

Amorphe und nanokristalline Metalle

Von Hans-Rainer Hilzinger und Hans Warlimont

Es ist gar nicht so einfach, einen metallischen Festkörper herzustellen, bei dem Unordnung bis ins kleinste Detail herrscht. Während eine Schmelze beim Abkühlen erstarrt, haben die Metallatome im allgemeinen genügend Zeit, Kristallkeime auszubilden, die lokal zu Mikrokristallen heranwachsen. Nur wenn man die Schmelze extrem schnell – beispielsweise mit einer Million Grad pro Sekunde - abkühlt, entsteht ein amorpher Festkörper. Wie beim Glas verbleiben die Atome dann in einem weitgehend ungeordneten Zustand. Man spricht denn auch von metallischen Gläsern, obgleich sie weder spröde noch durchsichtig sind (Spektrum der Wissenschaft, Juni 1980, Seite 47). Die amorphe Struktur verschafft ihnen einige interessante und praktisch nutzbare Eigenschaften: Insbesondere haben sie einen hohen elektrischen Widerstand und verhalten sich magnetisch weich, d.h. sie folgen Wechsellinien der magnetischen Feldrichtung bereits bei geringer Feldstärke.

In bereits technisch verwendeten Legierungen sind 70 bis 85 Prozent der Atome Übergangsmetalle wie Eisen, Cobalt oder Nickel und 15 bis 30 Prozent Halbmetalle wie Silicium und Bor (Halbmetalle sind Elemente, die in Eigenschaften wie der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit zwischen Metallen und Nichtmetallen liegen). Bei diesen Zusammensetzungen ist die Energie im kristallinen Zustand kaum niedriger als in der Schmelze; die Neigung zu kristallisieren ist darum nur schwach, so daß der Glaszustand erreicht werden kann und gegen Temperaturerhöhung relativ stabil ist.

Erstarren in Sekundenbruchteilen

Zur Herstellung metallischer Gläser haben industrielle Forschungsgruppen das sogenannte Schmelzspinn-Verfahren bis zur Produktionsreife entwickelt: Die aufgeschmolzene Legierung wird durch eine keramische Düse auf einen rasch rotierenden, wassergekühlten Metallzylinder aufgegossen (Bild 1). Der innige Kontakt zwischen dem sich bildenden Metallfilm und dem Zylinder sowie dessen hohe Wärmeleitfähigkeit bewirken die extrem schnelle Abkühlung.

