

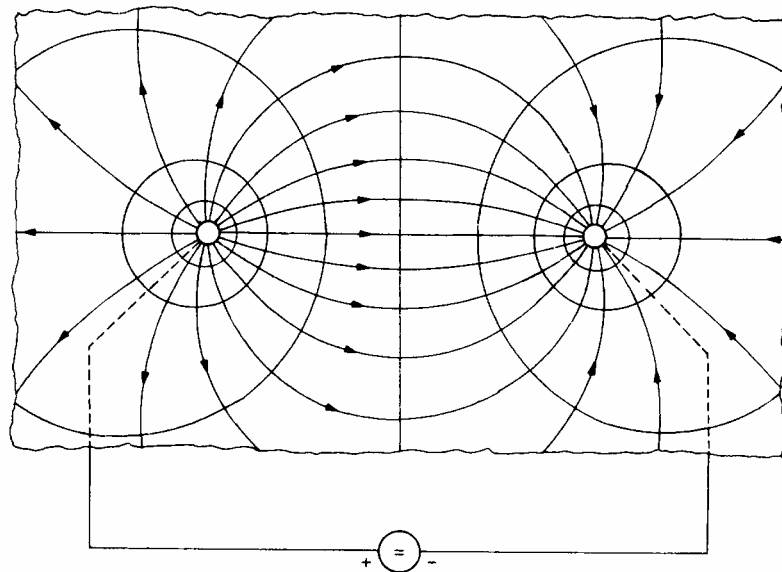
Elektrotechnik Grundlagen

Ergänzungs - Kapitel 5

Elektrisches Strömungsfeld

Inhaltsverzeichnis

5	Das elektrische Strömungsfeld.....	4
5.1	Feldgrößen im Strömungsfeld	4
5.2	Leistung im Strömungsfeld	5
5.3	Erde und Erdung	6
	5.3.1.... Staberder (Tiefenerder).....	6
	5.3.2.... Oberflächenerder	7
	5.3.3.... Fundamenterder (Ringerder, Halbkugelerder).....	8
	5.3.4.... Erdung im Feld.....	8
5.4	Übungen und Lösungen	9
	5.4.1.... Übungen.....	9
	5.4.2.... Lösungen	10



Literaturverzeichnis und Software

- L 5-1 Feynman Richard P., Leighton Robert B., Sands Matthew, The Feynman Lectures on Physics, mainly electromagnetism and matter, Addison-Wesley Publishing Company, Reading (Massachusetts), Palo Alto, London.
- L 5-2 Frohne Heinrich, Löcherer Karl-Heinz und Müller Hans, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag B.G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1996, ISBN 3-519-46400-4.
- L 5-3 Gren Joachim und Krause Joachim, Metzler Physik, Verlag Schroedel, Hannover, 1998, ISBN 3-507-10700-7.
- L 5-4 Hagmann Gert, Grundlagen der Elektrotechnik, AULA Verlag Wiesbaden, Auflage 3, ISBN 3-89104-506-9.
- L 5-5 Lüscher Edgar, Experimentalphysik II, Hochschultaschenbücher BI 115/115a, Bibliographisches Institut, Mannheim.
- L 5-6 MATHCAD[®] 2000. Mathematiksoftware, die sich für numerische Rechnungen und Laborauswertungen eignet.
- L 5-7 Meinke H., Gundlach Friedrich Wilhelm, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Studienausgabe in 3 Bänden, Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York, 1986, 4. Auflage, ISBN 3-540-15394-2.
- L 5-8 Schilt Heinz, Elektrizitätslehre, Birkhäuser Verlag, Basel, 1959.
- L 5-9 Tabellenbuch Informations- und Telekommunikationstechnik, Verlag Dr. Max Gehlen, Bad Homburg vor der Höhe, 1998, ISBN 3-441-92102-x.

