

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	VI
Koordinatensystem	XII
verwendete Variablen	XIII
verwendete Abkürzungen	XV
Kapitelübersicht	XVI
Abstract	XVIII
Prolog	1
Literaturrecherche	5
1 Grundlagen Schienenfahrzeuge	9
1.1 Das rollende Rad	9
1.1.1 Rollbedingung	9
1.1.2 Schlupf	10
1.2 Grundlagen Radsatz	11
1.3 Grundlagen Losradsatz	11
1.4 Laufdynamik eines Drehgestells	13
1.4.1 Drehgestell mit konventionellen Radsätzen	13
1.4.2 Drehgestell mit Losradsätzen	14
1.5 Gummigefederte Räder	15
1.5.1 Geringerer Aufwand für Neubereifung	15
1.5.2 Erhöhte Tolerierung von Gleislagefehlern	16
1.5.3 Reduzierung der ungefederten Massen	16
1.5.4 Reduzierung von Körperschall	16
1.5.5 Beeinflussung der Luftschallemission	17
1.5.6 Erhöhter Bauraumbedarf als Vollräder	17
1.5.7 Thermische Probleme	17
1.5.8 Reduzierung der kritischen Geschwindigkeit	18
1.5.9 Relaxation im Elastomer	18
2 Eisenbahnlärm	19
2.1 Dominanter Lärm in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit	19
2.1.1 Schallemissionen bei Stillstand bzw. Langsamfahrt	20
2.1.2 Schallemissionen im mittleren Geschwindigkeitsbereich	20
2.1.3 Schallemissionen im Hochgeschwindigkeitsbereich	20
2.2 Kurvenquietschen als Sonderform von Bahnlärm	21
2.2.1 Eigenschaften des Kurvenquietschens	21
2.2.1.1 Hörsensibler Bereich	21
2.2.1.2 Ausgeprägte Tonalität des Frequenzspektrums	21
2.2.1.3 Hoher disharmonischer Anteil	22

2.2.1.4 Geringe Vorhersagbarkeit	22
2.2.1.5 Zeitliche Instabilität	22
2.2.1.6 Schlechtes Bild in der Öffentlichkeit	22
2.2.2 Entstehungsmechanismus Kurvenquietschen	22
3 Ziel und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit	27
3.1 Problemlösungsansatz von der Quelle zum Empfänger	27
3.1.1 Generelle Vermeidung des Schlupfes zwischen Rad und Schiene	27
3.1.1.1 Radien in Bögen vergrößern	27
3.1.1.2 Radial einstellende Fahrwerke	28
3.1.1.3 keine Stahlräder bzw. keine Stahlschienen verwenden	30
3.1.2 Quietschminimierung durch Reibwertbeeinflussung	30
3.1.2.1 Laufflächenschmieranlagen an Schiene oder Rad	31
3.1.2.2 Beregnungsanlage für Straßenbahnschienen	32
3.1.2.3 Aufschweißungen auf Schiene	32
3.1.3 Kurvenquietschen am Rad selbst bekämpfen	33
3.1.3.1 Maßnahmen im Kraftfluß	33
3.1.3.2 Maßnahmen neben dem Kraftfluß	34
3.1.3.3 Radseitige mitdrehende Schalldämmung	38
3.1.3.4 Aktiver Tilger	39
3.1.4 Quellennahe Schallreduzierung	40
3.1.4.1 Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger vergrößern	40
3.1.4.2 Schalldämmung am Fahrzeug	41
3.1.4.3 Gegenschallanlage am Fahrzeug	41
3.1.4.4 Schalldämmung an der Schiene	42
3.1.4.5 Entdröhnung der Schiene	43
3.1.4.6 Schalldämmung neben dem Gleis	44
3.1.5 Empfängerseitige Schallreduzierung	44
3.1.6 Fokussierung der Maßnahmen	44
3.2 Geläufige Radbauarten	45
3.2.1 Dämpfungsschicht durch Radlast primär auf Druck beansprucht	45
3.2.2 Dämpfungsschicht durch Radlast primär auf Schub beansprucht	46
3.2.3 Mischbauformen aus 3.2.1 und 3.2.2	47
3.2.4 Tabellarische Übersicht geläufiger Radtypen	48
3.3 Einfluß des Fahrweges	49
3.3.1 Schallemissionsanteil der Schiene	49
3.3.2 Zielkonflikt Luftschall - Körperschall	52
4 Erstellung eines Simulationsmodells	55
4.1 SIMPACK als MKS-Tool	56
4.1.1 Randbedingungen speziell für Kurvenquietschen	56
4.1.2 Übergabe FEM in MKS	58
4.1.3 Organigramm Kompletmodell	60
4.2 Implementierung Straßenbahnrad	61
4.2.1 Implementierung Radscheibe	61
4.2.1.1 Geometrie Radscheibe	62
4.2.1.2 Schnittstellen Radscheibe	63
4.2.1.3 Eigenwertanalyse Radscheibe	64
4.2.2 Implementierung Radreifen	65

