Bezeichnungen:
Me = Metall, Ime = intermetallische Verbindung, Hl = Halbleiter, K = Keramik, OV = organische Verbindung, IV = Ionenverbindung; f = faserig, l = lamellar.

Literatur:
[1] *R. Kossowsky* a. o., Transaction of the Metallurgical Society of AIME 245(1969), p. 1219. [2] *J. S. Swisher* a. o., Journal of the Institute of Metals 97(1969), p. 103. [3] *E. R. Thompson* and *F. D. Lemkey,* Transactions. American Society for Metals 62(1969), p. 140. [4] *C. T. Elliot* and *S. E. R. Hiscox,* British Journal of Applied Physics D 2(1969), p. 108. [5] *W. Albers* and *J. Verbekt,* Journal of Materials Science 5(1970), p. . . . [6] *D. J. Rowcliffe* a. o., Journal of Materials Science 4(1969), p. 902. [7] *R. T. Southin* and *G. A. Chadwick,* Science Progress 57(1969), p. 353. [8] *J. A. Batt* a. o., Bulletin of the Americal Ceramic Society 48(1969), p 622.

herausgegriffen, an Hand derer jedoch viele allgemeingültige Regeln und Einsatzmöglichkeiten abgeleitet werden können. In Fig. 4 sind vier grundlegende Formen eutektischer Strukturen gezeigt. Ihre vollständige Charakterisierung ist durch die in Fig. 5 aufgeführten Parameter gewährleistet. Chemische Zusammensetzung, geometrische Abmessungen der Phasen und deren Grenzflächenzustand sind mit derzeitigen Herstellungsverfahren weitgehend kontrollierbar.

2. Kontrolle der eutektischen Feinstruktur im Erstarrungsprozess

Von den herkömmlichen Herstellungsverfahren für Kompositstrukturen stellt der Erstarrungsprozess eine der bestgeeigneten Methoden dar (Tabelle II), wohlkontrollierte 2-Phasen-Strukturen zu erhalten [1]. Während Drucksintern seine fruchtbarste Anwendung in keramischen Werkstoffen und den Hartmetallen (etwa Co-WC) findet, die «Glühbehandlung» für dispersionsgehärtete Werkstoffe (Al-Cu, Cu-Be, Nb-Ti usw.) und neuerdings auch bei den intern oxidierten Metallen (Al-Al_2O_3. Cu-BeO, Ag-Al_2O_3 usw.) sowie gerichtet glühbehandelten eutektoiden oder durch Mischungslücken ausgezeichneten Legierungen, ist der kontrollierte Erstarrungsprozess vor allem den eutektischen Legierungen vorbehalten. Die Aufmerksamkeit in dieser Arbeit gilt in erster Linie den faserigen, eindimensionalen Strukturen (Fig. 4).

Die Erstarrung eutektischer und naheutektischer Schmelzen erlaubt [2] (s. auch Tab. II und Fig. 5)

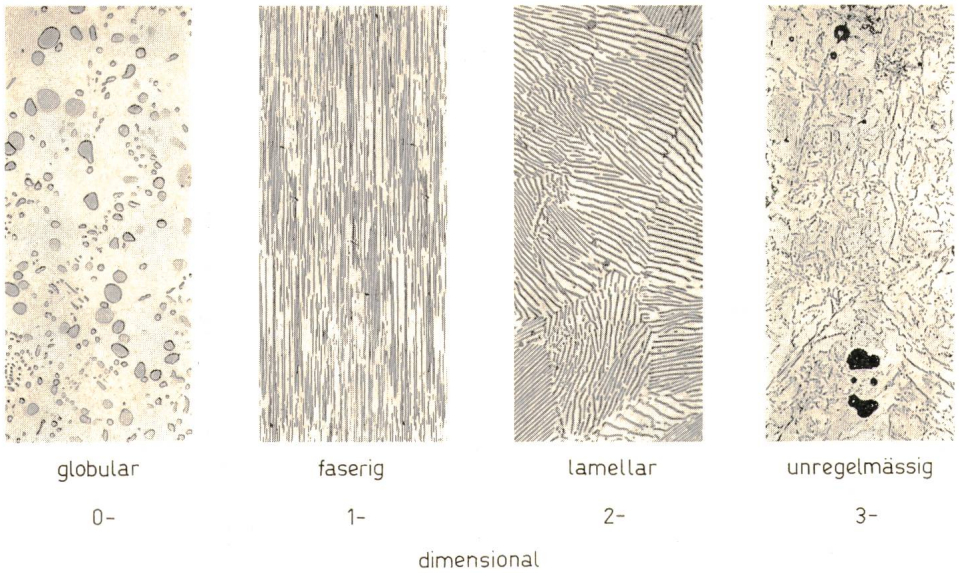
Auswertung von Methoden zur Herstellung von kontrollierten Kompositwerkstoffen

Tabelle II

Werkstoff-Charakterisierung Herstellungmethoden	Chemische Zusammensetzung		Zustand des Kristall-Gitters	Grenzflächenzustand		Räumliche Anordnung			
						Phasenverteilung	Geometrische Abmessungen		Makroskopische Orientierung
	Qualität	Quantität		chemisch	epitaktisch		Grösse	Form	
Dampfphasenreaktionen	+	+	+	+	—	—	—	—	—
Elektrolytische Abscheidung	—	+	+	+	—	—	—	—	—
Erstarrung	—	—	+	—	+	+	+	+	+
Drucksintern (Pulvermetallurgie)	+	+	—	—	—	—	+	+	—
Glühbehandlung (Tempern)	—	—	+	—	—	—	—	—	—
Komplexe Prozesse	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Bezeichnungen:
— stark begrenzt; + wenig begrenzt.

Fig. 4
4 Grundtypen eutektischer Strukturen



a) Kontrolle der makroskopischen Ausrichtung der eutektischen Strukturkomponenten;
b) Begrenzte quantitative Kontrolle der chemischen Zusammensetzung;
c) Quantitative Kontrolle der Abmessungen der Strukturkomponenten;
d) Begrenzte Kontrolle der Morphologie der Strukturkomponenten.

a) Ausrichtung der faserigen oder lamellaren Phasen ist ein Nebenprodukt eines einseitig gerichteten Wärme- und Materialflusses an der erstarrenden Grenzfläche. Eine einfache Möglichkeit dafür ist in Fig. 6 angedeutet, wobei vor allem Temperaturgradient G (grad/cm) an der Grenzfläche und Wachstumsgeschwindigkeit v wesentlich sind. Dadurch wird in den Legierungen mit $\Delta S_\alpha/\Delta S_\beta \geqq 1{,}4$ eine glatte Grenzfläche flüssig-fest hervorgerufen, (Fig. 7) die senkrecht zur Wachstumsrichtung verläuft ($\Delta S/_{\alpha,\beta}$ = Schmelzentropie der Phasen α und β). Da der Prozess der kontrollierten Erstarrung auf ein einfaches Diffusionsmodell zurückgeführt werden kann [1][1]) (mit Diff.-Koeff. D), scheidet sich die faserige oder lamellare β-Phase im allgemeinen senkrecht zur erstarrenden Grenzfläche aus. Fig. 7a zeigt eine solche planare Erstarrungsfront, die durch plötzliche Störung der gleichmässigen Wachstumsgeschwindigkeit erhalten worden ist. Als Beispiel für eine andere Methode zur Ausrichtung der 2. Phase ist der Einsatz eines magnetischen Feldes möglich, in Systemen mit $T_{\text{Curie}} > T_{\text{Eutekt.}}$, wo übereutektische Legierungen mit sich primär ausscheidender ferromagnetischer Phase durch einfache Umorientierung der magnetischen Phase parallel zur Magnetfeldrichtung ausgerichtet werden können [3]. Fig. 8 und 9 zeigen experimentellen Aufbau und eine auf diese Weise ausgerichtete Struktur von Bi-Co Legierungen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

b) Von der Betrachtung eines eutektischen Systems her (Fig. 3) drängt sich sogleich die Limitierung bezüglich des Volumenanteils der β-Phase auf, die auf eine einzige, nämlich die eutektische Zusammensetzung, beschränkt scheint. Es konnte jedoch in einigen Systemen gezeigt werden, dass diese Beschränkung durch die Verwendung bestimmter experimenteller Parameter überwunden werden kann. Als Kriterium gilt [4; 5].

$$G/v = [m_{\alpha,\beta}(C_n - C_e)/D] + K_i C_i \qquad (1)$$

Die Erklärung der algebraischen Symbole ist den Fig. 3 und 10 zu entnehmen, wobei Fig. 10 Gl. (1) mit Messungen, die im System Au-Co gemacht wurden [3], illustriert. Man erkennt, dass eine gleichmässige Kompositstruktur von hohen T-Gradienten G, niedrigen Wachstumsgeschwindigkeiten v, niedrigem Verunreinigungspegel $K_i C_i$, sowie möglichst geringen Steigungen der Liquiduslinien m_α oder m_β begünstigt werden. Verunreinigungen bewirken den Übergang von einer gleichmässigen in eine zellulare Erstarrungsfront (s. auch Fig. 7b). Die Verunreinigungen reichern sich als am niedrigsten schmelzender Restbestandteil in den Kanälen zwischen den Zellen an (Fig. 7b und 10).

c) Die quantitativen geometrischen Abmessungen der Fasern (oder auch Lamellen) können ebenfalls mit einer Formel abgeschätzt werden. Unter der Annahme einer diffusionsbestimmten Entmischung der Schmelze S am eutektischen Punkt in die Phasen α und β nach:

$$S \rightarrow \alpha + \beta$$

lässt sich zeigen, dass:

