

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

Praktikum/Übung SchAT

Versuch: Mechanische Beanspruchung durch Kurzschlußströme



Testat:

Praktikum in Zusammenarbeit mit der TU Dresden

Mechanische Beanspruchung durch Kurzschlußströme

Inhalt

- 2 Versuchsziel
- 3 Grundlagen
- 3.1 Allgemeine Gesichtspunkte
- 3.2 Leiterschienenanordnungen
- 3.3 Streckenlast auf zwei parallel verlegte Leiter
- 3.4 Die dynamische Beanspruchung
- 3.4.1 Eigenfrequenzen der Leiterschiene im elastischen Bereich
- 3.4.2 Zulässige Materialspannung
- 3.4.3 Stützerbeanspruchung
- 3.5 Die elastostatische Berechnung
- 4 Messung der dynamischen Beanspruchung
- 4.1 Versuchsanordnung
- 4.2 Meßprinzipien
- 4.2.1 Messung der Materialdehnung
- 4.2.2 Messung des Kurzschlußstromes
- 4.2.3 Abmessungen der Modelle
- 5 Literatur
- 6 Versuchsaufgaben
- 7 Kontrollfragen
- 8 Anhang

1 Formelzeichen und Indizes

A	Fläche	α	Winkel
В; В	magnetische Induktion; Vektor	α	Faktor nach DIN VDE 0103
Е	Elastizitätsmodul	β	Faktor nach DIN VDE 0103
F; F	Kraft; Vektor	Δ	Differenz
Н; Н	magnetische Feldstärke; Vektor	ε	Dehnung
Ι	Strom	φ	Korrekturfaktor
I _{xx} ; I _{yy}	Flächenträgheitsmoment	к	Stoßfaktor
I _K "	Anfangskurzschlußwechselstrom	λ_n	Eigenwerte
L	Leiter	μ_0	magnetische Feldkonstante
Μ	Moment	$\mu_{\rm r}$	relative Permeabilität
R	elektrischer Widerstand	ρ	Dichte
R _m	Zugfestigkeit	$\rho_{20^\circ C}$	spezifischer elektrischer Widerstand
R _{p0,2}	0,2 ‰-Grenze, Streckgrenze	σ	mechanische Spannung
V_{σ}	Faktor nach DIN VDE 0103	$\sigma_{0,2}$	0,2 % - Grenze, Streckgrenze
$V_{\rm F}$	Faktor nach DIN VDE 0103	ω	Kreisfrequenz
	(Resonanzüberhöhungsfaktor)	ψ	Korrekturfaktor
Vr	Faktor nach DIN VDE 0103		
W	Widerstandsmoment		
a	Leitermittenabstand		
d	Stromschienendicke		
$\mathbf{f}_{\mathbf{C}}$	maßgebliche Kennfrequenz		
h	Stromschienenhöhe		
i	Strom (Wechselstrom)		
i_x,i_y	Trägheitshalbmesser		
1	Länge		Indizes
q	Streckenlast		Biege-
q	Faktor nach DIN VDE 0103	dyn	dynamisch
r	Radius, Abstand	k2	Kurzschluß, zweipolig
S	Weg	k3	Kurzschluß, dreipolig
t	Zeit	m	maximal
v	Auslenkung	n	Laufindex
x, y, z	Koordinaten	sta	statisch

2 Versuchsziel

Der Versuch soll Kenntnisse über die Größe der mechanischen Beanspruchungen von Stromleiteranordnungen im Kurzschlußfall und über die meßtechnische Erfassung der Werte der Beanspruchungen und Belastungen vermitteln.

3 Grundlagen

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Wird ein System mit einer elektrischen, mechanischen oder thermischen Größe beaufschlagt, so stellt diese eine Belastung des Systems dar. Aus den Reaktionen des Systems auf diese Belastung ergeben sich entsprechende Beanspruchungen.

Die mechanische Beanspruchung von Leiterschienen im Kurzschlußfall ist abhängig von der Höhe des Kurzschlußstromes und der Geometrie der Anordnung (Querschnitt der Leiterschienen, Polmittenabstand). Der Kurzschlußstrom ruft unter Vermittlung durch das elektromagnetische Feld eine auf die Leiterschienen wirkende Streckenlast hervor. Zur Ermittlung der daraus resultierenden Beanspruchung sind Kenntnisse aus der Werkstoffkunde und der Festigkeitslehre notwendig. Da die Belastung eine zeitlich veränderliche Größe ist, werden auch Kenntnisse aus der Schwingungslehre benötigt.

Durch die Beanspruchung können Stromschienenanordnungen versagen:

- Das Material wird über seine Festigkeit hinaus beansprucht und bricht.
- Bleibende Verformungen können die Abstände zwischen Leiterschienen bzw. Leiterschienen und geerdeten Teilen so weit verkürzen, daß es zu einem Störlichtbogen kommt.



Bild 1: Verformung eines Balkens

3.2 Leiterschienenanordnungen

Man unterscheidet:	 biegesteife Leiter nicht biegesteife Leiter
sowie	- Hauptleiter

- Teilleiter.

Biegesteife Leiter haben die Fähigkeit, Querkräfte aufzunehmen. Sie werden durch die Belastung nur geringfügig ausgelenkt. Biegesteife Leiter können nach dem Prinzip der Balkenbiegung berechnet werden. Die im Versuch zu untersuchenden Leiterschienen gehören zu den biegesteifen Leitern.

Nichtbiegesteife Leiter sind nicht in der Lage, Querkräfte aufzunehmen. Die Auslenkung durch die Belastung ist deshalb größer als bei biegesteifen Leitern. Nichtbiegesteife Leiter werden auf Zug beansprucht (z. B. Freileitungsseile).

Als Hauptleiter bezeichnet man einen einzelnen Leiter oder die Anordnung mehrerer Leiter, die den gesamten Strom eines Stranges führen.

Ein Teilleiter führt einen bestimmten Teil des gesamten Stromes eines Stranges und ist Teil des Hauptleiters. [1]

3.3 Streckenlast auf zwei parallel verlegte Leiter



Bild 2: Leiteranordnung

Mit Hilfe des *Biot-Savart*schen Gesetzes kann für jeden beliebigen Punkt im Raum der Betrag einer Teilfeldstärke d**H** bestimmt werden, die durch ein Stromelement i dy hervorgerufen wird.

Hier soll nun der Betrag der Feldstärke d**H** bestimmt werden, die herrührend vom Stromelement i dy (Leiter 2) auf den Punkt P (Leiter 1) wirkt. Dabei wird von einem 2-poligen Kurzschluß ausgegangen, d. h., die Ströme in den Leitern 1 und 2 fließen in entgegengesetzter Richtung. Die Leiter werden als unendlich lang und parallel mit punktförmigem Querschnitt angenommen.

$$d\mathbf{H} = \frac{i\,d\mathbf{y} \,\mathbf{x}\,\mathbf{r}}{4\,\pi\,r^3} \qquad Biot-Savartsches \,\text{Gesetz} \tag{1}$$

Betrag der Teilfeldstärke dH:

$$dH = \frac{i\sin\alpha}{4\pi r^2} \, dy$$

mit $B = \mu H$ und $\mu = \mu_0 \mu_r$ $\mu_r = 1$ (Luft)

erhält man für die magnetische Induktion im Punkt P:

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \alpha}{r^2} \, dy \tag{2}$$

