

**Wolframdotierte wasserstoffhaltige  
amorphe Kohlenstoffschichten  
(a-C:H:W) für die schmierstofffreie  
inkrementelle Kaltmassivumformung**

Henning Hasselbruch

**BAND 96**

**Werkstofftechnik**



Universität  
Bremen



Leibniz-Institut für  
Werkstofforientierte  
Technologien

Wolframdottierte wasserstoffhaltige amorphe  
Kohlenstoffschichten (a-C:H:W) für die schmierstofffreie  
inkrementelle Kaltmassivumformung

Dem Fachbereich (FB04) Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Henning Hasselbruch

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Fechte-Heinen
2. Gutachter: Hon. Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen)

Tag der mündlichen Prüfung: 03. November 2022



Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für  
Werkstofforientierte Technologien

Band 96

**Henning Hasselbruch**

**Wolframdotierte wasserstoffhaltige amorphe  
Kohlenstoffschichten (a-C:H:W) für die schmierstoff-  
freie inkrementelle Kaltmassivumformung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Düren 2023

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8910-3

ISSN 2626-658X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

**Erklärung:**

Hiermit versichere ich, dass die Arbeit ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt wurde, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden und dass die den benutzten Werken und wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht wurden.

Bremen, den 12. Dezember 2022



---

Henning Hasselbruch



## Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – Leibniz-IWT in der Abteilung Oberflächentechnik der Hauptabteilung Werkstofftechnik (ehemals Stiftung Institut für Werkstofftechnik).

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Fechte-Heinen, Vorsitzender des Direktoriums und Leiter der Hauptabteilung Werkstofftechnik, für das Vertrauen. Mein Dank gilt zudem Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, ehemaliger geschäftsführender Direktor und Leiter der Hauptabteilung Werkstofftechnik, der meinen gesamten wissenschaftlichen Werdegang von Beginn an aktiv begleitet und gefördert hat. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Tim Hosenfeldt für die Übernahme des Korreferats besonders danken. Bei meinem Abteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. Andreas Mehner möchte ich mich für die außerordentlich menschliche Zusammenarbeit und fachliche Führung bedanken. Die vielen hilfreichen Tipps und Anregungen haben mich zu dieser Arbeit motiviert. Meinen Kollegen Dipl.-Ing. Helge Decho (Ruhe in Frieden) und M. Sc. Bastian Lenz gilt mein Dank für die tägliche Unterstützung im Labor und das freundschaftliche Zusammenwirken. Herrn M. Sc. Mika Altmann möchte ich danken für die mit Hilfe bei der Umsetzung der Bildanalytik.

Die Basis der vorliegenden Arbeit wurde während meiner Forschungstätigkeit im Teilprojekt „Potenziale des Trockenrundknetens“ im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms SPP 1676 – „Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“ geschaffen. Bedanken möchte ich mich daher bei der DFG für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens. Für das tolle und fachübergreifend kreative Zusammenwirken möchte ich mich bei den Teilprojektbeteiligten Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß und Dr.-Ing. Marius Herrmann vom Bremer Institut für Strukturmechanik (bime) sowie Dr.-Ing. Oltmann Riemer, Dr.-Ing. Florian Böhmermann und M.Sc. Julian Heidhoff vom Labor für Mikrozerspannung (LFM) der Hauptabteilung Fertigungstechnik des Leibniz-IWT bedanken. Dieses Team hat mich nachhaltig geprägt.

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle ebenfalls bei Dr.-Ing. Kai Schimanski bei der Unterstützung meiner ersten beruflichen Schritte und vielen Anmerkungen zu dieser Arbeit. Seit meiner Diplomarbeit stand er mir stets mit fachlichem und freundschaftlichem Rat als Ansprechpartner zur Seite und mittlerweile auch weit darüber hinaus.

Meinen Eltern, Gisela und Günter (Du fehlst!), sowie meinem Bruder Olaf danke ich dafür, dass sie mich während meines gesamten Lebensweges immer begleitet und mich insbesondere in meinem schulischen und universitären Vorankommen gefördert haben. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Partnerin Henriette Preiß bedanken, die während meines gesamten Studiums, Berufseinstiegs und Promotionsvorhabens an meiner Seite stand und mir trotz der oft nicht einfachen Zeiten und einiger Zumutungen immer den Rücken freigehalten hat. Ohne Deine Rückendeckung, der unendlichen Geduld und zuletzt aufmunternden Worte wäre diese Arbeit sicher nicht möglich gewesen.