Figurenverzeichnis

Fig. 5-1	Strömungsfeld in Metallplatte. (Aus [L 5-4])	4
Fig. 5-2	Infinitesimales Volumenelement im Strömungsfeld.....	4
Fig. 5-3	Blitzschutz.....	6
Fig. 5-4	Staberder	7
Fig. 5-5	Oberflächenerder	7
Fig. 5-6	Fundamenterder	8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1	Spezifischer Erdwiderstand	6
Tabelle 5-2	Erden im Vergleich	8

5 Das elektrische Strömungsfeld

5.1 Feldgrößen im Strömungsfeld

Das Strömungsfeld ist eine Beschreibung der Ladungsbewegung in elektrischen Leitern. Gegeben sei eine Metallplatte, die in zwei Punkten mit einer Ladungsquelle verbunden ist:

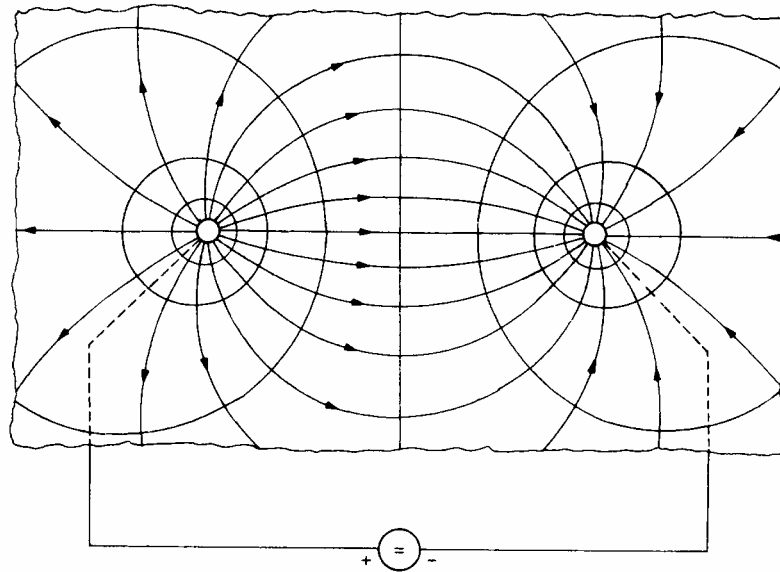


Fig. 5-1 Strömungsfeld in Metallplatte. (Aus [L 5-4])

Die Feldlinien von + zu – sind Strömungslinien. Punkte mit gleichbleibendem Potential zu + oder – bilden Äquipotenziallinien. Die Äquipotenziallinien verlaufen normal zu den Strömungslinien.

Für die weitere Betrachtung wird dem Strömungsfeld ein infinitesimal kleines Volumenelement entnommen.

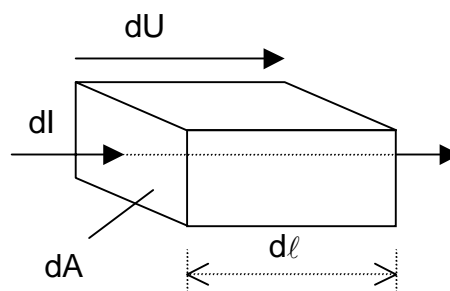


Fig. 5-2 Infinitesimales Volumenelement im Strömungsfeld

Nach dem Gesetz von OHM besteht am Volumenelement die Beziehung $dU = R \cdot dl$. R ist der Widerstand mit $R = \rho \cdot \frac{dl}{dA}$.

Weiter gilt im elektrostatischen Feld $dU = E \cdot dl$.

Mit der Stromdichte J wird $dl = J \cdot dA$.

Zusammengeführt ergibt sich

$$dU = E \cdot d\ell = R \cdot dI = \frac{\rho \cdot d\ell}{dA} \cdot J \cdot dA$$

$$E = \rho \cdot J \quad (5-1)$$

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J}$$

Damit ist das OHM' sche Gesetz des Strömungsfeldes gefunden.

Es gilt

$$U_{1,2} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \quad (5-2)$$

auch im Strömungsfeld und zudem ist

$$I = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (5-3)$$

5.2 Leistung im Strömungsfeld

Im Volumenelement nach Fig. 5-2 mit $dV = dA \cdot d\ell$ beträgt die Leistung $dP = dU \cdot dI$. Diese Leistung wird im leitenden Material in Wärme umgesetzt.

