

Herbert von Weingraber
Mohamed Abou-Aly

Handbuch Technische Oberflächen

Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten

Mit 317 Abbildungen und 41 Tafeln

Physikalische Bibliothek
Fachbereich 5
Technische Universität Darmstadt
Hochschulstraße 4
D-64289 Darmstadt

pb 4130



Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig / Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Bezeichnungen	XIV
1 Grundlagen	1
1.1 Begriffe „Fläche“, „Oberfläche“, „Technische Oberfläche“	1
Schrifttum zum Abschnitt 1.1	6
1.2 Erzeugen technischer Oberflächen	7
1.2.1 Fertigungsbedingter Oberflächenzustand	7
1.2.2 Übersicht über die wichtigsten Fertigungsverfahren	8
Schrifttum zum Abschnitt 1.2	11
2 Physikalische und chemische Eigenschaften der Oberflächengrenzschicht	15
2.1 Einführende Bemerkungen	15
Schrifttum zum Abschnitt 2.1	18
2.2 Grenzschichten der Oberfläche	19
2.2.1 Innere Grenzschicht	19
2.2.2 Äußere Grenzschicht	22
Schrifttum zum Abschnitt 2.2	28
3 Erfassen der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit	30
3.1 Oberfläche als räumliches Gebilde	30
3.1.1 Die Zeichnung, ein Mittel zur Darstellung der Oberflächen technischer Körper	30
3.1.2 Die Einzelflächen technischer Körper und ihre Lage-, Maß- und Gestaltabweichungen	30
Schrifttum zum Abschnitt 3.1	36
3.2 Voraussetzungen für das dreidimensionale und zweidimensionale Auswerten von Einzelflächen	36
3.2.1 Bei der Beurteilung technischer Oberflächen auftretende Probleme ..	36
3.2.2 Notwendigkeit eindeutiger Bezugsflächen	37
3.2.3 Darstellung technischer Oberflächen an Hand von Schnittlinien	38
3.2.4 Festlegen einheitlicher Koordinatensysteme für die zwei- und dreidimensionale Beschreibung von Einzelflächen technischer Körper	44
3.2.5 Stützfläche, Toleranzfläche und Regressionsfläche als Ausgangs- flächen für das Errichten von Bezugssystemen	45
3.2.6 Übergang vom dreidimensionalen zum zweidimensionalen Auswerten	52
3.2.7 Die tragende Fläche	54
Schrifttum zu Abschnitt 3.2	57
3.3 Bezugssysteme und die aus ihnen abgeleiteten Oberflächenmeßgrößen	58
3.3.1 Zahlenmäßiges Erfassen einzelner Ordnungen der Gestaltabweichung ..	58
3.3.2 Bezugssysteme für das zweidimensionale Erfassen von Istprofilen ...	59
3.3.2.1 Zuordnung der Gestaltabweichung zu bestimmten Ordnungen	59