Bremen, den 12. Dezember 2022



---

Henning Hasselbruch



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation für eine schmierstofffreie Kaltmassivumformung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Problemstellung der schmierstofffreien Prozessauslegung</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Übergeordnete Zielsetzung für eine schmierstofffreie Prozessführung</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Kenntnisstand</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Tribologie</b> .....	<b>4</b>
2.1.1 Reibung.....	5
2.1.2 Verschleiß.....	6
<b>2.2 Inkrementelle Kaltmassivumformung - Rundkneten</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3 Herstellung von makro- und mikrostrukturierten Umformwerkzeugen</b> .....	<b>9</b>
<b>2.4 Tribologische Dünnschichten in der schmierstofffreien Kaltumformung</b> .....	<b>11</b>
2.4.1 Übersicht tribologischer Dünnschichten.....	11
2.4.2 Potenzial amorpher Kohlenstoffschichten für Umformwerkzeuge.....	12
2.4.3 Kristallmodifikationen amorpher Kohlenstoffschichten .....	13
2.4.4 Eigenschaften amorpher Kohlenstoffschichten .....	14
2.4.5 Tribologische Mechanismen von amorphen Kohlenstoffschichten .....	16
2.4.6 Einfluss von Eigenspannungen in amorphen Kohlenstoffschichten .....	17
<b>2.5 Herstellungsverfahren amorpher Kohlenstoffschichten</b> .....	<b>18</b>
2.5.1 Reaktives Magnetron-Sputter-Verfahren .....	19
2.5.2 Bildungsmechanismen von a-C:H-Schichten .....	21
<b>2.6 Statistische Versuchsplanung</b> .....	<b>23</b>
2.6.1 Begriffe der statistischen Versuchsplanung .....	23
2.6.2 Versuchspläne.....	24
2.6.3 Regressionsmodell .....	25
<b>2.7 Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes</b> .....	<b>27</b>
<b>3 Aufgabenstellung, Forschungshypothesen und Lösungsweg</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Aufgabenstellung</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 Forschungshypothesen</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3 Lösungsweg</b> .....	<b>30</b>

<b>4</b>	<b>Versuchsprogramm, angewandte Verfahren und Untersuchungsmethoden.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Substratwerkstoffe und Vorbehandlung .....</b>	<b>32</b>
4.1.1	Probenplanung .....	32
4.1.2	Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (WKN. 1.2379).....	33
4.1.3	DC-Stahlfolie (WKN. 1.0330).....	34
4.1.4	Silizium Wafer .....	35
4.1.5	Probenvorbehandlung.....	35
<b>4.2</b>	<b>Verwendeter statistischer Versuchsplan .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>Verfahren zur Schichtabscheidung.....</b>	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b>Methoden zur allgemeinen Schichtcharakterisierung .....</b>	<b>40</b>
4.4.1	Kalottenschleifverfahren .....	40
4.4.2	Instrumentierte Eindringprüfung.....	41
4.4.3	Bestimmung der Schichteigenspannungen .....	42
4.4.4	Bestimmung der Schichtzähigkeit .....	44
4.4.5	Rockwell-C-Eindringprüfung .....	45
4.4.6	Ritzprüfung .....	46
4.4.7	Optische Glimmentladungsspektroskopie.....	47
<b>4.5</b>	<b>Methoden zur tribologischen Schichtcharakterisierung.....</b>	<b>47</b>
4.5.1	Stift-Scheibe-Tribometer .....	47
4.5.2	Impact-Tribometer.....	49
4.5.3	Keilreib-Tribometer.....	50
4.5.4	Anwendungsprüfung – Trockenrundkneten .....	51
<b>4.6</b>	<b>Methoden zur Oberflächen- und Verschleißcharakterisierung.....</b>	<b>52</b>
4.6.1	Rasterelektronenmikroskopie.....	52
4.6.2	Konfokale Laser-Scanning Mikroskopie .....	53
4.6.3	Bildanalytik .....	54
<b>5</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse.....</b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>Entwicklung eines Abscheideratenmodells anhand des Vorversuchsplans .....</b>	<b>55</b>
5.1.1	Ermittelte Einzellagenschichtdicken .....	55
5.1.2	Berechnete Abscheideraten.....	56
5.1.3	Abscheideratenmodell.....	57
<b>5.2</b>	<b>Grundcharakterisierung des Hauptversuchsplans.....</b>	<b>58</b>
5.2.1	Schichtdicke .....	58

