

Marcel Rhau

Zur Eignung von Ultrahochleistungsbeton (UHPC) als Zahnradwerkstoff



Marcel Rhau

# **Zur Eignung von Ultrahochleistungsbeton (UHPC) als Zahnradwerkstoff**

**TUD***press*

2021

Herausgeber:  
Institut für Massivbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held  
Universitätsstraße 15  
45141 Essen

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed  
bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>

ISBN 978-3-95908-445-1

THELEM Universitätsverlag & Buchhandlung  
Dresden und München  
<http://www.tudpress.de>

Gesetzt vom Autor.  
Made in E.U.

TUDpress ist ein Imprint von THELEM  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.  
Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der  
vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

---

# **Zur Eignung von Ultrahochleistungsbeton (UHPC) als Zahnradwerkstoff**

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Bauwissenschaften  
der Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
vorgelegte und genehmigte

## **DISSERTATION**

von

**Marcel Johann Rhau, M. Sc.**

aus

Krefeld

Essen, im Oktober 2020

---

**Marcel Johann Rhau, M. Sc.,**

geboren am 09.08.1988 in Krefeld. Von 2009 bis 2014 Studium des Bauingenieurwesens (Bachelor und Master) an der Universität Duisburg-Essen mit der Vertiefung „Konstruktiver Ingenieurbau“. Anschließend von 2014 bis 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen. Seit 2020 ist er bei der Firma BERDING BETON GmbH tätig.

Hauptreferentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jeanette Orlowsky

Tag der Einreichung: 06.10.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 12.04.2021

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau (IfM) der Universität Duisburg-Essen. Die Aufgabenstellung ergab sich aus der Bearbeitung des von der VolkswagenStiftung geförderten Forschungsvorhabens „Investigations on the Suitability of Ultra High Performance Concrete for the Production of Gear Wheels and Roller Bearings“ sowie aus dem bewilligten Folgeforschungsvorhaben. Der VolkswagenStiftung möchte ich daher für die Förderung danken.

Mein Dank gilt Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held, die mir die Möglichkeit gab, nach Abschluss meines Studiums am Institut für Massivbau zu promovieren. Ich danke ihr herzlich für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die gewährte Unterstützung während meiner gesamten Tätigkeit am Lehrstuhl.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jeanette Orlowsky danke ich sehr für die freundliche Übernahme des Korreferats sowie für ihr Interesse an meiner Arbeit.

Mein Dank und meine Anerkennung gebühren weiterhin auch allen Mitarbeiter\*innen des Instituts. Das angenehme Arbeitsklima am Institut für Massivbau und das freundschaftliche Verhältnis unter den wissenschaftlichen Mitarbeiter\*innen waren mir eine große Hilfe. Gedankt sei hiermit meinen Kolleg\*innen für ihre Diskussionsbereitschaft und ihren fachlichen wie menschlichen Beistand.

Weiterhin soll an dieser Stelle meinen studentischen Hilfskräften und den Studierenden gedankt werden, deren Abschlussthesen ich betreut habe und die mich vor allem bei den experimentellen Untersuchungen unterstützt haben. Ebenso möchte ich den der Universität angeschlossenen Werkstätten, im Speziellen der mechanischen Werkstatt Essen, für die durchgängige Unterstützung und Beratung danken.

Ein weiterer Dank richtet sich an alle Firmen, die mir Materialien für meine experimentellen Untersuchungen bereitstellten und mir Fragen zu ihren Produkten beantworteten.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie danken. Hierzu zählt zum einen meine Ehefrau Theresa Rhau, die mich während meiner gesamten Promotion uneingeschränkt, liebevoll und vielseitig unterstützt hat und immer sehr geduldig und verständnisvoll war. Zum anderen möchte ich meiner Mutter Susanne Dembach danken, die mich mein ganzes Leben lang begleitet und unterstützt hat. Ein besonderer Dank gilt ebenfalls meinem Schwiegervater Wilhelm Kuttler, mit dem ich intensiv über meine Arbeit gesprochen und diskutiert habe und der sich immer, auch sehr kurzfristig, Zeit für mich genommen hat. Ich danke außerdem auch allen weiteren Familienmitgliedern und Freund\*innen, die mir in dieser intensiven Zeit zur Seite standen.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beton als Zahnradwerkstoff .....</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Forschung/Technik .....	3
2.1.1	Klassifizierung von Beton / Normative Regelung.....	3
2.1.2	Ultrahochleistungsbeton .....	4
2.1.3	Einsatz von Beton außerhalb des Bauwesens .....	4
2.1.4	Zahnräder.....	9
2.1.4.1	Zahnradarten und Zahnradgetriebe .....	9
2.1.4.2	Flankenprofile von Stirnrädern .....	10
2.1.4.3	Tragfähigkeit von geradverzahnten Stirnrädern .....	11
2.1.4.4	Fertigungsverfahren von Zahnrädern.....	18
2.2	Anforderungen an Zahnradwerkstoffe .....	18
2.3	Bewertung von Beton hinsichtlich der Eignung als Zahnradwerkstoff .....	21
2.3.1	Tragfähigkeit.....	21
2.3.2	Gewicht/Masse .....	22
2.3.3	Maßhaltigkeit .....	22
2.3.4	Homogenität und Luftporengehalt.....	25
2.3.5	Oberflächenbeschaffenheit .....	25
2.4	Fazit.....	26
<b>3</b>	<b>Voruntersuchungen zu UHPC/RPC.....</b>	<b>29</b>
3.1	Festlegung der Ausgangsmischungen für die Voruntersuchungen .....	29
3.2	Einfluss der thermischen Behandlung auf die Betonfestigkeiten.....	31
3.3	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	32
3.4	Einfluss des Mixers auf die Betonfestigkeiten .....	37
3.5	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten.....	39
3.6	Fazit.....	41
<b>4</b>	<b>Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen.....</b>	<b>43</b>
4.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	43
4.2	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	46
4.3	Fazit.....	50

<b>5</b>	<b>Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen .....</b>	<b>51</b>
5.1	Festlegung der zu charakterisierenden Mischungszusammensetzungen .....	51
5.2	Versuchsübersicht .....	52
5.3	Mischungsherstellung .....	54
5.4	Frischbetoneigenschaften .....	55
5.4.1	Frischbetonrohddichte .....	55
5.4.2	Ausbreitmaß .....	55
5.4.3	Luftporengehalt .....	55
5.4.4	Frischbetontemperatur und Hydratationswärmeentwicklung .....	56
5.5	Festbetoneigenschaften .....	58
5.5.1	Festbetonrohddichte .....	58
5.5.2	Druckfestigkeit .....	59
5.5.3	Drucktragverhalten .....	61
5.5.4	Elastizitätsmodul .....	63
5.5.5	Dynamischer Elastizitätsmodul (Resonanzfrequenzmethode) .....	63
5.5.6	Biegezugfestigkeit .....	65
5.5.7	Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul .....	66
5.5.8	Spaltzugfestigkeit .....	70
5.5.9	Kleinlathärte (Vickershärte) .....	70
5.5.10	Schwindmaß/Dimensionsstabilität .....	72
5.5.11	Wärmeausdehnung .....	76
5.5.12	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität .....	78
5.5.13	Verschleißfestigkeit nach Böhme .....	79
5.5.14	Porengrößenverteilung und Porosität .....	81
5.5.15	Wassereindringversuche .....	84
5.5.16	Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test .....	84
5.5.17	Schmierstoffbeständigkeit .....	89
5.5.18	Säurebeständigkeit .....	92
5.5.19	Dämpfung .....	94
5.6	Zusammenfassung und Fazit .....	96
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC .....</b>	<b>99</b>
6.1	Herstellungsverfahren - Voruntersuchungen .....	99
6.1.1	Trennende Fertigung .....	99
6.1.2	Urformende Fertigung .....	101
6.1.3	Fazit .....	104

6.2	Form- und Schalungsbau .....	105
6.2.1	Welle-Nabe-Verbindung (WNV) .....	105
6.2.2	Berücksichtigung des Schwindens des Betons .....	107
6.2.3	Oberflächenrauheit .....	108
6.3	Prototypbau .....	113
6.4	Fazit .....	115
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit von Betonzahnradern .....</b>	<b>117</b>
7.1	Geeignete Zahnradgeometrie .....	117
7.2	Analytische Bestimmung der Zahnfuß-Nennspannung .....	119
7.3	Numerische Berechnung der Zahnfußspannung mittels der Finite-Elemente- Methode (FEM) .....	123
7.4	Numerische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit .....	126
7.5	Zahnrad-Demonstrator (Eigenentwicklung) .....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
8.1	Zusammenfassung .....	133
8.2	Ausblick .....	134
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
<b>Anhang A – Stand der Forschung/Technik .....</b>		<b>153</b>
A.1	Klassifizierung von Beton .....	153
<b>Anhang B – Voruntersuchungen zu UHPC/RPC .....</b>		<b>155</b>
B.1	Festlegung der Ausgangsmischung für die Voruntersuchungen .....	155
B.2	Einfluss unterschiedlicher Fasern auf die Betonfestigkeiten .....	156
B.3	Einfluss des Mischers auf die Betonfestigkeiten .....	160
B.4	Einfluss einer Vakuumbehandlung auf die Betonfestigkeiten .....	160
<b>Anhang C – Entwicklung geeigneter Mischungszusammensetzungen .....</b>		<b>161</b>
C.1	Einfluss unterschiedlicher Zuschläge auf die Druck-, Biegezug- und Verschleißfestigkeit .....	161
C.2	Siliciumcarbid als Zuschlag für Beton .....	162
C.2.1	Herstellung und Aufbereitung .....	162
C.2.2	Materialigenschaften und Verwendung .....	165
C.3	Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICCs .....	166
C.4	Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC .....	168
C.5	Tabellen zu „Weitere Optimierung des entwickelten SiC-Betons/HPSICC“ ....	174