Die Streckenlast ergibt sich aus:
$$q = \frac{dF}{dy}$$
 (3.1)

und
$$d\mathbf{F} = i \, d\mathbf{y} \times \mathbf{B}$$
 $d\mathbf{y} \perp \mathbf{B}$ (3.2)

$$dF = i B dy \tag{3.3}$$

$$zu: \qquad q = i B \tag{3.4}$$

$$q = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \alpha}{r^2} \, dy \qquad (4) \qquad \text{mit: } \sin \alpha = \frac{a}{r} \quad \text{und} \quad r = \sqrt{a^2 + (y - x)^2}$$

folgt:
$$q = \frac{\mu_0 i^2 a}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{\sqrt{[a^2 + (y-x)^2]^3}}$$

Grundintegral:
$$\int \frac{du}{\sqrt{(a^2 + u^2)^3}} = \frac{dy}{\sqrt{[a^2 + (y - x)^2]^3}}$$
 [2]

$$q = \frac{\mu_0 i^2 a}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{du}{\sqrt{\left[a^2 + u^2\right]^3}} \qquad \qquad y - x = u$$
$$dy = du$$

$$q = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi a} \frac{y - x}{\sqrt{a^2 + (y - x)^2}} \Big|_{-\infty}^{+\infty}$$

$$q = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi a}$$
(5)

Dabei tritt die maximale Streckenlast q_m bei maximaler Strombelastung (Stoßkurzschlußstrom I_S) auf.

$$q_m = \frac{\mu_0 I_s^2}{2\pi a} \qquad \text{mit} \qquad I_s = \kappa \sqrt{2} \cdot I_K'' \tag{6}$$

Die Streckenlast wurde bisher nur für ideale Anordnungen berechnet. In der Praxis treten jedoch zusätzliche Effekte auf, welche die Größe der Streckenlast beeinflussen. Das sind im einzelnen:

- endliche Stromdichte im beanspruchten Leiter L1
- Feldverzerrung um den beanspruchten Leiter L2
- Proximity-Effekt im beanspruchten Leiter L1

Der Effekt, hervorgerufen durch eine endliche Stromdichte in der vom Feld durchdrungenen Leiterschiene beinhaltet die Veränderung des wirksamen Leiterabstandes a durch die nichtlineare Verteilung des H-Feldes im Inneren des Leiters. Der Leiterabstand a wird zum scheinbaren (d. h. wirksamen) Teilleiterabstand a_t Das Verhältnis von a_t zu a wird größer mit größer werdendem Abstand a.

$$\frac{a_t}{a} = \frac{d}{a} \frac{1}{\ln\left(\frac{2a}{\frac{d}{2a}+1}\right)}$$
(7)

Bei einem Verhältnis des Leiterabstandes a zur Stromschienendicke d von $a/d \approx 3$ kann $a \approx a_t$ gesetzt werden (siehe Bild 11).

Der Wirkung der Feldverzerrung ist abhängig von der Geometrie der Anordnung. Betrachtet man die das magnetische Feld hervorrufende Leiterschiene der Anordnung als nicht linienförmig, sondern als einen Leiter mit rechteckigem Querschnitt, so ergibt sich eine Feldverzerrung um die Leiter. Die Feldlinien sind keine Kreise mehr. Damit kommt es zu einer Änderung der auf die Leiterschiene wirkenden Streckenlast und zu einer Änderung des Teilleiterabstandes. [3]

Dieser Effekt ist ebenfalls nur bei kleinen Leiterabständen wirksam (siehe Bild 12).

$$\frac{a_{t}}{a} = \frac{h}{a} \frac{1}{2 \arctan\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{a}{h} \ln\left(1 + \frac{h^{2}}{a^{2}}\right) + \frac{h^{3}}{a^{3}} \frac{d^{2}}{h^{2}} \frac{1}{6\left(1 + \frac{a^{2}}{h^{2}}\right)}$$
(8) [3]

Der Proximity-Effekt ist analytisch schwer zu beschreiben und soll hier nur qualitativ betrachtet werden.

Wird eine Leiteranordnung von einem Wechselstrom durchflossen, so bilden sich im Leiter Wirbelfelder, die einen Strom induzieren, der dem Leiterstrom überlagert wird. Die Stromverteilung im Leiter verändert sich.

	Effekt der endlichen Stromdichte	Feldverzerrungs- effekt	Proximity-Effekt
Funktion der Frequenz	nein	nein	ja
Funktion der Permeabilität des Leiters μ _r	nein	nein	ja
Funktion des spezifischen elektrischen Widerstandes $\rho_{20^\circ C}$	nein	nein	ja
Varalaish a a			a _t > a bei parallelen Strömen
vergieich a, a _t	$a_t < a$	$a_t > a$	a _t < a bei antiparallelen Strömen
Auftreten bei Gleichstrom	ja	ja	nein

Tabelle 1: Vergleich der Effekte

Geht man von einem generatorfernen Kurzschluß aus, so kann der transiente und subtransiente Anteil des Stromes vernachlässigt werden ($I_K = I_K$ = I_K = I_K).

Der Kurzschlußstrom setzt sich aus einem exponentiell abklingenden Gleichstrom i_ und einem Kurzschlußwechselstrom i_ zusammen.

$$i(t) = i_{-}(t) + i_{-}(t)$$
(9.1)

$$i_{-} = \sqrt{2} I_{K}'' c^{-\frac{t}{\tau}} \sin \alpha$$
(9.2)

$$i_{-} = \sqrt{2} I_{K}'' c^{-\frac{t}{\tau}} \sin \alpha$$
(9.2)

$$\alpha = \varphi_{z} - \varphi_{u}$$
(9.3)

$$\varphi_{z} - \text{Impedanzwinkel}$$
(9.3)

$$\varphi_{u} - \text{Phasenwinkel der Spannung}$$
im Kurzschlußeintritt

Für die Dimensionierung elektrotechnischer Anlagen sind zwei Verläufe des Kurzschlußstromes von Interesse:

- der Kurzschlußstromverlauf bei Fehlereintritt im Spannungsmaximum und

- der Kurzschlußstromverlauf bei Fehlereintritt im Nulldurchgang der Spannung.

Im Fall des Fehlereintrittes im Nulldurchgang der Spannung tritt ein zusätzliches Gleichglied auf, welches exponentiell abklingt. Durch die fast ausschließlich induktive Belastung des Kurzschlußstromkreises ist der Stromverlauf um +90° verschoben. Ist die Spannung bei Eintritt des Kurzschlusses u = 0, so müßte der Strom maximal sein. Um den Kurzschlußstrom auf den Startwert von $i_K = 0$ zu ergänzen, muß ein Gleichstromanteil vorhanden sein. Die Höhe der Ströme (Gleich- und Wechselstrom) ist abhängig vom X/R-Verhältnis des Netzes.



Bild 3: Verlauf des Kurzschlußstromes bei generatorfernem Kurzschluß [4]

Da der größte Strom bei Kurzschlußeintritt im Spannungsnulldurchgang auftritt (Kurzschlußeintrittswinkel $\varphi_u = 0$), ist dieser Fall maßgebend für die Bemessung der Anlagen auf ihre mechanische Beanspruchbarkeit.

Die durch den Kurzschlußstrom hervorgerufene Streckenlast auf die Leiter setzt sich aus einem Gleichglied und einem Wechselglied zusammen.

Das Gleichglied stellt die statische Belastung der Leiter dar:

$$q_{sta} = \frac{\mu_0 \ I_K''^2}{2\pi a}$$
(10.1)

mit

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2}[1 - \cos(2\omega t)]$$
 bei $\alpha = 0$

Das mit der doppelten Frequenz des Kurzschlußstromes wirkende Wechselglied ergibt die dynamische Belastung der Anlagen:

$$q_{dyn} = \frac{\mu_0 I_K''^2}{2\pi a} \cos(2\omega t)$$
(10.2)

Das Verhältnis von maximal auftretender Streckenlast q_m zu statischer Streckenlast q_{sta} kann nach Gleichung (6) und (10.1) bestimmt werden mit:

$$\frac{q_m}{q_{sta}} = \frac{\left(\sqrt{2} \ \kappa \ I_K''\right)^2}{I_K''^2} \le 8$$
(11)

Die Werte für den Stoßfaktor κ liegen im Bereich von 2 bis 1, praktisch jedoch bei $\kappa \le 1,855$ bei einem X/R = 20.