5.2.2	Schichtmorphologie.....	59
5.2.3	Chemische Zusammensetzung der amorphen Schichtsysteme .....	61
5.2.4	Oberflächenrauheit.....	63
5.2.5	Eindringhärte und elastisches Eindringmodul.....	64
5.2.6	Schichteigenspannungen.....	65
5.2.7	Schichtzähigkeit .....	67
5.2.8	Schichthaftung .....	69
<b>5.3</b>	<b>Tribologische Charakterisierung des Hauptversuchsplans .....</b>	<b>72</b>
5.3.1	Schmierstofffreie Gleitreibung.....	72
5.3.2	Schmierstofffreier Gleitverschleiß.....	74
5.3.3	Schmierstofffreier Stoßverschleiß.....	77
<b>5.4</b>	<b>Statistische Korrelationsanalysen ausgewählter Zielgrößen.....</b>	<b>81</b>
5.4.1	Korrelationsanalysen zum Einfluss der Schichtdicke und Rauheit.....	81
5.4.2	Korrelationsanalysen im Rahmen der Grundcharakterisierung .....	82
5.4.3	Korrelationsanalysen zum tribologischen Verhalten.....	84
<b>6</b>	<b>Regressionsanalysen und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>86</b>
<b>6.1</b>	<b>Regressionsmodelle und Diskussion des Abscheideratenmodells.....</b>	<b>86</b>
<b>6.2</b>	<b>Regressionsmodelle und Diskussion der Grundcharakterisierung .....</b>	<b>89</b>
6.2.1	Einflüsse auf die chemische Schichtzusammensetzung.....	90
6.2.2	Einflüsse auf die mechanischen Schichteigenschaften .....	93
6.2.3	Einflüsse auf die Schichthaftung.....	98
<b>6.3</b>	<b>Regressionsmodelle und Diskussion tribologischer Untersuchungen.....</b>	<b>103</b>
6.3.1	Einflüsse auf die schmierstofffreie Gleitreibung.....	104
6.3.2	Einfluss auf den schmierstofffreien Verschleiß.....	107
<b>6.4</b>	<b>Bewertung und Schlussfolgerungen der Regressionsmodelle .....</b>	<b>112</b>
<b>7</b>	<b>Validierung der Anwendungseignung .....</b>	<b>115</b>
<b>7.1</b>	<b>Anwendungseignung a-C:H(:W)-beschichteter Mikrotexturen.....</b>	<b>115</b>
7.1.1	Beschichtete Mikrotexturvarianten .....	115
7.1.2	Schichthaftung auf den Mikrotexturen .....	115
7.1.3	Keilreibversuche zur Beurteilung der Adhäsionsneigung .....	116
7.1.4	Impact-Versuche zur Beurteilung des Stoßverschleißes.....	118
7.1.5	Inkrementelle Anwendungsprüfung von Schicht-Mikrotexturvarianten .....	119
<b>7.2</b>	<b>Untersuchte Entwicklungsstufen von Rundknetwerkzeugen.....</b>	<b>120</b>

---

7.2.1	Inkrementelle Anwendungsprüfung der Werkzeugentwicklungsstufen.....	120
7.2.2	Prozesskräfte, Werkstückqualität und Partikelanalyse .....	121
7.2.3	Schichtverschleißanalysen der Werkzeugentwicklungsstufen.....	124
7.2.4	Ergänzende Überlegungen.....	129
7.2.5	Formintegrität der Makrostrukturierung und Mikrotexturen.....	130
<b>7.3</b>	<b>Fazit anwendungsnaher Untersuchungen .....</b>	<b>131</b>
7.3.1	Fazit zum Textureinfluss .....	131
7.3.2	Fazit zu den Ergebnissen, Regressionsmodellen und Anwendungseignung.....	132
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>137</b>
<b>8.1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>137</b>
<b>8.2</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>141</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Liste Studentischer Arbeiten.....</b>	<b>165</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>166</b>

## Kurzfassung

Die Umstellung inkrementeller Umformverfahren auf eine schmierstofffreie Prozessführung verspricht wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Die schmierstofffreie Auslegung erfordert jedoch das Verständnis und die Beherrschung der veränderten tribologischen Betriebsbedingungen im Festkörperkontakt zwischen dem Werkzeug und Werkstück. Eine Schlüsselrolle stellt die tribologische Konditionierung der Werkzeugoberflächen dar. Über eine Makrostrukturierung lassen sich der Materialfluss und die Prozesskräfte steuern. Mikrotexturen wirken reibmindernd und können auch den adhäsiven Werkzeugverschleiß senken. Im Festkörperkontakt unterliegen derartige Funktionselemente aber hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen. Hierdurch werden weitere Verschleißschutzmaßnahmen erforderlich, die die tribologische Wirksamkeit über einen langen Zeitraum aufrechterhalten.