4.2.2.1 Geometrie Radreifen	66
4.2.2.2 Schnittstellen Radreifen	67
4.2.2.3 Eigenwertanalyse Radreifen	68
4.2.3 Gummifederung	69
4.2.3.1 Geometrische Daten	71
4.2.3.2 Strombrücken	72
4.2.3.3 Statische Kennwerte	73
4.2.3.4 Dynamische Kennwerte	76
4.2.3.5 Abbildung der Gummielemente durch einfaches Kelvin-Voigt-Element	78
4.2.3.6 Abbildung der Gummielemente durch komplexes Gummimodell	79
4.2.3.7 Vergleich der verschiedenen verwendeten Gummimodelle	81
4.2.4 Eigenwertanalyse Gesamttrad	82
4.3 Implementierung Gesamtfahrzeug	83
4.3.1 Implementierung Radträger	84
4.3.1.1 Geometrie Radträger	84
4.3.1.2 Schnittstellen Radträger	85
4.3.1.3 Mechanische Daten Radträger	88
4.3.2 Implementierung Drehgestellrahmen	88
4.3.2.1 Geometrie Drehgestellrahmen	89
4.3.2.2 Schnittstellen Drehgestellrahmen	89
4.3.2.3 Mechanische Daten Drehgestellrahmen	90
4.3.3 Implementierung Drehgestell	90
4.3.3.1 Ballastmasse	91
4.3.3.2 Externer Antrieb des Drehgestells	92
4.4 Implementierung des Rad-Schiene-Kontaktes	94
4.4.1 Rad-Schiene-Kontakt in SIMPACK bei starrem Radreifen	97
4.4.1.1 Rad- und Schienenprofile	97
4.4.1.2 Rad-Schiene-Kontaktpunkt	98
4.4.1.3 Modellierung der Reibung zwischen Rad und Schiene	100
4.4.2 Rad-Schiene-Kontakt in SIMPACK bei elastischem Radreifen	102
4.4.2.1 Implementierung des elastischen Radreifens	103
4.4.2.2 Quintessenz des rollenden elastischen Radreifens	105
4.4.2.3 Kein polygonales Abrollen des Radreifens	106
4.5 Modellierung Fahrweg	107
4.5.1 Schienenprofil in der Simulation	107
4.5.2 Referenzstrecke	108
4.5.3 Starre kontinuierliche Schienenlagerung	109
4.6 Grenzen des Modells	110
4.6.1 Kurze Simulationszeiten	110
4.6.2 y-Position des Rad-Schiene-Kontaktpunktes nicht korrekt	111
4.6.3 Gleis nicht als Körper	111
4.6.4 Höhere Quietschmoden (>2000 Hz) nicht abbildbar	111
4.6.5 Keine plastische Deformation im Rad-Schiene-Kontakt	112
4.7 Auswertung der Simulationsergebnisse	112
5 Straßenbahnradprüfstand	114
5.1 Randbedingungen	114
5.2 Aufbau des Prüfstandes	115
5.2.1 „Endlosschiene“ bzw. Schienenrad	115