---

<b>Anhang D – Charakterisierung wichtiger Werkstoffkennwerte ausgewählter Mischungszusammensetzungen</b> .....	<b>178</b>
D.1 Mischungsherstellung.....	178
D.2 Übersicht über die Anzahl der Probekörper.....	178
D.3 Drucktragverhalten.....	180
D.4 Zugfestigkeit, Zugtragverhalten und Zug-E-Modul.....	182
D.5 Kleinlasthärte (Vickershärte).....	184
D.6 Schwindmaß/Dimensionsstabilität.....	185
D.7 Verschleißfestigkeit nach Böhme.....	187
D.8 Frost-Tausalz-Widerstand/CDF-Test.....	188
D.9 Schmierstoffbeständigkeit.....	190
D.10 Säurebeständigkeit.....	190
D.11 Festigkeitsentwicklung.....	194
<b>Anhang E – Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für Zahnräder aus UHPC</b> .....	<b>195</b>
E.1 Oberflächenrauheit.....	195
E.2 Prototypbau.....	195
<b>Anhang F – Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit von Betonzahnrädern</b>	<b>196</b>
F.1 Geeignete Zahnradgeometrie.....	196
F.2 Analytische Berechnung der Zahnfußspannung nach DIN 3990-3 [69].....	198
F.3 Analytische Berechnung der Flankenpressung nach DIN 3990-2 [67].....	203
F.4 Numerische Berechnung der Zahnfußspannung mittels der FEM.....	205
F.5 Numerische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit.....	206
F.6 Zahnrad-Demonstrator (Eigenentwicklung).....	208
<b>Anhang G – Aus dieser Arbeit hervorgegangene Thesen</b> .....	<b>209</b>

## Abkürzungen/Formelzeichen

Nachfolgend sind die wichtigsten verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen angegeben. Nicht aufgeführte Bezeichnungen werden im Text erläutert.

### Abkürzungen

100er Würfel	<b>Würfel</b> mit Abmessungen: <b>100</b> mm x 100 mm x 100 mm
100er Zylinder	<b>Zylinder</b> mit Abmessungen: $\varnothing = 100$ mm; h = 200 mm
150er Würfel	<b>Würfel</b> mit Abmessungen: <b>150</b> mm x 150 mm x 150 mm
150er Zylinder	<b>Zylinder</b> mit Abmessungen: $\varnothing = 150$ mm; h = 300 mm
3D	drei ( <b>3</b> ) Dimensionen, dreidimensional
40er Prisma	<b>Prisma</b> mit Abmessungen: <b>40</b> mm x 40 mm x 160 mm
50er Prisma	<b>Prisma</b> mit Abmessungen: <b>50</b> mm x 60 mm x 250 mm
w/F <sub>m</sub> -Wert	massebezogener <b>Wasser-Feinsteilwert</b>
w/z-Wert	<b>Wasserzementwert</b>
BZF	<b>Biegezugfestigkeit</b>
Ch	<b>Charge</b>
DafStB	<b>Deutscher Ausschuss für Stahlbeton</b>
DF	<b>Druckfestigkeit</b>
DMS	<b>Dehnmessstreifen</b>
EK	<b>Edelkorund</b>
FA	<b>Flugasche</b>
FDM	Schmelzschiichtung (engl. <b>Fused Deposition Modeling</b> )
FE, FEM	<b>Finite-Elemente-Methode</b>
FM	<b>Fließmittel</b>
FTW	<b>Frost-Tau-Wechsel</b>
GG	<b>Glasgranulat</b>
GS	<b>Granatsand</b>
HPSICC	Hochleistungs-Siliciumcarbid-Beton (engl. <b>High Performance Silicon Carbide Concrete</b> )
HSM	<b>Hüttensandmehl</b>
IfM	Institut für <b>Massivbau</b> der Universität Duisburg-Essen
K	<b>Kombination</b>
LL	Lagerung des Probekörpers an der Luft ( <b>Luftlagerung</b> ), Lufttemperatur $t_L = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , $r_F = (65 \pm 5) \%$
M.-%	<b>Massenprozent</b>
MB	<b>Mischung B</b>
MK	<b>Mischkorund</b>
MS	<b>Mikrosilika</b>
NK	<b>Normalkorund</b>
NL <sub>28d</sub>	<b>28 d Normlagerung</b> entsprechend DIN EN 12390-2 [1]: (24 ± 2) h SL, anschließend 6 d WL, dann 21 d LL, Prüfalter 28 d

NL <sub>84d</sub>	<b>84 d Normlagerung</b> entsprechend DIN EN 12390-2 [1]: (24 ± 2) h SL, anschließend 6 d WL, dann 77 d LL, Prüfalter 84 d
NL <sub>112d</sub>	<b>112 d Normlagerung</b> entsprechend DIN EN 12390-2 [1]: (24 ± 2) h SL, anschließend 6 d WL, dann 105 d LL, Prüfalter 112 d
NL <sub>168d</sub>	<b>168 d Normlagerung</b> entsprechend DIN EN 12390-2 [1]: (24 ± 2) h SL, anschließend 6 d WL, dann 161 d LL, Prüfalter 168 d
ÖL	Lagerung des Probekörpers unter Öl ( <b>Öllagerung</b> ), Öltemperatur $t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
ÖL <sub>56d</sub>	<b>56 d Öllagerung</b> , NL <sub>28d</sub> , anschließend 56 d ÖL, Prüfalter 84 d
ÖL <sub>84d</sub>	<b>84 d Öllagerung</b> , NL <sub>28d</sub> , anschließend 84 d ÖL, Prüfalter 112 d
ÖL <sub>140d</sub>	<b>140 d Öllagerung</b> , NL <sub>28d</sub> , anschließend 140 d ÖL, Prüfalter 168 d
P	<b>Probekörper</b>
P <sub>LA</sub>	<b>Lastangriffspunkt</b>
PLA	<b>Polylactide</b>
PA	<b>Probekörperalter</b>
PP	<b>Prüfperiode</b>
PTFE	<b>Polytetrafluorethylen</b>
QS	<b>Quarzsand</b>
RPC	<b>Reactive Powder Concrete</b>
S	<b>Schlacke</b>
SDM	<b>Setzdehnmessplättchen, Setzdehnmesser</b>
SiC	<b>Siliciumcarbid</b>
SL	Lagerung des Probekörpers in der Schalung/Form ( <b>Schallagerung</b> ), Lufttemperatur $t_L = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
SLA	<b>Stereolithografie</b> (engl. <b>Stereolithography Apparatus</b> )
SSC	selbstverdichtender Beton, engl. <b>Self Compacting Concrete</b>
TPU	<b>thermoplastisches Polyurethan</b>
UHFB	<b>Ultrahochfesterbeton</b>
UHPC	Ultrahochleistungsbeton (engl. <b>Ultra High Performance Concrete</b> )
VK	<b>Verschleißwiderstandsklasse</b>
Vol.-%	<b>Volumenprozent</b>
WL	Lagerung des Probekörpers unter Wasser ( <b>Wasserlagerung</b> ), Wassertemperatur $t_w = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
WL <sub>7d</sub>	<b>7 d Wasserlagerung</b> : (24 ± 2) h SL, anschließend 6 d WL, Prüfalter: 7 d
WL <sub>28d</sub>	<b>28 d Wasserlagerung</b> : (24 ± 2) h SL, anschließend 27 d WL, Prüfalter: 28 d
WNV	<b>Welle-Nabe-Verbindung</b>
Z	<b>Zement</b>

## Formelzeichen

$b$	Zahnbreite/Walzenbreite, in [mm]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität (auch: Wärmespeicherkapazität) in [kJ/(kg·K)]; Kopfspiel zwischen Bezugsprofil und Gegenprofil in [mm]
$d$	Teilkreisdurchmesser in [mm]
$d_f$	Teilkreisdurchmesser des Ritzels in [mm]
$d_2, d_3$	Durchmesser der eingestellten Berührlinie für 2 bzw. 3 eingespannte Zähne in [mm]
$d_a$	Kopfkreisdurchmesser in [mm]
$d_b$	Grundkreisdurchmesser in [mm]
$d_e, d_{en}$	Durchmesser für Kraftangriff im äußeren Einzeleingriffspunkt in [mm]