Vor dem Hintergrund der genannten Herausforderungen stellen amorphe Kohlenstoffschichten eine vielversprechende Maßnahme zum Schutz der Werkzeugoberflächen dar. Gegenüber Werkzeugwerkstoffen und anderen tribologischen Dünnschichten sind eine hohe Schichthärtigkeit, ein verbesserter Adhäsionsschutz und eine niedrige Reibung gegen Aluminium- und Eisenbasislegierungen die wesentlichen Vorteile. Auch wenn sich amorphe Kohlenstoffschichten in anderen Anwendungsbereichen bereits gut etabliert haben, gilt ihre Beanspruchbarkeit bei der Umformung von Stählen bislang als ungenügend. Eine besondere Herausforderung am Beispiel des Vorschubrundknetverfahrens ist daher im vorliegenden Beanspruchungskollektiv zu sehen, bei dem zeitgleich eine hohe inkrementelle Stoßbeanspruchung mit überlagerten Gleitanteilen auf die Werkzeuge einwirkt. Über eine gezielte Modifikation der Kohlenstoffmatrix mit Wolfram soll eine ausreichende Schichthaftung zu den mehrskaligen Funktionselementen eingestellt werden. So müssen diese Schichten auch mit einer ausreichenden Verschleißbeständigkeit gegen Gleiten und Stoßen ausgestattet werden.

Kern der Arbeit ist ein zweistufiger Entwicklungsansatz mit dem Ziel wolframdotierte amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H(:W)) für den Einsatz auf Rundknetwerkzeugen zu befähigen. Hierzu wird das konventionelle reaktive Magnetron-Sputter-Verfahren eingesetzt. Auf Basis eines statistischen Vorversuchsplans werden die vier PVD-Verfahrensparameter Wolfram-Targetleistung ( $P_{W \text{ target}}$ ), Ethin-Durchfluss  $\Phi(\text{C}_2\text{H}_2)$ , bias-Spannung ( $U_{\text{bias}}$ ) und die Graphit-Targetleistung ( $P_{C \text{ target}}$ ) systematisch variiert. Unter konstanten Abscheidebedingungen wird ein Abscheideratenmodell entwickelt, welches auch die Vorhersage der Schichtwachstumsraten unter veränderlichen Abscheidebedingungen erlaubt. Auf dieser Basis werden in einem zweiten statistischen Hauptversuchsplan Schichten konstanter Einzellagedicken hergestellt. Hieran werden die Einflüsse der Verfahrensparameter auf die chemischen und mechanischen Schichteigenschaften sowie dem schmierstofffreien tribologischen Systemverhalten untersucht. Die Regressionsmodelle zeigen, dass sich die genannten Eigenschaften in einem hohen Maße über mehr als einen Parameter anpassen und damit bedarfsgerecht konstruieren lassen. Ausgewählte Schichtvarianten werden auf ihre Einsatzzeichnung unter realen Anwendungsbedingungen getestet und analysiert. Diese Untersuchungen belegen, dass ein schmierstofffreies Rundkneten erst mit der Applikation von a-C:H(:W)-Schichten ermöglicht wird. Zudem weisen die Schichten einen ausreichenden Verschleißschutz der Funktionselemente auf. Gegenüber der konventionellen Prozessführung werden unter schmierstofffreien Betriebsbedingungen vergleichbare und sogar z. T. bessere Werkstückqualitäten erreicht.

