

Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von W. Köster

---

---

11

---

---

# Magnetische Werkstoffe

Von

**Dr. techn. Ing. Franz Pawlek**

o. Professor an der Technischen Universität  
Berlin-Charlottenburg

Mit 270 Abbildungen



**Springer-Verlag**

Berlin / Göttingen / Heidelberg

1952

ISBN 978-3-642-53300-6      ISBN 978-3-642-53299-3 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-53299-3

Alle Rechte,

insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1952 by Springer-Verlag OHG. in Berlin/Göttingen/Heidelberg.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1952

## Vorwort.

Die stürmische Entwicklung auf ferromagnetischem Gebiet und die wachsende Bedeutung der Anwendung magnetischer Werkstoffe in der industriellen Technik ließ es schon seit einiger Zeit als wünschenswert erscheinen, eine zusammenfassende Darstellung über diese Fragen herauszubringen.

Der Verfasser folgte deshalb gern der Aufforderung des Herausgebers, „die Werkstoffe“ in einem Band der Sammlung geschlossen zu behandeln. Bei Beschränkung auf dieses wichtige und umfangreiche Teilgebiet der magnetischen Werkstoffkunde ging man von der Voraussetzung aus, daß der Industrie mit einem Buch, in dem in der Hauptsache die Anwendungsfragen des Gesamtgebietes gründlich abgehandelt sind, zur Zeit besonders gedient sein wird.

Bei der Bearbeitung konnte die Zeitschriftenliteratur der Jahre 1930 bis Ende 1950, die zum größten Teil im Original zur Verfügung stand, berücksichtigt werden. Von den älteren zusammenfassenden Werken ist das Buch „Die ferromagnetischen Legierungen“ von W. S. MESSKIN und A. KUSSMANN besonders erwähnenswert. Inhaltlich muß vieles in ihm nach dem heutigen Stand als überholt angesehen werden, wenn auch sein Aufbau noch immer als vorbildlich angesprochen werden kann. In einer Reihe weiterer, in der Folgezeit erschienener Bücher werden die Werkstoffe nur an zweiter Stelle behandelt. In dem umfangreichen Buch von R. M. BOZORTH „Ferromagnetism“, das 1951 in New York herauskam, wird der heutige Stand des Gesamtgebietes wiedergegeben. Im vorliegenden Band, in dem ein Querschnitt über die Entwicklung der magnetischen Werkstoffe in den letzten 20 Jahren gegeben wird, konnten diese jedoch sehr viel eingehender gewürdigt werden.

Das Manuskript des Buches wurde von Herrn Prof. Dr. W. KÖSTER und Herrn Dr. K. SIXTUS überprüft. Für diese Arbeit und für zahlreiche Diskussionen und Vorschläge während der Abfassung des Buches bin ich diesen Herren zu außerordentlichem Dank verpflichtet.

Die Firmen AEG, Badische Anilin- und Soda-Fabrik, Deutsche Edelstahlwerke, Krupp, Magnetstahlfabrik Tigges & Co. und Vacuum-schmelze Hanau haben bereitwillig Unterlagen zur Verfügung gestellt, wofür ich den Firmen auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank zum Ausdruck bringe. Das gleiche tue ich auch Herrn HELMUT HENNIG gegenüber für die Anfertigung von Zeichnungen und Fräulein URSULA VOLKMANN für das Korrekturlesen.

Berlin, im Januar 1952.