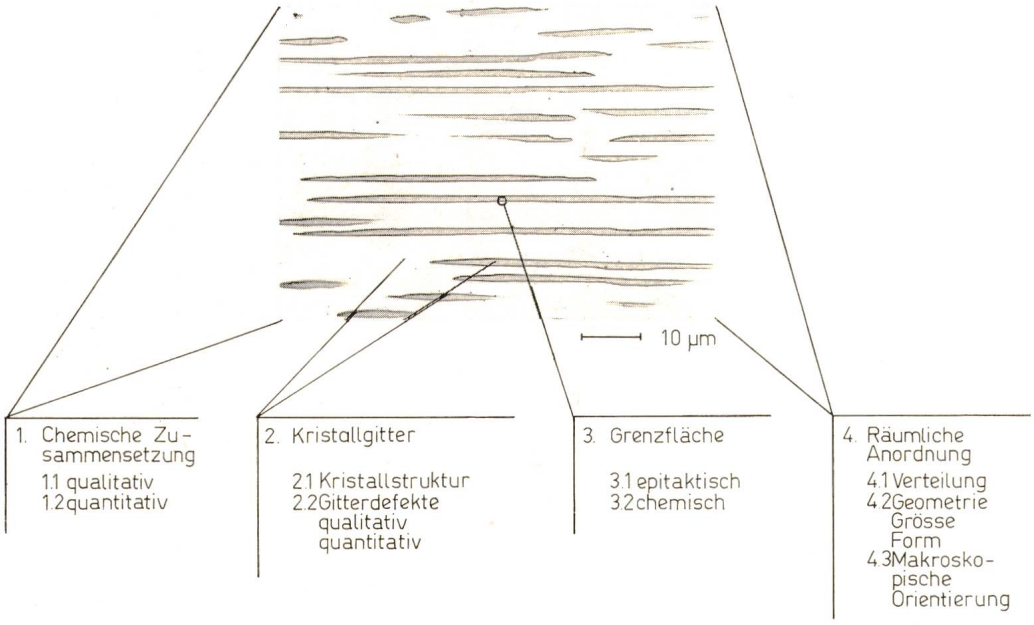


Fig. 5
Faktoren zur Charakterisierung von 2-Phasenstrukturen

$$R^2 v = \text{Konst} = \frac{D\,T_e \sin \alpha_{\alpha,\beta}}{4\,K_2(\zeta)\,(1+\zeta)^{1/2}\,\Delta c\,N_L^{1/3}} \left(\frac{\zeta V_\alpha^{1/3}}{m_\alpha} + \frac{V_\beta^{1/3}}{m_\beta} \right) \tag{2}$$

bzw. der Durchmesser D_f der Fasern selbst:

$$D_f = 2\,[\text{Konst.}/v\,(1+\zeta)]^{1/2} = 2\,[(1-\varphi_\beta)\,\text{Konst.}/v]^{1/2} \tag{3}$$

(Erklärung der Symbole s. im Anhang)

Die Konstante kann sehr leicht experimentell bestimmt werden, da nur Wachstumsrate v und die mittlere Faserentfernung $2R$ bekannt sein müssen. Es zeigt sich jedoch, dass auch die direkte Berechnung nach Gl. (2) und (3) zufriedenstellende Werte liefert. Fig. 11 gibt eine experimentelle Bestätigung für Gl. (2) am Beispiel des Au-Co Eutektikums. Bisher

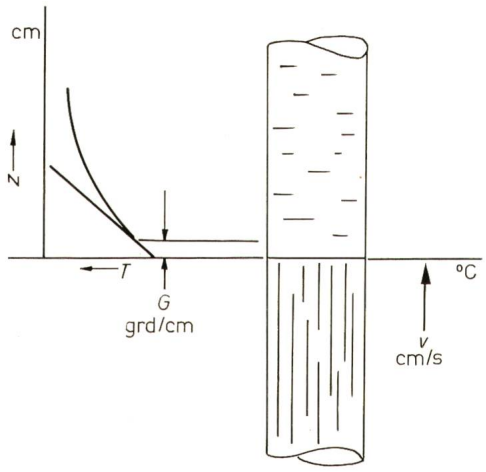


Fig. 6
Material- und Wärmefluss bei der gerichteten Erstarrung mit den entsprechenden Kontrollgrössen v (Wachstumsgeschwindigkeit) und G (Temperaturgradient)
T Temperatur; Z Entfernung von der Grenzfläche flüssig–fest

sind auf diese Weise Faserdurchmesser zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ und $5 \cdot 10^{-4}$ cm erzielt worden.

d) Die Morphologie der eutektischen Legierungen lässt sich in gewissen Grenzen variieren. Die wichtigsten Kontrollparameter hierfür sind Wachstumsgeschwindigkeit v und Zusätze c_i von Spurenelementen. Das bekannteste Beispiel ist Guss-

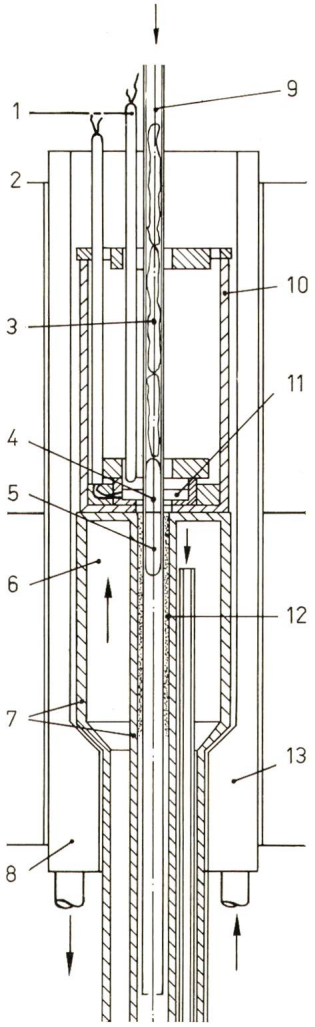


Fig. 8
Versuchsaufbau zur gerichteten Erstarrung im Magnetfeld
1 Kontroll-Thermoelement; *2* Magnet; *3* vorlegierte Stücke; *4* Schmelzzone; *5* erstarrt; *6* Warme H_2O-Kühlung; *7* Quarzwand; *8* H_2O-Kühlung; *9* Probenbehälter; *10* Al_2O_3-Tiegel; *11* Pt-Rh 40 bifilare Heizwicklung; *12* flüssiges Ga-In-Eutektikum; *13* Kühlwand

eisen mit lamellarem und kugeligem Graphit, wobei die kugelige Form durch besonders hohe Reinheit der Schmelze gefördert wird. Ein anderes Beispiel ist am «quasi-pseudobinären» System $CoV_{0,03}$ — $VC_{0,88}$ in Fig. 12 illustriert, wo Übergänge von der 0- über die 1- in die 2-dimensionale Form (vergl. Fig. 4) beobachtet werden. Die 0-dimensionale oder kugelige Form der Karbidausscheidungen (Fig. 12a) ist auf eine oszillierende Grenzfläche flüssig-fest zurückzuführen, die bei sehr langsamen Geschwindigkeiten ($v < 2$ cm/h) durch Temperaturschwankungen ausgelöst wird (= Wachstumsbänder). Sobald bei etwas höherem v die Oszillation ihren Einfluss verliert, gibt es faserförmige Karbidausscheidungen (Fig. 12b). Bei noch höheren Wachstumsgeschwindigkeiten schliesslich können bänder- und lamellenförmige Ausscheidungen beobachtet werden (Fig. 12c).

Abschliessend soll nicht unerwähnt bleiben, dass bei der Herstellung von gerichtet erstarrten Proben 3...4 Strukturzonen unterschieden werden müssen (Fig. 13) [2], deren thermo-

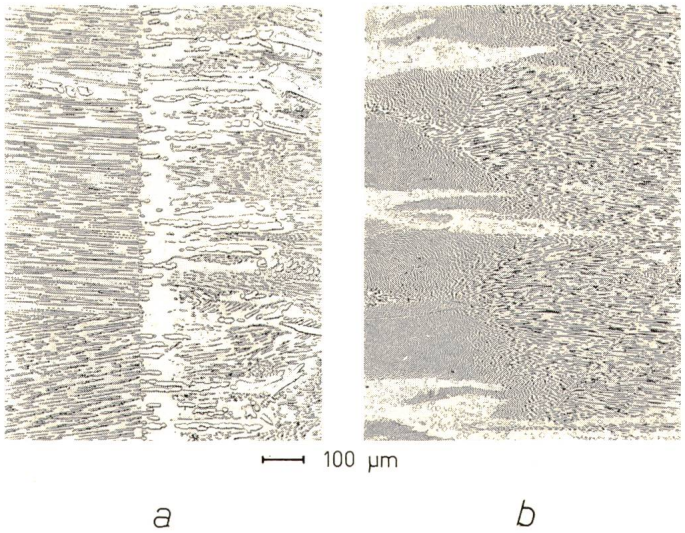


Fig. 7
Glatte (a) und zellenartige (b) Erstarrungsfronten im Au-Co-Eutektikum entsprechend hohem und niedrigem G/v-Verhältnis

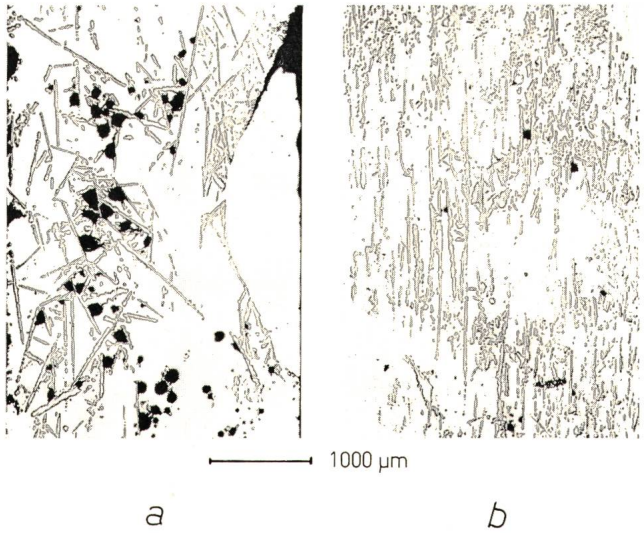


Fig. 9
Im Magnetfeld ausgerichtete Co-Primärdenriten (b) verglichen mit feldlos erstarrtem Bi-Co-Gefüge (a)