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	vorgegebenes Signifikanzniveau eines statistischen Versuchsplans	[%]
$\alpha_{\text{red}}$	Reduzierwinkel in der Reduzierzone eines Rundknetwerkzeuges	[°]
$\alpha_{\text{verl}}$	Verlängerungsfaktoren eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans	[-]
$A_{\text{AD,D,r}}$	relative Adhäsionsfläche von Aluminium beim KRVS-Test und Rundkneten	[%]
$A_{\text{D,r}}$	relative Delaminationsfläche beim KRVS-Test und Rundkneten	[%]
$A_{\text{HE,D,r}}$	relative Delaminationsfläche nach der Rockwell-C-Eindringprüfung	[%]
$A_i$	Verschleißquerschnittsfläche eines Verschleißgrabens	[m <sup>2</sup> ]
$A_{\text{Lc2,D,r}}$	relative Delaminationsfläche ab Lc2 mit spez. Segmentlänge (500 $\mu\text{m}$ )	[%]
$A_N / B_N$	senkrecht aufeinander stehende Verschleißnarbenbreiten (kleinste/größte)	[ $\mu\text{m}$ ]
$A_p$	projizierte Kontaktfläche bei der Universal-Mikrohärteprüfung (UMH)	[mm <sup>2</sup> ]
$A_r$	wahre Kontaktfläche an den Mikrokontakten in einem tribologischen System	[mm <sup>2</sup> ]
$A_{\text{WZ}}$	Amplitudenhöhe der Makrostrukturierung von Rundknetwerkzeugen	[ $\mu\text{m}$ ]
$\beta_i$	Regressionskoeffizient: Modellterme der Einflussfaktoren $x_i$	[-]
$b_c$	Breite einer Beschichtung auf einem streifenförmigen Substrat	[mm]
$b_s$	Breite eines Substrates (z. B.: Breite einer Stahl-Folie)	[mm]
$c$	Risslänge bei der Zähigkeitsbestimmung nach der Palmqvist-Methode	[ $\mu\text{m}$ ]
$C$	Kontaktnachgiebigkeit des UMH-Prüfsystems	[mm/N]
$CA$	gesamte Kraterfläche eines Impact-Kraters	[mm <sup>2</sup> ]
$CFD_{\text{krit}}$	kritische Versagenstiefe, bei der Stoßverschleiß einsetzt ( $CFD_{\text{krit}} = 0,5 \mu\text{m}$ )	[ $\mu\text{m}$ ]
$CFD_{6-4}$	Schichtversagenstiefe, ergibt sich aus Differenz von RID ( $10^6 \cdot 10^4$ )	[ $\mu\text{m}$ ]
$\delta$	dimensionsloser Geometriefaktor des Indenters (Vickers: $\delta = 0,016 \pm 0,004$ )	[-]
$\Delta R$	Veränderung der Biegeradien ( $R1 \rightarrow R2$ ) einseitig beschichteter Substrate	[mm]
$\Delta t$	Kontaktdauer eines auf einen Grundkörper auftreffenden Gegenkörpers	[ms]
$\Delta x$	Rückdrängung der linearen Vorschubeinheit während eines Werkzeughubes	[mm]
$d$	innerer Kalotten-Durchmesser	[ $\mu\text{m}$ ]
$d_{\text{nom}}$	nominaler Durchmesser des umgeformten, runden Hohlprofils	[mm]
$D_0$	Außendurchmesser eines nicht-umgeformten, runden Hohlprofils	[mm]
$D$	äußerer Kalotten-Durchmesser	[ $\mu\text{m}$ ]
$\emptyset$	Durchmesser   Durchschnittswert	[mm]   [-]
$\varepsilon_i$	Anzahl/Art an Residuen (Abweichung von Messdaten zur Regressionskurve)	[-]
$\varepsilon_{\text{ind}}$	spezifische Indentergeometrie (für Vickers-Diamant: $\varepsilon_{\text{ind}} = 0,75$ )	[-]
$E_c$	Elastizitätsmodul einer Beschichtung (üblicherweise $E_{\text{IT}}$ )	[GPa]
$E_{\text{ind}}$	Elastizitätsmodul des Indenters (Diamant: $E_{\text{ind}} = 1.000 \text{ GPa}$ )	[GPa]
$E_{\text{IT}}$	elastisches Eindringmodul gemessen mit Universal-Mikrohärteprüfer (UMH)	[GPa]
$E_r$	reduziertes Elastizitätsmodul bei der Universal-Mikrohärteprüfung (UMH)	[GPa]
$E_s$	Elastizitätsmodul des Substrates (Stahl: $E_s = 210 \text{ GPa}$ )	[GPa]
$f_{\text{IF}}$	Impact-Frequenz des Schlaghammers eines Impact-Tribometers	[1/s]
$f_{\text{WS}}$	Vorschubrichtung der Werkstücke in die Werkzeugzone	[-]
$f_{\text{WZG}}$	Vorschubrichtung des Mikrokugelpopfräasers	[-]
$F_A$	während eines Hubes auf das Werkzeug wirkende axiale Kraftkomponente	[kN]
$FA$	versagte Kraterfläche eines Impact-Kraters	[mm <sup>2</sup> ]