$f_{cm}$	mittlere Druckfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ohne Probekörpergeometriebezug in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{f}_{cm}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren Druckfestigkeiten $f_{cm}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ), ohne Probekörpergeometriebezug in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ck,cub}$	charakteristische Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen entsprechend DIN EN 1992-1-1 [2] in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cm,cub100}$	Mittlere Druckfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) ermittelt an 100er Würfeln ( $n > 1$ ) einer Charge in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{f}_{cm,cub100}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren zentrischen Zugfestigkeiten $f_{cm,cub100}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ), ermittelt an 100er Würfeln in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cm,cyl}$	mittlere Zylinderdruckfestigkeit entsprechend DIN EN 1992-1-1 [2]
$f_{cm,cyl100}$	mittlere Druckfestigkeit (arithmetischer Mittelwert) ermittelt an 100er Zylindern ( $n > 1$ ) einer Charge in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cm,pri40}$	mittlere Druckfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) ermittelt an 40er Prismen ( $n > 1$ ) einer Charge in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{f}_{cm,pri40}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren Druckfestigkeiten $f_{cm,pri40}$ (40er Prismen) mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm}$	mittlere zentrischen Zugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ohne Probekörpergeometriebezug in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{f}_{ctm}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren zentrischen Zugfestigkeiten $f_{cm}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ), ohne Probekörpergeometriebezug in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,ec}$	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons entsprechend DIN EN 1992-1-1 [2]
$f_{ctm,pri50}$	mittlere zentrische Zugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ermittelt an 50er Prismen in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,pri40}$	mittlere zentrische Zugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ermittelt an 40er Prismen, in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,fl,pri40}$	mittlere Biegezugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) ermittelt an 40er Prismen einer Charge in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{f}_{ctm,fl,pri40}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren Biegezugfestigkeiten $f_{ctm,fl,pri40}$ (40er Prismen) mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,fl,pri120}$	mittlere Biegezugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) ermittelt an Prismen mit den Maßen 120 mm x 120 mm x 360 mm einer Charge in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,sp}$	mittlere Spaltzugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ohne Probekörpergeometriebezug in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,sp,cyl150}$	mittlere Spaltzugfestigkeit (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge, ermittelt an 150er Zylindern in [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_p$	Umrechnungsfaktor, $\sigma_{F,Puls} \cdot f_p = \sigma_{F,Lauf}$
$\bar{f}_{ft}$	zentrische Faserzugfestigkeit in [N/mm <sup>2</sup> ]
$h$	Höhe in [mm, cm, m]
$h_{aP}$	Kopfhöhe des Bezugsprofils in [mm]
$h_{Fa}, h_{Fe}$	Biegehebelarm für Zahnfußbeanspruchung bei Kraftangriff am Zahnkopf (Fa) bzw. im äußeren Einzeleingriffspunkt (Fe) in [mm]
$h_{fP}$	Fußhöhe des Bezugsprofils in [mm]
$i$	Messzeitpunkt, Messpunkt
$k$	Kopfhöhenänderungsfaktor; Messzähnezahl
$l$	Länge in [mm; cm; m]
$l_0$	Ausgangslänge bzw. Anfangslänge in [mm; cm; m]
$m$	Modul in [mm]
$m_n$	Normalmodul, Modul der Ersatz-Geradverzahnung

$n$	Probekörperanzahl, Messwertanzahl, Chargenanzahl
$n_1$	Drehzahl in [U/min]
$p$	Druck in [bar]
$p_L$	Luftdruck in [mbar; hPa]
$rF$	Relative Luftfeuchtigkeit in [%]
$r_p$	Porenradius, Porengröße in [nm]
$s$	Werkstoffdicke in [mm; cm]
$s_c$	Schädigungstiefe in [ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{s}_{c,28d}$	mittlere Schädigungstiefe durch Salzsäurelösung (pH-Wert < 3,0) (arithmetischer Mittelwert) nach 28 d in [ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{s}_{c,84d}$	mittlere Schädigungstiefe durch Salzsäurelösung (pH-Wert < 3,0) (arithmetischer Mittelwert) nach 84 d in [ $\mu\text{m}$ ]
$\bar{s}_{c,4h}$	mittlere Schädigungstiefe durch Salzsäurelösung (pH-Wert = 0) (arithmetischer Mittelwert) nach 4 d in [ $\mu\text{m}$ ]
$s_{Fn}$	Zahnfußdickensehne im Berechnungsquerschnitt/ Zahnfußdicke in [mm]
$t$	Temperatur, in [ $^{\circ}\text{C}$ ]; Dicke in [mm]
$t_{c,1}$	Frischbetontemperatur einer Charge in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\bar{t}_{c,1}$	mittlere Frischbetontemperatur (arithmetischer Mittelwert) mehrerer Chargen in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\bar{t}_{c,2}$	mittlere Frischbetontemperatur (arithmetischer Mittelwert) zum Zeitpunkt der Montage des Thermoelements, erster Messwert des Thermoelements mehrerer Chargen in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\bar{t}_{c,i}$	mittlere Betontemperatur (arithmetischer Mittelwert) zum Zeitpunkt $i$ resultierend aus mehreren Probekörpern in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_L$	Lufttemperatur in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_{\text{Ref}}$	Referenztemperatur in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_W$	Wassertemperatur in [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$u$	Zähnezahlverhältnis
$z$	Zähnezahl
$A_{FT}$	Gesamtprüffläche für die Frost-Tausalz-Versuche in [ $\text{mm}^2$ ; $\text{cm}^2$ ; $\text{m}^2$ ]
$D$	Dämpfungsgrad
$DL_{13d}$	Dimensionsstabilität nach 13 d
$E$	Elastizitätsmodul/ E-Modul in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{cm,st}$	mittlerer statischer Druck-Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ), ohne Probekörpergeometriebezug in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{cm,st,cyl100}$	mittlerer statischer Druck-Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n = 5$ ), ermittelt an 100er Zylindern in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{dyn}$	mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ), ohne Probekörpergeometriebezug in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{dyn,pr140}$	mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n = 3$ ), ermittelt an 40er Prismen in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{ctm,pr50}$	mittlerer Zug-Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n \geq 4$ ), ermittelt an 50er Prismen in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{ctm,pr140}$	mittlerer Zug-Elastizitätsmodul (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ), ermittelt an 40er Prismen in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$E_{fi}$	Faser-Elastizitätsmodul in [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$F$	Kraft/ Zahnkraft in [N, kN]
$F_{bn}, F_{bt}$	(Nenn-)Zahnnormalkraft normal zur Berührlinie (bn) bzw. im Stirnschnitt (bt), bei Geradverzahnung $F_{bn} = F_{bt}$ in [N; kN]

$F_e$	Zahnkraft im äußeren Einzeleingriffspunkt in [N; kN]
$F_r'$	Radialkomponente der Zahnkraft in [N; kN]
$F_t$	Nenn-Umfangskraft am Teilzylinder im Stirnschnitt, in [N; kN]
$F_t'$	Tangentialkomponente der Zahnkraft, in [N; kN]
$HV_1$	mittlere Vickershärte (arithmetischer Mittelwert, $n > 200$ ), Prüflast: 1 kg (= 9,81 N) für eine Charge, in [N/mm <sup>2</sup> ]
$HV_{1pr}$	mittlere Vickershärte (arithmetischer Mittelwert, $n > 65$ ), Prüflast: 1 kg (= 9,81 N), ermittelt an einem Prüfkörper einer Charge, in [N/mm <sup>2</sup> ]
$K_{FA}, K_{FV}, K_{F\beta}, K_{Fa}, K_{H\beta}, K_{Ha}$	Belastungsfaktoren, siehe DIN 3990-1 [3]
$L_n$	mittlere rel. Feuchteaufnahme (arithmetischer Mittelwert) nach dem $n$ -ten FTW in [M.-%]
$M$	Moment, Kraftmoment
$M_{dreh,max}$	maximales Drehmoment in [Nm]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß, Determinationskoeffizient
$R_a$	arithmetischer Mittenrauwert in [ $\mu$ m]
$R_{t,n}$	mittlerer relativer dynamischer E-Modul (arithmetischer Mittelwert) aus der Grundschiwingung, nach dem $n$ -ten FTW
$R_{max}$	maximale Einzelrautiefe bzw. Rautiefe in [ $\mu$ m]
$R_s$	Zahndickenschwankung in [ $\mu$ m; mm], siehe DIN 3962-1 [4]
$R_{u,n}$	mittlerer relativer dynamischer E-Modul (arithmetischer Mittelwert) aus der Ultraschalllaufzeit, nach dem $n$ -ten FTW
$R_z$	arithmetischer Mittelwert der Einzelrautiefen bzw. gemittelte Rautiefe in [ $\mu$ m]
$S_F$	Sicherheitsfaktor für die Zahnfußbeanspruchung
$S_{Fmin}$	Mindestsicherheit für die Zahnfußbeanspruchung
$S_H$	Sicherheitsfaktor für die Flankenpressung
$S_{Hmin}$	Mindestsicherheit für die Flankenpressung
$S_n$	mittlere Abwitterungsmenge bzw. Masse des abgewitterten Materials (arithmetischer Mittelwert) nach dem $n$ -ten FTW in [g/m <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatur in [K]
$T_{sn}$	Zahndickentoleranz in [ $\mu$ m; mm], siehe DIN 3967 [5]
$V_{LP}$	Luftporengehalt ( $n = 1$ ) in [Vol.-%]
$\bar{V}_{LP}$	Arithmetischer Mittelwert der Luftporengehalte $V_{LP}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [Vol.-%]
$W$	Widerstandsmoment
$W_2, W_3$	Zahnweite für 2 bzw. 3 eingespannte Zähne in [mm]
$Y_B$	Zahnkranzdickenfaktor
$Y_{DT}$	Hochverzahnungsfaktor
$Y_F, Y_{Fa}$	Formfaktor für Kraftangriff im äußeren Einzeleingriffspunkt (F) bzw. am Zahnkopf (Fa)
$Y_{FS}$	Kopffaktor
$Y_S, Y_{Sa}$	Spannungskorrekturfaktor für Kraftangriff im äußeren Einzeleingriffspunkt (S) bzw. am Zahnkopf (Sa)
$Y_{\beta}$	Schrägenfaktor
$Y_{\epsilon}$	Überdeckungsfaktor
$Z_B, Z_D$	Einzeleingriffsfaktor
$Z_E$	Elastizitätsfaktor
$Z_H$	Zonenfaktor
$Z_{\beta}$	Schrägenfaktor
$Z_{\epsilon}$	Überdeckungsfaktor

