

Fachhochschule Münster

**Studiengang
Physikalische Technik**

Grundlagen der Elektrotechnik

Prof. Dr.-Ing. Peter Richert

Fachhochschule Münster, Fachbereich Elektrotechnik,
eLKaTe — Labor Kommunikationstechnik,
Stegerwaldstraße 39, 48 565 Steinfurt, Tel.: 0 2551 9-62125, Fax: -62391

Vorwort

Diese Vorlesung „Grundlagen der Elektrotechnik“ im Studiengang Physikalische Technik beruht im wesentlichen auf den Büchern [MP92], [CW92] und [FB82].

- [MP92] Anfängern, besser Fachfremden ist ein Studium von [MP92] empfohlen, das für Studenten des Fachbereiches Wirtschaft ausgelegt ist.
- [CW92] Bei vorhandenen Grundkenntnissen bietet sich [CW92] an, das über den Stoff der Vorlesung hinaus die Elektrotechnik theoretisch erläutert.
- [FB82] Aus dem Bereich Maschinenbau kommt [FB82], das für den Teil der elektrischen Maschinen als Vorlage diente. Es kann aber auch Fachfremden für ein allgemeines Verständnis empfohlen werden.

Steinfurt, den 5. Oktober 2000

P. Richert

Inhaltsverzeichnis

I. Gleichstrom	1
1. Gleichstromlehre	2
1.1. Grundbegriffe	2
1.1.1. Einleitung	2
1.1.2. Elektrische Strömung	2
1.1.3. Einfacher Stromkreis	4
1.1.4. Kirchhoff'sche Gesetze	6
1.1.5. Energie und Leistung	16
1.1.6. Spannungsquelle	16
1.1.7. Superposition	20
1.1.8. Machenanalyse	21
1.1.9. Stern-Dreieck-Transformation	23
1.2. Das elektrische Feld	24
1.2.1. Das elektrische Feld eines Kondensators	24
1.2.2. Die Aufladung eines Kondensators	25
1.2.3. Die Entladung eines Kondensators	27
1.2.4. Energie im Kondensator	28
1.2.5. Schaltung von Kondensatoren	29
1.3. Das stationäre magnetische Feld	31
1.3.1. Wirkung des elektrischen Stroms	31
1.3.2. Magnetische Feldstärke	31
1.3.3. Magnetische Induktion	31
1.3.4. Magnetische Vorgänge in Eisen	32
1.3.5. Magnetisierungskurve	33
1.3.6. Eigenschaften verschiedener Eisensorten	34
1.3.7. Kenngrößen des Materials	34
1.3.8. Magnetischer Fluß	35
1.3.9. Durchflutungsgesetz	36
1.3.10. Entmagnetisierung	37
1.3.11. Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter	37
1.3.12. Anwendungen des stationären Magnetfeldes	38
1.4. Das veränderliche magnetische Feld	38
1.4.1. Das Induktionsgesetz	38
1.4.2. Lenz'sche Regel	40
1.4.3. Selbstinduktion und Induktivität	41
1.4.4. Der Stromanstieg in der Spule	42
1.4.5. Energie in der Spule	43
1.4.6. Rotatorische Spannungserzeugung	43
1.4.7. Der Transformator	45
1.4.8. Wirbelströme	47