3.3.2.2	Bezugsstreckenfilterung	60
3.3.2.3	Systeme ausmittelter Bezugslinien (Mittelliniensysteme, M-Systeme)	61
	A) Die Bezugssysteme M_c und M_r	62
	B) Das Bezugssystem M_o	63
	C) Die Bezugssysteme M_e und M_{e_k}	63
3.3.2.4	Aufbau universeller Bezugssysteme einhüllender Flächen und Profile (enveloping systems, E-Systeme)	64
	A) Die Zweckmäßigkeit universell anwendbarer Bezugs- systeme	64
	B) Das räumliche Bezugssystem einhüllender Flächen (EF-System)	65
	C) Das System einhüllender Bezugsprofile (EP-System)	67
3.3.2.5	Französisches Verfahren einhüllender Linienzüge zur Trennung von Welligkeit und Rauheit (hier als FN-System bezeichnet)	78
3.3.3	Meßgrößen für das quantitative Erfassen der geometrischen Beschaffenheit technischer Oberflächen	79
3.3.3.1	Meßgrößen für die Gestaltabweichung G	79
3.3.3.2	Meßgrößen für die Formabweichung	84
3.3.3.3	Meßgrößen für die Welligkeit	88
3.3.3.4	Meßgrößen für die Rauheit	93
	A) Senkrechtmeßgrößen der Rauheit	94
	B) Waagrechtmeßgrößen der Rauheit	99
	C) Rauheitsgrade	100
3.3.3.5	Zusammenfassende Übersicht genormter oder empfohlener Oberflächenmeßgrößen	102
3.3.3.6	Kritische Betrachtung der verschiedenen Rauheitsmeßgrößen	102
	A) Einige allgemeine Vorbemerkungen	102
	B) Die zwischen Rauheitsmeßgrößen bestehenden Beziehungen	106
	I. Meßgrößen der Bezugssysteme M_c und M_r (Bezugsstreckenfilterung)	108
	II. Meßgrößen des Bezugssystems M_e bzw. M_{e_k} (elektrische Filterung)	110
	III. Beziehungen zwischen Meßgrößen verschiedener Bezugssysteme	110
3.3.4	Kennzeichnung der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit in Zeichnungen	113
	Schrifttum zum Abschnitt 3.3	115
3.4	Oberfläche als statistisches Problem	119
3.4.1	Einleitende Bemerkungen	119
3.4.2	Statistische Parameter und Verteilungen	120
	3.4.2.1 Ordinatenverteilungskurve	120
	3.4.2.2 Bedeutung der zentralen Momente für die weiteren Betrachtungen	122
	3.4.2.3 <i>Abbottsche</i> Tragkurve	124
	3.4.2.4 Neigungsverteilung und mittlere Neigung	125

3.4.2.5	Spitzenverteilung nichtperiodischer und stochastischer Profile	127
3.4.2.6	Profillänge	128
3.4.2.7	Profileinhüllende nach <i>Peklenik</i>	129
3.4.3	Korrelationsanalyse	130
3.4.3.1	Autokorrelationsfunktion	130
3.4.3.2	Kreuzkorrelationsfunktionen	135
3.4.3.3	Leistungsspektrum (Leistungsdichtefunktion)	136
3.4.4	Mathematische Näherung von Oberflächenprofilen und Verteilungen	137
3.4.4.1	Näherung des Profils $z(x)$ durch verschiedene Linear- kombinationen von Basisfunktionen	137
3.4.4.2	Näherung des Profils $z(x)$ durch trigonometrische Reihen	139
3.4.4.3	Näherung des Profils $z(x)$ durch Tschebyscheffpolynome	141
3.4.4.4	Beschreibung der Ordinatenverteilung durch Betafunktionen	142
	Schrifttum zum Abschnitt 3.4	144
4	Prüfen und Messen der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit	146
4.1	Subjektives Beurteilen von Oberflächen	146
4.1.1	Allgemeine Bemerkungen	146
4.1.2	Wahrnehmen mit dem Auge	147
4.1.2.1	Zur Physiologie des Auges	147
4.1.2.2	Beobachten der Oberfläche mit unbewehrtem Auge	149
4.1.3	Wahrnehmen mit dem Hautsinn	150
4.1.3.1	Zur Physiologie des Hautsinns	150
4.1.3.2	Beurteilen von Oberflächen mittels des Tastsinns	152
4.1.4	Subjektiver Vergleich von Oberflächen	153
4.1.4.1	Prüfen mit Oberflächenvergleichsmustern	153
	Schrifttum zum Abschnitt 4.1	157
4.2	Erzeugen und Betrachten vergrößerter Bilder von Oberflächenausschnitten	158
4.2.1	Grundsätzliches	158
4.2.1.1	Strahlungsarten	159
A)	Lichtstrahlung	160
B)	Korpuskularstrahlung	162
4.2.1.2	Auflösungsgrenze	164
4.2.1.3	Erzeugen von Raumbildern	165
A)	Stereoskopische Verfahren	165
B)	Holographische Verfahren	167
4.2.2	Lichtmikroskopisches Betrachten von Oberflächen	169
4.2.2.1	Lichtmikroskope	169
4.2.2.2	Quantitatives Auswerten lichtmikroskopischer Bilder	177
4.2.2.3	Photographische Wiedergabe von Oberflächen	179
A)	Makrophotographie	180
B)	Mikrophotographie	181
4.2.3	Betrachten von Oberflächen mit Hilfe von Korpuskularstrahlen	183
	Schrifttum zum Abschnitt 4.2	190
4.3	Optische Meßverfahren und -geräte	192
4.3.1	Verfahren und Geräte für das Erzeugen optischer Schnitte	192