Damit wird

$$\frac{dP}{dV} = \frac{dU \cdot dI}{dA \cdot d\ell} = \frac{E \cdot d\ell \cdot J \cdot dA}{dA \cdot d\ell} = E \cdot J \quad (5-4)$$

$$\frac{dP}{dV} = \vec{E} \cdot \vec{J}$$

Die pro Volumenelement umgesetzte Leistung ist gleich dem Produkt aus elektrischer Feldstärke und Stromdichte.

Für einen leitenden Körper wird

$$P = \iiint_V E \cdot J \cdot dV \quad (5-5)$$

$$P = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} \cdot dV$$

5.3 Erde und Erdung

Der Begriff Erde erscheint in den drei Formen Betriebserde, Schutzerde und Blitzerde.

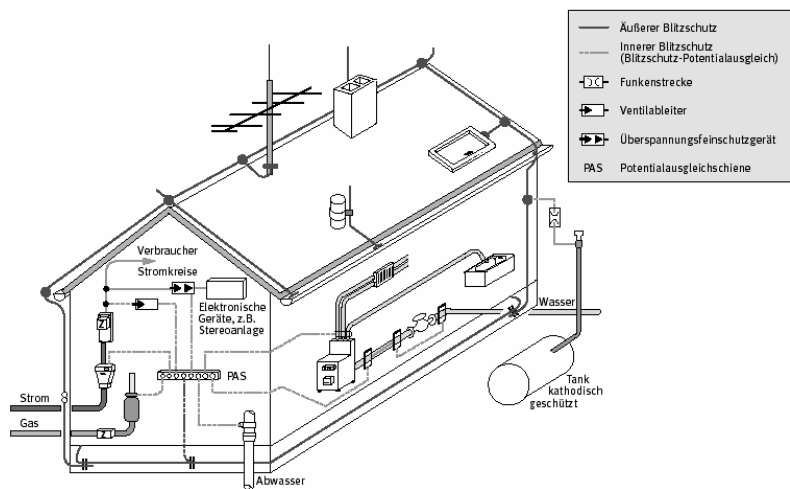


Fig. 5-3 Blitzschutz

- Die **Betriebserde** dient dem Betrieb. Beispiele sind: Neutralleiter (N, Nullleiter), Signal Ground (RS 232 Pin 5/9 bzw. 7/25) und so weiter.
- Die **Schutzerde** dient dem Schutz der Benutzer. Beispiele sind Schutzerde (PE, protection earth) am Gerätegehäuse, Abschirmungen (Shield, RS 232 Pin 1/25) und so weiter.
- Die **Blitzerde** soll bei Blitzschlag Verletzungen an Menschen vollständig und Beschädigungen an Geräten möglichst ganz vermeiden.

Die drei unterschiedlichen Erdsysteme dürfen nicht an beliebigen Stellen verbunden werden. Der Ort einer allfälligen **Zusammenführung** ist die **Potentialausgleichschiene PAS**.

Für die Erdung werden Staberder, Oberflächenerder oder Fundamenterder eingesetzt.

Massgebend für den Erdwiderstand R_E ist der spezifische Erdwiderstand ρ_E :

Art des Erdreichs	Moorboden, Sumpf, Humus in feuchter Lage	Lehm, Ton, Ackerboden	Sand, Kies, feucht bis trocken	Steiniger Boden, Gebirge
spezifischer Erdwiderstand ρ_E in Ωm .	30 5 .. 40	100 20 .. 200	700 200 .. 2'500	2000 500 .. 3'000

Tabelle 5-1 Spezifischer Erdwiderstand

5.3.1 Staberder (Tiefenerder)

Staberder werden als Stäbe in den Boden geschlagen. Je nach Mitteleinsatz werden bis 10 m Tiefe erreicht (Tiefenerder). Für den Erdwiderstand gilt

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{L}{r}\right) \quad \text{worin } L = \text{Erderlänge in m und } r = \text{Radius des Stabes in m.}$$