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$F_G$	von der Masse m abhängige Gewichtskraft	[N]
$F_{\max}$	maximale Kraft (Indentation)	[N]
$F_N$	aufgebrachte Normal- bzw. Eindringkraft	[N]
$F_R$	während eines Hubes auf das Werkzeug wirkende radiale Kraftkomponente	[kN]
<b>FR</b>	versagter Flächenanteil eines Impact-Kraters	[%]
$F_{\text{Reib}}$	tangentiale Kraftkomponente (Reibkraft) bei der Reibung	[N]
$F_{\text{Reib,a}}$	adhäsiver Anteil an der Reibkraft $F_{\text{Reib}}$ bei der Reibung	[N]
$F_{\text{Reib,d}}$	deformativer Anteil an der Reibkraft $F_{\text{Reib}}$ bei der Reibung	[N]
$F_V$	Vorschubkraft, die während eines Werkzeughubes $F_A$ entgegenwirkt	[kN]
$\gamma_{\text{Span}}$	effektiver Spanwinkel zwischen Fräser und Werkstückoberfläche	[°]
$\eta$	dynamische Viskosität eines Schmierstoffes in einem tribologischen System	[N·s/m <sup>2</sup> ]
<b>h</b>	Fallhöhe h einer Masse m	[mm]
$h_{\text{a-C:H}}$	Einzellagenschichtdicke der a-C:H-Funktionsschicht	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\text{a-C:H:W}}$	Einzellagenschichtdicke der a-C:H:W-Zwischenschicht	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_c$	Schichtdicke einer Beschichtung	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\text{Cr/CrNx}}$	Einzellagenschichtdicke der Cr/CrNx-Haftvermittlerschicht	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\text{ges}}$	Gesamttiefe der geschliffenen Kalotte	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_k$	Eindringtiefe der Kontaktfläche des Indenters unter $h_{\max}$	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\max}$	maximale Eindringtiefe bei $F_{\max}$	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_r$	ermittelte Tiefe über Schnittpunkt der Entlastungstangente mit der x-Achse	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_s$	Dicke des Substrates (z. B.: Dicke der Stahl-Folie)	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\text{span}}$	Eingriffstiefe des Fräsers in das Grundmaterial beim Mikrofräsen	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{\text{sub}}$	Anteil der Kalottentiefe, welche in das Substrat geschliffen wurde	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_T$	Hubweg der oszillierenden Rundknetwerkzeuge	[mm]
$H/E$	$H_{IT}/E_{IT}$ -Verhältnis zur Abschätzung der Streckgrenze einer Schicht	[-]
$H^2/E^2$	$H_{IT}^2/E_{IT}^2$ -Verhältnis zur Abschätzung der Beanspruchbarkeit einer Schicht	[-]
<b>HF</b>	Haftfestigkeitsklasse nach der Rockwell-C-Eindringprüfung (HRC)	[-]
$H_{\text{GDOES}}$	mittels GDOES-Analysen ermittelter qualitativer Wasserstoffgehalt (Intensität)	[-]
$H_{IT}$	Eindringhärte gemessen mit Universal-Mikrohärteprüfer (UMH)	[GPa]
$H_{\min}$	Mindestspannungstiefe, bei der noch eine vollständige Spanabnahme vorliegt	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>IF</b>	Impact-Kraft eines Einzelstoßes während eines Impact-Versuches	[N]
$IF_{\text{Ref}}$	konstante Impact-Kraft IF (800 N) für die a-C:H(:W)-Hauptversuchsvarianten	[N]
<b>k</b>	Anzahl Einflussfaktoren in einem Versuchsplan	[-]
$k_{1,239}$	Verschleißkoeffizient der unbeschichteten Referenzprobe	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{coat}}$	Verschleißkoeffizient der a-C:H(:W)-Schicht im Stift-Scheibe-Test	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{coat,AlMgSi0,5}}$	Verschleißkoeffizient der a-C:H(:W)-Schicht gegen AlMgSi0,5	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{coat,S235}}$	Verschleißkoeffizient der a-C:H(:W)-Schicht gegen S235	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{pin}}$	Verschleißkoeffizient des Gegenkörpers im Stift-Scheibe-Test	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{pin,AlMgSi0,5}}$	Verschleißkoeffizient des Gegenkörpers aus AlMgSi0,5	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$k_{\text{pin,S235}}$	Verschleißkoeffizient des Gegenkörpers aus S235	[N·m/m <sup>3</sup> ]
$K_{IC}$	Bruch- bzw. Risszähigkeit einer Beschichtung (kritischer Wert für $K_I$ )	[MPa· $\sqrt{\text{m}}$ ]
$\lambda$	Schmierfilmdicke des Schmierstoffes in einem tribologischen System	[ $\mu\text{m}$ ]
$\lambda_{UV}$	Wellenlänge des ultravioletten Lichts	[nm]

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$\lambda_{UV}$	Wellenlänge des ultravioletten Lichts	[nm]
$\lambda_{WZ}$	Wellenlänge der Makrostrukturierung von Rundnetzwerkzeugen	[mm]
<b>L</b>	Streifenlänge eines Substrates (z. B.: der Stahl-Folie)	[mm]
<b>Lc</b>	kritische Last in der Ritzprüfung nach DIN EN 1071-13 und ASTM C1624-05	[N]
<b>Lc1</b>	kritische Last: Entstehung erster (Zug-)Risse (kohäsives) im Ritztest	[N]
<b>Lc2</b>	kritische Last: Grenzflächenabplatzung (adhäsiv) im Ritztest	[N]
<b>Lc3</b>	kritische Last: diskontinuierliche Schichtperforation (adhäsiv) im Ritztest	[N]
<b>Lc4</b>	kritische Last: kontinuierliche Schichtperforation (adhäsiv) im Ritztest	[N]
$\mu_{AlMgSi0,5}$	Reibungskoeffizient der a-C:H(:W)-Schicht gegen AlMgSi <sub>0,5</sub>	[-]
$\mu_{eff}$	in der Umformzone effektiv wirkende Reibbedingungen	[-]
$\mu_i$	Gleitreibungskoeffizient von a-C:H(:W)-Schichten zum Gegenkörperwerkstoff	[-]
$\mu_I$	Reibungskoeffizient in der Reduzierzone I	[-]
$\mu_{II}$	Reibungskoeffizient in der Kalibrierzone II	[-]
$\mu_{Ref}$	Reibungskoeffizient einer unbeschichteten Paarung	[-]
$\mu_{S235}$	Reibungskoeffizient der a-C:H(:W)-Schicht gegen S235	[-]
$\mu_{1,2379}$	Reibungskoeffizient der unbeschichteten Referenzprobe	[-]
<b>M</b>	Biegemoment einer einseitig beschichteten Stahl-Folie	[Nm]
$\nu_C$	Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl) der Beschichtung ( $\nu_{a-C:H(:W)} = 0,25$ )	[-]
$\nu_{Ind}$	Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl) des Indenters (Diamant: $\nu_{Ind} = 0,07$ )	[-]
$\nu_S$	Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl) eines Substrates (Stahl: $\nu_S = 0,30$ )	[-]
<b>n</b>	Zyklenzahl beim Stift-Scheibe- und Impact-Test	[-]
$n_{AlMgSi0,5}$	Zyklen abhängiges Einlaufverhalten der a-C:H(:W)-Schicht gegen AlMgSi <sub>0,5</sub>	[-]
$n_i$	Anzahl an Fokusebenen bei der konfokalen Laser-Scanning-Mikroskopie	[-]
$n_{S235}$	Zyklen abhängiges Einlaufverhalten der a-C:H(:W)-Schicht gegen S235	[-]
$n_0$	Anzahl an Realisierungen im Zentralpunkt eines Versuchsplans	[-]
<b>N</b>	Grundgesamtheit betrachteter Versuchsdaten   Messfrequenz	[-]   [1/s]
$N_{ges}$	Gesamtanzahl an Einzelversuchen in einem statistischen Versuchsplan	[-]
$N_W$	Anzahl der Einzelversuche des orthogonalen Würfels eines Versuchsplans	[-]
$\omega_{a-C:H}$	Abscheiderate der a-C:H-Funktionsschicht	[ $\mu\text{m}/\text{h}$ ]
$\omega_{a-C:H:W}$	Abscheiderate der a-C:H:W-Haftvermittlerschicht	[ $\mu\text{m}/\text{h}$ ]
$\omega_{Cr/ CrN_x}$	Abscheiderate der Cr/CrN <sub>x</sub> -Haftvermittlerschicht	[ $\mu\text{m}/\text{h}$ ]
$\Phi(\text{C}_2\text{H}_2)$	Ethin-Durchfluss (PVD-Abscheideparameter)	[ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]
<b>p</b>	Anzahl absichtlicher vollständiger Vermengungen von Faktoren und 2FWW	[-]
$p_{ges}$	Gesamtdruck im Rezipient der PVD-Anlage	[mPa]
$P_{int}$	initiale Flächenpressung gemäß Hertzscher Pressung (Kugel-Ebene)	[MPa]
$P_{Ctarget}$	angelegte Kathoden- bzw. Targetleistung am Graphit-Target	[W]
$P_{Wtarget}$	angelegte Kathoden- bzw. Targetleistung am Wolfram-Target	[W]
$r_\beta$	Schneidkantenradius eines Mikrofräsers	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>R</b>	Radius	[mm]
<b>Ra</b>	arithmetische Mittenrauheit (Linienrauheit)	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>RH</b>	relative Luftfeuchtigkeit	[%]
<b>RID<sub>i</sub></b>	verbleibende Kratertiefe abhängig von $f_{ip}$ , IF und Zyklenzahl des Impact-Kraters	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_{Kugel}$	Radius der Kugel beim Kalottenschleifverfahren	[mm]
$R_{Reib}$	Reibradius beim Stift-Scheibe-Test	[m]