4.3.1.1	Lichtschnittverfahren und -geräte	192
4.3.1.2	Schattenwurfverfahren	195
4.3.1.3	Interferenzverfahren und -geräte	196
	A) Grundlagen, Zweistrahlinterferenzen	196
	B) Vielstrahlinterferenzen	201
	C) Äquidensitenverfahren	204
	D) Photogrammetrische Verfahren	205
	E) Fokussierungsverfahren	208
4.3.2	Reflexionsverfahren	209
4.3.2.1	Reflexionsverfahren nach <i>Heinrichs</i>	209
4.3.2.2	Reflexionsverfahren nach <i>Brodmann, Thurn</i> und <i>Gast</i>	210
4.3.3	Weißlichtverfahren (Phasenkontrast-Verfahren)	211
4.3.4	Auf der Benutzung des Lasers beruhende Geräte	212
4.3.4.1	Vorbemerkungen	212
4.3.4.2	Laser-Profilometer	213
	A) Allgemeines	213
	B) Aufbau des Laser-Profilometers	214
	C) Antasten mit Hilfe eines fokussierten Laser-Lichtbündels	215
	D) Mikroprofilometer, nach dem photometrischen Gleichgewicht arbeitend	217
	E) Heterodyn-Profilometrie	218
	F) Optischer Mikrotaster	219
	G) Optischer Meßtaster UBF 60 der Firma <i>Breitmeier</i>	220
4.3.4.3	Holographische Interferometrie	221
4.3.4.4	Auf den Reflexionseigenschaften der Oberfläche beruhende Verfahren und Geräte	223
	A) Laserinstrument nach <i>Murray</i>	223
	B) Lichtstreuungsmeßverfahren	224
	C) Ein weiteres Verfahren zur Messung der gerichteten und der gestreuten Reflexion	226
4.3.4.5	Messung der Oberflächenrauheit mit Hilfe der Granulationserscheinung (Speckles-Verfahren)	228
	A) Granulationserscheinungen	228
	B) Meßverfahren nach <i>Fujii, Asakura</i> u. a. für transparente Oberflächen	229
	C) Messung der Rauheit transparenter Oberflächen mit Hilfe der Laser-Granulationstechnik im <i>Fraunhofer</i> -schen Beugungsfeld	230
	D) Verfahren, bei denen die Korrelation zweier Granulationsmuster der gleichen Oberfläche beobachtet wird	231
	Schrifttum zum Abschnitt 4.3	232
4.4	Das Erfassen von Oberflächen nach dem Fühlschnittverfahren	235
4.4.1	Grundsätzliches zum Fühlschnittverfahren	235
4.4.2	Das Fühlsystem	236
4.4.2.1	Fühlelement und Gleitkufe	237
4.4.2.2	Arten der Fühlsysteme	239
4.4.2.3	Einfluß der Anordnung von Fühlelement und Gleitkufe	239