II. Wechselstrom	49
2. Wechselstromlehre	50
2.1. Grundbegriffe	50
2.1.1. Vorkommen und Arten von Wechselströmen	50
2.1.2. Eigenschaften sinusförmiger Wechselgrößen	52
2.1.3. Messung und Darstellung der Kennwerte	54
2.1.4. Addition und Subtraktion im Zeitdiagramm	55
2.2. Komplexe Rechnung	57
2.2.1. Die komplexe Zahlenebene	57
2.2.2. Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen	58
2.3. Komplexe Rechnung an komplexen Zweipolen	59
2.3.1. Widerstand	59
2.3.2. Kondensator	61
2.3.3. Spule	63
2.4. Allgemeiner Wechselstromzweipol	67
2.4.1. Spannung, Strom und Phasenwinkel	67
2.4.2. Leistung	67
2.5. Zusammengesetzte Zweipole	70
2.5.1. Reale Bauelemente	70
2.5.2. Allgemeiner komplexer Widerstand	70
2.5.3. Reihenschaltungen	72
2.5.4. Allgemeiner komplexer Leitwert	72
2.5.5. Parallelschaltungen	73
2.5.6. Ersatzwiderstand einer Schaltung	74
2.5.7. Umwandlung komplexer Widerstände	75
2.5.8. Blindleistungskompensation	75
2.6. Drehstrom	77
2.6.1. Erzeugung von Drehstrom	77
2.6.2. Sternschaltung und Dreieckschaltung beim Erzeuger	77
2.6.3. Leistungsberechnung beim Verbraucher	79
2.7. Schutz gegen Berührungsspannungen	80
2.7.1. Schutzmaßnahmen	81
2.7.2. Schutzisolierung	81
2.7.3. Schutztrennung	82
2.7.4. Schutzerdung	82
2.7.5. Nullung	82
2.7.6. Schutzschaltung	83
III. Energietechnik	84
3. Bauteile elektrischer Anlagen	85
3.1. Transformatoren	85
3.1.1. Gegeninduktivität	85
3.1.2. Transformatorgleichung	86
3.1.3. Der verlustlose Transformator	88
3.1.4. Der verlustlose und streuungsfreie Transformator	89
3.1.5. Der ideale Transformator	90
3.1.6. Vierpolersatzschaltung des eisenfreien Transformators	91
3.1.7. Zweipolersatzschaltung des eisenfreien Transformators	92
3.2. Leitungsberechnung	92

3.2.1.	Anforderungen an eine Leitung	92
3.2.2.	Spannungsverlust einer Leitung mit Einzellast am Ende	93
3.2.3.	Leistungsverlust einer Leitung mit Einzellast am Ende	96
3.3.	Rotierende elektrische Maschinen	98
3.3.1.	Überblick	98
3.3.2.	Aufbau und Erregung	98
3.3.3.	Drehfeldzahl	98
3.3.4.	Leistung und Drehmoment	101
3.3.5.	Drehmoment und Drehzahl	102
3.4.	Gleichstrommaschinen	103
3.4.1.	Aufbau und prinzipielle Funktionsweise	103
3.4.2.	Energiefluß und Leistungsbilanz	104
3.4.3.	Nebenschlußmotor	107
3.4.4.	Fremderregter Motor	107
3.4.5.	Reihenschlußmotor	108
3.4.6.	Einschalten und Anlassen	109
3.4.7.	Steuerung des fremderregten Motors	109
3.5.	Asynchronmaschine	111
3.5.1.	Prinzipielle Funktionsweise	111
3.5.2.	Ersatzschaltung	112
3.5.3.	Energie und Leistungsfluß	112
3.5.4.	Drehmoment	113
3.5.5.	Stromortskurve	114
3.5.6.	Leerlauf- und Kurzschlußversuch	114
3.5.7.	Verschiedene Motorarten	115
3.6.	Synchronmaschine	115
3.6.1.	Aufbau und Anwendungsgebiete	115
3.6.2.	Anwendungsgebiete	117
IV.	Arbeitsblätter	119
A.	Formelsammlung	120
A.1.	Grundbegriffe	120
A.2.	Das elektrische Feld	121
A.3.	Das stationäre magnetische Feld	121
A.4.	Das veränderliche magnetische Feld	122
A.5.	Wechselstromlehre	122
A.6.	Komplexe Zweipole	122
A.7.	Allgemeiner Wechselstromzweipol	123
A.8.	Zusammengesetzte Zweipole	123
A.9.	Transformator	124
A.10.	Elektrische Maschinen	124
A.11.	Gleichstrommaschine	124
A.12.	Asynchronmaschine	125
B.	Arbeitsblätter	126
B.1.	Gleichstromlehre	126
B.2.	Wechselstromlehre	129
B.3.	Bauteile elektrischer Anlagen	133

V. Aufgaben	137
C. Übungsaufgaben	138
C.1. Gleichstromlehre	138
C.1.1. Übungsaufgaben zum elektrischen Widerstand	138
C.1.2. Übungsaufgaben zu den Kirchhoff'schen Gesetzen	140
C.1.3. Übungsaufgaben zu Energie und Leistung	143
C.1.4. Übungsaufgaben zur Spannungsquelle	145
C.1.5. Übungsaufgaben zur Superposition	148
C.1.6. Übungsaufgaben zum Kondensator	149
C.1.7. Übungsaufgaben zum stationären magnetischen Feld	150
C.1.8. Übungsaufgaben zum veränderlichen magnetischen Feld	152
C.2. Wechselstromlehre	154
C.2.1. Übungsaufgaben zur Wechselstromlehre	154
C.2.2. Übungsaufgaben zum Drehstrom	160
C.3. Bauteile elektrischer Anlagen	161
C.3.1. Übungsaufgaben zum Transformator	161
C.3.2. Übungsaufgaben zur Leitungsberechnung	163
C.3.3. Übungsaufgaben zu elektrische Maschinen	164
C.3.4. Übungsaufgaben zur Gleichstrommaschine	165
C.3.5. Übungsaufgaben zur Asynchronmaschine	167

Tabellenverzeichnis

C.1. Strombelastbarkeit isolierter Leitungen bei 30°C Umgebungstemperatur	163
---	-----

Abbildungsverzeichnis

1.1.1. Leiterstück als Zylinder mit der Querschnittsfäche A und der Länge l	3
1.1.2. Verbraucherwiderstand R_V (z.B. Glühbirne), Generator G , Hin- und Rückleitung $R_L/2$. . .	5
1.1.3. Schaltung zur Knotenregel	6
1.1.4. Parallelschaltung und Ersatzwiderstand	7
1.1.5. Stromteiler	8
1.1.6. Reihenschaltung und Ersatzwiderstand	8
1.1.7. Spannungsteiler	9
1.1.8. Schiebewiderstand (Potentiometer)	9
1.1.9. Potentiometer mit Belastung	10
1.1.10. Schaltung zum Vorwiderstand	11
1.1.11. Realisierung eines Amperemeters mit 4 Meßbereichen	11
1.1.12. Erweiterung des Strommessbereiches	12
1.1.13. Realisierung eines Voltmeters mit 4 Meßbereichen	12
1.1.14. Erweiterung des Spannungsmessbereiches	13
1.1.15. Spannungsrichtige ($R_{iV} \gg R_{iA}$ oder stromrichtige ($R_{iA} \ll R_a$) Messung am Verbraucher . . .	13
1.1.16. Wheatstonesche Brückenschaltung	14
1.1.17. Bestimmung von Widerständen mit der Wheatstoneschen Brückenschaltung	14
1.1.18. Brückenschaltung im Kompensationsschreiber	15
1.1.19. Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle	17
1.1.20. Kennlinie einer realen Spannungsquelle	18
1.1.21. Vollständiges Ersatzschaltbild eines Stromkreises	18
1.1.22. Leistungsanpassung	19
1.1.23. Wirkungsgrad η und Leistungsverhältnis $P_a/P_{a,max}$ in Abhängigkeit von $x = R_a/R_i$	20
1.1.24. Netz mit zwei Spannungsquellen	20
1.1.25. Netz mit zwei Spannungsquellen	21
1.1.26. (Dreier-) Stern- und Dreieck-Schaltung	23
1.2.1. Elektrisches Feld im Kondensator	24
1.2.2. Polarisation eines Dielektrikums im elektrisches Feld	25
1.2.3. Aufladung eines Kondensators	26
1.2.4. Spannung und Strom bei der Kondensatoraufladung	28
1.2.5. Spannung und Strom bei der Kondensatorentladung	29
1.2.6. Serienschaltung von Kondensatoren	29
1.2.7. Parallelschaltung von Kondensatoren	29
1.3.1. Magnetfeld um einen geraden Leiter und in einer Spule	31
1.3.2. Magnetfeld in einer Kreisringspule (Toroid)	32
1.3.3. Messung des Zusammenhanges zwischen Feldstärke H und Induktion B	32
1.3.4. Veränderung der Weis'schen Bezirke	33
1.3.5. Schaltung zur Aufnahme der Magnetisierungskurve	33
1.3.6. Vollständige Magnetisierungskurve eines ferromagnetischen Stoffes	34
1.3.7. Beispiele verschiedener Magnetisierungskurven	35
1.3.8. Zum Durchflutungsgesetz	36
1.3.9. Experiment zur Lorentzkraft	37

1.3.10. Schema eines Lasthebemagneten	38
1.3.11. Spule mit Tauchanker	39
1.3.12. Prinzip eines Relais	39
1.3.13. Prinzip eines Überstromschalters	39
1.3.14. Prinzip eines Drehspulmeßwerkes	39
1.3.15. Prinzip eines Gleichstrommotors	40
1.4.1. Experiment zum Induktionsgesetz	40
1.4.2. Selbstinduktivität einer Spule	41
1.4.3. Schaltung zur Messung des Stromanstiegs in einer Spule	42
1.4.4. Prinzip der rotatorischen Spannungserzeugung	44
1.4.5. Ableitungsmöglichkeiten der induzierten Spannung mittels Kommutator oder Schleifringen	45
1.4.6. Prinzip des Transformators	45
1.4.7. Prinzip einer KFZ-Zündspule	46
1.4.8. Entstehung von Wirbelströmen	47
2.1.1. Beispiele verschiedener Wechselströme	51
2.1.2. Ohm'scher Widerstand: a) Strom- und Spannungsverlauf und b) Leistungsverlauf	52
2.1.3. Messung von Gleichströmen nach der Gleichrichtung: a) Schaltung und b) Spannung und Strom vor und nach der Gleichrichtung	54
2.1.4. Darstellung einer Wechselgröße: (a) Zeigerdiagramm und (b) Zeitdiagramm	55
2.1.5. Addition von Spannungen: (a) im Zeigerdiagramm und (b) im Zeitdiagramm	55
2.2.1. Darstellung der komplexen Zahl	57
2.3.1. Wechselspannung und -strom am Widerstand	59
2.3.2. Leistung am Widerstand	60
2.3.3. Spannung und Strom beim Kondensator	61
2.3.4. Phasenwinkel und Frequenzgang des kapazitiven Blindleitwerts und Blindwiderstands	62
2.3.5. Kapazitive Blindleistung beim Kondensator	62
2.3.6. Spannung und Strom bei der Spule	63
2.3.7. Phasenwinkel und Frequenzgang des induktiven Blindleitwerts und Blindwiderstands	65
2.3.8. Induktive Blindleistung bei der Spule	65
2.4.1. Widerstand und Leitwert in der komplexen Zahlenebene: Zusammenstellung der Leitwerte und Widerstände für einige exemplarische Fälle.	67
2.4.2. Scheinleistung beim allgemeinen Zweipol	68
2.5.1. Ersatzschaltbild realer Bauelemente	70
2.5.2. Widerstand, Spule und Kondensator in Reihe: Schaltbild und Zeigerdiagramm für Widerstände	70
2.5.3. Addition von beliebigen Scheinwiderständen bei einer Reihenschaltung: (a) Schaltbild, (b) Zeigerdiagramm für Widerstände	72
2.5.4. Widerstand, Spule und Kondensator parallel: (a) Schaltbild, (b) Zeigerdiagramm für Leitwerte	72
2.5.5. Addition von beliebigen Scheinleitwerten bei einer Parallelschaltung: (a) Schaltbild, (b) Zeigerdiagramm für Leitwerte	73
2.5.6. Ersatzwiderstand einer Schaltung	74
2.5.7. Realisierung eines komplexen Ersatzwiderstandes	74
2.6.1. Spannungsdiagramm: (a) Zeitdarstellung, (b) Zeigerdiagramm	77
2.6.2. Wirkbild eines 2-poligen Drehstromgenerators der Innenbauart	77
2.6.3. Sternschaltung mit Spannungszeigerdiagramm	78
2.6.4. Dreieckschaltung mit Stromzeigerdiagramm	79
2.7.1. Maßnahmen zur Schutzisolierung	81
2.7.2. Maßnahmen zur Nullung	82
2.7.3. Fehler-Schutzschalter	83
3.1.1. Zwei magnetisch gekoppelte Leiterschleifen	85
3.1.2. Transformator: Aufbau und Übersicht	86

3.1.3. Transformator: Schaltbild und Schaltsymbole	87
3.1.4. Transformator mit unsymmetrischen Stromzählpfeilen	88
3.1.5. Impedanzwandlung im verlust- und streuungsfreien Transformator	90
3.1.6. Impedanzwandlung im idealen Übertrager	91
3.1.7. Allgemeiner Vierpol als Transformatorersatzschaltung mit symmetrischer T-Schaltung	91
3.1.8. Ersatzschaltung eines streuungsfreien Transformators mit Verlusten	92
3.1.9. Zweipolersatzschaltung eines Transformators	92
3.2.1. 2- und 3-Leitersysteme	94
3.2.2. Abhängigkeit des Spannungsverlustes vom Leistungsfaktor der Belastung	94
3.2.3. Beispiel zum Spannungsverlust auf einer Leitung	95
3.3.1. Aufbau einer 2-poligen Gleichstrommaschine	99
3.3.2. Entstehung des Drehfeldes: Phasenfolge der Spannungen	99
3.3.3. Entstehung des Drehfeldes: Rotation der Durchflutung	100
3.3.4. Bremsen zur Messung des nutzbaren Drehmomentes	101
3.3.5. Betriebsarten einer elektrischen Maschine	102
3.4.1. Prinzipielle Darstellung der Gleichstrommaschine	103
3.4.2. Ersatzschaltung der Ankerwicklungen	103
3.4.3. Induzierte Spannungen in den Ankerwicklungen	104
3.4.4. ESB des Ankerkreises	105
3.4.5. Leistungsbilanz des Gleichstrommotors	106
3.4.6. Schaltung des Nebenschlußmotors mit Wendepolwicklung	107
3.4.7. Abhängigkeit des Drehmoments und der Drehzahl beim Nebenschlußmotor vom Ankerstrom bei konstanter Ankerspannung	108
3.4.8. Schaltung des Reihenschlußmotors	108
3.4.9. Abhängigkeit des Drehmoments und der Drehzahl beim Reihenschlußmotor vom Ankerstrom	109
3.4.10. Steuerungskennlinie des fremderregten Motors	110
3.5.1. Induktionsvorgang in einer Leiterschleife der Läuferwicklung einer Asynchronmaschine	111
3.5.2. Leistungsbilanz des Asynchronmotors	112
3.5.3. Vereinfachte Ersatzschaltung der Asynchronmaschine	114
3.5.4. Ortskurve des Ständerstromes (HEYLANDkreis)	114
3.6.1. Prinzipschaltbild einer 2-poligen Vollpolmaschine und Polrad einer 6-poligen Schenkelpolmaschine mit Dämpferkäfig	116
B.1.1. Netz mit zwei Spannungsquellen	127
B.2.1. Addition und Subtraktion komplexer Zahlen	129
B.3.1. Berücksichtigung der Eisenverluste in einer Zweipoldarstellung des Transformators und Zeitdiagramm eines Leistungstransformators bei Nennlast	133
B.3.2. Nebenschlußmotor und Reihenschlußmotor	136
C.1.1. Schaltung zur Dimensionierung eines Vorwiderstandes	140
C.1.2. Widerstandsnetzwerk	141
C.1.3. Vielfachmeßgerät	141
C.1.4. Wheatstonesche Brückenschaltung	142
C.1.5. Widerstandsbrücke	142
C.1.6. Widerstandsnetzwerk	144
C.1.7. Gleichstromschaltungen	146
C.1.8. Wheatstonesche Brückenschaltung	147
C.1.9. Widerstandsnetzwerk	148
C.1.10. Wheatstonesche Brückenschaltung	148
C.1.11. Kondensatorschaltung	149
C.1.12. Induktion B in Abhängigkeit von der Feldstärke H in Holz (B_L -Werte $\times 100$) und Eisen	151
C.2.1. Vierpolschaltung	156

C.2.2. Zweipolschaltung	157
C.2.3. Komplexer Ersatzwiderstand	157
C.2.4. RC-Netzwerk	159
C.3.1. RC-Parallelschaltung als Belastung einer Quelle mit der inneren Impedanz $R_i + j\omega L_i$. . .	161
C.3.2. Berechnung eines Anpassungsübertragers	161
C.3.3. Ersatzschaltbild des Transformators zur Leerlauf- und Kurzschlußmessung	162
C.3.4. Leistungsschild eines Drehstrom-Asynchronmotors	164