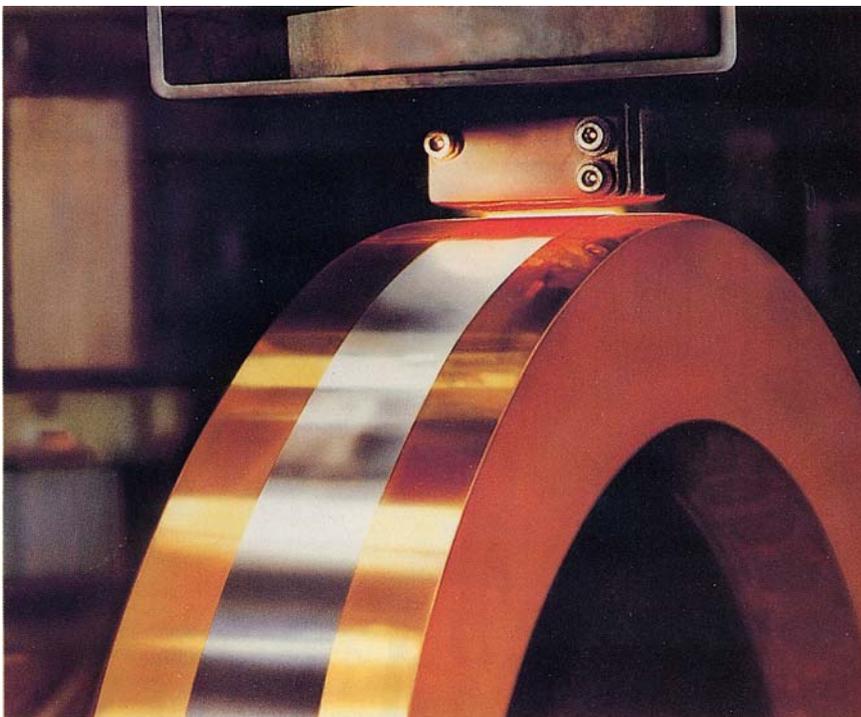


Bild 1:
Metallische Gläser entstehen, wenn die Schmelze durch eine Keramikdüse auf ein gekühltes Rad gegossen und so in Millisekunden von etwa 1400 auf 400 Grad Celsius abgekühlt wird. Präzise Anlagensteuerung ist für die Qualität entscheidend. Das Rad dieser Laboranlage zur Optimierung von Legierungen hat einen Durchmesser von 80 und eine Breite von 10 Zentimetern; die Folie ist 5 Zentimeter breit.

Vor einer vollen Umdrehung wird der Metallfilm abgehoben; so bildet sich kontinuierlich ein dünnes Band. Um Abkühlgeschwindigkeiten von einer Million Grad pro Sekunde zu erreichen, muß seine Dicke allerdings deutlich unter 0,1 Millimeter liegen. Das steuert man im wesentlichen durch die Wal-

zengeschwindigkeit: Mit 20 bis 50 Metern pro Sekunde lassen sich 0,02 bis 0,04 Millimeter erreichen. Die Abmessungen der Gießdüse und der Kühlwalze bestimmen die Folienbreite. Die hohen Gießgeschwindigkeiten, der große Temperaturunterschied zwischen Metallstrahl und Kühlwalze sowie die erforderliche Präzision in der Positionierung der Düse zur rotierenden Walze stellen erhebliche Anforderungen an die Verfahrenstechnik. Beispielsweise kann sich die Walze durch Erwärmung, ausdehnen; darum muß der Spalt zwischen Düse und Walze überwacht und nachgeregelt werden.

Weich gegen wechselnde Magnetfelder

In Metallen gehören Bindungselektronen nicht einem, sondern allen Atomen. Derart miteinander gekoppelt, wirken sie aufeinander ein und bilden in ferromagnetischen Materialien spontan magnetisch geordnete Bereiche aus - die Weißsehen Bezirke, die der französische Physiker Pierre-Ernest Weiss (1865 bis 1940) erstmals beschrieben hat.

Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, haben die atomaren magnetischen Momente zwei Möglichkeiten, sich danach auszurichten: Zum einen drehen sie sich innerhalb Weißscher Bezirke, zum anderen wachsen diejenigen Bezirke, die bereits eine energetisch günstige Orientierung haben, auf Kosten der anderen, und die Grenzschichten zwischen ihnen, die sogenannten Bloch-Wände (benannt nach dem amerikanischen Physiker Felix Bloch, geboren 1905, Nobelpreis 1952), wandern. In einem Kristall gibt es aber magnetische Vorzugsrichtungen; diese Anisotropie behindert die Drehung der magnetischen Momente. Außerdem ist ein Metallgitter im allgemeinen gestört und durch Fehlordnung deformiert (inhomogen); an solchen Störungen bleiben die Grenzschichten beim Wandern leicht haften.

Demgegenüber sind amorphe Metalle homogen und ihre Eigenschaften in allen Richtungen gleich. Die Magnetisierung ist darum wesentlich erleichtert.

Am deutlichsten macht sich das beim erneuten Wechsel der Magnetfeldrichtung bemerkbar. In einem Metall mit Gitterstruktur ist es oft energieaufwendiger, den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen. Es verbleibt zunächst eine als Remanenz bezeichnete Restmagnetisierung. Eine zusätzliche Feldkraft - die Koerzitivfeldstärke - ist erforderlich, um die magnetischen Momente wieder in den Ausgangszustand zu bringen. Für Anwendungen in Wechselfeldern bevorzugt man darum weichmagnetische Materialien, die schon in schwachen Feldern ummagnetisieren. Dazu gehören die amorphen Metalle und Nickel-Eisen-Legierungen.

Ein weiterer Vorteil der metallischen Gläser ist ihr hoher spezifischer elektrischer Widerstand von 1,2 bis 1,5 millionstel Ohmmeter. Dadurch werden elektrische Wirbelströme, eine Folge der Selbstinduktion beim Ändern der Magnetisierungsrichtung, selbst bei Frequenzen von mehreren hundert Kilohertz stark reduziert. Das bedeutet auch, daß sich die Materialien weniger erwärmen., der Aufwand für die Wärmeabfuhr geringer wird und damit das ganze Gerät kompakter zu bauen ist. Amorphe Metalle, zu Ringbandkernen gewickelt, setzt man darum in Überträgern und Drosselspulen für Schaltnetzteile ein, wenn entsprechend hohe Frequenzen zu bewältigen sind (Bild 2).