Bild 4: Stoßfaktor κ für generatorfernen Kurzschluß in Niederspannungsnetzen [5]

3.4 Die dynamische Beanspruchung

Die dynamische Beanspruchung der Leiterschienen wird durch die sich zeitlich ändernde Streckenlast hervorgerufen. Da die Schwingung der Leiterschienen (Balkenschwingung) durch eine Erregung erzwungen wird, hat die Schwingungsgleichung die folgende vereinfachte Form:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = \frac{q(x,t)}{\rho A} \qquad Bernoulli-Euler-Wellengleichung \tag{12.1}$$

Dabei wird angenommen, daß der Querschnitt A über der betrachteten Länge ebenso wie die Biegesteifigkeit EI konstant sind. Da die Streckenlast q nicht ortsabhängig ist, vereinfacht sich die Differentialgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = \frac{q(t)}{\rho A}$$
(12.2)

Diese Gleichung kann unter Beachtung der Randbedingungen nach Tabelle 3 gelöst werden.

3.4.1 Eigenfrequenzen der Leiterschiene im elastischen Bereich

Wird in Gleichung (12.2) q = 0 gesetzt, ergeben sich die Eigenfrequenzen der Leiterschiene. Es wird dabei vom Idealfall ausgegangen, d. h., der Unterbau (Stützer, Befestigung) der Leiterschiene wird als starr angesehen. Die Gleichung zur Berechnung der Eigenfrequenzen lautet [6]:

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$
(13)

Gleichung (13) ist nur für Hauptleiter anwendbar, die aus einem Einzelleiter bestehen. Für Hauptleiter, die aus Teilleitern bestehen, sind die zur Berechnung der Eigenfrequenz notwendigen Gleichungen in DIN VDE 0103 angegeben. Die Eigenwerte λ_n sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Die Eigenfrequenz f_1 wird nach DIN VDE 0103 als maßgebliche Kennfrequenz f_C bezeichnet. Man unterscheidet drei Frequenzbereiche:

-	$f_C \gg 2 f_{Netz}$:	Leiterschiene folgt der Belastung unverzögert
		(Beanspruchung kann mit der elastostatischen Methode ermittelt werden)
-	$f_C \approx 2 f_{Netz}$:	Resonanzbereich bei Beanspruchung im elastischen Bereich
-	$f_C \ll 2 f_{Netz}$:	Leiterschiene kann durch ihre Trägheit der Belastung nicht folgen

Beträgt die maßgebliche Kennfrequenz einer Schienenanordnung $f_C = 100$ Hz, so führt das nicht zwangsläufig zur Resonanz. Wird die Elastizitätsgrenze des Materials in den Außenlagen der Leiterschiene überschritten, so ändert sich der resultierende Elastizitätsmodul (plastische Verformung), und der "Schwingkreis" wird verstimmt.

3.4.2 Zulässige Materialspannung

Die auf die Leiterschiene wirkende zeitabhängige Streckenlast führt zu einer Auslenkung der Schiene, d. h., es tritt eine Dehnung ε auf, die der Spannung σ proportional ist. Diesen Zusammenhang beschreibt das *Hookes*che Gesetz:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \tag{14}$$

Wird die zulässige Spannung überschritten, kommt es zu plastischen Verformungen und bei weiterer Erhöhung der Beanspruchung zum Bruch. Dabei treten die größten Spannungen an den Einspannstellen und dort in den äußeren Lagen der Schiene auf ($\sigma \sim \epsilon$). Verformt sich eine Leiterschiene im Kurzschlußfall über einen zulässigen Wert plastisch oder kommt es zum Bruch, so hat dies kostenintensive Reparaturen zur Folge. Deshalb müssen alle Leiteranordnungen kurzschlußfest dimensioniert werden. Ein Leiter wird nach [1] als kurzschlußfest betrachtet, wenn gilt:

$$\sigma_m \le q \, \sigma_{0,2} \tag{15}$$

Der Sicherheitsfaktor q (Tabelle 6) und die Streckgrenze $\sigma_{0,2}$ (Bild 11) werden für gebräuchliche Materialien (Tabellen 7 und 8) angegeben.

Bei σ_m können bleibende Durchbiegungen von bis zu 1 % des Stützabstandes entstehen. Mindestabstände zwischen Hauptleitern bzw. Hauptleitern und geerdeten Teilen dürfen dabei nicht unterschritten werden [1]. Für eine Leiterschiene bei Strombelastung kann die zulässige Spannung σ_m nach

$$\sigma = \frac{M_b}{W} \tag{16.1}$$

ermittelt werden.

Unter Einbeziehung der Sicherheitsfaktoren V_{σ} und V_r (Bild 9) nach DIN VDE 0103 [1] ergibt sich für Gleichung (16.1):

$$\sigma_m = V_\sigma \ V_r \ \frac{M_{b\,\text{max}}}{W} \tag{16.2}$$

Eine Möglichkeit zur überschläglichen Ermittlung der zulässigen Spannung bietet die Gleichung (16.3) nach DIN VDE 0103, die eine Vereinfachung von Gleichung (16.2) darstellt:

$$\sigma_m = V_\sigma \ V_r \ \beta \ \frac{q_m \ l^2}{8W} \tag{16.3}$$

Der Faktor β ist in Tabelle 4 enthalten.

Bei Nutzung von Gleichung (16.3) ist für den dreipoligen Kurzschluß

$$q_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi a} \frac{\sqrt{3}}{2} I_{p3}^2 \qquad \text{mit} \quad I_{p3} = \kappa \sqrt{2} I_{k3}''$$
(17.1)

und für den zweipoligen Kurzschluß

$$q_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi a} I_{p2}^2 \qquad \text{mit} \quad I_{p2} = \kappa \sqrt{2} I_{k2}'' \qquad (17.2)$$

einzusetzen.

Die Faktoren V_{σ} , V_r sind Bild 9 zu entnehmen, der Faktor β ist in Tabelle 4 enthalten.

3.4.3 Stützerbeanspruchung

Für die Beanspruchung der Stützer ist nach DIN VDE 0103 die dynamische Kraft F_d maßgebend. F_d kann berechnet werden mit:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \tag{18}$$

für den dreipoligen Kurzschluß mit
$$F_{m3} = q_{m3} l$$

für den zweipoligen Kurzschluß mit $F_{m2} = q_{m2} l$

Die Faktoren V_F und V_r sind Bild 9 zu entnehmen, der Faktor α ist in Tabelle 4 enthalten.

