

DIN EN 60404-1

ICS 29.030

Einsprüche bis 2015-02-19
Vorgesehen als Ersatz für
DIN IEC 60404-1:2008-06

Entwurf**Magnetische Werkstoffe –
Teil 1: Einteilung
(IEC 68/482/CD:2014)**

Magnetic materials –
Part 1: Classifications
(IEC 68/482/CD:2014)

Matériaux magnétiques –
Partie 1: Classification
(CEI 68/482/CD:2014)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2014-12-19 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 111 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DIN-Normenausschuss Eisen und Stahl (FES)

Inhalt

	Seite
1 Allgemeines	7
1.1 Zweck und Anwendungsbereich	7
1.2 Normative Verweisungen	7
1.3 Begriffe	8
2 Magnetisch weiche Werkstoffe (Koerzitivfeldstärke ≤ 1 kA/m)	8
2.1 Klasse A – Eisen	8
2.1.1 Allgemeines	8
2.1.2 Physikalische Eigenschaften	9
2.1.3 Hauptanwendungsgebiete	10
2.2 Klasse B – Weicher kohlenstoffarmer Stahl	10
2.2.1 Klasse B1 – Massivmaterial	10
2.2.2 Klasse B2 – Flacherzeugnisse	11
2.3 Klasse C – Siliziumstähle	12
2.3.1 Klasse C1 – Massivmaterial	12
2.3.2 Klasse C2 – Flacherzeugnisse	13
2.4 Klasse D – Andere Stähle	20
2.4.1 Klasse D1 – Massivwerkstoffe	20
2.4.2 Klasse D2 – Flacherzeugnisse	22
2.4.3 Klasse D3 – Nichtrostende Stähle	23
2.5 Klasse E – Nickel-Eisen-Legierungen	25
2.5.1 Klasse E1 – Nickelgehalt 70 % bis 85 %	25
2.5.2 Klasse E2 – Nickelgehalt 54 % bis 68 %	27
2.5.3 Klasse E3 – Nickelgehalt 41 % bis 51 %	28
2.5.4 Klasse E4 – Nickelgehalt 35 % bis 40 %	30
2.5.5 Klasse E5 – Nickelgehalt 29 % bis 33 %	31
2.6 Klasse F – Eisen-Kobalt-Legierungen	32
2.6.1 Klasse F1 – Kobaltgehalt 47 % bis 50 %	32
2.6.2 Klasse F2 – Kobaltgehalt 35 %	33
2.6.3 Klasse F3 – Kobaltgehalt 23 % bis 27 %	34
2.7 Klasse G – Andere Legierungen	35
2.7.1 Klasse G1 – Aluminium-Eisen-Legierungen	35
2.7.2 Klasse G2 – Aluminium-Silizium-Eisen-Legierungen	36
2.8 Klasse H – Weichmagnetische Werkstoffe, hergestellt mittels pulvermetallurgischer Verfahren	37
2.8.1 Klasse H1 – Weichferrite	37
2.8.2 Klasse H2 – Weichmagnetische Sinterwerkstoffe	39
2.8.3 Klasse H3 – Pulververbundwerkstoffe	40
2.9 Klasse I – Amorphe weichmagnetische Werkstoffe	41

	Seite
2.9.1 Klasse I1 – Eisen-Basis-Legierungen	41
2.9.2 Klasse I2 – Kobalt-Basis-Legierungen	42
2.9.3 Klasse I3 – Nickel-Basis-Legierungen	43
3 Magnetisch harte Werkstoffe (Koerzitivfeldstärke > 1 kA/m)	44
3.1 Klasse Q – Magnetostruktionswerkstoffe – Seltene-Erden-Eisen-Legierungen (Klasse Q1)	44
3.1.1 Allgemeines	44
3.1.2 Physikalische Eigenschaften	45
3.1.3 Hauptanwendungsgebiete	45
3.2 Klasse R – Hartmagnetische Legierungen	45
3.2.1 Klasse R1 – Aluminium-Nickel-Kobalt-Eisen-Titan-(AlNiCo-)Legierungen	45
3.2.2 Klasse R3 – Eisen-Kobalt-Vanadium-Chrom-(FeCoVCr-)Legierungen	46
3.2.3 Klasse R5 – Seltene-Erden-Kobalt (SE-Co-)Legierungen	47
3.2.4 Klasse R6 – Chrom-Eisen-Kobalt-Legierungen	48
3.2.5 Klasse R.7 – Seltene-Erden-Eisen-Bor-Legierungen	49
3.3 Klasse S – Hartmagnetische Keramik – Hartferrite (Klasse S1)	51
3.3.1 Allgemeines	51
3.3.2 Physikalische Eigenschaften	51
3.3.3 Hauptanwendungsgebiete	52
3.4 Klasse T – Andere hartmagnetische Werkstoffe – Martensitische Stähle (Klasse T.1)	52
3.4.1 Allgemeines	52
3.4.2 Physikalische Eigenschaften	52
3.4.3 Hauptanwendungsgebiete	53
3.5 Klasse U – Kunststoffgebundene hartmagnetische Werkstoffe	53
3.5.1 Klasse U1 – Kunststoffgebundene Aluminium-Nickel-Kobalt-Eisen-Titan- (AlNiCo-)Magnete	53
3.5.2 Klasse U2 – Kunststoffgebundene Seltene-Erden-Kobalt-(SE-Co-) Magnete	54
3.5.3 Klasse U3 – Kunststoffgebundene Neodym-Eisen-Bor-(SE-FeB-) Magnete	55
3.5.4 Klasse U4 – Kunststoffgebundene Hartferrite	55
3.5.5 Klasse U5 – Kunststoffgebundene seltene Erden-Stickstoff-Magnete	56

Tabellen

Tabelle 1 – Bereiche der chemischen Zusammensetzung	9
Tabelle 2 – Bereiche festgelegter Werte für magnetische Eigenschaften	9
Tabelle 3 – Bereiche typischer Werte für magnetische und mechanische Eigenschaften	10
Tabelle 4 – Bereiche für den Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes	12
Tabelle 5 – Bereiche festgelegter Werte für magnetische und elektrische Eigenschaften	13
Tabelle 6 – Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes	14
Tabelle 7 – Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes	16
Tabelle 8 – Bereiche typischer Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes	16
Tabelle 9 – Festgelegte Höchstwerte des Ummagnetisierungsverlustes	17

	Seite
Tabelle 10 – Typische Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften für eine Dicke von 0,50 mm.....	18
Tabelle 11 – Typische Werte für magnetische Eigenschaften	19
Tabelle 12 – Typische Bereiche der magnetischen und mechanischen Eigenschaften	21
Tabelle 13 – Typische Bereiche der mechanischen Eigenschaften.....	22
Tabelle 14 – Bereiche der festgelegten Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften warm gewalzter Erzeugnisse	23
Tabelle 15 – Bereiche der festgelegten Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften kalt gewalzter Erzeugnisse	23
Tabelle 16 – Bereiche der chemischen Zusammensetzung	24
Tabelle 17 – Typische magnetische Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand	25
Tabelle 18 – Festgelegte magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife.....	26
Tabelle 19 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife.....	26
Tabelle 20 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit	26
rechteckiger Hystereseschleife.....	26
Tabelle 21 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife	27
Tabelle 22 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife.....	28
Tabelle 23 – Festgelegte magnetische Eigenschaften ^a von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife	29
Tabelle 24 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife.....	29
Tabelle 25 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit	29
rechteckiger Hystereseschleife.....	29
Tabelle 26 – Festgelegte magnetische Eigenschaften von Werkstoffen im schlussgeglühten Zustand.....	31
Tabelle 27 – Typische physikalische Eigenschaften	32
Tabelle 28 – Bereiche festgelegter magnetischer Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife	33
Tabelle 29 – Typische magnetische Eigenschaften der Werkstoffe mit rechteckiger Hystereseschleife	33
Tabelle 30 – Festgelegte magnetische Eigenschaften.....	34
Tabelle 31 – Festgelegte magnetische Eigenschaften.....	35
Tabelle 32 – Typische Eigenschaften für Mn-Zn-Ferrite	38
Tabelle 33 – Typische Eigenschaften für Ni-Zn-Ferrite	38
Tabelle 34 – Bereiche festgelegter Eigenschaften.....	39
Tabelle 35 – Typische physikalische und magnetische Eigenschaften.....	40
Tabelle 36 – Typische physikalische und magnetische Eigenschaften.....	41
Tabelle 37 – Typische physikalische und magnetische Eigenschaften.....	42
Tabelle 38 – Typische physikalische Eigenschaften	45
Tabelle 39 – Bereiche festgelegter Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope und anisotrope AlNiCo-Legierungen	46
Tabelle 40 – Festgelegte Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für schlussgeglühte anisotrope FeCoVCr-Legierungen	47

