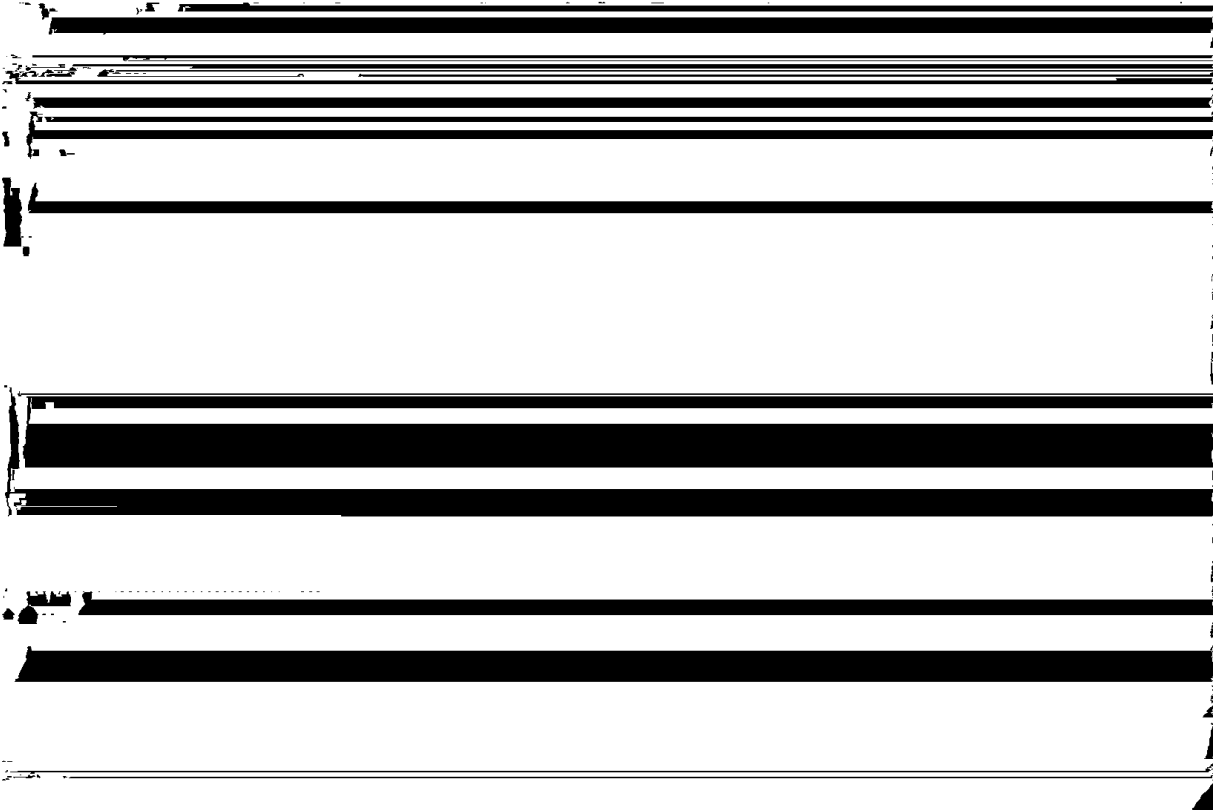


Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Vorwort..... | VII |
| Inhaltsverzeichnis | IX |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Gliederung | 4 |
| 2 Statisch versus beweglich: Allgemeine Begriffe | 7 |
| 2.1 Trägheit..... | 7 |
| 2.1.1 Masse | 8 |
| 2.1.2 Trägheitskraft..... | 8 |
| 2.2 Dynamische Antwort | 9 |
| 2.2.1 Maximalantwort..... | 9 |
| 2.3 Dynamische Erregungen. Klassifizierung und Merkmale | 10 |
| 2.3.1 Periodische Erregungen | 10 |
| 2.3.1.1 Dynamische Lasten bei rotierenden Maschinen | 10 |
| 2.3.1.1.1 Winkelgeschwindigkeit (Kreisfrequenz ω_e)..... | 11 |
| 2.3.1.1.2 Periode T | 11 |
| 2.3.1.1.3 Frequenz f | 11 |
| 2.3.1.1.4 Drehwinkel φ | 11 |
| 2.3.1.1.5 Zentrifugalkraft P_o | 11 |
| 2.3.1.2 Beschreibung periodischer Erregungen durch harmonische Funktionen..... | 12 |
| 2.3.1.2.1 Fourier-Analyse | 13 |
| 2.3.1.2.2 Amplitudenspektrum | 16 |
| 2.3.1.2.3 Exponentielle Form von Fourier-Reihen | 16 |
| 2.3.1.2.4 Diskrete Fourier Reihenentwicklung | 17 |
| 2.3.2 Nichtperiodische Erregungen..... | 18 |
| 2.3.2.1 Dynamische Lasten bei stoßartigen Erregungen..... | 18 |
| 2.3.2.1.1 Einheitsstoß..... | 19 |
| 2.3.2.1.2 Bewegungsenergie (kinetische Energie)..... | 19 |
| 2.3.2.1.3 Potentielle Energie der Lage..... | 20 |
| 2.3.2.1.4 Impuls | 20 |
| 2.3.2.1.5 Bewegungsgröße..... | 21 |
| 2.3.2.1.6 Impulssatz..... | 21 |
| 2.3.3 Von Menschen verursachte Erregungen | 22 |
| 2.3.3.1 Gehen..... | 22 |
| 2.3.3.2 Laufen, Rennen..... | 23 |
| 2.3.3.3 Hüpfen | 24 |
| 3 Allgemeines über Erdbeben | 27 |
| 3.1 Schadenswirkung von Erdbeben..... | 27 |
| 3.2 Die Erdplatten und Erdbebenentstehung..... | 28 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.3 | Seismologische Begriffe | 30 |
| 3.3.1 | Hypozentrum | 30 |
| 3.3.2 | Epizentrum..... | 31 |
| 3.3.3 | Erdbebenwellen | 31 |
| 3.3.4 | Messung von Erdbeben..... | 32 |
| 3.3.4.1 | Darstellung von Erdbeben als stochastische Erregung | 33 |
| 3.3.4.2 | Maximalausschläge seismischer Erregungen..... | 34 |
| 3.3.4.3 | ARIAS-Intensität I_0 | 35 |
| 3.3.4.4 | HUSID-Diagramm..... | 35 |
| 3.3.4.5 | RMS-Wert..... | 35 |
| 3.3.4.6 | Spektralintensität SI | 35 |
| 3.3.4.7 | Magnitude | 36 |
| 3.3.4.8 | Intensität | 36 |
| 3.3.4.9 | Epizentralintensität | 37 |
| 3.3.5 | Erdbebengefährdung..... | 38 |