3.5 Die elastostatische Berechnung

Wird ein Balken mit einer sich langsam ändernden Streckenlast belastet, können die Reibungs- und Trägheitskräfte vernachlässigt werden. Dieser Fall ist gegeben, wenn die maßgebliche Kennfrequenz f_C größer ist als die Frequenz der Streckenlast. Man erhält dann aus der Schwingungsgleichung des Balkens (12.2) als Sonderfall die Gleichung für die elastostatischen Belastung des Balkens:

Streckenlast
$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = q$$
 (19.1)

Aus Gleichung (19.1) erhält man durch viermalige Integration die Gleichung der elastischen Biegelinie v(z) sowie als Zwischenergebnisse die folgenden Größen: [6]

Querkraft
$$F_{Q}(x) = EI \frac{d^{3}v}{dx^{3}}$$
 (19.2)

Moment
$$M(x) = EI \frac{d^2 v}{dx^2}$$
 (19.3)

Biegewinkel
$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{EI} \int M \, dx = v'$$
 (19.4)

Durchbiegung

$$v(x) = \frac{1}{EI} \iint M \, dx \, dx \tag{19.5}$$



Bild 5: Balkenelement

Zur Ermittlung der elastischen Biegelinie stellt man die Momentengleichung M(x) nach Bild 5 auf, setzt M(x) in Gleichung (19.3) ein und integriert diese zweimal. Unter Beachtung der Randbedingungen nach Tabelle 3 erhält man die Momente an den Einspannstellen M_A, M_B sowie die Gleichung der Biegelinie v(x). Für typische Anordnungen sind die Gleichungen der Biegelinie, der Momente an den Einspannstellen und einige spezielle Verformungen in Tabelle 5 angegeben. Es ist zu beachten, daß die Berechnung der elastischen Biegelinie v(x) nach Gleichung (19.5) nur im Bereich der rein

elastischen Verformung möglich ist. Aluminium gilt als rein elastisch verformbar bis zu einer Dehnung von $\varepsilon \approx 1 \%$ (siehe Bild 11, Punkt R_m).

4 Messung der dynamischen Beanspruchung

4.1 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung besteht aus einer durch einen Hochstromtransformator gespeisten Leiterschleife (Durchlaufbiegeträger mit fester Einspannung), die einen zweipoligen Kurzschluß ohne Erdberührung nachbildet. In einem Stützfeld sind an einem Leiter sowie an einem Stützer Dehnungsmeßstreifen angebracht (Bild 7). Die Modellabmessungen (Leitermittenabstand, Stützerabstand, Stromschienenquerschnitt) sind den in der Realität verwendeten Abmessungen vergleichbar. Für das betrachtete Stützfeld kann die Leiterschiene im Modell als beidseitig fest eingespannter Balkens angesehen werden.

4.2 Meßprinzipien

4.2.1 Messung der Materialdehnung

Die Messung der Dehnung ist im Bereich der rein elastischen Verformung durch Einsatz von passiven, indirekten Gebern möglich. Bei plastischer Verformung ist eine Messung der Dehnung nicht ausreichend, da sich die äußeren Randbereiche nicht im gleichen Verhältnis deformieren. Es müssen zusätzliche Schwingungsmeßverfahren genutzt werden.

Da im Versuch nur eine rein elastische Verformung angenommen wird, werden als Geber Dehnungsmeßstreifen genutzt. Diese wandeln eine Längenänderung ΔI der Meßschiene in eine Widerstandsänderung ΔR um, d. h., es wird ein der Dehnung proportionaler Widerstand gemessen. Das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung zu relativer Längenänderung heißt k-Faktor. Er wird für jeden Dehnungsmeßstreifen vom Hersteller angegeben.

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \le 2,0 \tag{20}$$

Ein Dehnungsmeßstreifen besteht aus einer Trägerschicht aus Papier, auf die ein mäanderförmiger Drahtwiderstand aus einer Sonderlegierung aufgebracht ist. Zur Messung der Dehnung wird der Dehnungsmeßstreifen auf das Meßobjekt mit einem speziellen Klebstoff (hier der kalthärtende Kleber KALLOPLAST) aufgeklebt.

Die Meßschaltung besteht aus vier Dehnungsmeßstreifen je Meßpunkt. Zur optimalen Anpassung an die Meßleitungen und zur Kompensation von Temperatureinflüssen und Unsymmetrien sind die Dehnungsmeßstreifen in Vollbrücke mit zwei aktiven Zweigen geschaltet. Dabei wird auf jede Seite der zu betrachtenden Leiterschiene ein aktiver und ein passiver Meßstreifen aufgeklebt. Die aktiven Meßstreifen werden in Richtung der Stromschienenlängsachse angebracht und durch die Beanspruchung der Leiterschiene verformt. Die passiven Meßstreifen werden quer zur Längsachse der Leiterschiene angebracht. Da die aktiven Dehnungsmeßstreifen auf unterschiedlichen Seiten der Leiterschiene angebracht sind, wird bei Dehnung des einen Meßstreifens der zweite Meßstreifen um den gleichen Betrag gestaucht. Dadurch erhöht sich die Empfindlichkeit der Meßanordnung um den Faktor 2.



passive Dehnungsmeßstreifen

Bild 6: Prinzipmeßschaltung und Anordnung der Dehnungsmeßstreifen

Zur punktuellen Erfassung der Meßgrößen ist es notwendig, eine möglichst kleine Bauform der Dehnungsmeßstreifen zu wählen.

Über Meßleitungen und einen Meßstellenumschalter sind die Dehnungsmeßstreifen mit einem schnellen Meßverstärker verbunden, der die geringen relativen Widerstandsänderungen auswertet und als Spannungsänderung im Meßzweig der Vollbrücke anzeigt. Zur Aufzeichnung und Auswertung der Meßsignale wird ein Transientenrecorder verwendet.

Mit dem *Hooke*schen Gesetz und den Spannungs-Dehnungs-Kennlinien (Bilder 9, 10) kann aus den Meßwerten für die Leiterschiene und für den Stützer eine punktuelle Spannungs- und Momentenverteilung ermittelt werden. Die Widerstandsmomente W für gebräuchliche Leiterquerschnitte sind in den Tabellen 9-11 zusammengestellt. Bei der Berechnung des Widerstandsmomentes ist die Wirkungsrichtung der Belastung zu beachten.

4.2.2 Messung des Kurzschlußstromes

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse ist es notwendig, den Verlauf des Kurzschlußstromes zu kennen. Da sich aus dem Kurzschlußstrom der Verlauf der Streckenlast ergibt, müssen:

- der Stoßkurzschlußstrom I_S
- der Dauerkurzschlußstrom I_K und
- die Zeitkonstante des Gleichgliedes

gemessen werden.

Die Messung des Kurzschlußstromes erfolgt über einen induktivitätsarmen Hochstromshunt. Der dem Strom proportionale Spannungsabfall wird mit einem Transientenrecorder aufgezeichnet.

4.2.3 Abmessungen der Modelle



Bild 7: Abmessungen der Modellanordnung (Leiterschleife)





5 Literatur

- [1] DIN VDE 0103 Berechnung der Wirkung von Kurzschlußströmen Entwurf, Juni 1992
- Bronstein, I. N.; Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik
 25. Auflage, 1991
 B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart – Leipzig, Verlag Nauka Moskau
- [3] Duschek, A.:
 Stromkräfte zwischen parallelen Leitern von rechteckigem Querschnitt Archiv Elektrotechnik, 37 (1943) 6, Seite 293 – 301
- [4] Pundt, H.:
 Elektroenergiesysteme
 Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium 6. Lehrbrief
 4. Ausgabe, 2. Auflage, 1982
- [5] Pundt, H.: Elektroenergiesysteme Wissensspeicherheft korrigierte Auflage, 1992
- [6] Fronius, S.; Holzweißig, F.: Taschenbuch Maschinenbau
 Band 2 – Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Mechanik und Festigkeitslehre, Strömungstechnik, Technische Thermodynamik
 Auflage, 1985, Verlag Technik, Berlin
- [7] Böhme, H.: Beanspruchung elektrotechnischer Betriebsmittel in Elektroenergieanlagen
 2. Lehrbrief Mechanische Beanspruchung und Festigkeit von Stromleiteranordnungen Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium
 2. Ausgabe, 1982
- [8] Böhme, H.: Mittelspannungstechnik
 1. Auflage, 1992, Verlag Technik, Berlin München

weiterführende Literatur:

 [9] Göldner, H.; Pfefferkorn, W.: Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Dynamik
 2., verb. Auflage, 1990, Fachbuchverlag Leipzig

