

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 16

Artikel: Thermische und elektrische Eigenschaften besonderer Nickel-Legierungen für die Elektrotechnik

Autor: Herrmann, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916761>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Thermische und elektrische Eigenschaften besonderer Nickel-Legierungen für die Elektrotechnik

Von H. Herrmann, Hanau

669.245 : 621.3

Es wird über besondere thermische und elektrische Eigenschaften von Nickel und Nickel-Legierungen berichtet und an Hand von Beispielen auf Anwendungen in der Elektrotechnik hingewiesen, bei denen man von diesen Eigenschaften Gebrauch macht. Dabei werden folgende Anwendungsgebiete behandelt: Reinnickel und Nickel mit kleinen Zusätzen für Elektronenröhren und ähnliche Geräte; Nickel-Legierungen für Temperaturmessungen; oxydationsbeständige, warmfeste und korrosionsbeständige Legierungen; Legierungen für elektrische Widerstände; Nickel-Eisen-Legierungen mit besonderer Wärmedehnung; Nickelhaltige aushärtbare Federlegierungen; Federlegierungen mit einstellbarem Temperaturgang des Elastizitätsmoduls.

L'auteur décrit les propriétés thermiques et électriques particulières du nickel et de ses alliages, à l'aide d'exemples d'applications en électrotechnique, où il est fait usage de ces propriétés. Il traite les domaines d'applications suivants: nickel pur ou avec de faibles additions pour tubes électroniques et dispositifs analogues; alliages de nickel pour mesures de température, alliages inoxydables, résistants à la chaleur et à la corrosion, alliages pour résistances électriques, ferro-nickels à dilatation thermique déterminée, alliages pour ressorts durcissables à teneur en nickel, alliages pour ressorts dont la variation de température du module d'élasticité peut être ajustée.

1. Einleitung

Neben Eisen, Kupfer und Aluminium ist zweifellos Nickel zu den wichtigsten Gebrauchsmetallen der Elektrotechnik zu zählen. Die verschiedenartigen und interessanten Eigenschaften dieses Metalles und seiner Legierungen und die sich daraus ergebenden vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten sollen nachfolgend an Hand einiger Beispiele betrachtet werden. Es ist dabei recht schwierig, eine sinnvolle Begrenzung dieser Werkstoffgruppe vorzunehmen. Einerseits führen oft schon sehr kleine Zusätze zu reinem Nickel zu neuen Eigenschaften und anderen Anwendungen, anderseits ist es reizvoll, die sich ändernden Eigenschaften einer Legierungsreihe mit abnehmendem Nickelgehalt zu verfolgen, wobei man auch Legierungen mit geringerem Nickelanteil als 50 % nicht ausschliessen kann.

2. Reinnickel und Nickel mit kleinen Zusätzen für Elektronenröhren und ähnliche Geräte

Neben den in den letzten Jahren sehr bedeutsam gewordenen Halbleitern spielt auf vielen Gebieten der Elektrotechnik nach wie vor die Elektronenröhre eine grosse Rolle. Als «Herz» der Elektronenröhre kann man die Kathode bezeichnen, welche die für die Funktion so wichtigen Elektronen liefert. In sehr vereinfachter Darstellung lassen sich Aufbau und Wirkungsweise etwa folgendermassen beschreiben: Auf einen Trägerkörper aus Nickel ist eine Oxydschicht aufgebracht, die vorwiegend aus Bariumoxyd besteht. Durch sehr kleine, genau dosierte Zusätze zu dem Trägermetall Nickel wird ein Teil des Bariumoxydes zu Barium reduziert, welches bei Beheizung der Kathode Elektronen abgibt. Diese Vorgänge können empfindlich gestört werden, wenn das Trägermetall unerwünschte Verunreinigungen enthält, die entweder die Reaktion mit der Oxydschicht in nachteiliger Weise beeinflussen, oder durch Ablagerung von Reaktionsprodukten zwischen Trägermetall und Oxydbelag eine hochohmige Zwischenschicht bilden, oder auch durch Verdamp-

fung das Vakuum verschlechtern und als Niederschlag zwischen isolierten Teilen elektrisch leitende «Brücken» bilden. Zu den unerwünschten Verunreinigungen zählen z. B. Mangan, Eisen, Zink, Schwefel u. a.; als beabsichtigte Zusätze dagegen seien Magnesium, Wolfram, Zirkon und Aluminium genannt. Es gibt auch Elemente, die in bestimmten Röhrentypen unerwünschte Verunreinigung, in anderen dagegen absichtlicher Zusatz sind, wie etwa Silizium und Kohlenstoff. Sowohl die Art und Menge der Zusätze als auch die maximal zulässigen Verunreinigungen werden durch die von der Elektronenröhre geforderten Eigenschaften bestimmt, wobei oft ein Kompromiss zwischen hohem Nutzeffekt und langer Lebensdauer zu schliessen ist. Einige für Oxydkathoden gerne benutzte Nickelsorten sind in Tabelle I angegeben [1; 2; 3] ¹⁾.

Ausser diesen Werkstoffen für Oxydkathoden werden auch für andere Innenbauteile häufig Nickel-Legierungen eingesetzt, z. B. Nickel mit Mangangehalten zwischen 0,3 und 5 % oder mit Beryllium desoxydiertes Nickel. Durch einen Mangan-Zusatz zu Nickel werden die Rekristallisationstemperatur und die Festigkeit erhöht, sowie die Neigung zur Aussendung störender Sekundärelektronen wesentlich herabgesetzt. Für Bauteile, die nicht ferromagnetisch sein dürfen, sind Nickel-Chrom (80 % Ni, 20 % Cr) und Nickel-Kupfer (55 % Ni, 45 % Cu) gebräuchlich. Die Nickel-Chrom-Legierung zeichnet sich darüber hinaus durch sehr gute Formbeständigkeit (und Oxydationsbeständigkeit) bei höheren Temperaturen aus.

Für Halterungen beheizter Kathoden braucht man Legierungen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit und nimmt dazu Eisen-Legierungen mit 36 oder 42 % Nickel (vergl. Abschnitt 6).

3. Nickel-Legierungen für Temperaturmessungen

Eines der wichtigsten Hilfsmittel zur Messung, Regelung und Registrierung von Temperaturen ist das Thermoelement.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Zusammensetzung einiger Nickelsorten für Oxydkathoden

Tabelle I

Absichtlicher Zusatz %				Max. zulässige Verunreinigung %							Anwendungsbeispiele
Ni	Mg	W	Al	Si	Al	Mn	Fe	Cu	S	C	
99,9	0,04-0,06	—	—	0,02	0,01	0,01	0,08	0,03	0,005	0,05	normale Röhren hoher Leistung
99,9	0,06-0,09	—	—	0,02	0,01	0,01	0,08	0,03	0,005	0,05	
95,9	0,02-0,04	4	—	0,02	0,01	0,01	0,08	0,03	0,005	0,05	Röhren mit langer Lebensdauer
97,8	0,02-0,06	2	0,02...0,10	0,02	—	0,01	0,08	0,03	0,005	0,05	

Auf diesem Sektor haben sich ebenfalls Nickel-Legierungen einen hervorragenden Platz erobert. Es ist bemerkenswert, dass man durch Zusatz verschiedener Metalle die thermoelektrischen Eigenschaften des Nickels extrem stark verändern kann. Während man durch Zugabe von Kupfer (bis ca. 50 %) Legierungen erhält, die gegen reines Nickel eine negative Thermospannung aufweisen, führen Zusätze von Vanadium, Molybdän oder Chrom (bis ca. 15 %) zu Legierungen mit stark positiver Thermospannung gegen Nickel [4]. Eine Darstellung dieser Beobachtungen zeigt Fig. 1.

Aus diesen Untersuchungen sind einige Paarungen entstanden, die in der Technik häufig benutzt werden und die in verschiedenen Ländern genormt wurden. Die grösste Be-

deutung neben den Elementen aus Edelmetallen (Platin-Rhodium/Platin) kommt dabei wohl dem Element Nickel-Chrom/Nickel zu, welches sich durch seine nahezu linear mit der Temperatur ansteigende relativ hohe Thermospannung, sowie seine gute Oxydationsbeständigkeit bis zu Temperaturen von ca. 1000 °C auszeichnet. Für niedrigere Temperaturen werden die Paarungen Eisen/Konstantan (= Nickel-Kupfer) und Kupfer/Konstantan gerne eingesetzt [5].

Die Zusammensetzung und Thermospannung der drei wichtigsten unedlen Thermoelemente sind der Tabelle II zu entnehmen.

Ergänzend ist noch die Paarung Nickel-Chrom/Konstantan zu nennen, die wegen ihrer besonders grossen Thermospannung (0...700 °C, 53,14 mV) für elektromagnetisch arbeitende Zündflammsicherungen häufig benutzt wird.

In dem Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und ca. 200 °C reicht die Messgenauigkeit eines Thermoelementes verschiedentlich nicht aus. Man greift dann auf das genauere Widerstandsthermometer zurück. Dieses besteht im wesentlichen aus einer Wicklung dünner Drahtes, dessen elektrischer Widerstand mit steigender Temperatur stark zunimmt, so dass man mittels einer Widerstandsmessung die Temperatur bestimmen kann, der die Wicklung ausgesetzt ist. Voraussetzung ist, dass der Widerstandsanstieg (Temperaturkoeffizient des Widerstandes) gleichmäßig erfolgt, genau bekannt ist und innerhalb sehr enger Grenzen reproduzierbar eingehalten werden kann. Für die Widerstandswicklungen kommen Platin und Nickel zur Anwendung. Reines Nickel hat neben dem aus anderen Gründen schlechter geeigneten Eisen unterhalb seines bei ca. 360 °C liegenden Curiepunktes von den gebräuchlichsten Metallen den grössten Temperaturkoeffizienten (α) des Widerstandes (zwischen 0 und 100 °C ist $\alpha = 6,7 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$). Durch einen kleinen Legierungszusatz wird dieser Wert erniedrigt auf die genormte Grösse von $6,17 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, der sich bei der technischen Herstellung sehr gleichmäßig einhalten lässt.

Zum Vergleich zeigt Fig. 2 den Anstieg des Widerstandes mit der Temperatur von Nickel und Platin.

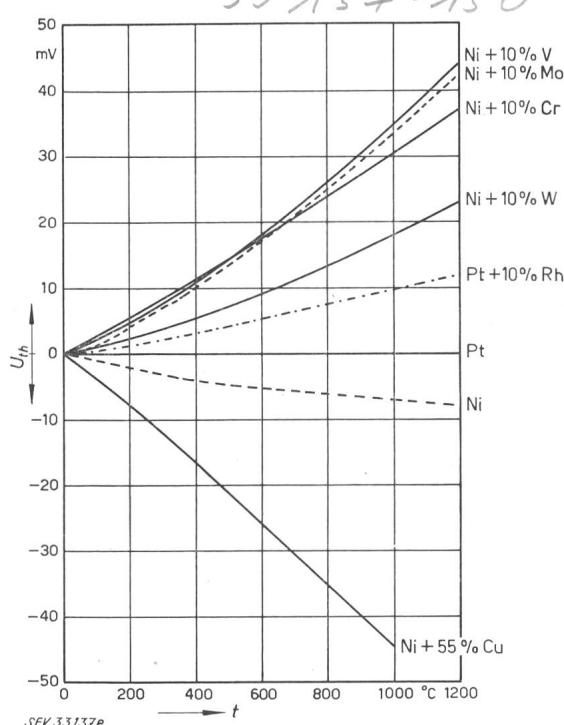


Fig. 1

Thermospannung von Nickel mit verschiedenen Zusätzen (Gewichts-Prozente) gegen reines Platin

U_{th} Thermospannung gegen Platin; t Temperatur

Hauptbestandteile und Thermospannung einiger Thermoelemente

Tabelle II

Bezeichnung	Hauptbestandteile		Thermospannung mV		
	Plusschenkel	Minusschenkel	0...400 °C	0...700 °C	0...1000 °C
NiCr/Ni	90 % Ni, 10 % Cr	95 % Ni, 2 % Mn, 2 % Al	16,40	29,14	41,31
Fe/Konst.	100 % Fe	43 % Ni, 57 % Cu	22,16	39,72	—
Cu/Konst.	100 % Cu	43 % Ni, 57 % Cu	21,00	—	—

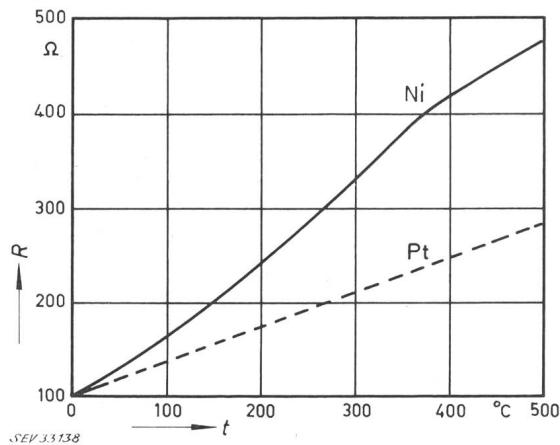


Fig. 2
Anstieg des elektrischen Widerstandes R von Nickel und Platin mit der Temperatur t

Eine weitere Werkstoffgruppe für Temperaturmess- und Regelaufgaben sind die Thermobimetalle, auf die in Abschnitt 6 näher eingegangen wird.

4. Oxydationsbeständige, warmfeste und korrosionsbeständige Legierungen

Sowohl in der Industrie als auch im Haushalt spielt die Erzeugung von Wärme eine grosse Rolle. Eine der bequemsten Möglichkeiten dazu bietet die elektrische Energie. Zur Umsetzung der Energie in Wärme braucht man Heizelemente, die bei hohen Betriebstemperaturen eine gute Lebensdauer aufweisen. Ein beträchtlicher Anteil der für die Heizelemente benötigten Drähte, Bänder und Rohre wird wiederum aus Nickel-Legierungen hergestellt. Die wichtigsten Anforderungen an solche Werkstoffe sind:

- Gute Oxydationsbeständigkeit;
- Hohe Warmfestigkeit;
- Genügend hoher spezifischer Widerstand und meistens ein kleiner Temperaturkoeffizient;
- Unempfindlichkeit gegen aggressive Bestandteile der Umgebung;
- Gute Verarbeitbarkeit.

Am besten erfüllt werden diese Bedingungen von Legierungen der Systeme Nickel-Chrom, Nickel-Eisen-Chrom und Eisen-Chrom-Aluminium [6]. Die dritte Legierungsgruppe enthält zwar kein Nickel, darf aber wegen ihrer Bedeutung hier nicht unerwähnt bleiben. An der erreichbaren hohen Zunderbeständigkeit und Lebensdauer sind kleine Zusätze verschiedener Elemente massgeblich beteiligt.

Eine der am vielseitigsten verwendbaren Legierungen besteht aus 80 % Nickel und 20 % Chrom und zeichnet sich besonders durch ihre hohe Oxydationsbeständigkeit an Luft aus. Ein Nachteil der hochnickelhaltigen Legierungen ist

ihre Empfindlichkeit gegen Schwefel und Schwefelverbindungen [7]. Die Widerstandsfähigkeit gegen solche Angriffe lässt sich durch Eisenzusatz erhöhen, wobei man allerdings eine Erniedrigung der höchstzulässigen Daueranwendungstemperatur in Kauf nehmen muss. Die wichtigsten Eigenschaften verschiedener nickelhaltiger Heizleiter-Legierungen enthält Tabelle III (nach DIN 17 470).

Es sei erwähnt, dass sich im Zusammenhang mit der Untersuchung der Eigenschaften von Heizleiterlegierungen auch interessante metallkundliche Probleme ergeben haben, wie z. B. der bei Nickel-Chrom-Legierungen aufgefundene sog. K-Zustand [8; 9; 10]. Darunter ist eine Art Nahordnung der Atome im Mischkristallgitter zu verstehen, die durch Wärmebehandlungen unter 600 °C entsteht und in Änderungen des elektrischen Widerstandes und der thermoelektrischen Eigenschaften zum Ausdruck kommt. Die beobachteten Vorgänge sind nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern auch von praktischer Bedeutung. Sie erklären den bei einigen Legierungen vorhandenen Einfluss der Vorbehandlung auf den Widerstand bei Raumtemperatur. Die Abhängigkeit der Widerstand-Temperaturkurve von der Vorbehandlung ist für die Legierung NiCr 80 20 in Fig. 3 schematisch dargestellt [10].

Es ist nicht weiter verwunderlich, dass sich die meisten der erwähnten Heizleiter-Legierungen auch als warmfeste Werkstoffe für thermisch hoch beanspruchte Geräteteile, wie Muffeln und Traggestelle von Öfen, Förderbänder für Durchlaufglühöfen, Einsatzbehälter, Roste, Wärmeleit- und Wärmeschutzbleche usw., sehr gut bewährt haben.

Um eine noch höhere Warmfestigkeit zu erreichen, sind diese Legierungen mittels verschiedener Zusätze weiterentwickelt worden. Durch Zugabe von Molybdän und Kobalt zu eisenfreiem Nickel-Chrom konnte die Rekristallisations-

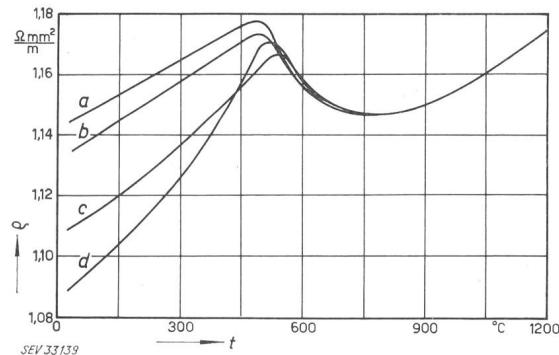


Fig. 3
Einfluss der Vorbehandlung auf den spezifischen elektrischen Widerstand ρ bei NiCr 80/20

Die Proben wurden gegläut und mit verschiedener Geschwindigkeit abgekühlt

a 0,8 °C/min; b 3,5 °C/min; c ca. 300 °C/min;
d kontinuierliche Durchlaufglühung

Zusammensetzung und Eigenschaften einiger Heizleiter-Legierungen

Tabelle III

Bezeichnung	Hauptbestandteile			Höchstzulässige Anwendungstemperatur °C	Spezifischer Widerstand bei 20 °C Ωmm²/m	Temperatur-Faktor $\frac{R_{600}}{R_{20}}$	Dichte g/cm³	Festigkeit kg/mm²	Dehnung bei 100 mm Messlänge %
	Ni	Cr	Ic						
	%								
NiCr 80 20	80	20	—	1200	1,12	1,026	8,3	75...90	≥ 20
NiCr 60 15	60	15	25	1150	1,13	1,070	8,2	75...90	≥ 30
NiCr 30 20	30	20	50	1100	1,04	1,172	7,9	68...83	≥ 30
CrNi 25 20	20	25	55	1050	0,95	1,242	7,8	60...75	≥ 30

temperatur erhöht werden, durch Zugabe von Titan und Aluminium wurden die Legierungen auch aushärtbar.

Schliesslich dürfen an dieser Stelle die korrosionsbeständigen Legierungen nicht unerwähnt bleiben. Im Vordergrund stehen dabei die Werkstoffe, von denen man Beständigkeit in feuchter Umgebung und Unempfindlichkeit gegen electrolytische Korrosion verlangt. Hervorragend bewährt haben sich bei solchen Anforderungen hochnickelhaltige Legierungen, Nickel-Kupfer-Legierungen sowie die bekannten Chrom-Nickel-Stähle. Aus der ersten Gruppe ist eine Legierung mit den Hauptbestandteilen 60 % Nickel, 15 % Chrom, 15 % Eisen 7 % Molybdän hervorzuheben, die sowohl rostsicher als auch gegen viele Säuren beständig ist.

Einen sehr breiten Raum nehmen die Nickel-Kupfer-Legierungen ein, die mit weiteren Zusätzen (Fe, Al) in zahlreichen Variationen hergestellt werden. Die Nickelgehalte liegen hauptsächlich zwischen 10 und 70 % [11; 12].

Bei den Chrom-Nickel-Stählen wird die Korrosionsbeständigkeit vorwiegend durch den Chrom- (15...25 %) und Nickelanteil (8...12 %) erreicht [13].

Anwendungsbeispiele für Nickel-Kupfer-Legierungen und Chrom-Nickel-Stähle sind in erster Linie Bauteile in Industrieanlagen, wie Kessel und Behälter, Wärmeaustauscher, Rohrleitungen usw.

5. Legierungen für elektrische Widerstände

Während der hohe Temperaturkoeffizient des Widerstandes von reinem Nickel (vergl. Abschnitt 3) für Widerstandsthermometer sehr willkommen ist, legt man bei Werkstoffen für elektrische Widerstände grössten Wert auf einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten bei hinreichend hohem spezifischen Widerstand.

Legierungen, die diesen Wünschen weitgehend gerecht werden, entstammen vorwiegend den Systemen Nickel-Kupfer und Nickel-Chrom. Der Verlauf des spezifischen Widerstandes und des Temperaturkoeffizienten für Nickel-Kupfer-Legierungen ist in Fig. 4 dargestellt. Wie man sieht, erreicht man mit ca. 45 % Ni die günstigsten Eigenschaften. Legierungen dieser Zusammensetzung werden in grossem

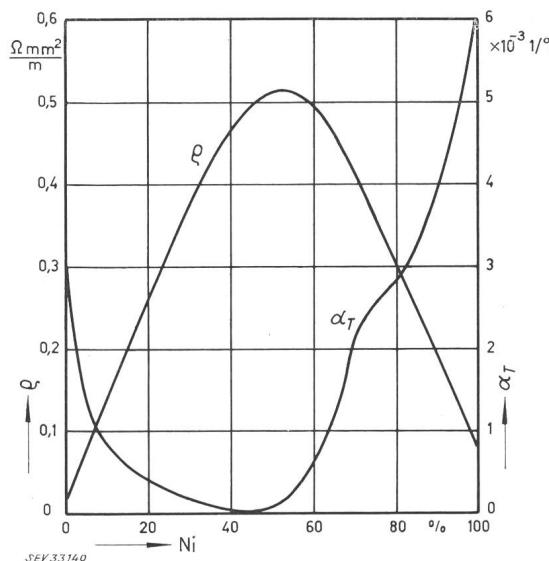


Fig. 4

Verlauf des spezifischen Widerstandes ρ und des Temperaturkoeffizienten α_T im Legierungssystem Nickel-Kupfer

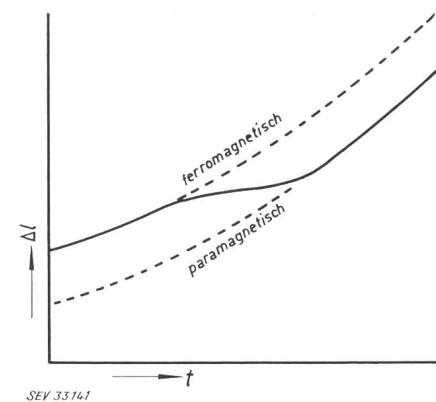


Fig. 5
Schematische Darstellung der Wärmedehnung Δl von Nickel-Eisen-Legierungen bei Übergang vom ferromagnetischen in den paramagnetischen Zustand
t Temperatur

Umfang für technische Widerstände benutzt. Für Messwiderstände sind diese Legierungen wegen ihrer grossen Thermospannung gegen Kupfer weniger geeignet.

Zu noch besseren Ergebnissen hat eine Weiterentwicklung geführt, die von den Nickel-Chrom-Aluminium-Legierungen ausging. Durch Zusätze von Kupfer oder Eisen (einige %) konnte man Werkstoffe herstellen, die nach geeigneter Wärmebehandlung in einem grossen Temperaturbereich um 20 °C einen Temperaturkoeffizienten unter $\pm 20 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ besitzen und deren spezifischer Widerstand rund dreimal so gross ist wie der des sonst für sehr genaue Widerstände verwendeten Manganins (12 % Mn, 2 % Ni, Rest Cu). Ihre Eignung für Mess- und Präzisionswiderstände liegt auf der Hand [6].

6. Nickel-Eisen-Legierungen mit besonderer Wärmedehnung

Einer allgemein gültigen Faustregel zufolge dehnen sich alle metallischen Werkstoffe zwischen absolutem Nullpunkt und ihrem Schmelzpunkt etwa um den gleichen Betrag aus, d. h. Metalle mit hohem Schmelzpunkt haben einen kleinen Dehnungskoeffizienten, solche mit niedrigem Schmelzpunkt hohe Dehnungskoeffizienten. Die mittleren Dehnungskoeffizienten im Bereich von 0...100 °C und die Schmelzpunkte einiger Metalle sind in Tabelle IV angegeben.

Schmelzpunkt und Dehnungskoeffizient verschiedener Metalle

Tabelle IV

Metall	Schmelztemperatur °C	Mittlerer Ausdehnungskoeffizient zwischen 0 und 100 °C 1/°C
Wolfram	3380	$4,5 \cdot 10^{-6}$
Molybdän	2622	$5,1 \cdot 10^{-6}$
Platin	1773	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Eisen	1535	$11,5 \cdot 10^{-6}$
Nickel	1453	$12,5 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	1084	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Silber	960	$18,7 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	658	$23,1 \cdot 10^{-6}$
Blei	327	$28,0 \cdot 10^{-6}$
Zink	419	$36,0 \cdot 10^{-6}$

Die Dehnungskoeffizienten von Legierungen liegen im allgemeinen zwischen denen der Komponenten. Diese Regel wird jedoch in bestimmten Legierungssystemen ganz wesent-

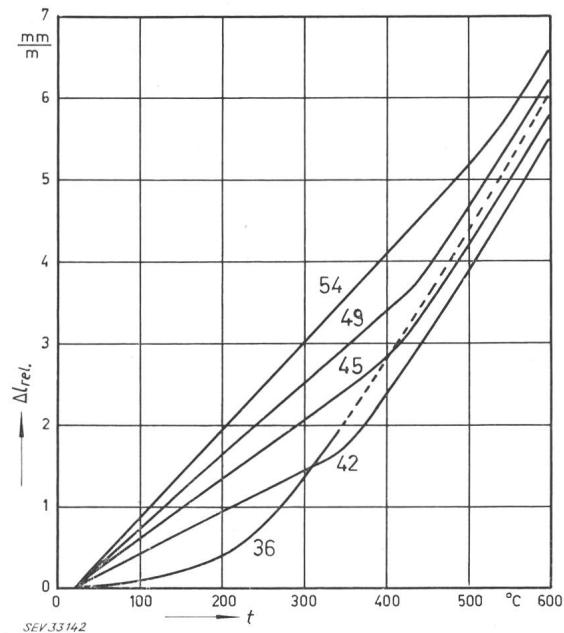


Fig. 6

Wärmedehnung von Eisen-Nickel-Legierungen mit verschiedenem Nickel-Gehalt

Die Zahlen geben den Nickel-Gehalt in Gewichts-Prozenten an
 Δl_{rel} relative Wärmedehnung; t Temperatur

lich durchbrochen. Während sich beispielsweise die Metalle Nickel und Eisen in Tabelle IV ohne weiteres einfügen, zeigen die Nickel-Eisen-Legierungen ein ganz ungewöhnliches Verhalten, dessen Ursachen im Ferromagnetismus zu suchen sind.

Von hohen Temperaturen kommend, stellt man zunächst die durch Abnahme der Gitterschwingungen bedingte normale Kontraktion fest. Sobald der Curiepunkt erreicht wird und damit der Übergang vom paramagnetischen in den ferromagnetischen Zustand erfolgt, beginnt mit der bei weiterer Abkühlung zunehmenden spontanen Magnetisierung eine relative Volumenzunahme, die sich der thermischen Kontraktion überlagert. Das heißt die zunächst steil verlaufenden Dehnungskurven knicken im Curiepunkt ab und verlaufen von da an viel flacher. Eine schematische Darstellung dieses Vorganges zeigt Fig. 5, einige Beispiele gibt Fig. 6 wieder [14; 15; 16; 17; 26]. Ähnliche Auswirkungen des Ferromagnetismus sind auch in Eisen-Platin- und Eisen-Kobalt-Chrom-Legierungen bekannt.

Dehnungskurven dieser Art sind von grossem technischen Interesse, so dass die entsprechenden Legierungen zahlreiche Anwendungen gefunden haben.

Eine extrem kleine Wärmedehnung bei Temperaturen von ca. $-100 \dots +200$ °C zeichnet das Eisen-Nickel mit 36 % Nickel aus. Es wird überall da eingesetzt, wo man bei Temperaturänderungen in dem genannten Bereich möglichst keine Änderungen der Abmessungen haben will, z. B. im Apparatebau, für Präzisionsmasse und -Lehren, Uhrenpendel usw. Für manche Anwendungen ist es von Nutzen, dass sich der Dehnungskoeffizient in einem begrenzten Temperaturbereich um 20 °C durch Kaltverformung noch erniedrigen lässt und sogar kleine negative Werte erreichen kann. In diesem Zustand ist der Werkstoff allerdings einer sog. natürlichen Alterung unterworfen, wobei sich der Dehnungskoeffizient langsam wieder in Richtung der für den geglühten Zustand gültigen Werte ändert. Diese Verände-

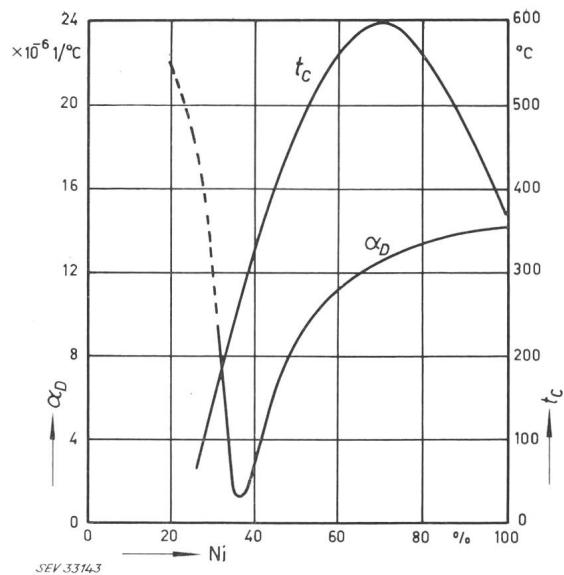


Fig. 7

Curietemperatur t_C und mittlerer Dehnungskoeffizient α_D zwischen 0 und 100 °C von Eisen-Nickel-Legierungen
 Ni Nickel-Gehalt in Gewichts-Prozenten

rungen nimmt man häufig durch eine künstliche Alterungsbehandlung bei erhöhter Temperatur (300...400 °C) vorweg. Eine bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen störende Eigenart des 36-%igen Nickel-Eisens sind sehr kleine, plötzlich erfolgende Volumenänderungen in unregelmässiger Folge und Richtung, die sich allerdings nur mit Geräten höchster Präzision nachweisen lassen [18].

Das 36-%ige Nickel-Eisen ist jedoch nicht nur durch die ausserordentlich kleine Wärmedehnung ausgezeichnet, es hat auch einen recht hohen spezifischen Widerstand und eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit (vergl. Abschnitt 2). Die Extremwerte der erwähnten Eigenschaften sowie die Änderung mit steigendem Nickelanteil sind aus den Fig. 7, 8 und 9 zu ersehen [17].

Wie aus Fig. 6 hervorgeht, steigt mit wachsendem Nickel-Gehalt der Dehnungskoeffizient an. Da sich gleichzeitig auch der Curiepunkt zu höheren Temperaturen verschiebt, wird der Bereich kleiner Wärmedehnung erweitert. So erhält man eine Reihe von Legierungen, die sich in Verbindung mit Werkstoffen hoher Wärmedehnung sehr gut für Temperaturmess- und Regelaufgaben eignen. Anwendungen

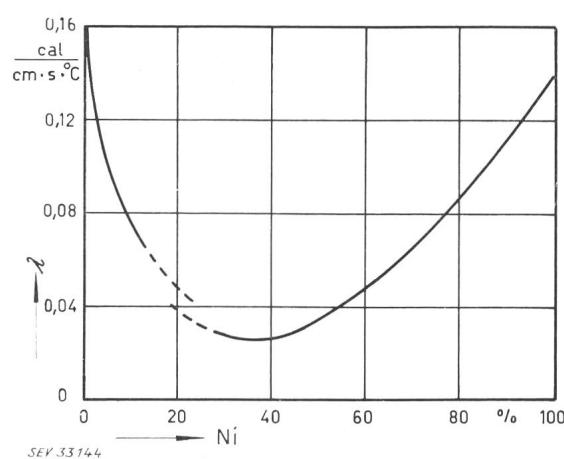


Fig. 8

Wärmeleitfähigkeit λ von Eisen-Nickel-Legierungen
 Ni Nickel-Gehalt in Gewichts-Prozenten

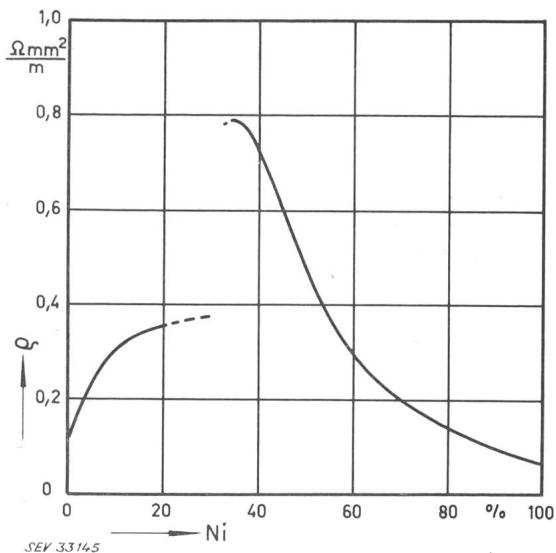


Fig. 9

Spezifischer elektrischer Widerstand ρ von Eisen-Nickel-Legierungen

Ni Nickel-Gehalt in Gewichts-Prozenten

dieser Art sind Dehnungsregler und Thermobimetalle. In beiden Fällen wird die mit steigender Temperatur zunehmende unterschiedliche Längenänderung ausgenutzt. Bei Dehnungsreglern sind die Komponenten häufig als Stab und Rohr ausgebildet, wodurch für Regelaufgaben auch grössere Kräfte zur Verfügung gestellt werden können. Die Komponenten von Thermobimetall sind in Bandform innig miteinander verbunden (verschweisst), so dass sich für die Gestaltung des Temperaturfühlers besonders viele Möglichkeiten ergeben.

Einige Anwendungsformen für Thermobimetalle sind in Fig. 10 zu sehen [19; 20].

Ein schmaler gerader Streifen aus Thermobimetall krümmt sich bei Temperaturänderung, während bei Wendeln und Spiralen eine Verdrehung der Enden gegeneinander erfolgt. Die dabei zurückgelegten Wege oder die bei Unterdrückung der Bewegung entstehenden Kräfte können mit Hilfe der Abmessungen in weiten Grenzen variiert werden und bieten Anreiz zu immer neuen Anwendungen.

Wendet man sich nun den Nickel-Eisen-Legierungen mit ca. 50 % Nickel zu, so findet man Dehnungskoeffizienten, die denen von Weichgläsern (Gläser mit relativ niedriger Erweichungs-temperatur und hoher Wärmedehnung) ähneln und die demzufolge für Glas-Metall-Verschmelzung geeignet sind. Die innige Verbindung der beiden Partner erfolgt bei Temperaturen, bei denen das Glas in zähflüssigem Zustand vorliegt. Während der nachfolgenden Abkühlung auf Raumtemperatur entstehen Spannungen im Glas und Metall, die der unterschiedlichen Kontraktion der beiden Partner proportional sind und die angesichts der geringen Zugfestigkeit des Glases in bestimmten Grenzen gehalten werden müssen. Eine gute Abstimmung der Wärmeausdehnung von Glas und

Metall ist demnach eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung solcher Verbindungen, die als Bauteile von Elektronenröhren, Fernsehröhren, Glühlampen, Transistoren, Gleichrichtern, Bildwandlern und anderen Geräten ein grosses Anwendungsfeld gefunden haben [21; 22; 23; 24; 25].

Für die nicht weniger bedeutsame Gruppe der Hartgläser (Gläser mit höherer Erweichungstemperatur und kleiner Wärmedehnung) fanden sich ebenfalls gut passende Einschmelzpartner, als man entdeckte, dass sich der Bereich kleiner Wärmedehnung von Nickel-Eisen-Legierungen in Richtung höherer Temperaturen noch erweitern lässt, wenn man einen Teil des Nickels durch Kobalt ersetzt. Kobalt hat einen sehr hoch liegenden Curiepunkt (ca. 1120 °C) und verschiebt dementsprechend auch als Legierungszusatz die Curietemperatur nach oben (Fig. 11).

7. Nickelhaltige aushärtbare Federlegierungen

Wenn von Federlegierungen die Rede ist, denkt man naturgemäß zuerst an die Stähle, die auf diesem Gebiet zweifellos auch am weitesten verbreitet sind. Dessen ungeachtet gibt es jedoch vielfach Anwendungen, in denen Spezialwerkstoffe überlegen sind. Nickelhaltige Werkstoffe dieser Art sind Legierungen mit den Hauptbestandteilen Kobalt, Nickel, Chrom, Eisen und einem Berylliumzusatz. Bei diesen Werkstoffen werden die Federeigenschaften durch Ausscheidungshärtung erzeugt. Aus Nickel-Beryllium lassen sich wegen seiner guten Verformbarkeit auch komplizierte Federenteile herstellen. Verglichen mit Stahl hat Nickel-Beryllium im ausgehärteten Zustand ähnliche Festigkeit, aber die Vorteile, dass es völligrostbeständig ist, gute elektrische und thermische Leitfähigkeit hat und vor allem durch geeignete Wärmebehandlungen jederzeit reversibel sowohl in den weichen, bildsamen Zustand als in den Zustand höchster Härte und bester Federeigenschaften gebracht werden kann. Ausserdem liegt die Grenztemperatur der Anwendung mit 450 oder 500 °C — je nach Vorbehandlung — ausgesprochen hoch [27].



Fig. 10

Fig. 10

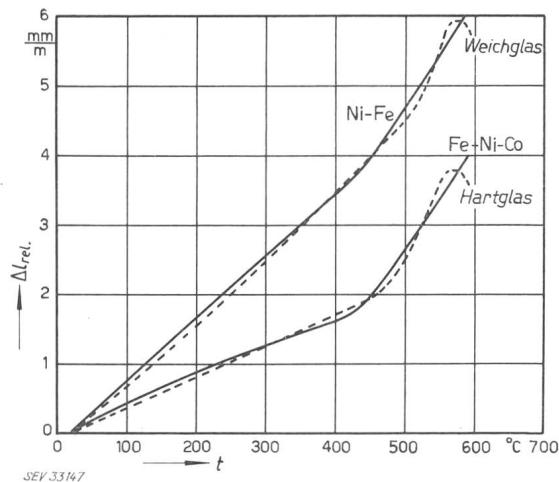


Fig. 11

Dehnungskurven zweier Gläser und Metalle, die zur Herstellung von Glas-Metall-Verschmelzungen geeignet sind
 Δl_{rel} relative Verlängerung; t Temperatur

8. Federlegierungen mit einstellbarem Temperaturgang des Elastizitätsmoduls

Für Präzisionsgeräte der Mess- und Regeltechnik, Uhren und andere Geräte, benötigt man häufig Federn, deren Federkraft temperaturunabhängig ist oder sich bei Temperaturänderungen in ganz bestimmter Weise ändert. Diese Forderung führt erneut zu den in Abschnitt 6 schon erwähnten anomalen magnetischen Eigenschaften des Nickels und bestimmter Nickel-Legierungen zurück.

Während der Elastizitätsmodul E , der das Verhältnis einer auf einen Körper einwirkenden Spannung zu der dadurch verursachten Dehnung angibt, bei den meisten Metallen mit steigender Temperatur abnimmt, kann man bei Nickel — je nach Vorbehandlung — ebenfalls eine einsinnig abfallende Kurve, oder aber Kurven mit einem ausgeprägten Minimum erhalten (vergl. Fig. 12 und 13) [14; 15; 16; 17].

Die Ursachen dieser Anomalie sind magnetostriktive Vorgänge, die unterhalb der Curietemperatur ablaufen und die durch Kaltverformung und Wärmebehandlung beeinflussbar sind. Aus weiteren Untersuchungen ergab sich, dass in Nickel-Eisen-Legierungen bestimmter Zusammensetzung

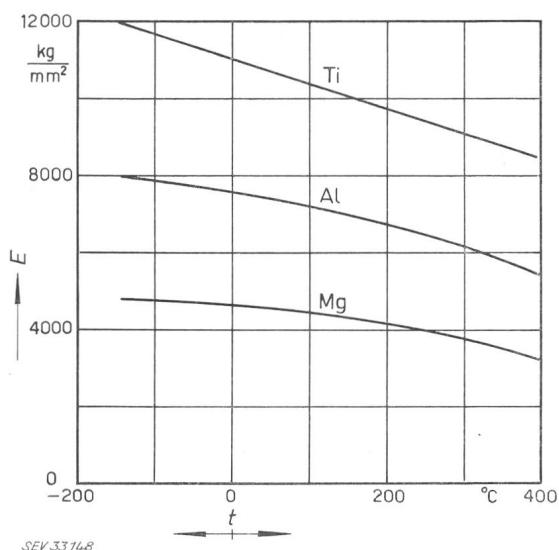


Fig. 12

Temperaturgang des Elastizitätsmoduls E von Titan, Aluminium und Magnesium nach W. Köster

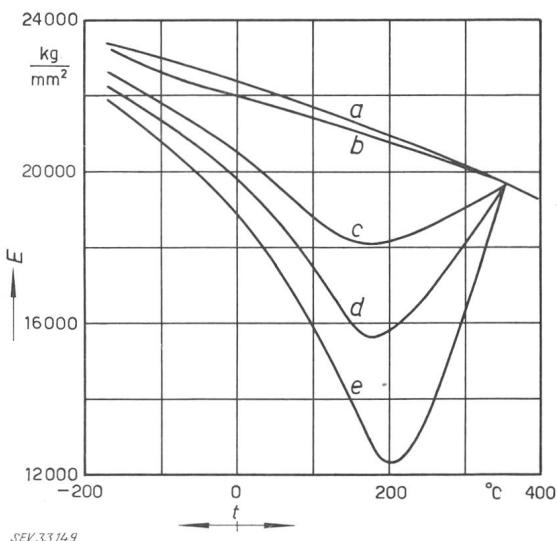


Fig. 13

Temperaturgang des Elastizitätsmoduls E von Nickel nach verschiedener Vorbehandlung
 a bei magnetischer Sättigung; b in kalt verformtem Zustand; c nach Glühung bei 700 °C; d nach Glühung bei 900 °C; e nach Glühung bei 1300 °C

t Temperatur

ähnliche und für die Anwendungstechnik leicht auswertbare Erscheinungen auftreten. Die wichtigsten Massnahmen sind: den gewünschten Wert des Temperaturkoeffizienten des E-Moduls durch Legierungszusätze in den Bereich der Gebrauchstemperatur zu schieben und der E-Modul/Tempera-

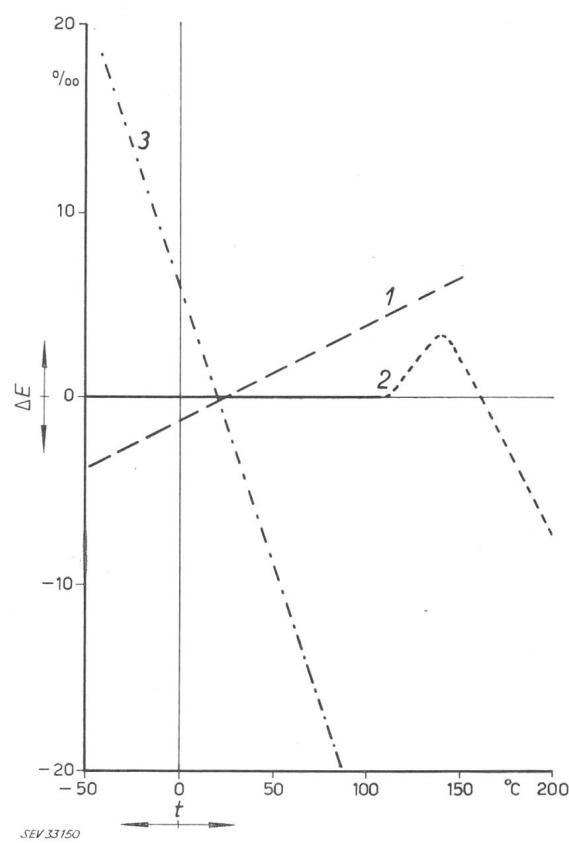


Fig. 14

Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von «Thermelast 4009» im geglühten Zustand und nach Wärmebehandlung, sowie eines anderen Federwerkstoffes zum Vergleich

1 geglüht; 2 kaltverformt und wärmebehandelt; 3 beliebiger Federwerkstoff (Kupfer-Beryllium)

ΔE Änderung des Elastizitätsmoduls in Promille, bezogen auf 20 °C

tur-Kurve selbst durch Kaltverformung oder Aushärtung eine geeignete Form zu geben.

So entstand seinerzeit der erste derartige Werkstoff durch Chromzusatz zu 36-%igem Nickel-Eisen. Die Weiterentwicklung führte zu anderen Legierungszusätzen und abgewandelten, zum Teil aushärtbaren Legierungen mit guten Federeigenschaften. Nickel-Eisen-Legierungen mit ca. 40 % Nickel und 9 % Molybdän haben in letzter Zeit erhebliche Bedeutung gewonnen.

Wenn im Vorstehenden nur vom Temperaturgang des Elastizitätsmoduls gesprochen wurde, so darf dabei nicht übersehen werden, dass es bei der Anwendung letzten Endes auf die elastischen Kräfte ankommt. Diese sind aber nicht nur vom Elastizitätsmodul, sondern auch von den Abmessungen der Konstruktionsteile abhängig, und die Abmessungen wiederum ändern sich bei Temperaturänderungen nach Massgabe des thermischen Dehnungskoeffizienten. Um eine Kompensation der Temperatureinflüsse zu erreichen, muss also eine geeignete Kombination zwischen der Wärmedehnung und der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls gefunden werden. Gerade hiefür ist es wichtig, dass man durch legierungstechnische Massnahmen und zweckmässige Vorbehandlung die elastischen Eigenschaften in einem gewissen Umfang beeinflussen kann (Fig. 14). Als Beispiel sei der Werkstoff «Thermelast 4009» genannt [28].

Wichtige Anwendungen sind Frequenzstabilisatoren, elektromechanische Filter, Waagen, Uhren, Stimmgabeln, Spannbänder in hochwertigen Geräten der Mess- und Regeltechnik.

9. Schlussbemerkung

Die behandelten Beispiele sollten zeigen, wie eng oft die Eigenschaften von Metallen und Legierungen mit den daraus resultierenden Anwendungen verknüpft sind. Vielfach sind es gerade Anomalien, die einen Anreiz zur technischen Anwendung bieten, und nicht selten werden durch die Anwendung neue Einblicke in metallkundliche und physikalische Vorgänge im Metall gewonnen. So trägt eine gute Zusammenarbeit zwischen dem Hersteller und Anwender solcher

Werkstoffe einerseits zur Vertiefung der Erkenntnisse über Aufbau und Eigenschaft der Legierungen bei, andererseits dient sie dem technischen Fortschritt.

Literatur

- [1] G. Herrmann, S. Wagener, Die Oxydkathode, Bd. I und II, J. A. Barth Verlag, Leipzig 1950.
- [2] H. de Gude, Valvo-Berichte IX (1963), H. 2, S. 29...61.
- [3] Versch. Verfasser, Le Vide 51 (1954), H. 5.
- [4] W. Rohn, Zeitschr. f. Metallkde (1924), H. 8.
- [5] H. Thomas, Härterei-Technik und Wärmebehandlung 2 (1957), H. 2.
- [6] H. Pfeiffer, H. Thomas, Zunderfeste Legierungen, Springer-Verlag Berlin — Göttingen — Heidelberg 1963.
- [7] I. Pfeiffer, Zeitschr. f. Metallkde 49 (1958), S. 267...275.
- [8] H. Thomas, Zeitschr. f. Physik 129 (1951), S. 219...232.
- [9] H. G. Baer, Zeitschr. f. Metallkde 49 (1958), S. 614...622.
- [10] H. Thomas, Zeitschr. f. Metallkde 52 (1961), S. 813...816.
- [11] Nickel-Informationsbüro, Düsseldorf, Nickel-Kupfer-Legierungen.
- [12] Nickel-Informationsbüro, Düsseldorf, Kupfer-Nickel.
- [13] E. Houdremont, Handbuch der Sonderstahlkunde, Springer-Verlag Berlin — Göttingen — Heidelberg 1956.
- [14] R. Becker, W. Döring, Ferromagnetismus, J. Springer, Berlin 1939, S. 305 ff.
- [15] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, van Nostrand Co., New York 1951, S. 641 ff.
- [16] E. Kneller, Ferromagnetismus, Springer-Verlag, Berlin — Göttingen — Heidelberg 1962.
- [17] Nickel-Informationsbüro, Düsseldorf, Die physikalischen Eigenschaften der Nickel-Eisen-Legierungen.
- [18] C. Hoffrogge, Zeitschr. f. Physik 126 (1949), S. 671...688.
- [19] H. Thomas, Gaswärme 1 (1955), S. 24...27.
- [20] F. Kaspar, Bimetalle in der Elektrotechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1960.
- [21] W. Düsing, Telefunken-Zeitung 26 (1953), S. 111...120.
- [22] H. Herrmann, Vakuum-Technik 4 (1955), S. 115...177.
- [23] J. H. Partridge, Glass-to-metal seals, Soc. Glass Technology, Sheffield 1949.
- [24] A. Zincke, Technologie der Glasverschmelzungen, Akad. Verlagsgesellschaft, Leipzig 1961.
- [25] F. Engel, Glastechn. Berichte 29 (1956), S. 5...10.
- [26] F. Assmus, 40 Jahre Vacuumschmelze AG. 1923—1963, S. 47...63.
- [27] R. Reinbach, Draht 6(1955), S. 79...81.
- [28] D. Böhme, L. Jung, 40 Jahre Vacuumschmelze AG. 1923—1963, S. 64...71.

Adresse des Autors:

H. Herrmann, Diplom-Physiker, Vacuumschmelze AG, Grüner Weg 37, 6450 Hanau.

615.84

Die Elektronik in der Elektromedizin

Von F. Liechti, Ostermundigen/Bern

Es ist eine interessante Tatsache, dass alle physikalischen Erscheinungsformen, sei es Wärme oder Kälte, Druck oder Unterdruck, elektrische Gleich- und Wechselströme in kontinuierlicher oder Impulsform, magnetische Felder, Hochfrequenzströme, α -, β - und γ -Strahlen, Ultraschall, Radar, UV-Licht bis zu Infrarot und neuerdings auch Laserbündel auf sehr verschiedene Art und Weise und zu ganz verschiedenen Zwecken am Menschen appliziert werden.

Der Zweck dieser Anwendungen verteilt sich auf die beiden Gruppen Therapie und Diagnose. Beide Gruppen stützen sich auf eine derartige Vielfalt von Apparaten und Verfahren, dass es im Rahmen eines Aufsatzes gar nicht möglich ist, mehr als nur eine allgemeine Orientierung zu geben. Eine vollständige Darstellung würde mehrere Bände füllen.

Die Elektronik spielt in der physikalischen Therapie eine grosse Rolle. Die Hauptanwendungsgruppen sind:

Ultrakurzwellentherapie;
Mittelwellenchirurgie;
Radartherapie;
Ultraschalltherapie;
Elektroschock-Therapie;
Impuls- und Interferenztherapie;
Syncardiale Therapie (Staatherapie);
Röntgentherapie;
Schrittmacher für die Wiederbelebung.

1. Physikalische Therapie

Die Ultrakurzwellentherapie

Der Zweck der UKW-Therapie ist die lokale, oder für die sog. Fiebertherapie, die generelle Erwärmung des Körperegewebes, der Blutgefäße, der Muskulatur und der Knochen. In der Regel wird mit Frequenzen zwischen 25 und 50 MHz gearbeitet, wobei die freien Bänder durch Verordnungen der PTT bestimmt sind. Als Senderöhren dienen in der Regel zwei Pentoden. Die HF-Schwingungen werden