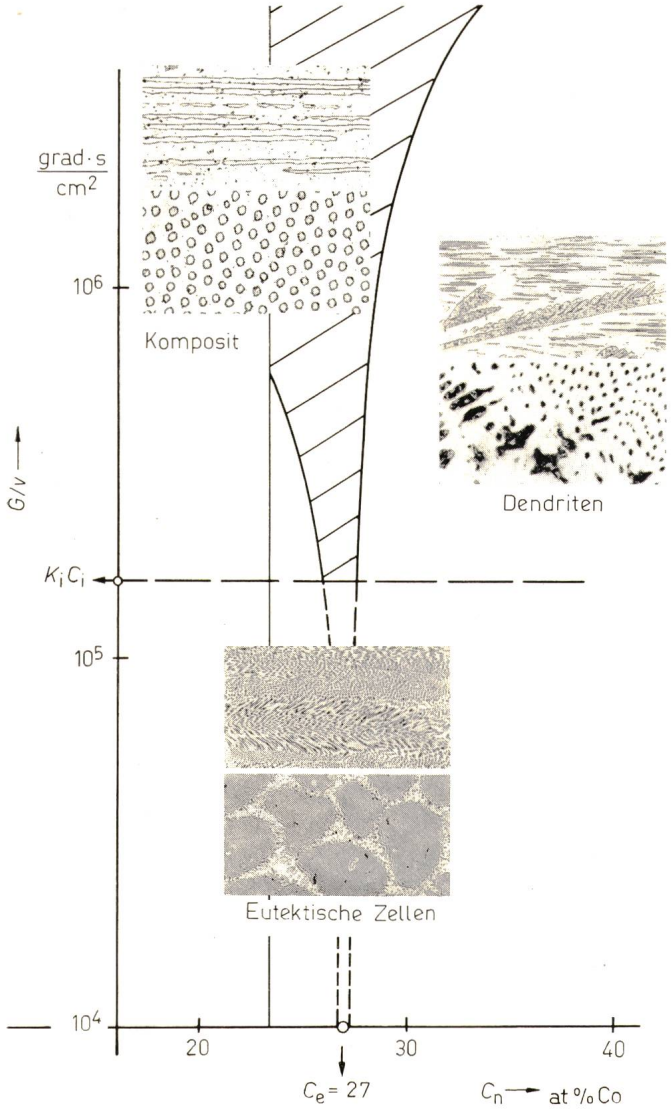


Fig. 10
Illustration des G/v-Kriteriums für das Au-Co-System

dynamisch stabilste mittlere Zone die gleichmässigste Struktur aufweist und dadurch gekennzeichnet ist, dass die Grenzflächen zwischen der Matrix α und der 2. Phase β einen minimalen Energiezustand angenommen haben. Dieser bewirkt, dass sich eine kristallographische Orientierung zwischen den beiden Phasen zueinander einstellt (Fig. 14), welche minimale elastische Verspannungen zwischen den beiden Gittern zulässt.

Bei oberflächlicher Betrachtung der möglichen Zahl binärer Eutektika (= 3860 bei Annahme von 70 Metallen im Periodensystem und einer durchschnittlichen Zahl von 1,6 Eutektika pro binäres System) scheint die Auswahl von möglichen eutektischen Werkstoffen gering zu sein. Das Bild ändert sich jedoch sofort, wenn ternäre eutektische Systeme miteinbezogen werden (Fig. 15), wo durch verschiedene Schnitte durch die eutek-

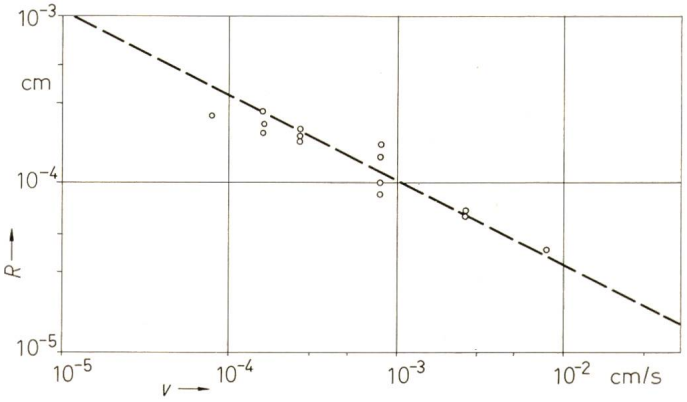


Fig. 11
Illustration des R^2v-Gesetzes für das Au-Co-Eutektikum

tische Rinne eine grosse Anzahl zusätzlicher 2-Phasenstrukturen möglich wird. Diese Art des Legierens erlaubt nicht nur Variation der chemischen Zusammensetzung, sondern manchmal auch eine damit verbundene Kontrolle der Morphologie.

3. Eigenschaften und Anwendungen

Gegenüber dem ausgedehnten Anwendungsbereich der herkömmlichen Kompositstrukturen einschliesslich eutektischer Legierungen (z. B. Gusseisen Fe-C, Silicium Al-Si, Lötzinn Pb-Sn) ist die Anwendung *gerichtet* erstarrter Eutektika bisher äusserst beschränkt, meistens noch im frühen Entwicklungsstadium begriffen. Im Vergleich zu den eutektischen Gebrauchslegierungen sind die gerichtet erstarrten Eutektika vor allem wegen der stark ausgeprägten Anisotropie ihrer Eigenschaften interessant. Zusammenfassend beleuchtet sind es vor allem die folgenden Effekte, die ihre Eigenschaften bestimmen:

a) Volumeneffekte;
b) Grössen- und Formeffekte;
c) Grenzflächeneffekte;
d) Austauscheffekte.

Für alle werden im folgenden Beispiele vermittelt. Da

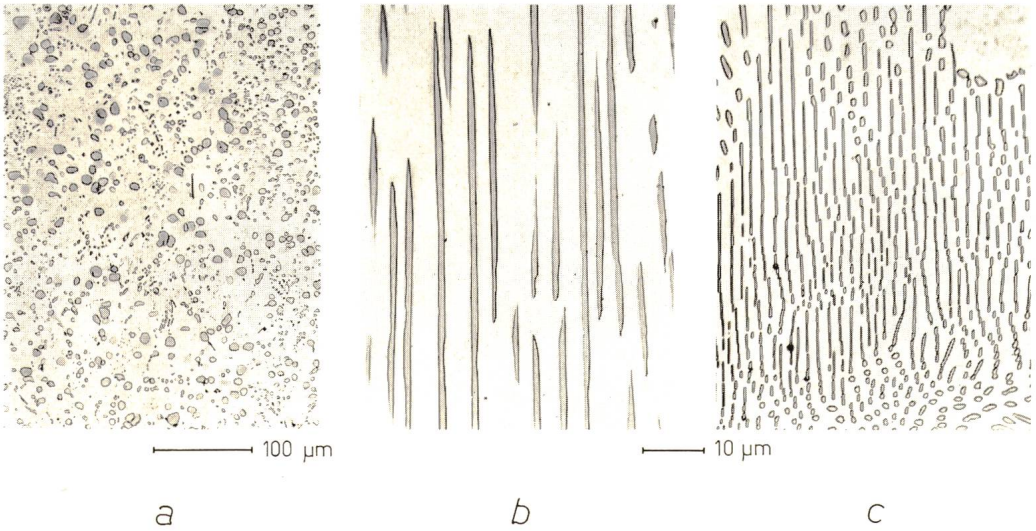


Fig. 12
3 Strukturformen des $CoV_{0,03}$–$VC_{0,88}$ Eutektikums
a globulare Form durch unregelmässige Wachstumsgeschwindigkeit v hervorgerufen
b faserige Form zwischen v = 1...20 cm/h
c lamellare Form oberhalb v = 20 cm/h

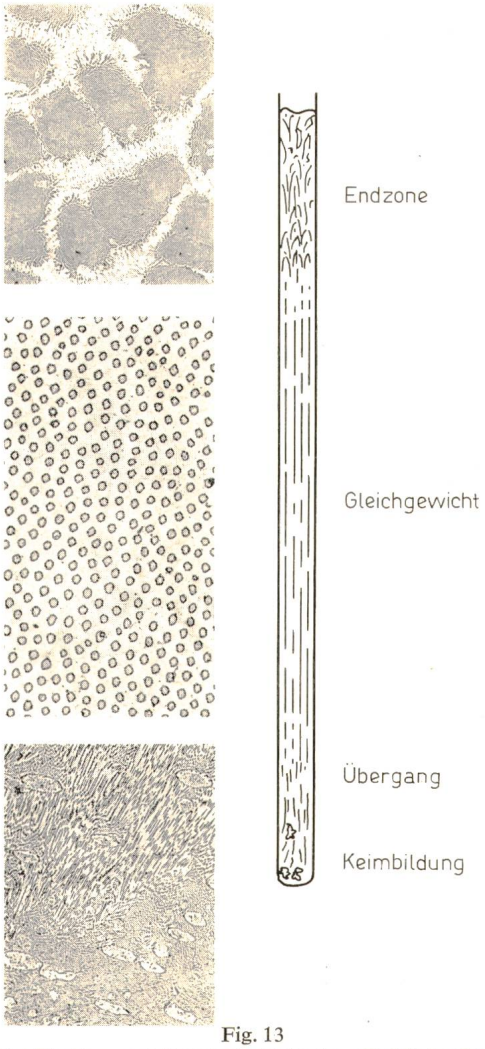


Fig. 13
Verschiedene Strukturzonen in gerichtet erstarrter zylindrischer Probe (Au-Co)

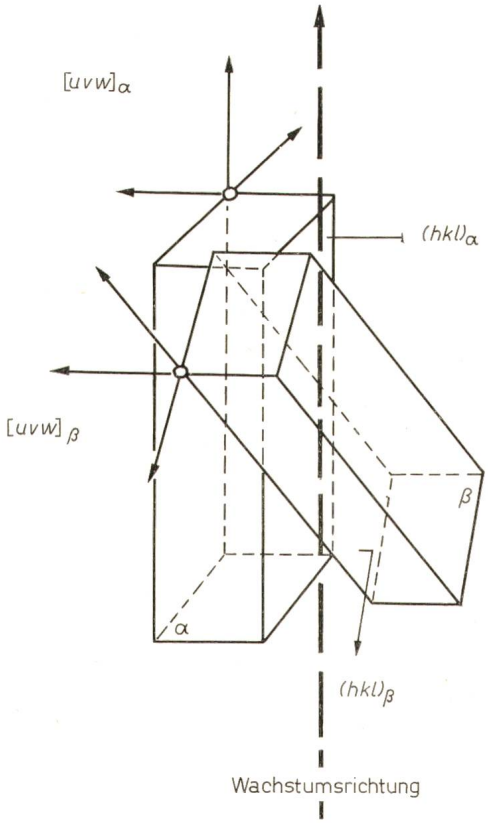


Fig. 14
Zur kristallographischen Charakterisierung der beiden Phasen eines binären Eutektikums

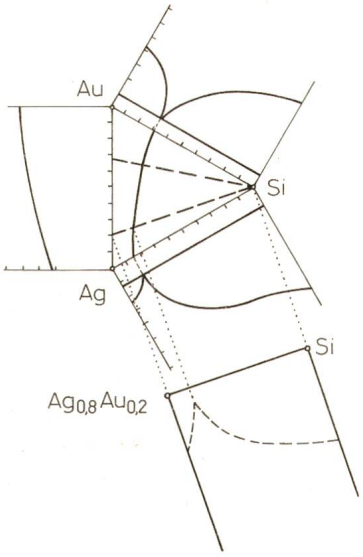


Fig. 15
Liquiduslinien des Dreistoffsystems Au-Ag-Si mit herausprojiziertem Schnitt des Systems $Ag_{0,8}Au_{0,2}$-Si

hier jedoch darauf verzichtet werden muss, eine allumfassende Zusammenstellung zu geben, sollen einige prägnante Anwendungen exemplarisch diskutiert werden.

