

Elektromagnetische Felder

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Wunsch

Doz. Dr.-Ing. habil. Hans-Georg Schulz

2., bearbeitete Auflage



Verlag Technik Berlin

Inhaltsverzeichnis

Schreibweise und Formelzeichen der wichtigsten Größen	10
1. Felder und Feldintegrale	15
1.1. Skalar- und Vektorfelder	15
1.1.1. Feldgrößen und Felder	15
Physikalische Feldgrößen. Skalare und Vektoren. Komplexe Feldgrößen. Feld- und Ortsvektoren. Zusammenfassung. Tensorfelder	
1.1.2. Koordinatensysteme	22
Ortskoordinaten. Umrechnung von Ortskoordinaten. Ortskoordinatenlinien. Koordinatenflächen. Erzeugung von Koordinatensystemen. Spezielle Koordinatensysteme. Zusammenfassung	
1.1.3. Orts- und Tangentenvektor	36
Ortsvektor. Tangenten- und Basisvektor. Metrische Koeffizienten. Koordinatenelemente. Änderung des Koordinatensystems	
1.1.4. Felddarstellung	42
Skalarfeld. Vektorfeld. Quellen- und Wirbelfelder. Schreibweise. Koordinatendarstellung. Spezielle Felder. Umrechnung von Vektorfeldern. Zusammenfassung. Aufgaben zum Abschnitt 1.1.	
1.2. Feldintegrale	49
1.2.1. Linienintegrale	50
Raumkurve. Skalares Linienintegral. Koordinatendarstellung. Beispiel. Vektoriell Linienintegral	
1.2.2. Flächenintegral	55
Raumfläche. Skalares Flächenintegral. Koordinatendarstellung. Beispiel. Raumwinkel. Vektoriell Flächenintegral	
1.2.3. Volumenintegral	60
Räumlicher Bereich. Volumenintegral. Koordinatendarstellung. Beispiel. Zusammenfassung. Aufgaben zum Abschnitt 1.2.	
2. Theorie der Felder	66
2.1. Differentialoperatoren und Integralsätze I	66
2.1.1. Skalares Feld. Gradient	66
Gradient. Eigenschaften des Gradienten. 1. Integralsatz von <i>Gauß</i> . Taylor-Entwicklung	
2.1.2. Vektorfeld. Divergenz	73
Divergenz. Eigenschaften der Divergenz. Beispiele. 2. Integralsatz von <i>Gauß</i> . Taylor-Entwicklung	
2.1.3. Vektorfeld. Rotation	77
Rotation. Eigenschaften der Rotation. 3. Integralsatz von <i>Gauß</i> . Beispiele	
2.1.4. Integralsätze von <i>Stokes</i>	81
1. Integralsatz von <i>Stokes</i> . 2. Integralsatz von <i>Stokes</i> . Anwendungen. Zusammenfassung. Aufgaben zum Abschnitt 2.1.	
2.2. Differentialoperatoren und Integralsätze II	86
2.2.1. Nabla- und Laplace-Operator	86
Nabla-Operator. Laplace-Operator. Harmonische Funktion. Vektorieller Laplace-Operator	