$\alpha$	Eingriffswinkel am Teilkreis in [rad; °]; Flankenwinkel
$\alpha_{an}, \alpha_{en}$	Profilwinkel am Kopfzylinder (an) bzw. im äußeren Einzeleingriffspunkt (en) der Ersatz-Geradverzahnung in [rad; °]
$\alpha_{Fan}, \alpha_{Fen}$	Kraftangriffswinkel am Kopfzylinder (Fan) bzw. im äußeren Einzeleingriffspunkt (Fen) der Ersatz-Geradverzahnung in [rad; °]
$\alpha_n$	Normaleingriffswinkel am Teilkreis, Eingriffswinkel an der Ersatz-Geradverzahnung in [rad; °]
$\alpha_P$	Profilwinkel in [rad; °]
$\alpha_T$	Wärmedehnzahl (auch: Wärmeausdehnungskoeffizient) in [10 <sup>-6</sup> /K]
$\alpha_t$	Stirneingriffswinkel in [rad; °]
$\alpha_w$	Betriebseingriffswinkel, Eingriffswinkel am Wälzkreis in [rad; °]
$\alpha_{wt}$	Betriebseingriffswinkel im Stirnschnitt in [rad; °]
$\beta$	Schrägungswinkel am Teilkreis in [rad; °]
$\beta_o$	Schrägungswinkel am Grundkreis, Grundschrägungswinkel in [rad; °]
$\gamma_a, \gamma_e$	Hilfswinkel/Verdrehwinkel am Zahnkopf (a) bzw. äußeren Einzeleingriffspunkt (e) in [rad; °]
$\epsilon_\alpha$	Profilüberdeckung, Profilüberdeckungsfaktor
$\epsilon_{an}$	Profilüberdeckung der Ersatz-Geradverzahnung
$\epsilon_{cm, cyl100}$	mittlere Bruchstauchung (arithmetischer Mittelwert, $n = 4$ ), ermittelt an 100er Zylindern in [%] bzw. [mm/m]
$\epsilon_{ctm, pri50}$	mittlere Bruchdehnung (arithmetischer Mittelwert, $n \geq 4$ ), ermittelt an 50er Prismen in [%] bzw. [mm/m]
$\epsilon_{s13d}$	mittleres Schwindmaß/ mittlere Schwindverkürzung (arithmetischer Mittelwert, $n \geq 1$ ) nach 13 d in [%] bzw. [mm/m]
$\epsilon_{s365d}$	mittleres Schwindmaß/ mittlere Schwindverkürzung (arithmetischer Mittelwert, $n \geq 15$ ) nach 365 d in [%] bzw. [mm/m]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit in [W/(m·K)]
$\nu$	Poisson-Zahl bzw. Querdehnzahl
$\nu_c$	Querdehnzahl von Beton
$\pi$	Kreiszahl (= 3,14)
$\rho$	Dichte in [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{fr}$	Frischbetonrohddichte ( $n = 1$ ) in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{\rho}_{fr}$	Arithmetischer Mittelwert der Frischbetonrohddichten ( $n > 1$ ) in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{hdm}$	mittlere Festbetonrohddichte (arithmetischer Mittelwert, $n > 1$ ) einer Charge in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\bar{\rho}_{hdm}$	arithmetischer Mittelwert der mittleren Festbetonrohddichte $\rho_{hdm}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{mat}$	Materialrohddichte in [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{sr}$	Rechnerische Betondichte, Stoffraumrechnung in [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varrho$	Krümmungsradius in [mm]
$\varrho_F$	Fußrundungsradius am Berührungspunkt der 30°-Tangenten in [mm]
$\varrho_{rP}$	Fußrundungsradius des Bezugsprofils in [mm]
$\sigma$	Standardabweichung; Spannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{abs}$	(absolute) Standardabweichung der Mittelwerte/Einzelwerte mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in der jeweiligen Einheit
$\sigma_{abs, ch}$	(absolute) Standardabweichung einer Charge ( $n > 1$ ) in der jeweiligen Einheit
$\bar{\sigma}_{abs, ch}$	mittlere (absolute) Standardabweichung (arithmetischer Mittelwert) resultierend aus den relativen Standardabweichungen $\sigma_{rel, ch}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in der jeweiligen Einheit
$\sigma_b$	Biegespannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_d$	Druckspannung in [N/mm <sup>2</sup> ]

$\sigma_F$	Zahnfußspannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{F0}$	Zahnfuß-Nennspannung, maximale örtliche Zugspannung am Zahnfuß in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{FG}$	Zahnfuß-Grenzfestigkeit in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{FP}$	zulässige Zahnfußspannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{FE}$	Zahnfuß-Grundfestigkeit in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{F \text{ lim}}$	Zahnfuß-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeitswert für Zahnfußbiegespannung) in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{F, \text{ Lauf}}$	zulässige Zahnfußspannung aus Laufversuchen in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{F, \text{ Puls}}$	zulässige Zahnfußspannung aus dem Pulsator-Versuch in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_H$	Flankenpressung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{H0}$	nominelle Flankenpressung im Wälzpunkt in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{HG}$	Grübchen-Grenzfestigkeit in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{HP}$	maximal zulässige Flankenpressung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{H \text{ lim}}$	Grübchen-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeit für Flankenpressung) in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{max}}$	maximale Pressung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{\text{rel}}$	relative Standardabweichung der Mittelwerte/Einzelwerte mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [%]
$\sigma_{\text{rel, ch}}$	relative Standardabweichung ( $n > 1$ ) einer Charge in [%]
$\bar{\sigma}_{\text{rel, ch}}$	mittlere relative Standardabweichung (arithmetischer Mittelwert) resultierend aus den relativen Standardabweichungen $\sigma_{\text{abs, ch}}$ mehrerer Chargen ( $n > 1$ ) in [%]
$\sigma_{\text{rel, pr}}$	relative Standardabweichung der Messwerte unterschiedlicher Probekörper ( $n > 1$ ) einer Charge, in [%]
$\tau$	Schubspannung in [N/mm <sup>2</sup> ]
$u$	Umfangs- bzw. Gleitgeschwindigkeit in [m/s]
$\emptyset$	Durchmesser in [mm]
$\emptyset_K$	Korndurchmesser in [mm]
$\Delta l_{\text{bm}}$	mittlerer Dickenverlust nach Böhme nach 16 Prüfperioden (PP) in [mm/50 cm <sup>2</sup> ]
$\Delta l_T$	Längendifferenz resultierend aus der temperaturabhängigen Verformung in [mm]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz in [K]
$\Delta T_c$	Differenz von Referenztemperatur zu Betontemperatur (= $t_{c,i} - t_{\text{ref}}$ ) in [K]
$\Delta T_{c, \text{ loss}}$	Differenz von der ersten, mit dem Thermoelement gemessenen Betontemperatur ( $i = 2$ ) zur Frischbetontemperatur ( $i = 1$ ), (= $t_{c,1} - t_{c,2}$ ) in [K]
$\Delta V_{\text{bm}}$	mittlerer Volumenverlust nach Böhme nach 16 Prüfperioden (PP) in [cm <sup>2</sup> /50 cm <sup>2</sup> ]



## 1 Einleitung und Motivation

Zementgebundener Beton wird hauptsächlich im Bauwesen verwendet. Seine für die Herstellung, die Bemessung und den Einbau relevanten Kennwerte sind in Normen und Richtlinien verankert. Die Anforderungen an Beton richten sich hauptsächlich an dessen Festigkeitseigenschaft, im Speziellen an die Druckfestigkeit; die Zugfestigkeit wird in der Bemessung weitestgehend vernachlässigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Betonzugfestigkeit nur ca. 10 % der Druckfestigkeit entspricht, wird zur Aufnahme von Zugkräften eine Bewehrung (i. d. R. aus Stahl) in den Beton eingelegt. Um ein duktilen Bauteilversagen sicherzustellen, muss im Rahmen der Sicherheitskonzepte der aktuellen Normungen für den Stahlbetonbau (vgl. DIN EN 1992-1-1 [2]) ebenfalls eine Mindestbewehrung zur Vermeidung eines unangekündigten Versagens angeordnet werden.

Die fortschreitende Entwicklung in der Betontechnologie und die damit einhergehenden verbesserten Materialeigenschaften ermöglichen es, ultrahochfeste Betone (UHPC, engl. **Ultra High Performance Concrete**) herzustellen. Diese Betone zeichnen sich neben der hohen Festigkeit (Betonfestigkeitsklasse  $> C100/115$ ) auch durch ihr dichtes Gefüge aus, woraus ebenfalls hervorragende Dauerhaftigkeitseigenschaften resultieren.

