

1	Einleitung	13
2	Charakterisierung und Definition des Grats	17
2.1	Definition des Grats	17
2.2	Ursachen der Gratentstehung	18
2.2.1	Allgemeine Betrachtungen	18
2.2.2	Urformen	19
2.2.3	Umformen	21
2.2.4	Trennen	22
	2.2.4.1 Zerteiltechnische Trennverfahren	22
	2.2.4.2 Spanende Trennverfahren	23
2.2.5	Abtragende Verfahren	24
2.2.6	Fügen	25
2.3	Charakterisierung des Grats	25
2.3.1	Grundlagen	25
	2.3.1.1 Grat in Form einer Geraden	26
	2.3.1.2 Grat in gekrümmter Form	27
2.3.2	Gratlage	27
	2.3.2.1 Erläuterungen	28
2.3.3	Darstellung der Gratarten	29
2.4	Reproduzierbarkeit von Gratkenngößen	29
2.5	Entgrataufgabe	32
2.5.1	Gratbeseitigung	33
2.5.2	Gratbeseitigung und Erzeugung zusätzl. geometr. Formen	33
2.6	Mathematisch-technologische Gesamtbetrachtung	33
2.6.1	Ziel der Betrachtung	33
2.6.2	Gesamtbetrachtung	34

3	Entgratgerechtes Gestalten und Fertigen	39
3.1	Entgratziele	39
3.2	Empfehlungen zur entgratgerechten Gestaltung	41
3.2.1	Grundlegende Zusammenhänge	41
3.2.2	Allgemeine Empfehlungen	41
3.2.3	Gestaltungsregeln für den Konstrukteur	43
3.2.4	Gestaltungsregeln für den Fertigungsplaner	45
3.2.5	Spezifische Gestaltungsregeln für das Urformen	45
3.2.6	Spezielle Gestaltungsregeln für das Umformen	47
3.2.7	Gratminimierung beim Spanen	47
	3.2.7.1 Gestaltungsregeln	47
	3.2.7.2 Gratminimierung beim Bohren	49
3.2.8	Bearbeitungsabfolge	51
3.3	Gratminimierung und Grätvorhersage bei der Zerspanung	51
3.3.1	Werkstoffeinfluss	51
	3.3.1.1 Gratneigung von Werkstoffen	51
	3.3.1.2 Duktile Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze	52
	3.3.1.3 Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze	53
	3.3.1.4 Spröde Werkstoffe mit minimaler Bruchdehnung	54
3.3.2	Rechnerische Prognose der Gratdicke	55
	3.3.2.1 Zielstellung des Vorhersagemodells	55
	3.3.2.2 Grundlagen	55
	3.3.2.3 Modellgleichung und Einflussgrößen	56
	3.3.2.4 Ergebnisse und Anwendung	58
	3.3.2.5 Erweiterung auf Kantenwinkel ungleich 90°	61
	3.3.2.6 Abschätzung der Grathöhe	62
	3.3.2.7 Praktische Bedeutung der Prognose	63
4	Allgemeine Betrachtungen zum Entgraten	65
4.1	Präzisierung der Entgrataufgabe oder des Entgratproblems	65
4.2	Eigenschaften der Gratbasis	65
4.3	Kräfte und Bewegung zwischen Grund- und Gratkörper	69
4.3.1	Nichtmechanische Kräfte	70
4.3.2	Mechanische Kräfte	70
	4.3.2.1 Kräfte durch Mikrobewegung	70
	4.3.2.2 Kräfte durch Makrobewegung	70
4.3.3	Kräfte durch Kombinationsbewegungen	71
4.4	Präzisierung des Entgratproblems durch Fragebögen	71
4.5	Vorgehensweise zur Auswahl des Entgratverfahrens	71

5	Entgratverfahren der Zerteiltechnik	73
5.1	Abschlagen	73
5.2	Brechen	74
5.2.1	Makrobrechen mit starren Werkzeugen	74
5.2.2	Makrobrechen mit nichtstarren Werkzeugen	74
5.2.3	Mikrobrechen mit nichtstarren Werkzeugen	75
5.3	Trommeln	78
5.4	Keilschneiden oder Meißeln	79
5.5	Messerschneiden	80
5.5.1	Werkzeuge mit spitzem Keilwinkel	80
5.5.2	Werkzeuge mit großem Keilwinkel	80
6	Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide	83
6.1	Drehen	83
6.2	Bohren und Senken	85
6.3	Fräsen	87
6.4	Hobeln/Stoßen	89
6.5	Feilen	91
6.6	Bürstspanen	91
6.7	Robotereinsatz und Kombination von Entgratverfahren	94
6.8	Spezielle Handentgratwerkzeuge	97
7	Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide	99
7.1	Schleifen	99
7.1.1	Schleifen mit rotierender Scheibe	100
7.1.1.1	Schleifkörper	100
7.1.1.2	Schleifmaschinen	104
7.1.2	Schleifen mit Bändern	105
7.1.3	Verfahrensbewertung	106
7.1.4	Anpassungs- und Optimierungsmöglichkeiten	107
7.1.4.1	Schleifkörper	107
7.1.4.2	Verfahrensvarianten	107
7.1.4.3	Industrieroboter- und Manipulatoreinsatz	108
7.2	Gleitspanen, Gleitschleifen	109
7.2.1	Verfahrensvarianten	109
7.2.2	Verfahrenseigenschaften	113
7.3	Druckfließbläppen	115
7.4	Tauchbläppen	120
7.5	Strahlspanen	121

