

V. L. Popov

Kontaktmechanik und Reibung

Ein Lehr- und Anwendungsbuch von
der Nanotribologie bis zur numerischen
Simulation



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Kontakt- und Reibungsphänomene und ihre Anwendung	1
1.2	Zur Geschichte der Kontaktmechanik und Reibungsphysik	3
1.3	Aufbau des Buches	7
2	Qualitative Behandlung des Kontaktproblems – Normalkontakt ohne Adhäsion	9
2.1	Materialeigenschaften	10
2.2	Einfache Kontaktaufgaben	13
2.3	Qualitative Abschätzungsmethode für Kontakte mit einem dreidimensionalen elastischen Kontinuum	17
	Aufgaben	21
3	Qualitative Behandlung eines adhäsiven Kontaktes	25
3.1	Physikalischer Hintergrund	26
3.2	Berechnung der Adhäsionskraft zwischen gekrümmten Oberflächen	30
3.3	Qualitative Abschätzung der Adhäsionskraft zwischen elastischen Körpern	31
3.4	Einfluss der Rauigkeit auf Adhäsion	33
3.5	Klebeband	34
3.6	Weiterführende Informationen über van-der-Waals-Kräfte und Oberflächenenergien	35
	Aufgaben	36
4	Kapillarkräfte	41
4.1	Oberflächenspannung und Kontaktwinkel	41
4.2	Hysterese des Kontaktwinkels	45
4.3	Druck und Krümmungsradius der Oberfläche	45
4.4	Kapillarbrücken	46
4.5	Kapillarkraft zwischen einer starren Ebene und einer starren Kugel	47
4.6	Flüssigkeiten auf rauen Oberflächen	48

4.7	Kapillarkräfte und Tribologie	49
	Aufgaben	50
5	Rigorese Behandlung des Kontaktproblems – Hertzscher Kontakt	57
5.1	Deformation eines elastischen Halbraumes unter der Einwirkung von Oberflächenkräften	58
5.2	Hertzsche Kontakttheorie	61
5.3	Kontakt zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmten Oberflächen	63
5.4	Kontakt zwischen einem starren kegelförmigen Indenter und dem elastischen Halbraum	65
5.5	Innere Spannungen beim Hertzschen Kontakt	66
	Aufgaben	69
6	Rigorese Behandlung des Kontaktproblems – Adhäsiver Kontakt	73
6.1	JKR-Theorie	74
	Aufgaben	79
7	Kontakt zwischen rauen Oberflächen	83
7.1	Modell von Greenwood und Williamson	84
7.2	Plastische Deformation von Kontaktspitzen	89
7.3	Elektrische Kontakte	91
7.4	Thermische Kontakte	94
7.5	Mechanische Steifigkeit von Kontakten	95
7.6	Dichtungen	95
7.7	Rauheit und Adhäsion	97
	Aufgaben	97
8	Tangentiales Kontaktproblem	103
8.1	Deformation eines elastischen Halbraumes unter Einwirkung von Tangentialkräften	104
8.2	Deformation eines elastischen Halbraumes unter Einwirkung von Tangentialspannungsverteilungen	105
8.3	Tangentiales Kontaktproblem ohne Gleiten	107
8.4	Tangentiales Kontaktproblem unter Berücksichtigung des Schlupfes	109
8.5	Abwesenheit des Schlupfes bei einem starren zylindrischen Stempel	112
	Aufgaben	112
9	Rollkontakt	117
9.1	Qualitative Diskussion der Vorgänge in einem Rollkontakt	118
9.2	Spannungsverteilung im stationären Rollkontakt	120
	Aufgaben	126