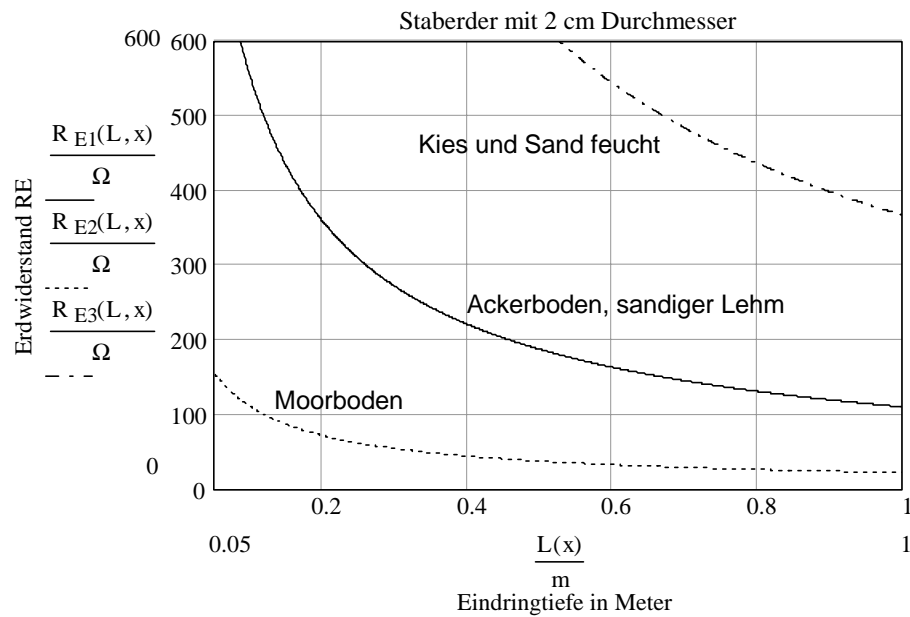


Fig. 5-4 Staberder

5.3.2 Oberflächenerder

Oberflächenerder werden als Draht (\varnothing 6 bis 10 mm) oder Band (ca. 4x25 mm) wenig unter der Erde (bis 1 m tief) längs ausgelegt und eingegraben. Wasserleitungen können als Oberflächenerder dienen. Für den Erdwiderstand gilt

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{L}{r}\right) \quad \text{warin } L = \text{Erderlänge in m und } r = \text{Radius des Stabes in m}$$

oder $0,25 \cdot$ Bandbreite für Bandverlegung.

