

# **Handbuch der Fertigungstechnik**

Band 4/1

## **Abtragen, Beschichten**

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Günter Spur

Mit 578 Bildern und 105 Tabellen

**Carl Hanser Verlag München Wien**

# Inhalt

1	Abtragen	1
1.1	Einführung in die Abtragtechnik	1
1.1.1	Allgemeines	1
1.1.2	Geschichtliche Entwicklung	1
1.1.3	Einteilung der abtragenden Fertigungsverfahren	4
	Literatur zu Abschnitt 1.1	13
1.2	Abtragen durch Flüssigkeit	16
1.2.1	Grundlagen	16
1.2.2	Technologie	19
1.2.3	Anwendungsbeispiele des Abtragens durch Wasserstrahlen	22
1.2.3.1	Allgemeines	22
1.2.3.2	Anwendung beim Gußputzen	22
1.2.3.3	Anwendung beim Entgraten	23
1.2.3.4	Anwendung beim Schneiden	23
	Literatur zu Abschnitt 1.2	28
1.3	Abtragen durch Gas	29
1.3.1	Allgemeines	29
1.3.2	Autogenes Brennschneiden	29
1.3.2.1	Anwendungsbedingungen	29
1.3.2.2	Vorgänge in der Wirkzone	30
1.3.2.3	Technologie	31
1.3.2.3.1	Brenner und Düsen	31
1.3.2.3.2	Parameter	32
1.3.2.3.3	Bahnführungsmaschinen	39
1.3.2.3.4	Umweltschutz	44
1.3.2.3.5	Wirtschaftlichkeit	45
1.3.2.4	Anwendungsbeispiele	47
1.3.3	Metallpulverbrennschneiden	52
1.3.4	Metallpulverschmelzschneiden	53
1.3.5	Mineralpulverbrennschneiden	53
1.3.6	Longcav-Brennschneiden	54
1.3.7	Brennfugen	55
1.3.8	Brennflämmen	56
1.3.9	Brennbohren	58
1.3.10	Flammstrahlen	59
	Literatur zu Abschnitt 1.3	60
1.4	Abtragen durch elektrische Gasentladung	61
1.4.1	Abtragen mit Funken	61
1.4.1.1	Grundlagen	61
1.4.1.2	Verfahrensübersicht	64
1.4.1.3	Funkenerosives Senken	66
1.4.1.3.1	Allgemeines	66
1.4.1.3.2	Senkerosionsanlage	67
1.4.1.3.3	Technologie	69
1.4.1.3.4	Oberflächenbeschaffenheit	75
1.4.1.3.5	Funkenerosives Senken mit überlagerter Elektrodenbewegung	78
1.4.1.4	Funkenerosives Schneiden	81
1.4.1.4.1	Allgemeines	81
1.4.1.4.2	Schneiderosionsanlage	81