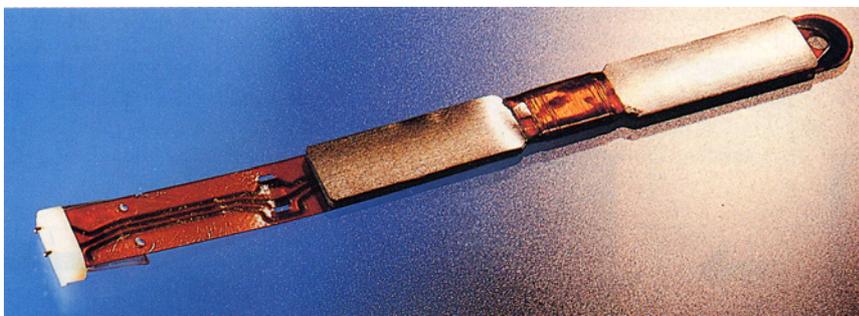


Bild 2:

Diese in einem Uhrenarmband versteckte Antenne kann die Signale des deutschen Zeitzeichensenders in Mainflingen noch in einer Entfernung von 1500 Kilometern empfangen. Der Spulenkern besteht aus mehreren Lagen einer Folie aus amorphem Metall; die Verjüngung für die Kupferumwicklung wurde ausgestanzt

Ordnung im Kleinen

Mittlerweile geht die Entwicklung zu nanokristallinen Materialien. Metallglas-Folien, auf 500 bis 600 Grad Celsius erwärmt, verändern ihre Struktur: Es entstehen Kristallite mit Kornabmessungen von 10 bis 15 Nanometern (millionstel Millimetern), getrennt durch amorphe Grenzschichten von wenigen Atomlagen Dicke.

Die Eigenschaften dieser Materialien werden derzeit für ausgewählte Legierungen untersucht. Sie können weichmagnetisch wie metallische Gläser sein, sind aber gegen Erwärmung und Magnetostraktion, die Formänderung durch Umordnung der magnetischen Momente stabiler. Zudem bestehen die Legierungen zu 80 Prozent aus dem preiswerten Eisen, während Nickel-Eisen-Legierungen 80 Prozent Nickel und amorphe Metalle Cobalt in der gleichen Größenordnung enthalten.