- [10] DIN 40 500 Kupfer für die Elektrotechnik
 Teil 2 Rohre aus Kupfer und silberlegiertem Kupfer
 Technische Lieferbedingungen, April 1980
- [11] DIN 40 500 Kupfer für die Elektrotechnik
 Teil 3 Stangen, Profile aus Kupfer und silberlegiertem Kupfer
 Technische Lieferbedingungen, April 1980
- [12] DIN 40 501 Aluminium für die Elektrotechnik Teil 2 – Rohre aus E-Al und E-AlMgSi0,5 Technische Lieferbedingungen, Juni 1985
- [13] DIN 40 501 Aluminium für die Elektrotechnik
 Teil 3 Stangen und Profile aus E-Al und E-AlMgSi0,5
 Technische Lieferbedingungen, Juni 1985
- [14] DIN 43 670 Stromschienen aus Aluminium; Bemessung für Dauerbetrieb Dezember 1975
- [15] DIN 43 671 Stromschienen aus Kupfer; Bemessung f
 ür Dauerbetrieb Dezember 1975
- [16] Weigand, A.:
 Einführung in die Berechnung mechanischer Schwingungen Band III – Schwingungen fester Kontinua (Stäbe und Platten) 1962, Fachbuchverlag Leipzig
- [17] Göldner, H.; Holzweißig, F.:
 Leitfaden der Technischen Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik, Dynamik
 9. Auflage, 1986, Fachbuchverlag Leipzig
- [18] Warttmann, B.: Beitrag zum dynamischen Verhalten von Stützern in Schaltanlagen bis 36 kV bei Kurzschlußbelastung Dissertation, 1981, TU Dresden
- [19] Stauch, G.:
 Zur mechanisch dynamischen Beanspruchung kompakter Schaltanlagen bei Kurzschlußbelastung Dissertation, 1985, TU Dresden
- [20] Keller, W.; Schumann, P.: Die Ermittlung der mechanischen Kurzschlußbeanspruchungen von Leiterschienenanordnungen in Schaltanlagen Dissertation, 1974, TU Dresden

6 Versuchsaufgaben

- 1.1 Berechnen Sie die Randdehnung einer Leiterschiene aus Aluminium (E-Al F10; 40 x 5 mm²; flach verlegt) an den Stellen z₁ = 0; z₂ = 0,25 l; z₃ = ¹/₂, wenn bei ¹/₂ eine punktförmige Kraft von 9,81 N angreift (Bild 8). Der Abstand der Auflagerpunkte beträgt l = 1 m. Die Leiterschiene kann in den Auflagerpunkten lose gelagert bzw. fest eingespannt werden.
- 1.2 Entwickeln Sie ein Kriterium, wie mit Hilfe der Randdehnung an den Stellen z_1 , z_2 und z_3 die Einspannungsart beurteilt werden kann!
- 1.3 Bestimmen Sie mit den Ergebnissen aus Aufgabe 1.1 die Kalibrierkonstante für die Dehnungsmessung!
- 1.4 Bestimmen Sie an der Kalibriereinrichtung die maßgebliche Kennfrequenz f_C bei loser Auflagerung bzw. fester Einspannung der Leiterschiene!
- 1.5 Bestimmen Sie die Kalibrierkonstante für die Strommessung!
- 2 Führen Sie den Kurzschlußversuch durch!
- 3.1 Bestimmen Sie die Momentenverteilung längs der Leiterschiene und des Stützers aus den gemessenen Dehnungen (ε_m und ε_{sta}) unter Verwendung der Spannungs-Dehnungs-Kennlnien (Bild 10, Bild 11). Der Stützer besteht aus Hartpapier und kann als Hohlzylinder betrachtet werden. Stellen Sie M(z) und $\varepsilon(z)$ jeweils für den Scheitelwert der Dehnung ε_m und für den stationären Mittelwert der Dehnung ε_{sta} dar.
- 3.2 Berechnen Sie die Belastungsgrößen q_m und F_d und ermitteln Sie daraus die entsprechenden Beanspruchungen ε_m . Vergleichen Sie mit den Meßwerten. Worauf sind mögliche Abweichungen zurückzuführen?
- 3.3 Berechnen Sie die maximale Materialspannung σ_m für den Leiterwerkstoff in der Modellanordnung. Ist die betrachtete Leiterschiene kurzschlußfest?
- 3.4 Berechnen Sie die maßgebliche Kennfrequenz f_C der Leiterschiene. Ermitteln Sie diese auch experimentell aus dem Ausschwingverhalten nach dem Kurzschluß an der Versuchsanordnung. Vergleichen Sie die Werte miteinander und mit den Ergebnissen aus 1.4. Wie sind die Unterschiede zu interpretieren?
- 3.5. Ermitteln Sie aus den vorliegenden Meßwerten sowie aus den berechneten Werten die Biegelinien v(z) für die statische und die dynamische Belastung der Leiterschiene und des Stützers und stellen Sie diese graphisch dar. Vergleichen Sie die Ergebnisse!

Hinweis:	$\mu_0 = 4 \pi \ 10^{-7} \ \mathrm{Vs(Am)}^{-1}$	$\rho_{\rm Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$	$E_{Stützer} = 5000 \text{ N/mm}^2$
----------	--	--	-------------------------------------

7 Kontrollfragen

- 1 Welchen Belastungen ist ein Hochspannungsgerät in einer Schaltanlage ausgesetzt?
- 2 Wodurch entsteht eine mechanische Beanspruchung?
- 3 Erläutern Sie die Begriffe Belastung, Beanspruchung und Festigkeit.
- 4 Welche Stromschienenanordnungen kennen Sie?
- 5 Bestimmen Sie Betrag und Richtung der Kräfte bei einem zweipoligen Kurzschluß auf unendlich lange, parallele Leiter!
- 6 Wie unterscheidet sich der Verlauf der Streckenlast bei rein sinusförmigem Kurzschlußstrom ($\kappa = 1$) von dem bei verlagertem Kurzschlußstrom ($\kappa > 1$)?
- 7 Unter welchen Bedingungen können Sie die mechanische Beanspruchung mit der elastostatischen Methode ermitteln? Woraus leitet sich die entsprechende Beziehung ab?
- 8 Skizzieren Sie Auslenkung und Biegewinkel eines mit einer konstanten Streckenlast belasteten Balkens mit vier Auflagerpunkten (Loslager)!
- 9 Skizzieren Sie Auslenkung und Biegewinkel eines beidseitig fest eingespannten, mit einer konstanten Streckenlast belasteten Balkens. Vergleichen Sie mit der Darstellung nach Aufgabe 8!
- 10 Berechnen Sie den Momentenverlauf M(x) und die Gleichung der Biegelinie v(x) eines mit konstanter Streckenlast belasteten, beidseitig fest eingespannten Balkens. Skizzieren Sie die Querkraft- und Momentenverteilung. Berechnen Sie den Ort der maximalen Durchbiegung. Wie groß ist diese?
- 11 Welches Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung und der Dehnung? Erläutern Sie dieses Gesetz!
- 12 Leiten Sie den in Gleichung (20) aufgestellten Zusammenhang her!