| 3.3.6 | Merkmale deutscher Erdbeben..... | 38 |
| 4 | Grundlagen der dynamischen Modellierung..... | 43 |
| 4.1 | Dynamische Freiheitsgrade..... | 43 |
| 4.2 | Dynamische Modellierung..... | 44 |
| 4.2.1 | Trägheitsmatrix | 46 |
|  | | |
| 5.1 | Baustoffkennlinien..... | 47 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6 | Elastische Systemeigenschaften | 69 |
| 6.1 | Steifigkeit von Einmassensystemen..... | 69 |
| 6.1.1 | Biegesteifigkeit | 70 |
| 6.1.2 | Schubsteifigkeit | 73 |
| 6.1.3 | Biege-Schubsteifigkeit..... | 74 |
| 6.1.4 | Steifigkeit von Fachwerken | 74 |
| 6.1.5 | Rückstellkraft..... | 75 |
| 6.1.6 | Verformungsenergie | 75 |
| 6.1.7 | Flexibilität..... | 75 |
| 6.1.8 | Steifigkeit zusammengesetzter Systeme | 75 |
| 6.2 | Steifigkeit von Mehrmassensystemen..... | 78 |
| 6.2.1 | Geschossteifigkeit | 78 |
| 6.2.2 | Geschossteifigkeit von elastisch eingespannten Stützen | 80 |
| 6.2.3 | Bestimmung der Steifigkeitsmatrix | 81 |
| 6.3 | Ersatzstabmodelle für Tragwerke | 84 |
| 6.4 | Steifigkeitsmittelpunkt..... | 87 |
| 6.5 | Verteilung von Horizontalkräften auf die Aussteifungselemente | 87 |
| 7 | Schwingungen von Einmassensystemen | 89 |
| 7.1 | Darstellung von Einmassenschwingern | 90 |
| 7.2 | Lineare Systemeigenschaften. Allgemeine Bewegungsgleichung..... | 90 |
| 7.3 | Freie ungedämpfte Schwingungen..... | 91 |
| 7.3.1 | Eigenkreisfrequenz ω | 93 |
| 7.3.2 | Periode T | 93 |
| 7.3.3 | Eigenfrequenz f | 93 |
| 7.4 | Freie gedämpfte Schwingungen..... | 95 |
| 7.4.1 | Logarithmisches Dekrement | 98 |
| 7.5 | Erzwungene Schwingungen..... | 98 |
| 7.5.1 | Gedämpftes System unter harmonischer Erregung..... | 98 |
| 7.5.1.1 | Dämpfungshysterese und spezifische Dämpfung | 101 |
| 7.5.2 | Ungedämpftes System unter stoßartiger Erregung..... | 102 |
| 7.5.2.1 | Einfluss der Dämpfung | 104 |
| 7.5.3 | Ungedämpftes System unter beliebiger Erregung. Duhamel-Faltungsintegrale | 104 |
| 7.5.3.1 | Berücksichtigung der Dämpfung | 107 |
| 7.6 | Numerische Lösungen | 107 |
| 7.6.1 | Duhamel-Integrale | 108 |
| 7.6.2 | Direkte Zeitintegrationsverfahren | 111 |
| 7.6.2.1 | β -Verfahren von Newmark | 111 |
| 7.6.2.2 | Wilson- Θ -Verfahren..... | 116 |
| 7.7 | Antwortempfindlichkeit..... | 119 |
| 7.8 | Antwort auf eine „Fourier-Reihe“-Erregung | 120 |
| 7.9 | Schwingungsisolierung | 122 |
