

Valentin L. Popov

# Kontaktmechanik und Reibung

Von der Nanotribologie bis zur  
Erdbebendynamik

2., überarbeitete Auflage



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kontakt- und Reibungsphänomene und ihre Anwendung .....	1
1.2 Zur Geschichte der Kontaktmechanik und Reibungsphysik .....	3
1.3 Aufbau des Buches .....	8
<b>2 Qualitative Behandlung des Kontaktproblems – Normalkontakt ohne Adhäsion</b> .....	<b>9</b>
2.1 Materialeigenschaften .....	10
2.2 Einfache Kontaktaufgaben .....	13
2.3 Qualitative Abschätzungsmethode für Kontakte mit einem dreidimensionalen elastischen Kontinuum .....	17
Aufgaben .....	21
<b>3 Qualitative Behandlung eines adhäsiven Kontaktes</b> .....	<b>27</b>
3.1 Physikalischer Hintergrund.....	28
3.2 Berechnung der Adhäsionskraft zwischen gekrümmten Oberflächen .....	32
3.3 Qualitative Abschätzung der Adhäsionskraft zwischen elastischen Körpern .....	33
3.4 Einfluss der Rauigkeit auf Adhäsion .....	35
3.5 Klebeband .....	36
3.6 Weiterführende Informationen über van-der-Waals-Kräfte und Oberflächenenergien.....	37
Aufgaben .....	38
<b>4 Kapillarkräfte</b> .....	<b>43</b>
4.1 Oberflächenspannung und Kontaktwinkel.....	43
4.2 Hysterese des Kontaktwinkels .....	47
4.3 Druck und Krümmungsradius der Oberfläche .....	47
4.4 Kapillarbrücken .....	48
4.5 Kapillarkraft zwischen einer starren Ebene und einer starren Kugel.....	49
4.6 Flüssigkeiten auf rauen Oberflächen .....	50
4.7 Kapillarkräfte und Tribologie .....	51
Aufgaben .....	52
<b>5 Rigorose Behandlung des Kontaktproblems – Hertzscher Kontakt</b> .....	<b>59</b>
5.1 Deformation eines elastischen Halbraumes unter der Einwirkung von Oberflächenkräften .....	60
5.2 Hertzsche Kontakttheorie .....	63
5.3 Kontakt zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmten Oberflächen .....	65
5.4 Kontakt zwischen einem starren kegelförmigen Indenter und dem elastischen Halbraum .....	67

x	Inhaltsverzeichnis	
	5.5 Innere Spannungen beim Hertzschen Kontakt	68
	Aufgaben	71
<b>6</b>	<b>Rigorese Behandlung des Kontaktproblems – Adhäsiver Kontakt</b>	<b>75</b>
	6.1 JKR-Theorie	76
	Aufgaben	81
<b>7</b>	<b>Kontakt zwischen rauen Oberflächen</b>	<b>85</b>
	7.1 Modell von Greenwood und Williamson	86
	7.2 Plastische Deformation von Kontaktspitzen	92
	7.3 Elektrische Kontakte	93
	7.4 Thermische Kontakte	96
	7.5 Mechanische Steifigkeit von Kontakten	97
	7.6 Dichtungen	97
	7.7 Rauheit und Adhäsion	99
	Aufgaben	99
<b>8</b>	<b>Tangentiales Kontaktproblem</b>	<b>109</b>
	8.1 Deformation eines elastischen Halbraumes unter Einwirkung von Tangentialkräften	110
	8.2 Deformation eines elastischen Halbraumes unter Einwirkung von Tangentialspannungsverteilungen	111
	8.3 Tangentiales Kontaktproblem ohne Gleiten	113
	8.4 Tangentiales Kontaktproblem unter Berücksichtigung des Schlupfes	115
	8.5 Abwesenheit des Schlupfes bei einem starren zylindrischen Stempel	118
	Aufgaben	118
<b>9</b>	<b>Rollkontakt</b>	<b>123</b>
	9.1 Qualitative Diskussion der Vorgänge in einem Rollkontakt	124
	9.2 Spannungsverteilung im stationären Rollkontakt	126
	Aufgaben	132
<b>10</b>	<b>Das Coulombsche Reibungsgesetz</b>	<b>137</b>
	10.1 Einführung	137
	10.2 Haftreibung und Gleitreibung	138
	10.3 Reibungswinkel	139
	10.4 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Kontaktzeit	140
	10.5 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Normalkraft	142
	10.6 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Gleitgeschwindigkeit	143
	10.7 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Oberflächenrauheit	143
	10.8 Vorstellungen von Coulomb über die Herkunft des Reibungsgesetzes	145
	10.9 Theorie von Bowden und Tabor	146
	10.10 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Temperatur	149
	Aufgaben	150

<b>11 Das Prandtl-Tomlinson-Modell für trockene Reibung .....</b>	<b>161</b>
11.1 Einführung .....	161
11.2 Grundeigenschaften des Prandtl-Tomlinson-Modells.....	163
11.3 Elastische Instabilität .....	167
11.4 Supergleiten .....	171
11.5 Nanomaschinen: Konzepte für Mikro- und Nanoantriebe .....	172
Aufgaben .....	177
<b>12 Reiberregte Schwingungen .....</b>	<b>181</b>
12.2 Reibungsinstabilität bei abfallender Abhängigkeit der Reibungskraft von der Geschwindigkeit .....	182
12.3 Instabilität in einem System mit verteilter Elastizität .....	185
12.4 Kritische Dämpfung und optimale Unterdrückung des Quietschens .....	187
12.5 Aktive Unterdrückung des Quietschens.....	189
12.6 Festigkeitsaspekte beim Quietschen .....	192
12.7 Abhängigkeit der Stabilitätsbedingungen von der Steifigkeit des Systems .....	193
12.8 Sprag-Slip .....	198
Aufgaben .....	199
<b>13 Thermische Effekte in Kontakten .....</b>	<b>205</b>
13.1 Einführung .....	206
13.2 Blitztemperaturen in Mikrokontakten .....	206
13.3 Thermomechanische Instabilität .....	208
Aufgaben .....	210
<b>14 Geschmierte Systeme .....</b>	<b>213</b>
14.1 Strömung zwischen zwei parallelen Platten .....	214
14.2 Hydrodynamische Schmierung .....	215
14.3 „Viskose Adhäsion“ .....	219
14.4 Rheologie von Schmiermitteln .....	222
14.5 Grenzschichtschmierung .....	224
14.6 Elastohydrodynamik .....	225
14.7 Feste Schmiermittel .....	227
Aufgaben .....	228
<b>15 Viskoelastische Eigenschaften von Elastomeren.....</b>	<b>235</b>
15.1 Einführung .....	235
15.2 Spannungsrelaxation in Elastomeren .....	236
15.3 Komplexer, frequenzabhängiger Schubmodul .....	238
15.4 Eigenschaften des komplexen Moduls.....	240
15.5 Energiedissipation in einem viskoelastischen Material .....	241
15.6 Messung komplexer Module .....	242
15.7 Rheologische Modelle .....	243
15.8 Ein einfaches rheologisches Modell für Gummi („Standardmodell“) ...	246

15.9 Einfluss der Temperatur auf rheologische Eigenschaften.....	248
15.10 Masterkurven .....	249
15.11 Prony-Reihen .....	250
Aufgaben .....	253
<b>16 Gummireibung und Kontaktmechanik von Gummi .....</b>	<b>257</b>
16.1 Reibung zwischen einem Elastomer und einer starren rauen Oberfläche.....	257
16.2 Rollwiderstand.....	263
16.3 Adhäsiver Kontakt mit Elastomeren .....	266
Aufgaben .....	268
<b>17 Verschleiß.....</b>	<b>275</b>
17.1 Einleitung.....	275
17.2 Abrasiver Verschleiß .....	276
17.3 Adhäsiver Verschleiß.....	279
17.4 Bedingungen für verschleißarme Reibung.....	282
17.5 Verschleiß als Materialtransport aus der Reibzone.....	284
17.6 Verschleiß von Elastomeren .....	285
Aufgaben .....	287
<b>18 Reibung unter Einwirkung von Ultraschall .....</b>	<b>289</b>
18.1 Einfluss von Ultraschall auf die Reibungskraft aus makroskopischer Sicht.....	290
18.2 Einfluss von Ultraschall auf die Reibungskraft aus mikroskopischer Sicht .....	295
18.3 Experimentelle Untersuchungen der statischen Reibungskraft als Funktion der Schwingungsamplitude .....	297
18.4 Experimentelle Untersuchungen der Gleitreibung als Funktion der Schwingungsamplitude.....	300
Aufgaben .....	302
<b>19 Numerische Simulationsmethoden in der Reibungsphysik.....</b>	<b>309</b>
19.1 Kontakt und Reibung in verschiedenen Simulationsmethoden: Eine Übersicht.....	310
19.1.1 Mehrkörpersysteme .....	310
19.1.2 Finite Elemente Methode .....	311
19.1.3 Randelementemethode .....	312
19.1.4 Teilchenmethoden .....	314
19.2 Reduktion von dreidimensionalen Kontaktaufgaben auf eindimensionale .....	314
19.3 Kontakt in einem makroskopischen tribologischen System .....	315
19.4 Reduktionsmethode für ein Mehrkontaktproblem .....	320
19.5 Dimensionsreduktion und viskoelastische Eigenschaften.....	324
19.6 Adhäsion in der Reduktionsmethode .....	325

19.7 Abbildung von Spannungen im Reduktionsmodell .....	326
19.8 Das Berechnungsverfahren in der Reduktionsmethode .....	328
19.9 Schmierung, Kavitation und plastische Deformation in der Reduktionsmethode .....	328
Aufgaben .....	329
<b>20 Erdbeben und Reibung.....</b>	<b>335</b>
20.1 Einführung .....	336
20.2 Quantifikation der Erdbeben.....	337
20.2.1 Gutenberg-Richter-Gesetz.....	338
20.3 Reibungsgesetze für Gesteine.....	339
20.4 Stabilität beim Gleiten mit der geschwindigkeits- und zustandsabhängigen Reibung.....	343
20.5 Nukleation von Erdbeben und Nachgleiten .....	346
20.6 Foreshocks und Aftershocks.....	349
20.7 Kontinuumsmechanik von granularen Medien und Struktur von Verwerfungen .....	350
20.8 Ist Erdbebenvorhersage möglich?.....	354
Aufgaben .....	355
<b>Anhang .....</b>	<b>359</b>
<b>Weiterführende Literatur.....</b>	<b>363</b>
<b>Bildernachweis.....</b>	<b>369</b>
<b>Index .....</b>	<b>371</b>