8 Anhang

Tabelle 2	Flächenträgheits- und Widerstandsmomente ausgewählter Querschnitte
Tabelle 3	Randbedingungen verschiedener Auflager
Tabelle 4	Eigenwerte dünner prismatischer Stäbe bei Biegeschwingungen, Randbedingungen, Faktoren α und β
Tabelle 5	Auflagerkräfte, Biegemomente und Verformungen an ausgewählten geraden Trägern konstanter Biegesteifigkeit EI
Tabelle 6	Faktor q
Tabelle 7	Ausgewählte mechanische und elektrische Eigenschaften von Aluminium- werkstoffen in der Elektrotechnik (nach DIN 40 501 Teil 2 und 3)
Tabelle 8	Ausgewählte mechanische und elektrische Eigenschaften von Kupferwerk- stoffen in der Elektrotechnik (nach DIN 40 500 Teil 2 und 3)
Tabelle 9	Statische Werte für Stromschienen aus E-Al oder E-Cu mit Rechteck- Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. 43 671)
Tabelle 10	Statische Werte für Stromschienen aus E-Al oder E-Cu mit Kreis- Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. 43 671)
Tabelle 11	Statische Werte für Stromschienen aus E-Al oder E-Cu mit Kreisring- Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. 43 671)
Tabelle 12	Statische Werte für Stromschienen aus E-Al mit U-Querschnitt (nach DIN 43 670)
Bild 9	Faktoren V _F , V _{σ} , V _r abhängig von der auf die Erregerfrequenz bezogenen maßgeblichen Kennfrequenz
Bild 10	Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinie für 12-kV-Stützer Typ GS 10/800 aus gemagertem Epoxidharz
Bild 11	Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinie für E-Al F10
Bild 12	Endliche-Stromdichte-Effekt – a _t /a abhängig von a/d
Bild 13	Feldverzerrungseffekt – a _t /a abhängig von a/d

Querschnitt	Flächenträgheitsmoment	Widerstandsmoment
Rechteck	$I_{xx} = \frac{b h^3}{12}$	$W_{xx} = \frac{b h^2}{6}$
	$I_{yy} = \frac{b^3 h}{12}$	$W_{yy} = \frac{b^2 h}{6}$
Kreis y	$I_{xx} = \frac{\pi}{64} D^4$ $I_{yy} = I_{xx}$	$W_{xx} = \frac{\pi}{32} D^3$ $W_{yy} = W_{xx}$
Kreisring	$I_{xx} = \frac{\pi}{64} \left(D^4 - d^4 \right)$ $I_{yy} = I_{xx}$	$W_{xx} = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$ $W_{yy} = W_{xx}$

Tabelle 2: Flächenträgheits- und Widerstandsmomente ausgewählter Querschnitte [6]

Auflager	Randbedingungen	Auflager	Randbedingungen
Einspannung	v = 0	Gelenk	
	<i>v</i> ′ = 0		$v_1 = v_2$
Festlager		stetiger Übergang	$v_1 = v_2$
	v = 0		$-v_1' = v_2'$
Loslager		Abwinklung	
	v = 0	bei nicht ineinander drehbaren Koordi- natensystemen	$-v_1'=v_2'$

Tabelle 3: Randbedingungen verschiedener Auflager

Auflegenerge	Eiger	iwerte	E-1-t or	Eslater 0
Aunagerung	n	λ_n	Factor α	Factor p
	1	4,730		
A B	2	7,853	A: 0,5	0.5
	3	10,996	B: 0,5	0,5
	4	14,137		
	1	π		
	2	2π	A: 0,5	1.0
	3	3π	B: 0,5	1,0
	4	4π		
	1	1,875		
	2	4,694		
V↓ I I I I I I I I I I I I I I I I I I I	3	7,855		
	4	10,996		
	1	3,926		
	2	7,069	A: 0,625	0.73
	3	10,210	B: 0,375	0,75
	4	13,351		
Eigenfrequenzen: $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ $\omega_n = \frac{\lambda_n^2}{l^2}$	$\sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$	$\begin{array}{rcl} A & - & Que \\ \rho & - & Ma \\ EI & - & Bie \\ n & - & Nue \\ \lambda_n & - & n-te \end{array}$	erschnittsflä terialdichte gesteifigkei mmer des Ei er Eigenwert	che t igenwertes

Tabelle 4: Eigenfrequenzen dünner prismatischer Stäbe bei Biegeschwingungen, Faktoren α und β [1] [6]

Auflagerung	Schnittgrößen	Gleichung der Biegelinie	Spezielle Verformungen
A A V X B	$F_A = F_B = \frac{ql}{2}$ $M_b = \frac{ql^2}{12} \left[1 - 6\frac{x}{l} + 6\left(\frac{x}{l}\right)^2 \right]$ $M_A = M_B = \frac{ql^2}{12}$ $M_{b \max} = \frac{ql^2}{12}$	$v = \frac{ql^4}{24 EI} \left[\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]$ $v' = \frac{ql^3}{12 EI} \left[\frac{x}{l} - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 \right]$	$v_{\rm max} = \frac{ql^4}{384 EI}$
	$F_{A} = F_{B} = \frac{ql}{2}$ $M_{b} = \frac{ql}{2} x \left[1 - \frac{x}{l} \right]$ $M_{b \max} = \frac{ql^{2}}{8}$	$v = \frac{ql^4}{24 EI} \left[\frac{x}{l} - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]$ $v' = \frac{ql^3}{24 EI} \left[1 - 6\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 4\left(\frac{x}{l}\right)^3 \right]$	$v_{\text{max}} = \frac{5 q l^4}{384 EI}$ $v'_A = -v'_B = \frac{q l^3}{24 EI}$
q I B V	$F_Q = qx \qquad F_B = ql$ $M_a = \frac{ql^2}{2} \qquad M_b = \frac{qx^2}{2}$ $M_{b \max} = \frac{ql^2}{2}$	$v = \frac{ql^4}{24 EI} \left[3 - 4\left(\frac{x}{l}\right) + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]$ $v' = \frac{ql^3}{6 EI} \left[\left(\frac{x}{l}\right)^3 - 1 \right]$	$v_0 = v_{\text{max}} = \frac{ql^4}{8EI}$ $\varphi_0 = v'_0 l = -\frac{ql^3}{6EI}$
	$F_{A} = \frac{3 q l}{8} \qquad F_{B} = \frac{5 q l}{8}$ $M_{b} = \frac{q l^{2}}{8} \left[3 \frac{x}{l} - 4 \left(\frac{x}{l} \right)^{2} \right]$ $M_{b \max} = \frac{q l^{2}}{8} = M_{B}$	$v = \frac{ql^4}{48 EI} \left[\frac{x}{l} - 3\left(\frac{x}{l}\right)^3 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]$ $v' = \frac{ql^3}{48 EI} \left[1 - 9\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 8\left(\frac{x}{l}\right)^3 \right]$	$v_{\text{max}} \approx \frac{ql^4}{184,6 EI}$ bei $x \approx 0,422 l$ $v\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{ql^4}{48 EI}$ $v'_A = \frac{ql^3}{48 EI}$
	Angriffspunkt der Kraft F bei $\frac{1}{2}$ $M_{b \max} = \frac{Fl}{4}$	$v_1 = \frac{Fl^3}{48 EI} \left[3\left(\frac{x_1}{l}\right) - 4\left(\frac{x_1}{l}\right)^3 \right]$ $0 \le x_1 \le \frac{1}{2}$	$v_{\text{max}} = v_F = \frac{Fl^3}{48 EI}$ $v'_A = \frac{Fl^2}{16 EI}$
	Angriffspunkt der Kraft F bei $\frac{1}{2}$ $F_A = F_B = \frac{F}{2}$ $M_A = \frac{Fl}{8}$ $M_F = \frac{Fl}{8}$	$v = \frac{F}{24 EI} \left[\frac{3x^2l}{2} - 2x^3 \right]$ $v' = \frac{F}{24 EI} \left[3xl - 6x^2 \right]$ $0 \le x \le \frac{1}{2}$	$v_F = \frac{Fl^3}{192 EI}$

 Tabelle 5: Auflagerkräfte, Biegemomente und Verformungen an ausgewählten geraden Trägern konstanter

 Biegesteifigkeit EI [6]



Tabelle 6: Faktor q [1]