10 Das Coulombsche Reibungsgesetz	131
10.1 Einführung	131
10.2 Haftreibung und Gleitreibung	132
10.3 Reibungswinkel	133
10.4 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Kontaktzeit	134
10.5 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Normalkraft	136
10.6 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Gleitgeschwindigkeit	137
10.7 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Oberflächenrauheit	137
10.8 Vorstellungen von Coulomb über die Herkunft des Reibungsgesetzes	139
10.9 Theorie von Bowden und Tabor	140
10.10 Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Temperatur	143
Aufgaben	144
11 Das Prandtl-Tomlinson-Modell für trockene Reibung	153
11.1 Einführung	153
11.2 Grundeigenschaften des Prandtl-Tomlinson-Modells	155
11.3 Elastische Instabilität	159
11.4 Supergleiten	163
11.5 Nanomaschinen: Konzepte für Mikro- und Nanoantriebe	164
Aufgaben	169
12 Reiberregte Schwingungen	173
12.1 Reibungsinstabilität bei abfallender Abhängigkeit der Reibungskraft von der Geschwindigkeit	174
12.2 Instabilität in einem System mit verteilter Elastizität	177
12.3 Kritische Dämpfung und optimale Unterdrückung des Quietschens	179
12.4 Aktive Unterdrückung des Quietschens	181
12.5 Festigkeitsaspekte beim Quietschen	184
12.6 Abhängigkeit der Stabilitätsbedingungen von der Steifigkeit des Systems	185
12.7 Sprag-Slip	190
Aufgaben	191
13 Thermische Effekte in Kontakten	197
13.1 Einführung	198
13.2 Blitztemperaturen in Mikrokontakten	198
13.3 Thermomechanische Instabilität	200
Aufgaben	202
14 Gesmiente Systeme	205
14.1 Strömung zwischen zwei parallelen Platten	206

14.2	Hydrodynamische Schmierung	207
14.3	„Viskose Adhäsion“	211
14.4	Rheologie von Schmiermitteln	214
14.5	Grenzschichtschmierung	216
14.6	Feste Schmiermittel	217
	Aufgaben	218
15	Viskoelastische Eigenschaften von Elastomeren	223
15.1	Einführung	223
15.2	Spannungsrelaxation in Elastomeren	224
15.3	Komplexer, frequenzabhängiger Schubmodul	226
15.4	Eigenschaften des komplexen Moduls	228
15.5	Energiedissipation in einem viskoelastischen Material	229
15.6	Messung komplexer Module	230
15.7	Rheologische Modelle	231
15.8	Ein einfaches rheologisches Modell für Gummi („Standardmodell“)	234
15.9	Einfluss der Temperatur auf rheologische Eigenschaften	236
15.10	Masterkurven	237
15.11	Prony-Reihen	239
	Aufgaben	242
16	Gummireibung und Kontaktmechanik von Gummi	245
16.1	Reibung zwischen einem Elastomer und einer starren rauen Oberfläche	245
16.2	Rollwiderstand	251
16.3	Adhäsiver Kontakt mit Elastomeren	254
	Aufgaben	256
17	Verschleiß	263
17.1	Einleitung	263
17.2	Abrasiver Verschleiß	264
17.3	Adhäsiver Verschleiß	267
17.4	Bedingungen für verschleißarme Reibung	270
17.5	Verschleiß als Materialtransport aus der Reibzone	272
17.6	Verschleiß von Elastomeren	273
	Aufgaben	275
18	Reibung unter Einwirkung von Ultraschall	277
18.1	Einfluss von Ultraschall auf die Reibungskraft aus makroskopischer Sicht	278
18.2	Einfluss von Ultraschall auf die Reibungskraft aus mikroskopischer Sicht	283
18.3	Experimentelle Untersuchungen der statischen Reibungskraft als Funktion der Schwingungsamplitude	285
	Aufgaben	287

19 Numerische Simulationsmethoden in der Reibungsphysik 291

 19.1 Kontakt- und Reibungsproblematik in verschiedenen
 Simulationsmethoden: Eine Übersicht 292

 19.1.1 Mehrkörpersysteme 292

 19.1.2 Finite Elemente Methode 293

 19.1.3 Teilchenmethoden 294

 19.2 Reduktion von dreidimensionalen Kontaktaufgaben auf
 eindimensionale 294

 19.3 Kontakt in einem makroskopischen tribologischen System 295

 19.4 Reduktionsmethode für ein Mehrkontaktproblem 300

 19.5 Dimensionsreduktion und viskoelastische Eigenschaften 305

 19.6 Abbildung von Spannungen im Reduktionsmodell 305

 19.7 Das Berechnungsverfahren in der Reduktionsmethode 307

 19.8 Adhäsion, Schmierung, Kavitation und plastische Deformation
 bei der Reduktionsmethode 307

 Aufgaben 307

Anhang 313

Weiterführende Literatur 317

Bildernachweis 323

Sachverzeichnis 325