**Franz Pawlek**

# Inhaltsverzeichnis.

A. Einleitung .....	1
B. Dauermagnete .....	4
I. Allgemeines .....	4
1. Charakterisierung der Dauermagnete .....	4
2. Theorie der Koerzitivkraft .....	6
a) Spannungstheorie nach BECKER .....	6
b) Fremdkörpertheorie nach KERSTEN .....	7
c) Streufeldtheorie nach NÉEL .....	8
d) Koerzitivkraft kleinster Teilchen .....	9
3. Theorie der Remanenz .....	9
a) Einfluß der Textur .....	9
b) Einfluß der Abkühlung im Magnetfeld .....	10
II. Dauermagnet-Werkstoffe .....	10
1. Geschichtlicher Überblick .....	10
2. Durch Gefügeumwandlung gehärtete Werkstoffe .....	12
a) Härtungsvorgang .....	12
b) Kohlenstoffstähle .....	13
Chrommagnetstahl S. 13. — Wolframmagnetstahl S. 26. —	
Kobaltmagnetstahl S. 32.	
c) Kohlenstofffreie Legierungen .....	39
Härtungsvorgang S. 39. — Eisen-Kobalt-Vanadin-Legierungen	
S. 40. — Eisen-Mangan-Legierungen S. 43. — Eisen-Nickel-	
Kupfer-Legierungen S. 43. — Eisen-Aluminium-Kohlenstoff-	
Legierungen S. 44.	
3. Durch Ausscheidung gehärtete Werkstoffe .....	45
a) Härtungsvorgang .....	45
b) Eisen-Nickel-Aluminium-Legierungen .....	46
Zusammensetzung und Eigenschaften S. 46. — Einfluß von	
Verunreinigungen S. 47. — Einfluß von Zusätzen S. 48. —	
Alterung S. 53. — Herstellung S. 55. — Wärmebehandlung	
S. 62. — Verwendung S. 74.	
c) Eisen-Nickel-Kupfer-Legierungen .....	75
Zusammensetzung und Eigenschaften S. 76. — Einfluß einer	
Verformungstextur S. 77. — Alterung S. 82. — Verwendung	
S. 82.	
d) Nickel-Kupfer-Kobalt-Legierungen .....	82
Zusammensetzung und Eigenschaften S. 82. — Einfluß einer	
Verformungstextur S. 83.	
e) Eisen-Kobalt-Molybdän- und Eisen-Kobalt-Wolfram-Legie-	
rungen .....	84

f) Kobalt-Mangan-Aluminium- und Eisen-Nickel-Zinn-Legierungen .....	84
4. Legierungen, deren Dauermagneteigenschaften mit der Ausbildung einer Überstruktur verknüpft sind .....	84
a) Platin-Legierungen .....	85
Zusammensetzung und Eigenschaften S. 85. — Härtingungsmechanismus S. 86.	
b) Manganlegierungen .....	86
5. Pulvermagnete .....	87
a) Ursache der hohen Koerzitivkraft .....	87
b) Zusammensetzung und Eigenschaften .....	88
c) Herstellungsverfahren .....	88
6. Oxydmagnete .....	90
C. Magnetisch weiche Werkstoffe .....	90
I. Allgemeines .....	90
1. Charakterisierung der magnetisch weichen Werkstoffe .....	90
a) Werkstoffe der Starkstromtechnik .....	91
b) Werkstoffe für Relais .....	92
c) Werkstoffe der Schwachstromtechnik .....	93
d) Definition der Permeabilität .....	94
2. Theorie der Remanenz .....	95
3. Theorie der Koerzitivkraft und Anfangspermeabilität .....	96
a) Spannungstheorie nach BECKER .....	96
b) Fremdkörpertheorie nach KERSTEN .....	97
c) Streufeldtheorie nach NÉEL .....	98
II. Magnetisch weiche Werkstoffe .....	99
1. Geschichtlicher Überblick .....	99
2. Reines Eisen .....	101
a) Eigenschaften des reinen Eisens .....	101
Sättigungsmagnetisierung S. 101. — Kristallenergie S. 102. — Sättigungsmagnetostriktion S. 102. — Koerzitivkraft S. 105. — Anfangspermeabilität S. 105. — Maximalpermeabilität S. 105	
b) Einfluß von Verunreinigungen .....	106
Einfluß auf die Sättigung S. 106. — Einfluß auf die Kristallenergie S. 107. — Einfluß auf die Sättigungsmagnetostriktion S. 107. — Einfluß auf die Koerzitivkraft S. 107. — Einfluß auf die Permeabilität S. 110.	
c) Einfluß der Korngröße auf die Koerzitivkraft .....	111
d) Nachwirkung .....	112
3. Technische Eisensorten .....	115
a) Eigenschaften und Zusammensetzung .....	115
Dynamogußisen S. 115. — Flußstahl S. 118. — Karbonyleisen S. 118. — Elektrolyteisen S. 119. — Reinigung technischer Eisensorten nach CIOFFI S. 120.	
b) Alterung .....	121
c) Herstellung .....	123
4. Eisenlegierungen .....	124
a) Charakterisierung der Werkstoffe der Starkstromtechnik ...	124
b) Einfluß von Legierungszusätzen auf die Eigenschaften des Eisens .....	125
Sättigungsmagnetisierung S. 125. — Kristallenergie S. 126. — Magnetostriktion S. 126. — Elektrischer Widerstand S. 128.	

c)	Eisen-Silizium-Legierungen .....	129
	Eigenschaften des Einkristalls S. 130. — Eigenschaften der technischen Legierungen S. 132. — Einfluß von Verunreinigungen S. 138. — Einfluß der Korngröße S. 140. — Einfluß der Kornorientierung S. 146. — Herstellung und Schlußglühung warmgewalzter Bleche S. 153. — Herstellung und Schlußglühung texturbehafteter Bleche S. 160. — Verwendung S. 162.	
d)	Eisenlegierungen mit teilweisem Ersatz des Siliziums durch andere Elemente .....	163
	Ersatz durch Aluminium S. 163. — Ersatz durch Nickel oder Nickel und Chrom S. 163.	
e)	Vollkommener Ersatz des Si durch andere Elemente .....	164
	Ersatz durch Aluminium S. 164. — Ersatz durch Arsen S. 165.	
f)	Eisenlegierungen mit höherem Legierungsgehalt .....	166
	Eisen-Aluminium-Silizium-Legierungen S. 166. — Eisen-Nickel-Silizium-Legierungen S. 169. — Eisen-Chrom-Legierungen mit Zusatz von Aluminium oder Silizium S. 169. — Eisen-Kobalt-Legierungen S. 171.	
5.	Eisen-Nickel-Legierungen .....	174
a)	Binäre Eisen-Nickel-Legierungen .....	175
	Eigenschaften der Nickel-Eisen-Legierungen S. 175. — Herstellung und Schlußglühung S. 194. — Verwendung S. 203.	
b)	Ternäre Legierungen auf Nickel-Eisen-Basis .....	203
	Nickel-Eisen-Kupfer-Legierungen S. 204. — Nickel-Eisen-Chrom-Legierungen S. 209. — Nickel-Eisen-Molybdän-Legierungen S. 211. — Nickel-Eisen-Mangan-Legierungen S. 212. — Nickel-Eisen-Silizium-Legierungen S. 213. — Nickel-Eisen-Vanadin-Legierungen S. 213. — Nickel-Eisen-Kobalt-Legierungen S. 213.	
c)	Mehrstofflegierungen auf Nickel-Eisen-Basis .....	221
	Legierung „1040“ S. 221. — Mu-Metall S. 221.	
D.	Magnetische Werkstoffe für Pupinspulen und Hochfrequenzkerne .....	227
I.	Allgemeines .....	227
1.	Charakterisierung der Werkstoffe für Pupinspulen und Hochfrequenzkerne .....	228
II.	Massekerne .....	233
1.	Eigenschaften der Massekerne .....	233
2.	Herstellung und Eigenschaften der Massekerne .....	236
a)	Herstellung der Metallpulver .....	236
b)	Herstellung der Hochfrequenzeisenkerne .....	238
c)	Herstellung der Pupinspulenkerne .....	239
III.	Isoperme .....	242
1.	Ausscheidungsisoperm .....	242
a)	Eigenschaften der Eisen-Nickel-Kupfer-Legierungen .....	244
b)	Deutung der Eigenschaften .....	248
c)	Herstellung .....	251
2.	Textur-Isoperm .....	252
a)	Eigenschaften der Eisen-Nickel-Legierungen .....	252
b)	Deutung der Eigenschaften .....	257
c)	Herstellung .....	259
3.	Plattierungs-Isoperm .....	262

IV. Nichtmetallische magnetische Werkstoffe .....	263
1. Theorie des Ferrimagnetismus .....	264
2. Eigenschaften der Ferrite .....	265
a) Eigenschaften einfacher Ferrite .....	266
b) Eigenschaften von Mischferriten .....	269
3. Verwendung .....	274
E. Werkstoffe mit großer Magnetostriktion .....	275
F. Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften auf Grund verborgener magnetischer Vorgänge .....	276
I. Allgemeines .....	276
1. Theorie der Werkstoffe mit geringem Temperaturkoeffizienten der Ausdehnung .....	276
2. Theorie der Werkstoffe mit geringem Temperaturkoeffizienten des E-Moduls .....	277
II. Werkstoffe mit kleinem Ausdehnungskoeffizienten .....	279
1. Invarlegierungen .....	279
2. Glas-Einschmelz-Legierungen .....	285
III. Werkstoffe mit kleinen Temperaturkoeffizienten des E-Moduls .....	288
G. Magnetische Werkstoffe mit stark temperaturabhängiger Sättigungsmagnetisierung .....	289
H. Unmagnetische Werkstoffe .....	291
I. Nichteisenmetalle .....	291
II. Unmagnetisches Gußeisen .....	292
III. Unmagnetischer Stahl .....	292
Anhang .....	294
Bezeichnung, Zusammensetzung und Eigenschaften der Dauermagnet- werkstoffe in Deutschland .....	294
Bezeichnung, Zusammensetzung und Eigenschaften der Dauermagnet- werkstoffe im Ausland .....	295
Eigenschaften von Blechkernen .....	297
Namenverzeichnis .....	298
Sachverzeichnis .....	301