Werkstoff-		ff-							Mechanische Eigenschaften				Elekt Eigens			
Kurzzei	ichen	Nummer	Rohre Rund, Rechteck Profile Vierkant, Sechskant		Rund, Rechteck Vierkant, Sechskant		Profile Zugfestig- keit grenze härte Elastizität modul		Elastizitäts- modul	Spezifi- scher Wi- derstand bei 20 °C	Leitfähig- keit bei 20 °C	Wärme- aus- dehnungs- Koeffizient				
									R _m	$\sigma_{0,2}$ $(\mathbf{R}_{ ho 0,2})$	HB	Е	ρ	к		
			Außen- durch- messer	Wanddicke	Durchmes- ser oder Schlüssel- weite	Dicke	Breite	Dicke					$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	$\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$		
									N 1/2	NI ((Richtwert)			1 2-1	
F 41			mm	mm	mm	mm	mm	mm	N/mm ⁻	N/mm ⁻		N/mm ⁻	max.	min.	K ·	
E-AI					max. 63	max. 50	max. 200	max. 15	min. 65	mind. 25 (bis 80)						
	F7	3.0257.08	bis 250	bis 12					(013 100)		20 bis 30		0,02825	35,4		
			018 230	über 12					min. 60	min. 20 (bis 80)	nin. 20 (bis 80)					
			über 250	über 4					(bis 100)	(013 00)						
	F8	3.0257.09				über 5 obere Grer	über 120 nzen nach Ve	über 5 reinbarung	min. 80	min. 50 (bis 100)	22 bis 32	$65 \cdot 10^3$	0,02841	35,2	24·10 ⁻⁶	
	F10	3.0257.26	bis 120	bis 6	max. 20	max. 10	max. 80		min. 100 (bis 140)	min. 70 (bis 120)	28 bis 38		0,02874	34,8		
	F13	3.0257.30			max. 10	max. 3	max. 12		min. 130	min. 110 (bis 160)	min. 32		0,02898	34,5		
E-AlMg Si0,5	F17	3.3207.79				max. 12	max. 180	max. 15	170 bis 220	min. 120 (bis 180)	45 bis 65		0,03125	32		
-)-			bia 250	bis 12								70.10^{3}			23·10 ⁻⁶	
	F22	3.3207.71	018 250	über 12		max. 12	max. 180	max. 12	min. 215 (bis 280)	min. 160 (bis 240)	65 bis 90		0,03333	30		
			über 250						(013 200)	(013 2+0)						

Tabelle 7: Ausgewählte mechanische und elektrische Eigenschaften von Aluminiumwerkstoffen in der Elektrotechnik (nach DIN 40 501 Teil 2 und 3) [12] [13]

		Festigkeitszustand ¹⁾		Abmessungen entsprechend den Maßnormen]	Festigkeitse	igenschafter	ı	Elektr. Eigenschaften			
	Werk- stoff- nummer			Rohre		Stangen			Profile	Zugfes- tigkeit	Streck- grenze	Brinell- härte	Elastizi- tätsmodul	Spezif. Wider- stand bei 20 °C	Leit- fähigkeit bei 20 °C		
Kurz- zeichen		Kurz- zeichen	z- Anhänge- zahl zur Werk- stoff- nummer	Außen-	Wand-	Rund, Rech Vierkant, Sechskant Durch- Dicke		teck Breite Stegdicke		R _m	$\sigma_{0,2} \\ (R_{\rho 0,2})$	HB	Е	ρ $\underline{\Omega \cdot mm^2}$	$\frac{\kappa}{m}$		
				durch- messer	dicke	messer oder Schlüssel- weite				2	2		(Richt- wert)	m	Ω·mm²		
				mm	mm	mm	mm	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	max.	mın.		
E-Cu 57	2.0060	р	.08			alle				ohne vorgeschriebene Festigkeitswerte (Vormaterial für Gesenkschmiedestücke)			0,01818	55			
E-Cu 57 SE-Cu	2.0060 2.0070	F20	.10	jeder	jede	10 bis 100	2 bis 40	10 bis 100	2 bis 20 20	2001							
							4 bis 30	über 100 bis 200		200 bis 250	max. 120	45 bis 70	110·10 ³	0,01754	57		
CuAg 0,1 CuAg 0,1 P	2.1203 2.1191	w	.19			alle				ohne vorgeschriebene Festigkeitswerte (Vormaterial für Ziehereien)				0,01754	57		
E-Cu 57 SE-Cu	2.0060 2.0070	zh	.20				alle			ohne vorgeschriebene Festigkeitswerte				0,01818	55		
				jeder	bis 10					95 01 ·	min. 190 (bis 290)						
		F25	.26				2 bis 30	10 bis 100		250 bis		70 bis 95		0,01786	56		
E-Cu 57 SE-Cu	2.0060 2.0070					6 bis 70	5 bis 20	über 100 bis 200	2 bis 14	500	(bis 280)						
CuAg 0,1	2.1203		F30 .30				2 bis 12	10 bis 100		2001		001	110.10				
CuAg 0,1 P	2.1191	F30		bis 160	bis 5	4 bis 40	5 bis 10	über 100 bis 200	2 bis 8	300 bis 360	min. 250 (bis 350)	80 bis 105		0,01786	56		
			.32	bis 50	bis 3	2 bis 10	2 bis 3	10 bis 100		min. 360	min. 320	95 bis			55		
		F37					über 3 bis 6	10 bis 50			(bis 390)	115		0,01818	55		
¹ Diese Kurzzeichen oder Anhängezahlen können dem Kurzzeichen oder der Werkstoffnummer jeder angegebenen Kupferlegierung zugeordnet werden, z. B.: E-Cu 57 F37 oder 2.0060.32																	

¹⁾ Diese Kurzzeichen oder Anhängezahlen können dem Kurzzeichen oder der Werkstoffnummer jeder angegebenen Kupferlegierung zugeordnet werden, z. B.: E-Cu 57 F37 oder 2.0060.32 Tabelle 8: Ausgewählte mechanische und elektrische Eigenschaften von Kupferwerkstoffen in der Elektrotechnik (nach DIN 40 500 Teil 2 und 3) [10] [11]

Breite	Quer-	Werl	kstoff	Statische Werte für eine Schiene								
x Dicke mm	schnitt mm ²				y ↓ ↓ ↓ ↓ ↓							
				I_{xx} cm ⁴	W _{xx} cm ³	i _x cm	$I_{yy} cm^4$	W _{yy} cm ³	i _y cm			
12 x 2	23,5	E-Al F13		0,0288	0,048	0,346	0,0008	0,008	0,0577			
15 x 2 15 x 3	29,5 44,5			0,0563 0,0844	0,0750 0,113	0,433	0,00100 0,00338	0,0100 0,0225	0,0577 0,0866			
20 x 2 20 x 3 20 x 5 20 x 10	39,5 59,5 99,1 199,0			0,133 0,200 0,333 0,667	0,133 0,200 0,333 0,667	0,577	0,00133 0,00450 0,02080 0,16700	0,0133 0,0300 0,0833 0,333	0,0577 0,0866 0,144 0,289			
25 x 3 25 x 5	74,5 124,0			0,391 0,651	0,313 0,521	0,722	0,00563 0,02600	0,0375 0,104	0,0866 0,144			
30 x 3 30 x 5 30 x 10	89,5 149,0 299,0	E-Al F10		0,675 1,13 2,25	0,450 0,750 1,500	0,866	0,00675 0,03130 0,25000	0,045 0,125 0,500	0,0866 0,144 0,289			
40 x 3 40 x 5 40 x 10	119,0 199,0 399,0			1,60 2,67 5,33	0,800 1,33 2,67	1,15	0,0090 0,0417 0,3330	0,0600 0,167 0,667	0,0866 0,144 0,289			
50 x 5 50 x 10	249,0 499,0]	E-Cu F30	5,21 10,40	2,08 4,17	1,44	0,0521 0,4170	0,208 0,833	0,144 0,289			
60 x 5 60 x 10	299,0 599,0			9,00 18,00	3,00 6,00	1,73	0,0625 0,5000	0,250 1,00	0,144 0,289			
80 x 5 80 x 10	399,0 799,0			21,30 42,70	5,33 10,70	2,31	0,0833 0,6670	0,333 1,33	0,144 0,289			
100 x 5 100 x 10 100 x 15	499,0 999,0 1500,0			41,70 83,30 125,00	8,33 16,70 25,00	2,89	0,104 0,833 1,81	0,417 1,67 3,75	0,144 0,289 0,433			
120 x 10 120 x 15	1200,0 1800,0	E-Al F6,5		144,00 216,00	24,00 36,00	3,46	1,00 3,38	2,00 4,50	0,289 0,433			
160 x 10 160 x 15	1600,0 2400,0			341,00 512,00	42,70 64,00	4,62	1,33 4,50	2,67 6,00	0,289 0,433			
200 x 10 200 x 15	2000,0 3000,0			667,00 1000,00	66,70 100,00	5,77	1,67 5,63	3,33 7,50	0,289 0,433			