	Seite
Tabelle 41 – anisotrope gesinterte SE-Co-Legierungen	48
Tabelle 42 – Bereiche festgelegter Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für schlussgeglühte isotrope und anisotrope CrFeCo-Legierungen.....	49
Tabelle 43 – Bereiche festgelegter magnetischer Eigenschaften und der Dichte für anisotrope gesinterte SE-FeB-Legierungen.....	50
Tabelle 44 – Bereiche festgelegter Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope und anisotrope Hartferrite	52
Tabelle 45 – Typische magnetische Eigenschaften.....	53
Tabelle 46 – Bereiche festgelegte Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope gebundene AlNiCo-Magnete	54
Tabelle 47 – Bereiche festgelegte Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope und anisotrope kunststoffgebundene SE-Co-Magnete	54
Tabelle 48 – Bereiche festgelegter Werte magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope gebundene NdFeB-Magnete	55
Tabelle 49 – Bereiche festgelegter magnetischer Eigenschaften und der Dichte für isotrope und anisotrope kunststoffgebundene Hartferrite.....	56
Tabelle 50 – Bereiche festgelegter magnetischer Eigenschaften und der Dichte für anisotrope kunststoffgebundene SE-FeN-Magnete.....	57

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 68/482/CD:2014 „Magnetic materials – Part 1: Classifications“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 68 „Magnetic alloys and steels“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 171 „Magnetische Legierungen und Stahl“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber DIN IEC 60404-1:2008-06 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Normentext wurde entsprechend den aktuellen Vorgaben für Dokumente überarbeitet.
- b) Bezüge und Verweisungen im Text wurden aktualisiert.
- c) Die Einteilung in Materialklassen wurde überarbeitet.
- d) Die normativen Verweisungen wurden auf den aktuellen Stand gebracht.
- e) Die Werte für die Eigenschaftsanforderungen wurden aktualisiert.
- f) Eine neue Klasse für spezielle Selten-Erd-Magnete wurde aufgenommen.

Magnetische Werkstoffe – Teil 1: Einteilung

1 Allgemeines

1.1 Zweck und Anwendungsbereich

Diese Norm wurde mit dem Ziel erarbeitet, kommerziell erhältliche magnetische Werkstoffe zu klassifizieren.

Der Begriff „Magnetische Werkstoffe“ bezeichnet Substanzen, deren Anwendung das Vorhandensein ferromagnetischer oder ferrimagnetischer Eigenschaften erfordert.

In dieser Norm erfolgt die Klassifizierung der magnetischen Werkstoffe nach zwei Hauptproduktgruppen, deren Vorhandensein allgemein anerkannt ist:

- weichmagnetische Werkstoffe (Koerzitivfeldstärke ≤ 1000 A/m);
- hartmagnetische Werkstoffe (Koerzitivfeldstärke > 1000 A/m).

Innerhalb dieser Hauptgruppen berücksichtigt die Einteilung gegebenenfalls noch folgende Merkmale:

- das hauptsächliche Legierungselement, den metallurgischen Zustand und die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs;
- wenn es möglich und zweckmäßig ist, eine Beziehung zwischen diesen Eigenschaften.

Eine Klassifizierung nach den besonderen Anwendungsgebieten kann nicht für alle Werkstoffe angewendet werden, da sehr häufig, abhängig von den geforderten Merkmalen, unterschiedliche Werkstoffe für die gleiche Anwendung verwendet werden.

1.2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-121, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 121: Electromagnetism*

IEC 60050-151, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 60050-221, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 60401-3, *Terms and Nomenclature for cores made of magneticall soft ferrites – Part 3: Guide on the format of data appearing in manufacturers' catalogues of transformer and inductor cores*

IEC 60404 (all parts), *Magnetic materials*

IEC 60404-2, *Magnetic Materials – Part 2: Methods of measurement of magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame*

IEC 60404-3, *Magnetic Materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*

IEC 60404-4, *Magnetic Materials – Part 4: Methods of measurement of the d. c. magnetic properties of iron and steel*

IEC 60404-6, *Magnetic Materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens*

IEC 60404-7, *Magnetic Materials – Part 7: Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open magnetic circuit*

IEC 60404-8-1, *Magnetic Materials – Part 8-1: Specifications for individual materials – Magnetically hard materials*

IEC 60404-8-3, *Magnetic Materials – Part 8-3: Specifications for individual materials – Cold-rolled magnetic non-alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-4, *Magnetic Materials – Part 8-4: Specifications for individual materials – Cold-rolled non-oriented magnetic steel strip and sheet delivered in the fully processed state*

IEC 60404-8-5, *Magnetic Materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 5: Specification for steel sheet and strip with specified mechanical properties and magnetic permeability*

IEC 60404-8-6, *Magnetic Materials – Part 8-6: Specifications for individual materials – Soft magnetic metallic materials*

IEC 60404-8-7, *Magnetic Materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully processed state*

IEC 60404-8-8, *Magnetic Materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 8: Specification for thin magnetic steel strip for use at medium frequencies*

IEC 60404-8-9, *Magnetic Materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 9: Standard specifications for sintered soft magnetic materials*

IEC 60404-8-10, *Magnetic Materials – Part 8: Specifications for individual materials – Magnetic materials (iron and steel) for use in relays*

IEC 60404-10, *Magnetic Materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic steel sheet and strip at medium frequencies*

ISO 4948-1, *Steels – Classification – Classification of steels into unalloyed and alloy steels based on chemical composition*

1.3 Begriffe

Die Begriffe, die die verschiedenen Ausdrücke in diesem Teil der IEC 60404 betreffen, sind in IEC 60050-121, IEC 60050-151, IEC 60050-221 und in den Werkstoffnormen der Serie 60404-8 festgelegt.

2 Magnetisch weiche Werkstoffe (Koerzitivfeldstärke ≤ 1 kA/m)

2.1 Klasse A – Eisen

2.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch die IEC 60404-8-6 und IEC 60404-8-10 abgedeckt.

2.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen, und sie werden oft als „handelsüblich reine“ oder „weichmagnetische“ Eisen bezeichnet. Elemente, welche die remanente magnetische Polarisierung, die Koerzitivfeldstärke, die Sättigungspolarisation und die Stabilität der magnetischen Eigenschaften negativ beeinflus-

sen, sind zur Erreichung der für die vorgesehene Anwendung geforderten magnetischen Eigenschaften eingeschränkt. Die Gehalte der wichtigsten Elemente außer Eisen liegen, so in diesen Werkstoffen vorhanden, typischerweise innerhalb der Bereiche der Tabelle 1.

Tabelle 1 – Bereiche der chemischen Zusammensetzung

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V
%	%	%	%	%	%	%	%
Bis zu 0,03	Bis zu 0,1	0,03 bis 0,2	Bis zu 0,015 ^a	Bis zu 0,03 ^a	Bis zu 0,08	Bis zu 0,1	Bis zu 0,1
^a Für eine verbesserte Zerspanbarkeit können die oberen Grenzwerte für P und S höher als in der Tabelle angegeben sein.							

2.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach den Werten der Koerzitivfeldstärke.

2.1.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe sind in vielen Formen erhältlich. Sie können als Brammen, Knüppel, Blöcke oder Schmiedeteile geliefert werden; als warm gewalzte Vorbramme mit rechteckigen oder quadratischen Querschnitten; als warm gewalzter Draht mit rundem, sechs- oder achteckigem Querschnitt; in kalt gewalzter oder gezogener Form als Stab oder Draht; als warm- oder kalt gewalztes Blech oder Band.

2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten für die Koerzitivfeldstärke kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Sättigungspolarisation, magnetische Polarisation bei verschiedenen magnetischen Feldstärken (hieraus kann die Permeabilität abgeleitet werden), Stabilität der Eigenschaften mit der Zeit;
- mechanisch: Härte, Stanzbarkeit, Zerspanbarkeit, Tiefzieheigenschaften, Zugfestigkeit;
- metallurgischer Zustand: warm- oder kalt umgeformt, geschmiedet, tiefgezogen, schlussgeglüht.

ANMERKUNG Für einen Werkstoff, welcher nicht im schlussgeglühten Zustand geliefert wird, erfolgt die Unterteilung aufgrund der Koerzitivfeldstärke, gemessen nach einer Wärmebehandlung gemäß den Anforderungen der Werkstoffnorm oder gemäß den Empfehlungen des Herstellers.

Bereiche festgelegter Werte für die oben angeführten magnetischen Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 – Bereiche festgelegter Werte für magnetische Eigenschaften

Höchstwert der Koerzitivfeldstärke	Mindestwert der magnetischen Polarisation für $H =$			Mindestwert der magnetischen Sättigungspolarisation ^a
	300 A/m	500 A/m	4000 A/m	
A/m	T	T	T	T
12 bis 240	1,30 bis 1,15	1,40 bis 1,30	1,60	2,10 bis 2,16
^a Werte nicht festgelegt, sondern typisch.				

2.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Hauptanwendungsgebiete sind Gleichstromrelais, Lautsprecher, Elektromagnete, magnetische Kupplungen, Bremsen, Teile magnetischer Kreise von Mess- und Regelgeräten sowie Polschuhe und andere gleichstrom-erregte Teile für Generatoren und Motoren.