| 7.9.1 | Aktive Schwingungsisolierung | 123 |
| 7.9.2 | Passive Schwingungsisolierung | 125 |
| 7.9.3 | Stoßisolierung | 125 |
| 7.9.3.1 | Bewegliche Massen | 125 |
| 7.9.3.2 | Impulsartige Erregung | 126 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.10 | Nichtlineare Systemeigenschaften | 127 |
| 7.10.1 | Bilinear elastische Systeme. Freie Schwingungen..... | 130 |
| 7.10.2 | Nichtlineare Steifigkeit | 131 |
| 7.10.3 | Elastoplastische Systeme | 134 |
| 7.10.4 | Nicht elastische Verschiebung | 136 |
| 8 | Schwingungen von Mehrmassensystemen | 139 |
| 8.1 | Zweimassenschwinger | 141 |
| 8.1.1 | Freie ungedämpfte Schwingungen..... | 142 |
| 8.1.1.1 | Eigenformenverfahren (Modale Analyse)..... | 147 |
| 8.1.2 | Erzwungene ungedämpfte Schwingungen | 150 |
| 8.1.3 | Erzwungene gedämpfte Schwingungen. Modale Dämpfung..... | 152 |
| 8.1.3.1 | Gedämpftes System unter Erdbebenbelastung..... | 153 |
| 8.1.4 | Numerische Lösungen | 157 |
| 8.2 | Mehrmassenschwinger..... | 162 |
| 8.2.1 | Freie ungedämpfte Schwingungen. Eigenformenmethode | 164 |
| 8.2.1.1 | Normierung der Eigenvektoren..... | 167 |
| 8.2.2 | Erzwungene ungedämpfte Schwingungen | 173 |
| 8.2.2.1 | Ungedämpftes System unter Erdbebenbelastung..... | 176 |
| 8.2.3 | Erzwungene gedämpfte Schwingungen | 177 |
| 8.2.3.1 | Modale Analyse mit Rayleigh-Dämpfung | 178 |
| 8.2.4 | Nichtlineare Systemeigenschaften | 181 |
| 8.3 | Systeme mit verteilter Masse | 183 |
| 8.3.1 | Freie ungedämpfte Schwingungen. Eigenwerte..... | 183 |
| 8.3.2 | Erzwungene gedämpfte Schwingungen | 190 |
| 8.3.2.1 | Gedämpftes System unter Erdbebenbelastung..... | 191 |
| 8.4 | Näherungsformel für die Grundperiode | 191 |
| 9 | Erdbebenberechnung | 197 |
| 9.1 | Antwortspektrenverfahren | 200 |
| 9.1.1 | Ermittlung von Antwortspektren | 200 |
| 9.1.2 | Normspektren..... | 205 |
| 9.1.3 | Einmassensysteme | 208 |
| 9.1.3.1 | Systeme mit nichtlinearem Verhalten | 209 |
| 9.1.3.1.1 | R-Spektren | 215 |
| 9.1.4 | Mehrmassensysteme | 217 |
| 9.1.4.1 | Grundschwingungsformverfahren | 217 |
| 9.1.4.2 | Berücksichtigung von zwei Schwingungsformen..... | 223 |
| 9.1.4.3 | Antwort von Mehrmassensystemen | 228 |
| 9.1.4.3.1 | Berechnung mit Ersatzmassen | 231 |
| 9.1.4.4 | Systeme mit verteilter Masse | 236 |
| 9.2 | Zeitverlaufverfahren | 239 |
| 9.2.1 | Einmassensysteme | 239 |