UHPC ist somit nur bedingt mit dem genormten Normalbeton und Hochleistungsbeton (Betonfestigkeitsklasse  $\leq C100/115$ ), wie er im Bauwesen Verwendung findet, vergleichbar. Die höheren Druck- und Zugfestigkeiten sowie Dauerhaftigkeitseigenschaften ermöglichen die Erschließung neuer Anwendungsgebiete, beispielsweise im Maschinenbau. Hier wird Beton bereits im Werkzeugmaschinenbau für Maschinenbetten oder -gestelle eingesetzt und stellt somit eine Alternative zu Grauguss- oder Stahlkonstruktionen dar. Der Fokus im Maschinenbau liegt hierbei nicht wie im Bauwesen auf den Werkstofffestigkeiten, sondern auf der Steifigkeit, der Maßhaltigkeit und dem Dämpfungsverhalten der Konstruktion.

Aus den sehr guten Werkstoffeigenschaften (Festigkeit, Dauerhaftigkeit, etc.) von UHPC kann abgeleitet werden, dass sich dieser auch für weitere Maschinenbauanwendungen nutzen lässt. Ebenso bietet UHPC durch seine Gießfähigkeit die Möglichkeit für neue Fertigungsverfahren (z. B. urformende Herstellung am Einsatzort). Da bisher keine systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen bekannt sind, welche die Belastung von komplexeren Maschinenbauteilen und deren Herstellung berücksichtigen, werden diese im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Beton als Werkstoff für Maschinenelemente sollte sich planmäßig im linear-elastischen Zustand (Druck- und Zugtragverhalten) befinden. Jeder Riss im Bauteil führt zu einer Verformungs- und Steifigkeitsänderung und macht das Bauteil für die maschinenbautechnische Anwendung unbrauchbar. Hierbei ist ebenfalls zu beachten, dass eine Bewehrung erst bei Reißen der Betonmatrix vollständig wirkt und beim ungerissenen Beton (linear-elastischer Bereich) nur einen marginalen Einfluss auf die Zugtragfähigkeit hat. Erst nach dem Reißen der Matrix ist eine Steigerung der Zugtragfähigkeit zu erwarten.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf komplex belasteten Maschinenbauteilen bzw. -komponenten, wozu das Zahnrad zählt. Das Zahnrad ist eines der meist verwendeten Maschinenelemente. Am

Beispiel des Zahnrades wird in dieser Arbeit untersucht, ob sich UHPC auch für komplex belastete Maschinenbauteile eignet und ggf. etablierte Werkstoffe wie Stahl oder Kunststoff ersetzen kann.

Die Herstellung von Stahl- und Kunststoffzahnradern ist mit einem hohen Fertigungsaufwand verbunden. Im Gegensatz zu Stahl und Kunststoff kann Beton in jede beliebige Form gegossen werden, wozu kein äußerer Energieeintrag (z. B. Erwärmen und Abkühlen) zur Verflüssigung oder Erhärtung notwendig ist. Betonzahnradern können somit vor Ort hergestellt werden und sind nach dem Entformen einsatzbereit. Ein weiterer positiver Aspekt von Beton ist seine geringe Dichte sowie Korrosionsbeständigkeit gegenüber Stahl. Ferner ist davon auszugehen, dass die Herstellung von Betonzahnradern, bedingt durch geringere Kosten der Ausgangsstoffe im Vergleich zu metallischen Werkstoffen wirtschaftlicher ist. Zudem ist zementgebundener Beton leichter zu recyceln, wodurch sich eine deutlich bessere Nachhaltigkeit ergibt.

Zunächst erfolgt ein Überblick über die Bereiche, in denen Beton derzeit außerhalb des Bauwesens Verwendung findet. Auf Basis dessen wird ein Anforderungsprofil für Beton als Zahnradwerkstoff erstellt. Anhand von Voruntersuchungen an feinkörnigem UHPC ( $\triangleq$  RPC, engl. **R**eactive **P**owder **C**oncrete) werden grundlegende Fragestellungen zum Einfluss unterschiedlicher betontechnologischer Optimierungsprozesse behandelt. Dabei wird beispielsweise der Einfluss von Fasern und einer thermischen Behandlung auf die Betoneigenschaften analysiert. Im Anschluss erfolgt die Entwicklung einer für die Zahnradherstellung geeigneten Mischungszusammensetzung, an der relevante Materialparameter bestimmt werden. Abschließend wird ein geeignetes Herstellungsverfahren für Betonzahnradern vorgestellt, numerische Tragfähigkeitsuntersuchungen an einem Betonzahnrad durchgeführt und die Realisierbarkeit von Betonzahnradern anhand eines Demonstrators gezeigt.

## 2 Beton als Zahnradwerkstoff

### 2.1 Stand der Forschung/Technik

#### 2.1.1 Klassifizierung von Beton / Normative Regelung

Die Klassifizierung von Beton erfolgt in Deutschland über die Betondruckfestigkeit in Festigkeitsklassen (z. B. für Normalbeton bzw. hochfesten Beton, Anhang A.1, Tab. A 1). Anhand der Normhistorie zeigt sich, dass es in den letzten Jahrzehnten große Entwicklungen in der Betontechnologie gab; die Druckfestigkeitsklassen für Beton nach DIN 1045 [6] endeten im Jahre 1988 noch bei einem B55 ( $\triangleq$  C45/55, charakteristische Zylinderdruckfestigkeit  $f_{ck,cyl} = 45 \text{ N/mm}^2$ , charakteristische Würfeldruckfestigkeit  $f_{ck,cub} = 55 \text{ N/mm}^2$ ). Heutzutage hingegen werden in DIN EN 206 [7], DIN 1045-2 [8] und DIN EN 1992-1-1 [2] Betone bis zu einer Festigkeitsklasse C100/115 ( $f_{ck,cyl} = 100 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{ck,cub} = 115 \text{ N/mm}^2$ ) geregelt. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die Betonzugfestigkeit von Normalbetonen (bis C50/60) ca. 10 % der Betondruckfestigkeit beträgt. Diese Annahme gilt jedoch nicht für hochfeste Betone (ab C55/67). Ein C100/115 weist nach DIN EN 1992-1-1 [2] beispielsweise nur eine mittlere zentrische Zugfestigkeit  $f_{ctm,ec} = 5,2 \text{ N/mm}^2$  auf, dies entspricht nur 4,8 % der mittleren Zylinderdruckfestigkeit ( $f_{cm,cyl} = 108 \text{ N/mm}^2$ , Anhang A.1, Tab. A 1 und Abb. A 1).

Betone oberhalb der Festigkeitsklasse C100/115 werden als „Ultrahochleistungsbeton“ (UHPC) oder „Ultrahochfesterbeton“ (UHFb) bezeichnet und sind in Deutschland bislang nicht normativ geregelt. Aktuell wird jedoch die DAfStb-Richtlinie „Ultrahochfester Beton“ zum Umgang mit UHPC erarbeitet [9, 10]. Ziel hierbei ist es, eine Ergänzung zu DIN EN 206 [7], DIN EN 13670 [11], DIN 1045 (Teil 2 + 3) [8, 12] und zu DIN EN 1992-1-1 [2] zu schaffen, um alle konstruktiven Anwendungen abzudecken [10]. Die neue DAfStb-Richtlinie soll dazu beitragen, die Vorteile des Baustoffs UHPC für moderne, langlebige, umweltschonende und wirtschaftliche Bauwerke in Deutschland zu verdeutlichen und zu nutzen [9, 10]. In der Richtlinie sollen die drei Druckfestigkeitsklassen UHPC130, UHPC150 und UHPC175 eingeführt werden, die charakteristischen Zylinderdruckfestigkeiten (100er Zylinder) von  $> 130 \text{ N/mm}^2$ ,  $> 150 \text{ N/mm}^2$  und  $> 175 \text{ N/mm}^2$  entsprechen.

In anderen Ländern existieren bereits Normen, welche die Herstellung und Anwendung von faserbewehrtem UHPC festlegen. So wurde schon im Jahr 2000 ein Leitfaden [13] zur Bemessung von vorgespannten Betonbalken aus ultrahochfestem Beton in Australien veröffentlicht. In Frankreich erfolgte die erste Veröffentlichung von Bemessungsregeln für UHPC im Jahre 2002 [14]. Seit 2016 wurden dort drei Normen [15–17] eingeführt, welche die Herstellung, die Bemessung und die Ausführung von faserbewehrten UHPC-Bauteilen regeln. Auch in Japan existiert seit 2004 eine Richtlinie zu UHPC [14, 18]. 2016 wurde in der Schweiz das erste Merkblatt zum Umgang mit UHPC publiziert [19].

### 2.1.2 Ultrahochleistungsbeton

Bereits Walz [20] (1966) stellte fest, dass durch Aufbringen von Druck auf den erhärtenden Beton dessen Druckfestigkeit gesteigert werden kann. Teichmann et al. [21] konnten durch Kompression des Frischbetons und einer siebentägigen thermischen Behandlung bei 250 °C Druckfestigkeiten von ca. 500 N/mm<sup>2</sup> (zylindrische Probekörper:  $h = 100$ ,  $\varnothing = 70$  mm) erreichen. Roy et al. [22, 23] stellten ebenfalls unter Einsatz von hohem Druck und hohen Temperaturen Betone mit Druckfestigkeiten von bis zu 650 N/mm<sup>2</sup> her. Die Untersuchungen von [24] zeigten, dass die Verwendung einer Stahlkörnung und eine Nachbehandlung bei hohem Druck und hoher Temperatur sogar eine Steigerung der Druckfestigkeit auf bis zu 800 N/mm<sup>2</sup> ermöglicht.