2.2 Klasse B – Weicher kohlenstoffarmer Stahl

2.2.1 Klasse B1 – Massivmaterial

2.2.1.1 Allgemeines

Einige dieser Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-10 abgedeckt.

2.2.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen mit unvermeidbaren Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind. Der Gehalt an Legierungselementen ist auf denjenigen von unlegierten Stählen nach ISO 4948-1 begrenzt, insbesondere beträgt der Siliziumgehalt weniger als 0,5 %.

2.2.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Koerzitivfeldstärke.

2.2.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise in der Form von Guss- oder Schmiedestücken im schlussgeglühten Zustand oder nach kundenseitig zur Verfügung gestellten Zeichnungen teilweise bearbeitet geliefert oder als Vorbramme oder Draht im warm- oder kalt gewalzten oder kalt gezogenen Zustand.

2.2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu der Koerzitivfeldstärke kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisation bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke;
- mechanisch: Streckgrenze (oder 0,2 %-Dehngrenze), Dehnung ($L_0 = 5 d_0$), Fehlerfreiheit;
- metallurgischer Zustand: warm- oder kalt umgeformt, geglüht zur Erzielung der erforderlichen magnetischen Eigenschaften.

Mechanische und zerstörungsfreie Prüfungen werden in Übereinstimmung mit den zugehörigen ISO-Normen durchgeführt. Die Koerzitivfeldstärke muss in Übereinstimmung mit IEC 60404-7, andere magnetische Eigenschaften müssen in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 gemessen werden.

Bereiche typischer Werte für magnetische und mechanische Eigenschaften sind in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3 – Bereiche typischer Werte für magnetische und mechanische Eigenschaften

Streckgrenze	Dehnung ($L_0 = 5 d_0$)	Koerzitivfeldstärke	Magnetische Polarisation für $H =$		
			2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	%	A/m	T		
100 bis 180	25 bis 45	40 bis 400	1,65 bis 1,55	1,75 bis 1,65	1,85 bis 1,75

2.2.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Die Werkstoffe werden für große Gleichstrommagnete benutzt, wo keine mechanische Festigkeit benötigt wird, z. B. Ablenkmagnete in der Elementarteilchenphysik, und für Relaisanwendungen.

2.2.2 Klasse B2 – Flacherzeugnisse

2.2.2.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-3, IEC 60404-8-4 und IEC 60404-8-10 abgedeckt.

2.2.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen mit unvermeidbaren Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind. Der Gehalt an Legierungselementen ist auf denjenigen von unlegierten Stählen nach ISO 4948-1 begrenzt, insbesondere beträgt der Siliziumgehalt weniger als 0,5 %. Diese Werkstoffe können nach dem Stanzen einer Glühbehandlung zur Verbesserung ihrer magnetischen Eigenschaften unterworfen werden.

2.2.2.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich entweder nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, der von der Blechdicke abhängt und üblicherweise bei Polarisationswerten von 1,5 T und bei den üblichen Netzfrequenzen gemessen wird, oder (für Relaisanwendungen) nach der Koerzitivfeldstärke.

2.2.2.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe werden in der Form kalt gewalzter Bänder oder Bleche oder (für Relaisanwendungen) in der Form warm gewalzter Bänder, Bleche oder Tafeln geliefert.

2.2.2.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisation bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke;
- mechanisch: Stanzbarkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Stapelfaktor;
- metallurgischer Zustand: warm gewalzt;
walzhart – d. h. kalt gewalzt;
nicht schlussgeglüht – d. h. geglüht und fertig gewalzt;
schlussgeglüht.

ANMERKUNG Für Werkstoffe, die walzhart und nicht schlussgeglüht geliefert werden, richtet sich die Untereinteilung nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, gemessen nach einer Wärmebehandlung entsprechend den Anforderungen der Werkstoffnorm oder entsprechend den Empfehlungen des Herstellers.

- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Die empfohlenen Nenndicken für die kalt gewalzten Werkstoffe betragen 0,50 mm, 0,65 mm und 1,0 mm bei Werkstoffen, deren magnetische Eigenschaften für 50 Hz ausgewiesen sind, und 0,47 mm, 0,64 mm und 0,79 mm bei Werkstoffen, deren magnetische Eigenschaften für 60 Hz ausgewiesen sind.

Die magnetischen Messungen werden gemäß IEC 60404-2, IEC 60404-3 oder IEC 60404-7 durchgeführt.

Bereiche für den Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes nach der Glühbehandlung sind in Tabelle 4 für die gebräuchlichen Blechdicken angegeben.

Tabelle 4 – Bereiche für den Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes

Neurndicke	Frequenz	Bereich des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes bei $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,50	50	6,60 bis 10,50
0,65	50	8,00 bis 12,00
0,50	60	8,38 bis 13,34
0,65	60	10,16 bis 15,24

Die festgelegten Höchstwerte der Koerzitivfeldstärke von Relaiswerkstoffen reichen von 40 A/m bis 240 A/m.

2.2.2.3 Hauptanwendungsgebiete

Die Werkstoffe werden zur Herstellung von lamellierten Kernen elektrischer Geräte und insbesondere kleiner Maschinen und für Relaisanwendungen verwendet.

2.3 Klasse C – Siliziumstähle

2.3.1 Klasse C1 – Massivmaterial

2.3.1.1 Allgemeines

Einige dieser Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 und IEC 60404-8-10 abgedeckt.

2.3.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Silizium in einem Bereich von 0 % bis 5 %.

2.3.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach den Werten der Koerzitivfeldstärke oder nach dem spezifischen elektrischen Widerstand, welcher vom Siliziumgehalt abhängig ist.

2.3.1.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe sind als warm gewalzte und kalt gezogene Stäbe, Draht, geschliffene Stäbe und geschmiedete Knüppel erhältlich und erfordern nach mechanischer Bearbeitung zur Erzielung der erforderlichen magnetischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung.

2.3.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zur Koerzitivfeldstärke und dem spezifischen elektrischen Widerstand, für welche in Tabelle 5 Wertebereiche angegeben sind, kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Sättigungspolarisation, magnetische Polarisation für verschiedene magnetische Feldstärken, remanente magnetische Polarisation;
- mechanisch: Zerspanbarkeit, Zähigkeit, Härte;

- metallurgischer Zustand: warm- oder kalt umgeformt, gegläht zur Erzielung der geforderten magnetischen Eigenschaften.

Tabelle 5 – Bereiche festgelegter Werte für magnetische und elektrische Eigenschaften

Siliziumgehalt ^a	Spezifischer elektrischer Widerstand ^a	Koerzitivfeldstärke	Mindestwert der magnetischen Polarisierung bei $H =$			
			100 A/m	300 A/m	500 A/m	4 000 A/m
%	$\mu\Omega\text{m}$	A/m	T			
2 bis 4,5	0,35 bis 0,60	48 bis 12	0,6 bis 1,2	1,1 bis 1,3	1,2 bis 1,35	1,5

^a Wert nicht festgelegt, sondern typisch.

2.3.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Hauptanwendungsgebiete sind magnetische Kreise von Relais, magnetische Kupplungen, magnetische Polster, Schrittmotoren und Kreiselgehäuse.

2.3.2 Klasse C2 – Flacherzeugnisse

2.3.2.1 Klasse C21 – Isotrope¹⁾ (nichtkornorientierte) Stähle zur Verwendung bei Netzfrequenzen

2.3.2.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-3, IEC 60404-8-4, IEC 60404-8-6 und IEC 60404-8-10 abgedeckt.

2.3.2.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Silicium, dessen Gehalt zwischen 0,1 % und 5 % betragen kann. Andere Legierungselemente, z. B. Aluminium, können ebenfalls vorhanden sein. Der Werkstoff enthält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.3.2.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, welcher von der Blechdicke abhängt und üblicherweise bei einer Polarisierung von 1,5 T und bei Netzfrequenz gemessen wird.

Wenn die Anwendung (z. B. Relais) es erfordert, kann es geeigneter sein, dass sich die Untereinteilung nach der Koerzitivfeldstärke oder Permeabilität richtet.

2.3.2.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise als kalt gewalzte Bänder oder Bleche geliefert.

2.3.2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

¹⁾ Dies beschreibt einen Werkstoff, der im Wesentlichen isotrop ist und absichtlich so hergestellt wurde.

- magnetisch: magnetische Polarisation für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke, spezifische Scheinleistung für verschiedene Werte der Polarisation, Anisotropie des Ummagnetisierungsverlustes;
- elektrisch: Art der Oberflächenisolation und ihr elektrischer Widerstand, spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Stanzbarkeit, Zähigkeit, Zugfestigkeit, Härte, Oberflächenzustand und -beschaffenheit, Stapelfaktor, Ebenheit, Kantengeradheit;
- metallurgischer Zustand: walzharter Zustand: d. h. kalt gewalzt;
nicht schlussgeglühter Zustand: d. h. geglüht oder geglüht und nachgewalzt;
schlussgeglühter Zustand.