Tabelle 9: Statische Werte für Stromschienen aus E-Al oder E-Cu mit Rechteck-Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. DIN 43 671) [14] [15]

Durch- messer	Quer- schnitt	Werkstoff		Statische Werte einer Schiene				
mm	mm ²			I cm ⁴	W cm ³	i cm		
5	19,6			0,00306	0,0123	0,125		
8	50,3	E-Al F11	E-Cu F37	0,0201	0,0503	0,200		
10	78,5			0,0491	0,0982	0,250		
16	201			0,322	0,402	0,400		
20	314	E-AI F9	E C E20	0,785	0,785	0,500		
32	804	E A1 E6 5	E-Cu F30	5,15	3,22	0,800		
50	1960	E-AI F0,3		30,7	12,3	1,25		

Tabelle 10: Statische Werte für Strom-

schienen aus E-Al oder E-Cu mit Kreis-Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. DIN 43 671) [14] [15]

Außen-	Wanddicke	Querschnitt	Wer	kstoff	Statisc	he Werte einer S	Schiene
durchmesser					Ŧ		
mm	mm	mm ²			1 cm ⁴	cm ³	1 cm
	2	112			0.464	0.464	0.640
	2 3	115		E-Cu F37	0,404	0,404	0,040
20	3 4	201			0,597	0,597	0,010
20	5	236		E-Cu F30	0,004	0,004	0,505
Außen- durchmesser mm 20 32 40 50 63 63 80 100 120 160 200 250	6	264		E-Cu F25	0,765	0,765	0,539
	2	188		E Cu E27	2,13	1,33	1,06
	3	273		E-CuF5/	2,90	1,82	1,03
32	4	352		E Cu E30	3,52	2,20	1,00
	5	424		E-Curso	4,00	2,50	0,97
	6	490	E-Al F10	E-Cu F25	4,36	2,73	0,94
	2	239		E-Cu F37	4,32	2,16	1,35
	3	349			6,01	3,00	1,31
40	4	452		E-Cu F30	7,42	3,71	1,28
	5	550			8,59	4,30	1,25
	6	641	-	E-Cu F25	9,55	/,/8	1,22
	3	443		E-Cu F37	12,3	4,91	1,67
	4	578		E-Cu F30	15,4	6,16	1,63
50	5	707			18,1	7,25	1,60
	6	829			20,4	8,18	1,57
63	8	1060	E-Al F7	E-Cu F25	24,1	9,65	1,51
	10	1200			20,7	10,70	1,40
63	3	565		E C. E20	25,5	8,10	2,12
	4	741	E-A1 F10	E-Cu F30	32,4	10,3	2,09
	5	911			38,6	12,3	2,06
	0	1070	E 41 E7	E-Cu F25	44,1	14,0	2,03
	8	1380	E-ALF/		55,4	10,9	1,97
	3	726	E-Al F10	E-Cu F30	53,9	13,5	2,72
	4	955			69,1	17,3	2,69
80	5	1180			83,2	20,8	2,66
	0	1400		E-Cu F25	90,1	24,0	2,02
	0	2200	E-Al F7		119	29,7	2,50
	2	014			100	21.5	2,50
	3	914		E-Cu F30	108	21,5	3,43
100	4	1210	E-A1 F10		159	27,8	5,40 2,26
100	5	1490			109	30,3	3,30
	8	2310	E A1 E7	E-Cu F25	246	49.3	3,26
	4	1460	E-AIT/		246	40.0	3,20
	+ 5	1810	F-A1 F10	E-Cu F30	243	40,9	4,10
120	6	2150	Limito		350	58 3	4,07
120	8	2820		E-Cu E25	444	73.9	3.97
	10	3460	E-Al F7	E Cui 20	527	87,8	3,91
	4	1960		D G D	597	74.6	5.52
	5	2440	E-A1 F10	E-Cu F30	732	91.5	5,48
160	6	2900			862	108	5,45
	8	3820	E 41 E	1	1110	138	5,38
	10	4710	E-AIF/		1330	166	5,32
	5	3060	E A1 E10	E-Cu F25	1460	146	6,90
	6	3660	E-ALFIU		1720	172	6,86
200	8	4830			2230	223	6,79
	10	5970	E-Al F7		2700	270	6,73
	12	7090		E-Cu F20	3140	314	6,66
	5	3850	F-41 F10		2890	231	8,66
	6	4600	E-ALL110	F_C11 F25	3420	274	8,63
250	8	6080		E-Cu 125	4460	357	8,56
	10	7540	E-Al F7		5440	435	8,49
	12	8970		E-Cu F20	6370	510	8,43

Tabelle 11: Statische Werte für Stromschienen aus E-Al oder E-Cu mit Kreisring-Querschnitt (nach DIN 43 670 bzw. DIN 43 671) [14] [15]

	Ma	ıße		Quers	schnitt	Werkstoff	Statische Werte für eine Schiene						
h	b	S	d	Ε	[]			y↑ ↓↓↓ F↑					
							I_x	W _x	i _x	e	I_y	W_y	i _y
mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²		cm^4	cm ³	cm	mm	cm^4	cm ³	cm
60	30	4	25	448	896	E-Al F6,5	23,5	7,83	2,29	8,96	3,71	1,76	0,91
80	37,5	6	25	858	1720		77,5	19,4	3,01	11,3	10,7	4,08	1,12
100	37,5	8	25	1270	2540		167	33,4	3,62	11,0	14,3	5,38	1,06
120	45	10	30	1900	3800		356	59,3	4,34	13,3	30,5	9,63	1,27
140	52,5	11	35	2450	4900	E-Al F8	632	90,3	5,09	15,3	54,2	14,5	1,49
160	60	12	40	3070	6140		1040	130	5,82	17,3	89,2	20,9	1,71
180	67,5	13	45	3760	7520		1620	180	6,56	19,2	139	28,8	1,92
200	75	14	50	4510	9020		2410	241	7,31	21,2	207	38,4	2,14

Tabelle 12: Statische Werte für Stromschienen aus E-Al mit U-Querschnitt (nach DIN 43 670) [15]





Bild 9: Faktoren V_F , V_σ , V_r abhängig von der auf die Erregerfrequenz bezogene maßgebliche Kennfrequenz [1] [19]



Bild 11: Zugspannungs-Dehnungs-Kennlinie für E-Al F10



Bild 12: Endliche Stromdichte-Effekt – a_t/a abhängig von a/d



Bild 13: Feldverzerrungseffekt – a_t/a abhängig von a/d