Die Entwicklung von feinkörnigem UHPC in Kanada und Frankreich in den 1980er und 1990er Jahren ermöglichte erstmals die Herstellung von Betonen (Stahlfasereinsatz + thermische Behandlung) - ohne Einsatz einer Druckbehandlung - mit Druckfestigkeiten  $> 200$  N/mm<sup>2</sup> [24–28]. Diese UHPCs wurden aufgrund ihrer Feinkörnigkeit (Größtkorn  $\varnothing_K \leq 0,6$  mm) als „Reactive Powder Concrete“ (RPC) bezeichnet.

Die Festigkeitserhöhung ( $\geq 200$  N/mm<sup>2</sup>) und die damit verbundenen verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften von UHPC/RPC im Vergleich zu Normalbetonen sind hierbei hauptsächlich mit der Optimierung der Packungsdichte, der Reduzierung des Wasser-Zement-Wertes (w/z-Wert), dem Fasereinsatz und der thermischen Nachbehandlung zu begründen. Hierzu wurde das Drei-Stoff-System (Zement, Gesteinskörnung, Zugabewasser) des Betons auf ein Fünf-Stoff-System (Zement, Gesteinskörnung, Zugabewasser, Zusatzmittel und -stoffe) erweitert. Zur Packungsdichteoptimierung werden beispielsweise reaktive (z. B. Silikastaub) und nichtreaktive, inerte Zusatzstoffe (z. B. Gesteinsmehle) eingesetzt. Um eine verarbeitbare Betonkonsistenz bei geringerem w/z-Wert zu erreichen, werden Zusatzmittel wie Hochleistungsfließmittel zugefügt.

Erste Untersuchungen zu grobkörnigerem UHPC ( $\leq \varnothing_K = 16$  mm) wurden in den 1990er Jahren durchgeführt, bei dem ebenfalls eine Optimierung im Feinkornbereich (erhöhter Feinkornanteil mit  $\varnothing_K < 0,125$  mm) erfolgte [27, 29, 30]. Heutzutage wird daher zwischen feinkörnigem UHPC/UHFB und grobkörnigem UHPC/UHFB unterschieden, zu ersterem zählt auch der klassische RPC. Weitere Informationen zu UHPC sind beispielsweise [14] zu entnehmen.

### 2.1.3 Einsatz von Beton außerhalb des Bauwesens

Im Bauwesen besteht die Hauptaufgabe des Einsatzes des Werkstoffs Beton in der Aufnahme und Weiterleitung von Druckkräften. Durch die stetige Weiterentwicklung der Betone, vor allem im Hinblick auf die Festigkeit, eröffneten sich diverse Anwendungsgebiete auch außerhalb des Bauwesens für diesen Werkstoff (Kap. 2.1.1, 2.1.2).

In [31, 32] wird über den Einsatz von Stahl- und Spannbeton im Maschinenbau berichtet. Dazu zählen allgemeine Maschinengrundteile (z. B. Maschinenrahmen und -gestelle), spezielle Maschinenteile (z. B. Pressenzylinder), formsteife Teile (z. B. Werkzeugmaschinenbetten), hochbelastete Konstruktionen (z. B. Rahmen für mechanische und hydraulische Pressen) und stoßbeanspruchte Teile (z. B. Hammerschabotten) [31, 32]. Aber auch zur Massefunktion (z. B. als

Belastungsmasse) oder zur Schwingungsdämpfung (z. B. Gestelle für Werkzeugmaschinen) kann Beton eingesetzt werden [31, 32].

Ein Bereich, in dem Beton sowohl in der Vergangenheit als auch in der Gegenwart Verwendung findet ist der Schiffsbau. Die Stahlbetonbauweise konnte sich aufgrund fehlender Anwendungsmöglichkeiten und aus mangelndem Interesse jedoch nicht gegenüber anderen Baustoffen durchsetzen [33]. Erst während und nach dem ersten und zweiten Weltkrieg wurde aufgrund der Stahlknappheit wieder auf Stahlbeton als Schiffswerkstoff (Abb. 1, links) zurückgegriffen [34, 35]. Jedoch konnte sich der Betonschiffsbau nicht behaupten, was mit dem hohen Eigengewicht der Betonschiffe im Vergleich zu den Stahl- oder Holzkonstruktionen begründet werden kann [33, 34].



Abb. 1: Links: Betonschiffswrack von Redentin in der Wismarer Bucht, Länge ~ 40,5 m (Foto: A. Micheel); rechts: Schwimmendes Kunstobjekt „Vineta“ im Störmthaler See bei Leipzig, Stahlbetonponton: 15 m x 20 m [36] (Foto: Clement Germany GmbH)

In den 1980er Jahren erfolgten in der DDR Entwicklungen von Betonschwimmkörpern bzw. -pontons für Krane, Bagger oder Rammen [34]. Heutzutage werden vorwiegend Betonschwimmkörper bzw. -pontons (z. B. nach [37]) beispielsweise für Stege hergestellt (vgl. Abb. 1, rechts). Aber auch größere schwimmende Konstruktionen aus Beton, wie die Floating Bridge in Dubai, eine schwimmende sechsspurige Autobrücke, sind heutzutage realisierbar [36]. Bei dieser wurden Einzelstahlbetonpontons (22 m x 5 m x 2,65 m) zu insgesamt vier großen schwimmenden Brückenelementen mit Maßen von 22 m x 130 m zusammengefügt [36]. Betonpontons weisen aufgrund ihres hohen Eigengewichtes gute wellendämpfende Eigenschaften auf und haben eine hohe Beständigkeit gegen Salzwasser und Temperaturschwankungen [38].

Untersuchungen von [39] ergaben, dass sich der Werkstoff Beton auch im Spezialtiefbau einsetzen lässt. Im Rahmen dessen wurden beispielsweise UHPC-Bohrspitzen (Abb. 2, links), UHPC-Rammpfähle, UHPC-Ankerplatten und UHPC-Biegeträger hergestellt. Feldversuche (Demonstratoren im 1:1-Maßstab) zeigten, dass eine Praxistauglichkeit des UHPCs für Bohrspitzen, Rammpfähle und Biegeträger gegeben ist und dass im Spezialtiefbau Stahlbauteile durch UHPC ersetzt werden können. [39]



Abb. 2: Links: UHPC-Bohrspitze [39]; rechts: Betongewicht an einem Unimog (Foto: M. Tenwinkel) [40]

Auch im Bereich von Gegengewichten hat sich Beton bei Bau- und Landmaschinen etabliert (Abb. 2, rechts und Abb. 3) und bietet eine günstige Alternative zu metallischen Erzeugnissen. Weiterhin kann Beton auch als Werkstoff für komplette Karosserieteile von Fahrzeugen, z. B. bei Schleppern, genutzt werden. Ein Beispiel hierfür sind Beton-Karosseriekomponenten (Abb. 3).



Abb. 3: Links: Rohguss - Beton-Karosseriekomponente für einen Schlepper; rechts: Schlepper mit Beton-Karosseriekomponente [41] (Fotos: M. Tenwinkel)

Die Karosseriekomponenten bzw. Gewichte der Tenwinkel GmbH & Co. KG werden aus Stahlfaserbeton hergestellt, bei dem, je nach gefordertem Gewicht, Magnetit als Zuschlag verwendet wird. Hierdurch ist die gezielte Herstellung von Dichten  $\rho_{\text{hdm}}$  zwischen  $2,4 \text{ g/cm}^3$  und  $4,8 \text{ g/cm}^3$  möglich. Wird eine höhere Masse benötigt, so ist diese in der Regel aus Grauguss zu fertigen. Durch die Verwendung von CEM III A 52,5 N/R und Stahlfasern erreicht der Schwerbeton Druckfestigkeiten von über  $85 \text{ N/mm}^2$ . [41]

Ein weiterer Bereich, in dem sich UHPC heutzutage etabliert hat, ist der Bau von Maschinenbetten und -gestellen (Abb. 4, links) [35, 42]. Schon während des ersten Weltkrieges wurde im Bereich der Werkzeugmaschinenengestelle versucht, Gusseisen aufgrund der Metallknappheit durch

zementgebundene Betone zu ersetzen [43, 44]. Hierbei handelte es sich beispielsweise um Führungsbahnen aus Zementbeton, die sich aufgrund des auftretenden hohen Verschleißes nicht durchsetzen konnten [43]. Erst 1939 wurde die Idee der aus zementgebundenem Beton hergestellten Maschinenbetten wieder aufgegriffen, da es während des zweiten Weltkriegs erneut zu einer Rohstoffverknappung kam [43]. Im Rahmen dessen wurde festgestellt, dass die aus Beton hergestellten Maschinengestelle eine höhere dynamische Steifigkeit aufweisen, als die aus Gusseisen gefertigten [43]. Jedoch konnte sich Zementbeton aufgrund der hohen Anforderungen (z. B. Dauerfestigkeit) an die Werkstoffe für Werkzeugmaschinen nicht gänzlich durchsetzen [43]. Durch die weiteren Entwicklungen und Innovationen in der Betontechnologie ist es heutzutage möglich, Betone, besonders UHPC, herzustellen, die den Ansprüchen an Maschinenbetten genügen und somit Grauguss und Stahlschweißkonstruktionen ersetzen können. So bringt der Einsatz von UHPC auch einige Vorteile mit sich, wie eine gute Temperaturbeständigkeit sowie die hohe Dämpfung im Vergleich zu Grauguss [35, 42].

