

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Die Entwicklung von Oberleitungen und Stromabnehmern | 2 |
| 1.1.1 | Erste Modellvorstellungen und ihr Einfluß auf den Entwicklungsprozeß | 3 |
| 1.1.2 | Messungen am realen System | 8 |
| 1.2 | Realitätsnahe Modelle und numerische Simulation | 10 |
| 1.2.1 | Verschiedene Anwendungen der Simulation | 11 |
| 1.2.2 | Anforderungen an die Simulation und gegenwärtig bestehende Probleme | 14 |
| 1.3 | Zur vorliegenden Arbeit | 17 |
| 2 | Modellierung von Oberleitungen und Stromabnehmern | 19 |
| 2.1 | Modellierung der Oberleitungs-Kettenwerke | 19 |
| 2.1.1 | Modellierung von Fahrdrabt, Trageilen und Beiseil | 20 |
| 2.1.2 | Eigenschaften der verschiedenen Draht-Modelle | 22 |
| 2.1.3 | Modellierung der Hänger | 30 |
| 2.1.4 | Modellierung der Seitenhalter | 31 |
| 2.1.5 | Untersuchung der Wellenreflexion an einer Punktmasse | 36 |
| 2.1.6 | Modellierung der Abspannungen und der Mastbefestigungen der Drähte | 41 |
| 2.2 | Modellierung der Stromabnehmer | 42 |
| 2.2.1 | Lineare Mehrmassenmodelle | 43 |
| 2.2.2 | 7-FHG-Modell nach PETRI | 45 |
| 3 | Numerische Simulation von Oberleitungs-Kettenwerken | 47 |
| 3.1 | Übersicht über bisher verwendete Verfahren | 47 |
| 3.1.1 | Modalanalyse | 47 |
| 3.1.2 | Frequenzabhängige FEM | 48 |
| 3.1.3 | Finite-Elemente-Methode | 49 |
| 3.1.4 | Finite-Differenzen-Verfahren | 50 |
| 3.1.5 | Charakteristikenmethode | 50 |
| 3.1.6 | D'Alembertsches Wanderwellenverfahren | 50 |
| 3.1.7 | Vergleich der Verfahren | 51 |
| 3.2 | Konzept für die numerische Simulation | 52 |
| 3.3 | Einfluß der Ortsdiskretisierung | 53 |
| 3.3.1 | Semidiskretisierungen der Saiten-DGL | 55 |
| 3.3.2 | FDM-Semidiskretisierungen beim Euler-Bernoulli-Balken | 61 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.3 | FDM-Semidiskretisierungen beim Timoshenko-Balken | 63 |
| 3.4 | Integrationsverfahren | 66 |
| 3.4.1 | Kriterien zur Auswahl geeigneter Verfahren | 67 |
| 3.4.2 | Vorauswahl geeignet erscheinender Integrationsverfahren | 71 |
| 3.4.3 | Untersuchung expliziter Runge-Kutta-Verfahren | 72 |
| 3.4.4 | Die Trapezregel als implizites RKV | 77 |
| 3.4.5 | Zweischrittverfahren für Differentialgleichungen 2. Ordnung | 78 |
| 3.4.6 | Implizites Mehrschrittverfahren der Schrittzahl 3 für Differentialgleichungen 2. Ordnung | 83 |
| 3.4.7 | Verfahrensauswahl | 84 |
| 3.5 | Volldiskretisierungen: FDM und Zweischrittverfahren | 85 |
| 3.5.1 | Volldiskretisierungen der Saiten-DGL | 86 |
| 3.5.2 | Volldiskretisierungen beim Euler-Bernoulli-Balken | 90 |
| 3.6 | Spezielle Formeln für Seitenhalter, Hänger und andere Komponenten | 92 |
| 3.6.1 | Seitenhalter | 92 |
| 3.6.2 | Hänger | 93 |
| 3.6.3 | Befestigungspunkte der Y-Beiseile | 95 |
| 3.6.4 | Abspannungen der Drähte | 95 |
| 3.7 | Simulation eines Lastabwurfversuches | 96 |
| 4 | Numerische Behandlung der Stromabnehmer-Differentialgleichungen | 101 |
| 4.1 | Einfache Mehrmassenmodelle | 101 |
| 4.1.1 | Integration der Differentialgleichungen mit der Trapezregel | 103 |
| 4.1.2 | Integration der Differentialgleichungen mit dem BDF 2. Ordnung | 105 |
| 4.2 | Stromabnehmermodell mit einzeln gefederten Schleifleisten | 106 |
| 5 | Kopplung von Stromabnehmer und Kettenwerk | 109 |
| 5.1 | Numerische Behandlung einer konstanten Wanderlast | 109 |
| 5.1.1 | Einfluß der Ortsdiskretisierung | 110 |
| 5.1.2 | Konvergenz der Lösungen bei numerischer Integration | 117 |
| 5.2 | Kontaktkraftbestimmung bei dynamisch gekoppeltem System | 118 |
| 5.2.1 | Kopplung bei Verwendung unterschiedlicher Integrationsverfahren | 118 |
| 5.2.2 | Kontaktkraftberechnung für eine Wandermasse | 125 |
| 5.2.3 | Verbesserter Kraftaufteilungsansatz | 133 |
| 5.2.4 | Andere Verfahren zur Kopplung von Stromabnehmer und Fahrdrabt | 138 |
| 6 | Ergebnisse einiger Simulationsrechnungen | 144 |
| 6.1 | Kettenwerk unter dem Einfluß einer konstanten Wanderlast | 145 |
| 6.1.1 | Einfluß des Hängerausknickens und der Fahrdrabt-Biegesteifigkeit | 148 |
| 6.1.2 | Konvergenz der Ergebnisse | 149 |
| 6.2 | Simulation mit 4-Massen-Modell für den Stromabnehmer | 152 |