Inhaltsverzeichnis

5.2.2 Straßenbahnrad (Realteil)	117
5.2.3 Haupttrahmen	118
5.2.4 Verstelleinrichtungen	119
5.2.4.1 Anlaufwinkel und y-Position	119
5.2.4.2 Normalkraft und Seitenführungskraft	120
5.2.4.3 Kompensation Unrundheit Räder	121
5.2.5 Antrieb	122
5.2.7 Kompletierter Prüfstand	124
5.3 Meßtechnik	124
5.3.1 Drehzahlsensor	124
5.3.2 Beschleunigungssensoren	125
5.3.3 Mikrophon	126
5.3.4 Datenverarbeitung Meßtechnik	126
5.4 Probleme bei Prüfstandsmessungen	126
5.4.1 Massiver Verschleiß am Schienenrad	127
5.4.2 Resonanzverschiebung durch Schienenrad	128
5.4.3 Verbleibende Probleme bei Prüfstandsmessungen	133
5.4.3.1 Trotz realer Werkstoffe hoher Verschleiß an beiden Rädern	133
5.4.3.2 Störeinflüsse größer als in Simulation	135
5.4.3.3 Abweichend Peripherie des Straßenbahnrades	136
5.5 Auswertung der Prüfstandsergebnisse	137
5.5.1 Auswertung Beschleunigungsaufnehmer	138
5.5.2 Auswertung Luftschall	139
6 Verifikation	141
6.1 Vorwort zur Verifikation des Kurvenquietschens	141
6.2 Verifikationsbasis	142
6.2.1 Verifikationsmessungen am Bahnhof Pasing/München	142
6.2.2 Verifikationsmessungen im Depot der MVG	143
6.2.3 Daten Verifikationsmessungen	144
6.2.4 Bandbreite an Quietschfrequenzen	145
6.3 Verifikation Simulation – reale Straßenbahn	146
6.3.1 Verifikation bei neuem Radreifen	146
6.3.2 Verifikation bei abgefahretem Radreifen	148
6.3.3 Zusammenfassung Verifikation Simulation	151
6.4 Verifikation Prüfstand – reale Straßenbahn	151
6.4.1 Verifikation bei neuem Radreifen	151
6.4.2 Verifikation bei abgefahretem Radreifen	153
6.4.3 Zusammenfassung Verifikation Prüfstand	155
6.5 Abgleich Prüfstand – Simulation	155
7 Erkenntnisse über das Kurvenquietschen	156
7.1 Verhaltensunterschied Losradsatz zu konventionellem Radsatz	156
7.2 Abhängigkeit des Kurvenquietschens von der Radposition	158
7.3 Einflußparameter Fahrgeschwindigkeit	160
7.4 Analyse des Schlupfes am Rad-Schiene-Kontakt	162
7.5 Analyse des Radlasteinflusses	165
7.6 Analyse der Abhängigkeit des Abfahrzustandes der Radreifen	168