	1.4.1.4.3	Technologie	83
1.4.1.5		Elektroden	88
	1.4.1.5.1	Allgemeines	88
	1.4.1.5.2	Elektrodenarten	88
	1.4.1.5.3	Verfahren zur Elektrodenherstellung	89
	1.4.1.5.4	Spann- und Handhabungssysteme	98
	1.4.1.5.5	Elektrodenwerkstoffe	99
	1.4.1.5.6	Anwendungsbeispiele	103
1.4.1.6		Bearbeiten auf Erodieranlagen	106
	1.4.1.6.1	Allgemeines	106
	1.4.1.6.2	Anforderungen an Erodieranlagen	107
	1.4.1.6.3	Aufbau von Erodieranlagen	111
	1.4.1.6.4	Werkzeuge und Zusatzeinrichtungen	115
	1.4.1.6.5	Planung und Steuerung von Arbeitsabläufen	118
	1.4.1.6.6	Arbeitstechniken	119
	1.4.1.6.7	Anwendungsbeispiele	120
	1.4.1.6.8	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften	130
1.4.2		Abtragen mit Lichtbogen	135
	1.4.2.1	Allgemeines	135
	1.4.2.2	Lichtbogen-Sauerstoffschneiden	135
	1.4.2.3	Lichtbogen-Druckluftschneiden	137
	1.4.2.4	Lichtbogenschneiden mit Kohle- oder Metallelektrode	137
1.4.3		Abtragen mit Plasma	139
	1.4.3.1	Allgemeines	139
	1.4.3.2	Argon-Wasserstoff Technologie	140
	1.4.3.3	Luft-Plasma Technologie	142
	1.4.3.4	Wasser-Injektions-Plasma Technologie	144
	1.4.3.5	PMC-grün Technologie	147
	1.4.3.6	Wirtschaftlichkeit	150
		Literatur zu Abschnitt 1.4	152
1.5		Abtragen durch gebündelte Strahlen	156
	1.5.1	Allgemeines	156
	1.5.2	Voraussetzungen	156
	1.5.2.1	Physikalische Voraussetzungen	156
		1.5.2.1.1 Energietransfer vom Strahl auf den Werkstoff	156
		1.5.2.1.2 Erforderliche Strahlleistungsdichte	159
	1.5.2.2	Apparative Voraussetzungen	160
		1.5.2.2.1 Allgemeines	160
		1.5.2.2.2 Erzeugung von Elektronenstrahlen	161
		1.5.2.2.3 Fokussierung von Elektronenstrahlen	164
		1.5.2.2.4 Erzeugung von Laserstrahlen	167
		1.5.2.2.5 Fokussierung von Laserstrahlen	173
		1.5.2.2.6 Vergleich von Laser- und Elektronenstrahlen	175
	1.5.3	Fertigungsanlagen	176
		1.5.3.1 Allgemeines	176
		1.5.3.2 Elektronenstrahlanlagen	176
		1.5.3.3 Laserstrahlanlagen	181
		1.5.3.3.1 Festkörperlaser	181
		1.5.3.3.2 CO <sub>2</sub> -Gaslaser	188
		1.5.3.4 Vergleich von Laser- und Elektronenstrahlanlagen	196
	1.5.4	Abtragprozeß	197
		1.5.4.1 Allgemeines	197