2.2.2. Rechenregeln	89
Allgemeine Grundregeln. Regeln für Produktfelder. Formeln für den Ortsvektor. δ -Funktion. Rechenregeln	
2.2.3. Greensche Integralsätze	95
Stetige Feldfunktionen. Unstetige Feldfunktionen. Greensche Integralsätze für Vektorfelder. Zusammenfassung Aufgaben zum Abschnitt 2.2.	
3. Elektromagnetische Felder	102
3.1. Allgemeine Grundeigenschaften	102
3.1.1. Grundgleichungen. Stoffeigenschaften	102
Maxwellsche Gleichungen. Isotrope Stoffe. Anisotrope Stoffe	
3.1.2. Strom und Ladung	104
Kontinuitätsgleichung. Relaxationszeit	
3.1.3. Bedingungen an Grenzflächen	107
Normalkomponenten. Tangentialkomponenten	
3.1.4. Feldenergie	109
Poyntingscher Satz. Energiedichte	
3.1.5. Einteilung der Felder	111
Stationäre Felder. Nichtstationäre Felder. Wirbelfreie Felder. Einteilung. Zusammenfassung Aufgaben zum Abschnitt 3.1.	
3.2. Wirbelfreie Felder	116
3.2.1. Grundeigenschaften	116
Grundgleichungen. Skalarpotential. Eindeutigkeit	
3.2.2. Potential wirbelfreier Felder	119
Poissonsche Differentialgleichung. Eindeutigkeit. Zusammenfassung	
3.2.3. Lösung der Poissonschen Gleichung	122
Partikuläre Lösung. Greensche und Neumannsche Funktion. Differentialgleichung der Funktionen G und N . Inverser Laplace-Operator	
3.2.4. Lösung der Laplaceschen Gleichung	128
Randwertaufgaben der Potentialtheorie. Separation der Variablen	
3.2.5. Lösung in kartesischen Koordinaten	130
Separation. Anpassung an die Randwerte	
3.2.6. Lösung in Zylinder- und Kugelkoordinaten	134
Kreiszyylinderkoordinaten. Kugelkoordinaten	
3.2.7. Zweidimensionale Felder	138
Methode. Konforme Abbildung. Zusammenfassung. Lösungsmethoden Aufgaben zum Abschnitt 3.2.	
4. Elektrostatik	144
4.1. Felder ohne Randbedingungen (Newton-Potentiale)	144
4.1.1. Feldgrößen	144
Grundgleichungen der Elektrostatik. Newton-Potentiale. Berechnungsmöglichkeiten des Newton-Potentials (Übersicht)	
4.1.2. Elementare Ladungsverteilungen	147
Kugel- und Punktladung (Methode 1). Kugel- und Punktladung, Linienladung (Methode 2). Ringladung	
4.1.3. Überlagerung von Elementarfeldern (Methode 3)	153
Überblick. Feld zweier Punktladungen. Dipol. Feld mehrerer Punktladungen. Doppelschicht. Stetigkeitseigenschaften der Flächenpotentiale	
4.1.4. Entwicklung nach Elementarfeldern (Methode 4)	163
Reihenentwicklung. Physikalische Deutung. Beispiel	
4.1.5. Ergänzungen	166
Kelvin-Transformation. Funktionaltransformation. Zusammenfassung Aufgaben zum Abschnitt 4.1.	

4.2. Felder mit konstanten Randbedingungen	168
4.2.1. Spiegelungsmethode	168
Grundgedanke der Methode. Spiegelung von Punktladungen. Spiegelung an Ebene und Kugel. Mehrfachspiegelung	
4.2.2. Greensche Funktion	173
Physikalische Definition. Felddarstellung mittels $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$. Berechnung von $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 4.2.	
4.3. Harmonische Potentiale	177
4.3.1. Raumladungsfreie Felder	177
Allgemeines Grundproblem. Kugel im homogenen Feld. Randwertaufgabe. Lösung mit Greenscher Funktion	
4.3.2. Ergänzungen	182
Feld bei vorgegebenen Raumladungen und Randwerten. Zur Greenschen Funktion. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 4.3.	
4.4. Ebene Felder	185
4.4.1. Komplexes Potential der Ebene	185
Allgemeines. Zylinder- und Linienladung. Komplexes Potential der Ebene. Feldüberlagerung. Reihenentwicklung. Spiegelung in der Ebene. Komplexe Feldstärke \underline{E}	
4.4.2. Reguläre Potentiale	194
Berechnung durch Ladungsspiegelung. Konforme Abbildung. Beliebige Randwerte. Schwarz-Christoffelsche Formel. Beispiel. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 4.4.	
4.5. Felder bei nichtleitenden Grenzflächen	203
4.5.1. Einfache Grenzflächen	203
Ebene Grenzfläche. Kugelförmige Grenzfläche	
4.5.2. Beliebige Grenzflächen	207
Grundgleichungen. Integralgleichungen. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 4.5.	
4.6. Kapazität, Energie und Kraft	210
4.6.1. Kapazität	210
Teilkapazität. Physikalische Deutung. Reziprozitätstheorem. Beispiel	
4.6.2. Energie des elektrischen Feldes	214
Energie und Potential. Energie und Kapazität	
4.6.3. Kraft im elektrostatischen Feld	216
Kraftdichte. Kraft auf Grenzflächen. Kraft und Energie. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 4.6.	
5. Wirbelfelder	223
5.1. Feldpotentiale	223
5.1.1. Quellenfreie Felder	223
Vektorpotential. Eindeutigkeit des Vektorpotentials. Vektorpotential mit vorgegebenen Quellen. Differentialgleichung des quellenfreien Vektorpotentials	
5.1.2. Poissonsche Vektorgleichung	228
Lösungen der Differentialgleichung $\Delta \mathbf{V} = -\mathbf{w}$. Quellenfreie Lösungen von $\Delta \mathbf{V} = -\mathbf{w}$. Eindeutigkeit. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 5.1.	
5.2: Elektromagnetische Potentiale	231
5.2.1. Maxwell'sche Gleichungen	231
Skalar- und Vektorpotential. Nebenbedingung. Potentialgleichungen für Leiter (Form I). Potentialgleichung für Leiter (Form II). Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 5.2.	

6. Stationäre Felder	237
6.1. Strömungsfelder	237
6.1.1. Strömung im Leiter	237
Grundgleichungen stationärer Felder. Stationäre Felder im Leiter. Grundaufgabe für Strömungsfelder	
6.1.2. Räumliche Felder	239
Punktquellen. Spiegelungsmethode. Neumannsche Funktion. Reihenentwicklung	
6.1.3. Ebene Felder	245
Punktquellen. Harmonische Felder. Komplexe Feldstärke	
6.1.4. Räumliche n -Pole	249
Übertragungswiderstände. Messung der n -Pol-Parameter. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 6.1.	
6.2. Stationäre Magnetfelder	254
6.2.1. Felder ohne Randbedingungen	254
Grundgleichungen. Feld außerhalb der Strömung. Eigenschaften des magnetischen Skalarpotentials. Linienhafte Leiter. Beispiel	
6.2.2. Felder mit Randbedingungen	263
Bedingungen an der Grenzfläche. Grenzfall $\mu \rightarrow \infty$ (Spiegelung). Harmonische Felder	
6.2.3. Ebene Felder	265
Komplexes Potential. Komplexe Induktion \underline{B} . Linienhafte Leiter. Randbedingungen. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 6.2.	
6.3. Induktivität, Energie und Kraft	273
6.3.1. Induktivität	273
2-Leiterschleifen-System. n -Leiterschleifen-System	
6.3.2. Energie und Induktivität	275
Energie und Stromdichte. Energie und Induktivität	
6.3.3. Kraft	277
Kraftdichte. Kraft auf Grenzflächen. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 6.3.	
7. Nichtstationäre Felder	281
7.1. Quasistationäre Felder	281
7.1.1. Grundgleichungen	281
Beliebige Zeitabhängigkeit. Sinusförmige Zeitabhängigkeit	
7.1.2. Flächenhafte Leiter (Wirbelstrom)	284
Vektorpotential. Feldberechnung. Wirbelstromverluste. Wechselstromwiderstand	
7.1.3. Zylinderförmiger Leiter (Skinneffekt)	292
Berechnung der Felder. Näherungslösungen. Wechselstromwiderstand. Zusammenfassung	
Aufgaben zum Abschnitt 7.1.	
7.2. Wellenfelder	299
7.2.1. Hertzscher Vektor	299
Grundgleichungen. Hertzscher Vektor Π . Feld im Leiter	
7.2.2. Hertzscher Dipol	304
Modell, Feldgleichungen. Nah- und Fernfeld. Periodische Erregung. Feldlinienverläufe. Fernfeld bei periodischer Erregung	
7.2.3. Energieabstrahlung des Hertschen Dipols	314
Poyntingscher Vektor. Harmonische Erregung. Strahlungsdiagramm. Zusammenfassung.	
Aufgaben zum Abschnitt 7.2.	
Anhang	319
Literaturverzeichnis	330
Sachwörterverzeichnis	331