

Aus dem Programm

Regelungstechnik

Grundlegende Lehrbücher

Regelungstechnik für Ingenieure, von M. Reuter

Grundlagen der Regelungstechnik, von E. Pestel
und E. Kollmann

Einführung in die Regelungstechnik, Lineare Regelvorgänge,
von W. Leonhard

Einführung in die Regelungstechnik,
Nichtlineare Regelvorgänge, von W. Leonhard

Weiterführende Lehrbücher

Theorie linearer Regelsysteme, von M. Thoma

Einführung in die moderne Systemtheorie, von H. Schwarz

Stochastische Vorgänge in linearen und nichtlinearen
Regelkreisen, von H. Schlitt

Identifikation zeitvarianter Regelsysteme, von P. Kopacek

Fluidische Bauelemente und Netzwerke

von H. M. Schaedel

Definition und Berechnung der Sicherheit
von Automatisierungssystemen, von R. Konakowsky

Herbert M. Schaedel

Fluidische Bauelemente und Netzwerke

Mit 316 Bildern



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Schaedel, Herbert M.:
Fluidische Bauelemente und Netzwerke / Herbert M.
Schaedel. – Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1979.

Verlagsredaktion: *Alfred Schubert, Willy Ebert*

Meiner Frau und meinen Kindern

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1979

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1979.

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder auch für die Zwecke der Unterrichtsgestaltung gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Satz: Vieweg, Braunschweig

Buchbinder: W. Langelüddecke, Braunschweig

ISBN 978-3-528-08423-3 ISBN 978-3-663-19577-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-19577-1

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1979

Vorwort

Der Aufbau des vorliegenden Buches geht auf eine Wahlvorlesung an der Fakultät für Elektrotechnik an der RWTH Aachen zurück, die seit dem WS 1971 gehalten wird. Von Beginn an war es das erklärte Ziel, dem nachrichtentechnischen Charakter dieser nicht-elektronischen Technik gerecht zu werden. Natürlich bilden strömungsmechanische Phänomene die Grundlage aller fluidischen Elemente. Ohne fundamentale Kenntnisse der Strömungsmechanik wäre eine Entwicklung der Bauelemente und deren heutiger Stand undenkbar. Ein erfolgreicher Netzwerk- bzw. Systementwurf ist andererseits genau so wenig vorstellbar ohne grundlegende Kenntnisse der Nachrichtentechnik.

So ist es auch das Hauptziel der Vorlesung bzw. des Buches, den Grundgedanken der Ersatzschaltung konsequent zu verfolgen und die einzelnen fluidischen Bauelemente in ihren Ersatzschaltungen zu erläutern und somit das Fundament zu schaffen, auf dem das Gebäude der Netzwerke mit nachrichtentechnischen Methoden errichtet werden soll.

Das beginnt mit den Analogiebetrachtungen in **Kapitel 3**. Nach der Wahl von geeigneten Netzwerkgrößen entsprechend Spannung und Strom im elektrischen Netzwerk werden die passiven Bauelemente Widerstand, Induktivität und Kapazität im strömungsmechanischen Netzwerk definiert. Als Netzwerkgrößen dienen Druck und Massenstrom. Auch der Satz von Bernoulli für inhomogene Leiter wird durch eine Ersatzschaltung beschrieben.

In **Kapitel 4** werden die einzelnen Gleichstrombauelemente aufgeschlüsselt. Homogene und inhomogene Leiter werden in ihren linearen und nichtlinearen Anteilen auf ihre Grundsaltungen zurückgeführt.

Mit den Erkenntnissen aus Kapitel 3 und 4 ist es dann möglich, in **Kapitel 5** die Ersatzschaltungen für die verschiedenen fluidischen Analogverstärker zu finden, die damit ähnlich wie eine Röhre oder ein Transistor auf einfache Weise in ihrem Frequenzverhalten beschrieben werden können. Hierbei wird zum ersten Mal vom Begriff der Kleinsignalaussteuerung Gebrauch gemacht, um mit den Methoden für lineare Netzwerke arbeiten zu können. Dies ist in der Praxis bei signalverarbeitenden Netzwerken in der überwiegenden Anzahl der Fälle möglich. Im Gegensatz hierzu bringt Kapitel 10 in Abschnitt 7 Verfahren, die eingesetzt werden können, wenn bei impulsförmigen Signalen die nicht-linearen Eigenschaften der Bauelemente nicht vernachlässigt werden können.

Operationsverstärker und ihre Schaltungstechnik sind Gegenstand von **Kapitel 6**. Eine Dimensionierung der verschiedenen Schaltungen ist nur aufgrund ausführlicher Ersatzschaltungen möglich. Die Netzwerkberechnung erfolgt wie bei einer elektronischen Schaltung. Da annähernd „ideale“ Operationsverstärker in der Fluidik nicht angenommen werden können, sind die Rechengänge umfangreicher als in der Elektronik. Besonderer Wert wird auf die Berechnung der Phasenkompensationsnetzwerke für den Operationsverstärker gelegt, ohne die ein stabiles Arbeiten einer Schaltung nicht gewährleistet werden kann. Zur Einführung in die Thematik werden die Grundsaltungen des „idealen“ Operationsverstärkers behandelt. Die Berechnung von Netzwerken mit realen Operationsverstärkern wird hierauf aufgebaut.

Die wesentlichen Prinzipien der digitalen fluidischen Strahlelemente werden in **Kapitel 7** erläutert. Es wird gezeigt, wie das Schaltverhalten eines Haftstrahlverstärkers durch eine sinnvolle Ersatzschaltung beschrieben werden kann. Auf eine Einführung in die Schaltalgebra und deren Anwendung auf digitale Schaltungen wird bewußt verzichtet, da der logische Entwurf von Schaltungen in einer genügenden Anzahl von Werken behandelt wird.

Kapitel 8 ist den fluidischen Meßfühlern gewidmet. Neben den verschiedenartigen Strahlfühlern nehmen die fluidischen Widerstandsmeßbrücken einen breiten Raum ein. Die Anwendung dieser Meßbrücken ist ohne eine solide Operationsverstärkertechnik kaum denkbar. Ebenso werden die verschiedenen Fühler auf Oszillatorbasis diskutiert.

Ein wesentliches Bauelement in der Fluidik stellt die Übertragungsleitung in **Kapitel 9** dar, da wegen der relativ geringen Signalgeschwindigkeit die Wellenlänge der Signale schon bei Frequenzen unter 100 Hz in die Größenordnung der Schaltungsabmessungen kommen kann. Massenstrom und Druck sind dann nicht nur zeit- sondern auch ortsabhängig. Wellenvorgänge können das Verhalten einer Schaltung erheblich beeinflussen. In Analogie zur elektrischen Übertragungsleitung werden die Leitungsgleichungen gefunden, die Leitungsbeläge in ihrer Frequenzabhängigkeit berechnet und in Diagrammen dargestellt.

In **Kapitel 10** werden Wechselstromnetzwerke behandelt. Anpassungsprobleme von Leitungen an ihre Last werden diskutiert und Lösungsmöglichkeiten für Kleinsignalaussteuerung gegeben. Es folgt eine ausführliche Analyse der linearen Bauelemente Widerstand, Kapazität und Induktivität und deren Ersatzschaltungen. Spezielles Interesse ist der Realisierung linearer Widerstände mit geringem induktivem Anteil gewidmet, wie sie beispielsweise zur Beschaltung von Operationsverstärkern benötigt werden. Aufbau und Berechnung von verschiedenartigen Filterschaltungen folgen. Zum Schluß wird ein einfaches Verfahren zur Behandlung von impulsförmigen Signalen im Netzwerk mit nichtlinearen Bauelementen erläutert.

Bausteine der Trägerfrequenztechnik werden in **Kapitel 11** vorgestellt. Nach einer kurzen Einführung in die Modulationsverfahren werden Oszillatorschaltungen behandelt und ihr Einsatz als Frequenzmodulator bzw. als Frequenznormal diskutiert. Anschließend folgt ein Abschnitt über fluidische Gleichrichter, die die Voraussetzung für die verschiedenen Demodulationsschaltungen bilden, die hiernach vorgestellt werden.

Der Anhang in **Kapitel 12** bringt die wesentlichen Konstanten der Luft, zugeschnittene Größengleichungen zur Erleichterung der Arbeit bei der Berechnung von Netzwerken, Umrechnungstabellen zwischen amerikanischen bzw. englischen und deutschen Einheiten und Symbole und Schaltzeichen.

Kapitel 13 enthält eine umfangreiche Literatursammlung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. *H.-J. Tafel* vom Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung der TH Aachen, der die Vorlesung von Beginn an wohlwollend förderte.

Ein Teil des Inhalts der Kapitel 3, 4, 9 und 10 wurde bereits auf dem Fluidics State-of-the-Art Symposium in Adelphi, Maryland (USA) unter dem Titel "Signal analysis of fluidic networks" und von Fluidics Quarterly (USA) und der Advisory Group of Aerospace and Development (AGARD, Nato) abgedruckt (siehe Literatur [3.3]). Ich möchte daher Herrn *D. H. Tarumoto* von Fluidics Quarterly und Herrn *J. H. Trotmann* von der AGARD freundlichst für die Genehmigung danken, das gesamte Material in diesem Buch zu verwenden.

Mein Dank gilt ebenso den Herausgebern des Handbuchs für fluidische Meßtechnik (siehe Literatur [8.1]), Herrn Prof. Dr. *Ch. Rohrbach* und Herrn Dipl. Phys. *N. Mayer*, sowie dem VDI-Verlag für die Erlaubnis, einen Teil der in meinen Beiträgen zum Handbuch bereits veröffentlichten Abbildungen verwenden zu dürfen. Dies betrifft insbesondere die Kapitel 4 und 9.

Dem Vieweg Verlag, insbesondere den Herren *Schubert*, *Ebert* und *Langebartels* sei für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Herbert M. Schaedel

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Strömungsmechanische und thermodynamische Grundlagen	7
2.1	Strömungsformen	7
2.1.1	Laminare Strömung	7
2.1.2	Turbulente Strömung	7
2.2	Strömungsmechanische Ähnlichkeitsparameter	8
2.2.1	Reynolds-Zahl	8
2.2.2	Strouhal-Zahl	8
2.2.3	Mach-Zahl	8
2.3	Flüssigkeitsreibung	9
2.4	Grundgleichungen	10
2.4.1	Die Navier-Stokeschen Bewegungsgleichungen	10
2.4.2	Die Kontinuitätsgleichung	12
2.4.3	Die Zustandsgleichung für ideale Gase	13
2.4.4	Die Energiegleichung	15
2.4.5	Das Zähigkeitsgesetz für Luft	16
3	Analogiebetrachtungen	17
3.1	Potential und Strom im fluidischen Netzwerk	18
3.2	Die Interpretation des Satzes von Bernoulli für inkompressible oder schwach kompressible Medien durch eine Ersatzschaltung	19
3.3	Diskrete fluidische Bauelemente	21
3.3.1	Widerstand	21
3.3.2	Induktivität oder Inertanz	22
3.3.3	Kapazität eines starren Volumens	22
3.3.4	Kapazität eines veränderlichen Volumens	24
4	Gleichstrombauelemente	25
4.1	Homogene Leiter	25
4.1.1	Widerstand bei laminarer Strömung	25
4.1.2	Widerstand bei turbulenter Strömung	29
4.2	Inhomogene Leiter	30
4.2.1	Querschnittsverengungen (Düsen)	30
4.2.2	Querschnittserweiterungen (Diffusoren)	31
4.2.3	Strahlempfänger	35
4.3	Leitungsverzweigungen	36
4.3.1	Die Ersatzschaltung der „idealen“ Verzweigung	37
4.3.2	Die verlustbehaftete Verzweigung	38
4.3.3	Die symmetrische Verzweigung	41
4.4	Leitungszusammenführungen	42
4.4.1	Die Ersatzschaltung der „idealen“ Leitungszusammenführung	42
4.4.2	Die Ersatzschaltung der verlustbehafteten Leitungszusammenführung	43
4.4.3	Die symmetrische Leitungszusammenführung	45

5	Fluidische Analogverstärker	46
5.1	Strahlablenkverstärker	46
5.1.1	Gleichstromersatzschaltung von Strahlablenkverstärkern	47
5.1.2	Vereinfachte Berechnung von Druck- und Stromverstärkung für den impulsgesteuerten Strahlablenkverstärker	48
5.1.3	Kennlinien der Strahlablenkverstärker	50
5.1.4	Wechselstromersatzschaltung von Strahlablenkverstärkern	53
5.2	Wirbelkammerverstärker	62
5.2.1	Berechnung der Leerlaufdruckverstärkung unter stark vereinfachten Bedingungen	62
5.2.2	Kennlinien des Wirbelkammerverstäkers	63
5.2.3	Statische und dynamische Ersatzschaltung des Wirbelkammerverstäkers	66
5.2.4	Grundsaltungen des Wirbelkammerverstäkers	67
6	Fluidische Operationsverstärker und ihre Schaltungstechnik	69
6.1	Aufbau und Ersatzschaltung	69
6.1.1	Operationsverstärker mit turbulentem Freistrah	69
6.1.2	Operationsverstärker mit laminarem Freistrah	72
6.2	Grundsaltungen des idealen Operationsverstärkers	73
6.2.1	Proportionalverstärker-Schaltung	73
6.2.2	Summierverstärker-Schaltung	74
6.2.3	Integrier-Schaltung	75
6.2.4	Differenzier-Schaltung	76
6.2.5	Proportionalverstärker mit Differentialanteil (PD-Glied)	77
6.2.6	Proportionalverstärker mit Integralanteil (PI-Glied)	78
6.2.7	Proportionalverstärker mit Integral- und Differentialanteil (PID-Glied)	79
6.3	Grundsaltungen des realen fluidischen Operationsverstärkers	80
6.3.1	Proportionalverstärker-Schaltung	81
6.3.2	Verstärker mit Proportional- und Differentialanteil	91
6.3.3	Bootstrap-Integrator	94
6.4	Eingangs- und Ausgangswiderstand des stromgegekoppelten Operationsverstärkers	96
6.5	Großsignalbandbreite des fluidischen Operationsverstärkers	98
6.5.1	Großsignalbandbreite des fluidischen Operationsverstärkers bei Lag-Kompensation	98
6.5.2	Großsignalbandbreite des fluidischen Operationsverstärkers bei Lag-Lead-Kompensation	100
6.5.3	Wahl des Kompensationspunktes	102
7	Elemente und Bausteine der Digitaltechnik	104
7.1	Turbulenzverstärker	104
7.1.1	Koaxial-Turbulenzverstärker	104
7.1.2	Planar-Turbulenzverstärker	107
7.1.3	Schaltungen mit Turbulenzverstärkern	107
7.2	Haftstrahlelemente	109
7.2.1	Haftstrahl-Effekt (Coanda-Effekt)	109
7.2.2	Bistabiles Haftstrahlelement (Flipflop)	110
7.2.3	Unistabiles Haftstrahlelement, Inverter und OR-NOR-Gatter	119
7.2.4	Haken-Element (Halbaddierer)	120
7.3	Strahlelemente mit Wandunterstützung oder -führung	120
7.3.1	Mittensstabiles Element (Äquivalenz-Gatter)	121
7.3.2	Und-Element	121
7.3.3	Oder-Element	122

7.4	Digitale Bausteine	122
7.4.1	Binärteiler	122
7.4.2	Schmitt-Trigger	125
8	Meßwertaufnehmer	126
8.1	Temperatur-Meßfühler	126
8.1.1	Widerstandsbrückenschaltung	126
8.1.2	Oszillatoren	128
8.2	Fluidischer Dehnungsmeßstreifen	129
8.3	Fluidischer Strömungsgeschwindigkeitsfühler und Durchflußfühler	130
8.4	Drehzahl- und Winkelgeschwindigkeitsfühler	130
8.4.1	Taumelscheibe	130
8.4.2	Strahlunterbrecher	131
8.4.3	Nockenscheibe	131
8.4.4	Wirbelkammer	132
8.5	Positionsfühler mit Codierscheibe und Codelineal	132
8.6	Strahlfühler	133
8.6.1	Freistrahlschranke	133
8.6.2	Gegenstrahlfühler	133
8.6.3	Dreidüsenfühler (Düse-Fangdüse-Kreuzdüse)	134
8.6.4	Kurzabstandsfühler (Düse-Prallplatte-System)	134
8.6.5	Brennpunkt-Näherungsfühler	135
8.6.6	Streukegel-Näherungsfühler	137
8.6.7	Wirbeldüsen-Näherungsfühler	137
8.6.8	Ultraschallschranke mit Laminarstrahl	138
8.7	Meßköpfe zur Dicken- und Breitenmessung	139
8.7.1	Widerstandsmeßkopf zur Außendurchmesserbestimmung von fortlaufendem Material	139
8.7.2	Analoger Bandkantenfühler	141
8.7.3	Dickenmeßfühler	141
8.7.4	Innendurchmesser-Fühler	142
8.8	Beschleunigungsaufnehmer	143
9	Die fluidische Übertragungsleitung	144
9.1	Die Ersatzschaltung für ein kleines Stück der homogenen fluidischen Übertragungsleitung	144
9.2	Die homogene fluidische Übertragungsleitung beliebiger Länge	145
9.2.1	Wellenwiderstand und Wellenausbreitungsmaß	145
9.2.2	Die Leitungsgleichungen	146
9.2.3	Eingangsimpedanz einer Übertragungsleitung bei Abschluß mit einer beliebigen Impedanz	147
9.2.4	Die Vierpol-Ersatzschaltung einer Leitung beliebiger Länge	147
9.3	Die verlustfreie homogene fluidische Übertragungsleitung	148
9.4	Die verlustbehaftete homogene fluidische Übertragungsleitung mit frequenz- unabhängigen Leitungsbelägen	149
9.5	Die verlustbehaftete homogene fluidische Übertragungsleitung unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Leitungsbeläge	150
9.5.1	Die homogene Fluidik-Leitung mit kreisförmigem Querschnitt	151
9.5.2	Die homogene Fluidik-Leitung mit rechteckigem Querschnitt	161
9.5.3	Wellenausbreitungsmaß und Wellenwiderstand von Fluidik-Leitungen mit kreisförmigem und rechteckigem Querschnitt	165
9.5.4	Näherungsgleichungen für die Leitungsbeläge	168
9.5.5	Experimentelle Untersuchungen an fluidischen Übertragungsleitungen	170

9.5.6	Einfluß eines überlagerten Gleichstromes auf das Frequenzverhalten einer Übertragungsleitung	174
9.6	Die inhomogene fluidische Übertragungsleitung	178
9.7	Wellentypen höherer Ordnung in homogenen fluidischen Übertragungsleitungen	181
10	Wechselstromnetzwerke	184
10.1	Die beschaltete Übertragungsleitung im Netzwerk	184
10.2	Nichtlineare Bauelemente	186
10.2.1	Das Wechselstromverhalten von Düsen	186
10.2.2	Wechselstromverhalten von Diffusoren und Strahlempfängerdüsen	194
10.3	Lineare Bauelemente	195
10.3.1	Kapazität	197
10.3.2	Induktivität	201
10.3.3	Widerstand	202
10.4	Filter aus diskreten Bauelementen	205
10.4.1	RC-Tiefpaßfilter	205
10.4.2	RL-Tiefpaßfilter	206
10.4.3	RLC-Tiefpaßfilter	208
10.5	Resonanzkreise	209
10.5.1	Parallelresonator	209
10.5.2	Reihenresonator	211
10.6	Leitungsverzweigungsfiler	213
10.7	Impulsförmige Signale (Großsignalaussteuerung)	215
11	Bausteine der Trägerfrequenztechnik	223
11.1	Allgemeines	223
11.2	Modulationsarten	225
11.2.1	Amplitudenmodulation	225
11.2.2	Frequenz- und Phasenmodulation	226
11.3	Oszillatoren	229
11.3.1	Oszillator mit äußerer Rückführung als Frequenzmodulator	229
11.3.2	Oszillator mit Federresonator-Stabilisierung als Frequenznormal	231
11.4	Auskoppelstufe für Wechselstromsignale	233
11.5	Gleichrichter	234
11.5.1	Aktiver Gleichrichter (Diskriminator)	234
11.5.2	Passiver Gleichrichter	236
11.5.3	Gleichrichtung einfacher, unmodulierter Wechselsignale	237
11.6	Demodulation	238
11.6.1	Demodulation amplitudenmodulierter Signale	239
11.6.2	Demodulation phasenmodulierter Signale	240
11.6.3	Demodulation frequenzmodulierter Signale	241
11.7	Schwebungsdetektor	247
12	Anhang	250
12.1	Konstanten der Luft	250
12.2	Zugeschnittene Größengleichungen	251
12.3	Umrechnung amerikanischer und englischer Maßeinheiten	253
12.4	Schaltzeichen und Symbole	254
12.5	Einige wichtige Beziehungen zur Vektorrechnung	257
12.6	Komplexe Schwingung und komplexe Amplitude	258
13	Literatur	260
	Sachwortverzeichnis	268

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche
<u>A</u>	komplexe Leerlauf-Druckverstärkung des Operationsverstärkers in Kap. 6
a	Seitenverhältnis Höhe/Breite
<u>a</u>	Vierpolparameter in Abschnitt 9.2.4
b	Breite
c	Schallgeschwindigkeit
c_a	Schallgeschwindigkeit im freien Raum
C	Kapazität
C_{ap}	Koeffizient in Gl. (4.1.17)
C_{PR}	Druckrückgewinnungsfaktor
C_{PRi}	idealer Druckrückgewinnungsfaktor
C_R	Widerstandsbeiwert im Rechteckkanal
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen
D	Durchmesser
D_e	äquivalenter Durchmesser = $4 \cdot \text{Fläche} / \text{Umfang}$
e	innere Energie in Abschnitt 2.4.4
e	mechanisches Potential in Abschnitt 3.1
f	Frequenz
f_v	charakteristische Frequenz
f	Reibungsfaktor in Abschnitt 4.1.2
F	Kraft
<u>F</u>	Frequenzgang
G	Leitwert
G_p	Druckverstärkungsfaktor
G_m	Massenstromverstärkungsfaktor
h	Höhe
i	Enthalpie in Abschnitt 2.4.4
\dot{I}	Impuls pro Zeiteinheit
k	Wärmeleitfähigkeit in Abschnitt 2.4.4
K	Korrekturfaktor, Beiwert
L	Induktivität
l	Länge
M, m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
<u>\dot{m}</u>	komplexe Massenstromamplitude
Ma	Mach-Zahl

P	Leistung
p	Überdruck
\underline{p}	komplexe Druckamplitude
\bar{p}	mittlerer Überdruck
p^*	Absolutdruck
p_0	Bezugsdruck (z.B. Atmosphärendruck)
Q	Güte
r	dynamischer Widerstand
R	Widerstand
R_g	Gaskonstante
Re	Reynolds-Zahl
S	Strouhal-Zahl
s	Steifigkeit in Abschnitt 3.1
s	Entropie in Abschnitt 3.3
t	Zeit
t_S	Signaltransportzeit
t_v	Strahllaufzeit
T	Temperatur
T_V	Vorhaltzeit in Kap. 6
T_N	Nachstellzeit in Kap. 6
T_t	Totzeit in Kap. 6
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
\underline{v}	Geschwindigkeitsvektor
x	Koordinate
y	Koordinate
\underline{Y}	Admittanz
z	Koordinate
\underline{Z}	Impedanz
\underline{Z}_0	Wellenwiderstand
Z_{S0}	Wellenwiderstand der verlustfreien Leitung
α	Winkel in Abschnitt 4.3
α_i	Eigenwert
α_1	Dämpfungsmaß
β	Winkel in Abschnitt 4.3
β_1	Phasenmaß
γ_1	Wellenausbreitungsmaß
Γ	Reflektionsfaktor

δ	Auslenkung
ϵ	Koeffizient
ζ	Widerstandszahl
η	Wirkungsgrad
Θ	Winkel
κ	Adiabatexponent (1,405 für Luft)
λ	Wellenlänge
λ	Verlustbeiwert in Abschnitt 4.3
μ	dynamische Zähigkeit
ν	kinematische Zähigkeit
ρ	Dichte
τ	Zeitkonstante
φ	Winkel
ϕ	Dissipationsfunktion
ω, Ω	Kreisfrequenz
ω_ν	charakteristische Kreisfrequenz