1.5.4.2	Eindringtiefe und Energieabgabe .....	197
1.5.4.3	Reflexion und Absorption von Laserstrahlen .....	200
1.5.4.4	Rückstreuung von Elektronenstrahlen .....	201
1.5.4.5	Aufheizen der Abtragzone .....	202
1.5.4.6	Dynamik des Abtragprozesses .....	203
1.5.4.7	Thermische Beeinflussung der Randzone .....	209
1.5.5	Verfahren .....	214
1.5.5.1	Herstellen von Bohrungen und Durchbrüchen .....	214
1.5.5.1.1	Technologie .....	214
1.5.5.1.2	Anwendungsbeispiele .....	223
1.5.5.2	Schneiden und Trennen von Flach- und Formteilen .....	230
1.5.5.2.1	Technologie des Feinschneidens .....	230
1.5.5.2.2	Technologie des Ritzens und Anreißens (Scribens) ...	233
1.5.5.2.3	Technologie des Schneidens mittels CO <sub>2</sub> -Laserstrahlen	234
1.5.5.2.4	Anwendungsbeispiele .....	243
1.5.5.3	Abtragen von Dünnschichten .....	249
1.5.5.3.1	Technologie .....	249
1.5.5.3.2	Anwendungsbeispiele .....	253
1.5.5.4	Sonderverfahren .....	256
1.5.5.4.1	Allgemeines .....	256
1.5.5.4.2	Auswuchten von Rotoren .....	256
1.5.5.4.3	Beschriften und Markieren .....	257
1.5.5.4.4	Abisolieren von Kunststoffummantelungen .....	258
1.5.5.4.5	Freilegen von kunststoffbeschichteten Metallober- flächen .....	259
Literatur zu Abschnitt 1.5 .....		260
1.6	Chemisches Abtragen .....	263
1.6.1	Allgemeines .....	263
1.6.2	Ätzabtragen .....	263
1.6.3	Thermisch-chemisches Entgraten .....	263
1.6.4	Chemisch-thermisches Abtragen .....	265
Literatur zu Abschnitt 1.6 .....		265
1.7	Elektrochemisches Abtragen .....	266
1.7.1	Grundlagen .....	266
1.7.2	Elektrochemisches Profilabtragen .....	268
1.7.2.1	Elektrochemisches Senken .....	268
1.7.2.1.1	Allgemeines .....	268
1.7.2.1.2	Anforderungen an elektrochemische Senkanlagen ...	268
1.7.2.1.3	Elektrolytarten .....	270
1.7.2.1.4	Anforderungen an Werkzeugelektroden und Vorrichtungen .....	270
1.7.2.1.5	Einflußgrößen .....	271
1.7.2.1.6	Elektrochemische Senkbarkeit .....	273
1.7.2.2	Elektrochemisches Bohren .....	281
1.7.2.3	Elektrochemisches Drehen .....	282
1.7.2.4	Elektrochemisches Entgraten .....	283
1.7.2.5	Elektrochemisches Markieren .....	284
1.7.3	Kombination elektrochemischer und spanender Bearbeitungsverfahren ...	284
1.7.3.1	Elektrochemisches Schleifen .....	284
1.7.3.2	Elektrochemisches Honen .....	285
1.7.3.3	Elektrochemisches Läppen .....	286
1.7.4	Elektrochemisches Oberflächenabtragen .....	287

1.7.4.1	Allgemeines	287
1.7.4.2	Elektrochemisches Polieren	287
1.7.4.3	Elektrochemisches Badentgraten	287
1.7.4.4	Elektrochemisches Entmetallisieren	288
1.7.4.5	Elektrochemisches Beizen	288
1.7.5	Elektrochemisches Ätzen	289
1.7.5.1	Allgemeines	289
1.7.5.2	Tauchätzen	291
1.7.5.3	Sprühätzen	291
1.7.5.4	Sonstige Ätzverfahren	291
1.7.6	Elektrochemische Abtraganlagen	292
1.7.6.1	Elektrochemische Senkanlagen	292
1.7.6.1.1	Allgemeines	292
1.7.6.1.2	Aufbau der Anlagen	292
1.7.6.1.3	Vorrichtungen	301
1.7.6.1.4	Anwendungsbeispiele	302
1.7.6.2	Elektrochemische Entgrat-, Kontur- und Gravieranlagen	304
1.7.6.2.1	Allgemeines	304
1.7.6.2.2	Aufbau der Anlagen	305
1.7.6.2.3	Vorrichtungen	308
1.7.6.2.4	Anwendungsbeispiele	309
1.7.6.3	Elektrochemische Sprühätzenanlagen zur Leiterplattenfertigung	310
1.7.6.3.1	Allgemeines	310
1.7.6.3.2	Einteilung	314
1.7.6.3.3	Anforderungen	314
1.7.6.3.4	Regenerationsanlagen	318
1.7.7	Anwendungsbeispiele des elektrochemischen Tauchätzens	321
1.7.7.1	Anwendung in der Leiterplattenfertigung	321
1.7.7.1.1	Allgemeines	321
1.7.7.1.2	Ätzsystem	321
1.7.7.1.3	Regeneration und Badausrüstung	325
1.7.7.1.4	Prozessparameter	327
1.7.7.2	Anwendung in der Luftfahrttechnik	327
1.7.7.2.1	Allgemeines	327
1.7.7.2.2	Anforderungen	332
1.7.7.2.3	Werkstückvorbereitung	334
1.7.7.2.4	Aufbereitung der Badflüssigkeit	337
1.7.7.2.5	Elektrochemische Tauchätzenanlagen	337
	Literatur zu Abschnitt 1.7	338
2	Beschichten	341
2.1	Einführung in die Beschichtungstechnik	341
2.1.1	Allgemeines	341
2.1.2	Einteilung der beschichtenden Fertigungsverfahren	343
2.1.3	Bedeutung der beschichtenden Fertigungsverfahren	346
	Literatur zu Abschnitt 2.1	348
2.2	Grundlagen des Beschichtens	349
2.2.1	Allgemeines	349
2.2.2	Grundlagen des metallischen Beschichtens	349
2.2.3	Grundlagen des nichtmetallischen Beschichtens	359
2.2.3.1	Organisches Beschichten	359
2.2.3.2	Anorganisches Beschichten	360
	Literatur zu Abschnitt 2.2	362