| 9.2.1.1 | Systeme mit nichtlinearem Verhalten | 244 |
| 9.2.2 | Mehrmassensysteme | 245 |
| 9.2.2.1 | Systeme mit nichtlinearem Verhalten..... | 246 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 10 | Bewegungsenergie und Tragwerk | 249 |
| 10.1 | Energieprinzipien..... | 249 |
| 10.2 | Energetische Betrachtungen. Energiebilanz..... | 252 |
| 10.2.1 | Freie ungedämpfte Schwingungen..... | 252 |
| 10.2.2 | Freie gedämpfte Schwingungen..... | 254 |
| 10.2.3 | Erzwungene Schwingungen..... | 256 |
| 10.2.4 | Elastoplastische Systeme | 258 |
| 10.3 | Erdbebenbeanspruchte Tragwerke | 259 |
| 10.3.1 | Energiegleichung | 259 |
| 10.3.2 | Energiezeitverlauf..... | 261 |
| 10.3.3 | Eingangsenergie..... | 262 |
| 10.3.4 | Ansätze zur Abschätzung der dissipierten Energie | 265 |
| 10.3.5 | Energie-Entwurfsspektren | 271 |
| 10.3.6 | Energetisches Bemessungsverfahren | 272 |
| 10.3.7 | Energieaufnahme- und Energiedissipationsvermögen | 274 |
| 10.3.7.1 | Energieaufnahmevermögen elastischer Systeme | 274 |
| 10.3.7.2 | Versagensmechanismen und Schädigungsindikatoren..... | 276 |
| 10.3.7.3 | Energiedissipationsvermögen der Tragwerke | 278 |
| 10.3.7.3.1 | Systeme mit monotonem Verhalten..... | 278 |
| 10.3.7.3.2 | Systeme mit zyklischer Schadensakkumulation | 280 |
| 10.3.7.3.3 | Energiedissipationsindex D_i | 282 |
| 10.3.7.3.4 | Grenzzustand der Stabilität | 286 |
| 10.3.7.4 | Hybride Nachweisverfahren | 289 |
| 10.4 | Mehrmassensysteme | 292 |
| 11 | Zufallsschwingungen | 295 |
| 11.1 | Grundbegriffe..... | 295 |
| 11.2 | Dichtefunktion | 298 |
| 11.2.1 | Normal- (Gauß-) Verteilung | 300 |
| 11.2.2 | Rayleigh-Verteilung..... | 301 |
| 11.3 | Korrelation und Autokorrelation..... | 302 |
| 11.4 | Fourier Integralentwicklung..... | 306 |
| 11.5 | Spektralanalyse | 309 |
| 11.5.1 | Schmalband- und Breitband-Zufallprozesse | 312 |
| 11.6 | Erdbebensimulierung..... | 315 |
| 11.6.1 | Spektraldichtefunktionen | 316 |
| 11.7 | Antwort auf Zufallerregungen. Einmassenschwinger | 318 |
| 12 | Berechnungsverfahren nach Euronorm 8 | 325 |
| 12.1 | Erdbebeneinwirkungen | 326 |
| 12.1.1 | Elastisches Antwortspektrum..... | 326 |
| 12.1.1.1 | Baugrundverhältnisse..... | 326 |
| 12.1.1.2 | Maximale Bodenverschiebung..... | 328 |
| 12.1.2 | Bemessungsspektrum..... | 328 |
| 12.1.3 | Möglichkeiten zur Beschreibung der Erdbebeneinwirkung..... | 330 |