7.5.1	Entgratstrahlspanen mit festem Strahlmittel	121
7.5.1.1	Beschleunigung durch Düsen	123
7.5.1.2	Beschleunigung mit Schleuderrädern	124
7.5.2	Strahlspanen mit flüssigem Strahlmittel	128
7.5.2.1	Strahlspanen ohne Abrasivmittelzusatz	128
7.5.2.2	Anwendung des Hochdruckwasserstrahlens	132
7.5.2.3	Strahlspanen mit Abrasivmittelzusatz	134
7.5.2.4	Verfahrenseinschätzung	135
7.6	Magnetabrasives Entgraten	136
7.7	Entgraten durch Schwingungen	136
7.7.1	Niederfrequente Schwingungen	136
7.7.2	Hochfrequente Schwingungen	137
8	Entgraten durch Abtragen	139
8.1	Thermisches Entgraten	139
8.1.1	Thermisches Entgraten durch einen festen Körper	139
8.1.2	Thermisches Entgraten durch Flüssigkeit	140
8.1.3	Thermisches Entgraten durch Gas	140
8.1.3.1	Schmelzschneiden mit Warmgas	140
8.1.3.2	Entgraten mittels Brennschneidens	141
8.1.3.3	Entgraten durch Flämmen	141
8.1.3.4	Entgraten durch Pulverbrennschneiden	142
8.1.4	Thermisches Abtragen durch elektrische Gasentladungen	142
8.1.4.1	Funkenerosives Entgraten	142
8.1.4.2	Entgraten mit Lichtbogen und rotierendem Werkzeug	144
8.1.4.3	Entgraten mit Lichtbogen und nichtrotierendem Werkzeug	145
8.1.4.4	Entgraten mit Plasmastrahlen	146
8.1.4.5	Entgraten mit magnetisch bewegtem Lichtbogen	148
8.1.5	Thermisches Entgraten durch Strahlen	148
8.1.5.1	Entgraten mit Lichtstrahlen	149
8.1.5.2	Entgraten mit Laserstrahlen	149
8.1.5.3	Entgraten mit Elektronenstrahl	150
8.1.6	Thermisches Entgraten durch Bewegung	151
8.1.6.1	Entgraten durch Reibtrennen	151
8.1.7	Widerstandsentsgraten durch elektrischen Strom	152
8.1.7.1	Widerstandsentsgraten	153
8.1.7.2	Entgraten durch Induktion	155
8.1.8	Elektromechanisches Entgraten	155

8.1.8.1	Schleifen mit elektrisch leitfähigen Scheiben	156
8.2	Chemisches Entgraten	157
8.2.1	Entgraten durch Ätzen	157
8.2.2	Thermisches Entgraten	157
8.3	Entgraten durch elektrochemisches Abtragen	163
8.3.1	Verfahrensgrundlage	163
8.3.2	Elektrochemisches Entgraten	165
8.3.2.1	Elektrochemisches Formentgraten	165
8.3.2.2	Elektrochemisches Entgraten mit Segmentkatode	167
8.3.2.3	Elektrochemisches Badentgraten	167
8.3.2.4	Elektrochemisches Entgraten mit rotierender Bürste	168
8.3.3	Elektrochemisches Entgraten durch Ätzen	170
9	Spanende Werkzeuge für den maschinellen Einsatz	173
9.1	Allgemeine Anforderungen für die Anwendung	173
9.1.1	Entgrataufgaben	174
9.1.2	Grundprinzipien und Funktionsmerkmale	175
9.2	Arbeitsprinzipien.....	177
9.2.1	Rückwärts- und Vorwärtsentgraten	177
9.2.2	Entgraten von Querbohrungen	177
9.3	Beispiele für Entgratwerkzeuge	178
9.3.1	Entgratwerkzeuge mit federnd oder elastisch gelagerten Schneiden..	179
9.3.1.1	Entgratwerkzeug COFA	179
9.3.1.2	Faswerkzeug SNAP	179
9.3.1.3	Entgratwerkzeug mit elastomergelagerten Schneiden.....	180
9.3.1.4	Entgratwerkzeug BurrOff	180
9.3.1.5	Entgratwerkzeug GMO	181
9.3.1.6	Entgratwerkzeug Burraway	181
9.3.1.7	Entgratwerkzeug zur Durchdringungsentgratung.....	181
9.3.2	HSD-Entgratwerkzeuge mit druckkontrollierten Schneiden	182
9.3.3	Einsatz von Entgratwerkzeugen zum konturgerechten Entgraten von Kanten.....	183
10	Qualitätssicherung beim Entgraten	185
10.1	Qualität der Gratbeseitigung	185
10.2	Qualitätseinfluss am Werkstück	187
10.3	Gerätetechnik zur Kantendarstellung	187
	Stichwortverzeichnis	189
	Literatur	193