2.3	Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand .....	363
2.3.1	Allgemeines .....	363
2.3.2	Aufdampfen .....	366
2.3.2.1	Allgemeines .....	366
2.3.2.2	Grundlagen .....	366
2.3.2.3	Technologie .....	371
2.3.2.4	Anwendung und Bedeutung .....	376
2.3.3	Sputtern .....	378
2.3.3.1	Allgemeines .....	378
2.3.3.2	Grundlagen .....	378
2.3.3.3	Technologie .....	382
2.3.3.4	Anwendung und Bedeutung .....	389
2.3.4	Ionenplattieren .....	390
2.3.4.1	Allgemeines .....	390
2.3.4.2	Grundlagen .....	390
2.3.4.3	Technologie .....	391
2.3.4.4	Anwendung und Bedeutung .....	395
2.3.5	Beschichten durch Plasmapolymerisation .....	396
2.3.5.1	Allgemeines .....	396
2.3.5.2	Grundlagen .....	396
2.3.5.3	Technologie .....	402
2.3.5.4	Anwendung und Bedeutung .....	407
2.3.6	Beschichten durch Ionenstrahlen .....	408
2.3.6.1	Allgemeines .....	408
2.3.6.2	Grundlagen .....	410
2.3.6.3	Technologie .....	413
2.3.6.4	Anwendung und Bedeutung .....	416
2.3.7	Beschichten durch chemisches Abscheiden aus der Gasphase .....	419
2.3.7.1	Allgemeines .....	419
2.3.7.2	Grundlagen .....	420
2.3.7.3	Technologie .....	422
2.3.7.4	Anwendung und Bedeutung .....	424
	Literatur zu Abschnitt 2.3 .....	427
2.4	Beschichten aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand .....	433
2.4.1	Nichtmetallisches organisches Beschichten .....	433
2.4.1.1	Lackieren .....	433
2.4.1.1.1	Allgemeines .....	433
2.4.1.1.2	Vorbehandlung .....	433
2.4.1.1.3	Lacksysteme .....	439
2.4.1.1.4	Spritzlackieren ohne elektrostatische Lackaufladung ..	447
2.4.1.1.5	Sprühen mit elektrostatischer Lackaufladung .....	451
2.4.1.1.6	Tauchlackieren .....	455
2.4.1.1.7	Fluten .....	459
2.4.1.1.8	Walzen, Gießen und Rakeln .....	459
2.4.1.1.9	Bandbeschichten .....	461
2.4.1.1.10	Zentrifugieren und Trommeln .....	462
2.4.1.1.11	Streichen und Rollen .....	462
2.4.1.2	Befetten .....	463
2.4.1.2.1	Allgemeines .....	463
2.4.1.2.2	Anforderungen .....	463
2.4.1.2.3	Befettungsverfahren .....	464
2.4.1.2.4	Befettungsmittellösungen .....	464