3.1 Mechanische Eigenschaften (Turbinenschaufeln)

Die Turbinenschaufel ist eines der am stärksten beanspruchten Werkstoffteile im gesamten Maschinenbau (Fig. 16). Um den Leistungsgrad dieses Energiewandlers (thermische wird in Rotationsenergie umgesetzt) zu erhöhen, muss die Schaufel bei möglichst hohen Temperaturen T mit möglichst hoher Umlaufgeschwindigkeit beansprucht werden. Daraus erhellt sogleich, dass eine charakteristische Konstante

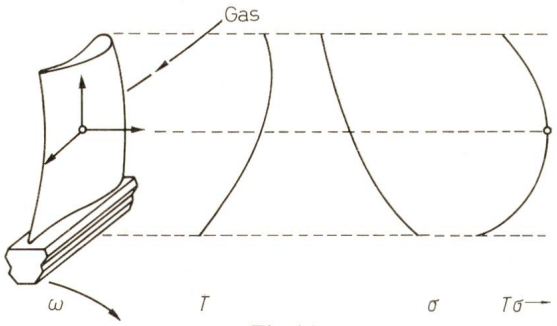


Fig. 16
Thermische und mechanische Oszillation nach 3 Richtungen
(Zug parallel zur Schaufelachse)
Beanspruchung einer Turbinenschaufel

$$K \approx \frac{\sigma T}{\delta}$$

möglichst hohe Werte aufweisen sollte, wobei hohe Festigkeit σ und geringe Dichte δ höhere Zentrifugalkräfte und damit Umlaufgeschwindigkeiten zuliessen. Der Vorteil eines gerichtet faserverstärkten Werkstückes erhellt sogleich (Fig. 17), wenn die Beanspruchung in Richtung der Faserachse eines eingebetteten hochelastischen Materials vorgenommen wird. Für eine erfolgreiche Verstärkung ist es notwendig, dass [6]:

a) Ein minimales sog. kritisches Faservolumen φ_{crit} überschritten wird;
b) Ein kritischer Winkel α_C zwischen Faserachsen und Beanspruchungsrichtung nicht überschritten wird;
c) Eine kritische Faserlänge l_C überschritten wird.

Fig. 17
Zugprobe eines gerichtet erstarrten Werkstückes
σ Zugbeanspruchung

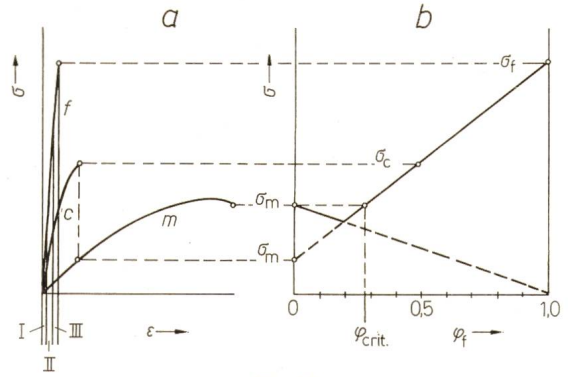


Fig. 18

Spannungs-Dehnungskurven für Matrix, Faser und Komposit mit 3 Beanspruchungsbereichen (*a*) und Projektion des Zugverhaltens auf den Zusammenhang zwischen Kompositfestigkeit und Volumenanteil der Faser (*b*)

I elastisch-elastisch, *II* elastisch-plastisch, *III* plastisch-plastisch
c Komposit; *f* Faser; σ Zugbeanspruchung; σ_c Festigkeit des Komposits; σ_f Festigkeit der Faser; σ_m Festigkeit der Matrix; $\varphi_{crit.}$ kritischer Faservolumenanteil; ε Dehnung; *m* Matrix

In Fig. 18 ist das Zustandekommen des kritischen Faservolumens definiert, das als

$$\varphi_f = \frac{\sigma_\alpha - \sigma_\alpha'}{\sigma_\beta - \sigma_\alpha} = \frac{\sigma_\alpha - \sigma_\alpha'}{\sigma_\beta} = \frac{\sigma_m - \sigma_m'}{\sigma_f} \equiv \varphi_{crit} \qquad (4)$$

(Fig. 18)
angegeben wird. Der kritische Winkel ist

$$\alpha_c = \mathrm{tg}\,(\tau_\alpha/\sigma_k) \qquad (5)$$

worin τ_α Schubmodul der Matrix α und σ_k Zugfestigkeit des Komposits *k* bedeuten. Die kritische Faserlänge l_c ergibt sich schliesslich, wenn Zugbeanspruchung der Faser σ_β und Scherbeanspruchung der Grenzfläche τ_g zwischen Faser und Matrix gleichgesetzt werden

$$\sigma_\beta \frac{\pi D_f^2}{4} = \tau_g \pi D_f l$$

so dass

$$l_c = \frac{\sigma_\beta D_f}{4\tau_g} \qquad (6)$$

Typische Werte für l_c/D_f liegen bei 50. Das Grenzflächenverhalten ist für den Metallkundler von besonderem Interesse, da hier z. B. das Studium von Versetzungsstrukturen ein tieferes Verständnis der Verstärkungsmechanismen verspricht, sowie bereits gezeigt hat, dass bei sehr feinen Faserabmessungen (unter 10^{-5} cm) Austauschverstärkungseffekte auftreten, die über die additive Regel

$$\sigma_k = \sigma_\alpha (1 - \varphi_\beta) + \sigma_\beta \varphi_\beta \qquad (7)$$

die den obigen Betrachtungen (Fig. 18) zugrunde liegt, hinausgehen.

Abschliessend sei mit Fig. 19 darauf hingewiesen, dass eutektische Legierungen die nächste Generation hochbeanspruchter Turbinenschaufeln sein können [7], wenn das Oxidationsproblem zufriedenstellend gelöst werden kann. Tabelle III enthält mehrere bisher untersuchte Systeme.

3.2 Elektrische Eigenschaften
(Kryoelektrische Energieübertragung)

Energieübertragung in Form elektrischen Stromes kann bei niedrigen Temperaturen mit höherem Wirkungsgrad geschehen (desgleichen natürlich das Betreiben von Generatoren, Transformatoren, Motoren etc.):

a) Mit konventionellen Leitern, deren Leitfähigkeit mit sinkenden Temperaturen besser wird (z. B. 10fache Verbesserung bei Verwendung von Cu-Leitern [20]).

oder

b) Mit Supraleitern, deren Leitfähigkeit bei einer kritischen Temperatur T_C sogar unendlich gross wird (z. B. 25...30fache Verbesserung bei Verwendung von Nb-Leitern [20].

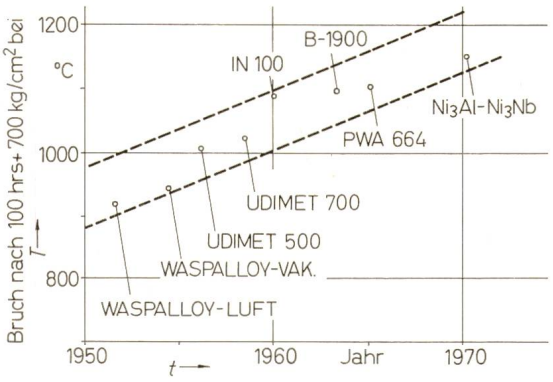


Fig. 19

Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Turbinenschaufellegierungen

T Temperatur; *t* Zeit

Auswahl einiger mechanisch interessanter Eutektika[1])

Tabelle III

Eutektikum Matrix – 2. Phase	Eutektische Temperatur	Volumanteil der 2.Phase	Typ	Binäres System
Al – Al_2Cu	548	0,46	l	einfache binäre Eutektika
Al – Al_3Ni	640	0,11	f – l	
Nb – Nb_2C	2335	0,31	f	
Ta Ta_2C	2800	0,29	f	
Ni – Ni_3Nb	1285	0,24	b	
Ni – Ni_3Ti	1287	0,39	l	
NiAl – Cr		0,34	f	pseudobinäre Eutektika
Co – TiC	1402	0,11	f	
Ni – TaC	?	0,10	f	
Co – VC	1330	0,16	f – l – g	
Ni_3Al – Ni_3Nb	1330	0,49	l	

Bezeichnungen:
l = lamellar, b = bandförmig, f = faserig, g = globulistisch.

[1]) Die Angaben sind entnommen den 3 Bänden «Constitution of Binary Alloys» (McGraw Hill 1958, 1965, 1969) sowie «Eutectic Grains» (L. M. Hogan, R. W. Kraft und F. D. Lemkey, Progr. Mat'ls Sci. 1970).