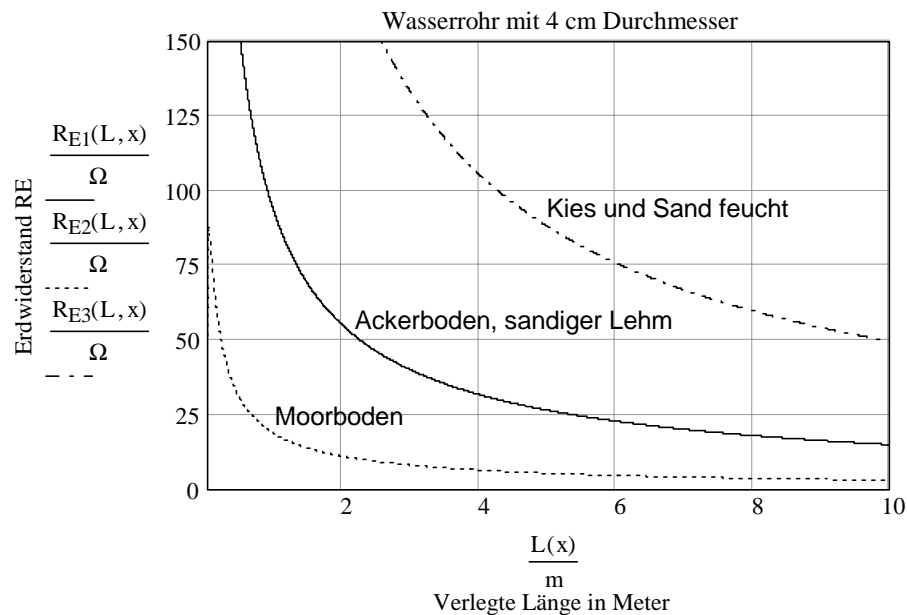


Fig. 5-5 Oberflächenerder

5.3.3 Fundamenterder (Ringerder, Halbkugelerder)

Bei Neubauten werden Bänderder als „Ringleitung“ in das Fundament eingelegt. **Fundamenterder** bieten bei geringem Erdwiderstand einen optimalen Schutz. Für den Erdwiderstand gilt

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi \cdot D} \quad \text{worin } D = \text{Durchmesser oder „Kantenlänge“ des Quadrats.}$$

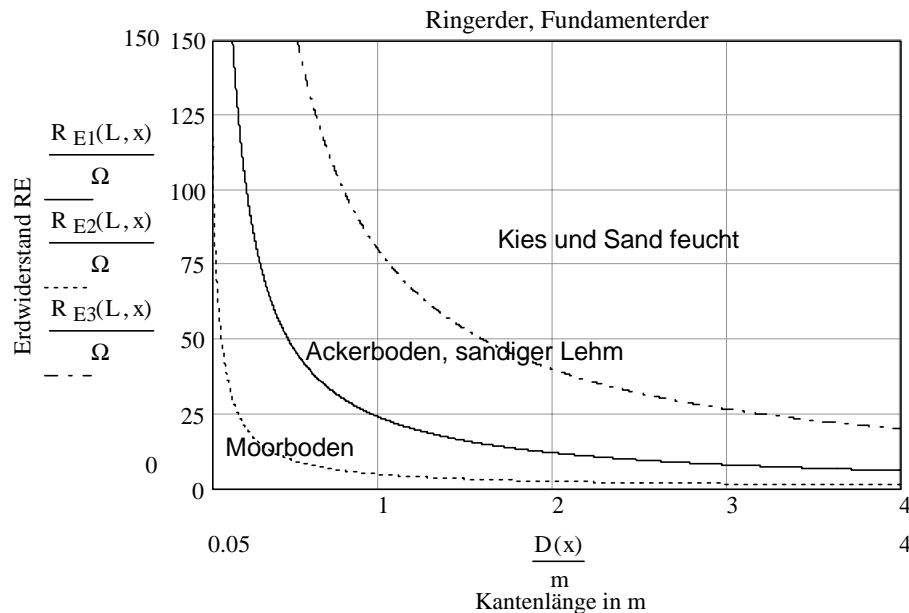


Fig. 5-6 Fundamenterder

5.3.4 Erdung im Feld

Wenn eine Erdung als Blitzerde dienen soll, muss der Erdwiderstand R_E unter 25Ω bis 30Ω liegen. Aus diesem Grund kann ein kurzer Staberder (3 - Kant, 30-50 cm lang) mit R_E einige hundert Ohm nicht als Blitzerde angesehen werden.

- Trotzdem soll der kurze Staberder eingesetzt werden, solange keine bessere Möglichkeit zur Verfügung steht (zu Beginn einer Mission). Trotz zu hohem Erdwiderstand werden Teile schädlicher Ströme abgeleitet. Dagegen können kurze Staberder nicht als HF-Erde (Hochfrequenzerde) dienen.
- In vielen Fällen rasch auffindbar ist ein guter Oberflächenerder, nämlich eine metallische Wasserleitung. Geeignet sind intakte Wasserverteilnetze und genügend lange Reststücke (in Erdbebengebieten). Ab einer Erdrohrschele wird ein Draht mit möglichst grossem Querschnitt (über 20 mm^2) zur PAS geführt.

	Betriebserde	Schutzerde	Blitzerde
Staberder kurz (unter 1m)		(X)	
Staberder lang (über 4 m)	X	X	X
Oberflächenerder kurz (unter 2 m)		(X)	
Oberflächenerder lang (über 6 m)	X	X	XX
Fundamenterder	XX	XX	XXX

Tabelle 5-2 Erden im Vergleich

Falls eine gute Blitzschutzanlage bereits besteht, kann an der PAS geerdet werden (und nie am Blitzableiter). Erdungen aller Art gelten nie als HF-Erde.