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
<b>RONt</b>	mittlere Spitze-zu-Tal-Rundheitsabweichung nach DIN EN ISO 12181-1	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>R<sup>2</sup></b>	mathematisches Bestimmtheitsmaß eines Polynoms bzw. einer Korrelation	[%]
<b>R<sup>2</sup><sub>prog</sub></b>	prognostiziertes Bestimmtheitsmaß	[-]
<b><math>\sigma_e</math></b>	extrinsischer Anteil an den gesamten Eigenspannungen $\sigma_{\text{res}}$	[MPa]
<b><math>\sigma_i</math></b>	intrinsischer Anteil an den gesamten Eigenspannungen $\sigma_{\text{res}}$	[MPa]
<b><math>-\sigma_m</math></b>	mittlere Schichtdruckeigenspannungen	[MPa]
<b><math>\sigma_{\text{res}}</math></b>	Eigenspannungen einer Beschichtung oder eines Festkörpers	[MPa]
<b><math>\sigma_{\text{th}}</math></b>	thermischer Anteil an den gesamten Eigenspannungen $\sigma_{\text{res}}$	[MPa]
<b><math>-\sigma_x / -\sigma_y</math></b>	biaxiale Druckeigenspannungen einer Beschichtung	[MPa]
<b>s</b>	zurückgelegter Gleitweg beim Stift-Scheibe-Test	[m]
<b>s<sub>FS</sub></b>	Anzahl an Faktorstufen in einem statistischen Versuchsplan	[-]
<b>s<sub>0</sub></b>	Wandstärke eines nicht-umgeformten, runden Hohlprofils	[mm]
<b>Sa</b>	mittlere arithmetische Höhe (flächenhaftes Äquivalent zu Ra)	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Sa<sub>Si-Wafer</sub></b>	mittlere arithmetische Höhe a-C:H(:W) beschichteter Si-Wafer	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Sa<sub>1.2379</sub></b>	mittlere arithmetische Höhe a-C:H(:W) beschichteter 1.2379-Substrate	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>SQ</b>	Summe der Abstandquadrate einer Zielgröße $y_i$	[-]
<b><math>\tau_{\text{FK}}</math></b>	Scherfestigkeit eines Festkörpers in einem tribologischen System	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>t<sub>Besch</sub></b>	Beschichtungsdauer (der Einzellagen) eines Multilagenschichtsystems	[h]
<b>t<sub>rev</sub></b>	Entladungsdauer an der Target-Kathode	[ $\mu\text{s}$ ]
<b>t<sub>SP</sub></b>	Sputter-Dauer beim Target-Zerstäuben	[ $\mu\text{s}$ ]
<b>t<sub>Sputter</sub></b>	Sputterdauer zur Bestimmung von chemischen GDOES-Elementtiefenprofilen	[s]
<b>T</b>	Temperatur	[°C]
<b>U<sub>bias</sub></b>	bias-Spannung (PVD-Abscheideparameter)	[-V]
<b>U<sub>elast</sub></b>	gespeicherte elastische Energie in der Schicht	[kg·m/s <sup>2</sup> ]
<b>U<sub>krit</sub></b>	haftungskritische Energie in der Schicht	[kg·m/s <sup>2</sup> ]
<b>U<sub>rev</sub></b>	Entladungsspannung an der Target-Kathode	[-V]
<b>U<sub>SP</sub></b>	Sputter-Spannung an der Target-Kathode	[-V]
<b>vdW</b>	van-der-Waals-Kraft	[N]
<b>v<sub>R</sub></b>	Gleitgeschwindigkeit	[m/s]
<b>v<sub>WS</sub></b>	Vorschubgeschwindigkeit der Werkstücke beim Vorschubrundkneten	[mm/min]
<b>V<sub>coat</sub></b>	Verschleißvolumen der Probe bzw. der Schicht nach dem Stift-Scheibe-Test	[m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>pin</sub></b>	Verschleißvolumen am Gegenkörper nach erfolgtem Stift-Scheibe-Test	[m <sup>3</sup> ]
<b>W<sub>GDOES</sub></b>	mittels GDOES-Analysen ermittelter Wolframgehalt in der Schicht	[At. %]
<b>x<sub>i</sub></b>	Anzahl/Art an Eingangsgrößen eines statistischen Versuchsplans	[-]
<b>y<sub>i</sub></b>	Anzahl/Art an Zielgrößen eines statistischen Versuchsplans (Messgröße)	[-]
<b><math>\hat{y}_i</math></b>	Anzahl/Art berechneter Zielgrößen eines Regressionspolynoms	[-]
<b>z<sub>i</sub></b>	Anzahl/Art von Störgrößen eines Regressionspolynoms	[-]
<b>2a</b>	Länge eines vorhandenen Risses (Anriss) für die Zähigkeitsbestimmung	[mm]