

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

<b>Verwendete Bezeichnungen</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Physikalische und chemische Eigenschaften der Oberflächengrenzschicht</b> .....	<b>15</b>
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
<b>3 Erfassen der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit</b> .....	<b>30</b>
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 ausmittlender 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 Bezugssysteme . . . . .	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
<b>4</b>	<b>Prüfen und Messen der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit</b> . . . . .	<b>146</b>
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, Zweistrahlinterenzen	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 Granula- tionserscheinung (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> Beugungsfeld	230
	D) Verfahren, bei denen die Korrelation zweier Granula- tionsmuster 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
<b>5</b>	<b>Verfahren zur Untersuchung der stofflichen Eigenschaften der Grenzschicht von Oberflächen . . . . .</b>	<b>290</b>
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
<b>6</b>	<b>Funktionsbedingte Anforderungen an den Oberflächenzustand . . . . .</b>	<b>301</b>
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
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>431</b>