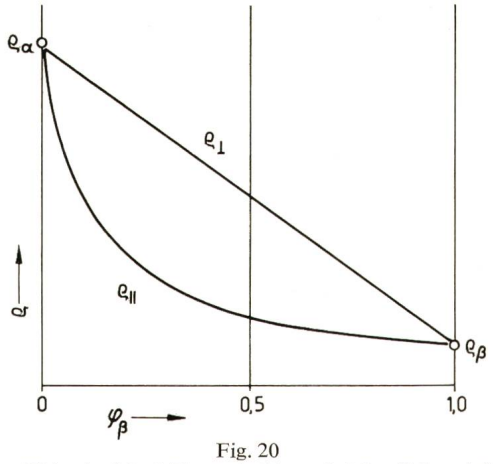


Fig. 20
Elektrischer Widerstand in 2-Phasenstrukturen bei Parallel- und Serienschaltung der Phasen α und β
ϱ elektrischer Widerstand; φ_β Faservolumenanteil

Gleich hier soll eingeflochten werden, dass eutektische Komposite bisher zwar wenig Grund zu überschwenglichen Hoffnungen geliefert haben, jedoch lassen sich aufschlussreiche Modellfälle konstruieren.

a) Als kryoelektrisches Leitermaterial kommt entweder Kupfer oder Aluminium in Frage. Al kommt bei niedrigen Temperaturen nahe an die elektrischen Eigenschaften des Cu heran. Weil Al billig ist, ist es wirtschaftlich interessant. Seine Festigkeiten lassen jedoch zu wünschen übrig, weswegen faserige Al-Al_xMe_y Eutektika auf verbessertes Festigkeitsverhalten untersucht worden sind (Me=Ni, La, Ca). Da nur sehr wenig oder gar keine Löslichkeit von Me-Atomen in der Al-Matrix vorhanden ist, wird die elektrische Leitfähigkeit im wesentlichen nur durch die Querschnittsminderung der verstärkenden Faser beeinträchtigt. Für den spezifischen elektrischen Widerstand des Komposites ϱ_k gilt (sowie für Wärmeleitfähigkeit, dielektrische Eigenschaften etc.):

$$\frac{1}{\varrho_k} = \frac{(1-\varphi_\beta)}{\varrho_\alpha} + \frac{\varphi_\beta}{\varrho_\beta} \quad \text{bei Parallelschaltung} \qquad (8)$$

und

$$\varrho_k = (1-\varphi_\beta)\,\varrho_\alpha + \varphi_\beta\,\varrho_\beta \quad \text{bei Serienschaltung} \qquad (9)$$

(Fig. 20). Alle praktischen Fälle sind zwischen diesen beiden Grenzfällen zu suchen.

b) Von grösserer Tragweite könnten Komposite auf dem Gebiet der Supraleitung werden. Fig. 21 zeigt die Projektion einer «Superüberlandleitung» [8]. Supraleitende Materialien sind bekanntlich nicht nur ihres völligen Fehlens des elektrischen Widerstandes wegen interessant, sondern auch, weil sie das magnetische Feld abstossen. Damit direkt hängt zusammen, wieviel Strom von einem Supraleiter transportiert werden kann. Das Magnetfeld H, das durch den fliessenden Strom I geschaffen wird, zerstört die Supraleitfähigkeit oberhalb eines kritischen Wertes H_C bzw. I_C. Die Grösse des kritischen Feldes H_c ist eine stark strukturabhängige Eigenschaft des Supraleiters, die auch in Kompositstrukturen beeinflussbar sein kann. So sind bisher mehrere Systeme bekannt geworden, die in Form einer Zweiphasenstruktur hochfeldbeständiges Verhalten (Typ II) annehmen, obwohl sie von Natur aus Typ I Supraleiter (niederfeldbeständig) sind. Der im Typ II Supraleiter transportierte Strom läuft durch ein sog. Fluxoidgitter [9] (Fig. 22a), dessen Zusammenbrechen durch eine wirksame Verankerung des Fluxoidgitters verhindert werden kann. Die Fluxoidverankerung wird durch Unregelmässigkeiten im Kristallgitter (Versetzungen, Fremdteilchen 0 bis 3-dimensionaler Natur → vergl. Fig. 4 etc.) gefördert. Beim Vergleich eines solchen Fluxoidgitters mit einer faserartigen eutektischen Struktur (Fig. 22a) drängt sich sofort die Möglichkeit auf, Komposite mit einer gut wärmeleitenden Matrix (Cu oder Ag) und einer hochfeld-supraleitenden Faser einzusetzen, wobei die Vortexgitterabmessungen, durch

$$2\,R_V = (2\,\Phi_0/3\,B)^{1/2} \qquad (10)$$

gegeben, dem eutektischen Gitter nach Gl. (2) angepasst werden könnte ($\Phi_0 = 2{,}07 \cdot 10^{-7}$ Gs cm^2, B = magnetische Induktion). Die gut leitende Matrix würde die Wärme bei einem evtl. Zusammenbruch eines Fluxoides ableiten können. Zu Spulen

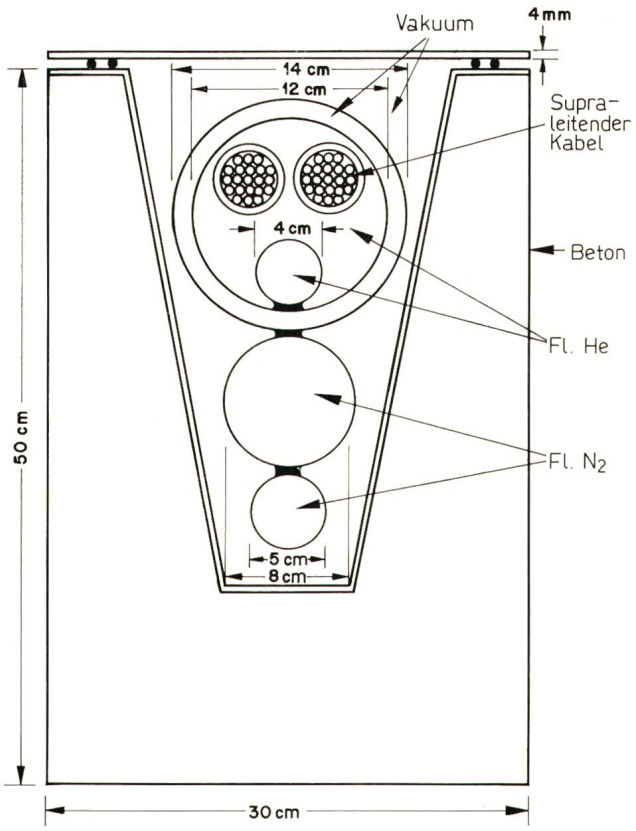


Fig. 21
Vorgeschlagener Querschnitt durch eine unterirdische «Supraüberlandleitung»

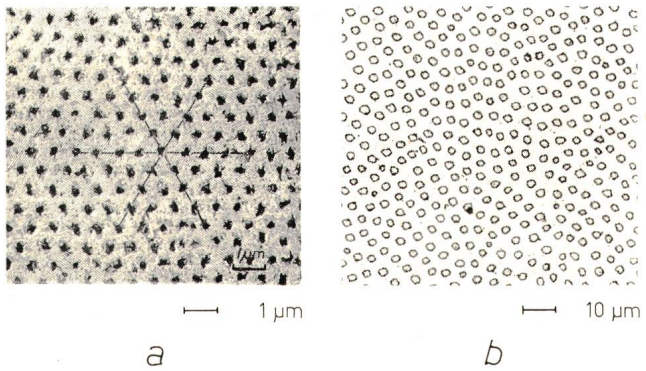


Fig. 22
Fluxoidgitter einer supraleitenden In-Legierung (*a*) und Querschnitt durch ein faseriges (Au-Co) Eutektikum (*b*)

Beispiele gerichtet erstarrter Eutektika mit ferromagnetischen Bestandteilen

Tabelle IV

Eutektisches System Matrix	–	2. Phase	Magnetischer Typ	Eutektischer Typ	Volumanteil 2. Phase	Eutektische Temperatur °C	Maximale Koerzitivkraft Oe	Art der angenommenen Anisotropie	Literatur
Y_2Co_{17}	–	Co	fm – fm	f	0,19	1330	19	F	1
Sm_2Co_{17}	–	Co	fm – fm	f	0,19	1325	490	F	–
Fe_2Ti	–	Fe	fm – fm	f		1340	mehrere	K	–
Fe_2Zr	–	Fe	fm – fm	f		1330	100	K	–
Fe_2Be	–	Fe	fm – fm	f		1165	100		–
FeCoB	–	FeCo	fm – fm	f			100	K	–
Fe_xSb	–	Fe	fm – fm	f	0,15	1002	100	K	2
CoSb	–	Co	fm – fm	f	0,38	1095	12,5	F	1
Au	–	Co	pm – fm	f	0,195	996	400, 450	F, S	3
CoAl	–	Co	pm – fm	f	0,65	1400	–	–	4
Bi	–	MnBi	dm – fm	f	0,04	262	4000	K	5
Sb	–	MnSb	dm – fm	f	0,29	510	10	K (S)	6
Bi	–	Co	dm – fm	(d – f)	0,10	271,2	40	F (K)	–
FeS	–	Fe	afm – fm	f	0,094	988	10,3	(F)	2

Bezeichnungen:
fm = ferromagnetisch, pm = paramagnetisch, dm = diamagnetisch, afm = antiferromagnetisch, f = faserig, l = lamellar, d = dendritisch, F, K, S = Form-, Kristall- oder Spannungsanisotropie.

Literatur:
[1] *F. S. Galasso,* Journal of Metals 17(1969)6, p. 17. [2] *F. S. Galasso,* Journal of Applied Physics 38(1967), p. 3241. [3] *J. D. Lingingston,* Journal of Applied Physics 41(1970), p. 197. [4] *H. E. Cline,* Transactions of the Metallurgical Society of AIME 239(1967), p. 1906. [5] *V. Noothoven, J. M. Goor* and *H. Zijlstra,* Journal Applied Physics 39(1968), p. 5471. [6] *M. R. Jackson, R. N. Tauber* and *W. R. Kraft,* Journal of Applied Physics 39(1968), p. 4452.

gewickelte Leiter, die heute bereits in supraleitenden Magneten eingesetzt werden, sind solche Komposite, wenn auch nichteutektischer Natur. Ähnliche Wicklungen werden auch bei im Bau befindlichen supraleitenden Motoren verwendet. Ein weiteres Anwendungsgebiet für solche mikroskopischen Kompositstrukturen ist bei der Wechselstromsupraleitung zu suchen. Man hofft, hierbei die Stabilität feiner Fasern (unterhalb 50 µm) gegen magnetische Fluxsprünge ausnutzen zu können.

Weitere interessante Entdeckungen haben sich in andern Supraleitergruppen angedeutet. Ein ungleich grösseres Hindernis zur weit verbreiteten Anwendung der Supraleitung liegt in ihrer Tieftemperaturbeständigkeit. Die höchste bisher gemessene Übergangstemperatur T_c liegt bei 20,7 °K [10]. Während eine T_c-Erhöhung auf Raumtemperatur oder mehr das Endziel aller Forschungen auf diesem Gebiet bleibt, bedeutete die Erhöhung auf die Verdampfungstemperatur des flüssigen N_2 ein Riesenschritt voran. Hiermit würde die Verwendung des teuren He (4,2 °K) oder die des gefährlichen H_2 (20,4 °K) als Kühlmittel von dem wohlfeilen N_2 (77,4 °K) abgelöst werden. Es wird angenommen, dass Komposite, deren supraleitende Fasern von einer sie polarisierenden Matrix umgeben werden, Höchsttemperatursupraleitung versprechen [11]. Jedoch ist es unwahrscheinlich, dass Eutektika der oben besprochenen simplen Art einen Durchbruch erlauben werden. Niederfeldsupraleiter für Höchsttemperaturen könnten evtl. bei eutektischen organischen oder organometallischen Materialien einmal gefunden werden.

3.3 Magnetische Eigenschaften
(Permanentmagnete)

Gute Permanentmagnetwerkstoffe zeichnen sich durch hohe magnetische Anisotropie aus. Ein verlockend einfaches Verfahren der Herstellung solcher Magnete bietet sich mit der gerichteten Erstarrung eutektischer Legierungen, deren mindestens eine Phase ferromagnetisch ist. Eingedenk der Tatsache, dass Eutektika zweiphasige Legierungen darstellen, deren eine Phase meist in feinverteilter Form vorliegt (Fig. 2), ist damit zu rechnen, dass sowohl Form- und Kristall- als auch Spannungsanisotropie mit Hilfe der gerichteten Erstarrung eingebaut werden können. Die zu erwartenden Koerzitivkräfte können wie folgt vereinfacht ausgedrückt werden [12] (Austauschanisotropie wird nicht betrachtet):

$$\sum H_c = H_{c_f} + H_{c_k} + H_{c_{sp}} = 2\pi M_s + (2K_1/M_s) + (3\sigma f_\sigma/M_s) \qquad (11)$$

worin M_s Sättigungsmagnetisierung, σ angelegte elastische Spannung, $f\sigma$ Magnetostriktionskonstante und K_1 Kristallanisotropiekonstante erster Ordnung bedeuten. Während Kristall- und Spannungsanisotropie im Einkristall unabhängig von der Morphologie der magnetischen Phase sind, gilt der Ausdruck für H_{cf} für unendlich lange Rotationsellipsoide [12] (= Fasern) und im letzteren Falle speziell für Eindomänenteilchen, also sehr geringe Faserdurchmesser. Ein guter Permanentmagnet muss neben hohen Anisotropiekonstanten noch ein hohes Energieprodukt $BH_s\,V$ besitzen, was in erster Linie eine dichte Packung der magnetanisotropen Teilchen erheischt. Die gerichtete Erstarrung erlaubt eine gewisse quantitative Kontrolle dieser kritischen Parameter:

a) Faserdurchmesser und Faserlänge (Formanisotropie), s. Gl. (3);
b) Einkristallinität (Kristallanisotropie);
c) Grenzflächenzustand (Spannungsanisotropie);
d) Volumenanteil der magnetischen Phase (Energieprodukt) s. Gl. (1).

In Tabelle IV sind bisherige Ergebnisse zusammengefasst worden, wobei die Koerzitivkräfte in der letzten Spalte aufgetragen sind. Es zeigt sich, dass faserige Eutektika mit zwei ferromagnetischen Phasen besonders vielversprechend sind, insbesondere auch in bezug auf ein hohes Energieprodukt. Fig. 23 gibt einen Vergleich der Koerzitivfeldstärke zwischen einer fm-fm (Sm_2Co_{17}—Co) — und einer pm-fm (Au-Co)-Kom-

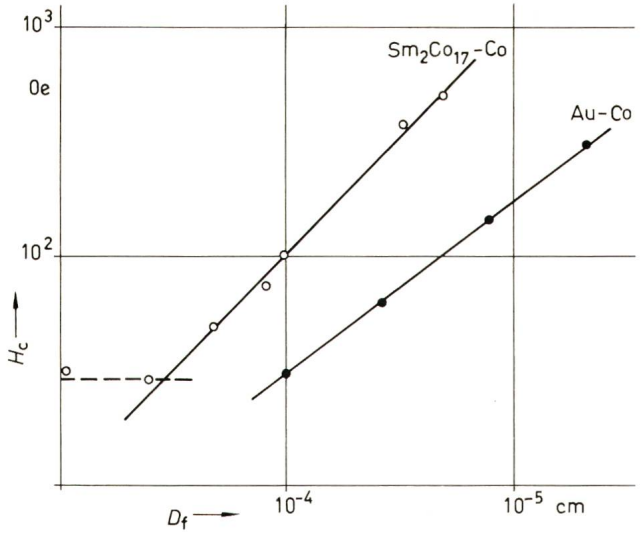


Fig. 23
Koerzitivfeldstärken D_f faseriger Sm_2Co_{17}-Co und Au-Co-Eutektika

bination [13] und zeigt gleichzeitig, wie stark H_c vom Faserdurchmesser abhängt. Die Magnetisierungskurven in Fig. 24 für zwei Au-Co-Proben, einmal langsam und einmal schnell erstarrt [13], machen diesen Zusammenhang besonders deutlich.

3.4 Ausgewählte komplexe elektronische Eigenschaften und Anwendungen

Das Gebiet der komplexen elektronischen Eigenschaften ist das interessanteste und dasjenige, welches eine unübersehbare Anzahl neuer Effekte verborgen hält. Zwei Entwicklungen werden hier herausgegriffen.

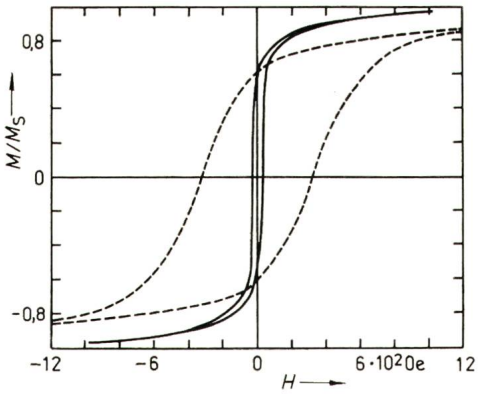


Fig. 24
Magnetisierung eines langsam (geringe Hysterese) und eines schnell erstarrten Au-Co-Eutektikums
M Magnetisierung; M_S Sättigungsmagnetisierung; H angelegtes Magnetfeld

3.4.1 Galvanomagnetische Effekte

3.4.1 Galvanomagnetische Effekte. Es existiert eine Vielzahl thermo- und galvanomagnetischer sowie auch magneto-optischer Effekte, die zweifellos alle im Widerspiel mit gerichtet erstarrten Eutektika interessante Anwendungen finden könnten. Hier möge es jedoch genügen, den Ettinghausen-Nernst-Effekt herauszugreifen. Bei Anlegen eines magnetischen Feldes an einen stromführenden Halbleiter werden die Elektronen von ihrer geraden Bahn in eine um den Hallwinkel gedrehten Bahn abgelenkt und dadurch der elektrische Widerstand vergrössert (Fig. 25). Ein ähnlicher Effekt wird in der Messtechnik für magnetoresistive Bauelemente ausgenutzt [14]. Offensichtlich ist eine starke Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes vom Magnetfeld erwünscht. Das lässt sich durch Einlagerung metallisch leitender nadelförmiger Bezirke in den Halbleiter erreichen. Hier werden die Hallströme kurzgeschlossen, und die Elektronen verbringen eine lange Zeit in den metallisch leitenden Gefügebestandteilen, bevor sie weiterfliessen (Fig. 25), wodurch sich der Widerstand weiter vergrössert. Das bisher bekannteste Beispiel dieser Art von Komposit-Magnetowiderstand sind die InSb-NiSb-Eutektika, die in Gestalt der «Feldplatten» (Fig. 26) bereits in mehreren elektronischen Kontroll- und Messgeräten Platz gefunden haben oder gar die Konstruktion eines bürstenlosen Gleichstrommotors erlauben [14].

3.4.2 p–n Übergänge. Äusserst interessante Anwendungen eines Grenzflächeneffektes sind in lamellaren Eutektika zu suchen, die aus p- und n-leitenden Lamellen bestehen. Offen-

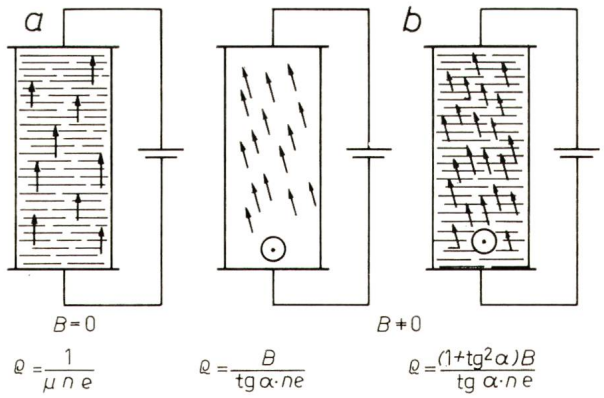


Fig. 25
Nernst-Ettinghauseneffekt im InSb-Einkristall (*a*) und im InSb-NiSb-Eutektikum (*b*)

sichtlich ist nicht ohne weiteres zu erwarten, dass zwei Phasen mit grundlegend unterschiedlichen Leitungsmechanismus aus derselben Schmelze gezogen werden können. In letzter Zeit ist jedoch eine Arbeit bekannt geworden [15], die das SnSe-$SnSe_2$-Eutektikum beschreibt (Fig. 27). Unabhängig ist nachgewiesen worden [15], dass mit Se-Überschuss hergestelltes SnSe p-Typ- und mit Se-Fehlstellen hergestelltes $SnSe_2$ n-Typ-Material ergeben. Eine dichte Packung von p-n-Übergängen, wie sie ein lamellares Eutektikum liefert, könnte Anwendungen in Elektrolumineszenz, Festkörperlaser, in monolithischen Schaltkreisen etc. finden. Die Möglichkeiten sind schier unübersehbar, insbesondere bei Hinzuziehung komplizierter Mehrphasenstrukturen als die bislang bekannt gewordenen.

