



WELLENAUSBREITUNG (389.064)

16. Auflage, Mai 2020, basierend auf Vorlesungen von Ernst BONEK

Vortragende im WS 2020/21:

Christoph MECKLENBRÄUKER, CG0304, +43 1 58801 38901, cfm@nt.tuwien.ac.at.

Redaktion der 16. Auflage:

Herbert GROLL, CG0518, +43 1 58801 38996, herbert.groll@tuwien.ac.at.

Homepage der VU:

<https://www.nt.tuwien.ac.at/teaching/courses-winter-term/wellenausbreitung/>

Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Über dieses Skriptum	7
1.2	Über die Vorlesung	7
1.3	Wellen auf Leitungen	8
1.4	Freiraumausbreitung	8
1.5	Mathematische Symbole	10
1.6	Weiterführende Literatur	11
2	Maxwellsche Theorie	13
2.1	Ladungskontinuität	13
2.2	Maxwellsche Gleichungen	14
2.2.1	Hilfsgleichungen	14
2.2.2	Effektive Ladungsfreiheit	15
2.2.3	Komplexe Schreibweise	16
2.3	Poyntingscher Satz	16
2.3.1	Energiebilanz	16
2.3.2	Komplexe Schreibweise	17
2.4	Randbedingungen	18
2.4.1	Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika	18
2.4.2	Grenzfläche zwischen Dielektrikum und idealem Leiter	21
2.4.3	Allgemeine Grenzfläche	21
2.5	Lösung der Wellengleichung in kartesischen Koordinaten	22
2.5.1	Die Wellengleichung	22
2.5.2	Der Separationsansatz	22
2.5.3	Modale Lösungen	24
3	Die homogene ebene Welle (HEW)	27
3.1	Die HEW im idealen Dielektrikum	27
3.1.1	Orthogonale Felder	30
3.1.2	Rücklaufende Wellen	30
3.1.3	Die Energiedichte der HEW, Poyntingscher Vektor	30
3.1.4	Wellenzahl und Wellenlänge	32
3.2	Polarisation	32
3.2.1	Polarisationsarten	33
3.2.2	Depolarisationserscheinungen	35
3.3	Die transversal elektromagnetische (TEM) Welle auf einer Parallelplattenleitung	36
3.3.1	Der Leitungswellenwiderstand der TEM-Welle	36
3.4	Die HEW in verlustbehafteten Medien	38

3.4.1	Abgeleitete elektromagnetische Größen	40
4	Reflexion an glatten Grenzflächen, die Parallelplattenleitung	43
4.1	Grenzflächen zwischen Dielektrika	43
4.1.1	Ideale Dielektrika	43
4.1.2	Nichtideale Dielektrika	47
4.2	Grenzfläche zu ideal leitfähigem Metall	47
4.2.1	TM-Fall	48
4.3	Die Parallelplattenleitung	48
4.3.1	Der Grundmodus	48
4.3.2	Die TM-Welle und die TE-Welle	49
4.3.3	Der Begriff des Modus	51
4.3.4	Die Grenzfrequenz	51
5	Die Oberflächenwelle	53
5.1	Die Lösung der Wellengleichung	53
5.2	Feldbilder	56
5.3	Wellenwiderstände und Leistungsumsatz	57
5.3.1	Der Feldwellenwiderstand	57
5.3.2	Der Leitungswellenwiderstand	58
5.3.3	Berechnung der Leitungsverluste: Power Loss Method	59
5.3.4	Der Oberflächenwiderstand	60
5.4	Der Skin-Effekt	60
6	Rechteckhohlleiter und Resonatoren	63
6.1	Der Rechteckhohlleiter	63
6.1.1	TM- und TE- Wellen	63
6.1.2	Feldbilder und Feldwellenwiderstand	65
6.1.3	Der Grundmodus TE_{10}	69
6.1.4	Leistungstransport und Dämpfung: Power Loss Method	70
6.2	Hohlraumresonatoren	73
6.2.1	Die Kreisgüte	74
6.2.2	Analogie zum Schwingkreis	75
7	Koaxialleitungen	77
7.1	Leitungswellenwiderstand, Kapazitäts- & Induktivitätsbelag	78
7.1.1	Feldbild	78
7.1.2	Leitungstheorie	79
7.1.3	Induktivitätsbelag	80
7.1.4	Kapazitätsbelag	81
7.1.5	Widerstandsbelag und Ableitungsbelag	82
7.2	Dämpfung der Koaxialleitung	82
7.3	Betrachtung im Zeitbereich	84
8	Dielektrische Wellenleiter	87
8.1	Ebener dielektrischer Wellenleiter	87
8.1.1	Die Lösung der Wellengleichung	88
8.1.2	Graphische Lösung der Dispersionsgleichung	90
8.1.3	Feldbilder	90

9	Streifenleitungen	93
9.1	Überblick	93
9.2	Grundlagen der Mikrostreifenleitungen	94
9.3	Analyse und Synthese von Mikrostreifenleitungen	96
9.4	Dispersion	99
9.5	Obere Grenzfrequenzen	99
9.6	Verluste	100
9.7	Die symmetrische Streifenleitung	102
10	Wellen und Hindernisse	105
10.1	Streuung	105
10.1.1	Die Kirchhoff-Theorie	105
10.2	Beugung	106
10.2.1	Beugung an einem Schirm	106
10.3	Fresnelzonen	107
11	Antennen	109
11.1	Lösung mittels Potentialen	109
11.2	Rayleighdistanz	110
11.3	Richtdiagramm	112
11.4	Gewinn	114
11.4.1	Äquivalenter Raumwinkel	114
11.4.2	Direktivität, Richtfaktor	116
11.4.3	Gewinn über Hertz'schen Dipol	116
11.4.4	Zusammenhang zwischen Fläche und Gewinn	119
11.4.5	EIRP und ERP	121
11.4.6	Deutsch-Englisch Begriffsklärung	123
11.5	Polarisation	124
11.5.1	Kreuzpolarisation	124
11.6	Eingangsimpedanz	124
11.6.1	Antennenimpedanz des Hertz'schen Dipols	125
11.7	Bandbreite	126
11.8	Reziprozität	128
11.9	Mean Effective Gain	129
11.10	Bekannte Antennen	130
11.10.1	Abgestimmte Antennen	130
11.10.2	Leitungsbasierte Breitbandantennen	133
11.10.3	„Frequenzunabhängige“ Breitbandantennen	133
11.10.4	Antennen für zirkulare Polarisation	136
11.10.5	Flächenhafte Antennen	138
12	Wellen im freien Raum	141
12.1	Richtfunk	141
12.2	Streckendämpfung	142
12.3	Pegelplan	143
12.4	Radar	144

13 Mehrwegeausbreitung	147
13.1 <i>Zeitinvariante</i> Zweiwegeausbreitung	148
13.2 <i>Zeitvariante</i> Zweiwegeausbreitung	151
13.3 Tatsächliche Mehrwegeausbreitung - Statistische Beschreibung	154
13.4 Kleinräumiger und großräumiger Schwund	160
13.4.1 Leistungsabnahme mit der Entfernung vom Sender	160
13.4.2 Großräumiger Schwund	161
13.4.3 Kleinräumiger Schwund	161
13.5 Bandbreitedefinition	162
A Definitionen der Kreisgüte	167
A.1 Mittlere gespeicherte Energie und Verluste	167
A.2 Abklingverhalten der Eigenschwingung	167
A.3 Relative Bandbreite des Resonators	168
A.4 Definition in der Netzwerktheorie	168
A.5 RLC Serienschwingkreis	169
A.6 GLC Parallelschwingkreis	169
Index	170

Index

- Antenneneffizienz
 - dielektrische, 120
 - ohmsche, 120, 124
- Antennenwiderstand, 124
- Apertur, 138
- Ausbreitungskonstante, 40
- Beverage-Antenne, 133
- Blindleistungsflussdichte, 18
- Brechungsgesetz, 45
- Brechungsindex, 45
 - relativer, 45
- Brewster-Winkel, 46
- cut-off, 51
- Dämpfung, 55
- Dämpfungsbelag, 71
- Dämpfungskoeffizient, 82
- Dielektrikum
 - ideales, 43
 - nichtideales, 47
- Dielektrizitätskonstante, komplexe, 16, 38
- Direktivität, 116
- Dispersion, 89
- Dispersionsgleichung, 89
- Dopplerverschiebung, 152
- Drehkreuzantenne, 136
- Eindringtiefe, 41, 61
- Eingangsimpedanz, 124
- EIRP, 121
- Elliptizität, 33
- Entartung, 64
- ERP, 122
- Feed, 138
- Feldwellenwiderstand, 29, 40, 57, 66
- Fläche, wirksame, 120, 141
- Flächenwirkungsgrad, 120
- Flussdichte,
 - elektrische, 15
 - magnetische, 15
- free space loss, 142
- Fresnel-Zone, 107
- Fresnelschen Formeln, 45
- Fußpunktwiderstand, 124
- Güte, 38, 74, 131
- Ganzwellendipol, 131
- Gewinn, 118
- Grenzfrequenz, 49, 51, 64
- Grenzwellenlänge, 64
- Grundmodus, 49, 66
- Grundstreckendämpfung, 142
- Grundwelle, 49
- Gruppengeschwindigkeit, 64, 84
- Halbwellendipol, 130
- Hammerstaad-Formeln, 96
- Harms-Goubau-Leitung, 53, 57
- Helmholtz-Gleichung, 22, 110
- Hertz'scher Dipol, 113
- Hohlleiterwellenlänge, 50, 64
- Hohlraumresonator, 73
- homogenes Material, 27
- Hornstrahler, 138
- Intersymbol-Interferenz, 148
- isotropes Material, 16, 27
- Kontinuitätsgleichung, 14
- Kreuzdipol, 136
- Kreuzpolarisation, 124
- Ladungsfreiheit, effektive, 15
- Langdrahtantenne, 133
- Leiterplatte, 93
- Leitungswellenwiderstand, 37, 58, 79
- Lichtwellenleiter, 87
- lineares Material, 16
- LNB, 139
- logarithmisch-periodische Antenne, 133
- Lorentz-Kraft, 14
- Lorenz-Eichung, 110
- LOS, 157
- Maxwellgleichungen, 14

Mean Effective Gain, 129
 Mediumswellenwiderstand, 29, 38
 Mehrwegeausbreitung, 148
 Modale Lösungen, 24
 Modenindex, 51
 Modenkarte, 72
 Modus, 51, 64
 entarteter, 51

 NLOS, 157

 Oberflächenwiderstand, 60
 Ohmsches Gesetz, lokales, 15

 Parabolspiegel, 138
 Parallelplattenleitung, 48
 Pegelplan, 143
 Phasengeschwindigkeit, 28, 55, 64, 80
 Phasenmaß, 55
 Polarisation, 124
 Polarisation,
 elliptische, 33
 lineare, 32, 35
 zirkulare, 33
 p-, 43
 s-, 43
 Power Loss Method, 59
 Poyntingvektor
 komplexer, 18, 39
 reeller, 17
 Produktansatz, 23

 Quasidielektrikum, 41
 Quasileiter, 41

 Rückstreuquerschnitt, 144
 Radar, 144
 Radargleichung, 145
 Radarquerschnitt, 144
 Raumwinkel, äquivalenter, 114, 116
 Rauschabstand, 142
 Rayleigh-Verteilung, 157
 Rayleighdistanz, 112
 Reflexionsfaktor, 44
 Reflexionsgesetz, 45
 Relaxationszeit, dielektrische, 15
 Reziprozität, 128
 Reziprozitätstheorem, 128
 Rice-Verteilung, 158
 Richtcharakteristik, 112
 Richtdiagramm, 113

 Satz von
 Poynting, 17
 Schwarz, 14
 Schwund, 147
 flacher, 162
 frequenzselektiver, 148, 162
 großräumiger, 161
 kleinräumiger, 161
 Separationsansatz, 22
 signal-to-noise ratio, 142
 Skalarpotential, 109
 Skin-Effekt, 60
 Sommerfeld-Draht, 56
 Stehwellenverhältnis, 127
 Strahlungseffizienz, 117, 120
 Strahlungsintensität, 114
 Strahlungsleistung, 117
 Strahlungsleistungsdichte, 119
 Strahlungsmaß, 117
 Strahlungsvektor, 111
 Strahlungswiderstand, 124
 Stromdichte,
 Konvektions-, 15
 Leitungs-, 15
 Surface Resistance, 60

 Telegrafengleichung, 22, 79
 Transmissionsfaktor, 44

 Vektorpotential, 109
 Verlustwinkel, 16, 38
 Verschiebungsstrom, 13
 Verzerrungsfreiheit, (Heaviside), 80

 Weibull-Plot, 157, 158
 Wellenadmittanz, 39
 Wellenimpedanz, 39
 Wellenlänge, 32
 Wellenzahl, 22, 32
 Wendelantenne, 136
 Wirkleistungsflussdichte, 18

 Zenneck Welle, 53
 Zweiwegeausbreitung
 zeitinvariante, 148
 zeitvariante, 151