4.4.2.4	Einfluß der Registrierbasis auf die Wirklichkeitstreue von Profilaufzeichnungen und auf die Richtigkeit der Anzeige . . .	241
4.4.2.5	Auslegungsgrundlagen des Fühlsystems	243
4.4.3	Meßumformer zur Vergrößerung der axialen Auslenkung des Fühlelementes	246
4.4.3.1	Induktive Meßumformer	248
4.4.3.2	Kapazitive Meßumformer	249
4.4.3.3	Photoelektrische Meßumformer	250
4.4.3.4	Elektrodynamische Meßumformer	250
4.4.3.5	Piezoelektrische Meßumformer	251
4.4.3.6	Zusammenfassung	252
4.4.4	Aufbereitung und Umwandlung des Meßsignals	253
4.4.4.1	Meßverstärker	253
4.4.4.2	Filterverfahren	253
	A) Die Hochpaßfilterung	255
	B) Tiefpaßfilterung	263
4.4.5	Weitere Meßsignalverarbeitung bei der Oberflächenmessung mit Fühlschnittgeräten	264
	Schrifttum zum Abschnitt 4.4	265
4.5	Praktische Ausführung von Oberflächenmeßgeräten mit elektronischer Vergrößerung der Fühlspitzenauslenkung	266
4.5.1	Rückblick auf die Entwicklung der Tast- und Fühlschnittgeräte und ältere, zum Teil nicht mehr gebaute Geräte	266
4.5.2	Moderne handelsübliche Oberflächenmeßgeräte	271
4.5.3	Prüfen und Justieren mechanischer Profilschnittgeräte	279
	Schrifttum zum Abschnitt 4.5	282
4.6	Verfahren und Geräte zur Messung des Flächentraganteils	283
	Schrifttum zum Abschnitt 4.6	284
4.7	Pneumatische Verfahren und Geräte für das Erfassen der Oberflächenrauheit	285
	Schrifttum zum Abschnitt 4.7	286
4.8	Die Anzahl der erforderlichen Messungen zur gesicherten Angabe eines Rauheitsmeßwertes	287
	Schrifttum zum Abschnitt 4.8	289
5	Verfahren zur Untersuchung der stofflichen Eigenschaften der Grenzschicht von Oberflächen	290
5.1	Allgemeine Bemerkungen	290
5.2	Die Feinstrukturanalyse mit Hilfe von Röntgenstrahlen	291
	Schrifttum zum Abschnitt 5.2	296
5.3	Die Mikroanalyse mit Hilfe von Elektronenstrahlen	296
	Schrifttum zum Abschnitt 5.3	299
5.4	Mikroanalyse mit Hilfe von Ionenstrahlen	299
	Schrifttum zum Abschnitt 5.4	300
6	Funktionsbedingte Anforderungen an den Oberflächenzustand	301
6.1	Verschiedene Funktionen der Bauteiloberflächen und ihre Ordnung	301
	Schrifttum zum Abschnitt 6.1	303

6.2	Anforderungen an mechanisch nicht oder kaum beanspruchte Wirkflächen . . .	304
6.2.1	Aussehen als Funktion von Sichtflächen	304
6.2.2	Beschichtbarkeit von Oberflächen	304
6.2.3	Oberfläche und Strömung von Flüssigkeiten und Gasen	305
6.2.4	Oberfläche und Wärmeübertragung	308
6.2.4.1	Wärmeübertragung durch Strahlung	308
6.2.4.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	310
6.2.4.3	Wärmeleitung	312
6.2.4.4	Verdampfung	314
6.2.4.5	Kondensation und Benetzbarkeit	315
6.2.5	Oberfläche und Dichtungsverhalten	316
	Schrifttum zum Abschnitt 6.2	317
6.3	Oberflächenzustand und Festigkeit	319
6.3.1	Eigenspannungen in der Oberflächengrenzschicht	319
6.3.2	Härte der Oberflächengrenzschicht	322
6.3.3	Entstehen von Rissen und Brüchen	325
6.3.4	Druckfestigkeit rauher Oberflächen	328
6.3.5	Einfluß des Oberflächenzustandes auf die Wechselfestigkeit von Bauteilen	329
	Schrifttum zum Abschnitt 6.3	333
6.4	Die Oberfläche und das Toleranz- und Passungssystem	337
6.4.1	Toleranz und Passung	337
6.4.2	Zuordnung von Maßtoleranz und Rauheit	337
6.4.3	Paßtoleranz und ihre Beeinflussung durch Rauheit und Abnutzung . .	341
6.4.4	Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf das Verhalten von Preßverbänden	343
6.4.5	Einfluß der Abnutzung auf die Erhaltung des Sitzcharakters bei Spiel- und Übergangssitzen	348
	Schrifttum zum Abschnitt 6.4	349
6.5	Tribologische Oberflächenprobleme	350
6.5.1	Zum Begriff Tribologie und allgemeine Bemerkungen zum Aufbau tribologischer Systeme	350
6.5.2	Oberfläche und Reibung	353
6.5.2.1	Grundsätzliche Erkenntnisse zum Reibungsvorgang	353
6.5.2.2	Trockene Reibung (Festkörperreibung)	359
6.5.2.3	Grenz- und Mischreibung	362
6.5.2.4	Ein Zwischenabschnitt über die Schmierstoffe	364
6.5.2.5	Hydrodynamische und elasto-hydrodynamische Schmierung . .	369
6.5.3	Oberfläche und Verschleiß	375
6.5.3.1	Grundsätzliches zum Verschleißproblem	375
6.5.3.2	Verschleißmeßgrößen	378
6.5.3.3	Verschleißmechanismen	379
	A) Adhäsiver Verschleiß	379
	B) Abrasiver Verschleiß	380
	C) Zerrüttungsvererschleiß	380
	D) Tribochemische Reaktionen	381
6.5.3.4	Der Ablauf von Verschleißvorgängen	382