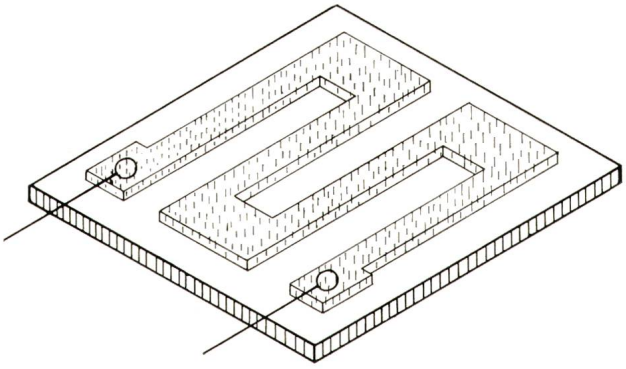


Fig. 26
«Feldplatte», magnetoresistives Bauelement

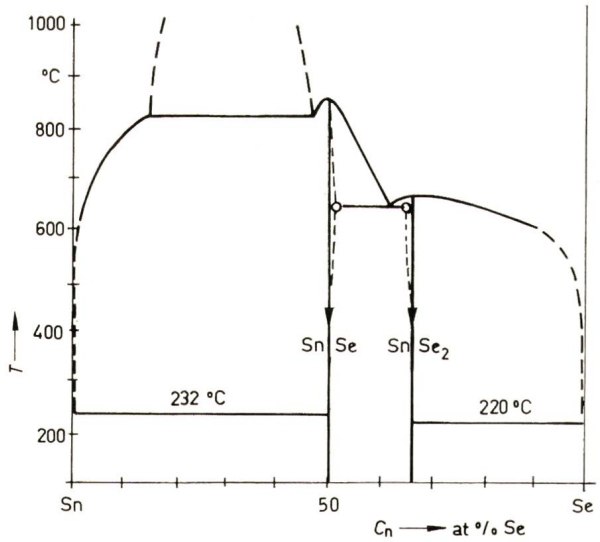


Fig. 27
Das Sn-Se-Zweistoffsystem mit SnSe-$SnSe_2$-Eutektikum
C_n Zusammensetzung; T Temperatur

4. Versuch einer Projektion in die Zukunft

Die zukünftige Förderung der Kompositionsstrukturen hängt vor allem mit zwei Entwicklungstendenzen zusammen:

a) Erschliessung neuer oder der Verfeinerung alter Anwendungsgebiete;
b) Entwicklung neuer oder der Verbesserung alter Technologien zur Herstellung von Kompositen.

Eine Projektion in die Zukunft wird stets zwei Pfade einschlagen müssen [16]:

a) Einfache Extrapolation dessen, was gegenwärtig existiert;
b) Erahnung bzw. «Prophezeiung» neuer Entwicklungen, die aus dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht übersichtlich folgen.

Ein einfaches Diagramm [2], nach den erwähnten Prinzipien zusammengestellt, verquickt einige der bearbeiteten Gebiete der heutigen Technik (Tabelle V). Wegen Platzmangels lässt

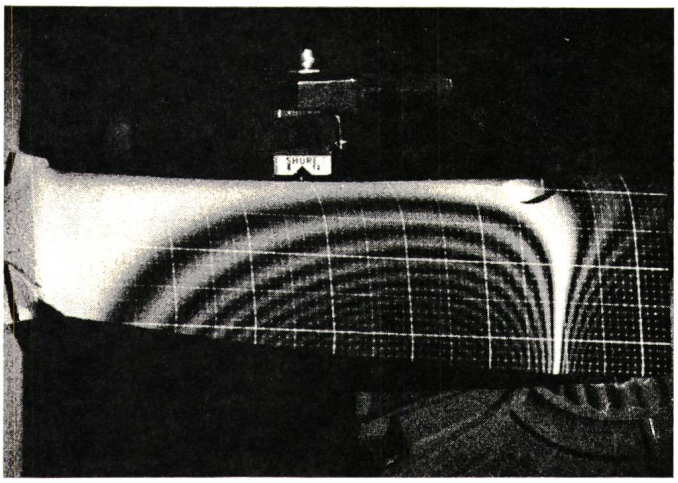


Fig. 28
Durch 3dimensionale Vibration hervorgerufenes Spannungsfeld in einer Turbinenschaufel, holographisch sichtbar gemacht

Einige wahllos herausgegriffene Zusammenhänge zwischen Anwendung, Herstellung und Theorie für die zukünftige Entwicklung gerichtet erstarrter Eutektika

Tabelle V

Anwendungsbereiche	Notwendige experimentelle bzw. präparative Methoden	Interessengebiete für Theorie und Erkenntnis
Magnetische Eigenschaften: Permanentmagnete, Magnetowiderstand	Genaue und dynamische Kontrolle der T-Gradienten einschl. Erweiterung des Bereiches nach oben (= genaue T-Kontrolle)	Erweiterung des gekoppelten Wachstumsbereiches
Supraleitung: Flussverankerung, kritische Felder, Proximity Effekt	genaue und dynamische Kontrolle der Erstarrungsgeschwindigkeit	Übergänge zwischen versch. Morphologien; ternäre und mehrphasige Systeme
Optische Eigenschaften: Magnetooptik, Polarisation	Lokale Dotierung	fehlerlose Faser- und Lamellenstrukturen
Komplexe elektronische Anwendung: (I.C., Lumineszenz)	Spezielle Effekte mit Magnetfeldern, elektr. Feldern, mech. Schwingungsfeldern	Lokalisierung von Verunreinigung und Strukturkomponenten
Mechanische Eigenschaften: allg. höhere Fest., Hoch-T-Festigk.	Massenproduktionsmethoden (z.B. Ausbau des Stranggussverfahrens, Taylorverfahrens)	

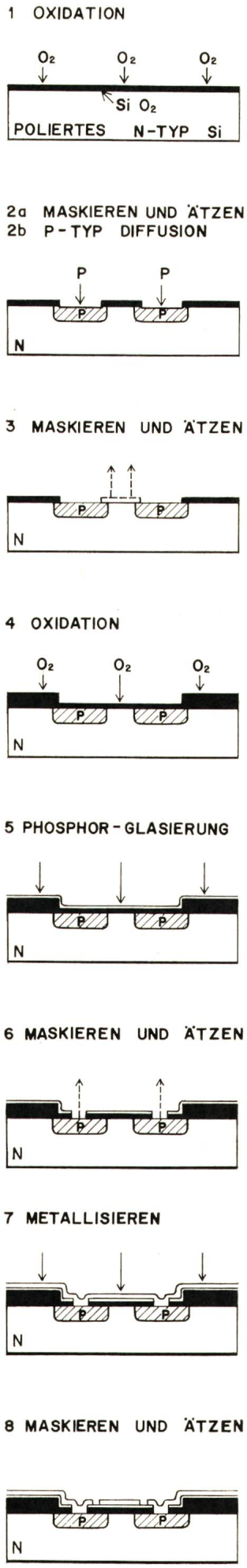


Fig. 29
Arbeitszyklus zur Herstellung eines integrierten Schaltkreises

sich nicht auf jede der angedeuteten Kombinationen eingehen. Daher mag es genügen, wenn zwei herausgegriffen werden, ein mechanisches und ein elektronisches Beispiel.

Die Turbinenschaufel unterliegt während des Laufes einem nichtlinearen Spannungsfeld, das im Standversuch mit holographischen Methoden sichtbar gemacht werden kann [17] (Fig. 28). Gelänge es nun, dieses Spannungsfeld mit verstärkenden Fasern [ähnlich dem Apatitskelett des Knochen (Fig. 1)] dreidimensional auszustatten, so wäre damit ein optimales Material geschaffen. Es lässt sich vorausdenken, dass die zukünftige Entwicklung eine individuelle Materialanpassung an den Gebrauchszweck anstreben wird: mit verfeinerten Herstellungsmethoden, die durch Computer kontrolliert werden.

Die Herstellung integrierter monolithischer Schaltkreise ist sehr komplex (Fig. 29). Nahezu alle denkbaren Präparationsmethoden werden im Verlauf solcher Arbeitszyklen angewendet. Es würde wirtschaftlich von Bedeutung sein, wenn man die Zahl der Arbeitsstufen verringern könnte. Mit der Erstarrung mehrphasiger (ternärer, quaternärer etc.) Eutektika z.B. würden Möglichkeiten existieren, keramische, metallische, ionische oder nichtleitende, halbleitende, supraleitende oder gar organische Stoffe strukturell zu verquicken und damit so etwas wie eine Ansammlung monolithischer Schaltkreise direkt aus der Schmelze zu ziehen.

Gegenüber den beiden extrapolierten Beispielen scheint der Schritt zu den eingangs erwähnten selbstregulierenden Strukturen weit gewagter, da bisher keine entsprechenden Werkstoffe in grösserem Umfang bekannt geworden sind. Von der

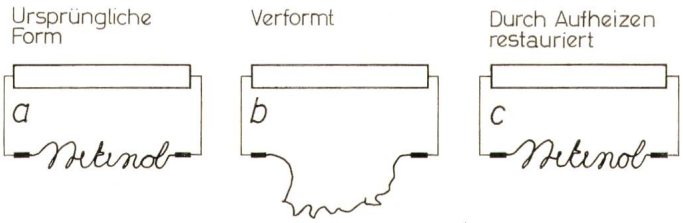


Fig. 30
TiNi-Legierung mit «Formgedächtnis»
Die durch eine Verformung hervorgerufene kristallographische Transformation wird durch Erwärmung rückgängig gemacht, wobei die vor der Verformung gewesene Gestalt wieder angenommen wird

Entwicklung in der organischen Chemie abgesehen, kann jedoch auf dem Gebiet der Metallkunde von einer interessanten Rarität berichtet werden: der Legierung mit Formerinnerungsvermögen TiNi [18]. Diese Legierung nimmt nach plastischer Verformung nach dem Aufheizen auf eine bestimmte Temperatur, ihre ursprüngliche Form genau wieder an (Fig. 30). Auf elektrischem Gebiet sind bereits seit geraumer Zeit selbstausheilende Strukturen bekannt, z. B. Li in Photozellen, das Strahlungsschäden durch Li-Diffusion ausheilt. Diese Beispiele sind jedoch nur geringe Ansätze, hoffentlich die gleichsam ersten Blinkzeichen einer massiven Entwicklung.

Ein Blick in die Zukunft der Kompositwerkstoffe möge mit dem Wort «im Material liegt die Botschaft verborgen» (frei übertragen nach *M. McLuhan's* «the medium is the message . . . or massage») [19] beschlossen werden! Für einen komplexen monolithischen Schaltkreis oder das tierische Gehirn trifft der Ausspruch im wahrsten Sinne des Wortes zu. Auf Grund einer einfachen phänomenologischen Extrapolation lässt sich der Zeitpunkt für eine weitgehende Erfüllung dieser Erwartung etwa auf die Jahre 2050 bis 3000 ansetzen (Fig. 31).

Der Autor möchte nicht versäumen, den Herren Prof. Dr. *A. P. Speiser* und Dr. *G. Gyarmathy* für kritische Durchsicht des Manuskriptes zu danken.