7.7 Analyse des Primärfederungseinflusses	170
7.8 Einfluß der Lateralposition des Rad-Schiene-Kontaktes	172
7.9 Analyse der Abhängigkeit des Reibwertverlaufes	173
7.9.1 Modellvorstellung des reibwertbasierten Reibschwingers	175
7.9.2 Anwendbarkeit des reibwertbasierten Reibschwingers	176
7.9.3 Modellvorstellung des normalkraftbasierten Reibschwingers	176
7.9.4 Anwendbarkeit des normalkraftbasierten Reibschwingers	177
7.9.5 Nachweis des Reibwerteinflusses am Prüfstand	178
7.9.5.1 Zusammenfassung des Reibwerteinflusses	178
7.10 Modifikation der schallabstrahlenden Fläche	179
7.11 Rotationsanalyse der Schwingfiguren	182
7.12 Zeitliche Instabilität	185
7.13 Modifizierte Dämpfung des Radreifens	187
7.14 Modifizierte Dämpfung der Elastomereinlage	189
7.15 Einfluß der Gummiklotzsteifigkeit	192
7.16 Beeinflußbarkeit durch Radschallabsorber	196
7.17 Vermutete Zusammenhänge	196
7.17.1 Einfluß des Gummivolumens	196
7.17.2 Chaotisches Verhalten?	197
7.17.3 Gegenseitiger Ausschluß von Schwingformen	199
7.17.4 Theorie der benötigten Mindestleistung	200
7.17.5 Synthese Geräusch Kurvenquietschen	201
8 Konzeption eines nicht quietschenden Straßenbahnrades auf Basis Bo54	203
8.1 Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse	203
8.2 Randbedingungen für neues Konzept	204
8.3 Konzeption eines neuen Gummiklotzes für Bo54	205
8.3.1 Konzept mit integrierter Stahlfeder	205
8.3.1.1 Sicherstellung der Traktion	206
8.3.1.2 Sicherstellung der Montage	207
8.3.1.3 Fazit Stahlfeder	209
8.3.2 Festigkeitsoptimierung von Elastomeren durch Fadeneinlage	209
8.3.3 Vorabschätzung der Wirksamkeit eines Tilgerkonzeptes	212
8.3.3.1 Funktionsprinzip eines Tilgers	212
8.3.3.2 Grob festlegung des Tilgerkonzeptes	214
8.3.3.3 Simulationsmodell mit Einmassenschwinger als Tilger	215
8.3.3.4 Simulationsmodell mit doppelt wirkendem Tilgerkonzept	216
8.3.3.5 Breitbandigkeit des Tilgerkonzeptes	217
8.3.4 Bauart mit doppelt wirkendem Tilger	218
8.3.5 Auslegung des doppelt wirkenden Tilgers	219
8.3.6 Fertigung und Erprobung eines quietschhemmenden Prototypens	220
8.3.7 Fazit bezüglich armierter Gummifederung mit integrierten Tilgern	225
9 Abschließende Betrachtung und Ausblick	227
9.1 Empfehlung	228
9.2 Ausblick	229
Anhang A: Technische Daten R2.2 der MVG (Typ GT6N)	230

Anhang B: Straßenbahn als Sonderform der Eisenbahn	231
B.1 Gemeinsam genutzte Verkehrsflächen	231
B.2 Güterverkehr als Sonderform	231
B.3 Keine Interoperabilität	231
B.4 Elektrotraktion vorherrschend	231
B.5 Geringere Radlasten und kleinere Räder	232
B.6 Geringere Maximalgeschwindigkeiten	232
B.7 Rillenschiene statt Vignolschiene	232
B.8 Kurven mit geringen Radien	232
B.9 Erhöhte Häufigkeit von Gleislagefehlern	233
B.10 Spurkranzanlauf als Betriebszustand	233
B.11 Erhöhter Verschleiß im Rad-Schiene-Kontakt	233
B.12 Niederflur als etablierter Standard	233
B.13 Obskure Fahrwerke	233
B.14 Ein- und Zweirichtungsfahrzeuge	234
B.15 Losradfahrwerke als Standard	234
B.16 Etablierte elastische Zwischenschicht im Rad	234
B.17 Adaptierte Steifigkeit der Schienenlagerung	234
B.18 Geänderter Zuständigkeitsbereich	235
Anhang C: Grundlagen zu Schall und Lärm	236
C.1 Physikalische Eigenschaften	236
C.2 Ausbreitung von Schallereignissen	237
C.3 Quantitative Erfassung des Schalldrucks	238
C.4 Töne, Klänge und Oberwellen	239
C.5 Schalldruck und Schalleistung	240
C.5.1 Schalldruck	240
C.5.2 Schall-Leistung	241
C.5.3 Superposition von Schalldrücken	242
C.6 Beurteilungspegel	243
C.7 Quintessenz Schall	243
Anhang D: Statische Meßwerte Serienklötze	244
Anhang E: Dynamische Meßwerte Serienklötze	246
Anhang F: Impulsantworten physischer Bauteile	252
Quellenverzeichnis	261
Quelle für Satellitenbilder	270
Im Umfeld dieser Arbeit entstandene Diplomarbeit	270