| 12.1.3.1 | Erdbebenleistungsspektrum | 330 |
| 12.1.3.2 | Erdbebenzeitverlauf..... | 330 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 12.1.4 | Kombination der Erdbebeneinwirkung mit anderen Einwirkungen..... | 331 |
| 12.2 | Tragwerksauslegung | 333 |
| 12.2.1 | Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren | 333 |
| 12.2.1.1 | Näherungsberechnung von Torsionswirkungen..... | 334 |
| 12.2.2 | Modale Analyse | 335 |
| 12.2.3 | Leistungsspektrenverfahren | 336 |
| 12.2.4 | Zeitverlaufverfahren | 336 |
| 12.2.5 | Berechnung im Frequenzbereich | 336 |
| 12.2.6 | Kombination der Komponenten der Erdbebeneinwirkung | 337 |
| 12.2.6.1 | Bedeutungskategorien von Bauwerken..... | 338 |
| 12.2.7 | Bauwerksverschiebung | 338 |
| 12.2.8 | Standsicherheitsnachweise..... | 338 |
| 12.2.8.1 | Tragfähigkeitsnachweis | 338 |
| 12.2.8.2 | Gebrauchstauglichkeitsnachweis | 339 |
| 13 | Erdbebengerechte Entwurfsgrundsätze..... | 341 |
| 13.1 | Grundsätze der Formgestaltung | 342 |
| 13.1.1 | Maßstab..... | 342 |
| 13.1.2 | Höhe..... | 342 |
| 13.1.3 | Abmessungen im Grundriss | 343 |
| 13.1.4 | Proportionen | 343 |
| 13.1.5 | Symmetrie..... | 345 |
| 13.1.6 | Regelmäßigkeit | 345 |
| 13.2 | Grundsätze der Tragwerksgestaltung | 351 |
| 13.2.1 | Geschossdecken | 352 |
| 13.2.2 | Aussteifungstragwerke..... | 354 |
| 13.2.2.1 | Biegesteife Geschossrahmen | 355 |
| 13.2.2.2 | Fachwerke..... | 359 |
| 13.2.2.3 | Wandscheiben..... | 361 |
| 13.2.2.4 | Kerne..... | 365 |
| 13.2.2.5 | Gemischte Rahmen-Wandscheiben Systeme | 366 |
| 13.2.3 | Anordnung von Aussteifungen im Grundriss | 367 |
| 13.2.4 | Ausbildung von Bauwerksecken..... | 370 |
| 13.2.5 | Steifigkeitsverteilung über die Höhe..... | 372 |
| 13.2.6 | Gründung | 374 |
| 13.3 | Nichttragende Bauteile..... | 375 |
| 13.3.1 | Erdbebengerechte Auslegung | 376 |
| 13.3.2 | Befestigungsmechanismen..... | 377 |
| 13.3.2.1 | Außenwände | 377 |
| 13.3.2.2 | Innenwände..... | 381 |
| 13.3.2.3 | Abgehängte Decken..... | 382 |
| 14 | Tragwerksplanung zur Erdbebensicherheit. Kapazitätsbemessung..... | 383 |
| 14.1 | Bemessungsgrundsätze | 384 |
| 14.1.1 | Eigenschaften elastoplastischer Systeme. Versagensmechanismen..... | 384 |
| 14.1.2 | Angaben zur Bemessungsstrategie..... | 386 |
| 14.1.3 | Das Verhaltenskriterium | 388 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 14.2 | Ablauf des Bemessungsvorgangs..... | 388 |