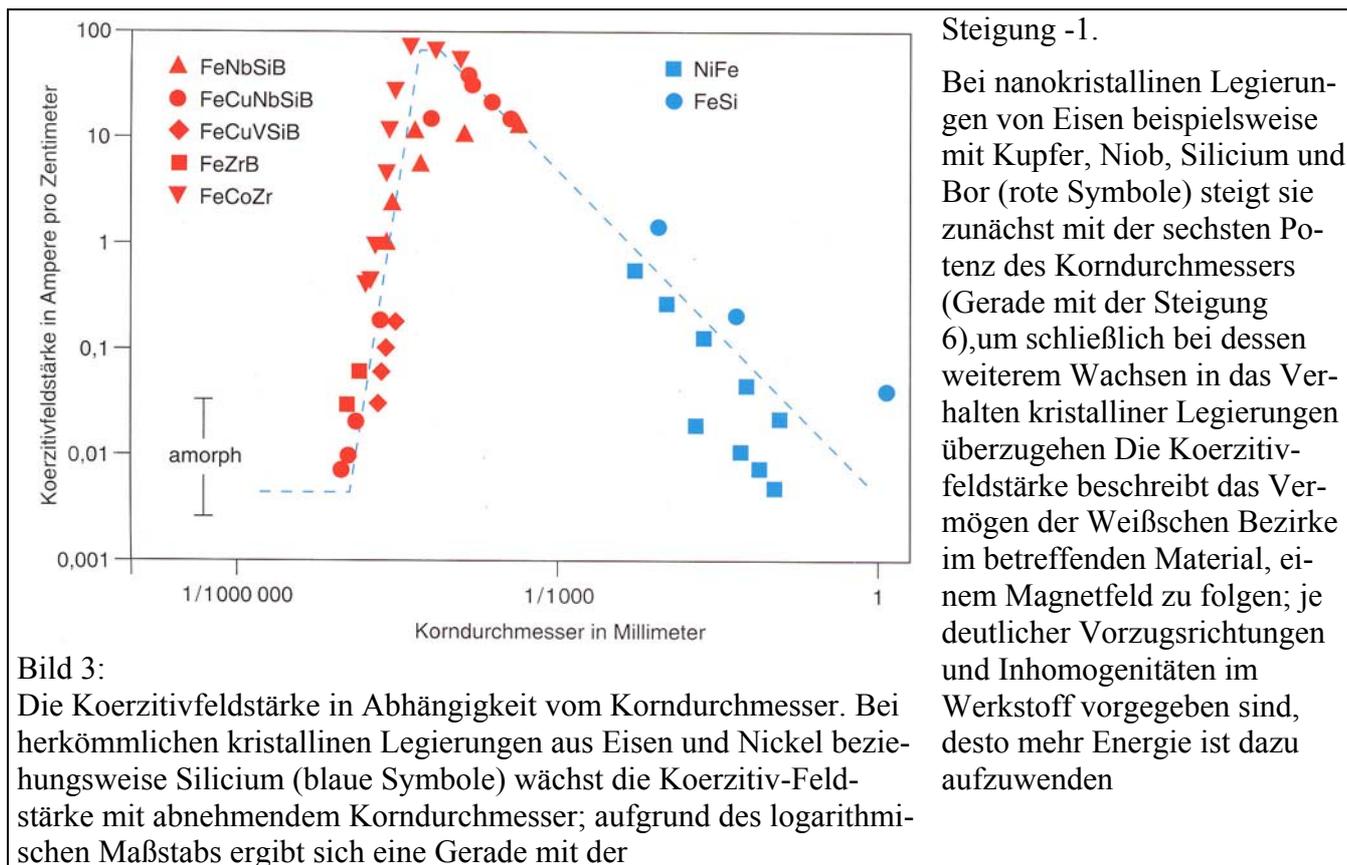


Bild 3:

Die Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit vom Korndurchmesser. Bei herkömmlichen kristallinen Legierungen aus Eisen und Nickel beziehungsweise Silicium (blaue Symbole) wächst die Koerzitiv-Feldstärke mit abnehmendem Korndurchmesser; aufgrund des logarithmischen Maßstabs ergibt sich eine Gerade mit der

Die magnetische Weichheit ist zunächst überraschend, denn die Erfahrung mit kristallinen Werkstoffen zeigt: Je kleiner die Körner sind, um so größer ist (bei gegebenem Volumen) die Gesamtgrenzfläche und damit die Koerzitivfeldstärke (Bild 2). Bei nanokristallinen Legierungen ist sie aber deswegen sehr klein, weil bei diesen Abmessungen ein Weißscher Bezirk sehr viele Kristallkörner umfaßt. Die einzelnen Körner haben zwar noch eine Vorzugsrichtung, aber deren Auswirkung verschwindet bei der Mittelung über einen ganzen Bezirk. Von außen gesehen, verschwimmen gewissermaßen die Effekte einzelner Kristallite wegen ihrer Kleinheit. Dadurch wirkt das Metall homogen und isotrop. Erst bei Temperaturen oberhalb von 600 Grad Celsius beginnt wieder ein Kornwachstum, und der Werkstoff wird magnetisch härter.

Vorteile des Unvollkommenen

Die nanokristallinen Metalle befinden sich noch im Prototypstadium. Erfolgreich getestet wurden bereits Anwendungen im Hochfrequenzbereich sowie in Fehlerstromschutzschaltern, bislang eine Domäne von Nickel-Eisen-Legierungen. Letztere messen bei 50-Hertz-Wechselstrom die Differenz zwischen ein- und ausgehen dem Strom und unterbrechen den Stromkreis bei Unregelmäßigkeiten, wie sie

beispielsweise von schadhaften Geräten Haushalt herrühren können. Nanokristalline Metalle werden vermutlich in vielen Anwendungsfeldern zum Einsatz kommen, die bislang herkömmlichen oder amorphen Werkstoffen vorbehalten waren.