ANMERKUNG Für Werkstoffe, die walzhart oder nicht schlussgeglüht geliefert werden, richtet sich die Untereinteilung nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, gemessen nach einer Wärmebehandlung entsprechend den Anforderungen der Werkstoffnorm oder entsprechend den Empfehlungen des Herstellers.

- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Die üblicherweise empfohlenen Werte der Nenndicke betragen 0,35 mm, 0,50 mm, 0,65 mm und 1,0 mm bei Werkstoffen, deren magnetische Eigenschaften für 50 Hz ausgewiesen sind, und 0,47 mm, 0,64 mm und 0,79 mm bei Werkstoffen, deren magnetische Eigenschaften für 60 Hz ausgewiesen sind. Die magnetischen Messungen werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-2 oder IEC 60404-3 durchgeführt. Die für die magnetischen Messungen benötigten Dichtewerte sind in den maßgeblichen Werkstoffnormen festgelegt. Andernfalls müssen die Dichtewerte vereinbart werden.

Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes nach der Schlussglühung sind in Tabelle 6 für vier gebräuchliche Blechdicken dargestellt.

Tabelle 6 – Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes

Nenndicke	Frequenz	Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes bei $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,35	50	2,10 bis 3,60
0,50	50	2,30 bis 10,50
0,65	50	3,10 bis 12,00
1,00	50	6,00 bis 13,00
0,35	60	2,65 bis 4,55
0,50	60	2,95 bis 13,34
0,65	60	4,08 bis 12,8
1,00	60	8,1 bis 17,3

2.3.2.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden hauptsächlich in magnetischen Kreisen von elektrischen Geräten verwendet, insbesondere in den Teilen von rotierenden Maschinen, in welchen der magnetische Fluss nicht gerichtet ist. Die Werkstoffe können außerdem in elektromagnetischen Relais, Kleintransformatoren, Vorschaltgeräten für Leuchtstoffröhren, elektrischen Messinstrumenten, Abschirmungen und magnetischen Polen von Elektronen- und Protonensynchrotronen verwendet werden.

2.3.2.2 Klasse C22 – Anisotrope²⁾ (kornorientierte) Stähle zur Verwendung bei Netzfrequenzen

2.3.2.2.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 und IEC 60404-8-7 abgedeckt.

2.3.2.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen und Hauptlegierungselement Silicium (ungefähr 3 %) zusammen mit unvermeidbaren Verunreinigungen und einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind. Diese Art von Magnetwerkstoff besitzt anisotrope Eigenschaften (Orientierung), so dass die Richtung parallel zur Walzrichtung die niedrigsten Werte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes und die höchste Permeabilität aufweist. Diese Eigenschaften sind gegenüber mechanischer Bearbeitung empfindlich, und Spannungsfreiglühungen kann verwendet werden, damit die innewohnenden Eigenschaften optimiert werden.

2.3.2.2.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Vollständigkeit der Kristallorientierung, ausgedrückt durch den Polarisationswert bei einer magnetischen Feldstärke von 800 A/m, und nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, der von der Blechdicke und der Orientierung abhängt und üblicherweise bei Polarisationswerten von 1,5 T oder 1,7 T und bei Netzfrequenzen gemessen wird.

2.3.2.2.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise als kalt gewalzte Bänder oder Bleche mit einer anorganischen Isolationsbeschichtung geliefert.

2.3.2.2.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu der Vollständigkeit der Kristallorientierung und den Werten des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- elektrisch: Art der Oberflächenisolation und ihr elektrischer Widerstand, spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zähigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und -zustand, Stapelfaktor, Ebenheit, Kantengeradheit;
- metallurgischer Zustand: geglüht und vollständig rekristallisiert;
- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Die üblicherweise verwendeten Blechdicken sind: 0,23 mm, 0,27 mm, 0,30 mm und 0,35 mm. Falls andere Dicken erforderlich sind, werden die Werte 0,18 mm und 0,50 mm empfohlen.

Magnetische Messungen werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-2 oder IEC 60404-3 durchgeführt. Die für die Berechnungen verwendete Dichte beträgt üblicherweise 7,65 Mg/m³. Die Prüfstreifen werden parallel zur Walzrichtung entnommen und vor der Messung einer Spannungsfreiglühung entsprechend den Empfehlungen des Herstellers unterzogen.

Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes nach der Spannungsfreiglühung für üblicherweise verwendete Blechdicken sind in Tabelle 7 dargestellt.

²⁾ Dies beschreibt einen Werkstoff, der im Wesentlichen anisotrop ist und absichtlich so hergestellt wurde.

Tabelle 7 – Bereiche festgelegter Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes

Nenn Dicke	Konventionelle Werkstoffe		Werkstoffe mit hoher Permeabilität	
	Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes bei			
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
	$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$		$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$	
mm	W/kg	W/kg	W/kg	W/kg
0,23	1,10 bis 1,20	1,45 bis 1,57	0,85 bis 1,00	1,12 bis 1,32
0,27	1,20 bis 1,30	1,58 bis 1,68	0,90 bis 1,10	1,19 bis 1,45
0,30	1,30 bis 1,40	1,71 bis 1,83	1,05 bis 1,20	1,38 bis 1,58
0,35	1,45 bis 1,55	1,91 bis 2,04	1,15 bis 1,35	1,51 bis 1,77

Zusätzlich sind Werkstoffe verfügbar, die nicht in IEC 60404-8-7 festgelegt sind. Ihre Eigenschaften sind in Tabelle 8 gegeben.

Tabelle 8 – Bereiche typischer Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes

Nennstärke	Werkstoffe mit Domänenverfeinerung	
	Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes bei $\hat{J} = 1,7 \text{ T}$	
	50 Hz	60 Hz
mm	W/kg	
0,23	0,72 bis 0,90	0,95 bis 1,19
0,27	0,85 bis 0,95	1,12 bis 1,25

2.3.2.2.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden hauptsächlich für die Herstellung magnetischer Kerne verwendet, in welchen die magnetischen Flusslinien im Wesentlichen parallel zur Walzrichtung verlaufen, wie zum Beispiel in Transformatorkernen.

2.3.2.3 Klasse C23 – Dünnteileblech

2.3.2.3.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-8 abgedeckt.

2.3.2.3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Silicium, dessen Gehalt zwischen 2 % und 4 % liegen kann. Andere Legierungsbestandteile, insbesondere Aluminium, können ebenfalls vorhanden sein. Der Werkstoff enthält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens notwendig sind.

2.3.2.3.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der magnetischen Anisotropie und dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, welcher von der Dicke, der magnetischen Polarisation und der Prüffrequenz abhängt.

2.3.2.3.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe werden üblicherweise in der Form kalt gewalzter Bänder oder Bleche geliefert.

2.3.2.3.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisation für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke;
- elektrisch: Art der Oberflächenisolation und ihr Widerstand, spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zähigkeit, Stapelfaktor, Ebenheit, Kantengeradheit;
- metallurgischer Zustand: gegläht und vollständig rekristallisiert;
- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Die festgelegten Höchstwerte des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes für die gebräuchlichen Blechdicken sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9 – Festgelegte Höchstwerte des Ummagnetisierungsverlustes

Art	Nennstärke	Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes bei $\hat{J} =$		Frequenz
		1,0 T	1,5 T	
	mm	W/kg		Hz
Kornorientiert	0,05	24	–	1000
	0,1	–	15	400
	0,15	–	16	400
Nichtkornorientiert	0,05	45	–	1000
	0,1	13	–	400
	0,15	14	–	400
	0,2	15	–	400

Die magnetischen Eigenschaften werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-10 und, ausgenommen für den nichtkornorientierten Werkstoff in 0,2 mm Dicke, an Prüfkörpern bestimmt, welche in Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Herstellers gegläht worden sind.

2.3.2.3.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden hauptsächlich in magnetischen Kreisen von Transformatoren und rotierenden Maschinen angewandt, welche bei höheren Frequenzen als 100 Hz betrieben werden.

2.3.2.4 Klasse C24 – Stähle mit festgelegten Werten für mechanische Eigenschaften und spezifischen Ummagnetisierungsverlust

2.3.2.4.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden nicht durch eine IEC-Publikation abgedeckt.

2.3.2.4.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Silicium, dessen Gehalt zwischen 2 % und 5 % betragen kann. Andere Legierungselemente, wie Aluminium und Mangan, können zur Festigkeitssteigerung und Verbesserung der magnetischen Eigenschaften hinzugefügt werden. Der Werkstoff erhält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.3.2.4.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Streckgrenze.

2.3.2.4.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe werden üblicherweise in Form von kalt gewalzten und schlussgeglühten Bändern oder Blechen geliefert.