| 6.2.1 | Einfluß der Ortsauflösung auf die Simulationsergebnisse | 156 |
| 6.2.2 | Einfluß der Fahrdrabt-Biegesteifigkeit | 160 |
| 6.2.3 | Einfluß des Hängerausknickens | 165 |
| 6.2.4 | Einfluß des statischen Fahrdrabtdurchhanges | 167 |
| 6.3 | Simulationen zur Stromabnehmer-Modellierung | 171 |
| 6.3.1 | Berücksichtigung der Steifigkeit des Balges | 172 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.3.2 | Verwendung einer Kopplungsfeder | 174 |
| 6.3.3 | Ergebnisse für verschiedene Stromabnehmermodelle | 176 |
| 6.4 | Simulationen mit vollständigem Kettenwerksmodell | 177 |
| 6.4.1 | Einfluß von Einschwingvorgängen | 180 |
| 6.4.2 | Einfluß von Montagetoleranzen | 182 |
| 6.4.3 | Befahrung mit mehreren Stromabnehmern | 184 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 189 |
| 7.1 | Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen | 189 |
| 7.2 | Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten | 194 |
| A | Berechnung der statischen Gleichgewichtslage von Kettenwerken | 198 |
| A.1 | Statischer Durchhang von Fahrdrabt- und Seilabschnitten | 199 |
| A.2 | Bestimmung der Kräfte in Punkten mit vorgegebener Höhenlage | 201 |
| A.2.1 | Iterative Bestimmung der 2. Ortsableitungen beim Balkenmodell | 202 |
| A.3 | Behandlung von Punkten mit nicht vorgegebener Höhenlage | 204 |
| A.4 | Anmerkungen zur Durchführung der Rechnung | 205 |
| A.5 | Berechnung des Fahrdrabzickzacks | 206 |
| A.6 | Andere Verfahren zur Berechnung der statischen Gleichgewichtslage | 208 |
| B | Berechnung der statischen Elastizität von Kettenwerken | 210 |
| B.1 | Analytische Berechnung des Elastizitätsverlaufes bei linearem Systemverhalten | 215 |
| B.1.1 | Berechnung der Extremwerte und des Mittelwertes der statischen Elastizität | 220 |
| B.2 | Berücksichtigung des Hängerausknickens | 222 |
| B.2.1 | Ausknickbedingung | 223 |
| B.2.2 | Berechnung der Auslenkungen aus dem Montagezustand bei ausknickendem Hänger | 225 |
| B.2.3 | Lösen der Gleichungssysteme bei ausknickenden Hängern | 226 |
| C | FDM-Differenzenausdrücke | 230 |
| C.1 | Differenzenausdrücke bei äquidistanter Diskretisierung | 230 |
| C.1.1 | Differenzenausdrücke für die zweite Ortsableitung | 232 |
| C.1.2 | Differenzenausdrücke für die vierte Ortsableitung | 234 |
| C.2 | Differenzenausdrücke bei nichtäquidistanter Diskretisierung | 235 |
| C.2.1 | Approximation der 1. und 2. Ortsableitung bei nicht äquidistanter Diskretisierung | 235 |
| C.2.2 | Approximation der 4. Ortsableitung bei nicht äquidistanter Diskretisierung | 236 |
| D | Fahrdrabtabschnitt unter Einwirkung einer konstanten Wanderlast | 237 |
| D.1 | Wanderlast als konzentrierte Punktkraft | 239 |
| D.2 | Wanderlast als Rechtecksfunktion | 240 |
| D.3 | Wanderlast als Dreiecksfunktion | 241 |
| D.4 | Auswertung der Ergebnisse | 242 |
| D.4.1 | Konvergenz in Abhängigkeit der Anzahl der Ansatzfunktionen | 242 |

| | | |
|----------|--|------------|
| D.4.2 | Abweichungen bei nicht punktförmiger Wanderlast | 245 |
| E | Wanderlast als harmonische Anregung | 250 |
| E.1 | Das Frequenzproblem bei dynamischer Stromabnehmer-Fahrdraht-Kopp- lung | 252 |
| F | Semianalytische Lösungen für ein dynamisch gekoppeltes System | 255 |
| F.1 | Prinzipielle Vorgehensweise bei der Lösung | 255 |
| F.2 | Erstes Verfahren: Linear zeitabhängige Kontaktkraft | 258 |
| F.2.1 | Durchführung der Rechnung | 261 |
| F.3 | Zweites Verfahren: Abschnittsweise konstante Kontaktkraft | 263 |
| F.4 | Kontaktkraftberechnung am Beispiel einer Wandermasse | 265 |
| F.4.1 | Ergebnisse bei Modellierung des Fahrdrahtes als Saite | 266 |
| F.4.2 | Ergebnisse bei Modellierung des Fahrdrahtes als Euler-Bernoulli- Balken | 271 |
| F.4.3 | Rechnung mit abschnittsweise linear zeitabhängiger Kontaktkraft | 273 |
| G | Materialkonstanten und Modellparameter | 276 |
| G.1 | Materialkonstanten der Oberleitung Re 250 | 276 |
| G.2 | Parameter verschiedener Stromabnehmermodelle | 277 |
| G.2.1 | Zweimassen-Modelle | 277 |
| G.2.2 | Dreimassen-Modelle | 278 |
| | Abkürzungen | 279 |
| | Formelzeichen | 280 |
| | Literaturverzeichnis | 282 |