6.5.3.5	Die verschiedenen Verschleißarten	384
	A) Gleitverschleiß	384
	B) Wälzverschleiß	388
	C) Stoßverschleiß	390
	D) Schwingungverschleiß	391
	E) Kornleit- und Kornwälzverschleiß	392
	F) Kavitationsverschleiß	394
	G) Tropfenschlagverschleiß	396
	H) Spül- oder Erosionsverschleiß	397
	J) Strahlverschleiß	398
	Schrifttum zum Abschnitt 6.5	400
6.6	Oberfläche und Korrosion	403
6.6.1	Zum Begriff der Korrosion	403
6.6.2	Die Korrosion als chemischer oder elektrochemischer Vorgang	404
6.6.3	Grundbegriffe der elektrochemischen Korrosion	405
6.6.3.1	Elektrodenpotential; Spannungsreihen der Metalle	405
6.6.3.2	Zum elektrochemischen Verhalten der Metalle	405
	A) Elektrochemische Reaktionen	405
	B) Passivität	406
	C) Die Korrosionselemente	407
6.6.4	Korrosionsarten	409
6.6.4.1	Korrosionsfälle ohne mechanische Beanspruchung	410
	A) Gleichmäßige Flächenkorrosion	410
	B) Lochkorrosion	410
	C) Kontaktkorrosion	412
	D) Spalt- oder Belüftungskorrosion	414
	E) Selektive Korrosion	414
6.6.4.2	Korrosionsfälle mit gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung	416
	A) Spannungsrißkorrosion	416
	B) Schwingungsrißkorrosion	417
	C) Kavitationskorrosion	417
	D) Reibkorrosion	418
6.6.5	Beispiele für das Korrosionsverhalten der Metalle im umgebenden Medium	418
6.6.5.1	Atmosphärische Korrosion	418
6.6.5.2	Metallkorrosion im Gebrauchswasser und im Salzwasser	420
6.6.5.3	Metallkorrosion in verdünnten und konzentrierten Säuren	422
6.6.5.4	Korrosion an im Erdreich verlegten Metallen	422
6.6.5.5	Mikrobakterielle Korrosion	423
6.6.6	Korrosionsschutz	424
6.6.6.1	Aktiver Korrosionsschutz	425
6.6.6.2	Passiver Korrosionsschutz	426
	A) Nichtmetallische anorganische Überzüge	426
	B) Metallische Überzüge	427
	C) Organische Überzüge	428
	Schrifttum zum Abschnitt 6.6	428
	Sachwortverzeichnis	431