	2.4.1.2.5	Prüfverfahren	466
	2.4.1.2.6	Einflußfaktoren	470
2.4.2		Nichtmetallisches anorganisches Beschichten	472
	2.4.2.1	Emaillieren	472
	2.4.2.1.1	Allgemeines	472
	2.4.2.1.2	Grundlagen	474
	2.4.2.1.3	Einteilung	475
	2.4.2.1.4	Emailfritte	475
	2.4.2.1.5	Metallträger für die Emaillierung	476
	2.4.2.1.6	Emaillierverfahren	476
	2.4.2.1.7	Nachbehandlung, Prüfung und Anwendung von Emaillierungen	478
2.4.3		Metallisches Beschichten	480
	2.4.3.1	Thermisches Spritzen	480
	2.4.3.1.1	Allgemeines	480
	2.4.3.1.2	Einteilung	480
	2.4.3.1.3	Vorbehandlung	482
	2.4.3.1.4	Metallspritzwerkstoffe	483
	2.4.3.1.5	Thermische Spritzverfahren	483
	2.4.3.1.6	Nachbehandlung, Prüfung und Anwendung von Metallspritzschichten	489
	2.4.3.1.7	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz	490
	2.4.3.2	Schmelztauchen	492
	2.4.3.2.1	Allgemeines	492
	2.4.3.2.2	Einteilung	492
	2.4.3.2.3	Grundlagen	493
	2.4.3.2.4	Schmelztauchwerkstoffe	494
	2.4.3.2.5	Metallträger	494
	2.4.3.2.6	Schmelztauchverfahren	495
	2.4.3.2.7	Weiterverarbeitung von Werkstücken mit Schmelztauchüberzug	497
	2.4.3.2.8	Korrosionsschutz durch Schmelztauchüberzüge	498
		Literatur zu Abschnitt 2.4	499
2.5		Beschichten aus dem ionisierten Zustand durch elektrolytische oder chemische Abscheidung	503
	2.5.1	Allgemeines	503
	2.5.2	Grundlagen	504
	2.5.3	Technologie	506
	2.5.3.1	Allgemeines	506
	2.5.3.2	Vorbehandlung	507
	2.5.3.3	Fertigungsabläufe beim Galvanisieren	510
	2.5.3.4	Prozeßparameter	513
	2.5.3.5	Nachbehandlung	515
2.5.4		Galvanotechnisch erzeugte Schichtüberzüge	516
	2.5.4.1	Schichtarten	516
	2.5.4.2	Schichteigenschaften	518
2.5.5		Anwendungsbedingungen	519
		Literatur zu Abschnitt 2.5	521
2.6		Beschichten aus dem festen Zustand	523
	2.6.1	Pulverbeschichten	523
	2.6.1.1	Allgemeines	523
	2.6.1.2	Technologie	524

2.6.1.2.1	Oberflächenvorbereitung .....	524
2.6.1.2.2	Herstellung von Pulverlacken .....	524
2.6.1.2.3	Pulverlackssysteme und deren Prüfung .....	526
2.6.1.3	Pulverbeschichtungsverfahren .....	530
2.6.1.4	Anwendungsbedingungen .....	537
2.6.2	Metallplattieren .....	539
2.6.2.1	Plattierverfahren .....	539
2.6.2.1.1	Allgemeines .....	539
2.6.2.1.2	Walzplattieren .....	540
2.6.2.1.3	Sprengplattieren .....	540
2.6.2.1.4	Gießplattieren .....	541
2.6.2.2	Plattierwerkstoffe .....	541
2.6.2.3	Verarbeitung von Plattierwerkstoffen .....	544
2.6.2.4	Anwendungsbeispiele .....	546
	Literatur zu Abschnitt 2.6 .....	547
2.7	Beschichten durch Schweißen .....	549
2.7.1	Allgemeines .....	549
2.7.2	Auftragwerkstoffe .....	549
2.7.3	Auftragschweißverfahren .....	551
	Literatur zu Abschnitt 2.7 .....	554
	Nachweis der Bilder .....	555
	Sachwortregister .....	557