| 14.3 | Biegesteife Rahmen | 389 |
| 14.3.1 | Stahlbetonbauweise | 390 |
| 14.3.1.1 | Riegel..... | 391 |
| 14.3.1.2 | Stützen | 393 |
| 14.3.1.3 | Rahmenknoten | 396 |
| 14.3.2 | Stahlbauweise | 399 |
| 14.3.3 | Stahl-Beton-Verbundbauweise | 405 |
| 14.4 | Ausgesteifte Stahlrahmen | 405 |
| 14.4.1 | Fachwerke mit zentrischen Verbandsanschlüssen | 406 |
| 14.4.2 | Fachwerke mit exzentrischen Verbandsanschlüssen..... | 407 |
| 14.4.3 | Ausfachungen | 408 |
| 14.5 | Stahlbetonwandscheiben..... | 409 |
| 14.5.1 | Gekoppelte Wandscheiben..... | 413 |
| 14.6 | Gemischte Systeme..... | 415 |
| 14.7 | Mauerwerksbauten..... | 415 |
| 14.8 | Holztragwerke..... | 417 |
| 15 | Tragverhaltenskontrolle..... | 419 |
| 15.1 | Passive Tragverhaltenskontrolle | 420 |
| 15.1.1 | Berechnungsgrundlagen..... | 421 |
| 15.1.1.1 | Energieformulierung | 422 |
| 15.1.2 | Verformungskontrolle mit Zusatzmassen | 423 |
| 15.1.2.1 | Feste geregelte Schwingungstilger..... | 423 |
| 15.1.2.1.1 | Parameterbestimmung..... | 425 |
| 15.1.2.1.2 | Tragwerksauslegung | 430 |
| 15.1.2.1.3 | Kontrollmechanismen | 432 |
| 15.1.2.2 | Flüssige Schwingungstilger | 433 |
| 15.1.2.2.1 | Parameterbestimmung..... | 433 |
| 15.1.2.2.2 | Kontrollmechanismen..... | 435 |
| 15.1.3 | Dämpfungskontrolle. Verfahren und Anlagen | 435 |
| 15.1.3.1 | Viskose Dämpfer | 437 |
| 15.1.3.1.1 | Parameterbestimmung..... | 442 |
| 15.1.3.1.2 | Tragwerksauslegung | 448 |
| 15.1.3.1.3 | Konstruktive Ausbildung..... | 450 |
| 15.1.3.2 | Viskoelastische Dämpfer | 452 |
| 15.1.3.2.1 | Parameterbestimmung..... | 454 |
| 15.1.3.2.2 | Tragwerksauslegung | 456 |
| 15.1.3.2.3 | Kontrollmechanismen..... | 457 |
| 15.1.3.3 | Plastische Hysteresedämpfer | 459 |
| 15.1.3.3.1 | Parameterbestimmung..... | 461 |
| 15.1.3.3.2 | Tragwerksauslegung | 464 |
| 15.1.3.3.3 | Kontrollmechanismen..... | 464 |
| 15.1.3.4 | Reibungsdämpfer | 476 |
| 15.1.3.4.1 | Kontrollmechanismen..... | 478 |
| 15.2 | Aktive Tragverhaltenskontrolle | 484 |
| 15.2.1 | Zustandsraum-Antwort von Einmassensystemen..... | 485 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 15.2.1.1 | Numerische Lösung | 488 |
| 15.2.2 | Zustandsraum-Antwort von Mehrmassensystemen..... | 490 |
| 15.2.2.1 | Numerische Lösung | 491 |
| 15.2.3 | Klassische optimal-lineare Kontrolle..... | 492 |
| 15.2.3.1 | Diskretisierte Kontrolle..... | 495 |
| 15.2.4 | Nichtlineare Kontrolle | 496 |
| 15.2.5 | Kontrollmechanismen | 496 |
| 15.2.5.1 | Massenkontrolle..... | 497 |
| 15.2.5.2 | Dämpfungskontrolle | 498 |
| 15.2.5.3 | Steifigkeitskontrolle..... | 500 |
| 16 | Erdbebenisolierung..... | 501 |
| 16.1 | Erdbebenschutz-Systeme. Geschichtliche Übersicht | 502 |
| 16.1.1 | Isolatorenklassifizierung..... | 505 |
| 16.1.1.1 | Kinematische Lager | 506 |
| 16.1.1.2 | Elastomerlager | 507 |
| 16.1.1.3 | Gleitlager mit reversiblen Verschiebungen..... | 511 |
| 16.1.1.4 | Stahlfeder..... | 513 |
| 16.1.2 | Neuzeitliche Entwicklung..... | 514 |
| 16.2 | Mechanische Eigenschaften von Isolatoren | 516 |
| 16.2.1 | Elastomerlager | 516 |
| 16.2.1.1 | Einschichtige, vulkanisierte Lager | 518 |
| 16.2.1.1.1 | Druckbeanspruchung | 518 |
| 16.2.1.1.2 | Horizontalbeanspruchung | 521 |
| 16.2.1.1.3 | Momentenbeanspruchung..... | 521 |
| 16.2.1.2 | Mehrschichtige Lager | 522 |
| 16.2.1.2.1 | Steifigkeit..... | 522 |
| 16.2.1.2.2 | Stabilität unter mäßigen Verschiebungen | 523 |
| 16.2.1.2.3 | Einfluss der Vertikallast auf die Horizontalsteifigkeit..... | 525 |
| 16.2.1.2.4 | Stabilität unter großen Verschiebungen..... | 525 |
| 16.2.1.2.5 | Stabilität gegen Umkippen..... | 527 |
| 16.2.1.2.6 | Dämpfung und dynamische Modellierung..... | 527 |
| 16.2.2 | Elastomerlager mit Bleikern | 530 |
| 16.2.3 | Elastomerlager mit begrenzter Verschiebung..... | 531 |
| 16.2.4 | Reibungs-Pendellager | 535 |
| 16.2.5 | Gleitlager | 537 |
| 16.2.6 | Stahlfederlager | 539 |
| 16.3 | Berechnung von erdbebenisolierten Bauwerken..... | 541 |
| 16.3.1 | Modellierung..... | 541 |
| 16.3.2 | Verformungsenergie | 545 |
| 16.3.3 | Ansätze zur Vordimensionierung..... | 546 |
| 16.3.4 | Antwortspektrenverfahren mit Zweimassenschwinger-Modell | 548 |
| 16.3.5 | Isolatorenssysteme mit veränderlicher Steifigkeit..... | 559 |
| 16.3.5.1 | Systeme mit sprunghaftem Steifigkeitsverlauf | 560 |
| 16.3.5.2 | Systeme mit nichtlinearem Steifigkeitsverlauf | 569 |
| 16.3.6 | Zeitverlaufverfahren | 570 |
| 16.4 | Aktive Kontrolle von erdbebenisolierten Bauwerken..... | 573 |

| | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|
| 16.4.1 | Modale Kontrolle..... | 576 |
| Literaturverzeichnis | | 579 |
| Sachwortverzeichnis | | 595 |