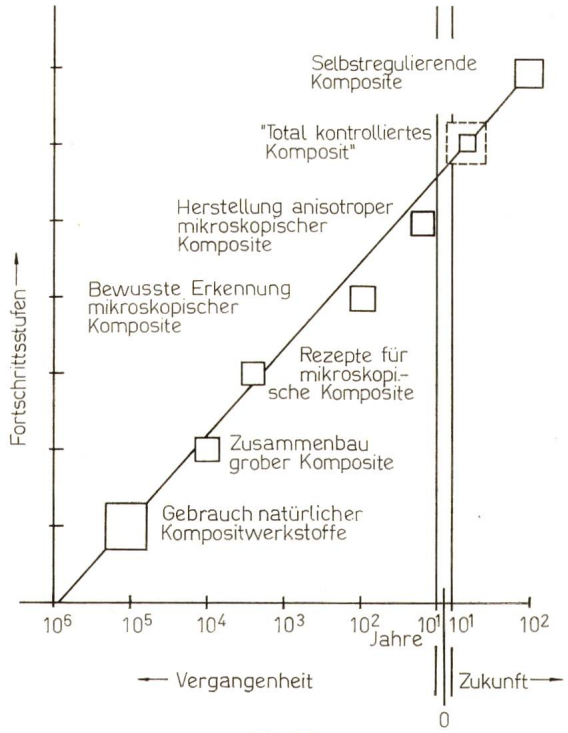


Fig. 31
Versuch einer linearen Extrapolation der Kompositstrukturentwicklung, geordnet nach Bewusstseinspegeln ihrer verstandesmässigen Durchdringung

Anhang

Zu Gl. (2) bedeuten:

D Diffusionskoeffizient (cm^2/s)

T_e eutektische Temperatur (^0K)

$\alpha_{\alpha,\beta}$ Grenzflächenwinkel zwischen Matrix und Faser gegenüber Schmelze an der Erstarrungsfront

$K_\alpha(\zeta)$ Volumenanteil (ζ)-abhängige Konstante [1]

$\zeta = \varphi_\beta/\varphi_\alpha$ Verhältnis der Volumenanteile von α (=Matrix) zu β (=Faser)

Δc $c_\alpha - c_\beta$ Differenz der Löslichkeit der Phase α für $\beta(c_\alpha)$ und der Phase β für $\alpha(c_\beta)$ bei der eutektischen Temperatur (Volumanteil)

N_L Losschmidtsche Zahl: $6{,}022 \cdot 10^{23}$ (Atome/Mol)

$V_{\alpha,\beta}$ Molvolumen der Phasen α und β (cm^3/Mol)

$m_{\alpha,\beta}$ Steigung der Liquiduslinien am eutektischen Punkt (Grad/Volumenanteil)

Gl. (3) lässt sich ableiten, wenn man bedenkt, dass der mittlere Faserabstand $2R$ mit dem Faserdurchmesser wie folgt zusammenhängt [1]:

$$D_f = \frac{2R}{(1+\zeta)^{1/2}}$$

Daraus folgt

$$R = \frac{D_f}{2}(1+\zeta)^{1/2} = \frac{D_f}{2(1-\varphi_\beta)^{1/2}}$$

weil

$$1+\zeta = 1 + \frac{\varphi_\beta}{\varphi_\alpha} = 1 + \frac{\beta}{1-\varphi_\beta} = \frac{1}{1-\varphi_\beta}$$

worin $\varphi_{\alpha,\beta}$ Volumenanteil der Phasen α oder β bedeuten. Da nach Gl. (2) auch

$$R = \text{Konst}/v^2$$

so folgt

$$\text{Konst}/v^{1/2} = \frac{D_f}{2(1-\varphi_\beta)^{1/2}}$$

und

$$D_f = 2\left[(1-\varphi_\beta)\,\text{Konst}/v\right]^{1/2} = 2\left[\text{Konst}/v\,(1+\zeta)\right]^{1/2}$$

Literatur

[1] *K. A. Jackson* and *J. D. Hunt:* Lamellar and rod eutectic growth. Transactions of the Metallurgical Society of AIME 236(1966)–, p. 1129...1142.

[2] *P. R. Sahm:* Zur Erstarrungskinetik eutektischer Legierungen. Schweizer Archiv 36(1970)6, S. 165...178.

[3] *P. R. Sahm:* Modified microstructure in eutectic Au-Co alloys by use of a magnetic field during directional solidification. Journal of Crystal Growth 6(1969)1, p. 101...103.

[4] *F. R. Mollard* and *M. C. Flemings:* Growth of composites from the melt. Transactions of the Metallurgical Society of AIME 239(1967)10, p. 1526...1546.

[5] *H. E. Cline:* Theory of the lamellar dendritic transition in eutectic alloys. Transactions of the Metallurgical Society of AIME 242(1968)8, p. 1613...1618.

[6] *A. Kelly:* Strong solids. Oxford, Clarendon, 1966.

[7] *E. R. Thompson* and *F. D. George:* Eutectic superalloys. SAE-Paper 690689 for Meeting. New York, Society of Automotive Engineers, 1969.

[8] *R. L. Garwin* and *J. Matisoo:* Superconducting lines for the transmission of large amounts of electrical power over great distances. Proc. IEEE 55(1967)4, p. 538...548.

[9] *H. Träuble* and *U. Essmann:* Flux line arrangement in superconductors as revealed by direct observation. J. Applied Physics 39(1968)8, p. 4052...4059.

[10] *B. T. Matthias* a. o.: Superconductivity at 20 degrees Kelvin. Science 156(1967)3775, p. 645...646.

[11] *W. A. Little:* Superconductivity at room temperature. Scientific American 212(1965)2, p. 21...27.

[12] *E. Kneller:* Ferromagnetismus. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1962.

[13] *J. D. Livingston:* Structure and magnetic properties of Au-Co aligned eutectics. J. applied Physics 41(1970)1, p. 197...204.

[14] *H. Weiss:* Feldplatten, magnetisch steuerbare Widerstände. ETZ-B 17(1965)10, S. 289...293.

[15] *W. Albers* and *J. Verberkt:* The SnSe-$SnSe_2$ eutectic; a P-N multilayer structure. J. Materials Science 5(1970)1, p. 24...28.

[16] *H. Kahn* and *A. J. Wiener:* The year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years. New York, Macmillan, London, Collier-Macmillan, 1968.

[17] *R. L. Powell* and *K. A. Stetson:* Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction. J. Optical Soc. America 55(1965)12, p. 1593...1598.

[18] Memory in a metallic compound. Nature 219(1968)–, p. 895.

[19] *M. McLuhan:* Understanding media: The extension of man. New York, McGraw-Hill, 1964.

[20] Superconductive power cables in 12 years. Industrial Research 11(1969)8, p. 19.

Adresse des Autors:

Dr. *P. R. Sahm,* Brown, Boveri Forschungszentrum, 5401 Baden.

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des TC 61, Sécurité des appareils électrodomestiques, vom 18. bis 23. Januar 1971 in Arnhem

Das TC 61 trat unter dem Vorsitz seines Vorsitzenden, Prof. R. C. G. Williams (United Kingdom), zusammen. Sekretär war Mr. K. S. Geiges (USA). Die Tagung wurde durch Mr. Huizinga, Vorstand des Holländischen Elektrotechnischen Vereins, eröffnet. Die Sitzungen fanden in den Räumen der KEMA (Holländische Prüfanstalt) statt.

Die Traktandenliste war recht umfangreich. Zu jedem Traktandum lagen lückenlose Zusammenstellungen vor. In diesen wurden zu jedem Punkt die Länderkommentare wörtlich aufgeführt. Auch das CES hatte zu fast allen Traktanden eine Stellungnahme verteilt. Durch die gute Vorbereitung konnte das reichlich befrachtete Programm fliessend fast vollständig behandelt werden. Die Traktandenliste wurde nach einiger Diskussion im wesentlichen genehmigt. Es wurden jedoch einige wegen vordringlicher anderer Arbeit bisher zurückgestellte Fälle zuerst behandelt.

Titel und Gültigkeitsbereich der Publ. 335-1, Sécurité des appareils électrodomestiques et analogues, Première partie: Règles générales. Der Vorsitzende bemerkte, dass diese wichtige Vorschrift unter Zeitnot entstanden ist. Sie enthält daher noch Unvollkommenheiten. Als positiv ist jedoch zu werten, dass sie vorliegt. Die an dieser Tagung zu diskutierenden speziellen Dokumente des zweiten Teiles werden zeigen, wo Ergänzungen oder Änderungen nötig sind. Die Philosophie von Teil I, die die grundlegenden, für alle Geräte gültigen sicherheitstechnischen Anforderungen enthält und eines speziellen Teils II mit gerätgebundenen Anforderungen ist zweckmässig und sollte, wenn immer möglich, aufrechterhalten werden.

Die deutsche Delegation schlug vor, Teil I zu unterteilen in die Gebiete Haushalt und ähnliche Anwendungen, Industrie, Handwerk und Landwirtschaft, Elektronik-Datenverarbeitung und Büromaschinen. Der Delegierte des CES befürwortete die klare Teil-I- und Teil-II-Konzeption. Die Elektronik, d. h. Elemente, die Vakuum-, Gasentladungsröhren oder Halbleiter enthalten, wird vermehrt in der gesamten Elektrotechnik verwendet. Teilweise ist sie derart in den Geräten integriert, dass sie prüftechnisch gar nicht gesondert behandelt werden kann. Die sicherheitstechnischen Anforderungen betreffend Lebens- und Feuergefahr sowie Radiostörschutz sind generell die gleichen. Die benötigten Textergänzungen sind nicht sehr zahlreich und wurden teilweise schon in Publ. 335-1 verarbeitet. Der Appendix «Elektronik» sollte dringend bearbeitet und bei nächster Gelegenheit im Text integriert werden. Wesentlich ist hierbei eine Ergänzung der Terminologie und der Definitionen. Das Sekretariat wird ein diesbezügliches Dokument verteilen. Der Gegenstand wird auf die Traktandenliste der nächsten Tagung (Brüssel, Juni 1971) kommen. Es werden 3 Titel zur Diskussion gestellt:

I Household, Commercial, Light Industrial and Similar Appliances,

II Electrical Appliances, Excluding Telecommunications,

III Electrical Appliances.

Feuchtigkeit und Temperatur sind naturgegeben aneinander gebunden. Die für Prüfungen empfohlenen Standardwerte und Toleranzen gaben zu Interpretationsschwierigkeiten Anlass. Das Sekretariat wird um Abklärung gebeten. Es wird ein diesbezügliches Dokument verteilt. Ohne Widerspruch werden die textlichen Änderungen vorgenommen, andernfalls an die nächste Tagung verwiesen.