Weiterhin wurden auch Untersuchungen zu UHPC-Druckgehäusen, z. B. zum Schutz vor extremen Umgebungsbedingungen der Tiefsee durchgeführt [45, 46]. Diese Gehäuse sollen beispielsweise die Hightech-Messinstrumente, Kamerasysteme oder die Stromversorgung von autonomen Unterwasserfahrzeugen vor den hohen Umgebungsdrücken bei Meeresbodenerkundungen schützen [46]. Bei den Untersuchungen kamen zwei unterschiedliche Betonmischungen zum Einsatz, die eine Druckfestigkeit von  $155 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $175 \text{ N/mm}^2$  aufwiesen. In [45, 46] konnte demonstriert werden, dass die Herstellung von funktionsfähigen UHPC-Druckgehäusen (Durchmesser:  $150 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 250 \text{ mm}$ ; Länge:  $370 \text{ mm} \leq l \leq 475 \text{ mm}$ ; Wandstärke:  $150 \text{ mm} \leq t \leq 250 \text{ mm}$ ) möglich ist und diese eine kostengünstige Alternative zu Druckgehäusen aus Edelstahl und Titan darstellen. Vor allem aufgrund seiner Gießfähigkeit scheint UHPC gut geeignet für Gehäuse mit großen Durchmessern.

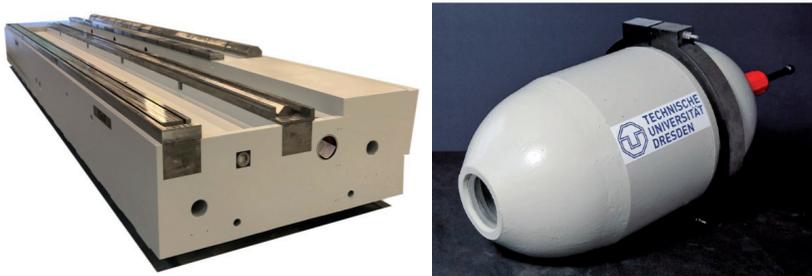


Abb. 4: Links: Maschinenbett für eine Walzenschleifmaschine GEORG ultragrind SG 2 der Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik [47] (Foto: durcrete GmbH); rechts: UHPC-Druckgehäuse mit Beschichtungssystem [46]

Neben den genannten Anwendungen findet hochfester Beton (i. d. R. Faserbeton, Druckfestigkeit:  $50 \text{ N/mm}^2$  -  $60 \text{ N/mm}^2$  [48]), neben Kunststoff, beispielsweise als Werkstoff für Abstandhalter Verwendung [49]. Beton-Abstandhalter bieten Kunststoff-Abstandhaltern gegenüber den Vorteil, dass diese feuerbeständig sind und sich bei Hitze und Kälte nicht verformen. Weiterhin können

Beton-Abstandhalter aufgrund besserer Verbundeigenschaften bei weißen Wannen Verwendung finden, um Umläufigkeiten zu vermeiden. Ebenso kann über die Betonrezeptur eine Anpassung an die Umgebungsbedingungen (z. B. durch Chlorid- oder Sulfatangriff) erfolgen, um möglichen Qualitätsanforderungen zu genügen [50]. In Abb. 5 (links) ist zu erkennen, dass durch Extrusion die Herstellung der unterschiedlichsten Formen von Abstandhaltern erfolgen kann. Weiterhin ermöglicht die Extrusion die wirtschaftliche Fertigung hoher Stückzahlen.



Abb. 5: Links: Sonderabstandhalter aus Faserbeton © MAX FRANK Gruppe [49]; rechts: Parabolrinne aus hochfestem Beton [51] (Foto: T. Brenner)

In [52] wurde die Substitution von metallischen Werkstoffen durch Beton am Beispiel eines Dieselmotors untersucht. Dorfmuüller [52] stellte fest, dass bedingt durch die Vergrößerung des Bauvolumens beim Einsatz von Beton für ein Bauelement umfangreiche Änderungen vorgenommen werden müssen. Dies inkludiert hohe Entwicklungskosten, die nicht durch die geringeren Materialkosten des Betons im Vergleich zum Metall ausgeglichen werden können. Nach [53] werden auch heute noch kritische Elemente (Lagerungen) bei Maschinenkörpern aus Mineralguss nach wie vor aus Stahl (Einlege Teile) gefertigt. Beispielsweise ist das Einlegen von Stahlteilen in den Beton notwendig, um den Anschluss an andere Bauelemente zu ermöglichen. Dies ist erforderlich, damit die im Maschinenbau geforderten Toleranzen und Genauigkeiten eingehalten werden können [35, 52]. Nachteil dieser Stahleinbauteile ist, dass diese einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilkosten haben und somit den Vorteil der geringeren Materialkosten des Betons zunichtemachen [35, 52]. Daher soll nach [52] bei Neukonstruktionen eine Optimierung hinsichtlich des minimalen Einsatzes von Einlege Teilen erfolgen.

Müller [51] entwickelte einen Großdemonstrator, um die Realisierbarkeit eines Sonnenkollektorelements, bzw. einer Parabolrinne aus hochfestem Beton nachzuweisen und zeigte, dass das i. d. R. verwendete Stahlfachwerk durch Beton ersetzt werden kann.

Beton wird gegenwärtig in vielen Bereichen außerhalb des Bauwesens eingesetzt und ersetzt dort in der Regel metallische Werkstoffe. Das Gebiet der Kontaktmechanik (Zahnräder, Gelenke, Rollen, Lager, etc.) wird hierbei in den meisten Fällen durch den Einsatz von Stahleinlagen umgangen. Neben den oben genannten Fertigungsvorteilen weist Beton auch ökologische Vorteile auf. So kann durch die Substitution von Stahl durch Beton (UHPC/RPC) die Nachhaltigkeit gesteigert werden [39]. Aber auch die gut dämpfende Eigenschaft sowie die thermische Trägheit verhelfen

dem Werkstoff, z. B. bei Maschinenbetten, zu Vorteilen gegenüber metallischen Werkstoffen. In Zukunft könnte die Substitution von Stahl durch UHPC wieder an Bedeutung gewinnen, da prognostiziert wird, dass die Stahlpreise bereits in den nächsten 30 Jahren stark ansteigen werden [54].

Ein weiterer Bereich, in dem Beton immer mehr Verwendung findet, ist der gestalterische bzw. künstlerische Bereich. So werden mittlerweile filigrane Fassaden aus UHPC gegossen oder sogar Schmuck aus Beton gefertigt.

Die Literaturrecherche ergab, dass es aufgrund der stetigen Weiterentwicklung in der Betontechnologie sinnvoll ist, eine Fertigung von Maschinenelementen wie Zahnrädern aus Beton weitergehend zu prüfen. Im nächsten Kapitel wird daher das Maschinenbauteil Zahnrad näher betrachtet.

### 2.1.4 Zahnräder

Das Zahnrad zählt zu den ältesten Maschinenelementen der Welt [55]. Im mathematischen bzw. technischen Zusammenhang dürfte es erstmals von Aristoteles, 330 v. Chr., erwähnt worden sein [56, 57]. Insgesamt ist jedoch nicht auszuschließen, dass Zahnräder in China oder Ägypten schon vor der Zeit Aristoteles eingesetzt wurden (z. B. für Wasserschöpfwerke) [56, 57]. Den ersten einwandfreien geschichtlichen Nachweis für die Existenz von Zahnrädern lieferte Philon aus Byzanz 230 v. Chr. durch die Beschreibung des Wasserhebwerks des Barbiers von Alexandria, Ktesibios [56, 57]. Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Zahnrades wird in [56–58] gegeben.

Zahnräder sind komplex beanspruchte Standardmaschinenelemente in mechanischen Konstruktionen wie in Getrieben oder Motoren. Bei der Drehmomentübertragung resultieren aus dem Gleit- und Wälzkontakt an der Zahnflanke hohe Pressungen und Schubspannungen. Weiterhin treten am Zahnfuß erhöhte Biegezugspannungen auf.

#### 2.1.4.1 Zahnradarten und Zahnradgetriebe

Nach DIN 868 [59] wird zwischen diversen Arten von Zahnrädern unterschieden, die sich den Getriebebauarten Wälz- und Schraubwälzgetrieben zuordnen lassen (Tab. 1).

Tab. 1: Zahnräder für Wälz- und Schraubwälzgetriebe entsprechend [59]

Wälzgetriebe	Schraubwälzgetriebe
Stirnrad (bzw. Zylinderrad)	Zylinderschnecke, Schneckenrad
Zahnstange	Hyperboloidrad
Kegelrad	Schraubrad, Schneckenschraubrad
Kegelplanrad	Hypoidrad (bzw. Kegelschraubrad)
Stirnplanrad (bzw. Kronenrad)	Globoidschnecke, Globoidschneckenrad

Zahnradgetriebe bestehen aus zwei oder mehreren sich im Eingriff befindenden Zahnrädern. Bei Wälzgetrieben liegen die Wellen, auf denen die Zahnräder befestigt sind, zueinander parallel oder

schneiden sich, bei Schraubwälzgetrieben kreuzen sich die Wellen [59–61]. In Tab. 2 sind die wichtigsten Getriebebauarten dargestellt.

Tab. 2: Übersicht über die wichtigsten Getriebebauarten (in Anlehnung an [60])

Getriebeart		Funktionsfläche	Lage der Achsen	Kontaktart	
Wälzgetriebe	Stirnrad- getriebe		Zylinder	parallel $\Sigma = 0$ $a > 0$	Linie
	Kegelrad- getriebe		Kegel	sich schneidend $\Sigma > 0$ (meist $\Sigma = 90^\circ$ ) $a = 0$	Linie
Schraubwälzgetriebe	Stirnrad- schraub- getriebe		Zylinder	sich kreuzend $\Sigma > 0$ $a > 0$	Punkt
	Kegelrad- schraub- getriebe		Kegel	sich kreuzend $\Sigma = 90^\circ$ $a > 0$	Punkt
Schraub- getriebe	Schnecken- getriebe		Zylinder und Globoid	sich kreuzend $\Sigma = 90^\circ$ $a > 0$	Linie
$a =$ Achsabstand, $\Sigma =$ Achsenwinkel					

Da das Stirnrad bzw. das Stirnradgetriebe die meist verwendete Bauart des Zahnrades darstellt, wird hierauf näher eingegangen.

#### 2.1.4.2 Flankenprofile von Stirnrädern

Die Zahnflanke ist der Teil der Zahnoberfläche, der sich zwischen der Kopfmantel- und Fußmantelfläche befindet (Abb. 6) [59].

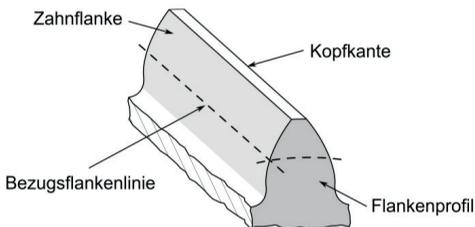


Abb. 6: Zahnflanke/Flankenprofil (in Anlehnung an [59, 60])

Als Flankenprofil ist jede beliebige Kurvenform denkbar, solange das Verzahnungsgesetz eingehalten wird [60]. Hierbei ist wichtig, dass sich möglichst einfache Eingriffslinien ergeben und sich die Flanken genau und einfach herstellen lassen [60]. Bei Stirnrädern sind nach [59] die folgenden Flankenprofile gebräuchlich:

- Evolventenverzahnung,
- Zykloidenverzahnung,
- Punktverzahnung bzw. Triebstockverzahnung und
- Kreisbogenverzahnung (für Sonderfällen, z. B. in der Uhrentechnik).

Im Maschinenbau hat sich hauptsächlich die Evolventenverzahnung (vgl. DIN ISO 21771 [62], DIN 3960 - Beiblatt 1 [63]) durchgesetzt, da diese präzise und ohne großen Aufwand hergestellt werden kann und zugleich unempfindlich gegenüber Achsstandabweichungen ist. Außerdem können unterschiedliche Zahnformen, Zähnezahlen und ein variierender Achsstand mit dem gleichen Werkzeug (durch die Profilverzahnung) hergestellt werden [64]. Weitere Informationen zu den verschiedenen Profilen bzw. Arten von Stirnradverzahnungen sind beispielsweise [60, 61, 64, 65] zu entnehmen.

### 2.1.4.3 Tragfähigkeit von geradverzahnten Stirnrädern

Generell erfahren Zahnräder mechanische, tribologische, thermische und chemische Beanspruchungen, die i. d. R. in Kombination auftreten. Der Zahnfuß wird meist mechanisch, aus der Normalkraftbelastung (Zahnkraft  $F$ ) resultierend, durch eine Biege-, Druck- und Schubspannung beansprucht (Abb. 7, links). An der Zahnflanke (Kontaktpunkt) überlagern sich tribologische (Reibung) und mechanische Beanspruchung (Hertz'sche Pressung) (Abb. 7, rechts). [55]

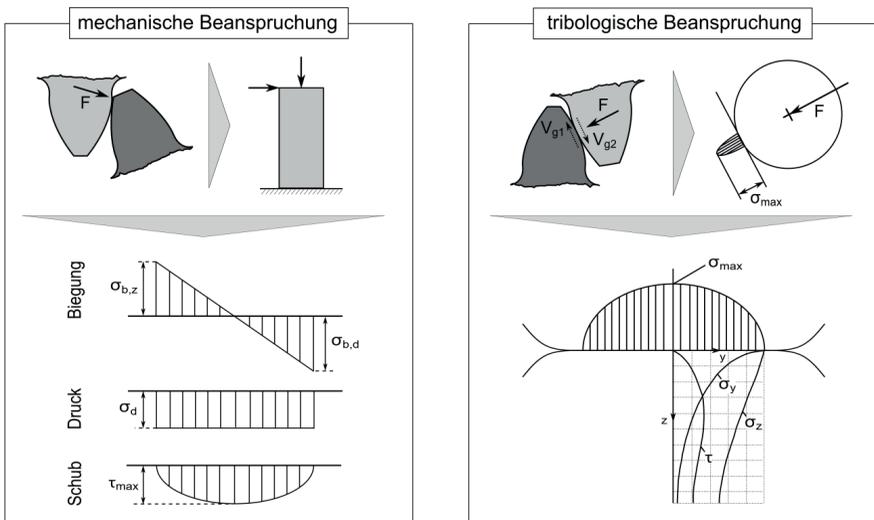


Abb. 7: Beanspruchung von Zahnrädern (in Anlehnung an [55])

Thermische und chemische Einwirkungen haben in den üblichen Betriebsbereichen nur einen geringen Einfluss auf die Zahnradtragfähigkeit. Es zeigt sich, dass die Tragfähigkeit von Zahnradern durch viele Faktoren beeinflusst wird, hierzu zählen neben den Werkstoffeigenschaften auch die Oberflächenbeschaffenheit des Zahnrades und die verwendeten Schmierstoffe. [55]

Bezüglich der Tragfähigkeit, bzw. der Beanspruchungsgrenze von Zahnradern können folgende Tragfähigkeiten unterschieden werden [61]:

- Zahnfußtragfähigkeit (Gefahr des Zahnbruchs),
- Zahnflankentragfähigkeit (Gefahr der Grübchenbildung bzw. Zahnflanken-Ermüdung),
- Fresstragfähigkeit (Gefahr von Kalt- oder Warmverschweißungen (vgl. [60])),
- Verschleißtragfähigkeit (hoher Gleitverschleiß).

Diese Tragfähigkeiten resultieren aus den bei Zahnradern auftretenden Schadensmöglichkeiten bzw. -arten. In DIN 3979 [66] wird zwischen den zwei Hauptschadensarten (Zahnflankenschäden und Zahnbruch) unterschieden. Den Zahnflankenschäden können Verschleiß, Korrosion, Ermüdungserscheinungen, aber auch Deformationen und Risse an den Zähnen zugeordnet werden. Beim Zahnbruch wird zwischen Gewaltbruch und Dauerbruch bzw. Ermüdungsbruch unterschieden.

Die geforderten Tragfähigkeitsnachweise von Stirnrädern sind in Deutschland nach DIN 3990 und international nach ISO 6336 geregelt. Hierbei wird zwischen der Grübchentragfähigkeit (Teil 2, [67, 68]), der Zahnfußtragfähigkeit (Teil 3, [69, 70]) und der Fresstragfähigkeit (Teil 4, [71–73]) unterschieden. Da DIN 3990 und ISO 6336 sich inhaltlich im Wesentlichen entsprechen, wird in dieser Arbeit der deutschen Norm (DIN 3990) gefolgt.

### Zahnfußtragfähigkeit

Die am stärksten beanspruchten Stellen eines Zahnrades sind der Zahnfuß (Biege- und Druckspannung) sowie die Berührstelle der Flanken (Walzenpressung) [61]. Die Zahnfußtragfähigkeit wird in der Regel durch den Bruch am Zahnfuß infolge der örtlich auftretenden Spannungen bestimmt, der zu einem direkten Versagen des Zahnrades führt und somit das Ende dessen Lebensdauer darstellt [60, 61].

Nach DIN 3990-3 [69] kann die Zahnfußbeanspruchung bzw. die Zahnfuß-Nennspannung  $\sigma_{F0}$  nach drei Methoden (A, B und C) ermittelt werden (vgl. Kapitel 7.2, Tab. 59). Zur Erläuterung des grundsätzlichen Tragverhaltens wird an dieser Stelle das analytische Vorgehen nach Methode C herangezogen. Nähere Informationen zu den anderen Verfahren erfolgen im Rahmen einer Zahnradberechnung in Kapitel 7.2.

Um die Zahnfußbeanspruchung bzw. die Zahnfuß-Nennspannung  $\sigma_{F0}$  im Punkt B bzw. B' (Abb. 8) für einen Einzelangriff (Profilüberdeckung = 1,0) bestimmen zu können, muss zunächst der Krafteingriffspunkt ermittelt werden. Dieser kann auf der sicheren Seite liegend (höhere resultierende Zahnfußspannung) mit einem Kraftangriff an der Zahnkopfkante angenommen (Punkt A, Abb. 8) werden [61, 69]. Die realen Belastungen können anschließend über die tatsächlich vorhandene Profilüberdeckung angenähert werden [61, 69].