2.3.2.4.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zur Streckgrenze kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: spezifischer Ummagnetisierungsverlust, magnetische Polarisation für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke;
- elektrisch: Oberflächenisolation und ihr Widerstand, spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zugfestigkeit, Dehnung, Härte, Stapelfaktor;
- metallurgischer Zustand: schlussgeglüht;
- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Typische Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften für eine Dicke von 0,5 mm sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10 – Typische Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften für eine Dicke von 0,50 mm

Streckgrenze	Spezifischer Ummagnetisierungsverlust bei $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$ und $f = 50 \text{ Hz}$	Magnetische Polarisation bei $H = 5 \text{ kA/m}$	Stapelfaktor
(L)	(L + C)	(L)	
N/mm ²	W/kg	T	%
470	4,6	1,69	98,0
620	6,7	1,63	98,0
ANMERKUNG L = längs zur Walzrichtung; C = quer zur Walzrichtung.			

2.3.2.4.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden grundsätzlich unter alternierenden Flussbedingungen für mechanisch beanspruchte Teile magnetischer Kreise benutzt, wie z. B. Rotoren schnell laufender rotierender elektrischer Maschinen.

2.3.2.5 Klasse C25 – 6,5 %-Siliziumstähle

2.3.2.5.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden nicht durch eine IEC-Publikation abgedeckt.

2.3.2.5.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Silizium, dessen Gehalt zwischen 6 % und 7 % betragen kann. Andere Legierungsbestandteile können ebenfalls enthalten sein. Der Werkstoff enthält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.3.2.5.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach dem spezifischen Ummagnetisierungsverlust, der von der Dicke, der magnetischen Polarisierung und der Messfrequenz abhängt.

2.3.2.5.1.3 Lieferformen

Diese Werkstoffe werden üblicherweise in der Form von kalt gewalzten Bändern oder Blechen geliefert.

2.3.2.5.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisierung für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke;
- elektrisch: Art der Oberflächenisolation und deren Widerstand, spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Stapelfaktor, Ebenheit, Kantengeradheit;
- metallurgischer Zustand: schlussgeglühter Zustand;
- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Typische Werte für magnetische Eigenschaften sind in Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 11 – Typische Werte für magnetische Eigenschaften

Nennstärke	Höchstwert des spezifischen Ummagnetisierungsverlust bei $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$		Magnetostriktion (Spitze zu Spitze) bei 1,0 T und 400 Hz
	W/kg	Hz	$\times 10^{-7}$
mm			
0,05	20,0	1000	1,2
0,10	6,0	400	1,2
0,20	8,0	400	1,2
0,30	10,0	400	1,2

Der spezifische Ummagnetisierungsverlust wird in Übereinstimmung mit IEC 60404-10 bestimmt. Dabei werden geschnittene Prüfstreifen verwendet, die jeweils hälftig parallel und quer zur Walzrichtung genommen werden.

Die Magnetostriktion wird bei $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$ und $f = 400 \text{ Hz}$ mit Hilfe eines optischen Verschiebungsmessgerätes gemessen.

2.3.2.5.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden allgemein in magnetischen Kreisen elektrischer Geräte verwendet, die oberhalb einer Frequenz von 100 Hz arbeiten, wobei Geräuscharmheit und niedriger Ummagnetisierungsverlust erforderlich sind, wie z. B. bei Hochfrequenztransformatoren, Drosseln und Motoren, die in tragbaren elektrischen Geräten verwendet werden.

2.4 Klasse D – Andere Stähle

2.4.1 Klasse D1 – Massivwerkstoffe

2.4.1.1 Klasse D11 – Gussstähle

2.4.1.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden nicht durch eine IEC-Publikation abgedeckt.

2.4.1.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen mit unvermeidbaren Verunreinigungen. Hauptlegierungselemente sind Kohlenstoff, dessen Gehalt unter 0,45 % liegt, und andere Elemente (insbesondere Chrom, Nickel, Mangan, Molybdän und Silicium), welche zur Erzielung der geforderten Eigenschaften notwendig sein können.

2.4.1.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Streckgrenze oder der 0,2 %-Dehngrenze, welche von der chemischen Zusammensetzung und der Wärmebehandlung abhängen.

2.4.1.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise in der Form von Gussstücken im schlussgeglühten Zustand oder nach Vorlagen, die vom Anwender zur Verfügung gestellt werden, teilweise bearbeitet geliefert.

2.4.1.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten der Streckgrenze kann eine vollständigere Beschreibung des Werkstoffes durch folgende Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisation für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke, Koerzitivfeldstärke;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zugfestigkeit, Dehnung, Kerbschlagfestigkeit, Fehlerfreiheit;
- metallurgischer Zustand: entweder normalisierend gegläht und angelassen oder abgeschreckt und angelassen.

Mechanische und zerstörungsfreie Prüfungen werden in Übereinstimmung mit den geeigneten ISO-Normen durchgeführt. Die Koerzitivfeldstärke wird in Übereinstimmung mit IEC 60404-7, andere magnetische Eigenschaften werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 gemessen.

Typische Bereiche der magnetischen und mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 12 – Typische Bereiche der magnetischen und mechanischen Eigenschaften

Streckgrenze	Zugfestigkeit	Dehnung $L_o = 5,65 \sqrt{S_o}$	Kerbschlagarbeit	Magnetische Polarisierung bei $\hat{H} =$		
				2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	J	T		
200 bis 500	350 bis 750	25 bis 12	50 bis 20	1,50 bis 1,30	1,65 bis 1,50	1,80 bis 1,65

2.4.1.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Dieser Werkstoff wird in magnetischen Kreisen von elektrischen Geräten verwendet, wo eine gewisse mechanische Festigkeit erforderlich ist, insbesondere in Teilen von rotierenden Maschinen wie Rotoren, Polschuhen, Pressplatten und Magnethalterungen.

2.4.1.2 Klasse D12 – Schmiedestähle

2.4.1.2.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch keine IEC-Publikation abgedeckt.

2.4.1.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselemente sind Kohlenstoff, dessen Gehalt von 0,15 % bis 0,5 % variieren kann, und andere Legierungselemente, wie z. B. Nickel (bis zu 4 %), Chrom (bis zu 1,8 %), Molybdän (bis zu 0,5 %), Vanadium (bis zu 0,12 %) und Mangan (bis zu 1,9 %) in Abhängigkeit von den erforderlichen mechanischen Eigenschaften und der Größe des Schmiedeteils. Der Werkstoff enthält ebenso unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente (Si, Al), welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.4.1.2.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Streckgrenze oder der 0,2 %-Dehngrenze, welche üblicherweise von der chemischen Zusammensetzung und der Wärmebehandlung abhängen.

2.4.1.2.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise in Form von Schmiedestücken im schlussgeglühten und nach Vorlagen, die vom Anwender zur Verfügung gestellt werden, teilweise bearbeiteten Zustand geliefert.

2.4.1.2.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten der Streckgrenze kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch folgende Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisierung für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zugfestigkeit, Dehnung, Kerbschlagfestigkeit, Biegebarkeit, Fehlerfreiheit;
- metallurgischer Zustand: entweder normalisierend gegläht und angelassen oder abgeschreckt und angelassen;
- Abmessungen: nach Vorlagen, die vom Anwender zur Verfügung gestellt werden.

Mechanische und zerstörungsfreie Prüfungen werden in Übereinstimmung mit den zugehörigen ISO-Normen durchgeführt. Magnetische Eigenschaften werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 bestimmt.

Typische Bereiche der mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 13 angegeben.

Tabelle 13 – Typische Bereiche der mechanischen Eigenschaften

Streckgrenze	Zugfestigkeit	Dehnung $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$	Kerbschlagarbeit Spitzkerbprobe
N/mm ²	N/mm ²	%	J
200 bis 800	300 bis 1 000	20 bis 12	136 bis 16

2.4.1.2.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden in magnetischen Kreisen von elektrischen Geräten verwendet, insbesondere in den mechanisch beanspruchten Teilen von rotierenden Maschinen, wie z. B. Wellen für rotierende Maschinen, Polschuhen, Polkörpern und Polendplatten.

2.4.2 Klasse D2 – Flacherzeugnisse

2.4.2.1 Klasse D 21 – Festigkeitsstähle – Stähle mit festgelegten Werten für die mechanischen Eigenschaften und die magnetische Permeabilität

2.4.2.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-5 abgedeckt.

2.4.2.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Legierungselemente können Kohlenstoff oder andere Elemente sein, wie z. B. Silicium. Der Werkstoff enthält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen und einen niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.4.2.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der 0,2 %-Dehngrenze.

2.4.2.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise in der Form von Bändern oder Blechen geliefert.

2.4.2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Zusätzlich zu den Werten der Dehngrenze kann eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe durch folgende Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisierung für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke, wovon die Permeabilität abgeleitet werden kann;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zugfestigkeit, Dehnung, Oberflächenzustand, Stanzbarkeit, Ebenheit, Kantengeradheit;
- metallurgischer Zustand: warm gewalzt, warm gewalzt und nachgewalzt, kalt gewalzt und schlussgeglüht, kalt gewalzt, gegläht und nachgewalzt;
- Abmessungen: Dicke, Breite und (falls erforderlich) Länge.

Die üblicherweise empfohlenen Werte der Nenndicke liegen im Bereich von 0,5 mm bis 4,5 mm.

Die Bereiche der festgelegten Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften sind in Tabelle 14 für warm gewalzte und in Tabelle 15 für kalt gewalzte Erzeugnisse dargestellt.

**Tabelle 14 – Bereiche der festgelegten Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften
warm gewalzter Erzeugnisse**

Mindestwert der 0,2 %-Dehngrenze	Mindestwert der Zugfestigkeit	Mindestwert der Bruchdehnung $L_0 = 80$ mm	Mindestwert der magnetischen Polarisation bei $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 bis 700	350 bis 800	22 bis 10	1,60 bis 1,46	1,80 bis 1,78

**Tabelle 15 – Bereiche der festgelegten Werte für mechanische und magnetische Eigenschaften
kalt gewalzter Erzeugnisse**

Mindestwert der 0,2 %-Dehngrenze	Mindestwert der Zugfestigkeit	Mindestwert der Bruchdehnung $L_0 = 80$ mm	Mindestwert der magnetischen Polarisation bei $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 bis 400	325 bis 450	16 bis 10	1,60 bis 1,50	1,83 bis 1,80

2.4.2.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden im Allgemeinen in magnetischen Gleichfeldern für die mechanische belasteten Teile magnetischer Kreise von rotierenden elektrischen Maschinen verwendet, insbesondere als Läuferkörper, Kranz- und Polbleche.

2.4.3 Klasse D3 – Nichtrostende Stähle

2.4.3.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden nicht durch eine IEC-Publikation abgedeckt.

2.4.3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe ist Eisen. Hauptlegierungselement ist Chrom mit Gehalten von 11 % bis 20 %. Andere Legierungselemente, z. B. Silicium und Mangan, können ebenso vorhanden sein. Der Werkstoff enthält außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind, welche die Zerspanbarkeit verbessern, wie z. B. Schwefel, Selen oder Blei, oder welche die Korrosionsbeständigkeit erhöhen, wie z. B. Molybdän, Titan oder Niob. Verglichen mit herkömmlichen nicht rostenden Stählen haben die Sorten für magnetische Anwendungen kleinere chemische und verfahrenstechnische Toleranzen, damit ein gleichmäßigeres magnetisches Verhalten erzielt wird.

2.4.3.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach dem Chromgehalt und den Herstellungseigenheiten entsprechend der Tabelle 16.

Tabelle 16 – Bereiche der chemischen Zusammensetzung

Sorte	Cr	Si	Mo	Mn	C	S ^a
	%					
D31-01	11 bis 13	Bis zu 1,5	Bis zu 0,5	Bis zu 0,8	Bis zu 0,065	Bis zu 0,025
D31-02	11 bis 13	Bis zu 1,5	Bis zu 0,5	Bis zu 0,8	Bis zu 0,065	0,25 bis 0,40
D31-03	16,5 bis 18,5	Bis zu 1,5	Bis zu 0,5	Bis zu 0,8	Bis zu 0,065	Bis zu 0,025
D31-04	16,5 bis 18,5	Bis zu 1,5	Bis zu 0,5	Bis zu 0,8	Bis zu 0,065	0,25 bis 0,40
D31-05	16,5 bis 18,5	Bis zu 1,5	1,0 bis 2,5	Bis zu 1,0	Bis zu 0,065	Bis zu 0,03
D31-06	16,5 bis 18,5	Bis zu 1,5	1,0 bis 2,5	Bis zu 1,0	Bis zu 0,065	0,25 bis 0,40
^a Selen und Blei können anstelle von oder zusätzlich zu Schwefel beigelegt sein.						

Die Sorten D31-01, D31-03 und D31-05 sind für Anwendungen gedacht, die gute Kaltverformungseigenschaften und Schweißbarkeit erfordern, die Sorten D31-02, D31-04 und D31-06 für Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an die Zerspanbarkeit. Die Sorten D31-01 und D31-02 haben zur Reduzierung der Legierungskosten und zur Erhöhung der Sättigungspolarisation einen geringeren Chromgehalt. Sie sind jedoch nur für gemäßigt korrosive Einsatzbedingungen geeignet. Die Sorten D31-03 und D31-04 sind für den Einsatz in stärker korrosiven Umgebungen gedacht, während die Sorten D31-05 und D31-06 für den Einsatz in den am stärksten korrosiven Umgebungen unter Inkaufnahme einer gewissen Reduzierung der magnetischen Leistungsfähigkeit gedacht sind.

2.4.3.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden üblicherweise als Knüppel, Stab, Walzdraht, gezogener Draht, Blech oder Band geliefert.

2.4.3.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Sättigungspolarisation, Maximalpermeabilität, remanente magnetische Polarisation, Koerzitivfeldstärke;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Zerspanbarkeit, Kaltumformbarkeit, Schweißbarkeit, Härte;
- chemisch: Korrosionsbeständigkeit.

Typische Werte magnetischer Eigenschaften sind in Tabelle 17 für schlussgeglühte Werkstoffe angegeben. Während der Chromgehalt die Werte der magnetischen Polarisation und des spezifischen elektrischen Widerstandes beeinflusst, hat er keinen ausgeprägten Einfluss auf die Maximalpermeabilität und die Koerzitivfeldstärke.

Tabelle 17 – Typische magnetische Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand

Sorte	Spezifischer elektrischer Widerstand	Maximale Permeabilität	Koerzitivfeldstärke	Magnetische Polarisation bei $H =$			
	$\mu\Omega m$		A/m	300 A/m	500 A/m	1 kA/m	8 kA/m
				T			
D31-01	0,55	2000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-02	0,55	2000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-03	0,75	2000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-04	0,75	2000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-05	0,75	1300	240	0,5	0,6	0,8	1,1
D31-06	0,75	1300	240	0,5	0,6	0,8	1,1

2.4.3.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden in magnetischen Kernen und anderen Teilen verwendet, wo ein nicht rostender Stahl mit hoher Permeabilität erforderlich ist, der eine niedrige Koerzitivfeldstärke und einen geringen Restmagnetismus besitzt: Magnetventile und elektromagnetische Geräte in Fahrzeugen, wie z. B. Einspritzpumpen und Antiblockiersysteme.

2.5 Klasse E – Nickel-Eisen-Legierungen

2.5.1 Klasse E1 – Nickelgehalt 70 % bis 85 %

2.5.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch die IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.5.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteil dieser Werkstoffe sind Eisen und Nickel, dessen Gehalt in einem Bereich von 70 % bis 85 % liegt. Legierungselemente wie Molybdän, Kupfer, Chrom oder Silicium können zur Steigerung des spezifischen elektrischen Widerstandes und zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften hinzugefügt werden. Die Werkstoffe enthalten außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.5.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Amplitudenpermeabilität bei einer magnetischen Feldstärke von 0,4 A/m und der Form der Hystereseschleife: rund, flach oder rechteckig.

2.5.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe sind als warm gewalzte Profile und Bänder, Schmiedestücke, kalt gezogener Draht sowie als kalt gewalztes Blech und Band erhältlich. Sie werden üblicherweise im nicht schlussgeglühten Zustand geliefert, aber eine Anzahl von Werkstoffen, besonders diejenigen mit flacher oder rechteckiger Hystereseschleife, sind im schlussgeglühten Zustand erhältlich, z. B. als Ringbandkerne.

2.5.1.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch folgende Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisierung bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke, magnetische Sättigungspolarisation, Koerzitivfeldstärke, Maximalpermeabilität, remanente magnetische Polarisierung und statischer Polarisierungshub;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Stanzbarkeit, Tiefziehbarkeit oder Wickelfähigkeit;
- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglühter Zustand, d. h. warm- oder kalt gewalzt, die Werkstoffe benötigen zur vollen Entwicklung ihrer magnetischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung; schlussgeglühter Zustand.

Die Werte für magnetische Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand sind in den Tabellen 18 bis 20 angegeben.

Magnetische Messungen werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 oder IEC 60404-6 durchgeführt.

Tabelle 18 – Festgelegte magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife

Sorte ^a	Höchstwert der Koerzitivfeldstärke ^b	Mindestwert der Amplitudenpermeabilität ^b bei $H = 0,4 \text{ A/m}$	Mindestwert der magnetischen Polarisierung bei $H =$				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10^3	T				
E 11	1 bis 4	100 bis 30	0,50	0,65	0,70	0,73	0,75

^a Verbesserte Sorten mit einem Mindestwert der Amplitudenpermeabilität von bis zu 250 000 für $H = 0,4 \text{ A/m}$ sind lieferbar.

^b Nur für Dicken $t > 0,4 \text{ mm}$.

^c Nur für Dicken $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.

Tabelle 19 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife

Magnetische Sättigungspolarisation	Remanente magnetische Polarisierung	Messpunkt für Scheitelwert der magnetischen Feldstärke	Scheitelwert der magnetischen Polarisierung	Statischer Polarisierungshub $f = 50 \text{ Hz}$
T	T	A/m	T	T
0,74	0,2	1,5	0,22	0,18
0,74	0,15	5	0,44	0,35
0,74	0,1	10	0,44	0,38

Tabelle 20 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit rechteckiger Hystereseschleife

Magnetische Sättigungspolarisation	Koerzitivfeldstärke	Remanente magnetische Polarisierung	Maximalpermeabilität
T	A/m	T	
0,8	0,8	0,73	250 000

2.5.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden dort verwendet, wo hohe Permeabilität bei niedrigen magnetischen Feldstärken gefordert ist.

- a) runde Hystereseschleife: Messgeräte, Stromwandler, Niederspannungstransformatoren, Relais-
teile, Signalübertrager, Fehlerstromschutzschalter, Rotor- und Sta-
torstanzteile, magnetische Abschirmungen;
- b) flache Hystereseschleife: Impulsübertrager, Thyristorschuttdrosseln, Fehlerstromschutzschalter;
- c) rechteckige Hystereseschleife: Magnetverstärker, AC/DC-Wandler, sättigbare Drosseln, Impuls-
übertragerkerne.

2.5.2 Klasse E2 – Nickelgehalt 54 % bis 68 %

2.5.2.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.5.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Nickel, dessen Gehalt im Bereich von 54 % bis 68 % liegt. In einigen Fällen kann ein Teil des Nickels durch Kobalt ersetzt sein. Zusätzlich können Molybdän, Kupfer, Chrom oder Silicium zur Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes und zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften vorhanden sein. Die Werkstoffe enthalten außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen her-
rühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.5.2.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Eine mögliche Grundlage ist die Form der Hystereseschleife: rund oder flach (im Magnetfeld gegläht).

2.5.2.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe sind als nicht schlussgeglühtes kalt gewalztes Band oder als schlussgeglühter Ringbandkern erhältlich.

2.5.2.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: Maximalpermeabilität, magnetische Sättigungspolarisation, remanente
magnetische Polarisation, Koerzitivfeldstärke;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Wickelbarkeit;
- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglüht, d. h. kalt gewalzt, oder schlussgeglüht (mit oder ohne
Magnetfeld).

Typische Werte der magnetischen Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand sind in den Tabellen 21 und 22 angegeben.

Magnetische Messungen werden in Übereinstimmung mit IEC 60404-6 durchgeführt.

Tabelle 21 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife

Sorte	Koerzitivfeldstärke	Amplitudenpermeabilität bei $H = 0,4 \text{ A/m}$	Maximalpermeabilität
	A/m		
E 21	1,2	50 000	110 000

Tabelle 22 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife

Koerzitivfeldstärke	Magnetische Sättigungspolarisation	Statischer Polarisationshub	Remanente magnetische Polarisation
A/m	T	T	T
5 bis 7	1,5 bis 1,25	0,8	0,2 bis 0,1

2.5.2.3 Hauptanwendungsgebiete

Die Werkstoffe werden dort verwendet, wo hohe Permeabilität bei niedrigen magnetischen Feldstärken gefordert wird.

- a) Werkstoffe mit runder Hystereseschleife: Fehlerstromschutzschalter, Signalübertrager, Wandler;
- b) Werkstoffe mit flacher Hystereseschleife: Fehlerstromschutzschalter, Impulsübertrager, Thyristorschutzdrosseln.

2.5.3 Klasse E3 – Nickelgehalt 41 % bis 51 %

2.5.3.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.5.3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Nickel, dessen Gehalt im Bereich 41 % bis 51 % liegt. Legierungselemente wie Molybdän, Kupfer, Chrom oder Silicium können zur Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes und zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften hinzugefügt werden. Die Werkstoffe enthalten außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.5.3.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Amplitudenpermeabilität bei einer magnetischen Feldstärke von 0,4 A/m oder nach der Form der Hystereseschleife: rund (isotrop), flach (magnetfeldgeglüht) oder rechteckig (anisotrop).

2.5.3.1.3 Lieferformen

Die isotropen Werkstoffe sind als warm gewalzte Profile und Bänder, als Schmiedestücke, als kaltgezogener Draht sowie als kalt gewalzte Bleche und Bänder erhältlich.

Die Werkstoffe mit flacher Hystereseschleife sind als Ringbandkerne erhältlich.

Die anisotropen Werkstoffe sind als kalt gewalzte Bänder oder Folien erhältlich.

2.5.3.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung der Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisation bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke, magnetische Sättigungspolarisation, Koerzitivfeldstärke, Remanenzverhältnis;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Stanzbarkeit oder Tiefziehbarkeit;

- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglühter Zustand: d. h. warm- oder kalt umgeformt, gegläht; die Werkstoffe benötigen zur vollen Entwicklung ihrer magnetischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung; schlussgeglühter Zustand.

Werte für magnetische Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand sind in den Tabellen 23 bis 25 angegeben.

Magnetische Messungen werden entsprechend der Erzeugnisform in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 oder IEC 60404-6 durchgeführt.

Tabelle 23 – Festgelegte magnetische Eigenschaften^a von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife

Sorte	Höchstwert der Koerzitivfeldstärke	Mindestwert der Amplitudenpermeabilität ^b bei $H = 0,4 \text{ A/m}$	Mindestwert der magnetischen Polarisation bei $H =$				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10^3	T				
E 31	6 bis 12	10 bis 4	0,5	0,9	1,1	1,35	1,45

^a Nur für Dicken $t > 0,4 \text{ mm}$.

^b Nur für Dicken $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.

Tabelle 24 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit flacher Hystereseschleife

Koerzitivfeldstärke	Magnetische Sättigungspolarisation	Statischer Polarisationshub	Remanente magnetische Polarisation
A/m	T	T	T
7	1,52	1,1	0,08 bis 0,23

Tabelle 25 – Typische magnetische Eigenschaften von Werkstoffen mit rechteckiger Hystereseschleife

Magnetische Sättigungspolarisation	Koerzitivfeldstärke	Remanente magnetische Polarisation	Maximalpermeabilität
T	A/m	T	
1,55 bis 1,6	12 bis 8	1,5 bis 1,57	50 000 bis 70 000

2.5.3.3 Hauptanwendungsgebiete

Diese Werkstoffe werden dort verwendet, wo hohe Permeabilität bei niedrigen magnetischen Feldstärken in Kombination mit hoher remanenter magnetischer Polarisation oder magnetischer Sättigungspolarisation gefordert wird.

- a) runde Hystereseschleife: Messgeräte, Stromwandler, Niederspannungstransformatoren, Relais-teile, Signalübertrager, Fehlerstromschutzschalter, Rotor- und Statorstanzteile, magnetische Abschirmungen;
- b) flache Hystereseschleife: Impulsübertrager, Thyristorschuttdrosseln, Fehlerstromschutzschalter;
- c) rechteckige Hystereseschleife: Magnetverstärker, AC/DC-Wandler, sättigbare Drosseln, Impulsübertragerkerne.

2.5.4 Klasse E4 – Nickelgehalt 35 % bis 40 %

2.5.4.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.5.4.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Nickel, dessen Gehalt im Bereich 35 % bis 40 % liegt. Legierungselemente wie Molybdän, Kupfer, Chrom oder Silicium können zur Steigerung des spezifischen elektrischen Widerstandes und zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften hinzugefügt werden. Die Werkstoffe enthalten außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.5.4.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Amplitudenpermeabilität bei einer magnetischen Feldstärke von 1,6 A/m.

2.5.4.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe sind als warm gewalzte Profile und Bänder, Schmiedestücke, kalt gezogener Draht, kalt gewalzte Bleche und Bänder erhältlich. Sie werden üblicherweise im nicht schlussgeglühten Zustand geliefert, aber eine Anzahl von Werkstoffen ist auch im schlussgeglühten Zustand erhältlich.

2.5.4.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: Koerzitivfeldstärke, magnetische Polarisierung bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- mechanisch: Stanzbarkeit oder Tiefziehbarkeit;
- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglühter Zustand: d. h. warm- oder kaltumgeformt, gegläht; die Werkstoffe benötigen zur vollen Entwicklung ihrer magnetischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung; schlussgeglühter Zustand.

Festgelegte Werte für die magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe im schlussgeglühten Zustand sind in Tabelle 26 angegeben.

Magnetische Messungen werden entsprechend der Erzeugnisform in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 oder IEC 60404-6 durchgeführt.

Tabelle 26 – Festgelegte magnetische Eigenschaften von Werkstoffen im schlussgeglühten Zustand

Sorte ^c	Höchstwert der Koerzitivfeldstärke ^b	Mindestwert der Amplitudenpermeabilität ^a bei $H = 1,6 \text{ A/m}$	Mindestwert der magnetischen Polarisation ^b				
			bei $H =$				
	A/m		20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
			T				
E 41-02	–	2 200	–	–	–	–	–
E 41-03	24	2 900	0,20	0,45	0,70	1,00	1,18

^a Nur für Dicken $0,1 \text{ mm} \leq t \leq 0,38 \text{ mm}$.