5.4 Übungen und Lösungen

5.4.1 Übungen

12. STROMDICHTE

An einem stromführenden Kupferdraht wird zwischen zwei $\ell = 5$ m auseinanderliegenden Punkten die Spannung $U = 450$ mV gemessen. Der Drahtdurchmesser beträgt $\delta = 700$ μm . $\rho_{\text{Cu}} = 17,5 \cdot 10^{-9}$ Ωm

- Welche Stromdichte J herrscht im Leiter ?
- Welcher Strom I fließt im Leiter ?

13. ZYLINDRISCHES FELD

Zwischen zwei dünnwandigen, koaxial angeordneten Metallrohren der Länge $L = 2$ m mit den Radien $r_1 = 1$ cm und $r_2 = 2$ cm befindet sich ein Medium mit $\rho = 50$ $\text{M}\Omega\cdot\text{m}$.

Die elektrische Feldstärke soll an keiner Stelle den Wert $E = 2$ MVm^{-1} übersteigen.

- Welche Spannung U darf maximal zwischen den beiden Rohren herrschen?
- Welcher Widerstand R besteht zwischen den beiden Rohren ?

14. FELD AN KUGEL

Zwischen zwei dünnwandigen Metall – Hohlkugeln mit $r_1 = 4$ cm und $r_2 = 1$ dm, die konzentrisch angeordnet sind, befindet sich ein Medium mit $\rho = 100$ $\text{M}\Omega\cdot\text{m}$.

- Welcher Widerstand R besteht zwischen den beiden Metallkugeln ?
- Wie gross ist die maximal auftretende Feldstärke E , wenn zwischen den Kugeln die Spannung $U = 25$ kV herrscht ?

15. ZYLINDRISCHES FELD

Zwischen zwei dünnwandigen, koaxial angeordneten Metallrohren der Länge $L = 4$ m mit den Radien $r_1 = 1$ cm und $r_2 = 4$ m befindet sich ein Medium mit $\rho = 150$ $\Omega\cdot\text{m}$. Der Strom im inneren Rohr betrage $I = 50$ kA.

- Welcher Widerstand R besteht zwischen den beiden Rohren ?
- Wie gross ist die maximal auftretende Feldstärke E ?
- Wie gross ist die Spannung U zwischen den Rohren ?

16. FELD AN HALBKUGEL

Zwischen zwei dünnwandigen Metall – Hohl - Halbkugeln mit $r_1 = 10$ m und $r_2 = 100$ m, die konzentrisch angeordnet sind, befindet sich ein Medium mit $\rho = 100$ $\Omega\cdot\text{m}$. Randeffekte sollen unberücksichtigt bleiben.

- Welcher Widerstand R besteht zwischen den beiden Metall - Halbkugeln ?
- Wie gross ist die maximal auftretende Feldstärke E , wenn zwischen den Kugeln ein Strom von $I = 30$ kA fließt ?

5.4.2 Lösungen

12. STROMDICHTE

- a) $I = 1,979 \text{ A}$
 - b) $J = 5,143 \text{ Amm}^{-2}$
-

13. ZYLINDRISCHES FELD

- a) $U = 13,863 \text{ kV}$
 - b) $R = 2,758 \text{ M}\Omega$
-

14. FELD AN KUGEL

- a) $R = 119,37 \text{ M}\Omega$
 - b) $E = 1,042 \text{ MVm}^{-1}$
-

15. ZYLINDRISCHES FELD

- a) $R = 35,76 \text{ }\Omega$
 - b) $E = 29,842 \text{ MVm}^{-1}$
 - c) $U = 1,788 \text{ MV}$
-

16. FELD AN HALBKUGEL

- a) $R = 2,865 \text{ }\Omega$
 - b) $E = 4,775 \text{ kVm}^{-1}$
-