

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XXIII
Abkürzungen	XXV
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Signal- und modellbasierte Diagnosekonzepte	3
2.2 Leckagediagnose in fluidtechnischen Systemen	5
2.3 Diagnose von Transportleitungen	7
2.4 Modellierung	12
2.4.1 Leitungsströmungen (Gas, Flüssigkeit)	12
2.4.2 Pneumatische Systeme	14
2.5 Zusammenfassung und Fazit	17
3 Ziel und methodisches Vorgehen	19
3.1 Anforderungen an das diagnoseorientierte Modell	19
3.2 Gewählte Vorgehensweise	20
3.3 Untersuchte Systemkonfiguration	22
3.3.1 Pneumatisches System im Nutzfahrzeug am Beispiel LKW	22
3.3.2 Prüfstand im Labor (LFPS)	26
3.3.3 Verwendete CAE-Tools	29
4 Fundamentale Modellierung des pneumatischen Systems	31
4.1 Fluidsysteme	31
4.1.1 Luft als ideales Gas	32
4.1.2 Wichtige Parameter, Kenngrößen und Begriffe	32
4.1.3 Thermodynamische Grundlagen	35
4.2 Strömungs-Differentialgleichungen	37
4.2.1 Herleitung	37
4.2.2 Umformung auf Massenströme	39
4.2.3 Mathematische Einordnung	43
4.2.4 Mögliche vereinfachende Annahmen	45

4.2.5	Abschätzung des Rohrreibungskoeffizienten	48
4.3	Modellierung pneumatischer Systemkomponenten	49
4.3.1	Bauteile mit festem oder variablem Volumen	49
4.3.2	Drosselstellen und Ventile	52
4.3.3	Kopplungen und Verzweigungen	55
4.3.4	Leckagen	57
5	Analyse des Systemverhaltens	59
5.1	Wärmekoeffizienten	59
5.2	Pneumatische Systemkomponenten	61
5.2.1	Speichertank	61
5.2.2	Luftfeder	62
5.2.3	Exkurs: Indirekte Sensorinformation aus Tank und Feder	66
5.2.4	Leckage	70
5.2.5	Ventil	73
5.3	Pneumatische Leitung mit stationärer Strömung	74
5.4	Pneumatische Leitung mit transienter Strömung	77
5.4.1	Speichertank zu kleinem Tank	77
5.4.2	Speichertank zu Luftfeder	80
5.5	Gepulster Füllvorgang	82
5.5.1	Speichertank zu kleinem Tank	82
5.5.2	Speichertank zu Luftfeder	83
5.6	Periodisch und sprunghaft angeregte Strömung	85
5.7	Ergebnis der Systemanalyse	88
6	Diagnoseorientierte Modellierung 1: ZLP-Leitungsmodule	89
6.1	Übertragungsverhalten eines Leitungsmoduls	90
6.1.1	Vereinfachte, isotherme Betrachtung	90
6.1.2	Herleitung ohne Vereinfachungen (quasi-isotherm)	94
6.1.3	Herleitung mit Energiegleichung (adiabat)	98
6.2	Kombination mit anderen Komponenten	101
6.2.1	Beispiel „TLT“	103
6.2.2	Erweiterung um ein Hilfsvolumen	104
6.3	Integration von Leckagen im Leitungsmodul	106
6.3.1	Vorgabe des Leckagemassenstroms	106
6.3.2	Implizite Berechnung des Leckagemassenstroms	109
6.4	Umwandlung in andere Darstellungsformen	110
6.4.1	System gewöhnlicher Differentialgleichungen	110
6.4.2	Ableitung einer Zustandsraumdarstellung (ZRD)	111
6.5	Methodik der „ZLP-Leitungsmodule“ auf einen Blick	114
6.6	Bewertung in Bezug auf die Eignung zur Diagnose	115

7 Diagnoseorientierte Modellierung 2: Nutzung der Elektrischen Analogie	117
7.1 Physikalische Größen und elementare Bauelemente	117
7.1.1 Widerstand	118
7.1.2 Induktivität	120
7.1.3 Kapazität	121
7.2 Leitungen	122
7.3 Nachbildung spezieller Komponenten und Effekte	123
7.4 Beispiele	127
7.5 Bewertung in Bezug auf die Eignung zur Diagnose	129
8 Verifikation der diagnoseorientierten Modellierungsansätze	131
8.1 ZLP-Leitungsmodulen bei stationärer Strömung	131
8.1.1 Leitung ohne Leckage	131
8.1.2 Leitung mit Leckage	133
8.2 ZLP-Leitungsmodulen bei transienten Vorgängen	134
8.2.1 Vorbetrachtungen zum ZLP-Leitungsmodulssystem	134
8.2.2 Leitung (Komponenten an den Enden nicht betrachtet)	138
8.2.3 Leitung mit Komponenten	145
8.2.4 Beispiel „TLT“	149
8.3 Elektrische Analogie	153
8.4 Gesamtfazit der Verifikation	156
9 Anwendung zur Leckagediagnose	157
9.1 Direkte Nutzung von Vergleichsmodellen	157
9.1.1 Direkte Messung von Druck und Massenstrom	158
9.1.2 Indirekte Messung des Massenstroms	161
9.1.3 Bewertung	162
9.2 Beobachterbasiertes Verfahren	163
9.2.1 Struktur des Diagnosekonzeptes	163
9.2.2 Herleitung des Grundkonzeptes	165
9.2.3 Bewertung und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung/Adaption	171
9.3 Schätzerbasiertes Verfahren	172
9.3.1 Erläuterung des Grundkonzeptes	173
9.3.2 Ergänzung durch virtuelle Leitungsstücke	174
9.3.3 Bewertung und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung/Adaption	175
9.4 Fazit der Anwendungsbetrachtung	176
10 Zusammenfassung	177
A Ergänzungen zur Systemmodellierung	181
A.1 Dynamische Viskosität von Luft	181
A.2 Spezifische Wärmeleitfähigkeit von Luft	182
A.3 Herleitung der Strömungsdifferentialgleichungen	183
A.3.1 Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)	183

A.3.2 Impulserhaltung (Impulsgleichung)	185
A.3.3 Energieerhaltung (Energiegleichung)	189
A.4 Herleitung der Drosselgleichung	192
A.5 Bewegungsgleichungen auf einen Blick	197
A.6 Maximale Strömungsgeschwindigkeit	197
A.7 Rohreibungskoeffizient im Moody-Diagramm	198
A.8 Approximation des Rohreibungskoeffizienten	202
A.9 Wertebereich einzelner Terme der Impulsgleichung	204
B Detailinformationen zum pneumatischen System	207
B.1 Nutzfahrzeug	207
B.2 Prüfstand	211
C Ergänzungen zur Systemanalyse	215
C.1 Hinweis zu Sensoren und Filterung von Messwerten	215
C.2 Indirekte Sensorinformation	217
C.2.1 Linearisiertes Modell des Speichertanks	217
C.2.2 Indirekte Sensorinformation durch die Luftfeder	219
C.2.3 Initialdruck aus Strom und Spannung am Ventil	223
D Ergänzungen zur diagnoseorientierten Modellierung	225
D.1 Detaillierte Herleitungen zum ZLP-Leitungsmodulsystem	225
D.1.1 Umformung der Übertragungsfunktionen um Drücke an beiden Leitungsenden vorgeben zu können	225
D.1.2 Koeffizienten bei Approximation der Hyperbelfunktionen	226
D.1.3 Beispiele für mögliche Übertragungsfunktionen in TLT	226
D.1.4 Beispiel für eine Übertragungsfunktion in TLVLTmL	228
D.1.5 Simulationsmodell auf Basis des ZLP-Leitungsmodulsystems	229
D.1.6 Zustandsraumdarstellung für das Beispiel „TLT“	230
D.1.7 Ergänzungen zur Herleitung ohne Vereinfachungen	235
D.1.8 Ergänzungen zur Herleitung mit Energiegleichung	241
D.2 Detaillierte Herleitungen zur elektrischen Analogie	242
D.2.1 Ersatzschaltung für einen Zylinder	242
D.2.2 Ersatzschaltung für eine Luftfeder	243
D.2.3 Ergänzungen zu „TLT“ und „TLVLTmL“	243
E Ergänzungen zur Verifikation	245
E.1 Stationärer Zustand (ZLP-Leitungsmodul)	245
E.1.1 Massenstrom im Fall ohne Leckage	245
E.1.2 Druck im Fall mit Leckage	245
E.2 Transiente Vorgänge (ZLP-Leitungsmodul)	246
E.2.1 Leitung mit Leckage ohne Komponenten	246
E.2.2 Beispiel „TLT“	253

F Ergänzungen zu Diagnosekonzepten	255
F.1 Wichtige Begriffe und Definitionen	255
F.2 Nutzung von Vergleichsmodellen	256
F.2.1 Ergänzende Diagramme zum Beispiel 1	256
F.3 Beobachterbasiertes Verfahren	258
F.3.1 Grundkonzept	258
G Studentische Arbeiten und Veröffentlichungen	261
G.1 Arbeiten in direktem Zusammenhang	261
G.2 Arbeiten in anderen Themenbereichen	262
G.3 Veröffentlichungen	262
Literaturverzeichnis	263
Lebenslauf	279