^b Nur für Dicken $t > 0,4 \text{ mm}$.

^c Verbesserte Sorten mit einem Mindestwert der Amplitudenpermeabilität bis zu 9 000 bei $H = 0,4 \text{ A/m}$ sind verfügbar.

2.5.4.3 Hauptanwendungsgebiete

Die Werkstoffe werden für Hochfrequenz- und Impulsanwendungen, Übertrager in der Telekommunikation, Hochfrequenzfilter oder -transformatoren, Sperrwandler, Impulsübertrager und magnetische Abschirmungen verwendet.

2.5.5 Klasse E5 – Nickelgehalt 29 % bis 33 %

2.5.5.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden nicht durch eine IEC-Publikation abgedeckt.

2.5.5.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Nickel. Die Curie-Temperatur ist stark vom Nickelgehalt abhängig. Legierungselemente wie Kupfer können zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften hinzugefügt sein. Die Werkstoffe enthalten außerdem unvermeidbare Verunreinigungen zusammen mit einem niedrigen Gehalt anderer Elemente, welche von Beimengungen herrühren können, die während des Herstellungsverfahrens erforderlich sind.

2.5.5.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Eine mögliche Grundlage der Untereinteilung ist die maximale Arbeitstemperatur.

2.5.5.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe werden als kalt gewalztes Band oder kalt gezogener Draht, üblicherweise im schlussgeglühten Zustand, geliefert.

2.5.5.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung der Werkstoffe kann durch folgende Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: Änderung der magnetischen Polarisation mit der Temperatur bei einer gegebenen magnetischen Feldstärke und gegebenem Temperaturbereich;
- elektrisch: spezifischer elektrischer Widerstand;
- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglühter Zustand, d. h. kalt gewalzt oder -gezogen; schlussgeglühter Zustand.

Typische Werte der kennzeichnenden magnetischen Eigenschaften im schlussgeglühten Zustand sind in Tabelle 27 angegeben.

Tabelle 27 – Typische physikalische Eigenschaften

Curie-Temperatur	Magnetische Polarisation bei 0 °C und bei $H = 10 \text{ kA/m}$	$\Delta B/\Delta T$ bei $H = 10 \text{ kA/m}$
°C	T	T/K
30 bis 120	0,15 bis 0,7	–0,005 bis – ,007

2.5.5.3 Hauptanwendungsgebiete

Temperaturkompensatoren (magnetischer Nebenschluss) für permanentmagnetische Messvorrichtungen, insbesondere für Stromzähler (Energieverbrauchsmessgeräte) und für Spannungsregler in Kraftfahrzeugen.

2.6 Klasse F – Eisen-Kobalt-Legierungen

2.6.1 Klasse F1 – Kobaltgehalt 47 % bis 50 %

2.6.1.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.6.1.1.1 Chemische Zusammensetzung

Hauptbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Kobalt, dessen Gehalt im Bereich 47 % bis 50 % liegt. Legierungselemente wie Vanadium, Chrom, Niob oder Tantal können zur Verbesserung der Zähigkeit hinzugefügt werden.

2.6.1.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Koerzitivfeldstärke und der Form der Hystereseschleife.

2.6.1.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe mit runder Hystereseschleife werden als warm gewalzte rechteckige oder runde Stäbe, Band oder Blech, kalt gezogener Draht, Schmiedestücke und kalt gewalztes Band geliefert. Werkstoffe mit rechteckiger Hystereseschleife sind als Band oder Folie oder als Ringbandkerne erhältlich.

2.6.1.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung der Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: Maximalpermeabilität, magnetische Sättigungspolarisation, magnetische Polarisation für verschiedene Werte der magnetischen Feldstärke, remanente magnetische Polarisation, Koerzitivfeldstärke, spezifischer Ummagnetisierungsverlust;
- mechanisch: Stanzbarkeit im kalt gewalzten Zustand, Zerspanbarkeit im warm umgeformten oder wärmebehandelten Zustand, Zugfestigkeit;
- metallurgischer Zustand: Werkstoffe mit runder Hystereseschleife werden üblicherweise im nicht schlussgeglühten Zustand geliefert, d. h. warm- oder kalt umgeformt, und erfordern zur vollen Entwicklung ihrer magnetischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung;
Werkstoffe mit rechteckiger Hystereseschleife werden im schlussgeglühten Zustand geliefert.

Magnetische Messungen werden entsprechend der Erzeugnisform in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 oder IEC 60404-6 durchgeführt.

Werte für magnetische Eigenschaften der schlussgeglühten Werkstoffe sind in den Tabellen 28 und 29 angegeben.

Tabelle 28 – Bereiche festgelegter magnetischer Eigenschaften von Werkstoffen mit runder Hystereseschleife

Sorte	Höchstwert der Koerzitivfeldstärke	Mindestwert der magnetischen Polarisation bei $H =$				
		300 A/m	800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
	A/m	T				
F 11	60 bis 240	1,8 bis 1,4	2,1 bis 1,7	2,2 bis 1,9	2,25 bis 2,06	2,25 bis 2,15

Tabelle 29 – Typische magnetische Eigenschaften der Werkstoffe mit rechteckiger Hystereseschleife

Sorte	Koerzitivfeldstärke	Remanente magnetische Polarisation
	A/m	T
F 12	20 bis 40	1,90 bis 2,10

2.6.1.3 Hauptanwendungsgebiete

Isotrope Werkstoffe finden dort Verwendung, wo extrem hohe magnetische Polarisationswerte mit niedrigen oder mittleren Feldstärken verknüpft sind, wie z. B. Transformatoren, Relais, elektromagnetische oder elektromechanische Geräte für die Luft- und Raumfahrt, Telefonmembranen, Polschuhe für Elektromagnete, magnetische Linsen und Magnetlager.

Anisotrope Werkstoffe werden für platzsparende, hoch belastete Magnetverstärker und Spezialtransformatoren verwendet.

2.6.2 Klasse F2 – Kobaltgehalt 35 %

2.6.2.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.6.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Grundbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Kobalt, dessen Gehalt ungefähr 35 % beträgt. Legierungselemente wie Vanadium oder Chrom können zur Verbesserung der Zähigkeit hinzugefügt werden.

2.6.2.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Koerzitivfeldstärke.

2.6.2.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe sind als warm gewalztes Band oder Blech, Schmiedestücke und Gussstücke erhältlich.

2.6.2.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen:

- magnetisch: magnetische Polarisierung bei verschiedenen Werten der magnetischen Feldstärke, magnetische Sättigungspolarisation;
- mechanisch: Zerspanbarkeit im warm umgeformten oder wärmebehandelten Zustand;
- metallurgischer Zustand: nicht schlussgeglühter Zustand, d. h. warm gewalzt oder warm umgeformt; die Werkstoffe benötigen eine Wärmebehandlung zur vollen Entwicklung der magnetischen Eigenschaften.

Magnetische Messungen werden entsprechend der Erzeugnisform in Übereinstimmung mit IEC 60404-4 oder IEC 60404-6 durchgeführt.

Festgelegte Werte für die magnetischen Eigenschaften der schlussgeglühten Werkstoffe sind in Tabelle 30 angegeben.

Tabelle 30 – Festgelegte magnetische Eigenschaften

Sorte		Höchstwert der Koerzitivfeldstärke	Mindestwert der magnetischen Polarisierung bei $H =$			
			800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
		A/m	T			
F 21	Massivmaterial	300	1,2	1,3	–	–
	Band oder Blech		1,5	1,6	2,0	2,2

2.6.2.3 Hauptanwendungsgebiete

Die Werkstoffe werden hauptsächlich für Anwendungen benutzt, die entweder mit extrem hohen magnetischen Polarisierungen oder ungewöhnlich hohen Temperaturen verknüpft sind, und als Polschuhe für Elektromagnete.

2.6.3 Klasse F3 – Kobaltgehalt 23 % bis 27 %

2.6.3.1 Allgemeines

Diese Werkstoffe werden durch IEC 60404-8-6 abgedeckt.

2.6.3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Hauptbestandteile dieser Werkstoffe sind Eisen und Kobalt, dessen Gehalt in dem Bereich von 23 % bis 27 % liegt. Legierungselemente wie Vanadium oder Chrom können zur Verbesserung der Zähigkeit hinzugefügt werden.

2.6.3.1.2 Grundlage der Untereinteilung

Die empfohlene Untereinteilung richtet sich nach der Koerzitivfeldstärke.

2.6.3.1.3 Lieferformen

Die Werkstoffe sind als warm gewalzte runde Stangen, warm gewalztes Blech oder Band, Schmiedestücke, kalt gezogener Draht sowie als kalt gewalztes Band und Folie erhältlich.

2.6.3.2 Physikalische Eigenschaften

Eine vollständigere Beschreibung dieser Werkstoffe kann durch die folgenden Eigenschaften erfolgen: