

Florestan Schindler

Zerspanungsmechanismen beim Schleifen von polykristallinem Diamant



Zerspanungsmechanismen beim Schleifen von polykristallinem Diamant

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Florestan Schindler

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juli 2015

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Florestan Schindler

Zerspanungsmechanismen beim Schleifen von
polykristallinem Diamant

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 46/2015



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Florestan Schindler:

Zerspanungsmechanismen beim Schleifen von polykristallinem Diamant

1. Auflage, 2015

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2015

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-378-0

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, dem Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich herzlich für die fachliche und persönliche Förderung, die stetige Unterstützung meiner Tätigkeit sowie seine motivierende und wohlwollende Führung.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier, dem Leiter des Instituts für Werkstofftechnik IWT der Universität Bremen, danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich bedanke mich bei allen Kollegen des Werkzeugmaschinenlabors, insbesondere bei den „Aachener Schleifern“, für die Unterstützung und stete Hilfsbereitschaft. Die positive Atmosphäre am Institut hat in entscheidender Weise zur erfolgreichen Umsetzung dieser Arbeit beigetragen. Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Freunden und Kollegen Janis Thiermann, Matthias Rasim, Richard Brocker, Sebastian Müller, Christian Wirtz und Dr.-Ing. Patrick Mattfeld für die eingehende Durchsicht und Diskussion meiner Arbeit.

Darüber hinaus danke ich den Mitarbeitern des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnologie IPT, Herrn Andreas Janssen und Herrn Jan-Patrick Hermani, für die Unterstützung bei der Laser-Bearbeitung. Bei Herrn Dr. rer. nat. Thomas E. Weirich vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie GFE der RWTH Aachen bedanke ich mich für die zahlreichen Diskussionen und die Unterstützung bei der Auswertung.

Besonderer Dank gilt meinen studentischen Mitarbeitern, Herrn Seamus Laprell und Herrn Moritz Jochums, für ihr Engagement und für ihre tatkräftige Mithilfe.

Außerdem danke ich meinem Bruder Dr.-Ing. Sebastian Schindler für die inhaltlichen Diskussionen und die mentale Unterstützung.

Für ihre liebevolle Unterstützung und Geduld während der Erstellung dieser Arbeit danke ich von Herzen meiner lieben Frau, Celia Jiménez García. Der größte Dank gilt meinen Eltern, die mich stets in jeder Hinsicht unterstützt und mir die Möglichkeit für meinen Werdegang geschaffen haben.

Aachen, im Juli 2015

Florestan Schindler

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	5
2.1	Kohlenstoff und seine Modifikationen	5
2.2	Diamant und seine Eigenschaften	8
2.2.1	Aufbau von Diamant	8
2.2.2	Eigenschaften von Diamant	10
2.3	Graphit und seine Eigenschaften	13
2.3.1	Aufbau von Graphit	13
2.3.2	Eigenschaften von Graphit	13
2.4	Polykristalliner Diamant	15
2.4.1	Herstellung von polykristallinem Diamant	16
2.4.2	Herstellung von PKD-Werkzeugschneiden	17
2.4.3	Eigenschaften von polykristallinem Diamant	19
2.5	Schleifen von polykristallinem Diamant	22
2.5.1	Prozessführung und Schleifparameter	22
2.5.2	Zerspanungsmechanismen beim PKD-Schleifen	27
2.6	Alternative Bearbeitungsverfahren	30
2.6.1	Zerspanungsmechanismen beim Polieren	31
2.6.2	Verschleißmechanismen von PKD beim Einsatz als Schneidstoff	32
2.7	Zwischenfazit aus dem Stand der Erkenntnisse	34
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	37
4	Entwicklung und Charakterisierung eines Analogieprüfstands zur Analyse des PKD-Schleifens	41
4.1	Versuchsaufbau und -durchführung des Analogieprozesses	42
4.1.1	PKD-Spezifikation und Analogiewerkstückgeometrie	42
4.1.2	Werkzeugschleifmaschine und Werkstückeinspannung	43
4.1.3	Schleifscheibenspezifikation und Einsatzvorbereitung	45
4.1.4	Prozesskinematik des Analogieprozesses	47
4.2	Analyse des statischen und dynamischen Maschinenverhaltens	49
4.3	Bestimmung der mechanischen Prozesslast beim Schleifen	55
4.4	Bestimmung der thermischen Prozesslast beim Schleifen	56
4.4.1	Messprinzip der Pyrometrie	56
4.4.2	Versuchsaufbau zur Temperaturmessung	58
4.4.3	Kalibrierung des Messequipments	59
5	Bewertung des Schleifprozesses	63
5.1	Einfluss der Schleifparameter auf die Prozessbelastung	63
5.2	Interpretation des Schleifscheibenverschleißverhaltens	69

6	Analyse der Prozessbelastungen beim Schleifen	77
6.1	Abschätzung der mesoskopischen mechanischen Prozesslast	77
6.2	Abschätzung der mesoskopischen thermischen Belastung	80
6.3	Thermische Belastungsgrenzen für D15A und CTB 010.....	87
6.3.1	Dynamische Wärmestrom-Differenzkalorimetrie	87
6.3.2	Beugungsanalyse der Graphitisierung für CTB 010.....	89
7	Identifikation der Zerspanungsmechanismen	93
7.1	Analyse der PKD-Randzone	93
7.1.1	FIB-Präparation und TEM-Analyse	94
7.1.2	PKD-Randzone vor dem Schleifen.....	97
7.1.3	PKD-Randzone nach dem Schleifen.....	100
7.2	Erklärungsmodell für das PKD-Werkstoffverhalten	106
8	PKD-Bearbeitung durch die Kombination von Laserstrahlabtragen und Schleifen.....	113
8.1	Mechanismen beim Kurzpulslaserstrahlabtragen von PKD.....	115
8.2	Analyse der PKD-Randzone nach der Laserbearbeitung.....	118
8.3	Bewertung des Analogieschleifprozesses nach der Laserbearbeitung	124
8.4	Schleifen von PKD-Schneidplatten nach der Laserbearbeitung	125
8.5	Validierung der PKD-Werkzeugqualität im Einsatztest.....	128
8.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse des Kombinationsprozesses.....	130
8.6.1	Berechnung der Bewertungsgrößen	131
8.6.2	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	133
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
9.1	Zusammenfassung.....	135
9.2	Ausblick.....	136
10	Literaturverzeichnis.....	141
11	Anhang	153
11.1	Konventionelles PKD-Schleifen.....	153
11.2	Kombination von Laserstrahlabtragen und Schleifen von PKD	155
	Lebenslauf.....	161

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Großbuchstaben

A	μm	Mittlere Korundkorngröße in Mikrometer
\hat{A}	10^{-9} m s^{-2}	Schwingungsamplitude der Beschleunigung
A_f	μm^2	Bruchfläche
A_{PKD}	mm^2	Makroskopische Kontaktfläche
A_n	%	Projizierter Schnittflächenanteil in der Schnittebene z orthogonal zur Oberfläche eines Körpers
A_t	μm	Auflösung
Bi	-	BIOT-Zahl
c_i	%	Konzentration des Stoffes i
C_0	€	Kapitalwert zur Periode Null
C_{Stat}	mm^{-3}	Statische Schneidendichte
D	μm	Mittlerer Durchmesser der Diamantkörner
D_{max}	μm	Maximaler Diamantkorndurchmesser
D_{min}	μm	Minimaler Diamantkorndurchmesser
E	MPa	Elastizitätsmodul
E_b	kJ mol^{-1}	Bindungsenergie
E_f	J	Energie für einen Spröbruch nach GRIFFITH
EK	€	Einkaufspreis
E_p	J	Energie für plastisches Fließen
E_P	keV	Bandlückenenergie
E_{ph}	eV	Photonenenergie
F_n	N mm^{-2}	Auf die Eingriffsfläche bezogene Normalkraft
$F_{n,grenz}$	N mm^{-2}	Grenzwert der flächenbezogenen Normalkraft
F_n	N mm^{-1}	Bezogene Normalkraft
F_t	N mm^{-1}	Bezogene Tangentialkraft
F_A	N mm^{-2}	Anpressdruck beim Schleifen
F_A	N	Anpresskraft beim kraftgebundenen Schleifen
FK	€	Fertigungskosten

F_n	N	Schleifnormalkraft
F_t	N	Schleiftangentialkraft
$F_{X,Y,Z}$	N	Kraftmessbereich in X-, Y- und Z-Richtung
F_z	N	Fliehkraft
G	-	Schleifverhältnis
G	MPa	Schubmodul
G	-	GRIFFITH-Faktor
Ga^{2+}	-	Gallium-Ionen
G_d	-	Abrichtverschleißverhältnis
G_{ax}	-	Axiales Verschleißverhältnis bezogen auf die Zustellung beim Schleifen
G_u	$\mu\text{m s}^{-1}$	Güteklasse der Unwucht
GW	€	Gewinn
G_{xx}	$\mu\text{m N}^{-1}$	Nachgiebigkeit in X-Richtung bei Anregung in X-Richtung
G_{yy}	$\mu\text{m N}^{-1}$	Nachgiebigkeit in Y-Richtung bei Anregung in Y-Richtung
G_{zz}	$\mu\text{m N}^{-1}$	Nachgiebigkeit in Z-Richtung bei Anregung in Z-Richtung
H	%	Häufigkeitsverteilung
H	MPa	Nanohärte
H_K	GPa	KNOOP-Härte
HK	€	Herstellungskosten
H_M	-	MOHS-Härte
H_V	GPa	VICKERS-Härte
K	-	Kohärenz
K_E	€	Energieeinzelnkosten
K_{Energie}	€	Stromkosten je KWh
K_F	€	Fertigungskosten je Werkstück
K_I	€	Instandhaltungskosten
K_{IC}	$\text{MPa m}^{0,5}$	Spannungsintensitätsfaktor
K_L	€	Lohnkosten
K_M	€	Maschinenkosten
K_{MH}	€ s^{-1}	Maschinenstundensatz

K_R	€	Raumkosten
K_T	kg	Masse eines Karats (1 KT = 2×10^{-4} kg)
K_W	€	Anteilige Werkzeugkosten
K_{WT}	€	Werkzeuggesamtkosten
K_X	€	Anteilige Restfertigungsgemeinkosten
K_z	μm	Schartigkeit der Schneidkante
K_z	€	Kalkulatorische Zinskosten
L	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Wärmestrahlung
L	€ h^{-1}	Stundenlohn
L_m	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Von einem Körper emittierte Wärmestrahlung
L_n	€	Lohnnebenkosten
L_r	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Reflektierter Anteil der Wärmestrahlung
L_s	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Wärmestrahlung eines schwarzen Strahlers
L_t	μm	Länge des Perthometerschriebs
L_{tr}	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Transmittierter Anteil der Wärmestrahlung
L_u	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Umgebungsstrahlung (reflektiert + transmittiert)
L_U	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Von einem Körper reflektierte Umgebungsstrahlung
L_w	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Von einem Körper emittierte Eigenstrahlung
L_a	$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	Absorbierter Anteil der Wärmestrahlung
$M_{X,Y,Z}$	Nm	Drehmomentmessbereich um die X-, Y- und Z-Achse
N	$\mu\text{m N}^{-1}$	Nachgiebigkeit
$N(f)$	$\mu\text{m N}^{-1}$	Dynamische frequenzabhängige Nachgiebigkeit
N_{kin}	-	Kinematische Schneidenanzahl
Nu	-	NUSSELT-Zahl
P_{Nenn}	kW	Nennleistung
Pr	-	PRANDTL-Zahl
Q_{FIB}	$\mu\text{m h}^{-1}$	Abtragrate der Focused-Ion-Beam-Präparation
Q_w	$\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$	Zeitspannungsvolumen
R	μm	Spannweite
R	GPa	Druckfestigkeit
R	-	Matrix des reziproken Gitters im Fourier Raum

Re	-	REYNOLDS-Zahl
R _m	GPa	Zugfestigkeit
R _{mr}	%	Materialtraganteil
Rz	µm	Gemittelte Rautiefe
T	°C	Absolute Temperatur in Grad Celsius
T	min	Werkzeugstandzeit
ḡ	min ⁻¹	Aufheizrate
T _µ	µm	Schnitteinsatztiefe
T ₀	°C	Chemische Standardtemperatur
T _{mess}	°C	Temperaturmessbereich
T _N	Jahre	Nutzungsdauer der Maschine
T _P	°C	Mittels Infrarot-Pyrometer gemessene Temperatur
T _{Pr}	°C	Temperatur der Probe
T _R	°C	Temperatur der Referenzseite
T _S	°C	Schmelztemperatur
T _{TE}	°C	Temperatur des Thermoelements
T _U	°C	Umgebungstemperatur
T _{UW}	°C	Umwandlungs- bzw. Zersetzungstemperatur
T _V	°C	Siede- bzw. Sublimationstemperatur
T _w	°C	Die Eigentemperatur einer Oberfläche
U	m	Umfang des Speicherrings
U _b	kV	Beschleunigungsspannung
VB _{max}	µm	Verschleißmarkenbreite
VK	€	Verkaufspreis
V _p	µm ³	Plastisch verformtes Volumen
V _{PKD}	mm ³	Zerspantes PKD-Werkstoffvolumen
V _{PKD,i}	mm ³	Zerspantes PKD-Volumen pro Schleifhub
V _r	mm ³	Verschleißvolumen der Abrichtscheibe
V _s	mm ³	Verschlissenes Schleifbelagsvolumen
V _{sd}	mm ³	Verschleißvolumen des Schleifbelags beim Abrichten
W	W m ⁻² µm ⁻¹	Spektrale spezifische Wärmestrahlung

Kleinbuchstaben

a	$10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
a_0	nm	Gitterparameter
a_0	nm	Identitätsabstand
a_e	μm	Zustellung pro Schleifhub
$a_{e,ges}$	μm	Gesamtaufmaß beim Schleifen
a_{ed}	μm	Zustellung pro Hub beim Abrichten
$a_{ed,ges}$	μm	Gesamtzustellung beim Abrichten
$a_{ed,r}$	μm	Radiales Abrichtaufmaß
b	mm	Kantenlänge der PKD-Schneide
b_0	nm	Gitterparameter
b_s	mm	Breite des Schleifbelags
$b_{s,eff}$	mm	Effektive Schleifbelagsbreite
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
c_0	nm	Gitterparameter
c_p	$\text{J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
d	μm	Größenordnung der Betrachtung
d_B	μm	Bohrungsdurchmesser
d_F	μm	Durchmesser der Glasfaser
d_g	nm	Abstand der Gitterebenen
d_{HM}	μm	Hartmetallschichtdicke
d_{PKD}	μm	PKD-Schichtdicke
d_R	mm	Rondendurchmesser
d_{sa}	mm	Schleifscheibenaußendurchmesser
d_{si}	mm	Schleifscheibeninnendurchmesser
d_t	μm	Abstand paralleler Messbahnen
d_{TEM}	nm	Punktauflösevermögen des TEM
e^-	-	Elektron, negativ geladenes Teilchen
e_s	J m^{-2}	Spezifische Energie für das Abgleiten zweier Ebenen
e_u	μm	Exzentrizität
f	Hz	Frequenz

f_a	kHz	Abtastfrequenz
f_g	Hz	Grenzfrequenz einer Hoch- oder Tiefpassfilterung
h	mm	Werkstückhöhe
h_{cu}	μm	Unverformte Spannungsdicke
$h_{cu,krit}$	μm	Kritische Spannungsdicke
$h_{cu,max}$	μm	Maximale unverformte Spannungsdicke
h_G	mm	Auskraghöhe
k	μm	Kerbtiefe
k_E	€	Stromkosten
l_{WSP}	mm	Schneidkantenlänge der Wendeschneidplatte
l_b	nm	Bindungslänge
l_g	μm	Kontaktlänge
l_s	mm	Schleifweg
m	kg	Masse
m_s	kg	Masse des Schleifwerkzeugsystems
n	-	Stichprobenumfang
n_r	min^{-1}	Abrichtscheibendrehzahl
n_s	min^{-1}	Schleifscheibendrehzahl
$n_{s,max}$	min^{-1}	Maximale Schleifscheibendrehzahl
n_{sd}	min^{-1}	Schleifscheibendrehzahl beim Abrichten
$n_{w,max}$	min^{-1}	Maximale Werkstückdrehzahl
n_{WM}	-	Losgröße
n_{WT}	-	Anzahl Werkstücke je Werkzeug
p	GPa	Druck
p_0	bar	Chemischer Standarddruck
r	μm	Eckenradius der Schneidplatte
r_e	nm	Gleichgewichtsabstand
r_t	μm	Tastspitzenradius (Perthometer)
s	10^{-9} m	Schwingweg
\dot{s}	10^{-9} m s^{-1}	Schwinggeschwindigkeit
\ddot{s}	10^{-9} m s^{-2}	Schwingbeschleunigung

s	μm	Standardabweichung
s_i	mm	Bearbeitungsweg
sp	-	Linear hybridisiertes Orbital
sp^2	-	Trigonal-planar hybridisiertes Orbital
sp^3	-	Tetraedisch hybridisiertes Orbital
s_s	mm	Dicke des Schleifbelags
s_{wsp}	Mm	Wendeschneidplattendicke
t	s	Zeit
t_e	min	Bearbeitungszeit je Werkstück
t_{er}	min	Erholzeit
t_l	min	Leerlaufzeit
t_h	min	Hauptzeit
t_n	min	Nebenzeit
t_r	min	Rüstzeit
t_v	min	Verteilzeit
t_w	min	Werkzeugwechselzeit
t_{wST}	min	Werkstückwechselzeit
v_c	m s^{-1}	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm min^{-1}	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{f,max}$	m min^{-1}	Maximale Vorschubgeschwindigkeit
v_{fad}	mm min^{-1}	Abrichtvorschubgeschwindigkeit
v_{fi}	mm min^{-1}	Bearbeitungsgeschwindigkeit
v_r	m s^{-1}	Umfangsgeschwindigkeit der Abrichtscheibe
v_{rel}	m s^{-1}	Relativgeschwindigkeit beim Abrichten
v_s	m s^{-1}	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
v_c	m s^{-1}	Schnittgeschwindigkeit
v_{sd}	m s^{-1}	Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Abrichten
v_t	$\mu\text{m s}^{-1}$	Messgeschwindigkeit des Perthometers
x_i	%	Anteil in Volumenprozent
x_d	-	Verschleißfaktor beim Abrichten

x_L	%	Lohnnebenkostenfaktor
z_L	μm	Schruppaufmaß für die Laserbearbeitung
z_s	μm	Schlichtaufmaß beim Schleifen
ν	$\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$	Viskosität

Griechische Buchstaben

ΔG	kJ mol^{-1}	Freie Enthalpiedifferenz
ΔH	kJ mol^{-1}	Enthalpiedifferenz
ΔS	kJ mol^{-1}	Entropiedifferenz
Δa_e	μm	Veränderung der Zustellung durch die Unwucht
Δa_s	μm	Axialverschleiß der Schleifscheibe
Δa_{sd}	μm	Axialverschleiß der Schleifscheibe beim Abrichten
Δm	kg	Veränderung der Masse
Δr_r	μm	Radialverschleiß der Abrichtscheibe
Δx	μm	Verbiegung in X-Richtung
Δz	μm	Abstand der Schnittebene zum höchsten Profilpunkt
$\bar{\alpha}$	$^\circ$	Durchschnittlicher Winkel zwischen einzelnen Orbitalen einer molekularen Struktur
α	$^\circ$	Winkel der Phasenverschiebung einer Schwingung
α	10^{-6}K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_a	-	Koeffizient für den absorbierten Anteil der Wärmestrahlung
α_y	$^\circ$	Verkipfung des Werkstücks um die Y-Achse
μ	-	Reibungskoeffizient
μ	-	Schleifverhältnis
γ	J m^{-2}	Oberflächenenergie
ε	-	Emissionsgrad
λ	$^\circ$	Freiwinkel
λ	nm	Wellenlänge
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
λ_L	nm	Wellenlänge des Lasers
λ_{max}	nm	Wellenlänge des Wärmestrahlungsmaximums

Λ_{Mess}	nm	Messwellenlänge
λ_{SB}	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit des Schleifbelags
π	-	Nicht-kovalenter Bindungstyp über VAN-DER-WAALS-Kräfte
ρ_r	-	Koeffizient für den reflektierten Anteil der Wärmestrahlung
ρ_{SB}	g cm^{-3}	Dichte des Schleifbelags
ρ_{th}	g cm^{-3}	Theoretische Dichte
σ	MPa	Zug- bzw. Druckspannung
σ	-	Kovalenter Bindungstyp über Elektronenpaarbindung
σ_{bB}	MPa	Biegefestigkeit
σ_{dB}	MPa	Druckfestigkeit
σ_{hyd}	MPa	Hydrostatische Druckspannung
σ_{max}	MPa	Maximale Zug- bzw. Druckspannung
σ_{min}	MPa	Minimale Zug- bzw. Druckspannung
σ_s	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	STEFAN-BOLTZMANN-Konstante
σ_T	MPa	Trennfestigkeit
τ	MPa	Schubspannung
T_B	MPa	Schubfestigkeitsgrenze
T_F	MPa	Schubfließgrenze
T_{max}	MPa	Maximale Schubspannung
T_{tr}	-	Koeffizient für den absorbierten Anteil der Wärmestrahlung
ω	Hz	Kreisfrequenz
Ω	Rad	Raumwinkel
Θ	°	Beugungswinkel

Chemische Elemente

$^{12,13,14}\text{C}$	-	Kohlenstoff Isotope mit 12, 13 oder 14 Nukleonen im Kern
C	-	Kohlenstoff
Co	-	Kobalt
CO	-	Kohlenmonoxid
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid