

Direkt abgeformte Betonbauteile für Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau

Christoph Hahm

Christoph Hahm

**Direkt abgeformte Betonbauteile für
Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau**

Berichte aus dem INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK)

Herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung (Produkt- und Systementwicklung),

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletz (Maschinenelemente) und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik)

aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) an der TU
Ilmenau.

Band 40

Diese Reihe setzt die „Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente
und Konstruktion“ fort.

Direkt abgeformte Betonbauteile für Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau

Christoph Hahm



Universitätsverlag Ilmenau
2023

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 20. Oktober 2022

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachterin: Univ. -Prof. Dr.-Ing. Andrea Osburg
(Bauhaus-Universität Weimar)

3. Gutachter: Univ.-Prof. (i. R.) Dr.-Ing. Christian Weber
(Technische Universität Ilmenau)

Tag der Verteidigung: 12. Oktober 2023

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<https://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

ISSN 2191-8082

DOI [10.22032/dbt.59146](https://doi.org/10.22032/dbt.59146)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023000307](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023000307)



Dieses Werk - mit Ausnahme der anders gekennzeichneten Teile und des Umschlags - ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Geleitwort der Herausgeber

Die Konstruktion von Maschinen und Geräten sowie die zugehörigen Methoden und Werkzeuge sind seit den frühen 1950er Jahren ein profilbildender Schwerpunkt an der Technischen Universität Ilmenau und ihren Vorgängerinstitutionen. Es war daher ein nahe liegender Schritt, dass die drei konstruktiv orientierten Fachgebiete der Fakultät für Maschinenbau – Maschinenelemente, Feinwerktechnik/Precision Engineering, Konstruktionstechnik – im Mai 2008 das Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) neu gegründet haben. Das IMGK steht in der Tradition einer Kette ähnlicher Vorgängereinstitute, deren wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich durch sich über der Zeit ändernde Universitätsstrukturen bedingt war.

Zweck des Institutes ist es, die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Fachgebiete zu bündeln, um Forschung und Lehre zu verbessern und erzielte wissenschaftliche Ergebnisse gemeinsam in die Fachöffentlichkeit zu tragen.

Ein wesentliches Instrument hierzu ist die Schriftenreihe des Instituts für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Sie führt eine erfolgreiche Schriftenreihe des im Jahr 1991 gegründeten unmittelbaren Vorgängereinstitutes IMK (Institut für Maschinenelemente und Konstruktion) fort.

In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die am Institut entstandenen Dissertationen, daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen.

Der vorliegende Band 40 ist als Dissertation am Fachgebiet Feinwerktechnik unter der wissenschaftlichen Betreuung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska entstanden. Die Herausgeber wünschen sich reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn sie zum fruchtbaren Dialog in Wissenschaft und Praxis beitragen würde.

Ilmenau, im Dezember 2023

Univ. Prof. Dr. Ing. Stephan Husung (Product and Systems Engineering)

Univ. Prof. Dr. Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente)

Univ. Prof. Dr. Ing. René Theska (Feinwerktechnik)

Kurzfassung

Präzisionssysteme können durch die Verwendung von Werkstoffen mit gleichem Ausdehnungskoeffizient thermisch stabil realisiert werden. Häufig wird Naturhartgestein verwendet, da dieses sehr fein bearbeitet werden kann und langzeitstabil ist. Die Gestaltungsmöglichkeiten sind durch die kosten- und zeitaufwendige Bearbeitung eingeschränkt. Die Verfügbarkeit entsprechender Gesteinsvorkommen ist begrenzt und es müssen lange Lieferzeiten veranschlagt werden. Ein alternativer Ansatz, vergleichbare Eigenschaften zu erzielen, ist die Verwendung von Beton. Das urformende Herstellen erlaubt auch Bauteile mit komplexer Geometrie. Durch Abformen wird eine hohe Geometrietreue erreicht. Da Beton weltweit zu geringen Kosten verfügbar ist, amortisieren sich die Formkosten schon bei kleinen Losgrößen. Betonbauteile weisen eine zeit- und klimaabhängige Änderung der Bauteilgestalt auf. Durch gezielte Maßnahmen kann die Stabilisierungszeit verkürzt werden. In einer Langzeitstudie wurde eine mit Naturstein vergleichbare Formstabilität belegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsansatz entwickelt, um die Formänderung von komplexer Geometrie vorherzusagen. Beton kann auch für Teile mit hoher spezifischer Steifigkeit in beweglichen Maschinenstrukturen eingesetzt werden. Um eine mit Stahl- oder Aluminiumleichtbauteilen vergleichbare Zuverlässigkeit zu gewährleisten, muss die Betriebsfestigkeit verbessert werden. Der Einsatz von Armierung ist nicht zielführend, da diese zu inhomogenem thermischen Verhalten führt. Alternativ kann eine Verstärkung durch die Aufbringung von Beschichtungen mit erhöhter Zugfestigkeit erfolgen. Die Wirkung auf die Betriebsfestigkeit wurde analysiert und eine experimentelle Methode zur Bestimmung des Beschichtungseinflusses entwickelt. Abschließend erfolgt die Übertragung der Ergebnisse auf ein Verfahren zur Vorhersage der Betriebsfestigkeitssteigerung von beschichteten Betonbauteilen mit beliebiger Geometrie. Die Richtlinien sowie die technologischen Hinweise liefern die Grundlagen zur Konstruktion und Herstellung von Präzisionsbauteilen aus Beton. Weiterhin erlauben die Simulationsansätze die Gestaltoptimierung und Bestimmung einer verformungspräventiven Schalungsgeometrie, womit das Fertigteil annähernd der Sollgeometrie entspricht. Ferner wurden auch die Grundlagen für die Entwicklung von Bauteilen mit gesteigerter Betriebsfestigkeit gelegt.

Abstract

Machines and devices for precision applications can be realized thermally stable by using materials with the same coefficient of expansion. Natural stone is often used because it can be machined very precisely and is stable over the long term. The design possibilities are limited by the costly and time-consuming machining. The availability of corresponding natural stone sources is limited and long delivery times are estimated. An alternative approach to achieve comparable properties is the use of concrete. Primary shaping also allows components with complex geometry to be produced. High geometric accuracy is achieved through molding. Since concrete is available worldwide at low cost, the molding costs are amortized even for small lot sizes. Concrete parts show a time- and climate-dependent change of the part geometry. The stabilization time can be shortened by specific measures. In a long-term study, a geometrical stability comparable to that of natural stone was demonstrated. Within the scope of this work, a simulation approach was developed to predict the shape change of complex geometry. Concrete can also be used for parts with high specific stiffness in moving machine structures. To ensure reliability comparable to lightweight steel or aluminum components, the endurance strength has to be improved. The use of reinforcement is not appropriate because it leads to inhomogeneous thermal behavior. Alternatively, reinforcement can be achieved by applying coatings with increased tensile strength. The impact on the endurance strength was analyzed and an experimental method for determining the coating influence was developed. Finally, the results are transferred to a method for predicting the endurance strength improvement of coated concrete structures of arbitrary geometry. The guidelines as well as the technological references provide the fundamentals for the design and manufacture of precision concrete components. Furthermore, the simulation approaches allow the shape optimization and determination of a deformation-preventive mold geometry, whereby the ready to use part approximately corresponds to the specified geometry. Furthermore, the foundations for the development of components with increased endurance strength were also provided.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Anforderungen an Bauteile in der Präzisionstechnik	2
1.2 Hydraulisch gebundener Beton für Präzisionsbauteile	3
1.3 Präzisionssysteme aus hydraulisch gebundenem Beton	6
2 Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1 Werkstoffe	9
2.1.1 Naturhartgestein	9
2.1.2 Reaktionsharzbeton	12
2.1.3 Hydraulisch gebundener Beton	15
2.2 Bauteile mit planaren Präzisionsflächen	20
2.2.1 Gestaltabweichungen und Kennwerte	21
2.2.2 Erzeugung von Präzisionsflächen	24
2.3 Leichtbau	27
2.3.1 Gewichtsreduktion	28
2.3.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Betriebsfestigkeit	29
2.3.3 Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtung	33
3 Ziele der Arbeit	37
4 Werkstoff- und Verfahrensentwicklung	41
4.1 Grundlagen für die Werkstoffentwicklung	41
4.1.1 Betonentwicklung	41
4.1.2 Beschichtungsentwicklung	46
4.2 Grundlagen zur Verfahrensentwicklung	51
4.2.1 Herstellungstechnologie für Präzisionsbauteile	51
4.2.2 Erzeugung planarer Bauteiloberflächen	52
4.3 Probekörper	53
4.3.1 Probekörper zur Qualifizierung von Gestaltabweichungen	53
4.3.2 Probekörper für die Beschichtungsqualifizierung	54
4.3.3 Probengeometrie zur Validierung der Berechnungsansätze	56

5	Bauteile mit urgeformten Präzisionsflächen	59
5.1	Definition der Messaufgaben und -verfahren	59
5.2	Ergebnisse der messtechnischen Qualifizierung	62
5.2.1	Rauheit und Welligkeit	62
5.2.2	Makroskopische Gestaltänderung	65
5.2.3	Langzeitstabilität	67
5.3	Verringerung der Form- und Lageabweichungen	72
5.3.1	Modellbildung zur Beschreibung der Gestaltänderung	72
5.3.2	Simulationsmodell und Einstellung der Randbedingungen	76
5.3.3	Maßnahmen zur Verringerung von Gestaltabweichungen	78
5.3.4	Schalungssysteme	79
5.4	Zusammenfassung und Gestaltungsrichtlinien	81
6	Bauteile mit gesteigerter Betriebsfestigkeit	83
6.1	Qualifizierung des Betriebsfestigkeitssteigerungspotenzials	83
6.1.1	Beeinflussung der Betriebsfestigkeit durch Beschichtung	84
6.1.2	Mathematische Modellbildung für Primitivgeometrie	85
6.1.3	Versuchsgrundlagen für die Qualifizierung von Beschichtungen	88
6.1.4	Simulationsmodell für Komplexgeometrie	89
6.2	Experimentelle Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit	91
6.2.1	Versuche zur Beschichtungsqualifizierung	91
6.2.2	Mechanische Prüfung beschichteter Betonproben	95
6.2.3	Ermittlung der Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichten	97
6.2.4	Übertragung des Rechenmodells auf beliebige Geometrie	97
6.3	Zusammenfassung – Leichtbau	99
6.3.1	Auswirkungen von Sol-Gel-Systemen auf Betonleichtbauteile	99
6.3.2	Empfehlungen zur Herstellung von Betonleichtbauteilen	100
7	Technologievalidierung	101
7.1	Konzepte für Bearbeitungsmaschinen und Messgeräte	102
7.2	Wirtschaftlichkeit und Koppelstellengestaltung	103
7.3	Versuchstechnische Verfahren und Messtechnik	104
7.4	Validierung der Simulationsverfahren	106
7.4.1	Simulation der Gestaltänderung	106
7.4.2	Simulation der Betriebsfestigkeitssteigerung	109
8	Zusammenfassung	115
8.1	Erkenntnisse	115
8.2	Ausblick	117

Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	127
A Anhang	137
A.1 Auszug DAfStb Richtlinie zur Instandhaltung [Rau18]	137
A.2 Verfahrensrichtlinien zum Abformen von Führungsflächen	138
A.3 Lösung zu 6.1.2 – Steifigkeiten beschichteter Quader	139
A.4 Ermittlung der Biegesteifigkeit im 3-Punkt-Biegeversuch	141
A.5 Messfehler bei den Steifigkeitsmessungen nach GUM	142
A.6 Biegesteifigkeitsmessungen der Charge Nr. III	143
A.7 Geradheitsmessungen am Demonstrator	144

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
AKF	Autokollimationsfernrohr
Al	Aluminium
APDL	ANSYS® Parametric Design Language
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlefaser verstärkter Kunststoff
C ³	Carbon Concrete Composite e. V.
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
EP	Epoxidharz
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HIP	heiß isostatisch gepresst
HM	High Modulus (hochsteife Kohlefasern für CFK)
HPSCC	high performance self compacting concrete (hochfester selbstverdichtender Beton)
HPSiC	heiß gepresstes Siliciumcarbid
HT	High Tenacity (hochfeste Kohlefasern für CFK)
KMG	Koordinatenmessgerät
NHG	Naturhartgestein
PUR	Polyurethan
OS	Oberflächenschutzsysteme des DAfStb

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
SCC	self compacting concrete (selbstverdichtender Beton)
SiC	Siliciumcarbid
SSiC	drucklos gesintertes Siliciumcarbid
TIR	total indicator reading
UHPC	ultra high performance concrete (ultrahochfester Beton)

Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
A	Abstand der sphärischen Backen (Zugprüfung)	mm
$ALPX$	Materialausdehnungskoeffizient in ANSYS®	
B	Breite	mm
c	Wärmekapazität	$\text{kJ} (\text{kg K})^{-1}$
C_{Biegung}	Biegesteifigkeit	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
C_i	Steifigkeit ($i = 0 \rightarrow$ unbeschichtet $i = 1 \rightarrow$ beschichtet)	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
C_{Index}	Steifigkeit mit Bezeichnung des Beschichtungszustandes	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
C_{Masch}	Maschinensteifigkeit	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
C_{spez}	spezifische Steifigkeit bezüglich der Dichte	$\text{kNm} (\text{kg})^{-1}$
C_{Zug}	Zugsteifigkeit	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
C_{Biegung}	Biegesteifigkeit	$\text{N} (\mu\text{m})^{-1}$
E	Elastizitätsmodul	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_0	Elastizitätsmodul des Substratwerkstoffes	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_1	Elastizitätsmodul an der Beschichtungsoberfläche	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_2	Elastizitätsmodul an der Substratoberfläche	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_A	Elastizitätsmodulverteilung im Substrat	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_B	Elastizitätsmodulverteilung in der Infiltrationszone	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$
E_C	Elastizitätsmodulverteilung in der Beschichtung	$\text{N} (\text{mm})^{-2}$

<i>Formelzeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
$E_{I..EVII}$	Elastizitätsmodulverteilung in den Intervallen I bis VII	N (mm)^{-2}
E_{effektiv}	effektiver Elastizitätsmodul	N (mm)^{-2}
E_{subst}	substituierter Elastizitätsmodul für Schalenelemente	N (mm)^{-2}
f_{ck}	Druckfestigkeit	N (mm)^{-2}
f_{ctm}	Zugfestigkeit	N (mm)^{-2}
f_{N}	Nennfestigkeit	N (mm)^{-2}
f_{R}	Rechenfestigkeit	N (mm)^{-2}
F	Kraft allgemein	N
F_i	Prüfkraft ($i = 0 \rightarrow$ unbeschichtet $i = 1 \rightarrow$ beschichtet)	N
g	Gravitationskonstante	m (s)^{-2}
H	Höhe	mm
I_z	äquatoriales Flächenträgheitsmoment	mm^4
i	Anzahl von Beschichtungsvarianten für eine Charge	
k	Wöhlerkoeffizient	
L	Länge (Prüflänge analysierte Länge des Prüfkörpers)	mm
l	Bezugslänge	mm
m	Masse	kg
n	Probenanzahl allgemein	
n_{Charge}	Probenanzahl	
n_i	minimale Probenanzahl zur statistischen Auswertung	
n_{Index}	Probenanzahl mit Bezeichnung des Bezuges	
$REFT$	Referenztemperatur in ANSYS®	
RHT	Eindringtiefe der Beschichtung	mm
R_a	arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_e	Streckgrenze	Nm (kg)^{-1}
R_{spez}	spezifische Festigkeit bezüglich der Dichte	Nm (kg)^{-1}

<i>Formelzeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
R_z	gemittelte Rautiefe	μm
s	Weg (Verschiebung allgemein)	μm
T	Schichtstärke (Beschichtungscharakterisierung)	μm
$T(x,y,z)$	lokales Potenzial (Gestaltänderungssimulation)	
T_{subst}	substituierte Wandstärke für Schalenelemente	μm
T_{BEZUG}	BezugsPotential	
T_{INT}	Initialtemperatur für die Temperaturfeldanalyse in APDL	
T_{MAX}	maximales Potenzial	
T_{MIN}	minimales Potenzial	
U_{CM}	Unsicherheit bei der Ermittlung der Maschinensteifigkeit	$\text{N}(\mu\text{m})^{-1}$
w/z	Wasser-Zement-Wert (Massenverhältnis Wasser : Zement)	
x	Längskordinate	mm
y	Höhenkordinate	mm
z	laterale Kordinate	mm
X	Übersetzungsverhältnis (Verschiebungsrelation)	
X_{Crel}	relatives Steifigkeitsverhältnis	
X_{C}	Steifigkeitserhöhung	%
X_{N}	Betriebsfestigkeitssteigerung	%
$X_{\sigma\text{rel}}$	relatives Spannungsverhältnis	
α	thermischer Ausdehnungskoeffizient	10^{-6}K^{-1}
α_{ERSATZ}	Ersatzdehnungskoeffizient	
γ	Spiegelverkipfung (Nickwinkel)	"
δ	Durchbiegung	μm
ε	mechanische Dehnung	
ΔH	Ebenheit	μm
ΔH_{MAX}	maximale laterale Abweichung zur Referenz	μm

<i>Formelzeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
ΔL	axiale Längenänderung	μm
$\Delta l/l$	relative Längenänderung	
Δm	Messunsicherheit bei der Massebestimmung	kg
Δs	Messunsicherheit bei der Längenmessung	μm
Δx_{MAX}	schwindungsäquivalente Axialverschiebung	μm
λ	Wärmeleitfähigkeit	W (m K)^{-1}
ν	Poissonzahl	
ρ	Dichte	kg (m)^{-3}
ρ_{effektiv}	makroskopisch repräsentative Dichte	kg (m)^{-3}
σ	Standardabweichung allgemein	μm
σ_s	Standardabweichung bei der Wegmessung	μm
σ_z	Spannung Zug/Druck	N (mm)^{-2}
σ_{EQV}	<i>Mises</i> -Vergleichsspannung	N (mm)^{-2}

1 Einleitung

Die stetige Verbesserung der räumlichen Auflösung und Reproduzierbarkeit von Herstellungs- und Messprozessen in immer größer ausgedehnten Arbeitsräumen eröffnet Potenziale zur effektiven Herstellung von Produkten mit höchsten Anforderungen an die Gestaltgeometrie. Davon ausgehend, steigen die Anforderungen an Präzisionsmaschinen und -geräte [Don06], [Bar93]. Ein Maschinensystem wird durch eine bestimmte Anzahl definiert gekoppelter Bauteile gebildet. Grundsätzlich muss zwischen ruhenden und bewegten Bauteilen unterschieden werden [WB06]. In Tabelle 1.1 sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von ausgewählten Konstruktionswerkstoffen aufgelistet.

Tabelle 1.1: Bereiche für mechanische und thermische Eigenschaften ausgewählter Konstruktionswerkstoffe [Oel18], [Tho18], [Fis18], [Rei21], [Rei22], [Ste03], [TSS07]

<i>Material</i>	<i>mechanische Eigenschaften</i>				<i>therm. Eigenschaften</i>		
	Druckfestigkeit	Biegefestigkeit	E-Modul	Dichte	Ausdehnungskoeff.	spez. Wärmekap.	Wärmeleitfähigkeit
Einheit	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	g/cm ³	µm/mK	kJ/kgK	W/mK
Stahl ¹	260..850	300..600	209..211	7,85	11..13	0,45..0,50	46..58
Gusseisen (GGG)	720..1150	290	88..185	7,2..7,4	9,5..10,5	0,46..0,63	47..50
Al-Legierungen ¹	90..530	120..500	68..78	2,6..2,8	21,0..23,0	0,88..0,92	75..235
Naturhartgestein	250..360	10..35	60..95	2,8..3,0	5,0..7,5	0,8..1,0	1,7..3,5
Standardbeton ²	55..250	2,6..17,9	30..50	2,0..2,8	6..14	0,9..1,0	1,7..2,1
Polymerbeton ³	100..180	25..30	30..45	2,3..2,4	15..19	0,7..0,9	1,0..2,9
SCC (Spezialbeton) ⁴	110	7,7..8,1	45	2,52	9,7..10,6	1,0	1,9..2,2
Al ₂ O ₃ -Keramik ⁵	2500..4000	310..630	350..410	3,75..3,96	6,0..8,3	0,9	25,0..35,6
SiC-Keramik ⁶	2000..3500	420..650	360..450	3,07..3,21	4,5..5,0	0,6..1,0	43..145
Kohlefaserverbund ⁷	—	340..1300	20..91	1,76..1,96	6,8..30,0	0,71/1,85 ⁸	≈ 0,52

¹Werte unter der Annahme Zugfestigkeit ≈ Druckfestigkeit für metallische Werkstoffe

²Werte für hochfesten Beton ab Festigkeitsklasse C55/67 nach *DIN 1045-2*

³mechanische Kennwerte gelten bei einer Bauteiltemperatur von 20 °C ±4 K

⁴Self Compacting Concrete (SCC I+II der Bauhausuniversität Weimar und der TU Ilmenau)

⁵Minimalwerte für 96% Reinheit | Maximalwerte für 99,8% Reinheit

⁶Minimalwerte für SSiC (drucklos gesintert) | Maximalwerte für HPSiC (heiß gepresst)

⁷C-Fasereigenschaften von HT..HM (E-Modul längs und Wärmedehnung quer zur Faser)

⁸Wärmekapazität C-Faser/Epoxidharz Gesamtkapazität variiert mit dem Füllgrad

1.1 Anforderungen an Bauteile in der Präzisionstechnik

Jedes Bauteil muss sehr unterschiedlichen Anforderungen resultierend aus Herstellung und Gebrauch genügen. Um dem gerecht zu werden, kommen verschiedene Werkstoffe nach dem Prinzip Funktionswerkstoff an Funktionsstelle zum Einsatz. Die grundsätzlichen Anforderungen an Werkstoffe für die Verwendung in der Präzisionstechnik sind:

- eine hohe erreichbare Formgenauigkeit,
- eine geringe erreichbare Oberflächenrauheit,
- eine hohe mechanische Verschleißfestigkeit,
- eine hohe Langzeitformstabilität,
- eine hohe Steifigkeit,
- eine hohe Materialeigendämpfung und
- ein beherrschbares thermisches Verhalten

Die Steigerung der räumlichen Auflösung und Reproduzierbarkeit erfordert die temperatur- und langzeitstabile Einhaltung immer kleinerer Toleranzen der Gestalt und Lage präzisionsbestimmender Bauteile. Zugleich sind die übergeordneten Forderungen nach minimalen Herstellungskosten und ressourcenschonendem Einsatz von Werkstoffen zu erfüllen.

Ruhende Bauteile

Ruhende Bauteile sind Gestelle und Gestellbauteile, die die tragenden und stützenden Grundkörper von Maschinensystemen bilden. Über funktionsgerechte Koppelstellen werden alle weiteren Bauteile mit dem Gestell verbunden. Die Verbindung kann starr oder aber mit einem definierten Freiheitsgrad erfolgen. In der Regel sind es Lager oder Führungen. Größe und Gestalt sind abhängig von der Maschinenspezifikation und den Prozessanforderungen [WB06], [Nic85]. Daher werden in der Präzisionstechnik die folgenden spezifischen Forderungen an ruhende Bauteile gestellt:

- eine große Masse und Trägheit zur Tilgung von Schwingungen bei dynamischen Beanspruchungen infolge von Prozesskräften und
- eine große Wärmespeicherfähigkeit für eine hohe thermische Trägheit gegenüber kurzweiligen Temperaturschwankungen bei der Aufnahme von Wärmeenergie

Bewegte Bauteile

Bewegte Maschinenbauteile weisen eine hohe Anzahl an Koppelstellen auf und werden konventionell als Schweiß- oder Gusskonstruktionen auf Basis von Eisen- oder Nichteisenlegierungen in Leichtbauweise ausgeführt. Für spezielle Anwendungsbereiche finden auch Verbundwerkstoffe oder Keramiken Einsatz. Jedoch sind hierbei die Möglichkeiten zur Einbringung von Koppelstellen und die Gestaltungsfreiheit gegenüber metallischen Werkstoffen stark reduziert. Aufgrund der restriktiven Forderungen des Leichtbaus ergeben sich für bewegte Bauteile in der Präzisionstechnik die folgenden wesentlichen Forderungen:

- eine geringe Masse und Trägheit für eine hohe erreichbare Dynamik bei gleichzeitig minimalem Energieeintrag durch die notwendigen Antriebsbaugruppen
- eine maximale Steifigkeit für minimale Verformung unter mechanischer Beanspruchung im Betrieb und
- eine geringe Wärmespeicherfähigkeit zum schnellen Erreichen eines stationären Zustandes bei der Aufnahme von Wärmeenergie

1.2 Hydraulisch gebundener Beton für Präzisionsbauteile

Für Gestellbauteile wird bevorzugt *Naturhartgestein* als Werkstoff verwendet [Rei21]. Funktionsgeometrie mit besonders hohen Anforderungen an Formtreue und Rauheit der Oberflächen, beispielsweise für die Führung von aerostatischen Elementen, kann durch subtraktive Verfahren erzeugt und direkt in die Bauteile ohne die Verwendung von zusätzlichen Elementen integriert werden. Die hohe Eigendämpfung sowie die Möglichkeit, große monolithische Bauteile mit großer Masse herstellen zu können, ergeben günstige Schwingungseigenschaften und stellen die Voraussetzungen zum Aufbau von Positioniersystemen mit hoher Genauigkeit dar [Tho18].

Die Kosten für solche Bauteile werden stückzahlunabhängig durch den hohen maschinellen und manuellen Bearbeitungsanteil des Schleifens und des Läppens bestimmt. Für die Erfüllung der Anforderungen bezüglich Gleichmäßigkeit, Rissfreiheit, Dichte, Größe und Bearbeitbarkeit können nur Naturhartgesteine aus wenigen Abbaubetrieben verwendet werden [Rei21]. Die geopolitisch unsichere Lage der Vorkommen sowie die Witterungsabhängigkeit von Abbau und Transport führen, neben der aufwendigen Bearbeitung, zu Lieferzeiten bis hin zu einem Jahr. Um den mit Naturmaterialien unvermeidlich verbundenen Risiken begegnen zu können und die zeitliche Verfügbarkeit zu verbessern, ist eine kostenintensive Zwischenlagerung von Rohsteinblöcken in unmittelbarer Reichweite der Hersteller notwendig.

Die Herstellung von Gestellbauteilen aus **Reaktionsharzbeton** (Mineralguss) in einem zweistufigen Prozess ist ein alternativer Ansatz. Hiermit können zu Naturhartgestein vergleichbare Festigkeiten bei Raumtemperatur erreicht werden. Durch die urformende Herstellungstechnologie wird eine größere Formenvielfalt ermöglicht. Die einzelnen Komponenten des Verbundwerkstoffes sind zudem sehr häufig direkt regional verfügbar. Bei der Herstellung wird zunächst in einem Gießverfahren die Bauteilrohgeometrie mit einem Gemisch aus chemisch vernetzenden Kunststoffen und der Gesteinskörnung geschaffen. Die Funktionsflächen werden durch mechanische Feinbearbeitung (Schleifen/Läppen) generiert, wobei der mechanische Abtrag als Sondermüll zu entsorgen ist.

Bei geringen Anforderungen an die Bauteilgeometrie können durch Urformverfahren auch Bauteile mit direkt abgeformten Funktionsflächen entstehen. Die erreichbaren Toleranzen sind allerdings mit einer **Ebenheit** $\Delta H \geq 2 \mu\text{m}$ auf 1 dm^2 bzw. $\geq 20 \mu\text{m}$ auf 1 m^2 sowie einem **arithmetischen Mittenrauwert** $R_a \geq 0,5 \mu\text{m}$ begrenzt [Sah87]. Durch eine Erhöhung der geometrischen Anforderungen an die Gießform kann der Aufwand für die Nachbearbeitungen drastisch verringert bzw. gänzlich vermieden werden. Dies führt zu einer Reduzierung der stückzahlabhängigen Kosten gegenüber Bauteilen aus Naturhartgestein. Mit hohem finanziellen Aufwand für die Fertigung der Gießformen und hohen technologischen Prozessanforderungen sind Form- und Lageabweichungen von $\leq 5 \mu\text{m}$ auf einer Basislänge von 1 m möglich. Die nicht vorherbestimmbaren geometrischen Veränderungen der Reaktionsharzbetonbauteile wegen der zeitlich und temperaturabhängig veränderlichen physikalischen Eigenschaften sind jedoch problematisch.

Durch Verwendung von **hydraulisch gebundenem Beton** kann die Temperaturabhängigkeit der Steifigkeit minimiert werden. Die stetige Weiterentwicklung von Betonmischungen erbrachte in den vergangenen Jahren zu Naturhartgestein vergleichbare Werkstoffeigenschaften [Rei22]. Die Herstellung erfolgt im Vergleich zum Reaktionsharzbeton bei uneingeschränkter Gestaltungsfreiheit unter erheblich vermindertem Aufwand. Durch die Verwendung von Betonmischungen mit reduziertem Zementgehalt kann zusätzlich die Umweltbilanz verbessert werden [Lud18].

Unter Einbeziehung aller Einflüsse kann hydraulisch gebundener Beton als ressourcenschonender und kostengünstiger Alternativwerkstoff angesehen werden, welcher bereits für Grundbetten im Maschinen- und Gerätebau Anwendung findet [Bun12]. Durch innovative **selbstverdichtende Betone** (SCC $\hat{=}$ Self Compacting Concrete) wurde die Entwicklung der Technologie zur urformenden Herstellung von Bauteilen mit planaren Präzisionsflächen ermöglicht. Diese selbstverdichtenden Betone können ohne zusätzliche Verdichtungsenergie in Schalungen eingebracht werden, wodurch die Relativlage zwischen Schalung und Einbauteilen sowie Verbundelementen nicht gefährdet wird. Hydraulisch gebundener sowie selbstverdichtender Beton wird im Rahmen dieser Arbeit als **Beton** bezeichnet.

Die Eignung von direkt abgeformten Bauteilen auf Basis von Beton als Alternativwerkstoff für Präzisionsbauteile stehen im Fokus dieser Arbeit. Das Kriech- und Langzeitverhalten von Beton wurde im Bauingenieurwesen bereits umfassend untersucht [Gra02]. Die Ergebnisse sind jedoch weder auf die in der Präzisionstechnik üblichen Umgebungsbedingungen noch auf deren Anforderungen übertragbar. Die Reduzierung der eigengewichtsbedingten Verformungen im Hinblick auf die geforderte Langzeitstabilität wurde untersucht und die Eignung von verschiedenen Betonen bezüglich der im Präzisionsmaschinenbau geforderten physikalischen Eigenschaften geprüft.

Durch anforderungsgerechte Projektierung von Betonmischungen mit hohem E-Modul besteht die Möglichkeit zur Realisierung von Bauteilen mit hoher Steifigkeit. In herkömmlichen Anwendungsbereichen des Werkstoffs Beton besteht häufig nicht dieser Anspruch, um die Spannungen in Bauwerken in Folge von Setzerscheinungen auf einem geringen Niveau zu halten. Als Alternative zu spanend hergestellten Leichtbauteilen auf der Basis von metallischen Werkstoffen mit bis zu 90% Spanvolumen und mechanisch nachbearbeiteten Funktionsflächen ist die Herstellung von multifunktionalen Fertiglleichtbauteilen aus Beton durch Urform-, Abform- und Einbetttechniken möglich. In diesem Zusammenhang wurden erstmals Präzisionsbauteile aus Beton in Leichtbauweise untersucht, welche:

- aus dünnwandigen Strukturen (ähnlich denen von Metallbauteilen) bestehen,
- mit integrierten, abgeformten Funktionsflächen versehen sind und
- sich durch eine langzeitstabile Formtreue auszeichnen.

Eine wesentliche Größe zur Bewertung der Leichtbaueignung eines Werkstoffes ist die spezifische Steifigkeit, welche aus dem Verhältnis E-Modul zu Dichte gebildet wird [DL09], [Hai06]. Die spezifische Steifigkeit der entwickelten Betonsorten liegt sehr nah an der von metallischen Werkstoffen. Mit steifigkeitserhöhenden Maßnahmen werden Betonleichtbauteile für hochdynamische Bewegungen realisierbar, welche zugleich die für die Präzisionstechnik notwendigen mechanischen sowie thermischen Eigenschaften besitzen.

Es wurden die Grundlagen für den Einsatz von Beton als Basismaterial für Bauteile in hochintegrierten, dynamisch bewegten Präzisionssystemen zusammengestellt. Hierfür wurden Betone, Verfahren und Technologien zur urformenden Herstellung entwickelt sowie Konstruktionsgrundlagen für Leichtbauteile mit hoher spezifischer Steifigkeit abgeleitet. Die entwickelte Technologie ermöglicht die Herstellung von multifunktionalen Präzisionsleichtbauteilen in den verschiedensten Größen (Dimensionen von <1 m bis hin zu mehreren Metern) für einen vielfältigen Einsatz.

Für die Entwicklung von Formen und Formteilen wurden Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien zur werkstoff-, beanspruchungs- und fertigungsgerechten Konstruktion von Leichtbauteilen auf Basis von Beton abgeleitet. Zusätzlich wurden technologische Verfahren für die Herstellung von dünnwandigen Präzisionsbetonbauteilen mit gesteigerter Betriebsfestigkeit vorgestellt. Die notwendigen wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die Anwendung dieser Technologie werden in dieser Arbeit systematisch dargelegt.

1.3 Präzisionssysteme aus hydraulisch gebundenem Beton

Im Rahmen dieser Arbeit werden Systeme als **Präzisionssysteme** verstanden, wenn das Verhältnis der erreichbaren Mess- oder Positionierreproduzierbarkeit zur charakteristischen Abmessung ≤ 100 ppm beträgt (notwendige Bedingung) und die Wiederholbarkeit der Positionierung im Raum lediglich durch die Auflösung des Antriebssystems begrenzt wird (hinreichende Bedingung). Die Feststellung der Einsatzfähigkeit von Präzisionsgeräten und -maschinen auf Basis von Beton steht im Fokus dieser Arbeit. Langzeiterfahrungen aus dem Verformungsverhalten von Betonkörpern als Maschinenaufstellbasis für Messgeräte der Koordinatenmesstechnik zeigen exemplarisch ein hochstabiles Langzeitverhalten. Diese waren Anlass für den begründeten Optimismus hinsichtlich der erreichbaren Formstabilität [p. G. René Theska].

Die innerhalb dieser Arbeit ermittelten Kenngrößen zum Abform-, Schwind- und Langzeitverhalten von Präzisionsbauteilen dienen als Eingangsgrößen für Simulationstools zur Vorhersage der zu erwartenden Gestaltänderung. Die Berechnungsergebnisse ermöglichen eine gezielte Beeinflussung der Schalungsgeometrie. Somit wird ein neuer Ansatz aufgezeigt, Funktionsflächen mit einer *relativen Formabweichung* $\Delta/l \approx 10$ ppm und einer *gemittelten Rautiefe* $R_z \leq 2,5$ μm , bei komplexer Geometrie der Bauteile, herzustellen. Werte in dieser Größenordnung waren bisher nur für einfache Raumprimitive realisierbar [p. G. Egbert Reitz].

Durch breit gefächerte Variationsmöglichkeiten bei der Zusammenstellung der Ausgangsstoffe können Betone mit ähnlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften für verschiedene Wandstärken projiziert werden [Bau18a], [Thi08]. Hierdurch ist Beton hervorragend geeignet, die Anforderungen an massive Stützstrukturen sowie an filigrane Tragstrukturen bei sehr guter Materialhomogenität zu erfüllen [Kah+16]. Anwendungsspezifische Bauteilbeschichtungen und Beschichtungsverfahren führen zu einer zusätzlichen Steigerung der Steifigkeit und zur Beseitigung von Oberflächenfehlern. Hierdurch können die Betonbauteile auch hinsichtlich ihrer Betriebsfestigkeit verbessert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sind Formensysteme und Technologien für die hochreproduzierbare Herstellung von Prüfkörpern mit engen geometrischen Toleranzen und definierten Materialparametern entwickelt worden. Für den statistisch belegbaren Nachweis der Betriebsfestigkeitssteigerung wurden Prüfverfahren und -maschinen konzipiert bzw. modifiziert. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen wurden genutzt, um Simulationsmethoden zur Vorhersage der Betriebsfestigkeitssteigerung durch die Beschichtung von Bauteilen zu ermöglichen. Die Auswirkungen von versuchstechnisch analysierten Beschichtungen können folglich schon bei der Gestaltsynthese beliebiger Bauteile abgeschätzt werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Werkstoffe

Im Maschinenbau sind die Werkstoffe Stahl und Gusseisen sehr weit verbreitet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird Stahl als Referenzwerkstoff zum Vergleich der Eigenschaften herangezogen. Für Präzisionsanwendungen werden metallische Werkstoffe aufgrund der Gefahr von verbleibenden inneren Spannungen sowie von Korrosion an ungeschützten Oberflächen häufig durch mineralische Werkstoffe ersetzt. Faserverbundbauteile und keramische Bauteile werden für Strukturen eingesetzt, bei denen extreme Festigkeit bzw. Steifigkeit und geringes Gewicht gefordert sind. Die Bauteilkosten spielen hierbei eine untergeordnete Rolle, weil diese Werkstoffe an den entsprechenden Funktionsstellen nach dem heutigen Stand der Technik nicht durch Werkstoffe aus anderen Werkstoffgruppen substituiert werden können [Mos13].

Die Ausführungen in den folgenden Abschnitten werden deshalb auf die wichtigsten Eigenschaften und Anwendungsfelder der Werkstoffe Naturhartgestein, Mineralguss und Beton im modernen Präzisionsmaschinenbau beschränkt. Hinsichtlich der wichtigsten physikalischen Eigenschaften sowie der Be- bzw. Verarbeitbarkeit werden die Vor- und Nachteile der relevanten Werkstoffe zusammengefasst. Zusätzlich werden hierbei auch relative Bauteilkosten und Lieferzeiten gegenübergestellt.

2.1.1 Naturhartgestein

Als Grundlage für Mess- und Bearbeitungssysteme mit hohen Genauigkeitsforderungen sind für die Bauteile Form- und Lageabweichungen im Bereich von Mikrometern bzw. Winkelminuten auch über Distanzen von mehreren Metern zu gewährleisten. Naturhartgestein wird aufgrund der geringen Materialeigenstressungen und der exzellenten Möglichkeit zur mechanischen Feinbearbeitung oft als Gestellwerkstoff verwendet. Für diesen Einsatzzweck besitzt Naturhartgestein gegenüber den Gestellwerkstoffen Gusseisen oder Stahl vorteilhafte mechanische, elektrische, magnetische sowie thermische Werkstoffeigenschaften und ist zudem korrosionsbeständig. Eine Übersicht von vor- und nachteiligen Eigenschaften ist in Tabelle 2.1 kurz zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile des Einsatzes von Naturstein

Vorteile	Nachteile
+ keine bzw. geringe elektrische Leitfähigkeit und geringe magnetische Wirkung	– sehr lange Lieferzeiten hohe Transportkosten ⇒ hohe Materialeinzel- und -gemeinkosten
+ hohe Vickers-Härte (<i>DIN 50133</i>) ≈ 850..900 HV deutlich höher als ≈ 180 HV bei <i>C45-Stahl</i> [Tho18]	– Verfügbarkeit ist stark eingeschränkt und unterliegt saisonalen/witterungsbedingten Risiken ⇒ erhöhte Lagerhaltungskosten für Materialvorhalt
+ hohe Abriebfestigkeit (Verschleißwiderstand fester Oberflächen gegenüber tribologischer mechanischer Beanspruchung)	– kostenintensive, diamantbesetzte Werkzeuge notwendig und hohe Maschinenlaufzeiten pro Bauteil ⇒ Vermeidung von filigranen Leichtbaustrukturen
+ minimale Eigenspannungen = hohe Formstabilität >300 Mio Jahre alt ⇒ nahezu keine Eigenspannungen im Gestein	– geringe Anzahl geeigneter Fundstätten (besonders für große Bauteile) ⇒ Abhängigkeit von wenigen Zulieferern
+ hohe Wärmekapazität $c \approx 0,8..1,0 \text{ kJ (kg K)}^{-1}$ beträgt ungefähr das Doppelte im Vgl. zu Stahl ⇒ hohe thermische Trägheit [Fis18]	– geringe Wärmeleitfähigkeit $\lambda \approx 3,5 \text{ W (m K)}^{-1}$ ca. eine Größenordnung geringer als bei Stahl ⇒ Bildung von Hotspots möglich
+ geringe thermische Dehnung $\alpha \approx 5,0..7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ beträgt nur etwa die Hälfte im Vgl. zu ≈ $10..13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei Stahl [Fis18]	– sehr geringes Potenzial für Leichtbauweise durch riskante (Sprödigkeit ⇒ Bruchgefahr) und kostenintensive Bearbeitung dünnwandiger Strukturen
+ hohe Eigen- bzw. Materialdämpfung ⇒ hohe dynamische Stabilität	– stark eingeschränkte Gestaltungsfreiheit und eingeschränkte Möglichkeiten zur Funktionsintegration
+ sehr gute Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit	– erhöhtes Risiko für nicht sichtbare Materialfehler
+ kein Kriechen bei mechanischer Beanspruchung	– Naturprodukt ⇒ Eigenschaften können schwanken

Einen breiten Einsatz findet Naturhartgestein im Messgerätebau. Für viele Bauteile von **Koordinatenmessgeräten** (KMG) wird häufig das aus Südafrika stammende Naturhartgestein *Nero Impala* verwendet. Dieses Gestein zeichnet sich durch seine geringe Wärmeausdehnung und gleichmäßige Mineralverteilung mit daraus resultierenden guten technischen Eigenschaften aus. Es handelt sich dabei um magmatisches Tiefengestein, bestehend aus Quarz, Feldspat und Glimmer [Oel18], [Tho18], [Rei21].

Die Rohgesteinsblöcke werden mittels diamantbesetzten Seilsägen aus dem Fels extrahiert und zur Weiterverarbeitung transportiert. Während der gesamten Prozesskette, beim Transport sowie durch die Freilegung von nicht detektierten Fehlstellen besteht das Risiko von Beschädigungen. Durch subtraktive mechanische Verfahren werden die Gesteinsblöcke mit geometrisch unbestimmter Schneide durch Schleifen und Läppen mit gebundenem und ungebundenem Korn fertig bearbeitet. Die **Ebenheit** ΔH nach *DIN 876* (siehe Gl. 2.1) von geläpften Oberflächen liegt für den *Genauigkeitsgrad 00* im Bereich weniger μm (Bsp.: $A = l \times l = 1000 \times 1000 \text{ mm}^2 \Rightarrow \Delta H \leq 4 \mu\text{m}$) [DIN876–1]. Die Ebenheit des *Genauigkeitsgrades 00* für $l = 1000 \text{ mm}$ kann nach dem aktuellen Stand der Technik durch erfahrenes Fachpersonal bei Präzisionsbauteilen mit integrierten Führungsflächen für aerostatische Führungen auch bei einer Länge $l \geq 10 \text{ m}$ realisiert werden [Rei21].

$$\Delta H \hat{=} t_1 / \mu\text{m} \leq 2 \left(1 + \frac{l}{1000} \right) \quad \text{mit } l = \text{Bezugslänge/mm} \mid \text{Genauigkeitsgrad 00} \quad (2.1)$$

Bei der mechanischen Bearbeitung wird Wasser zur Kühlung eingesetzt. Die unvermeidliche Einlagerung von Wasser an den Gefügegenzflächen führt zu einer Volumenänderung. Der Zeitraum zur geometrischen Stabilisierung ist abhängig vom Gradienten der Volumenänderung. Der stationäre Zustand ist erst dann erreicht, wenn dieser Gradient unter einen Schwellenwert gesunken ist, der bezüglich der geforderten Formstabilität als unkritisch angesehen werden kann.

Bei modernen KMG mit hohen Genauigkeitsforderungen ist ca. 1 Jahr nach Fertigstellung und Endabnahme am Bestimmungsort eine erneute Kalibrierung erforderlich, damit die zu gewährleistenden Mess- und Positioniergenauigkeiten eingehalten werden können. KMG der höheren Genauigkeitsklasse auf Basis von Naturhartgestein werden ausschließlich in klimatisierten Räumen mit konstanter relativer Luftfeuchte (rel. Luftfeuchte $45\% \pm 10\%$, Feuchtekategorie A nach *VDI/VDE 2627*) eingesetzt [VDI2627]. Herrscht im Naturhartgestein ein Feuchtegleichgewicht mit der Umgebung, ist es bei konstanten Umweltbedingungen äußerst langzeitformstabil.

Ein Nachteil dieses Materials liegt jedoch im komplizierten, teilweise langwierigen und vor allem kostenintensiven Beschaffungsprozess [Oel18]. An nur sehr wenigen Lagerstätten in Südafrika, China und Europa kann Naturhartgestein in den geforderten Qualitäten und Abmessungen abgebaut werden. Es sind nur wenige Zulieferer in der Lage, Natursteinrohblöcke frei von Rissen und anderen Vorschädigungen zu liefern. Hinzu kommen erschwerte klimatische und infrastrukturelle Bedingungen an den jeweiligen Abbauorten.

Durch diese Gegebenheiten ist die Vorhersage der Lieferzeit im Einzelfall erschwert. Um Lieferengpässe zu vermeiden, werden Rohgesteinsblöcke in ausreichender Menge und Größe im Lagerbestand mit direktem Zugriff vorgehalten. Durch die Kapitalbindung und die Lagerhaltung entstehen Kostenpositionen ohne Wertschöpfung. Diese Kosten werden bei der Angebotserstellung über einen erhöhten Gemeinkostenzuschlag umgelegt.

Für eine höhere Flexibilität und Unabhängigkeit gegenüber Abbauunternehmen bzw. Umwelteinflüssen werden von den Maschinenherstellern auch die Gesteinsqualitäten aus lokalen Vorkommen (z. B. Österreich) akzeptiert. Leider weisen diese eine höhere Porosität und eine höhere Fehlstellenhäufigkeit auf, wodurch bspw. die Funktionsflächen durch einen zusätzlichen Versiegelungsprozess mittels Epoxidharzbeschichtung verschlossen werden müssen. Damit die epoxidharzgetränkten Flächen trotzdem für aerostatische Führungen und weitere Funktionsoberflächen eingesetzt werden können, ist der flächige Auftrag in einem weiteren Prozessschritt wieder zu entfernen, sodass der Kunststoff lediglich in den Fehlstellen verbleibt und später keinen Einfluss auf den Kraftfluss hat. Durch diesen zusätzlichen Prozessaufwand schlägt sich der Kostenvorteil bei der Beschaffung nicht direkt im Endpreis nieder [Rei21].

Die für die Bearbeitung der Gesteinsblöcke notwendigen diamantbesetzten Werkzeuge und diamanthaltigen Läppmittel sind sehr kostenintensiv. Durch die hohen Maschinenlaufzeiten steigen die Bauteilkosten zusätzlich gegenüber gut zerspanbaren Materialien. Deshalb ist schon bei der Bauteilentwicklung ein minimaler Volumenabtrag vorzusehen. Dementsprechend ist die Gestaltungsfreiheit auf wenige geometrische Grundformen beschränkt. Die Herstellung von filigranen Tragstrukturen in Leichtbauweise aus Naturhartgestein ist fertigungstechnisch problematisch und infolge eines erhöhten Bruchrisikos bei kleineren Wandstärken nicht zielführend. Auch die Möglichkeit zur Funktionsintegration, wie die Einbettung von Antrieben oder Medienzuführungen, ist stark eingeschränkt bzw. nur über zusätzliche Maßnahmen zu realisieren.

Bei der Gestaltung von Koppelstellen werden vorwiegend Schraubverbindungen eingesetzt. Die hierfür notwendigen Gewindehülsen werden in Kernlochbohrungen verklebt. Je nach Bauteil ist eine sehr große Anzahl von Kernbohrungen notwendig, wodurch die stückabhängigen Bauteilkosten weiter steigen. Die Positionierung benachbarter Bauteile erfolgt über die im Koppelstellenkraftfluss liegenden Präzisionsflächen. Diese sind meist durch überbestimmte Anordnungen charakterisiert und müssen, wie auch bei der Herstellung von aerostatischen Führungsflächen, mittels manueller Nachbearbeitung auf Mikrometeregenauigkeit gebracht werden.

2.1.2 Reaktionsharzbeton

Seit der Entwicklung von Reaktionsharzsystemen in den 70er Jahren hat sich Reaktionsharzbeton für viele Anwendungen in der Industrie als Alternativwerkstoff zu Gusseisen und Stahl etabliert [Jac02]. Er gehört zu den nichtmetallischen Werkstoffen und wird in der Literatur auch unter den Synonymen Polymerbeton, Epoxidharzbeton oder Mineralguss geführt. Im Maschinenbau wird er hauptsächlich für Unterbauten, Maschinenbetten und -gestelle eingesetzt [Bod22], [Nor18]. Der Begriff Reaktionsharzbeton bezeichnet ein Mehrphasensystem, das aus Füllstoffen, Bindemittel und Additiven besteht.

Für die Füllstoffe werden häufig quarzitisches Gesteine verwendet. Es werden aber auch Voll- oder Hohlkugeln aus Glas, Siliciumcarbitkörner oder Faserzusätze eingesetzt. Aufgrund des im Vergleich zu anderen Kunststoffen deutlich geringeren Schrumpfens beim Aushärten werden im Maschinenbau häufig Epoxidharze als Bindemittel verwendet. Der Einsatz von anderen Polymeren ist aber ebenso möglich. Bei den Additiven wird zwischen Härtern (Initiatoren), Beschleunigern (Aktivatoren) und Verzögerern (Inhibitoren) unterschieden.

Bei Epoxidharzsystemen wird der Härter in der Baustoffchemie als 2. Komponente des Bindemittels geführt. Durch die Variation des Verhältnisses von Füllstoffen zu Bindemittel und dem zielgerichteten Einsatz spezifischer Additive können unterschiedliche Eigenschaften für die Verarbeitung und die physikalischen Eigenschaften des ausgehärteten Werkstoffes eingestellt werden. Ausgewählte Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst [Etm93], [Bod22].

Um eine hohe mechanische Festigkeit zu erreichen, ist der Anteil der Füllstoffe zu maximieren, da diese eine höhere Festigkeit und Steifigkeit als das Bindemittel aufweisen. Die Zusammenstellung von Füllstoffen mit verschiedenen Korngrößen wird über definierte Sieblinien für eine möglichst hohe Packungsdichte optimiert. Auftretende Druckkräfte können über den direkten Verbund der Kornmatrix abgeleitet werden und der Bindemittelanteil wird minimiert. Die bei der Herstellung im geringen Masseanteil zugesetzten Additive haben die Aufgabe der Viskositätsminderung, der Haftvermittlung, des Härtens sowie der Verbesserung der Entlüftung während der Verarbeitung [Bod22], [Nor18].

Es wird zwischen warm- und kalthärtenden Epoxidharzen unterschieden. Bei Vernetzungstemperaturen über 80°C wird von warmhärtenden Epoxidharzen gesprochen. Warmhärtende Epoxidharze weisen im Vergleich zu kalthärtenden Epoxidharzen um ca. 30% bessere mechanischen Eigenschaften, eine geringere Wasseraufnahme und günstigere thermische Eigenschaften auf. Aufgrund der thermisch bedingten Schwindung beim Abkühlen und der sich daraus ergebenden geringeren Abformgenauigkeit sowie höheren inneren Spannungen werden für Präzisionssysteme grundsätzlich kalthärtende Epoxidharze eingesetzt [Bod22].

Beim Mischvorgang ist durch die Anwendung von Vakuummischern sicherzustellen, dass eine homogene Masse mit möglichst geringem Luftanteil zum Verguss bereitsteht. Ein Großteil der im Gemisch befindlichen Gasblasen kann später wegen der hohen Viskosität und Oberflächenspannung des Gießharzes auch durch Rütteln nicht entfernt werden.

Der Vorgang des Rüttelns beim Gießen ist vorrangig zur Erhöhung der Formfüllungsgeschwindigkeit bestimmt, weil die Topf- bzw. Verarbeitungszeit je nach Gemischeinstellung im Bereich von Minuten bis hin zu wenigen Stunden liegt. Sekundär wird das Rütteln der Gussform nach dem Gießen mit dem Zwecke der Entlüftung eingesetzt, um eine möglichst gute Verdichtung zu erreichen und den Porengehalt zu minimieren. Jedoch haben lediglich sehr große Luftblasen das Potenzial, die Oberfläche zu erreichen, sofern diese nicht durch Barrieren oder ungünstige Formschrägen am Aufsteigen gehindert werden. Es wird entweder die ganze Form oder nur an einzelnen Formwänden gerüttelt. Eine Kombination aus beiden Verfahren ist auch üblich. Die Schwingungsamplitude sollte ≤ 2 mm betragen, da sich sonst die Mischung von den Formwänden ablösen kann. Zudem kann es bei langen Rüttelzeiten zu Sedimentationserscheinungen kommen [Sah87].

Während des Aushärtens des Bindemittels wird Wärme freigesetzt. Bauteiltemperaturen $\geq 50^\circ\text{C}$ sowie ungleichmäßiges Abkühlen sollten vermieden werden, um Spannungen bzw. Spannungsrisse im Material zu vermeiden. Bei diesen hohen Reaktionstemperaturen ist es, bedingt durch das Abkühlungsschwinden, nicht möglich, enge Toleranzen einzuhalten. Um ein gleichmäßiges Abkühlen bei Bauteilen mit stark unterschiedlichen Materialstärken zu gewährleisten, sollten einzelne Formwände beheizt oder wärmeisoliert werden. Abhängig von der Masse des Gusskörpers kann nach 12 bis 14 Stunden entformt werden [Jac02].

Durch den im Vergleich zu Stahl-, Aluminium- oder Grauguss kalten Urformprozess ist ein hohes Maß an Funktionsintegration mittels einer Vielzahl verschiedener Bauteile möglich. Nahezu alle im Maschinenbau üblichen Bauteile, Werkstoffe und sonstige Koppelstellen können in der Form direkt positioniert und vergossen werden. Durch die relativ geringe Prozesstemperatur von $\leq 80^\circ\text{C}$ bei kalthärtenden Gießharzen fallen auch die Kosten für Gießformen selbst und die notwendigen Formhilfsmittel zur Positionssicherung von Einlege- teilen gering aus. Die Kosten für Nachbearbeitung von eng tolerierter Funktionsgeometrie sind aufgrund der minimierten subtraktiven Bearbeitungsprozesse, auf relativ geringem Niveau, verglichen mit der mechanischen Bearbeitung von Rohgesteinsblöcken. Jedoch ist der Abtrag durch die untrennbare Vermischung von Kunstharz und mineralischen Anteilen als Sondermüll zu entsorgen.

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile für den Einsatz von Reaktionsharzbeton

Vorteile	Nachteile
+ keine bzw. geringe elektrische Leitfähigkeit und geringe magnetische Wirkung	– lange Prozess-/Aushärtezeit ⇒ Zusammenstellung und Trocknung der Füllstoffe
+ geringere Formkosten im Vgl. zum Metallguss durch kalten Urformprozess	– geringe mechanische Festigkeit und Steifigkeit (starke Temperaturabhängigkeit)
+ direktes Abformen von Funktionsflächen möglich	– geringe Abrieb-/Verschleißfestigkeit
+ hohe spezifische Steifigkeit $E/\rho \approx 12..20 \text{ MNm kg}^{-1}$ mit $E \approx 30..45 \text{ kN mm}^{-2}$ und $\rho \approx 2,3..2,4 \text{ g cm}^{-3}$ ⇒ möglicher Leichtbau (EPUCRET-Systeme*)	– geringe Wärmeleitfähigkeit $\lambda \approx 1,0..2,9 \text{ W (m K)}^{-1}$ ca. eine Größenordnung geringer als bei Stahl ⇒ Bildung von Hotspots
+ hohe Wärmekapazität $c \approx 0,7..0,9 \text{ kJ (kg K)}^{-1}$ beträgt ungefähr 60% von Stahl	– hohe thermische Dehnung $\alpha \approx (15,0..19,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ist (15..30)% höher im Vergleich zu Stahl
+ gute Gestaltungsfreiheit und beste Möglichkeiten zur Funktionsintegration beim Urformen	– verstärktes Kriechen / geringe Formstabilität ⇒ für Präzisionsteile nur bedingt geeignet
+ gute Verfügbarkeit und definierte Beschaffenheit der Zuschlagstoffe	– Bearbeitungsrückstände sind nicht recyclebar und als Sondermüll zu entsorgen
+ hohe Eigen- bzw. Materialdämpfung ⇒ hohe dynamische Stabilität	– Bauteile der Maschinenstruktur sind am Ende des Produktlebenszyklus als Sondermüll zu entsorgen
+ sehr gute Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit	

* entnommen aus den technischen Merkblättern der RAMPF®-Gruppe für:

EPUMENT 145/B, EPUMENT 140/8B und AMPLEX 140/5

Infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Tab. 2.2) kann es im Betrieb zur Entstehung von Temperaturgradienten an Antriebsaggregaten bzw. durch Reibung beanspruchten oder elektrischen Strom führenden Stellen kommen. Die thermisch induzierten Spannungen und die damit auftretenden Gestaltabweichungen können nur mit erhöhtem Aufwand zur Kompensation oder Korrektur kontrolliert werden. Für die Kompensation der thermischen Verformungen sind Kühl- und Heizkreisläufe zur Bauteiltemperierung notwendig. Trotz der relativ einfachen Möglichkeit zur Einbringung solcher Elemente, stellt dies einen zusätzlichen Kostenaufwand dar. Der Konstrukteur ist somit in der Gestaltungsfreiheit und bei der Anordnung von Funktionselementen zur Erfüllung der Bauteilfunktion eingeschränkt.

Der E-Modul des Bindemittels wird bei einer Erwärmung von 20°C auf 80°C um ca. 50% reduziert [Erb07]. Schon unter der Annahme eines isotropen Materialverhaltens ist die auftretende Verformung bei veränderlichen Beanspruchungen, wie Wanderlasten oder Werkzeugeingriffen, durch die Maschinensteuerung kaum korrigierbar. Das Materialverhalten ist hierbei allerdings nicht isotrop, weil die Drucksteifigkeit hauptsächlich von der Steifigkeit der Füllstoffe (Gesteine) und die Zugsteifigkeit von der des Bindemittels (Kunststoff) abhängt.

Unter konstanter mechanischer Beanspruchung werden bei Temperaturerhöhung die auf Zug belasteten Stellen, infolge des temperaturabhängigen E-Moduls des Kunststoffes, stärker verformt als thermisch weniger beanspruchte Bereiche bzw. Bereiche, welche einer Druckbeanspruchung unterliegen. Daraus ergibt sich eine nur schwer korrigierbare nichtähnliche Gestaltabweichung für die betroffenen Bauteile. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften hat die Verwendung von Reaktionsharzbeton in der Präzisionstechnik praktisch keine Bedeutung.

2.1.3 Hydraulisch gebundener Beton

Hydraulisch gebundener Beton (Beton) ist ein 4-Stoff-System aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser und Zusätzen. Als Bindemittel fungieren hier der Zement und das Wasser, welches infolge der Hydratation, einer chemisch-physikalischen Reaktion, die Gesteinskörnung bzw. Ausgangsstoffe dauerhaft miteinander verkittet [Hum51]. Die Zusätze spielen hierbei nur eine untergeordnete Rolle und beeinflussen die Verarbeitungseigenschaften sowie die Dauer des Abbindeprozesses. Das Abbinden läuft bei korrekter chemischer Zusammensetzung weitgehend unabhängig von der Umgebung ab und kann an der Luft bzw. unter Wasser erfolgen. Bei der Reaktion von Zement und Wasser ist darauf zu achten, dass das für die vollständige Hydratation benötigte Wasser nicht durch Verdunstungsprozesse aus dem System entweichen kann.

Zum Erreichen der Maximalfestigkeit ist die vollständige Hydratation anzustreben, wobei der Zement und das beigefügte Wasser vollständig zu Zementstein reagieren. Dies wird durch eine zur Zementmasse relativen Wasserzugabe von $\approx 40\%$, sprich: bei einem **Wasser-Zement-Wert** von $w/z \approx 0,4$ erreicht. Mit reduziertem Wasseranteil stoppt die Hydratation vorzeitig. Bei Wasserüberschuss entstehen Porenräume durch die nachträgliche Abgabe des ungebundenen Wassers. Der ausgehärtete Zustand von Ausgangsstoffen bis 4 mm Größtkorn und Bindemittel, worin das verwendete Wasser chemisch ($\leq 25\%$ der Zementmasse) und physikalisch ($\leq 15\%$ der Zementmasse) gebunden ist, wird Betonmatrix genannt.

Der Aushärtungszustand nach 28 Tagen wird üblicherweise für die Definition der Nenn- und Rechenfestigkeit benutzt. Die **Nennfestigkeit** f_N ist die nach *DIN 1045-2* bestimmte Druckfestigkeit von Würfeln mit 15 cm Kantenlänge, welche zur Kategorisierung in Festigkeitsklassen benutzt wird. Die **Rechenfestigkeit** f_R zur Bauteilauslegung beträgt maximal 70% der ermittelten Nennfestigkeit [DIN1045-2]. Die Verarbeitung von Beton ist bei Temperaturen zwischen 5°C und 30°C sinnvoll [VDZ14]. Wobei ein bei 5°C gelagerter Beton nach 28 Tagen nur $2/3$ der Festigkeit eines bei 20°C gelagerten Betons erreicht.

Nach dem aktuellen Stand der Technik wird Beton als Basismaterial für Maschinenbauteile im Präzisionsmaschinenbau im Vergleich zu den Werkstoffen Stahl, Grauguss, Aluminium, Naturhartgestein oder Reaktionsharzbeton nur selten verwendet. Eine weit verbreitete Anwendung von Beton ist das Ausgießen von Eisenguss und Stahlblechschweißkonstruktionen im Gestellbereich. Hierbei wird eine Verbesserung schwingungstechnischer Eigenschaften durch eine Masseerhöhung und eine erhöhte Eigendämpfung angestrebt. Durch das Schwinden des Betons beim Aushärten entstehen allerdings auch Hohlräume bzw. Spalten, welche zu unvorhersehbaren dynamischen Effekten führen können.

Die Gestellfundamente zur Aufstellung von Mess- und Bearbeitungsmaschinen werden dagegen fast ausschließlich aus Beton gefertigt. Die bei konstanten Umweltbedingungen über viele Jahre unveränderten Relativlagen zwischen definierten Messpunkten auf Maschinenfundamenten können mit keinem anderen Material unter vergleichbaren Kosten realisiert werden. Eine große Herausforderung bei der Konstruktion von Maschinenbauteilen aus Beton ist, wie beim Reaktionsharzbeton, die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften. Die um ca. eine Größenordnung geringere **Zugfestigkeit** f_{ctm} im Vergleich zur **Druckfestigkeit** f_{ck} (siehe Gl. 2.2 nach *DIN 1045-1 Tab. 9*) bei den Festigkeitsklassen C55/67 bis C100/115 nach *DIN 1045-2* ist hierfür charakterisierend [DIN1045-1], [DIN1045-2].

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left(1 + \frac{f_{ck}}{10} \right) \Rightarrow f_{ck} : f_{ctm} \approx 14 : 1 |_{C55/67} \cdot 21 : 1 |_{C100/115} \quad (2.2)$$

Aus Gl. 2.2 geht hervor, dass die Zugfestigkeit in Relation zur Druckfestigkeit desto geringer ausfällt, je höher die Festigkeitsklasse ist. Da die Zugfestigkeit und -steifigkeit, wie auch beim Reaktionsharzbeton, maßgeblich von der Festigkeit des Bindemittels, also dem Zementstein abhängt, liegt bei der Entwicklung neuer Bindemittel das größte Potenzial zur Festigkeitssteigerung von Betonen [Str10].

Quellen, Schwinden und Kriechen

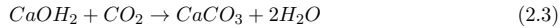
Die Langzeitstabilität der Bauteilgeometrie ist die wichtigste Eigenschaft für die Verwendung eines Werkstoffes im Präzisionsmaschinenbau. Ein Betonbauteil unterliegt zwei grundsätzlich verschiedenen Effekten, die in Folge von inneren Spannungen zu einer Gestaltänderung führen. Zum einen wird durch die Aufnahme und Abgabe von Wasser sogenanntes Quellen und Schwinden verursacht und zum anderen ist ein leichtes Kriechen unter mechanischer Last zu beobachten, welches durch Eigengewicht des Bauteils und zusätzliche Betriebslasten hervorgerufen wird.

Das Schwinden ist abhängig von der Bauteilgeometrie, der Betonzusammensetzung und den klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte). Für handelsübliche Standardbetone liegt das Gesamtschwindmaß bei ca. $(-0,2..-0,4)\%$. Das Gesamtschwindmaß setzt sich aus dem Kapillarschwinden, dem autogenen Schwinden, dem Trocknungsschwinden und dem Schwinden als Folge der Carbonatisierung zusammen [Wal97], [Hei17], [Per02]. Eine Übersicht der Schwindformen in chronologischer Reihenfolge des Auftretens zeigt Tabelle 2.3. Weiterhin wird der zeitliche Rahmen, die Größenordnung der Ausprägung und begünstigende oder behindernde Bedingungen aufgeführt.

Tabelle 2.3: Schwindformen von hydraulisch gebundenem Beton in chronologischer Reihenfolge [TFB01]

Schwindform	Zeitpunkt	Schwindmaß	Bemerkung
Kapillarschwinden	bis zum Erstarren	$0\%..-4\%$	Probleme bei großen freien Oberflächen (z. B. Böden)
autogenes Schwinden	während der ersten Tage	$0,0\%..-0,3\%$	Bedeutung vor allem bei niedrigen w_z -Werten $\leq 0,45$
Trocknungsschwinden	ab dem Erstarren über Jahre	$0,1\%..-0,5\%$	$\leq 0,1$ Quellen (Wasserauslagerung) $-0,5$ sehr trockene Luft ($\leq 50\%$ r. F.)
Carbonatisierungsschwinden	nach Monaten bis Jahrzehnte	$-0,01\%..-0,10\%$	maximales Schwinden bei $70\%..80\%$ r. F.

Das **Carbonatisierungsschwinden** wird durch die chemische Reaktion des aus der Hydratation entstandenen Calciumhydroxids mit dem aus der Umgebungsluft zugeführten Kohlenstoffdioxid begünstigt. Nach Gl. 2.3 entstehen hierbei Kalkstein und Wasser.



Das Volumen des zugeführten CO_2 ist geringer als das Volumen des entstehenden Wassers. Wenn dieses entweicht, kommt es zum Carbonatisierungsschwinden. Da hierfür CO_2 -Moleküle aus der Umgebungsluft benötigt werden, nimmt dieser Effekt je nach Porosität innerhalb weniger Zentimeter nach innen ab und beträgt in Abhängigkeit von der Bauteilwandstärke maximal $-0,1\%$.

Das **Trocknungsschwinden** im Bereich von ca. $(-0,1..-0,3)\%$ wird auf das Austrocknen des Betons zurückgeführt [Wal97]. Das im Zementleim physikalisch gebundene Wasser diffundiert, solange an die Bauteiloberfläche, bis sich ein Gleichgewicht zwischen relativer Betonfeuchte und der relativen Feuchte der Umgebungsluft eingestellt hat [Wes81]. Die Zeit zum Erreichen des Feuchtegleichgewichtes ist abhängig von der Bauteilwandstärke. Erst nach dem Abbau der durch das Schwinden hervorgerufenen Spannungen bleibt die Bauteilgeometrie stabil. Eine Betonplatte mit einer Wandstärke von z. B. 45 cm benötigt ca. 1 Jahr bei 50% relativer Luftfeuchte zum Erreichen des stationären Zustandes [Car37].

Das **autogene Schwinden** beginnt unmittelbar mit der Hydratation des Zements und setzt sich aus dem chemischen Schwinden und der Selbsttrocknung als Folge des Wasserverbrauches bei der Hydratation zusammen. Dieser Effekt hat bei Betonen mit niedrigem *Wasser-Zement-Wert* $\leq 0,45$ den größten Einfluss auf das Gesamtschwindmaß, weil hier praktisch das gesamte Wasser des Frischbetons chemisch oder physikalisch gebunden wird und damit kein Wasser durch Verdunsten aus der Matrix entweichen kann [Jac+08].

Kapillarschwinden wird auch als Frühschwinden oder plastisches Schwinden bezeichnet. Diese Erscheinung entsteht durch die frühzeitige Verdunstung oder den Abtransport von Wasser aus der Schalung. Durch die Verdunstung an der Oberfläche entsteht in den Kapillaren des noch plastischen Betons ein Unterdruck, welcher zur Volumenkontraktion führt. Zusätzlich wird zur Hydratation benötigtes Wasser entzogen, was zu einem Festigkeitsverlust führt. Beim Betonieren von Maschinenbauteilen ist deshalb sicherzustellen, dass der Frischbeton nicht mit der Umgebungsluft in Kontakt kommt und die Schalungsflächen völlig luft- und wasserdicht sind.

Da die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft witterungsbedingten Schwankungen unterliegt, führt eine steigende Luftfeuchte im Umkehrschluss zum Quellen des Betons. Mit Auswirkungen dieses Potenzials für eine umweltbedingte Gestaltänderung ist zu rechnen, wenn langwellige Schwankungen mit Periodizität von mehreren Tagen auftreten. Bei der

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile für den Einsatz von hydraulisch gebundenem Beton

Vorteile	Nachteile
+ keine bzw. geringe elektrische Leitfähigkeit und geringe magnetische Wirkung	– längere Prozess-/Lieferzeit als bei Mineralguss ⇒ 28 Tage Aushärtezeit für 93% Festigkeit
+ gute Verfügbarkeit und weltweit genormte Beschaffenheit der Gesteinskörnung (Zuschläge) und des Zementes (Bindemittel)	– geringere Abrieb-/Verschleißfestigkeit gegenüber Eisen- und Nichteisenlegierungen bei direktem mechanischen Kontakt
+ geringe Formkosten durch kalten Urformprozess	– geringe Zugfestigkeit $\approx 5\%..8\%$ der Druckfestigkeit
+ gute spezifische Steifigkeit $E/\rho \approx 15..24 \text{ MNm kg}^{-1}$ mit $E \approx 35..55 \text{ kN mm}^{-2}$ und $\rho \approx 2,3..2,4 \text{ g cm}^{-3}$ ⇒ möglicher Leichtbau (max. ca. 90% von Stahl)	– geringe Wärmeleitfähigkeit $\lambda \approx 1,7..2,2 \text{ W (m K)}^{-1}$ ca. eine Größenordnung geringer als bei Stahl ⇒ Bildung von Hotspots
+ hohe Wärmekapazität $c \approx 0,73..0,90 \text{ kJ (kg K)}^{-1}$ ⇒ entspricht $\approx 60\%$ des Wertes von Stahl	– leichtes Kriechen unter Last [Gra02] ⇒ max. $(1,0..1,5) \cdot 10^{-3}$ pro Nmm^{-2} über 1 Jahr
+ geringe therm. Dehnung $\alpha \approx (9,0..11,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ⇒ 15%..30% geringer im Vergleich zu Stahl	– nicht fluiddicht durch vorhandene Restporosität
+ gute Gestaltungsfreiheit und beste Möglichkeiten zur Funktionsintegration	
+ hohe Eigen- bzw. Materialdämpfung ⇒ hohe dynamische Stabilität	
+ gute Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit	

Verwendung von Beton für Präzisionsmaschinenteile ist eine entsprechende Klimatisierung mit Luftfeuchteschwankungen im Bereich von (10..15)% mit kurzwelligen Regelzyklen sicherzustellen. Unter diesen Bedingungen ist das Gestaltänderungspotenzial als ausreichend gering einzuschätzen, da die Einstellung des Feuchtegleichgewichtes asymptotisch mit einer großen Zeitkonstante über einen Zeitraum von mehreren Monaten erfolgt.

Beim Kontakt mit wasserlöslichen Flüssigkeiten, wie z. B. Kühl- und Schmieremulsionen, besteht jedoch ein sehr hohes Gestaltänderungspotenzial. Der Beton ist bei entsprechenden Maschinenbauteilen zu hydrophobisieren bzw. durch andere geeignete Maßnahmen, wie EP-Beschichtungen (EP $\hat{=}$ *Epoxidharz*) oder PUR-Lackierungen (PUR $\hat{=}$ *Polyurethan*), vor dem Eindringen von Wasser zu schützen oder durch dauerhaftes Verweilen im Fluid stationär zu betreiben. Bei Funktionsflächen besteht allerdings bei vorhandenen Betriebsflüssigkeiten lediglich die Möglichkeit des stationären Betriebes bzw. die vollständige Versiegelung und nachträgliche mechanische Feinbearbeitung.

Der Frischbeton kann nicht zu 100% entlüftet werden. Deshalb bleibt in der Betonmatrix immer ein Anteil an Restporosität. Durch die Inhomogenität in der Matrix werden stochastisch verteilte Grenzflächen zwischen der Gesteinskörnung, dem Bindemittel und den Luft einschließen gebildet. An diesen Grenzflächen wird bei dynamischen Beanspruchungen der Körperschall gebrochen, was zu einer guten Materialdämpfung bei Biege- und Torsionsschwingungen führt. Bei statischen Beanspruchungen werden durch die Luft einschlüsse jedoch Setzeffekte begünstigt, welche zum Kriechen des Bauteils führen. Das Kriechen ist vom Spannungsniveau und von der Dauer der Beanspruchung abhängig. Das spezifische

Kriechmaß von Beton liegt etwa bei $(1,0..1,5)\%$ pro $\text{N}(\text{mm})^{-2}$ und wird asymptotisch über den Zeitraum von ca. einem Jahr erreicht [Gra02].

Ein Zeitfenster von ca. 1 Jahr kann dementsprechend für die Prozesse des Schwindens und des Kriechens bis zum Erreichen des stationären Zustandes bezüglich Klimatisierung und statischer Beanspruchung durch z. B. das Bauteileigengewicht anberaumt werden. Dies entspricht in etwa dem Zeitraum, welchen auch ein Natursteinbauteil nach der im Abschnitt 2.1.1 beschriebenen mechanischen Bearbeitung zum Erreichen des Feuchtegleichgewichtes benötigt. Nach Ablauf dieser Zeit sollte eine erneute Kalibrierung bzw. Nachjustage des Maschinensystems erfolgen. Die wichtigsten Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile sind in Tabelle 2.4 für den Konstrukteur zusammengefasst.

2.2 Bauteile mit planaren Präzisionsflächen

In Präzisionssystemen ist die hohe Formgüte der die Drehachsen bzw. Leitgeraden definierenden Flächen maßgebend für die Mess- und/oder Positioniergenauigkeit. Eine hohe Reproduzierbarkeit und ausreichende Langzeitstabilität der Drehachsen bzw. Leitgeraden oder Führungsebenen sind hierbei von entscheidender Bedeutung [Bar93]. Außerdem werden von Präzisionspositioniersystemen sehr kleine Bewegungsaufösungen von wenigen Mikrometern bis in den Submikrometerbereich hinein gefordert.

Mit aerostatischen Führungen und Lagern können diese Anforderungen sehr gut umgesetzt werden. Aerostatische Elemente haben keinen negativen Einfluss auf die erreichbare Positionierauflösung, da sie nahezu reibungsfrei sind und daher kein Stick-Slip-Effekt auftreten kann. Auch die Steifigkeit einzelner aerostatischer Elemente im Bereich von $(10^1..10^3) \text{N}(\mu\text{m})^{-1}$ ist sehr groß, sehr gut einstellbar und lastabhängig regelbar [New06]. Da die Anforderungen an die Laufflächen für aerostatische Elemente am höchsten sind, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit diese Bauteiloberflächen als Referenz für Präzisionsflächen verwendet.

In der Koordinatenmesstechnik werden hauptsächlich aerostatische Elemente eingesetzt, welche eine gerade bzw. ebene (planare) Bewegung realisieren [Per12]. Im Weiteren wird nicht näher auf rotatorische Systeme eingegangen. Aerostatische Führungselemente werden mit einem optimalen **Arbeitsluftspalt** (siehe Abb. 2.1) von $(3..7) \mu\text{m}$ betrieben [New06]. Hierdurch ergeben sich Genauigkeitsanforderungen für die Bauteilgestalt und die Oberflächenbeschaffenheit, die primär durch die globalen maximalen Bahnabweichungen bestimmt werden, aber auch sekundär im lokalen Bereich unter einem Luftlager für dessen sicheren Betrieb erforderlich sind. Eine Abweichung wird als lokal verstanden, wenn sie in ihrer Ausprägung kleiner ist als die charakteristische Abmessung des aerostatischen

Elementes. Diese Abweichungen führen zu einem erhöhten Luftverbrauch und einer geringeren Steifigkeit der Führung. Erhebungen bzw. Spitzen auf der Oberfläche können zusätzlich zu Beschädigungen an den Führungselementen führen.

2.2.1 Gestaltabweichungen und Kennwerte

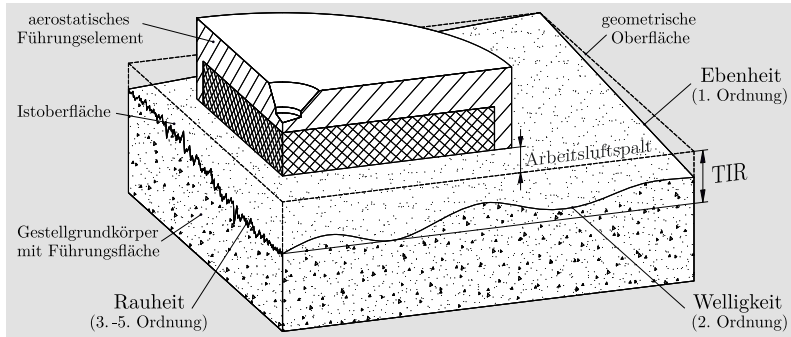


Abbildung 2.1: Gestaltabweichungen von Oberflächen für aerostatische Führungen

Für die Qualifizierung von aerostatischen Führungsfächen ist eine hinreichend genaue Kenntnis der Oberflächentopographie notwendig. Unter Gestaltabweichungen (siehe Abb. 2.1) wird nach *DIN 4760* die Gesamtheit aller Abweichungen der **Istoberfläche** von der idealen **geometrischen Oberfläche** verstanden [DIN4760]. Die Istoberfläche bezeichnet dabei das messtechnisch erfasste, angenäherte Abbild eines Formelementes. Damit können in Abhängigkeit vom Messverfahren (optisch, taktil) verschiedene Darstellungen des Istzustandes einer Oberfläche entstehen.

Die geometrische Oberfläche ist der ideale, durch die Zeichnungen und andere Konstruktionsdaten vorgegebene Sollzustand einer Oberfläche. Geometrische Oberflächen sind technisch nicht realisierbar [Mei09]. Gestaltabweichungen können nur bezüglich einzelner Raumprimitive oder einer mathematisch beschreibbaren Geometrie bestimmt werden. Für die Qualifizierung aerostatischer Führungsfächen ist die Bestimmung der Gestaltabweichungen bezüglich einer ideal ebenen Fläche von Relevanz.

Nach *DIN 4760* werden Gestaltabweichungen in Formabweichungen, Welligkeit und Rauheit unterteilt, welche sich durch Superposition überlagern und nur schwer voneinander zu trennen sind. Das wichtigste Unterscheidungskriterium ist die longitudinale Ausprägung der Abweichung wie z. B. eine Periodizität entlang einer Oberfläche. Die absoluten lateralen Abweichungen können hierbei in derselben Größenordnung liegen [Sau16].

1. Ordnung - Formabweichungen

Gestaltabweichungen 1. Ordnung beschreiben den bei der Betrachtung der gesamten Prüfgeometrie auftretenden maximalen lateralen Versatz von der geometrischen Form. Bei planaren Flächen äußert sich dies in einer Unebenheit. Für lange Flächen mit geringer Breite ist die Geradheitsabweichung nach *DIN EN ISO 12780-1* maßgebend [ISO12780-1].

Zur Berechnung der Ebenheit wird der TIR-Wert (*Total Indicator Reading* | siehe Abb. 2.1) nach *DIN 50441-5* verwendet [DIN50441-5]. Zu dessen Bestimmung wird zunächst eine Regressionsebene bzw. -gerade für alle Höhenkoordinaten der Prüffläche gebildet (siehe Abb. 2.2-links). Die Messpunkte sollten hierbei in konstanten Abständen über die Fläche bzw. Linie verteilt werden, wobei die Abstände mindestens eine Größenordnung kleiner als die zu erwartende Periodizität der Formabweichung sein müssen.

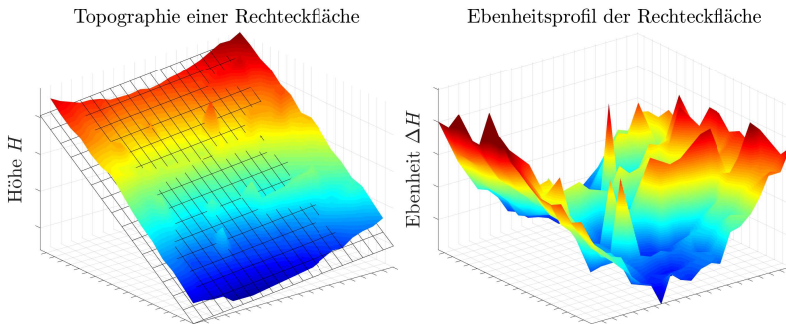


Abbildung 2.2: Beispielhafte Topographie einer geometrisch ebenen Rechteckfläche mit der zugehörigen Regressionsebene (links) und das Ebenheitsprofil (rechts) bezogen auf die Regressionsebene

Im zweiten Schritt werden die orthogonalen Abstände bezogen auf die Regressionsebene entsprechend Abb. 2.2-rechts errechnet. Die Ebenheit der Oberfläche ergibt sich aus der Differenz zwischen Maximum und Minimum [ISO12781-1]. Die longitudinale Periodizität für Formabweichungen muss definitionsgemäß mindestens dem 1000-fachen des maximalen lateralen Wertes entsprechen. Formabweichungen von aerostatischen Führungsflächen führen zu direkten, lateralen Bahnabweichungen bezüglich der Leitgeraden oder -ebene.

2. Ordnung - Welligkeit

Gestaltabweichungen 2. Ordnung beschreiben periodische Abweichungen zur geometrischen Oberfläche. Diese führen während des dynamischen Betriebs zu Schwingungen, welche

nicht reproduzierbare Bahnabweichungen des Positioniersystems hervorrufen [New06]. Für die Bestimmung der Welligkeit wird äquivalent zur Ebenheitsbestimmung die Berechnung des TIR-Wertes angewendet. Das Verfahren unterscheidet sich lediglich in der Größe des Prüfbereiches und in der Teilung zwischen Messpunkten. Das Verhältnis zwischen longitudinaler Periodizität und lateraler Ausprägung liegt definitionsgemäß zwischen 1000 : 1 und 100 : 1.

Wenn die Periodizität der Wellen nicht eindeutig erkennbar ist, sollten mehrere Prüfbereiche auf einer Fläche vorgesehen werden, um statistische Aussagen über die Welligkeitsverteilung zu erhalten. Welligkeit in Führungsflächen führt nicht direkt zu Bahnabweichungen. Jedoch wird die Tragfähigkeit und die Steifigkeit infolge der veränderten Strömungsverhältnisse reduziert. Der Maximalwert der Welligkeit für einen sicheren Einsatz von Luftlagern entspricht der halben Höhe des minimalen Arbeitsluftspaltes [New06].

3. bis 5. Ordnung - Rauheit

Gestaltabweichungen 3. bis 5. Ordnung sind weniger kritisch für die Bahntreue und den Luftfilmaufbau. Sie werden über regelmäßig und unregelmäßig auftretende Abweichungen beschreiben, wobei das Verhältnis von Abstand zu Tiefe zwischen 100 : 1 und 5 : 1 liegt. Die Rauheit einer ebenen Fläche wird von mechanischen Bearbeitungsverfahren geprägt. Bei geschliffenen Flächen ist das Aussehen des Rauheitsprofils stark von der Richtung der Messstrecke abhängig. Bei der mechanischen Bearbeitung entsteht eine ausgeprägte Charakteristik, welche auch als Werkzeugfingerabdruck bezeichnet wird [DIN40686]. Rauheitsprofile von urformend hergestellten Flächen sind durch Mikroporen und -risse gekennzeichnet.

Die maximalen Rauheiten (*Rautiefe* R_a und *Mittenrauwert* R_z) für einen sicheren Betrieb von Luftlagerelementen werden vom Hersteller vorgegeben. Für die Bestimmung der Rauheit werden 2-dimensionale Profilschnitte verwendet, die z. B. mittels eines Kufentasters aufgenommen werden können. Das Rohprofil, welches die Liste von Messpunktkoordinaten entlang der Messstrecke ist, beinhaltet zusätzlich noch Profilanteile der 1. und 2. Ordnung von Gestaltabweichungen. Diese werden durch gerätinterne Hochpassfilter gedämpft, um die Rauheiten nach *DIN EN ISO 4287* aus dem gefilterten Rauheitsprofil zu bestimmen [ISO4287]. Auch bei der Bestimmung der Rauheit sollten mehrere Prüfstrecken in unterschiedlichen Ausrichtungen auf einer Fläche vorgesehen werden, um statistische Aussagen über die Streuung der Rauheit innerhalb der Führungsfläche zu erhalten.

Bei der Begutachtung der Rauheitsprofile ist zusätzlich die qualitative Charakteristik von Bedeutung, weil die Ausprägung von Spitzen die Funktionssicherheit der aerostatischen

Elemente beeinträchtigt. Durch die Fehlstellen unterhalb des Bezugsprofils, wie z. B. Poren oder Oberflächenrisse, wird lediglich der Druckluftverbrauch der Führungselemente erhöht und die Steifigkeit geringfügig herabgesetzt.

6. Ordnung - Materialfehler

Gestaltabweichungen 6. Ordnung beschreiben Fehlstellen im Submikrometerbereich, die durch den Aufbau der Materie zustande kommen. Für aerostatische Führungsflächen sind diese Materialfehler nicht von Bedeutung.

Fazit

Für die Qualifizierung von aerostatischen Führungsflächen sind die Gestaltabweichungen der 1. bis 5. Ordnung von Bedeutung. Für weitere Ausführungen werden Formabweichungen der 1. Ordnung als globale Abweichungen bezeichnet. Unter lokalen Abweichungen werden die Gestaltabweichungen der 2. bis 5. Ordnung zusammengefasst. Bei hinreichend genauer Kenntnis der Ausprägung und des Langzeitverhaltens der globalen Abweichungen ist eine Bahnkorrektur über die Regelung des Positioniersystems möglich, sofern diese aus lokaler Sicht auch durch die Überlagerung mit den Gestaltabweichungen der Ordnungen 2 bis 5 nicht zur Funktionsbeeinträchtigung des aerostatischen Elementes führt.

2.2.2 Erzeugung von Präzisionsflächen

Zur Realisierung von ebenen Oberflächen an Betonbauteilen, welche den Einsatz von Luftlagerelementen ermöglichen, stehen generell die in Tabelle 2.5 zusammengefassten Fertigungsverfahren zur Verfügung. Durch subtraktive Feinbearbeitung wie Schleifen und Läppen ist die Herstellung von Präzisionsoberflächen aus Beton mit Rauheiten von $R_a = (1,6..6,3) \mu\text{m}$ und $R_z = (6,3..25) \mu\text{m}$ möglich [Kra18]. Im Patent *DD 00133201A1* wird ein Werkzeugmaschinenmodell aus Beton mit geschliffenen Führungsflächen analog der Technologie zur standardisierten Herstellung von Terrazzoplatten nach *DIN EN 13748-2* beschrieben [Ale85], [EN13748-2]. Die Anforderungen an Führungsflächen für aerostatische Elemente wurden jedoch mit dieser Technologie nicht erfüllt [Nie78].

Neben dem Schleifen können auch urformende Verfahren für den Abguss von luftlagertauglichen Oberflächen angewendet werden. Unter Abformen wird die direkte Replikation eines **Abformnormal**s (Gießformoberfläche) mit hinreichend kleinen Gestaltabweichungen verstanden. Die Präzisionsoberfläche kann unmittelbar während des Gießprozesses oder mittelbar nachträglich durch den Verguss mit einer weiteren Abformmasse entstehen.

Tabelle 2.5: Varianten zur Herstellung von luftlagertauglichen Funktionsflächen nach Fertigungsverfahren und Zeitpunkt der Formgebung [DIN8580]

Verfahren	Fertigungsverfahren nach DIN 8580				finale Formgebung	
	Urformen	Trennen	Fügen	Beschichten	direkt	nachträglich
Schleifen/Läppen		X				X
Abformen	X				X	X
Einbetten			X		X	X
Aufgießen				X		X

Der mittelbare Abformprozess kann erfolgen, wenn Schwindprozesse infolge von Erstarrung, Abkühlung oder Aushärtung der Abformmasse des Grundkörpers abgeschlossen sind. Da die Schichtstärke der zusätzlich aufzubringenden Abformmasse bezogen auf die Gesamtabmessungen sehr klein ist, hat deren Schwindung nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gestaltabweichungen des Bauteils. Nach dem direkten Einbetten von Funktionselementen während des Gießens wird die Funktion von Luftlagerelementen durch die Präzisionsoberflächen der vergossenen Einlegeteile sichergestellt.

Das Aufgießen bzw. Auftragen von zusätzlichen Schichten zum Einebnen der lokalen und globalen Abweichungen ist das unsicherste urformende Verfahren, da die verbleibenden Gestaltabweichungen stark von den Fließeigenschaften des Beschichtungswerkstoffes und der Prozessführung abhängen. Durch das Vergießen von Einlegeteilen, die zum Gusswerkstoff unterschiedliches mechanisches und thermisches Werkstoffverhalten aufweisen, werden Inhomogenitäten in die Maschinenbauteile eingebracht. Diese führen zu Spannungen und zu schwer kontrollierbaren Verformungen bei vorhandenen Betriebsbeanspruchungen.

Mit direktem unmittelbarem Abformen können Bauteile mit den benötigten Toleranzen und einer guten Materialhomogenität hergestellt werden. Dieses Verfahren hat das höchste Potenzial zur Senkung der Herstellkosten für Präzisionsbauteile, da der Nachbearbeitungsaufwand im Vergleich zum Schleifen viel geringer ist oder komplett entfällt.

Im Bereich des Maschinenbaus gab es bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts Bestrebungen, Stahl- und Graugussbauteile durch Bauteile aus Beton zu ersetzen [Jac02]. Diese konnten sich jedoch in Folge des vergleichsweise hohen Oberflächenverschleißes bzw. von frühzeitigen Ermüdungserscheinungen bei mechanischer Beanspruchung nicht durchsetzen. Erst mit der Entwicklung von polymergebundenem Beton in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden wieder Versuche zur Herstellung von direkt abgeformten Präzisionsflächen oder eingebetteten, metallischen Bauteilen mit Präzisionsoberflächen unternommen. Hierbei wurde festgestellt, dass es möglich ist, Reaktionsharzbetonbauteile für Führungsanwendungen unter Einhaltung der notwendigen geometrischen Toleranzen im urformenden Prozess herzustellen [Mas10], [Jac02].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine zeitlich uneingeschränkte Patentrecherche bezüglich der urformenden Herstellung von Präzisionsoberflächen in den *Internationalen Patent Klassen* von:

- Sektion B - Arbeitsverfahren/Transportieren,
- Sektion E - Bauwesen/Erdbohren/Bergbau,
- Sektion F - Maschinenbau/Beleuchtung/Heizung/Waffen/Sprengen sowie der
- Sektion G - Physik durchgeführt.

Durch unmittelbares bzw. direktes Abformen konnten die Anforderungen an luftlagertaugliche Oberflächen jedoch bis Ende der 90er Jahre nicht erfüllt werden. Daher war in der Reaktionsharzbetontechnologie stets ein weiterer Prozessschritt, wie nachträgliches Abformen oder spanende Nacharbeit vom Mineralguss bzw. eingebetteten Funktionselementen, notwendig. Beispielsweise wurde 1986 laut Patentschrift *EP 0253930 A1* ein Verfahren zur Herstellung von Maschinenbauteilen mit präzisen Oberflächen aus Beton durch Abformen auf Stahl- oder Natursteinoberflächen veröffentlicht. Nachgelagert war hier ebenfalls ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt zur finalen Feinbearbeitung der Betonoberfläche bzw. eingebetteter Einsätze aus Naturhartgestein, Marmor oder Quarz [Rog86].

In der Patentschrift *DE 10251228 C1* aus dem Jahr 2002 wurde durch die *Siemens AG* erstmals ein Verfahren zur urformenden Herstellung von Maschinenbauteilen mit unmittelbar abgeformten luftlagertauglichen Oberflächen veröffentlicht. Mittels direktem Abformen von Polymerbeton auf einer Abformlehre aus geläpften Naturhartgestein wurde hierbei die notwendige Qualität der Führungsflächen realisiert. Die Patentansprüche beziehen sich auf das Abformen von Polymerbeton auf einem Geometrienormal. Die erreichbare Ebenheit ist jedoch durch die hohen Aushärtetemperaturen von mindestens 40°C beschränkt, da es durch die ungleichmäßige Erwärmung und Abkühlung des Bauteils zu thermisch induzierten Spannungen und Deformationen kommt [Vae03].

Bei der Herstellung von Reaktionsharzbetonbauteilen kann eine Steigerung der Abformgenauigkeit durch die in der Patentschrift *DE 19714736 C1* dargelegten Maßnahmen erzielt werden. Hierbei werden die Schalungswände mit Epoxidharz bestrichen und ein möglichst großer Volumenanteil des späteren Gussteils mit bereits ausgehärteten Reaktionsharzbetoninlays gefüllt. Somit wird nach dem finalen Verguss der Zwischenräume ein Minimum an Schwund erreicht. Durch das nun geringere absolute Schwindmaß über die Gesamtabmessungen des Bauteils wurde die erreichbare Ebenheit von $\approx 800 \mu\text{m m}^{-1}$ auf $\approx 60 \mu\text{m m}^{-1}$ verringert [Gro98]. Für die Replikation von luftlagertauglichen Oberflächen durch das direkte Abformen von Beton auf Naturstein sind keine Patentschriften, Offenlegungsschriften, Patentanmeldungen oder relevante Veröffentlichungen bekannt.

2.3 Leichtbau

Der Aufbau von Maschinensystemen mit hoher Dynamik wird durch die Reduzierung der Masse und der Masseträgheitsmomente der bewegten Elemente der kinematischen Struktur unterstützt. Die Antriebsleistung zum Erreichen der benötigten Beschleunigungen und damit die mechanischen sowie die thermischen Beanspruchungen, welche zu Verformungen führen, wird hiermit minimiert. Bewegliche Bauteile werden daher unter dem Grundsatz des Leichtbaus gestaltet. Im Vergleich zu Gestellbauteilen ist hierbei an den hochbeanspruchten Stellen keine großzügige Materialverwendung möglich. Dadurch sind kaum Sicherheitsreserven vorhanden und die Bauteil- oder Betriebsfestigkeit ist für die auftretenden Betriebslasten nachzuweisen [Sch16], [SS16].

Die maßgebliche Eigenschaft zur Feststellung der Leichtbaufähigkeit eines Werkstoffes ist die *spezifische Steifigkeit* C_{spez} , wobei die Relation aus E-Modul E und Dichte ρ gebildet wird. Ein zweites Merkmal, welches durch die Relation von Streckgrenze R_e und Dichte ρ gebildet wird, ist die *spezifische Festigkeit* R_{spez} [DL09], [Hai06]. Mit diesen beiden Kenngrößen lässt sich das Potenzial eines Werkstoffes zum Leichtbau abschätzen und verschiedene Werkstoffe können verglichen werden.

Tabelle 2.6: Mittlere spezifische Steifigkeiten und spezifische Festigkeiten verschiedener Werkstoffe mit Leichtbaupotenzial errechnet aus den Werten der Tabelle 1.1

<i>Material</i>	<i>spezifische Steifigkeit</i>		<i>spezifische Festigkeit</i>	
	absolut	relativ zu Stahl	absolut	relativ zu Stahl
Einheit	kNm/kg	%	Nm/kg	%
Stahl (Bezug) ¹	26,6..26,9	—	33,1..108,3	—
Aluminium ¹	25,0..26,9	-6%..±0%	32,1..203,1	-55%..+188%
Standardbeton ²	10,7..25,0	-60%..-7%	19,6..125,0	-72%..+77%
Polymerbeton ²	12,5..19,6	-53%..-27%	41,7..78,3	-41%..+11%
SCC (Spezialbeton) ²	17,9	-33%	43,7	-38%
Gusseisen ¹	11,9..25,7	-55%..-4%	97,3..159,7	+37%..+126%
Al ₂ O ₃ -Keramik ²	92,5	+246%	668,4	+845%
SiC-Keramik ²	116,1..145,2	+336%..+440%	1129,0	+1114%
Kohlefaserverbund ¹	10,2..51,7	-62%..+92%	173,5..738,6	+45%..+945%

Zur Bestimmung der spezifischen Festigkeit wurden die werkstoffspezifischen Kennwerte verwendet

¹Zugfestigkeit, ²Druckfestigkeit

In Tabelle 2.6 sind die einstellbaren bzw. erreichbaren Wertebereiche dieser spezifischen Eigenschaften aufgelistet und mit den Werten von Stahl verglichen. Als Basis für den direkten Vergleich wurden die Kennwerte für die beim jeweiligen Werkstoff zu bevorzugende Beanspruchung herangezogen. Die spezifische Steifigkeit von Stahl kann nicht von hochfestem Reaktionsharzbeton oder hydraulisch gebundenem Beton erreicht werden.

Auffällig ist das geringe Leichtbaupotenzial des SCC mit nur $\frac{2}{3}$ der relativen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit. Diese besondere Betonmischung wurde jedoch für Gestellbauteile mit möglichst hoher Abstützmasse konzipiert und optimiert.

2.3.1 Gewichtsreduktion

Der Aufbau von Maschinensystemen mit hoher Dynamik wird durch die Reduzierung der Massen und der Massenträgheitsmomente der bewegten Elemente der kinematischen Struktur begünstigt. Beim konventionellen Gießen für dünnwandige Bauteile aus Eisen- und Nichteisenlegierungen in Dauerformen sind mindestens zwei Formteile, die in der Formteilungsebene verbunden sind, erforderlich. Beim Abformen von Bauteilen aus Beton kann eine einseitig offene Gießform (Schalung) verwendet werden.

Neben den vorteilhaften Materialeigenschaften von Beton herrscht durch den Urformprozess bei Raumtemperatur zusätzlich eine hohe Gestaltungsfreiheit in der Struktur und eine breite Auswahl von verwendbaren Schalungswerkstoffen. Hohe Widerstandsmomente bei geringer Masse können erreicht werden, indem die Formkerne aus sehr leichtem Kunststoffschaum oder -hohlkörpern im Gusskörper verbleiben, sofern diese gegen Aufschwimmen gesichert sind. Diese Gestaltungsweise findet bereits für zahlreiche Anwendungen im Bauwesen Einsatz.

Seit dem Jahr 2005 sind z. B. Hohlkörpermodule aus Kunststoff von der Firma *Heinze Cobiax Deutschland GmbH* zur Herstellung von Tragstrukturen verfügbar, welche in einer regelmäßigen Anordnung vergossen werden [Cob05].

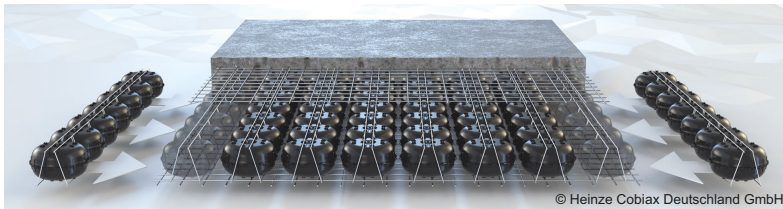


Abbildung 2.3: Anordnung der Elemente für eine Gebäudedecke unter Verwendung von SL-Modulen der Firma *Heinze Cobiax Deutschland GmbH* [Cob22]

Mit der Gebäudedeckenanordnung gemäß Abb. 2.3 wird:

- eine Gewichts- und Betoneinsparung von bis zu 35%,
- eine Einsparung von maximal 15% des benötigten Bewehrungsstahls und damit
- ein um 20% reduzierter CO₂ Verbrauch bei äquivalenter Tragfähigkeit erzielt.

Zusätzlich kann bei Zugrundelegung einer äquivalenten Durchbiegung die Querschnittshöhe gegenüber konventionell gefertigten Betondecken um 8% reduziert werden. Zur Herstellung von Röhrenbetondecken werden Fertigbauteile mit längssitzenden röhrenförmigen Hohlräumen im Äquatorialquerschnitt eingesetzt, um Gewicht zu sparen.

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von dünnwandigen modularen Bauteilen als Gießform, welche nach dem Betonieren im fertigen Gusskörper verbleiben. Bei diesem an die Herstellung von Filigrandecken angelehnten Verfahren wird die vollständige Tragfähigkeit erst nach dem finalen Abformprozess erreicht.

2.3.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Betriebsfestigkeit

Aufgrund der in Tabelle 2.6 aufgeführten geringen Werte für die spezifische Steifigkeit bzw. Festigkeit gegenüber Stahl und Aluminium wird für Beton die Notwendigkeit zur Steigerung und Absicherung der Betriebsfestigkeit deutlich. Zusätzliche Maßnahmen für die Betriebsfestigkeitssteigerung sind:

- beanspruchungs- und werkstoffgerechte Gestaltung,
- Einprägung von Druckvorspannung in den auf Zug beanspruchten Bereichen,
- Einbringung von Armierung
- Beeinflussung der Bauteiloberfläche

Die **Gestaltung** von Betonbauteilen und die Entwicklung von Bauelementen unter Einsatz von **Spannbeton** ist im Bauingenieurwesen bereits eingehend bei der Errichtung von freitragenden Gebäudeelementen [EN13693] sowie im Brückenbau [EN15050] untersucht worden. Die hieraus abgeleiteten Richtlinien besitzen allgemeine Gültigkeit und können direkt bei der Gestaltung von Maschinenbauteilen verwendet werden.

Spannbeton für Maschinenbauteile

Die Verwendung von unmittelbaren und mittelbaren Spannelementen ermöglichte Ende der 60er Jahre laut Patent Nr. *DE 1575278 A1* erstmals den Einsatz von Beton für hochfeste Gestellbauteile in Bearbeitungsmaschinen [Sei70]. Durch Spannelemente werden

Druckvorspannungen eingebracht. Die Bauteilfestigkeit wird erhöht, da im Betriebsfall keine oder lediglich tolerierbare Zugbeanspruchungen auftreten.

Durch **unmittelbare Spannelemente** wird ein direktes Verspannen des Betons erwirkt. Hierbei werden Zugseile bzw. -stäbe aus Stahl, Glas- oder Kohlenstofffasern vor dem Gießprozess gedehnt und bleiben bis nach dem Aushärten in der Schalung fixiert [Sch07]. Nach dem Ausschalen erfolgt eine gleichmäßig verteilte Verspannung entlang des Spannelementes. Bei der **mittelbaren Verspannung** wird das Bauteil über Zuelemente, welche mittels Spannplatten auf die Stirnflächen von Trägern einwirken, mit Vorspannung versehen.

Die mittelbare Verspannung ermöglicht die Erzeugung eines definierten Spannungs- und Verformungszustandes. Der Aufwand hierfür ist bei unmittelbarem Spannbeton vergleichsweise hoch, da dieser Zustand bereits vor dem Betonieren durch die Dehnung der Spannelemente definiert werden muss. Die Spannungsverteilung im ausgehärteten Bauteil ist im Vergleich zur mittelbaren Variante homogener, sobald die Geometrie der Bauteile die Komplexität eines quaderförmigen Balkens überschreitet.

Armierung

Als Armierung werden Einlegeteile bezeichnet, welche von der Betonmatrix vollständig umschlossen sind und idealerweise eine chemische Bindung mit dieser eingehen. Die Festigkeit wird gesteigert, sofern die Zwischenräume der Einlegeteile ausreichende Abstände aufweisen, womit die Packungsdichte der Gesteinskörnung nicht negativ beeinflusst wird. Die sicherheitstechnisch bevorzugte Variante ist die Verwendung von Armierungsmatten aus Baustahl.



© Tobias Krettek @ filmaton.tv

Abbildung 2.4: verschiedene Bewehrungsarten und die realisierbaren Mindestwandstärken für Stahl-, Carbonstab- und Textilbeton des C^3 -Netzwerkes [Car18]

Die Oxidschicht des Stahls geht mit den Reaktionsprodukten der Hydratation eine chemische Bindung auf atomarer Ebene ein und wird fest in der Matrix eingebunden. Durch die Duktilität des Stahls entstehen Sicherheitsreserven beim Bauteilversagen.

Auch die Armierung von Betonelementen mit Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern oder entsprechenden Geweben ist ein stark erforschtes Wissenschaftsgebiet. Hiermit ist bei betongerechter Konfektionierung ebenfalls mit einer Festigkeits- und Steifigkeitssteigerung bei Zug- und Biegebeanspruchung [TUD17] zu rechnen. Die lang- oder kurzfasrige Armierung ermöglicht die Herstellung von sehr steifen und hochfesten Bauteilen [SF08]. Seit dem *C³-Projekt* (Carbon Concrete Composite) der *Technischen Universität Dresden* und den Unternehmen des *C³-Netzwerkes* haben sich durch Kohlenstofffaserarmierung (siehe Abb. 2.4) neue Möglichkeiten zur Wandstärkenreduzierung ergeben [CH17].

Mit der Einbringung zusätzlicher Elemente, wie z. B. Polyamidgewebe (siehe Abb. 2.5-rechts), wird ebenfalls eine Festigkeitssteigerung erwirkt. Diese Art der Bewehrung ist jedoch eher für auftragende bzw. laminierende Verfahren in der Praxis anwendbar. Beim Abformprozess kann sich die Gesteinskörnung in den Fasern verhaken und das Abformergebnis negativ beeinflussen.

Für Bauteile, welche mittels Abformung hergestellt werden, sind starre Bewehrungssysteme sinnvoll. Hierbei sollte ein hinreichend großer Abstand vom ca. 3-fachen der maximalen Größtkornabmessung gewährleistet werden. Durch die notwendigen Bindemittel zur Fixierung der Kohlenstofffasern untereinander (siehe Abb. 2.5-links) sind negative Auswirkungen für den Verbund mit der Betonmatrix zu erwarten, da die Kohlenstofffasern hierdurch im Gegensatz zu Stahlbewehrung keinen direkten Haftverbund mit dem Zementleim eingehen [Sch98], [Rös18].

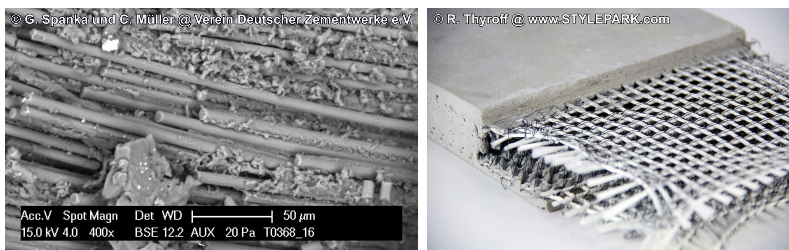


Abbildung 2.5: REM Aufnahme eines Kohlenstofffaserbündels mit Bindemittel (links) [MS21] und der innere Aufbau einer Textilbetonplatte mit einer Gitterstruktur aus Polyamidfasern (rechts) [Sty21]

Das spröde Materialverhalten und der nur auf Adhäsions- und Kohäsionskräften beruhende Verbund führt im Fall einer Überbeanspruchung zum sofortigem Bauteilversagen in Form eines Sprödbruches. Für sicherheitsrelevante Bauteile ist der Einsatz von Faserarmierungen laut aktuellem Stand der Technik noch nicht ausreichend untersucht worden und Gegenstand der Forschung.

Bei der Verwendung von Armierungselementen im Präzisionsmaschinenbau ist eine Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Beton und dem Armierungsmaterial vorzunehmen. Hiermit werden thermische Spannungen und thermisch induzierte Verformungen im Betrieb sowie Schädigungen bis hin zum Bauteilversagen während des Transportes verhindert. Die Modifikation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton ist nicht ohne eine Minderung der Festigkeit möglich. Zusätzlich wird durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten die Ausprägung einer homogenen Temperaturverteilung erschwert. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Konzentration auf die Beeinflussung der Bauteiloberfläche zur Steigerung der Betriebsfestigkeit.

Beeinflussung der Bauteiloberfläche

Die Betriebsfestigkeitssteigerung durch die Nachbehandlung der gefährdeten Bauteiloberflächen ist im Maschinenbau weit verbreitet. Die Festigkeit von Stahlbauteilen kann durch eine Wärmebehandlung wie z. B. Induktionshärten oder das Oberflächenhärten, durch das Infiltrieren von Stickstoffatomen beim Einsatzhärten erhöht werden [Kau99].

Beim Kugelstrahlen von Schraubenfedern werden Druckspannungen in die Bauteiloberfläche eingepreßt [Rös02]. Im unverformten Zustand ist der Federdraht im Spannungsgleichgewicht, wobei infolge der Rückfederung nach dem Winden an der Innenseite Zugeigenspannungen entstehen. Diese Eigenspannungen werden während des Kugelstrahlprozesses durch plastische Verformung beseitigt. Beim Ein- und Ausfedern (Druck- oder Zugfeder) wird die Oberflächenspannung dann vorerst umgekehrt, womit die Zugspannungsamplitude im Betrieb um die vorher eingepreßte Druckspannung geringer ist. Somit wird bei gleicher Belastung eine sechs- bis zehnfache Betriebsfestigkeit erreicht [Hai06].

Betonbauteile können durch verschiedene Oberflächentechnologien in ihrer Festigkeit beeinflusst werden. Im Bauingenieurwesen wird die Oberfläche von Betonelementen durch "Dampfhärten" beeinflusst. Beim **Dampfhärten** von Beton wird der Frischbeton samt Schalung bereits vor dem Abbinden in einem Autoklav bei ca. 200°C und einem Überdruck von ca. 15 bar gelagert [Cze55]. Hierbei kommt es durch die Abspaltung von sehr feinen Quarzkörnern bzw. Calciumsilikathydraten während der Hydratation des Zements zu einer verfestigenden Wirkung [Sch58]. Inwieweit der Härtevorgang in die Tiefe des Bauteils

eindringt, ist weitgehend ungeklärt. Da bei diesem Verfahren die Schalung ebenfalls diesen extremen Umweltbedingungen ausgesetzt wird, kann die Maßhaltigkeit eines Fertigteils für Präzisionsanwendungen nicht gewährleistet werden.

Das Materialverhalten von Beton unter mechanischer Beanspruchung ist hochspröde und unterliegt dem Elastizitätsgesetz bis zum Bauteilversagen. Deshalb ist die plastische Verformung der Oberflächen zur Einbringung von Druckvorspannung, wie es bei Schraubendruckfedern üblich ist, für Bauteile aus Beton ausgeschlossen. Die zu erzielende Beeinflussung der Bauteiloberfläche kann alternativ durch eine funktionelle Schichtaufbringung herbeigeführt werden. Da unbehauelter Beton offenporig ist, gibt es eine Vielzahl von Oberflächensystemen mit adhäsiven und kohäsiven Bindungseigenschaften.

2.3.3 Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtung

Durch *Oberflächenschutzsysteme* (OS) kann ein erhöhter Widerstand gegen Flüssigkeiten sowie eine Oberflächenverfestigung erzielt werden. Im Bauingenieurwesen wird die verfestigende Wirkung lediglich für die Restauration gealterter und vom Zerfall bedrohter Zierelemente benutzt, bevor der nachgelagerte Konservierungsprozess beginnt. Oberflächenschutzsysteme für Betonoberflächen und deren Instandsetzung werden durch den *Deutschen Ausschuss für Stahlbeton* (DAfStb) in 13 Gruppen eingeteilt (siehe Tab. A.1). Die Schutzfunktion wird hierbei durch folgende Eigenschaften definiert:

- Diffusionsfähigkeit gegenüber Wasserdampf (H_2O)
- Diffusionswiderstand gegenüber Kohlenstoffdioxid (CO_2)
- Witterungsbeständigkeit (Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen, UV-Strahlung)
- Fähigkeit zur Rissüberbrückung
- Fähigkeit zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit

Das entscheidende Kriterium des DAfStb bei der Einteilung der Oberflächenschutzsysteme sind die Befahrbarkeit der Oberfläche und die Rissüberbrückungsfähigkeit der aufzubringenden Schicht. Diese Schichten auf Acrylharz-, Epoxidharz- oder Polyurethanharzbasis werden allerdings nur zur Erhöhung der Haltbarkeit durch erhöhte Korrosions- und Erosionsbeständigkeit verwendet. Die Versiegelungen der Gruppe *OS3* und die Beschichtungen der Gruppen *OS8*, *OS10*, *OS11* sowie *OS12* sind für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Bauelemente bei mechanischer Beanspruchung vorgesehen [EN1504-2], [VDZ06]. Die Einteilung der Oberflächenschutzsysteme erfolgt nach der Art, der Ausprägung und der Schichtstärke des Auftrages (siehe Abb. 2.6). Es wird zwischen Imprägnierung (a), Versiegelung (b) und Beschichtung (c) unterschieden [WW86], [Sch92].

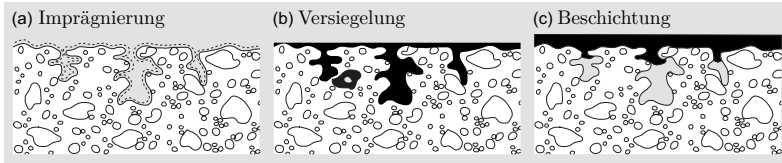


Abbildung 2.6: Beschichtungsarten für die Beschichtung von Neuteilen aus porösem Material mit sehr hoher Oberflächengüte [EN1504-2], [VDZ06]

Nach einer **Imprägnierung** ist kein Auftrag messbar. Die poröse Matrix wird bis zu einer definierten Tiefe infiltriert, welche durch die Oberflächenspannung, die Viskosität und die minimale Partikelgröße des Fluides oder der Dispersion eingestellt werden kann. Durch eine **Versiegelung** wird ein messbarer Auftrag von maximal $50\ \mu\text{m}$ gebildet und die Oberflächenporen je nach Fehlstellenausprägung partiell oder vollständig verschlossen. Mittels einer **Beschichtung** werden die Fehlstellen in der Bauteiloberfläche komplett verschlossen und ein beliebig starker Auftrag $> 50\ \mu\text{m}$ appliziert. Oberflächensysteme zur Verbesserung der Abriebfestigkeit sowie Verringerung der Rauheit von mineralischen Oberflächen werden z. B. im Patent Nr. *DE 102005040965 B4* geschützt [Rei09].

Die Beschichtung zur Erhöhung der Betondauerhaftigkeit bzw. der Beständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen ist ein weitreichendes Thema in der Baustoffforschung. Die Klassifizierung von Beschichtungen nach Art, Anwendungsfall und Auswirkungen ist detailliert in der *Instandhaltungsrichtlinie des DAfStb* und in der *DIN EN 1504-3* aufbereitet [VDZ06], [EN1504-3]. Hierbei werden jedoch ausschließlich Beschichtungen zur Erhöhung der Bauteildauerhaftigkeit aufgeführt. Im Jahr 2016 erfolgte die Erweiterung der *DAfStb-Richtlinie* um die *Verstärkung des Betontragwerks* durch Beschichtungen.

Die Prinzipien und Verfahren zur Instandhaltung wurden in Tabelle 2.7 systematisiert [Bau18a]. Für die Erhöhung der Betriebsfestigkeit können die Prinzipien 3 bis 5 Anwendung finden. Beim Bandagieren können gefährdete Querschnitte und makroskopischen Fehlstellen durch eine außenliegende Stützschrift verstärkt werden. Die Verstärkung von Bauteilen durch *„aufgeklebte Bewehrung“* eignet sich für komplexere Geometrie nur bedingt. Für die Betriebsfestigkeitssteigerung von Präzisionsbauteilen ist der Ausgleich von mikroskopische Fehlstellen zielführend. Zusätzlich ist das gleichmäßige Aufbringen von Oberflächensystemen mit niedriger Viskosität bei komplexerer Geometrie technologisch leichter zu beherrschen als der manuelle Auftrag von dicken Schichten bei hoher Viskosität.

Die direkte Erhöhung der Betriebsfestigkeit durch die Beschichtung von Bauteilen ist laut dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik noch nicht erforscht und wird im Rahmen dieser Arbeit erstmals untersucht.

Tabelle 2.7: Prinzipien und Verfahren zur Instandhaltung von Betontragwerken [Rau18]

<i>Prinzip</i>	<i>Verfahren</i>
1. Schutz gegen das Eindringen von Stoffen	Verhinderung des Eindringens von betonangreifenden, korrosionsfördernden Stoffen (z. B. weiches Wasser, sonstige Flüssigkeiten, Dampf, Gas, Chemikalien) oder des Angriffs durch Mikroorganismen. Das Prinzip ist zum Schutz von ungerissemem und gerissemem Beton anwendbar. Im Bereich von Trennrissen ist es auch anwendbar, um das Eindringen von Stoffen, insbesondere Flüssigkeiten durch Risse und Hohlräume in Bauteilen aus Beton zu verhindern.
2. Regulierung des Wasserhaushaltes des Betons	Einstellen und Aufrechterhalten des Feuchtezustands des Betons innerhalb eines unkritischen Bereiches. Dazu ist es i. d. R. erforderlich, das Eindringen des Wassers in den ungerissemem und gerissemem Beton zu reduzieren oder zu verhindern und gleichzeitig einen Austrag von Wasser aus dem Beton über die Dampfphase zu ermöglichen. Die Geschwindigkeit von feuchteabhängigen Schädigungsprozessen im Beton soll dadurch auf ein unschädliches Maß reduziert werden.
3. Reprofilierung oder Querschnittsergänzung	Wiederherstellung eines Betonbauteils hinsichtlich seiner vorgesehenen geometrischen Form und Funktion mit Betonersatz durch Handauftrag, Verguss oder Aufspritzen
4. Verstärkung des Betontragwerks	Erhöhung der Tragfähigkeit eines Betontragwerks gegenüber dem Soll- oder Ist-Zustand oder Erhöhung der Bauteilsteifigkeit durch aufgeklebte Bewehrung oder das Befüllen bzw. den Ausgleich von Fehlstellen mittels Mörtel oder zusätzlichen Beton.
5. Erhöhung des Widerstandes gegen physikalischen Angriff	Erhöhen des Widerstandes gegen physikalischen oder mechanischen Angriff durch Beschichtungen oder Betonersatz.
6. Erhöhung des Widerstandes gegen chemischen Angriff	Erhöhen des Widerstandes gegen chemischen Angriff durch Beschichtungen, Betonersatz oder dauerhafte Bekleidungen.
7. Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität	Schaffung von chemischen Bedingungen, bei denen die Oberfläche der Bewehrung ihren passiven Zustand beibehält oder wieder in einen passiven Zustand versetzt wird. Die Korrosion der Bewehrung kommt dadurch praktisch zum Stillstand und der vorhandene Abrostungszustand bleibt unverändert bestehen.
8. Erhöhung des Elektrolytwiderstandes	Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit des Betons zur Reduzierung des elektrolytischen Teilprozesses. Dazu muss der Wassergehalt des Betons begrenzt werden. Die Korrosionsgeschwindigkeit sinkt bei ausreichender Erhöhung des elektrolytischen Widerstandes des Betons auf ein unschädliches Maß.

Fazit

Aus dem dargestellten Stand der Technik lässt sich der folgende Forschungsbedarf ableiten:

1. Die Geometriestabilität wird sowohl bei Bauteilen auf Basis von Naturhartgestein als auch Beton nach einer langen Stabilisierungszeit erreicht. Trotz einer kürzeren Lieferkette ist die Durchlaufzeit für Präzisionsbetonbauteile zu lang.
2. Die Festigkeit und Steifigkeit von Beton ist für Präzisionssysteme ungenügend, um die Konkurrenzfähigkeit des Werkstoffes Beton gegenüber Eisen- und Nichteisenlegierungen bei der Verwendung als Konstruktionswerkstoff im Präzisionsmaschinenbau zu gewährleisten.
3. Zur Überwindung der Zielkonflikte zwischen den speziellen Anforderungen von ruhenden Bauteilen gegenüber denen von bewegten Bauteilen fehlen Gesamtkonzepte für Präzisionssysteme auf der Basis von Beton.
4. Die Angaben zu Schwindformen und deren Ausprägung sind in der Vergangenheit nur sehr knapp behandelt worden. Daher fehlen Daten über die Reproduzierbarkeit der zu erwartenden Gestaltänderungspotenziale für Standardbetone.
5. Es existieren keine praxistauglichen Simulationsmodelle zur Vorhersage der Folgen von chemisch-physikalisch bedingten Gestaltänderungsprozessen für die reproduzierbare Herstellung von Präzisionsbauteilen aus Beton.
6. Für direkt abgeformte Betonbauteile mit integrierten Funktionsflächen fehlen die Grundlagen, um eine Technologie zur reproduzierbaren Herstellung von Präzisionsbauteilen im Maschinen- und Gerätebau zu ermöglichen.
7. Die Ausarbeitung der wissenschaftlichen und versuchstechnischen Grundlagen bezüglich Betriebsfestigkeit für die Etablierung von modernen Armierungsmethoden für dynamisch beanspruchte Maschinenbauteile aus Beton mittels Faserverstärkungen durch Glas-, Aramid oder Kohlenstofffasern ist noch nicht erfolgt.
8. Es existieren keine Armierungswerkstoffe mit adäquaten thermischen Eigenschaften zu Beton mit denen die Herstellung von thermisch ausgewogenen Präzisionsbauteilen aus Beton möglich ist.
9. Die Betriebsfestigkeitssteigerung mittels eines flächigen Auftrages von Beschichtungsmaterial auf ein poröses Bauteil, welche auf eine äußere Verstärkung des Bauteiles zurückgeführt werden kann, ist bisher noch nicht adressiert worden.
10. Zur mathematischen Beschreibung und zur Simulation der Auswirkungen von versteifenden Schichten auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus porösem mineralischem Werkstoff existiert keine wissenschaftliche Basis.

3 Ziele der Arbeit

Das Primärziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Erarbeitung der wissenschaftlich-technischen und technologischen Grundlagen für direkt abgeformte Bauteile für Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau auf Basis von Beton. Hierbei sind die, für die Präzisionstechnik unerlässlichen, vorteilhaften mechanischen, schwingungstechnischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Naturhartgestein (siehe Tab. 2.1) zu erfüllen. Aufgrund von höherer Gestaltungsfreiheit, besserer Verfügbarkeit und erhöhter Wirtschaftlichkeit soll eine breitere Anwendung von Betonbauteilen ermöglicht werden.

Die Auswirkungen thermischer Änderungen auf die Gestaltabweichung des Gesamtsystems kann stark reduziert werden, wenn auf das gleiche Basismaterial für unbewegte und bewegte Bauteile zurückgegriffen wird. Daher wurden zwei Hauptthemengebiete identifiziert:

1. Die Technologieentwicklung zur urformenden Herstellung von Bauteilen mit integrierten Präzisionsoberflächen unter minimalem Nachbearbeitungsaufwand
2. Die Entwicklung der Grundlagen für Bauteile mit hoher spezifischer Steifigkeit

Höchste Forderungen an die Gesamtsteifigkeit führen in der Präzisionstechnik mehrheitlich zu überbestimmten Anordnungen. Deren Beherrschung erfordert einen erhöhten Aufwand in der Fertigung und Montage. Mit der Realisierung von Funktionsflächen und Koppelstellen bei minimalem Bearbeitungsaufwand wird der Fertigungsaufwand minimiert. Für die fertigungs- und montagegerechte Gestaltung sind entsprechende Richtlinien abzuleiten. Die Gewährleistung eines möglichst hohen E-Moduls von $\geq 50 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ durch eine spezielle Zusammensetzung des Betons ist eine wesentliche Forderung, um Bauteile mit hoher Steifigkeit realisieren zu können. Üblicherweise besteht dieser Anspruch in den herkömmlichen Anwendungsbereichen des Werkstoffs Beton nicht.

Bauteile mit urgeformten Präzisionsflächen

Bauteile für Präzisionssysteme müssen äußerst formstabil ausgeführt werden. Die zu erfüllenden Anforderungen werden in dieser Arbeit durch die Anwendung von planaren aerostatischen Führungen der beweglichen Bauteile von Planar- oder Linearantrieben gesetzt. Die Verformungen müssen unter den funktionsbedingt sehr geringen zulässigen Abweichungen verbleiben. Der Nachweis erfolgt durch die messtechnische Untersuchung von abgessenen Probekörpern über ein hierzu entwickeltes Messverfahren.

Selbstverdichtender Beton ist ein Hochleistungsbeton mit großem Potenzial zur rationellen Herstellung von Bauteilen mit komplexer Gestalt. Die Integration von weiteren notwendigen Funktionen wird hierdurch wesentlich verbessert. Einbau- sowie Verbundteile können mit reproduzierbarer Relativlage in die Schalungen eingelassen und eingebettet werden. Mit der Verwendung von selbstverdichtendem Beton wird die Entlüftung des Gemisches beim Gießvorgang ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie ermöglicht. Die Ausfüllung der Schalungsgeometrie erfolgt hierbei vollständig und homogen.

Weiterhin ist eine mit Naturhartgestein vergleichbare Langzeitstabilität zu belegen. Auch der Einfluss der klimatischen Aufstellbedingungen, von vergütenden Nachbehandlungen, den Prozessbedingungen beim Gießen und der Betonzusammensetzung selbst ist zu klären. Für den Nachweis der Langzeitstabilität bei Geradheits-/Ebenheitssabweichungen von wenigen $\mu\text{m}(\text{m})^{-1}$ sind etablierte Messverfahren zur Bestimmung der Geradheit bzw. Ebenheit zu modifizieren und zu verbessern.

Unter der Verwendung der Ergebnisse von Untersuchungen zum Abform-, Schwind- und Langzeitverhalten von Präzisionsbauteilen ist eine Simulationsmethode zur Vorhersage der zu erwartenden Gestaltänderung zu entwickeln. Hierbei sind aus den Untersuchungsergebnissen zur Bauteilgestalt von quaderförmigen Probekörpern spezifische Eigenschaftsparameter für einzelne favorisierte Betonmischungen zu ermitteln und in die FEM-Simulation zu übernehmen. Durch die Anwendung der Simulationsmethode sollen die Voraussetzungen zur Berücksichtigung der zu erwartenden Gestaltänderung bereits beim Bauteilentwurf geschaffen werden. Mit der Simulationsmethode wird die Ermittlung der Schalungsgeometrie für komplexere Bauteile mit engen Toleranzen ermöglicht.

Das Ziel der Technologieentwicklung ist die Möglichkeit zur reproduzierbaren Herstellung von Funktionsflächen durch die Replikation von Abformnormalen. Die Zielgrößen der geometrischen Toleranzen sind mit einer relativen Formabweichung von $\leq 10^{-5}$ und Rauheiten von $R_z \leq 2 \mu\text{m}$ bzw. $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$ gesetzt und stellen eine Verbesserung zum aktuellen Stand der Technik dar. Durch die Vermeidung von zeit- und kostenintensiven Schleif- und Läppprozessen ergibt sich ein hohes Potenzial zu Kosteneinsparung.

Bauteile mit gesteigerter Betriebsfestigkeit

Leichtbauteile aus Beton für dynamische Anwendungen sollen aus dünnwandigen, filigranen Strukturen bestehen. Hiermit entsteht eine Alternative zu den aktuell als Stahlblechschweißkonstruktionen, Metallguss oder als Frästeile ausgeführten Maschinenbauteilen. Zugleich sind die, für die Präzisionstechnik unerlässlichen, vorteilhaften mechanischen, elektrischen, magnetischen und schwingungstechnischen Eigenschaften von Naturstein zu übernehmen.

Die zu entwickelnde Technologie soll die Herstellung von multifunktionalen Präzisionsleichtbauteilen in den verschiedensten Größenordnungen (Dimensionen von < 1 m bis hin zu mehreren Metern) für den vielfältigen Einsatz im Präzisionsmaschinen- und Gerätebau ermöglichen. Auf der Basis der entwickelten Betontechnologie sollen Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien zur werkstoff-, beanspruchungs- und fertigungsgerechten Gestaltung von Leichtbaubauteilen formuliert werden.

Die grundsätzliche Tauglichkeit dieser Technologie ist für die Anwendung im industriellen Maschinenbau anhand von Kleinseriendemonstratoren mit filigran verrippten, funktionsintegrierten Beton-Präzisionsleichtbauteilen zu demonstrieren.

Weiterhin sind Empfehlungen zum Aufbau von Formen und Formteilen sowie zu den technologischen Verfahren für die Herstellung von dünnwandigen Präzisionsbetonbauteilen aus Beton abzuleiten. Die dazu notwendigen wissenschaftlich-technischen Grundlagen werden zusammengefasst, um die Anwendung der Technologie in der Praxis zu unterstützen.

Aufgrund der vergleichsweise geringen erreichbaren spezifischen Festigkeit von Beton sind Maßnahmen zur Steigerung der Betriebsfestigkeit zu qualifizieren bzw. zu entwickeln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Entwicklungsergebnisse für Funktionsbeschichtungen auf Sol-Gel-Basis für mineralische Werkstoffe vorgestellt. Durch die Funktionsbeschichtung bzw. Beschichtungstechnologie soll ein Ausgleich von Fehlstellen sowie eine gezielte Beeinflussung des Eigenspannungsverlaufes in der Oberfläche erfolgen. Zusätzlich ist eine Verbesserung der Kratzbeständigkeit nach *DIN EN ISO 1518* [ISO1518-1] bzw. Abriebfestigkeit nach *DIN EN ISO 7784-1* [ISO7784-1] und ein erhöhter Widerstand gegen chemisch-physikalische Einflüsse *ISO 16750-5* [ISO16750-5] zu erwarten. Die Beibehaltung der geometrischen Toleranzen der urgeformten bzw. feinstbearbeiteten Funktionsoberflächen steht hierbei im Vordergrund.

Für die Quantifizierung der Betriebsfestigkeitssteigerung ist eine Methodik zu entwickeln, welche die Simulation der physikalischen Auswirkungen von Beschichtungen unter Verwendung von versuchstechnisch gewonnenen Daten ermöglicht. Die Versuche werden standardisiert an Maschinen für die Zug- und Biegeprüfung durchgeführt. Um einen statistisch abgesicherten Beleg für den Einfluss der Beschichtung zu erhalten, sind die versuchs- und messtechnischen Voraussetzungen zu schaffen. Hierfür werden Formen und die Technologie für eine hochreproduzierbare Herstellung von Prüfkörpern mit geringen Maßabweichungen von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ und räumlich homogen verteilten Materialparametern notwendig. Durch die Übertragung der Ergebnisse der mechanischen Prüfung in ein verallgemeinertes Berechnungsmodell, wird die zu erwartenden Betriebsfestigkeitssteigerung für eine beliebige beschichtete Geometrie ermittelt.

4 Werkstoff- und Verfahrensentwicklung

Um Beton als Basiswerkstoff für bewegte und unbewegte Bauteile von Präzisionsmaschinen zu etablieren, ist für die technologische Absicherung ein hoher versuchstechnischer Aufwand erforderlich. Im Rahmen der Betonentwicklung müssen die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die chemisch-physikalischen Vorgänge beim Abbinden und Aushärten untersucht und auf die Anforderungen im Maschinenbau eingestellt werden. Die zu entwickelnden Beschichtungen unterliegen ebenfalls hohen Anforderungen bezüglich des Haftverbundes zum Substrat und der physikalischen Eigenschaften des Beschichtungswerkstoffes selbst. Ferner sind die urformende Herstellung von Betonbauteilen mit sehr engen Form- und Lagetoleranzen und deren anschließende messtechnische Qualifizierung die technologisch anspruchsvollsten Herausforderungen. Bei der Werkstoff- und Verfahrensentwicklung sind daher verschiedene Experimente bzw. Prüfungen unter Verwendung von speziell entwickelten Probekörpern erforderlich.

4.1 Grundlagen für die Werkstoffentwicklung

Die Erfüllung der Anforderungen an Werkstoffe für Präzisionsgestelle, die Verfahrenstauglichkeit und eine realitätsnahe Beschreibung des Gestaltänderungspotenzials stellen die Grundlage für die Betonentwicklung dar. Durch die Replikation von Abformnormalen sollen direkt nutzbare Präzisionsflächen generiert werden. Die errechnete Gestaltänderung beim Aushärten ist die Grundlage beim Entwurf der Schalung. Hierbei werden die zu erwartenden Gestaltabweichungen in invertierter Form präventiv in die Geometrie der Schalung eingeprägt. Durch geschlossene Beschichtungen mit hoher Steifigkeit werden die Bauteiloberflächen versiegelt, die Bauteile verstärkt und die Betriebsfestigkeit erhöht.

4.1.1 Betonentwicklung

Zunächst mussten die primären Anforderungen und Zielgrößen für Frisch- und Festbeton aufgestellt und unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten zusammengetragen werden (siehe Tab. 4.1). Die anforderungsgerechte Entwicklung spezieller SCC-Mischungen [Flo+14] sowie die Prüfung der Verarbeitungseigenschaften nach *DIN EN 12350 Teil 8 bis 11* [EN12350-8], [EN12350-9], [EN12350-10], [EN12350-11] wurde vom *Finger Institut für Baustoffkunde* an der *Bauhaus-Universität Weimar* durchgeführt.

Grundsätzlich gibt es die Möglichkeiten, einen SCC als Mehlkorntyp, als Stabilisierertyp oder aus der Kombination beider Typen auszuführen [Wir22]. SCC unterscheidet sich von Standardbeton durch einen erhöhten Mehlkorngelhalt, den Zusatz eines hochwirksamen Fließmittels und gegebenenfalls eines Stabilisierers. Es ergibt sich eine stabile Feinkorn suspension, in der sich die verschiedenen Gesteinskörnungen gegenseitig in Lage halten, ohne zu sedimentieren. Bei der Projektierung der Betonmischung ist ein Kompromiss zwischen der Erhöhung der Fließfähigkeit und ausreichender Sedimentationsstabilität zu finden.

Tabelle 4.1: Primäre Anforderungen an Betone für Maschinengestelle mit Präzisionsflächen

Anforderung	Wert	Bemerkung
1. Frischbetoneigenschaften		
1.1 Konsistenz	selbstverdichtend	hohe Fließfähigkeit / geringe Viskosität
1.2 Sedimentation	stabil	keine Entmischungserscheinungen
1.3 Frischbetonrohddichte	$\geq 2,50 \text{ g}(\text{cm})^{-3}$	vgl. (2,8..3,0) $\text{g}(\text{cm})^{-3}$ bei Naturstein
1.4 Luftporengehalt	$\leq 2,5 \text{ Vol}\%$	sehr gering im Vgl. zu Standardbeton
1.5 Frischbetontemperatur	$\leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$	20 °C Umgebungstemp. beim Abformen
2. Festbetoneigenschaften		
2.1 Festbetonrohddichte	$\geq 2,45 \text{ g}(\text{cm})^{-3}$	vgl. $\geq 2,8 \text{ g}(\text{cm})^{-3}$ bei Naturstein
2.2 Druckfestigkeit	$> 100 \text{ N}(\text{mm})^{-2}$	hochfester Beton
2.3 stat. E-Modul ¹	$\geq 45 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$	nach 28 Tagen Aushärten
2.4 dyn. E-Modul ¹	$\geq 55 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$	nach 28 Tagen Aushärten
2.5 Wasseraufnahme	$< 1,2 \text{ Vol}\%$	Auslagerung im Tauchbecken
2.6 axialer Schwund	$\leq 0,2\%$	entlang der Schwerachse ²
2.7 Ebenheit	$\leq 50 \mu\text{m}(\text{m})^{-1}$	absolute Ebenheitsabweichung ³
2.8 relative Ebenheit	$\leq 3 \mu\text{m}(\text{m})^{-1}$	Langzeitstabilität des Ebenheitsprofils
2.9 Rauheit	$R_z \leq 2,5 \mu\text{m} / R_a \leq 0,25 \mu\text{m}$	urgeformte Präzisionsflächen

¹Materialprüfung nach *DIN 1048-5* bzw. *DIN EN 12390-13* [DIN1048-5], [EN12390-13]

²temperaturstabile Prismen (100 · 100 · 400) mm³ nach *DIN EN 12390-1* [EN12390-1]

³abgeformt auf einem Abformnormal mit einer Ebenheitsabweichung $\Delta H \leq 6 \mu\text{m}/\text{m}$

Beim **Mehlkorn**typ wird ein hoher Gehalt von feinen Gesteinskörnungen mit Partikel durchmessern unter 0,1 mm verwendet, um eine stabile Suspension zu erzeugen, in der die grobe Gesteinskörnung schwebt. Die Abstimmung der einzelnen Komponenten Mehlkorn, Wasser, Fließmittel und Gesteinskörnung ist bei diesem Typ SCC besonders wichtig. Abweichungen bei den Mischungsverhältnissen oder bei den Ausgangsstoffen selbst, wie z. B. Schwankungen der Dichte oder des Feuchtigkeitsgehaltes können zu Sedimentation und Segregation oder zu unzureichender Fließfähigkeit führen. Die Projektierung der Betonmischungen erfolgt nach dem Verfahren von *Okamura* und wird hinsichtlich der verfügbaren Ausgangsstoffe auf europäische Verhältnisse angepasst [OO95], [Agg+08].

Hierbei wird zuerst das optimale Wasser-Mehlkorn-Verhältnis experimentell ermittelt und später darauf basierend die Betonmischung festgelegt.

Der **Stabilisierertyp** weist einen niedrigeren Mehlgörgehalt auf, wohingegen der Wassergehalt erhöht ist. Um ein Absinken der groben Gesteinskörnung und damit ein Entmischen zu verhindern, werden stabilisierende Betonzusatzmittel eingesetzt. Die chemischen Reaktionen von organischen Stabilisierern während der Hydratation und die damit zusammenhängende Stabilität unter verschiedenen Umwelteinflüssen ist weitgehend ungeklärt und Gegenstand aktueller Forschung. Aus diesem Grund und da bei der Verwendung von Stabilisierern die Einbringung von Wasser und zusätzlicher Flüssigkeiten erhöht wäre, wurden die im Rahmen der Arbeit ausgewerteten SCC-Mischungen trotz der höheren technologischen Anforderungen an die Prozessvorbereitung, den Mischprozess und den Abguss selbst als Mehlgörntyp ausgeführt.

Durch die Menge des Zugabewassers werden die Frisch- und Festbetoneigenschaften maßgeblich beeinflusst. Um die theoretisch optimale Wassermenge zu bestimmen, wurden Untersuchungen an:

- **Zementleim** (Gemisch aus dem reinen Bindemittel und Zugabewasser),
- **Mörtel** (Betonmischung mit Zuschlägen bis zur Korngröße von ≤ 4 mm) und
- **Frischbeton** (vollständige Betonmischung) durchgeführt.

Ziel der Zementleimuntersuchungen ist die Ermittlung des Volumenverhältnisses von Wasser zu Feststoff, bei der das jeweilige Wasser-Bindemittel-Gemisch noch nicht zu fließen beginnt, jedoch alle Partikel von Wasser umhüllt sind.



Abbildung 4.1: Betonbestandteile ohne grobe Gesteinszuschläge (a) und Mischvorgang (b)

Die Mörteluntersuchungen dienen zur Projektierung eines fließfähigen Mörtels, der in der Lage ist, die grobe Gesteinskörnung stabil in Schwebelage zu halten. Der von der *Bauhaus-Universität Weimar* projektierte Mörtel (siehe Abb. 4.1 - a) für die untersuchten *SCC-Mischungen* setzt sich aus:

- **Sand** $\hat{=}$ Gesteinskörnung zwischen 0,1 mm und 1 mm,
- **feiner Kies** $\hat{=}$ Gesteinskörnungen zwischen 1 mm und 3 mm,
- **Zement** $\hat{=}$ *CEMI 42,5 R* bzw. *CEM II A-LL 42,5 (Z 632)*,
- **Flugasche** $\hat{=}$ Steinkohlenasche *Asche 25*,
- **Mikro-/Nanosilika** $\hat{=}$ *971-U*/nicht genauer bezeichnet,
- **Zugabewasser** und
- **Fließmittel** $\hat{=}$ *Viscocrete 1053* zusammen.

Das Fließmittel *Viscocrete 1053* ist ein **Polycarboxylatether** (PCE). PCE ist ein Kamm-polymer, welcher sich an die Partikeloberflächen heftet. Durch die negativ geladenen freien Enden wird der Abstand zwischen den Inhaltsstoffen aufgrund der elektrostatischen Abstoßung gehalten und der Beton kann fließen, bis die Hydratation einsetzt. In der ausgehärteten Matrix werden die freien Enden zusammengeschoben und verbleiben mit einem minimalen Volumenanteil im Beton [Deu07].

Die Sieblinien der Gesteinskörnungen werden auf die minimale Wandstärke der jeweiligen Bauteilgeometrie angepasst. Die Maximalabmessung des Größtkorns sollte für eine optimale Formfüllung nicht mehr als die halbe minimale Wandstärke des zu fertigen Bauteils betragen [Flo+14]. Nach dem Vermengen wird das Wasser zugegeben und die verarbeitungsgerechte Fließfähigkeit mit der Zugabe von *Viscocrete 1053* eingestellt (siehe Abb. 4.1 - b). Die Mengenverhältnisse der Inhaltsstoffe für die projektierten *SCC-Mischungen* unterliegen der Geheimhaltung.

Die Optimierung der Zusammensetzung hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften erfolgt am jeweiligen Frischbeton. Hierbei werden die Inhaltsstoffe des entwickelten Mörtels mit den groben Gesteinskörnungen und mit ca. 10% reduzierter Wassermenge vermischt. Das Fließmittel wird abschließend so lange nachdosiert, bis die optimalen Frischbetoneigenschaften eintreten.

Es entstanden SCC-Variationen mit einer Wasserzugabemenge von 37,5% bezogen auf die Zementmasse ($w/z = 0,375$). Der minimale *Wasser-Zement-Wert* w/z von 0,38 für **ultrahochfeste Betone** (UHPC $\hat{=}$ Ultra High Performance Concrete) wurde dabei unterschritten, um die Schwindung zu minimieren [Wes81], [Loh97]. Die Partikel des unhydratisierten Zementanteils, welcher ca. 1,3% beträgt, werden als feste Bestandteile in die Matrix eingebaut. Trotz verringerter Wasserzugabe konnte keine Minderung der Festigkeit gegenüber einer äquivalenten Mischung mit positiv toleriertem w/z festgestellt werden.

Eigenschaften der entwickelten Spezialbetone

Im Rahmen dieser Arbeit wurden von der *Bauhaus-Universität Weimar* sechs verschiedene SCC vom Mehlkorn- und Stabilisierertyp mit verschiedenen Polymerkomponenten und -anteilen projiziert. Während der Voruntersuchungen wurden die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die erreichte Rauheit und die vorhandene Langzeitstabilität von Präzisionsflächen mit den Anforderungen (siehe Tab. 4.1) verglichen.

Tabelle 4.2: Mechanische und thermische Kennwerte der favorisierten Betone

Betonmischung	SCCI¹	SCCII¹	HPSCC²
mechanische Kennwerte			
Druckfestigkeit f_{ck}	110,1 N mm ⁻²	109,2 N mm ⁻²	≥115 N mm ⁻²
Biegezugfestigkeit f_{ctm}	8,1 N mm ⁻²	7,7 N mm ⁻²	≥9,6 N mm ⁻²
E-Modul (stat.) $E_{statisch}$	45,4 kN mm ⁻²	44,4 kN mm ⁻²	≥45,0 kN mm ⁻²
E-Modul (dyn.) $E_{dynamisch}$	57,9 kN mm ⁻²	53,4 kN mm ⁻²	k. A.
Frischbetonrohddichte ρ	2,52 kg dm ⁻³	2,53 kg dm ⁻³	k. A.
thermische Kennwerte			
Wärmeleitfähigkeit λ	2,12 W (mm K) ⁻¹	1,91 W (mm K) ⁻¹	k. A.
Ausdehnungskoeffizient α	9,7 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹	10,6 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹	k. A.

¹ Entwicklungs- und Messergebnisse der *Bauhaus-Universität Weimar*

² entnommen aus der Europäischen Technischen Zulassung ETA-13/033 [DIB13]

Die Mischungen SCCI und SCCII des Mehlkorntyps wurden aufgrund der erreichten mechanischen und thermischen Kennwerte (siehe Tab. 4.2) und aus den folgenden Gründen favorisiert und für das weitere Vorgehen ausgewählt.

- vertretbare Fließfähigkeit trotz vergleichsweise hoher Viskosität
- sehr geringer Luftgehalt in der Betonmischung von ≈ 2,1 Vol %
- geringes Gestaltänderungspotenzial bzw. Gesamtschwindung ≈ 0,2‰

Zusätzlich wurde eine kommerziell verfügbare Mischung von **ultra-hochfestem SCC** (HPSCC ≙ High Performance Self Compacting Concrete) verwendet, um bei der Qualifizierung der entwickelten SCC-Kompositionen den Bezug zum Stand der Technik herzustellen.

Variation der Prozessführung

Bei der Variation der Prozessführung wurde für die folgenden Testreihen jeweils eine Probe jeder Mischung nach dem Entschalen durch eine Feuchte-Wärme-Behandlung einem künstlichen Alterungsprozess ausgesetzt [VDZ59]. Die Disposition von Bauteilen bei einer Temperatur von $\geq 90^\circ\text{C}$ unter Sattdampfatmosphäre wird im Rahmen dieser Arbeit unter **Autoklavieren** verstanden. Da ein Ergebnis dieses Prozesses die erzwungene und weitgehend vollständige Hydratation ist, kann die Autoklavierung als Vergütungsprozess angesehen werden, wobei die maximale Festigkeit der Betonmischung erreicht wird [Rei22]. Durch das Anlegen von Überdruck kann dieser Prozess zusätzlich beschleunigt werden. Die Autoklavierung erfolgte jedoch ohne Druckbeaufschlagung, womit die Nachbehandlung nicht mit dem "Dampfhärten" (siehe Abs. 2.3.2) zu vergleichen ist.

4.1.2 Beschichtungsentwicklung

Der Werkstoff für die Oberflächenbehandlung sollte als Primärforderung einen höheren *E-Modul* als der Beton aufweisen und die Prinzipien 3 bis 5 aus Tabelle 2.7 erfüllen. Als Nebenfunktion kann das Erfüllen der restlichen Prinzipien die Eigenschaften des Bauteils für die Verwendung im Präzisionsbereich zusätzlich verbessern. Durch das *Regulieren des Wasserhaushaltes* kann das Quell- und Schwindverhalten positiv beeinflusst werden. Mit dem Erzielen einer chemischen Resistenz gegenüber öl- und lösungsmittelhaltigen Substanzen ist eine zusätzliche Qualifizierung zur Verwendung im Maschinenbau gegeben.

Im Rahmen eines Verbundprojektes mit der *Bauhaus-Universität Weimar* wurden drei vielversprechende Ansätze zur Entwicklung von Oberflächenschutzsystemen identifiziert, welche nach dem *Prinzip 2* in Tabelle 2.7 projiziert wurden. Die oberste Forderung war die vollständige Unterbindung des Feuchtigkeitsaustausches zwischen den entwickelten Spezialbetonen *SCCI* bzw. *SCC II* [Flo+14] für Maschinengestelle und der Umgebung, um die Gestaltänderung infolge von Quellen und Schwinden zu minimieren.

Zur Charakterisierung der Haftung wurden die Abreißfestigkeiten nach 7 und nach 28 Tagen bestimmt (siehe Tab. 4.3). Mit den 2K-PUR-Systemen wurden die höchsten Abreißfestigkeiten bei der Beschichtung von "jungen" Betonteilen mit weitgehend abgeschlossener Hydratation erzielt. Es können auch handelsübliche Lacksysteme in allen gewünschten Farbtönen aus z. B. Industrie und Fahrzeugbau eingesetzt werden.

Tabelle 4.3: Abreißfestigkeiten verschiedener Beschichtungssysteme für Bauteile aus SCC I und SCC II nach 7 Tagen und nach 28 Tagen

Basiswerkstoff für die Beschichtung:		SCC I		SCC II	
<i>Beschichtung</i>	<i>Ausführung</i>	7 Tage	28 Tage	7 Tage	28 Tage
Einheit		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
OS 5a	PCC-Feinmörtel (Egalisierungsschicht ¹) + 2-Schichten Acrylatdispersion	0,6	0,4	0,9	0,9
Acrylat	2-Schichten Acrylatdispersion ohne Egalisierungsschicht ¹	1,0	1,0	0,9	0,8
2K-PUR	unverdünntes 2-Komponenten PUR-Harz	3,6	3,8	3,4	4,0

Bestimmung durch Zugprüfung mittels aufgeklebter Zugplatten (Polymethylmethacrylat)

¹Egalisierungsschicht: Grundierung, Haftvermittlung und Alkalisperrschicht

Trotz der relativ hohen Festigkeitswerte der Beschichtungen ist für die Steigerung der Betriebsfestigkeit von Betonbauteilen eine höhere Zugfestigkeit $f_{ctm,SCC II} \leq 8,1 \text{ N(mm)}^{-2}$ bzw. eine höhere Steifigkeit $E_{SCC II} \leq 45 \text{ kN(mm)}^{-2}$ verglichen mit dem Substratwerkstoff (vgl. Tab. 1.1) notwendig. Mit den bekannten Kunststoffbeschichtungen können diese Werte nicht erreicht, sondern nur die Versagenscharakteristik der beschichteten Bauteile in Richtung mehr Duktilität eingestellt werden [Bau18b].

Bei Untersuchungen zur Applikation von Sol-Gel-Systemen auf Betonoberflächen durch das Fachgebiet *Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe* der *Technischen Universität Ilmenau* hat sich im Rahmen dieser Arbeit eine vielversprechende Möglichkeit als Alternative zu Kunststoffbeschichtungen ergeben. Beim Sol-Gel-Prozess entsteht durch die chemische Vernetzung von SiO_2 -Molekülen bei Raumtemperatur ein kristallines Gefüge, welches eine zu Kieselglas ähnliche Struktur aufweist. Hiermit können theoretisch Steifigkeiten von $E \approx 74 \text{ kN(mm)}^{-2}$ und eine Zugfestigkeit von $R_m \approx 100 \text{ N(mm)}^{-2}$ im Bereich von Kieselglas erreicht werden [CR13].

Für das Einstellen der Verarbeitungszeit und der Viskosität des Sols ist die Zugabe von Lösungsmitteln notwendig, welche beim Aushärten entweichen. Durch die hierbei entstehenden Mikroporen können die mechanischen Parameter von Kieselglas nicht erreicht werden. Jedoch tritt aufgrund des Volumenschwundes in der Beschichtung ein zusätzlicher Verfestigungseffekt durch die resultierenden Druckspannungen in der Betonoberfläche auf.

In Tabelle 4.4 sind die wesentlichen Eigenschaften von Oberflächenschutzsystemen nach DAfStb (siehe Abs. 2.3.2) zusammengetragen. Für die Behandlung von Oberflächen im Sol-Gel-Prozess sind alle drei Arten von Oberflächensystemen realisierbar. Da durch eine

Imprägnierung die Ziele einer Oberflächenverfestigung aufgrund der weiterhin ausgeprägten Oberflächenfehler nur bedingt erfüllt werden, sind die Oberflächensysteme der Kategorien der Versiegelungen und Beschichtungen besser geeignet.

Tabelle 4.4: Eigenschaften von Oberflächenschutzsystemen für Beton [Sch92]

Anforderungen	Imprägnierung	Versiegelung	Beschichtung
<i>Schichtstärkedefinition nach DAfStb</i>	– nicht messbar –	$\leq 50 \mu\text{m}$	$> 50 \mu\text{m}$
keine sichtbare Oberflächenveränderung	+	–	–
keine Oberflächenstrukturänderung	(+)	+	–
Oberflächenverfestigung	–	++	+
Erhöhung der Abriebfestigkeit	–	–	++
Fähigkeit zur Rissüberbrückung	–	–	++
Erhöhung der chemischen Beständigkeit	–	–	++
Hydrophobierung der Oberfläche	+	+	+
Reduzierung Flüssigkeitsaufnahme	(+)	+	++
Reduzierung der Gasdiffusion	–	(+)	++

– = untauglich, (+) = bedingt tauglich, + = tauglich, ++ = sehr tauglich

Die Beschichtungen, welche laut Definition einen Auftrag von $\geq 50 \mu\text{m}$ aufweisen müssen, sind ebenfalls nur bedingt geeignet. Um die geforderten Schichtstärken gleichmäßig zu erreichen, müssen diese mit einer relativ hohen Viskosität eingestellt werden. Dabei kommt es durch die geringe Fließfähigkeit des Beschichtungsmaterials zum Einschluss von Luft unterhalb der Oberfläche, was sich wiederum nachteilig auf die Bauteilfestigkeit auswirkt. Die optimale Beschichtungsart zum Erzielen einer Oberflächenverfestigung mit trotzdem vollständig nivellierten Fehlstellen ist definitionsgemäß die Versiegelung.

Die allgemeine Definition von Oberflächensystemen über die vorhandene Schichtstärke (siehe Tab. 4.4) kann allerdings zu Fehlinterpretationen führen. Unter einer Versiegelung wird hierbei lediglich eine definierte Schicht zum Schutz gegen das Eindringen von Substanzen und das Anhaften von Verschmutzungen verstanden, welche eine Schichtstärke von maximal $50 \mu\text{m}$ aufweist und dabei weitgehend die Oberflächentopographie erhält. Dies führt zu einer verminderten Rissüberbrückung.

Durch das Aufbringen von Sol-Gel-Beschichtungen ist die Realisierung geschlossener Schichten mit geringerer Schichtstärke möglich. Deshalb werden in dieser Arbeit weiterführend auch Oberflächensysteme mit einer Schichtstärke von $\leq 50 \mu\text{m}$, die einen vollständig geschlossenen Oberflächenfilm (Vgl. Abb. 2.6 - c) hervorbringen, als Beschichtungen bezeichnet.

Für das Erreichen einer optimalen Festigkeitserhöhung ist die Viskosität in der Weise zu minimieren, dass ein möglichst hoher Anteil der Beschichtung in tiefere Regionen der Bauteiloberfläche vordringt. Die Viskosität muss jedoch hoch genug sein, um einen vollständig geschlossenen, rissüberbrückenden Film auf der Bauteiloberfläche zu hinterlassen. Für eine sichere Applikation ist auch die Vernetzungszeit hinreichend groß einzustellen, um den Infiltrationsprozess nicht frühzeitig zu stoppen.

Eigenschaften der entwickelten Sol-Gel Beschichtungen

Die Entwicklung der Sol-Gel-Systeme wurde im Rahmen eines Verbundprojektes von der Firma *ETC Products GmbH* übernommen. Die Qualifizierung der beschichteten Proben erfolgte an der *TU Ilmenau* in Zusammenarbeit mit dem *Fachgebiet Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe*. In Abb. 4.2 (a) ist die REM-Aufnahme einer exemplarischen Betonprobenoberfläche im unbeschichteten Zustand abgebildet.

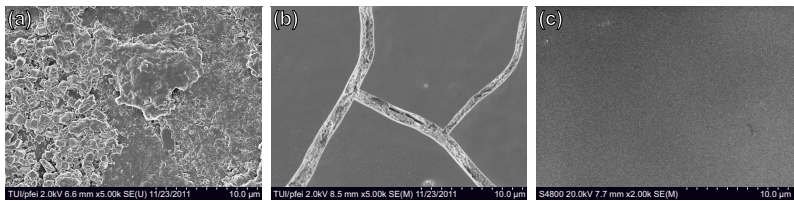


Abbildung 4.2: REM-Aufnahmen von unbeschichtetem Beton (a), rissiger Sol-Gel Schicht (b) und einer gleichmäßigen Schicht (c)

Sol-Gel Beschichtungen können zwar einerseits hohe Zugspannungen aufnehmen, bauen aber durch den Volumenschwund $\leq 30\%$ beim Verdunsten des Lösungsmittels Zugeigenschaften auf. Je dicker die aufgetragene Schicht ist, desto größer ist die Gefahr der Rissbildung, wie sie in Abb. 4.2 (b) zu erkennen ist. Im Vergleich hierzu ist die Schicht in Abb. 4.2 (c) sehr eben und hat die mikroskopischen Fehlstellen der Betonoberfläche (a) sehr gut ausgefüllt. Der Schichtauftrag war hierbei hinreichend gering, sodass die Zugspannung in der Oberfläche der Sol-Gel-Schicht als Folge der Schwindung nicht über das maximal ertragbare Niveau angestiegen ist.

Die optimalen Verarbeitungseigenschaften wurden über die Variation des Lösungsmittelgehaltes eingestellt, sodass die Beschichtung in die Oberfläche des Bauteils eindringen konnte und trotzdem alle Fehlstellen nivelliert wurden. Hierdurch wurde eine verfestigte Bauteiloberfläche geschaffen, ohne die Geometrie maßgeblich zu beeinflussen. Durch die Erhöhung des Lösungsmittelanteils kann eine entsprechend niedrige Viskosität des Sols eingestellt werden, was jedoch zu einem erhöhten Volumenschwund führt. Für die Entwick-

lung von Sol-Gel Systemen besteht somit ein Anforderungskonflikt, wobei dünnflüssige Sole mit hoher Endfestigkeit und hohem E-Modul gefordert werden.

Die in Tabelle 4.5 aufgeführten **Sol-Gel Lösungen** (Sole) enthalten epoxy- und amino-funktionelle Silane [Arx95]. Die Sole unterscheiden sich hauptsächlich in der Konzentration der verwendeten amino-funktionellen Silane. Auch hier unterliegt die Rezeptur der Geheimhaltung und es wird lediglich die Variation der Inhaltsstoffe für die *Sol-Gel Lösungen* angegeben. Variante *V18b* nur ein Drittel der Konzentration an Aminosilan im Vergleich zur Lösung *V13f* hat. Eine geringere Aminosilankonzentration bewirkt jedoch eine Absenkung der Härte bzw. Steifigkeit.

Tabelle 4.5: Chemische Eigenschaften der entwickelten Sol-Gel Systeme

Sol-Gel Lösung	V13f	V18b	V24b	V26e
dynamische Viskosität (20 °C)	16 mPa s	8 mPa s	86 mPa s	30 mPa s
Kontaktwinkel zu Beton ¹	5° .. 15°	5° .. 13°	17° .. 34°	5° .. 11°
Oberflächenspannung	19,6 N cm ⁻¹	20,2 N cm ⁻¹	20,6 N cm ⁻¹	17,7 N cm ⁻¹
Rohdichte	0,95 g cm ⁻³	0,98 g cm ⁻³	0,97 g cm ⁻³	0,93 g cm ⁻³
Silan (funktionelle Gruppe)	Aminosilan ↓ —	Aminosilan ↑ —	Diaminosilan ↑ —	Diaminosilan ↓ Acrylsilan
Beschichtungscharakterisierung	hart, eben	weich, flexibel	hart, eben	hart
Wasserbeständigkeit (24 h)	genügend	gut	befriedigend	sehr gut

¹starke Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit

Silankonzentration: ↑= hoch ↓= niedrig

Die Lösung *V24b* war ähnlich der Lösung *V13f*, mit der Ausnahme, dass hier eine diamino-funktionelle Gruppe verwendet wurde. Der Variante *V26e* wurde die diaminofunktionelle Gruppe nur in halber Konzentration zugegeben. Darüber hinaus erfolgte bei dieser Variante die Zugabe von Acrylsilan [Ber13]. Wichtige chemische Eigenschaften und die qualitative Beurteilung der Sol-Gel Lösungen und Beschichtungen sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Nach erfolgreicher Funktionsprüfung der ausgewählten Beschichtungen konnten im weiteren Verlauf die Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften und die Betriebsfestigkeit untersucht werden.

Als Nebeneffekt ist eine Verbesserung der Optik und der Haptik zu verzeichnen, wodurch die Attraktivität für die Verwendung von beschichteten Betonteilen gesteigert wird.

4.2 Grundlagen zur Verfahrensentwicklung

4.2.1 Herstellungstechnologie für Präzisionsbauteile

Bei der Betonage von Bauteilen durch die Replikation der Gestalt einer ebenen Fläche ist der Zustand des Abformnormals entscheidend. Deshalb erfolgt im ersten Schritt eine gründliche, schonende Reinigung der genutzten Natursteinoberfläche (siehe Abb. 4.3 - a).

Um einer Kontamination des *Abformnormals* während der Abformung vorzubeugen, erfolgt die Applikation einer Zwischenlage aus Kunststoff, welche im Rahmen dieser Arbeit als *Trennfolie* bezeichnet wird. Die Oberfläche der Platte aus Naturhartgestein muss für die Abformung absolut staubfrei sein. Staubpartikel, die sich unter der Trennfolie befinden, sind in der abgeformten Oberfläche als Vertiefungen zu erkennen. Die Trennfolie wird mittels eines sehr dünnen Wasserfilms zwischen Granit und Folie aufgerakelt, um Luft einschließen bzw. Blasenbildung zu vermeiden. Nach der Applikation der Folie auftreffende Staubpartikel sind weniger kritisch, da diese im Beton eingebettet werden.

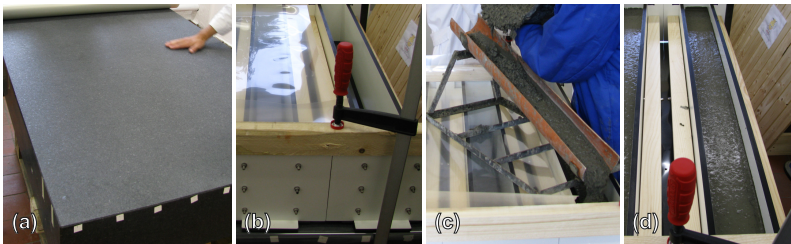


Abbildung 4.3: Probekörperherstellung: gereinigte Natursteinoberfläche (a), positionierte Schalung (b), Einfüllprozess (c) und befüllte Schalung (d)

Abschließend erfolgt die Positionierung und Fixierung der Schalungen (b) sowie das Aufsetzen der Einfüllvorrichtung und der Einfüllvorgang (c). Das Mischen erfolgt nach den im Rahmen der Betonentwicklung dokumentierten Vorgaben für optimale Frisch- und Festbetoneigenschaften (siehe Tab. 4.1).

Der Frischbeton muss über eine Entlüftungs- bzw. Schüttrutsche (Neigung: 15°, Mindestlänge: 60 cm) in die Schalung eingefüllt werden. Damit wird sichergestellt, dass die in der Mischung befindliche Luft zu einem möglichst großen Anteil entweichen kann, bevor der Beton in die Schalung gelangt.

Das Befüllen sollte ohne Absetzen und möglichst kontinuierlich an einer Stelle erfolgen, um zusätzliche Lufteinschlüsse zu vermeiden. Der eingebrachte Beton kann sich hierbei frei ausbreiten und weiter entlüften. Um die Verdunstung des für die Hydratation benötigten Wassers zu verhindern, müssen die Schalung und der Beton unmittelbar nach dem Befüllen mit Folie möglichst luftdicht verschlossen werden.

4.2.2 Erzeugung planarer Bauteiloberflächen

Für die urformende Herstellung von Präzisionsflächen ist eine möglichst formtreue Replikation von Bauteiloberflächen notwendig. Hierbei ist die Verwendung von formstabilen Abformnormalen aus feinstbearbeitetem Naturstein vorteilhaft. Durch eine massive Ausführung wird eine hohe Steifigkeit und eine hohe Trägheit gegenüber Temperaturschwankungen erreicht. Temperaturgradienten entstehen prozessbedingt durch den leichten Anstieg der Frischbetontemperatur als Folge des exothermen Hydratationsprozesses, wirken sich jedoch nicht auf die Abformgüte aus.

Die Abformflächen der Abformnormale zeichnen sich durch sehr geringe Ebenheitsabweichungen von $\leq 8 \mu\text{m}(\text{m})^{-1}$ aus, welche auf die Betonoberfläche übertragen werden. Die Prüfung der Maßhaltigkeit und der Langzeitstabilität von Probekörpern erfolgt an den Flächen, die bei der Abformung der Abformnormale entstehen.

Allerdings werden die Korngrenzen bei der Feinbearbeitung des Abformnormals freigelegt. Korngrenzen existieren zwischen den verschiedenen Mineralphasen im Naturstein und führen zu rissähnlichen Strukturen, welche im Rauheitsprofil (siehe Abb. 4.4) zu erkennen sind.

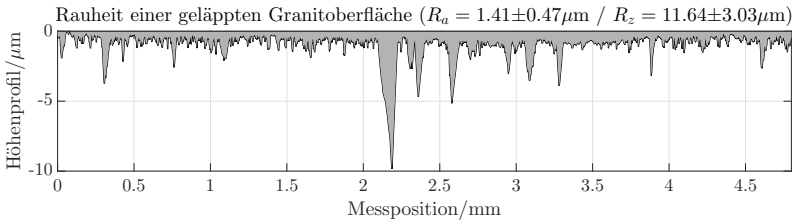


Abbildung 4.4: Exemplarisches Rauheitsprofil eines Abformnormals aus Naturhartgestein

Als Referenz für die notwendige *Oberflächengüte* werden im Rahmen dieser Arbeit Führungsflächen für aerostatische Elemente verwendet. Mit den entwickelten SCC-Mischungen ist aufgrund des hohen Mehlkornanteils eine sehr detailgetreue Wiedergabe der Oberfläche des Abformnormals möglich. Es entsteht hierbei die Negativgestalt des Oberflächenprofils, wobei die Rautiefen des Abformnormals mit einer Strukturauflösung im Submikrometer-

bereich als Rauhsitzen bzw. Erhebungen in der Betonoberfläche (Abb. 4.4- ausgegraute Fläche) abgeformt werden würden. Die aus dem Bezugsprofil herausragenden Fehlstellen könnten unmittelbar zur Schädigung von aerostatischen Elementen oder Präzisionsflächen von Koppelstellenelementen führen. Ein unerwünschter im Fertigungsprozess nachgeschalteter Feinbearbeitungsschritt wäre notwendig, um die Funktion der Präzisionsfläche zu gewährleisten.

Um die Abformung des Rauheitsprofils zu unterbinden, ist eine Trennfolie mit integrierender Wirkung auf dem Abformnormal aufzubringen. Mit Trennfolien aus Polypropylen konnten die hochwertigsten Abformergebnisse erzielt werden. Bei der Festlegung der Folienwandstärke ist ein Kompromiss zwischen der Erhöhung der integrierenden Wirkung bei größeren Folienstärken und der formtreuen Wiedergabe der Oberflächentopografie mit dünneren Folien zu finden. Bei der Variation der technologischen Parameter wurden Untersuchungen mit verschiedenen Wandstärken der Trennfolie durchgeführt.

Das Aufbringen von flüssigen oder pastösen Trennmitteln für die Abformung von Präzisionsflächen ist nicht zielführend, da das ölige Fluid mit einer Dichte von $\leq 1 \text{ g}(\text{cm})^{-3}$ durch den Frischbeton mit einer Dichte von $\geq 2,5 \text{ g}(\text{cm})^{-3}$ aus den Vertiefungen verdrängt wird. Zusätzlich wird die Randschicht des Frischbetons beim Abformprozess kontaminiert und die geforderte Oberflächenqualität kann nicht gewährleistet werden.

4.3 Probekörper

Es werden Probekörper von unterschiedlicher Gestalt zur Qualifizierung von Gestaltabweichungen, für die Beschichtungsqualifizierung und zur Validierung der Berechnungsansätze definiert und eingesetzt.

4.3.1 Probekörper zur Qualifizierung von Gestaltabweichungen

Für den Nachweis der Einsatzfähigkeit von SCC als Basismaterial für Präzisionsbauteile werden zur Untersuchung von Schwindung und weiteren Gestaltabweichungen zwei verschiedene Ausführungen von quaderförmigen Betonbalken verwendet.

Die Bestimmung des Schwindverhaltens längs der Schwerachse eines Profils erfolgt an der *Bauhaus-Universität Weimar* anhand von standardisierten, quaderförmigen Probekörpern mit den Abmessungen $(100 \cdot 100 \cdot 400) \text{ mm}^3$. Diese werden als **Schwindprismen** bezeichnet und in speziellen Schalungen hergestellt und untersucht.

Probek balken mit einem Verhältnis von ca. 1 : 10 zwischen den Querschnittsabmessungen und der Balkenlänge finden für die Qualifizierung von Gestaltabweichungen Verwendung. Mit dieser Geometrie ist ein hohes Potenzial für die Gestaltänderung in Folge der Schwindverformung zu erwarten.

Ein weiterer Vorteil liegt bei der Möglichkeit zur vereinfachten Untersuchung der Gestaltabweichungen. Die Bestimmung der Ebenheit wird durch wiederholte Geradheitsmessung in Richtung der Balkenlängsachse ersetzt. Die Abmessungen *Breite · Höhe · Länge* für die Probek balken wurden auf $(100 \cdot 130 \cdot 1050) \text{ mm}^3$ festgelegt, um den Aufwand für Handhabung und Transport überschaubar zu halten. An jedem Balken befindet sich eine abgeformte Präzisionsfläche, an der die Rauheits- und Geradheitsmessungen durchgeführt werden.

4.3.2 Probekörper für die Beschichtungsqualifizierung

Zur Entwicklung von Beschichtungen und zur Qualifizierung der mechanischen Eigenschaften beschichteter Bauteile zwei Arten von Betonprobekörpern verwendet. Es werden die Verarbeitungseigenschaften getestet, die Schichthaftung geprüft und der Nachweis des mechanischen bzw. chemischen Widerstandes erbracht, um die Oberflächenfunktion unter Betriebsbeanspruchungen zu gewährleisten. Hierfür sind leicht handhabbare Probekörper mit kleinsten Abmessungen für die Analyse im Labormaßstab zweckmäßig. Für die Qualifizierung des Einflusses der Beschichtungen auf die Steifigkeit und die Festigkeit sind für eine gute Vergleichbarkeit mit der Prüfung von metallischen Werkstoffen Probekörper entsprechend der *DIN 50125* zu verwenden [DIN50125].

Der Beton für die Beschichtungsentwicklung und -qualifizierung wurde von der *Bauhaus-Universität Weimar* auf Basis des Mörtels für die *SCCII-Mischung* projiziert. Die gefüllten Schalungen werden unmittelbar nach dem Vergießen abgedeckt und in einem Feuchteschrank bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\approx 100\%$ über einen Zeitraum von einer Woche gelagert.

Beschichtungsentwicklung – Kleinstproben im Labormaßstab

Im Rahmen der Beschichtungsentwicklung ist eine sehr große Probenanzahl mit denselben Substrateigenschaften notwendig, um die Schichtqualität von mehreren Beschichtungsvarianten miteinander vergleichen zu können. Zur möglichst detaillierten Begutachtung des Beschichtungszustandes sind Proben für mikroskopische Aufnahmen mit dem REM notwendig.

Aufgrund der geringen geforderten Abmessungen wurde die Probengeometrie gemäß Abb. 4.5 - b favorisiert, welche im Folgenden als **Pyramidenstümpfe** bezeichnet werden.

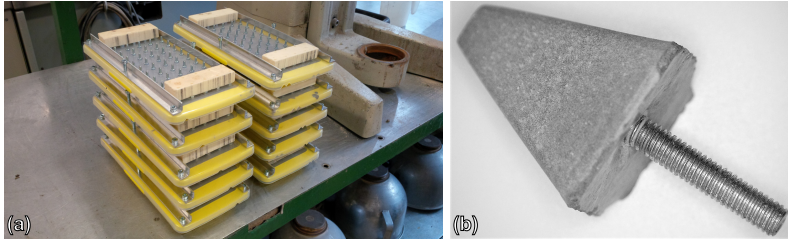


Abbildung 4.5: Schalungen zur Herstellung von Pyramidenstümpfen (a) und ein Pyramidenstumpf mit $(15 \cdot 15) \text{ mm}^2$ Grundfläche, 18 mm Höhe und 18° Formschräge (b)

Zur Aufnahme in eine Spannvorrichtung und zur Vermeidung von Verunreinigungen bei der Handhabung sind Gewindestifte in die Pyramidenstümpfe eingegossen. Die Schalungsgrundkörper hierfür sind mit einer sehr hohen Oberflächengüte kommerziell erhältlich. Es wurden 10 identische Schalungsbaugruppen für je 60 Pyramidenstümpfe (siehe Abb. 4.5 - a) zur Herstellung von 600 Kleinstproben im Labormaßstab pro Charge angefertigt.

Als Beschichtungsverfahren wurde die automatisierte Tauchbeschichtung favorisiert, wobei der Pyramidenstumpf in das Sol getaucht und mit einer definierten Geschwindigkeit von $\approx 0,5 \text{ mm(s)}^{-1}$ herausgezogen wird. Die Oberflächen von Betonteilen sind maßgeblich durch den Zementleim geprägt, da die größeren Fraktionen der Gesteinskörnung nur sehr selten an die Schalungsoberfläche gelangen. Deshalb sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen von Kleinstproben im Labormaßstab ohne Einschränkung auf Mischungen mit größeren Gesteinskörnungen übertragbar.

Beschichtungsqualifizierung – Proben zur mechanischen Prüfung

Zur Bestimmung der Betriebsfestigkeitssteigerung wurden standardisierte Zugproben mit Rechteckquerschnitt nach *DIN 50125* (siehe Abb. 4.6 - links) verwendet [DIN50125], welche im Folgenden als **Schulterstäbe** bezeichnet werden. Die Zusammensetzung des Betons für die Schulterstäbe und die Pyramidenstümpfe ist identisch. Für einen statistisch belegbaren Nachweis der Auswirkungen von Beschichtungen auf die Betonbauteile ist eine große Anzahl von Proben für jeden Beschichtungszustand notwendig.

Um unterschiedliche Beschichtungen auf identischem Substrat zu testen, wurden Schalungen aus *Silikon 4641* (siehe Abb. 4.6 - rechts) angefertigt. Mit den vorhandenen Schalungen können bis zu 100 Schulterstäbe in einem Los hergestellt werden.

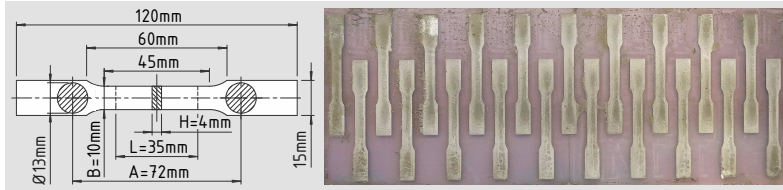


Abbildung 4.6: Abmessungen der Schulterstäbe für die mechanische Prüfung (links) und eine gefüllte Schalung bei der Probenherstellung (rechts)

4.3.3 Probengeometrie zur Validierung der Berechnungsansätze

Für die Validierung des Berechnungsansatzes wurden **Demonstratoren** in Form eines verrippten Bauteils entwickelt und in einer Kleinserie im Labormaßstab hergestellt. Deren wesentliche Merkmale sind:

1. Komplexe Struktur mit hoher Steifigkeit
2. Ebene Funktionsfläche mit hoher Qualität
3. Vergossene Elemente als Koppelstelle zu Peripherieelementen

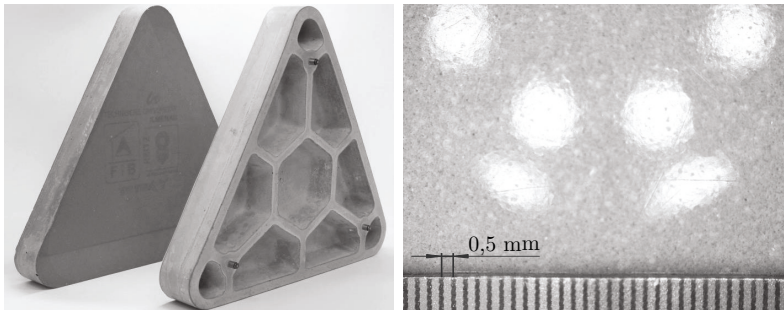


Abbildung 4.7: Supportstruktur mit spiegelnder Funktionsfläche in Kleinserienfertigung (links) und eine Nahaufnahme der Funktionsfläche (rechts)

In Abb. 4.7 ist ein nach der Herstellungstechnologie in Abschnitt 4.2.1 gefertigter Demonstrator dargestellt. Im rechten Bild ist die Funktionsfläche vergrößert abgebildet. Es ist deutlich die Spiegelung der punktuellen Lichtquellen zur Beleuchtung zu erkennen. Die geringe Streuung des Lichtes deutet auf eine sehr kleine Welligkeit hin. Die erkennbaren kratzerähnlichen Gebilde sind Erhöhungen, welche durch Kratzer auf dem Trennmittel (Folie) als Negativ abgeformt wurden.

5 Bauteile mit urgeformten Präzisionsflächen

Für die Qualifizierung von Beton als Basiswerkstoff sowie die Herstellung von urgeformten Oberflächen mit geringen Formabweichungen für Präzisionsmaschinen und -geräte ist eine Kombination von theoretischen und experimentellen Untersuchungen erforderlich. Zum Nachweis der Funktionssicherheit für aerostatische Führungsflächen sind entsprechend geringe Gestaltabweichungen höherer Ordnung einzuhalten. Zum Nachweis der Verwendbarkeit von Beton als Konstruktionswerkstoff für Maschinenbauteile ist eine im Vergleich zu Präzisionsbauteilen aus Naturhartgestein ähnliche Langzeitstabilität zu belegen. Die Simulation der Gestaltänderung während der Hydratation soll zur Bestimmung einer verformungspräventiven Formgeometrie führen. Mit diesem Vorgehen wird die Technologie zur reproduzierbaren Herstellung integrierter, funktionaler Präzisionsflächen abgesichert.

5.1 Definition der Messaufgaben und -verfahren

Die Rauheitsmessung dient zur Überprüfung der Funktionssicherheit für aerostatische Anwendungen. Die Schwindungs- sowie die Geradheitsmessung werden zur Untersuchung des Gestaltänderungspotenzials und zur Eignungsprüfung des Werkstoffes für Präzisionsanwendungen verwendet. Die Ergebnisse der Schwindungs- und Geradheitsmessungen bilden Eingangsgrößen für die Verifizierung eines Modells zur Simulation von Gestaltänderungen.

Rauheitsmessung – Messanordnung und Versuchsplan

Die Messung der Rauheit erfolgte nach einer Aushärtezeit von einem Monat mit dem Tastschnittverfahren. Es wurde ein portabler Kufentaster *Hommel-Etamic W5* der *JENOPTIK AG* mit einer Profilauflösung von 5 nm verwendet. Hierbei erfolgte die Aufnahme einer Messstrecke von 4,8 mm in verschiedene Richtungen an 10 willkürlich gewählten Stellen der Präzisionsfläche. Damit stehen nicht nur die Absolutwerte, sondern auch Informationen zur Verteilung bzw. Gleichmäßigkeit der Rauheit zur Verfügung. Durch die Auswertung der ungefilterten Profildaten sind auch Welligkeiten mit einer Periodizität unter 5 mm darstellbar.

Schwindungsmessung – Messanordnung und Versuchsplan

Die Längenänderung der Schwindprismen wird an der *Bauhaus-Universität Weimar* über induktive Wegaufnehmer an den Stirnseiten erfasst. Der schematische Aufbau der Prüfvorrichtung ist in Abb. 5.1 zu sehen. Die Messzapfen werden vorerst mit den Klemmschrauben an der Schalung arretiert und über die Koppelzapfen mit den Wegaufnehmern verbunden. Wenn die Hydratation soweit vorangeschritten ist, dass eine plastische Deformation des Betons durch dessen Eigengewicht ausgeschlossen werden kann, wird die Klemmschraube gelöst, um eine freie, gleitende Bewegung entlang der Folien zu ermöglichen.

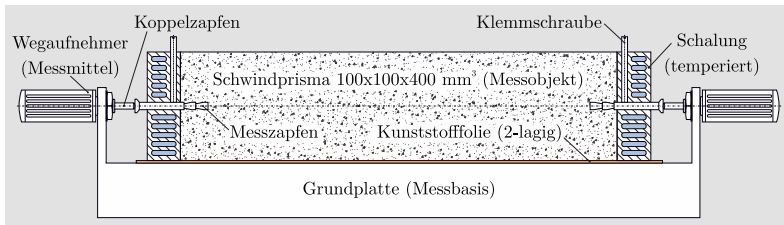


Abbildung 5.1: Anordnungsprinzip zur Messung der Schwindung

Die Schwindverformung wird über einen Zeitraum von 28 Tagen aufgenommen, wobei sich dieser Vorgang asymptotisch einem stationären Zustand annähert. Nach dieser Zeit liegt die axiale Schwindung im Bereich der Wegmessauflösung. Der weitere Schwund entlang der Längsachse kann extrapoliert werden.

Es erfolgt die parallele Vermessung von je zwei Schwindprismen, bei denen das Gesamtschwinden unter Umgebungsbedingungen und das autogene Schwinden ohne Luftkontakt bestimmt werden. Durch Differenzbildung wird das Trocknungsschwinden errechnet. Der Versuchsaufbau ermöglicht die Abführung der Hydratationswärme durch eine Temperaturregelung in der Schalung, welche hierfür mit Kühlmittel durchströmt wird. Damit wird der Einfluss der thermischen Längenänderung auf die Messergebnisse minimiert.

Geradheitsmessung – Verfahren und Versuchsplan

Nach dem Entschalen wurde die abgeformte Präzisionsfläche der Probekörper im ersten Quartal wöchentlich und im späteren Verlauf in steigenden Abständen mit einer Autokollimator-Planspiegel-Anordnung (siehe Abb. 5.2) mit einer **Basislänge** $L_B = 100 \text{ mm}$ aufgenommen.

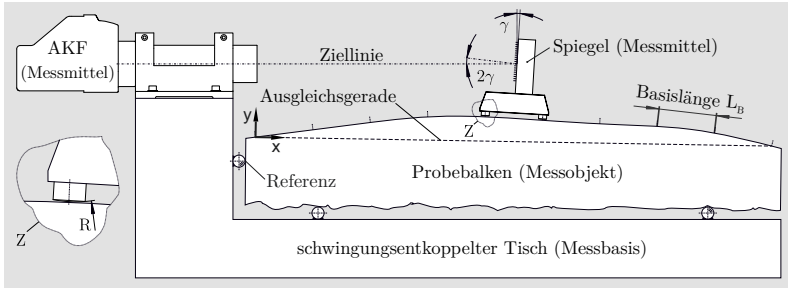


Abbildung 5.2: Prinzipielle Anordnung für die Geradheitsmessung mittels AKF

Die vermessene **Länge** L ist hierbei ein ganzzahliges Vielfaches der Basislänge L_B . Das **Höhenprofil** $H(x)$ der Oberfläche wird durch die Aufsummierung der schrittweise mittels **Autokollimatorfernrohr** (AKF) aufgezeichneten **Winkel** γ über die Basislänge L_B errechnet (siehe Gl. 5.1 und Gl. 5.2).

$$H(x) = \sum \Delta H(x) - H_{\text{Ausgleich}}(x) \quad (5.1)$$

$$H(x) = \sum_{j=1}^{x/L_B} \Delta H_j - mx \text{ mit } m = \text{konst.} = \frac{\sum_{j=1}^{L/L_B} \Delta H_j}{L} \text{ und } \Delta H_j = L_B \sin \gamma_j \quad (5.2)$$

Zur Ermittlung der **maximalen Geradheitsabweichung** H_{MAX} und der **Geradheitsabweichung in der Balkenmitte** H_{MITTE} wird das Höhenprofil $H(x)$ mittels einer Ausgleichsgeraden so gedreht, dass der Anfangs- und Endpunkt der Länge L auf $y = 0$ -Niveau liegen. Bei einer stetig fortschreitenden Messung sind mathematisch korrekte Ergebnisse zu erwarten. Hierfür ist es notwendig, dass der in Messrichtung vordere Aufstellungspunkt des Spiegelträgers mit dem hinteren Aufstellungspunkt der Anschlussmessung zusammenfällt.

Das verwendete AKF ist ein *ELCOMAT3000*[®] der Firma *Möller-Wedel Optical GmbH* mit einem absoluten **Gerätefehler** von $\pm 0,1''$ bei $\pm 20''$ bzw. $\pm 0,25''$ bei $\pm 1800''$ und einer **Reproduzierbarkeit** von $0,05''$ über den gesamten Messbereich [Möl21a]. Je kleiner der Winkelversatz zwischen Ziellinie und Ausgleichsgerade (siehe Abb. 5.2) ist, desto geringer fällt die Messunsicherheit aus. Mit der vorhandenen Hardware wird eine Relativmessung durchgeführt. Deshalb wird die angegebene Reproduzierbarkeit verwendet, um einen **Gerätefehler** von $0,024 \mu\text{m}$ bei der Versuchsauswertung zu berücksichtigen [Möl21b].

Da Gestaltabweichungen 2. Ordnung (Welligkeiten) mit einer Periodizität unterhalb der Basislänge L_B nicht erkannt werden können, stellt die Anordnung einen mechanischen Tiefpass dar. Beim Vorhandensein dieser Art von Gestaltabweichungen wird das errechnete

Höhenprofil verfälscht. Für eine sehr kurzwellige Ausprägung von wenigen Millimetern Periodizität wird jedoch die integrierende Wirkung der gewölbten Aufstellflächen des Messspiegels (siehe Abb. 5.2- Detail Z) wirksam.

Entspricht die Periodizität mindestens dem Doppelten der Basislänge L_B , ist das Messverfahren zur Bestimmung der Oberflächentopographie optimal einsetzbar. Bei Wellenlängen im Bereich vom 2 mm bis zur doppelten Basislänge ist das errechnete Höhenprofil nicht als Absolutmessung zu verwenden. Für diesen Fall können lediglich Informationen aus den relativen Abweichungen zwischen zeitlich getrennten Messungen bezüglich der Langzeitstabilität gewonnen werden. Eine reproduzierbare Position des Startpunktes und eine reproduzierbare Richtung der Leitgeraden sind hierbei notwendig.

Für eine manuelle Geradheitsmessung, bei der der Spiegel von Hand entlang einer Führungsgeraden bewegt wird, ist es üblich, jeweils drei Messreihen aufzunehmen. Der Messfehler wird im Anschluss konservativ über die Summe aus der *maximalen Abweichung vom Mittelwert* und dem *Gerätefehler* abgeschätzt, da bei einer derart geringen Anzahl an Durchläufen keine statistischen abgesicherten Ergebnisse erwartet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vorrichtung für die automatische Aufnahme des Geradheitsprofils entwickelt, mit der eine hinreichende Anzahl von Durchläufen ohne subjektive Fehlerbeeinflussung ermöglicht wird.

5.2 Ergebnisse der messtechnischen Qualifizierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Betonmischungen SCC I und SCC II und HPSCC entwickelt bzw. favorisiert (siehe Abs. 4.1.1) und messtechnisch untersucht. Nach dem Abformen blieben die Probekörper für 7 Tage in der Form. Zur Untersuchung des Einflusses der Autoklavierung wurden jeweils die Hälfte der Probekörper pro Mischung einer Autoklavierung unterzogen. Die zu autoklavierenden Probekörper wurden direkt nach dem Ausschalen in einer Klimakammer bei $\geq 90^\circ\text{C}$ unter Satteldampfmosphäre über einen Zeitraum von 4 Wochen gelagert. Auch das Trocknungsschwinden der unbehandelten Probekörper wurde durch die sofortige Abschirmung von der Umgebungsluft minimiert.

5.2.1 Rauheit und Welligkeit

Die Präzisionsflächen der Probekörper sind bereits ohne Nachbehandlung sehr glatt. Die Rauheiten der Proben (siehe Abb. 5.3) liegen unterhalb der gestellten Anforderungen von $R_z \leq 2,5 \mu\text{m}$ und $R_a \leq 0,25 \mu\text{m}$ für die Gewährleistung der Funktionssicherheit bei der Verwendung von aerostatischen Elementen. Bei der Probe HPSCC (grün) wurde die Forderung signifikant um ca. 40% unterschritten. Das liegt an der Verwendung einer

sehr dicken PP-Folie mit $100\ \mu\text{m}$ Wandstärke als Trennschicht bei der Betonage. Die Rauheitscharakteristik des Abformnormals wird durch diese Folie vollständig überdeckt. Die Spitze bei einer Messposition von $0,6\ \text{mm}$ mit einer Höhe von ca. $1,2\ \mu\text{m}$ lässt auf eine Fehlstelle in der Folie schließen. Bei einer Arbeitsspalthöhe des Luftlagerelements von $7\ \mu\text{m}$ wäre diese Spitze noch in der Toleranz für einen sicheren Betrieb [New06].

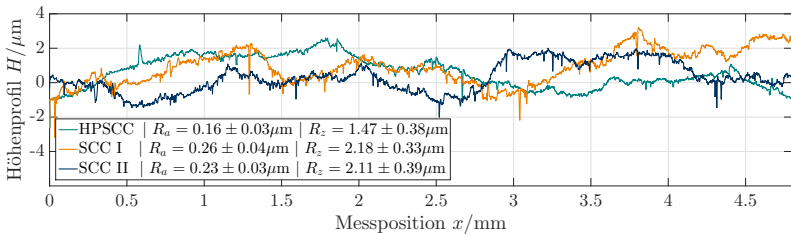


Abbildung 5.3: exemplarische Rauheitsprofile von verschiedenen Betonoberflächen

Bei den ungefilterten Rauheitsprofilen in Abbildung 5.3 ist eine sehr deutliche Welligkeit mit einer Periodizität von mehreren Millimetern zu erkennen. Die Welligkeit wird durch Inhomogenitäten der Foliensteifigkeit, Toleranzen der Folienwandstärke und dem Schweredruck der groben Gesteinskörnung, welche am unteren Rand nicht vollständig im Mörtel schweben kann, hervorgerufen. Im Reflexbild der Oberflächen (siehe Abb. 5.4) ist diese Welligkeit deutlich erkennbar.

Die Welligkeit der Fläche links ist viel geringer, da die Deformation der $20\ \mu\text{m}$ starken Folie in Folge des Schweredruckes weniger ausgeprägt ist. Jedoch wird hier die Folie in die Risse des Abformnormals gedrückt, sodass eine netzartige Oberflächentopographie entsteht. Die Welligkeit der Oberfläche des SCC II Probekörpers, welche dem Rauheitsprofil (siehe Abb. 5.3 blauer Graph) entnommen werden kann, liegt gerade noch im Toleranzbereich für einen sicheren Betrieb von aerostatischen Elementen.

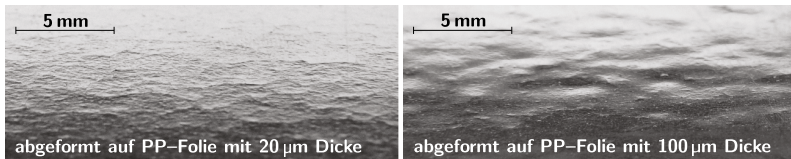


Abbildung 5.4: Reflexion eines Hell-Dunkel-Überganges an den Präzisionsflächen in sehr spitzem Winkel, aufgenommen bei verschiedenen Trennschichtstärken

Die beiden anderen Profile zeigen eine deutlich zu hohe Welligkeit. Um die Abformung einer funktionsfähigen Führungsebene zu garantieren, sollte die Foliendicke minimiert und ein Natursteinnormal mit nahezu rissfreier Oberfläche verwendet werden.

Für die lokale Oberflächenqualität ist die Nachbehandlung im Autoklaven von entscheidender Bedeutung, weil hierbei lokale Oberflächeneffekte auftreten, die einen beschleunigten Alterungsprozess darstellen. Die Proben für die Autoklavierung hatten nach dem Entschalen ebenfalls alle eine Funktionsfläche mit spiegelnder Qualität und sehr geringer Rauheit. Infolge der Nachbehandlung kam es zu sogenannten Ausblühungen und verstärkter Ausbildung von Mikrorissen (*Craquelérisen*) mit starker Ähnlichkeit zu glasierten Porzellanoberflächen. Diese Erscheinungen sind über die Rauheitsmessung verifizierbar.

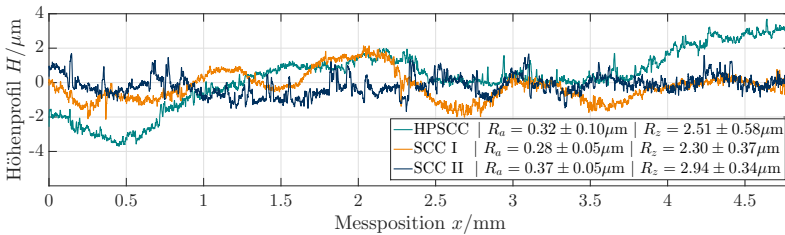


Abbildung 5.5: Rauheitsprofile verschiedener Betonoberflächen nach dem Autoklavieren

Die Rauheitsprofile in Abb. 5.5 zeigen durch kristalline Ausblühungen von wasserlöslichen Komponenten im Vergleich zu den unbehandelten Proben einen starken Anstieg der Rauheitswerte, wobei der HPSCC-Probekörper die stärkste Verschlechterung von im Mittel 100% (Vgl. Abb. 5.3) erfahren hat. Die Probekörper der *Bauhaus-Universität Weimar* zeigten im Gegensatz dazu recht moderate Rauheits erhöhungen von ca. 10% bei SCC I bis hin zu maximal 60% bei SCC II.

Die Rauheitskennwerte aller Proben liegen jedoch trotz der Verschlechterung noch im Rahmen der Forderungen für aerostatische Führungsflächen. Die Welligkeiten haben infolge von Erosions- und Ausblühungseffekten nach der Autoklavierung eine verringerte Amplitude, da die Kapillarität bei konkaven Oberflächenbereichen ein größeres Potenzial zum Herauslösen von mineralischen Komponenten aus der Betonmatrix ergibt, als es bei konvexen Oberflächenbereichen der Fall ist.

Mit der lokalen Oberflächenqualität des SCC II-Probekörpers kann aufgrund von dessen geringer Welligkeit der sicherste Betrieb für aerostatische Führungselemente gewährleistet werden [New06]. Eine Möglichkeit, die Welligkeit zu reduzieren, kann eine bessere Sedimentationsstabilität der Mischung sein, wodurch die großen Gesteinskörnungen besser in den Mörtel schweben und deshalb nicht so stark in die Folie hineingedrückt werden.

5.2.2 Makroskopische Gestaltänderung

Ergebnisse der Schwindungsmessung

Die Längenänderung der Schwindprismen (siehe Abs.4.3.1) wurde von der *Bauhaus-Universität Weimar* aufgenommen. In Abb. 5.6 ist zu erkennen, dass die Längsschwindung nach ca. einem Monat über einen asymptotischen Verlauf den stationären Endwert erreicht. Für das Gesamtschwinden wurden in den Messungen der *Bauhaus-Universität Weimar* (siehe 5.6 - links) [Flo+14] Werte zwischen 0,23‰ und 0,25‰ bei der Verwendung von SCC I bzw. SCC II ermittelt. Die Forderung von 0,20‰ (siehe Tab. 4.1) wurde hiermit fast erreicht. HPSCC-Proben standen für diese Untersuchungen nicht zur Verfügung.

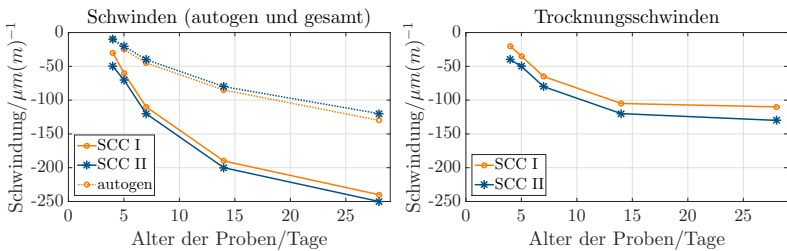


Abbildung 5.6: Schwindungsmessung der *Bauhaus-Universität Weimar* – relative axiale Verschiebung der *Schwindprismen* mit den Abmessungen $(100 \cdot 100 \cdot 400)$ mm³ innerhalb der ersten 28 Tage: Gesamtschwinden | autogenes Schwinden (links) und das Trocknungsschwinden (rechts) [Flo+14]

Geradheitsmessung mit erhöhter Reproduzierbarkeit

Die für die Voruntersuchungen notwendigen Geradheitsmessungen zur Bestimmung der Langzeitstabilität der Probekörper wurden mit manueller Spiegelpositionierung durchgeführt. Mit dem manuellen Verfahren war der Aufwand hoch und die Qualität des Messergebnisses entsprach nicht den Anforderungen, da die Störeinflüsse bzw. Fehlerquellen maßgeblich von den ausführenden Personen beeinflusst wurden. Die Abweichungen der Position des Messspiegels führten zu starken Streuungen in den Messungen. Die im Submikrometerbereich angestrebte Reproduzierbarkeit war manuell nicht erreichbar. Zusätzlich erfolgt ein Wärmeeintrag in den Spiegelfuß beim Anfassen während der Positionierung. Auch das AKF unterliegt hierbei schwankenden thermischen Bedingungen. Das Einstellen eines stationären Zustandes nach jedem Schritt ist unter vertretbarem zeitlichen Aufwand nicht möglich.

Mit einer automatisierten Positionierung sind äquidistante Schritte entsprechend der Basislänge entlang einer reproduzierbaren Leitgeraden möglich und die Messunsicherheit kann reduziert werden.

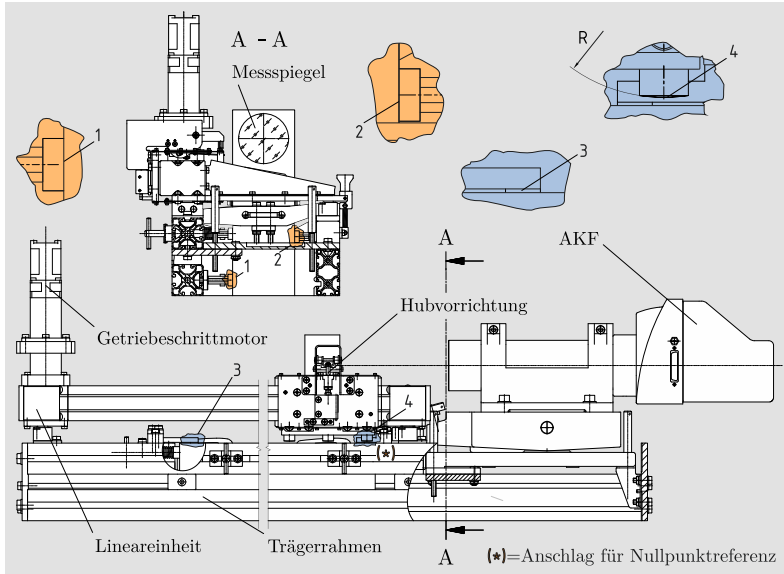


Abbildung 5.7: automatisches Geradheitsmessgerät mit AKF

Um einen reproduzierbaren Messablauf sicherzustellen, wurde ein automatisches Geradheitsmessgerät (siehe Abb. 5.7) für Probekörper mit maximal 100 mm Breite und bis zu 1,5 m Länge entwickelt. Mit dem automatischen Messgerät ist eine statistisch belastbare messtechnische Qualifizierung der Präzisionsflächen möglich. Die Leitgerade und der Startpunkt wird hierbei durch definierte mechanische Anschläge festgelegt. Die Positionierfehler werden durch die hohe Reproduzierbarkeit bei der Schrittmotorsteuerung und ein hochübersetzendes spielfreies Planetengetriebe mit vorgespanntem Zahnriementrieb im Vollschrittbetrieb entlang der Messstrecke minimiert. Die manuelle Positionierabweichung von 0,5 mm wurde damit um 96% auf 20 μm reduziert.

Durch den Ausschluss der zufälligen Fehlerquellen und eine statistische Messdatenverarbeitung, basierend auf einer ausreichenden Datenmenge, konnten die Messfehler bei der Geradheitsmessung ab Woche sechs (siehe Abb. 5.8) insgesamt um ca. eine Größenordnung reduziert werden. Durch einen reproduzierbaren Referenzpunkt bzw. definierte Leitgerade

und die damit verbundene Positioniergenauigkeit für Anschlussmessungen sind auch Relativmessungen für die Charakterisierung des Langzeitverhaltens von ebenen Flächen mit kurzwelligen lokalen Ebenheitsfehlern (kürzer als die Messbasis von 100 mm) möglich.

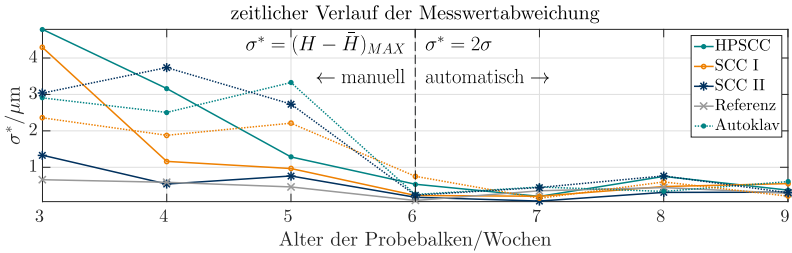


Abbildung 5.8: max. Abweichung vom Mittelwert bei manueller Messung (< 6 Wochen) bzw. max. erweiterte Standardabweichung für automatische Messungen

5.2.3 Langzeitstabilität

Zur Bestimmung der Langzeitstabilität der Referenzgeometrie wurden das absolute Verformungsverhalten und die relative Formabweichung mittelfristig über 17 Wochen und langfristig über ca. 10 Jahre untersucht. Die Geradheit wurde mit dem automatischen Geradheitsmessgerät aufgenommen und mit MATLAB[®] unter Berücksichtigung der erweiterten Standardabweichung ($K = 2$) ausgewertet.

Bei der Darstellung der Messergebnisse wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Anzeige der Vertrauensbereiche verzichtet. Stattdessen werden die maximalen erweiterten Standardabweichungen bei der Auswertung der relativen Geradheitsabweichung in einem zusätzlichen Diagramm (siehe Abb. 5.8) angezeigt. Die Trendlinien zwischen den Werten im Diagramm sind hierbei lediglich aus Gründen einer verbesserten Lesbarkeit eingezeichnet. Um eine bessere Vergleichbarkeit zum Gestaltänderungsverhalten von konventionell hergestellten Präzisionsbauteilen aus Naturhartgestein zu erreichen, wurde zusätzlich ein Granitnormal mit äquivalenter Geometrie als Referenz im selben Raum gelagert und vermessen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Probekörpern verschiedener Betonmischungen mit und ohne Autoklavierung vorgestellt. Bei der grafischen Darstellung werden die Daten *unbehandelter* Probekörper durch eine durchgezogene Linie und die Daten *autoklavierter* Probekörper durch eine gepunktete Linie repräsentiert

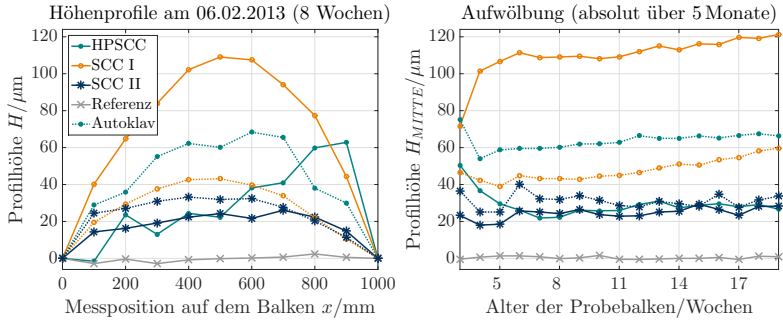


Abbildung 5.9: exemplarische Höhenprofile der Präzisionsflächen von Probekörpern (links) und der zeitliche Verlauf der maximalen Geradheitsabweichung (rechts)

Alle Höhenprofile (siehe Abb. 5.9-links) der dargestellten Probenreihe zeigen bei Betrachtung der absoluten Geradheitsabweichungen (siehe Abb. 5.9-rechts) über 5 Monate augenscheinlich eine kurze Stabilisierungszeit von ca. 4 bis 8 Wochen. Abgesehen von dem unbehandelten Probekörper der SCC I-Mischung weisen die Proben eine sehr geringe absolute Aufwölbung von unter $70\ \mu\text{m}$ auf. Jedoch ist zu bemerken, dass die Körper der HPSCC-Mischung durch die verwendete Trennschicht ($100\ \mu\text{m}$ Folie) eine in Abschnitt 5.2.1 beschriebene starke Welligkeit von ca. $3..7\ \text{mm}$ Periodenlänge aufweisen.

Diese Welligkeit kann trotz der balligen Aufstellfüße des Spiegels nicht mechanisch gefiltert werden und führt daher zur Verfälschung des absoluten Höhenprofils, welche sich besonders beim Profil des unbehandelten HPSCC-Probekörpers äußert (siehe Abb. 5.9- links/grün). Daher wird für die folgenden Ausführungen hauptsächlich die relative zeitliche Verschiebung der Körpermitte (siehe Abb. 5.10) genutzt. Die verwendete Messstelle repräsentiert den empfindlichsten Punkt gegenüber der Schwindverformung der Körper und fällt in den meisten Fällen mit der Stelle der maximalen Verformung zusammen.

Die Körper der HPSCC-Mischung benötigen zum Erreichen eines stationären Zustandes ca. 12 Wochen. Die Profilhöhe der SCC II-Probekörper schwankt bereits ab der 8. Woche um einen stationären Zustand. Da die anderen Probekörper keine ähnliche Charakteristik zeigen, ist die starke Abweichung nur über eine Fehlpositionierung der Messvorrichtung zu erklären. Durch die sehr feine Welligkeit (siehe Abb. 5.4- links) besteht eine erhöhte Sensitivität gegenüber einem Versatz des Startpunktes bzw. der Messrichtung.

Für die Quantifizierung der mittelfristigen Stabilität des Höhenprofils (siehe Tab. 5.1) wird die symmetrische Abweichung zwischen Minimal- und Maximalwert verwendet. Das Zielkriterium einer langzeitstabilen Ebenheit bzw. Geradheit von $3\ \mu\text{m}(\text{m})^{-1}$ (siehe Tab. 4.1) wird durch die HPSCC-Körper erreicht. Auch bei den Körpern aus SCC II ist die Abweichung

nur geringfügig höher. Im Vergleich zur Referenz aus Naturstein sind die Schwankungen höher, liegen jedoch in derselben Größenordnung.

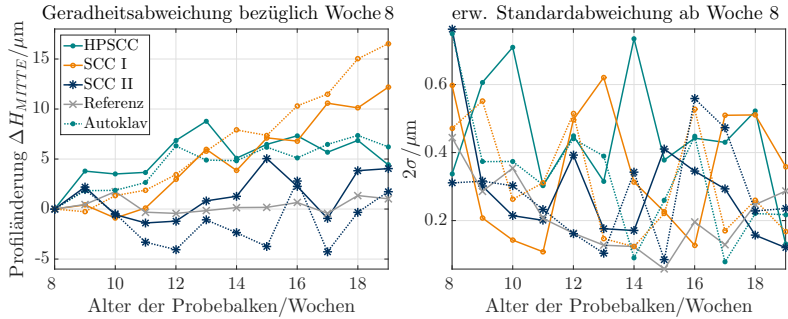


Abbildung 5.10: zeitlicher Verlauf der Geradheit bezüglich des Höhenprofils in der 8. Woche (links) und die max. erweiterte Standardabweichung (rechts)

Tabelle 5.1: mittelfristige relative Geradheitsabweichungen in der Balkenmitte und die Qualifizierung bezüglich der Forderung von $\Delta H \leq 3 \mu\text{m m}^{-1}$ Geradheit

Geradheitsabweichung	HPSCC*	SCCI	SCCII	Referenz
ΔH_{MITTE} - ohne Nachbehandlung	$\pm 3 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 12 \mu\text{m}$ (--)	$\pm 5 \mu\text{m}$ (-)	$\pm 1,8 \mu\text{m}$ (++)
ΔH_{MITTE} - nach Autoklavierung	$\pm 2,5 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 17 \mu\text{m}$ (--)	$\pm 4 \mu\text{m}$ (-)	—

Qualifikation/Zielkriterium: -- $\hat{=}$ nicht stabil, - $\hat{=}$ nicht erreicht, + $\hat{=}$ erreicht, ++ $\hat{=}$ übertroffen

*) 12 Wochen anstatt 8 Wochen Stabilisierungszeit

Bei den Proben aus SCCI ist eine stetige Tendenz zu größeren Aufwölbungen zu erkennen. Die Streuung der absoluten Aufwölbung mit $40..120 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 5.9 - links) ist vergleichsweise groß, um Bauteile mit Präzisionsgeometrie reproduzierbar herzustellen. Deshalb ist die Mischung SCCI nicht für die Herstellung von langzeitstabilen Präzisionsmaschinenstellern geeignet. Diese Aussage wird durch die Langzeituntersuchungen (siehe Abb. 5.11 - links) über fast 10 Jahre bestätigt. Erst nach ca. 3 Jahren sind die Probekörper aus SCCI in einem stabilen stationären Zustand (siehe Tab. 5.2).

Die große Schwankung des Höhenprofils von $\pm 6,5 \mu\text{m}$ beim autoklavierten SCCII-Probekörper (siehe Abb. 5.11 - links/blau-gepunktet und Tabelle 5.2) ist wahrscheinlich ebenfalls durch einen Ausreißer bei der Messung nach $4\frac{9}{12}$ Jahren in Folge einer Fehlpositionierung der Messvorrichtung entstanden.

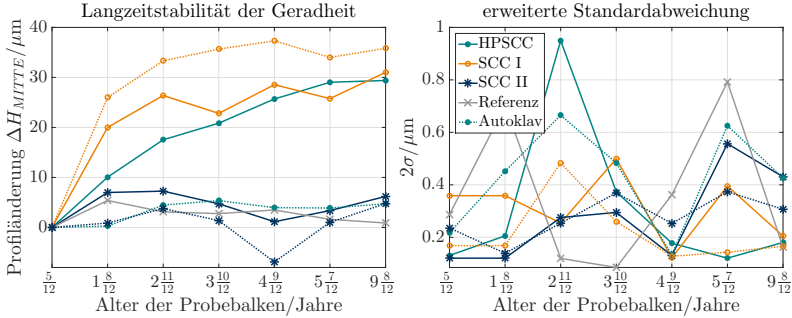


Abbildung 5.11: zeitlicher Verlauf der Geradheit bezüglich des Höhenprofils nach 5 Monaten (links) und die zugehörige erw. Standardabweichung (rechts)

Tabelle 5.2: Langzeitstabilität und Stabilisierungszeitraum des Höhenprofils in der Balkenmitte und die Erfüllung der Forderung von $\Delta H \leq 3 \mu\text{m m}^{-1}$

Geradheitsabweichung	HPSCC	SCC I	SCC II	Referenz
ΔH_{MITTE} – ohne Nachbehandlung	$\pm 14,5 \mu\text{m}$ (–)	$\pm 2,5 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 3 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 1,8 \mu\text{m}$ (++)
ΔH_{MITTE} – nach Autoklavierung	$\pm 2,5 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 3 \mu\text{m}$ (+)	$\pm 6,5 \mu\text{m}$! (–)	–
Stabilisierungszeit – ohne Nachbehandlung	≥ 5 Jahre	≈ 3 Jahre	≈ 8 Wochen	–
Stabilisierungszeit – nach Autoklavierung	$\approx 1/4$ Jahr	≈ 3 Jahre	≈ 8 Wochen	–

Qualifikation/Zielkriterium: – – $\hat{=}$ nicht stabil, – $\hat{=}$ nicht erreicht, + $\hat{=}$ erreicht, ++ $\hat{=}$ übertroffen

Die Aufwölbung des unbehandelten HPSCC-Probekörpers (grün-durchgezogen) weist bis zu einem Alter von 5 Jahren noch eine steigende Tendenz auf und kann erst später als stabil angesehen werden. Da die genauen Ausgangsstoffe dieses Betons nicht bekannt sind, kann keine Interpretation dieses Verlaufes erfolgen. Auch die Abweichung zwischen den autoklavierten (grün-gepunktet) und unbehandelten Proben konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Die Stabilisierungszeit wird durch die Autoklavierung der HPSCC-Probekörper, um 95% verkürzt. Dadurch sind Vorteile gegenüber konventionellen Bauteilen aus Naturhartgestein bezüglich der Lieferzeit zu erwarten.

Die Ergebnisse der SCC-Mischungen zeigen beim Vergleich von unbehandelten und autoklavierten Proben ähnliche Verläufe. Es sind keine messbaren Zusammenhänge zwischen der Formtreue und der Autoklavierung zu erkennen. Somit hat die Autoklavierung hier ausschließlich auf die physikalischen Eigenschaften der fertigen Betonbauteile Einfluss [Rei22].

Die Probekörper sowie die Referenz befanden sich während des gesamten Zeitraums der Messungen im selben Raum. Die Temperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit wurden im Stundentakt aufgezeichnet. Da das Labor nicht vollständig klimatisch stabilisiert ist, wurden erhebliche Schwankungen bei den Werten der Luftfeuchtemessung (Vgl. Tab. 5.3) verzeichnet, wobei es hier zu charakteristischen Verläufen zwischen Winter und Sommer kam. Das Verhalten der Probekörper zeigt jedoch insgesamt keine übereinstimmenden Tendenzen. Aufgrund der beobachteten Änderungen ist es nicht möglich, die Schwankungen der Geradheit auf die Änderung von klimatischen Bedingungen, wie z. B. der Luftfeuchtigkeitsänderung bei einem Wetterumschlag, zurückzuführen.

Tabelle 5.3: Klimatische Bedingungen und deren Maximalabweichungen während der Untersuchungen zur Langzeitstabilität

Zeitraum	Mittelwert	Tag	Monat	Jahr
Umgebungstemperatur	22,1 °C	± 1,6 K	± 2,0 K	± 2,1 K
relative Luftfeuchtigkeit	34,7%..48,9%*	± 5,1%	± 8,5%	± 15,1%
Luftdruck	955,7 mbar	± 6,9 mbar	± 12,1 mbar	± 15,2 mbar

*) Mittelwert im Winter .. Mittelwert im Sommer

Zusammenfassend sind die Mischungen SCCII und HPSCC (mit Autoklavierung) zu favorisieren, weil hierfür eine ausreichende Langzeitstabilität vorliegt. Durch die langen Stabilisierungszeiten der anderen Mischungen bestehen Nachteile in der Lieferzeit gegenüber konventionellen Bauteilen aus Naturhartgestein.

5.3 Verringerung der Form- und Lageabweichungen

Für die Herstellung von Präzisionsbauteilen mit urgeformten Funktionsflächen ist die Sicherstellung der Bauteilgestalt innerhalb der geforderten Toleranzen notwendig. Nach dem Vorgehen gemäß Abb. 5.12 wird eine Schalungsgeometrie zur präventiven Kompensation der Schwindverformung berechnet. Damit wird die Gestalt des Bauteils im Auslieferungszustand der geometrischen Form mit Abweichungen von $\leq 10 \mu\text{m(m)}^{-1}$ entsprechen.

Um die Simulation komplexer Geometrie zu ermöglichen, ist die Festlegung der Randbedingungen für den zu verwendenden Beton notwendig. Zur Bestimmung der im folgenden Simulationsbeispiel verwendeten Randbedingungen wurden die Messergebnisse des autoklavierten Probek balkens aus SCC II verwendet. Hiermit wird ein Gesamtschwinden von 0,248‰ (siehe Abb. 5.6 - links) zugrunde gelegt, womit die axiale Schwindung der Probek balken mit $\Delta x_{\text{MAX}} = -255,55 \mu\text{m}$ angesetzt werden kann. Die Aufwölbung in der Balkenmitte $\Delta H_{\text{MAX}} = 27,1 \mu\text{m}$ wird aus den Messergebnissen der Geradheitsmessung (siehe Abb. 5.9) übernommen.

5.3.1 Modellbildung zur Beschreibung der Gestaltänderung

Aus chemisch-physikalischer Sicht ist das Schwind- und Quellverhalten während der Hydratation ein komplexer Vorgang. Die Schwindverformung ist eine nicht linear skalierbare Gestaltänderung, wie sie auch bei Gussbauteilen aus Kunststoff oder Metall zu beobachten ist. Jedoch weisen die Gestaltänderungen eine gegensätzliche Charakteristik im Vergleich zu den Verformungen von thermoplastischen oder metallischen Gussteilen auf. Die im Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Formen des Schwindens führen zur Verringerung des Volumens. Dieser Effekt wird hauptsächlich durch den Kontakt mit der Umgebungsluft hervorgerufen. Je nach Zusammensetzung, Porosität und Wandstärke nehmen die Auswirkungen in Richtung des Bauteilinneren ab. Insofern ist dieser Effekt nicht mit thermisch homogenen Ausdehnungsprozessen vergleichbar.

Vorgehensweise und Simulationsstrategie

Ziel der Simulation ist die Generierung einer Schalungsgeometrie nach dem Schema in Abb. 5.12, bei der die urgeformte Bauteilgestalt nach dem Erreichen eines stationären Zustandes hinsichtlich der Schwindverformung der gewünschten geometrischen Form entspricht. Im Folgenden wird die Gestalt mit invertierter Formabweichung als **Kompensationsgeometrie** (positiv $\hat{=}$ Gussteil | negativ $\hat{=}$ Schalung) bezeichnet. Die Gestaltänderungen können durch Potenzialfelder mit nicht linearen Ansatzfunktionen

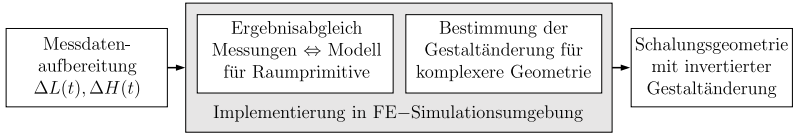


Abbildung 5.12: Verfahrensansatz für die Ermittlung einer Schalungsgeometrie zur präventiven Kompensation der Schwindverformung

beschrieben werden. Zur Einstellung der Modellparameter für spezielle Betonmischungen sind die Verformungsmessungen an den Probekörpern und Schwindprismen vorgesehen. Nach der Verifizierung findet die Simulation für komplexere Geometrie Anwendung.

Für die Verifizierung von Gestaltabweichungen während des Abbindens wurde die *Längsschwindung* ΔL der Schwindprismen sowie die *Geradheitsabweichung* ΔH der Probekörper zeitdiskret bis zum Erreichen eines stationären Zustandes aufgenommen. Mit diesen beiden Vergleichsverformungen werden die Modellparameter iterativ angepasst, bis die Abweichungen von Simulation und Messung im Bereich der Messunsicherheit der verwendeten Messmethode liegen. Nach der Bestimmung der Modellparameter für jede Betonmischung kann die Kompensationsgeometrie für beliebige Bauteile erstellt werden.

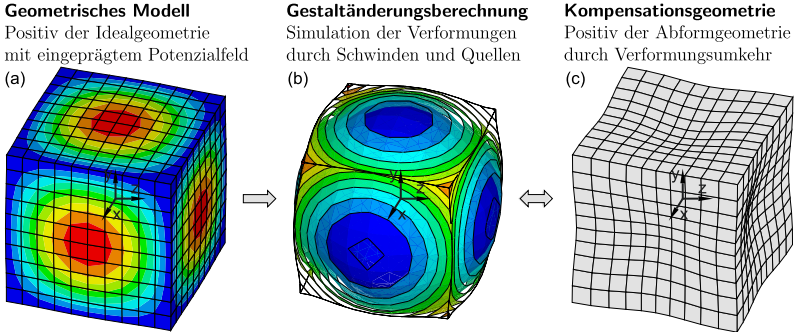


Abbildung 5.13: Qualitative Darstellung der Gestaltänderungssimulation mittels Potenzialfeldern (a-Idealgeometrie mit Gestaltänderungspotenzial | b-simulierte Verformung | c-positive Kompensationsgeometrie)

Da durch analytische Beschreibungen keine ausreichende Güte der Abbildung des physikalischen Verhaltens erreicht werden kann, wurde auf die FE-Methode zurückgegriffen. Die FEM-Simulationen wurden im Rahmen dieser Arbeit durch die Programmierung im **ANSYS® Parametric Design Language** (APDL) der **CADFEM GmbH** durchgeführt.

In Abb. 5.13 ist beispielhaft und qualitativ das Vorgehen zur Ermittlung der Kompensationsgeometrie für einen Würfel dargestellt. Die notwendigen Schritte sind:

1. Einprägung des Gestaltänderungspotenzials auf ein Modell mit Idealgeometrie (a)
2. Simulation der resultierenden Verformungen (b)
3. Invertierung der Verformung zur Ermittlung der Kompensationsgeometrie (c)

Zur besseren Veranschaulichung ist hierbei die Verformungscharakteristik stark überzeichnet. Um eine Simulation der Verformungscharakteristiken der Schwindverformung zu ermöglichen, wurden die folgenden Ansätze identifiziert und näher untersucht.

Ansatz: skaliertes Druckbehälter

Ein erster Ansatz für die Darstellung einer nach außen gewölbten und zusätzlich geschrumpften Struktur erfolgte durch Einprägung von mechanischen Spannungen. Dabei wird das Bauteil als Schalenmodell diskretisiert und die erforderlichen Ergebnisse über einen zweistufigen Berechnungsgang erzielt. Im ersten Schritt wird das Schalenmodell unter erhöhtem Innendruck verformt und im zweiten Schritt linear verkleinert. Die Zustandsbeschreibung ist hierbei nicht eindeutig. Da unendlich viele Konstellationen für den E-Modul, die Querkontraktionszahl, die Wandstärke, den angelegten Druck und den Skalierungsfaktor zum selben Ergebnis führen, ist dieser Ansatz nicht zielführend.

Ansatz: Temperaturfeldeinprägung

Durch die Nutzung kommerziell verfügbarer Berechnungstools für Potenzialfeldanalysen kann der Aufwand für die Modellerstellung erheblich reduziert werden. Da es kein direkt passfähiges Berechnungstool für die Anwendung von Potenzialfeldern auf strukturmechanische Eigenschaften gibt, wurde auf die Verwendung von Temperaturfeldern zurückgegriffen. Die thermische Dehnung stellt hierbei das notwendige Äquivalent zur chemisch-physikalisch induzierten Gestaltänderung dar. Mit der Einprägung von diskreten Temperaturverteilungen ist eine mathematisch adäquate Abbildung der exakten Verformungscharakteristiken möglich. Um die Parameter des Modells nach Abb. 5.12 eindeutig verifizieren zu können, ist ein Modellansatz mit zwei unabhängigen Parametern notwendig.

Für die Berechnung der thermischen Verformung sind die **Initialtemperatur** T_{INT} (APDL $\hat{=}$ REFT) und der **Wärmeausdehnungskoeffizient** α (APDL $\hat{=}$ ALPX) die wichtigsten nicht ortsgebundenen Parameter. Wird ein exakter Würfel (siehe Abb. 5.13- a) nach der Initialisierung an den Außenkanten abgekühlt (blau) und in der Mitte erwärmt (rot), resultiert die zu erwartende Verformungscharakteristik (siehe Abb. 5.13- b).

Zur Verifizierung des Modells wird die Kombination von T_{INT} und α ermittelt, womit die errechneten Verformungen mit den Messdaten aus dem Schwindversuch und der Geradheitsmessung übereinstimmen. Die Bauteildimensionen sind durch die Gestalt der geometrischen Sollform festgelegt und in erster Näherung als konstant anzusehen.

Da die Größen T_{INT} und α lediglich als Vehikel zur Einprägung der Gestaltänderung dienen und diese sehr abstrakt ohne Bezug zu sonstigen thermischen Vorgängen verwendet werden, ist die Einführung der dimensionslosen Größen **Bezugspotenzial** T_{BEZUG} (*REFT*) und **Ersatzdehnungskoeffizient** α_{ERSATZ} (*ALPX*) zweckmäßig. Der Wert für T_{BEZUG} zur Definition des initialen Zustandes vor dem Beginn des Abbindevorgangs ist im Bereich $0 \leq T_{\text{BEZUG}} \leq 1$ zu wählen. T_{BEZUG} wird maßgeblich für die Ausprägungscharakteristik der nicht-ähnlichen Gestaltänderung verwendet. α_{ERSATZ} ist schwindungsproportional und kann einen beliebigen positiven Wert annehmen. Hiermit ist die Steuerung der Höhe des Gestaltänderungspotenzials der jeweiligen Betonmischung möglich.

Nach der Initialisierung des Ausgangszustandes mit $T_{\text{BEZUG}} = \text{konst.}$ werden die Knoten des Modells über eine tangential stetige Ansatzfunktion mit lokalen Werten für das **Potenzialfeld** $T(x,y,z)$ belegt. Mit einem harmonischen Ansatz werden Unstetigkeiten für den Verlauf des Potenzialgradienten innerhalb eines Bauteiles vermieden. Da T_{BEZUG} und α_{ERSATZ} das Verformungsverhalten nicht unabhängig beeinflussen, bestehen keine direkten Zusammenhänge zwischen den Messwerten und den Modellparametern. Eine explizite Lösung für die Parameterbestimmung ist damit nicht möglich. Dennoch ist für jede Gestaltänderung eine eindeutige Kombination von T_{BEZUG} und α_{ERSATZ} repräsentativ.

Für die Vorhersage der Gestaltänderung von komplexeren dünnwandigen Bauteilen sind alle Knoten des Bauteils mit T_{BEZUG} , die mit den Vergleichsmessungen verifiziert wurden, festzuhalten. Im Anschluss an die Initialisierung des Ausgangszustandes werden die Außenkanten bzw. -flächen mit dem Minimalwert ($T = 0$) beaufschlagt und die Verteilung ($0 \leq T \leq 1$) in der charakteristischen Teilgeometrie, wie z. B. Schwerachsen von Verripungselementen, eingepägt. Die Werte der Potenzialverteilung nehmen ausgehend vom Gesamtschwerpunkt der Struktur mit $T = 1$ in radialer Richtung mit der entsprechenden Ansatzfunktion zur äußersten Ecke der Schwerachsenpfade zu $T = 0$ ab.

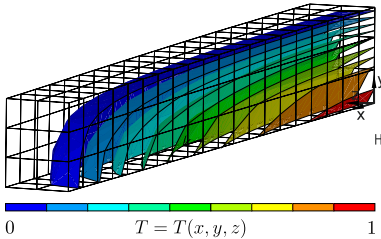
Die Kompensationsgeometrie kann über die Umkehr der Normalverschiebungen an den Modellaußenflächen bestimmt werden. Die Punkt-für-Punkt Invertierung ist rechentechnisch sehr aufwendig. Die direkte Generierung der Kompensationsgeometrie kann durch die Umkehr der Simulationsrandbedingungen erfolgen. Hierbei werden die Grenzwerte für T vertauscht ($0 \Rightarrow 1/1 \Rightarrow 0$) und das ermittelte T_{BEZUG} wird um $T = 0,5$ gespiegelt.

5.3.2 Simulationsmodell und Einstellung der Randbedingungen

Für die Simulation der Gestaltänderung beim Erreichen des stationären Zustandes im Feuchtgleichgewicht ist die *Temperaturfeldeinprägung* als das Verfahren mit dem höchsten Potenzial zur Vereinfachung ermittelt worden. Zur Simulation der verformten Geometrie werden die Knoten mit den räumlich verteilten und verformungsadäquaten Potenzialwerten gemäß Gl. 5.3 mit $T_{\text{MIN}} = 0$ und $T_{\text{MAX}} = 1$ beaufschlagt.

$$T(x,y,z) = T_{\text{MIN}} + (T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}) \cos\left(\frac{\pi}{L}x\right) \cos\left(\frac{\pi}{H}y\right) \cos\left(\frac{\pi}{B}z\right) \quad (5.3)$$

Idealgometrie mit Potenzialfeld:



Geometrie nach Verformung:

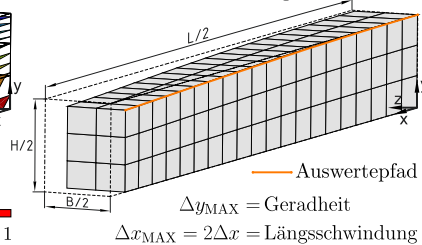


Abbildung 5.14: FEM-Simulation der Gestalt eines Achtelmodells der Probekanten (links: Randbedingungen für den stationären Zustand | rechts: Ausgangsgeometrie und verformtes Modell)

In Abbildung 5.14-rechts sind die qualitativen Ergebnisse der Simulation eines Achtelmodells von einem $L = 1030$ mm langen Balken mit dem Querschnitt von $(B \cdot H) = (100 \cdot 130)$ mm² dargestellt. Der Koordinatenursprung liegt hierbei im Schwerpunkt des ursprünglichen Quaders. Die Mittelebenen (xy -Ebene, yz -Ebene und xz -Ebene) sind Symmetrieebenen, an denen keine Verschiebung in die jeweilige Normalenrichtung auftritt. Mit einem *Ersatzdehnungskoeffizient* $\alpha_{\text{ERSATZ}} = 0,001$ und durch die Initialisierung mit einem *Bezugspotenzial* $T_{\text{BEZUG}} = 0,5$ können bei räumlicher Verteilung im Potenzialfeld $T = T(x,y,z)$ (siehe Abb. 5.14-links) die Messergebnisse des autoklavierten SCC II-Probekanten (siehe Abb. 5.9-links/blau-gepunktet) exakt abgebildet werden.

Dieser Modellansatz ist aufgrund der notwendigen räumlichen Verteilung der Potenzialwerte nur auf Raumprimitive anwendbar. Für die Simulation von komplexerer Geometrie ist der Modellansatz zu vereinfachen. Es liegt nahe, die Definition der Randbedingungen zu abstrahieren und die Dimension des Gradientenfeldes zu verringern, indem die Variation einzelner Parameter in Gl. 5.3 entfällt.

Exemplarisch wurden die folgenden Randbedingungen verwendet und die Simulationsergebnisse grafisch dargestellt (siehe Abb. 5.15):

1. 3D-Potenzialfeld | $T = T(x, y, z)$ | Außenflächen $T = 0$ (grün)
2. 2D-äquatoriales Potenzialfeld | $T = T(x, z) \rightarrow y = 0$ | Außenkanten $T = 0$ (orange)
3. 1D-axialer Potenzialverlauf | $T(x) \rightarrow y = 0, z = 0$ | Außenkanten $T = 0$ (blau)

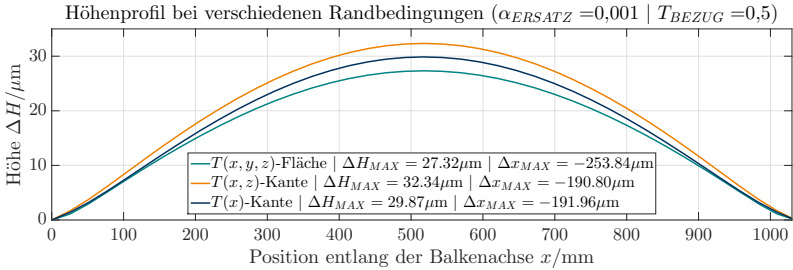


Abbildung 5.15: FEM-Simulationsergebnisse des Achtelmodells der Probekanten

Beim eindimensionalen Gradientenfeld entlang der Balkenachse ist die Abstraktionsstufe am höchsten, wodurch die Aufprägung der Randbedingungen bei komplexerer Geometrie gegenüber einer mehrdimensionalen Potenzialfeldeinprägung stark vereinfacht wird.

Der qualitative Kurvenverlauf der Verschiebungen ist bei Volumen-, Flächen und Linear-einprägung sehr ähnlich. Jedoch ist bei Beibehaltung der aufgetragenen Randbedingungen und Materialkonstanten die errechnete Längsschwindung ca. 20% geringer als bei Volumeneinprägung. Die Modellparameter müssen für die Reduktion der Dimensionen des Gradientenfeldes entsprechend angepasst werden. Bei der Anpassung ist der Wert für T_{BEZUG} weiter zu verringern und α_{ERSATZ} zu erhöhen, bis die quantitativ äquivalenten Verschiebungen für diese Geometrie erreicht werden. Hiermit ist die Möglichkeit für eine vereinfachte Simulation der Gestaltänderung von Raumprimitiven gegeben.

Die Übertragung auf komplexere Geometrie erfolgt entsprechend der in Abschnitt 5.3.1 erläuterten Vorgehensweise. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch demonstriert und mit Messergebnissen verglichen. Mit Hilfe von FEM-Modellen und Werkzeugen gemäß dem aktuellen Stand der Technik war es hierbei jedoch nicht möglich, ein allgemein gültiges und vollautomatisiertes Simulationswerkzeug zur Vorhersage der schwindungsabhängigen Gestaltänderung zu entwickeln.

Bei der Vorbereitung der FEM-Simulation von komplexeren Bauteilstrukturen ist eine manuelle Einteilung von Querschnittssektionen zur Definition der erforderlichen **Potenzialpfade** im Bauteil durchzuführen. Für die Entwicklung einer entsprechenden CAE-Umgebung zur automatisierten Erkennung dieser Potenzialpfade sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig.

5.3.3 Maßnahmen zur Verringerung von Gestaltabweichungen

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Langzeitstabilität ist das Versiegeln der Betonoberflächen, um den Austausch von Feuchtigkeit mit der Umgebung zu verhindern. Grund zu dieser Annahme ist der Unterschied zwischen autogenem Schwinden (durch die chemisch-physikalische Reaktion induziert) und weiteren Schwindformen beim Abbinden und Aushärten (siehe Tab. 2.3). Hierbei ist jedoch die gesamte Bauteiloberfläche mit der Versiegelung zu versehen. Da die Anforderungen an die Formtreue von direkt urgeformten Präzisionsflächen größer sind als die Toleranzen der Schichtdicke von kommerziell verfügbaren Beschichtungen, ist diese Möglichkeit aus technologischer Sicht als problematisch einzuschätzen. Weitere Ansätze zur Verringerung der Formabweichungen sind prinzipiell:

- Reduktion des ungebundenen Wassers in der Betonrezeptur
- Stabilisierung der klimatischen Bedingungen in der Arbeitsumgebung
- Aktive Temperierung der Bauteile während des Betriebes
- Erlangen der Idealgeometrie durch definierte Abweichungen der Form
- Nachträgliche Geometriekorrektur durch mittelbare Spannelemente
- Vorbeugende Geometriekorrektur durch unmittelbare Vorspannelemente

Die Möglichkeiten der Geometriekorrektur über mittelbare Spannelemente können, durch die Aufbringung von externen Kräften, mit sehr einfachen Mitteln an Gestellbauteilen umgesetzt werden. Sie sind daher sehr gut einsetzbar und für die Verwendung zu empfehlen.

Die unmittelbare Vorspannung durch direkt vergossene, seitens der Schalung vorgespannte, Elemente ist dagegen technologisch sehr schwierig umzusetzen. Da zum Erreichen eines definierten Verformungszustandes meist mehrere Probeteile notwendig sind, ist diese Variante lediglich bedingt bei Serienbauteilen mit größeren Stückzahlen einsetzbar.

Allerdings kann durch die unmittelbare Vorspannung Material gespart werden, weil die Bauteile mit Augenmerk auf beanspruchungsgerechte Gestaltung einem höheren Anteil an Druckspannung (Gl. 2.2 \rightarrow Zug : Druck \approx 1 : 14..21) unterliegen. Jedoch wird dieser Vorteil bei beiden Vorspannverfahren durch die Einbringung von anderen Werkstoffen und den damit verbundenen thermischen Inhomogenitäten relativiert.

5.3.4 Schalungssysteme

Zur Erzeugung von Präzisionsflächen für aerostatische Führungselemente an Bauteilen aus hydraulisch gebundenem Beton im Urformprozess wird die Einhaltung der Richtlinien aus Anhang A.2 empfohlen. Hiermit wird das Herstellen von langzeitstabilen Präzisionsbetonbauteilen für den alternativen Einsatz zu Naturhartgestein im Präzisionsmaschinenbau im Urformprozess ermöglicht. Die hierfür notwendigen Schalungsbauteile müssen unterschiedlichen Präzisionsansprüchen genügen und lassen sich im Wesentlichen in folgende Kategorien einteilen (aufgelistet nach steigenden Toleranzen):

1. **Abformnormale** aus Naturhartgestein mit den höchsten Anforderungen an Ebenheit, Welligkeit und Rauheit (Toleranzen und Formgeometrie der Präzisionsflächen)
2. **Trennfolien** zum Schutz der Schalungsbauteile und Beeinflussung der lokalen Oberflächenqualität bezüglich Rauheit und Welligkeit (minimaler Restluftspalt)
3. **Koppelstellenschalungen** für die Definition der Anschlussgeometrie (Abmessungen, Abmaße und Formabweichungen für Koppelstellen zu Nachbarelementen)
4. **Einlegeteile** mit Koppelstellen zur Positionierung (Einhaltung der erforderlichen Anschluss-/Montagetoleranzen zu Nachbarelementen)
5. **Konturschalungen** für die Definition der Bauteilgeometrie/-gestalt, wie z. B. Innenkonturen oder Versteifungsrippen (meist Wandstärkentoleranz maßgebend)

Die Ausrichtung der Präzisionsfläche des Abformnormals sollte beim Gießprozess horizontal erfolgen, da nur diese nach aktuellem Stand der Technik in der angestrebten Qualität durch Urformen blasenfrei hergestellt werden kann. Gestellbauteile mit Funktionsflächen verschiedener Ausrichtung sollten daher mehrteilig gegossen und später montiert werden.

Für Bauteile mit mehreren höhenversetzten, parallelen Funktionsflächen ist der Abformkörper aus mehreren Abformnormalen zu bilden (Baukasten). Alternativ besteht die Möglichkeit, weitere Präzisionsflächen durch nachträgliches Abformen hinzuzufügen. Diese Technologie wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt und sollte der Gegenstand von weiterführenden Arbeiten sein.

Zur Herstellung von Koppelstellen- und Konturschalungen sowie Einlegeteilen kommen je nach Anwendung und Bauteildimension mehrere Werkstoffe und Werkstoffkombinationen infrage. Ein Überblick für einschlägige Gestaltungsvarianten für Schalungen von Maschinenbauteilen aus Beton ist in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

Für die Demonstratoren (siehe Abb. 4.7) wurde eine Schalung als Frästeilkonstruktion für die Kleinserienproduktion vorgesehen. Die Schalungsgeometrie wurde aus hochdichtem PUR-Blockmaterial *NECURON® 301* gefräst und mit hochfestem

MIPA HS PUR 2K-Acryllack beschichtet. Die Verwendung dieser Formen erbrachte beim direkten Abformen eine gute Reproduzierbarkeit der Geometrie für ca. 10 Abgüsse. Danach wurden die Formen aufbereitet oder erneut beschichtet.

Tabelle 5.4: Konstruktionsvarianten für verschiedene Schalungen

<i>Bauteilgeometrie</i>	Beliebige Anordnung von ebenen Elementen	Komplexe Anordnung von Freiformflächen	Versteifung durch Support- strukturen
Schalplattenkonstruktion (Verbundholz-Oberflächen versiegelt)	++	–	(+)
Kompaktplattenkonstruktion (HPL-Platten mit hoher Steifigkeit)	++	–	(+)
Schweißkonstruktion (Stahl- oder Aluminiumbleche)	++	–	+
Blechumformteile (Stahl- oder Aluminiumbleche)	(+)	++	–
Frästeilkonstruktion (hochverdichtete PUR-Schäume*)	–	++	++
3D-Druckkonstruktion (vorwiegend ABS im FDM-Verfahren)	–	(+)	+

– = untauglich, (+) = bedingt tauglich, + = tauglich, ++ = sehr tauglich

*) Bei direktem Kontakt mit dem Beton ist die Oberfläche, z. B. mit hochfestem PUR-Lack, zu versiegeln.

In der industriellen Serienfertigung von Betonfertigteilen sind Schalungen in Verbundkonstruktion mittels Blechschweißteilen und Supportvolumen aus PUR-Schaum weit verbreitet. Dieses Schalungskonzept konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht für die festgelegte Geometrie skaliert bzw. aufgrund der begrenzten räumlichen Möglichkeiten nicht an weiteren Bauteilen untersucht werden.

Direkt vergossene Koppelstellenelemente und integrierte Schalungsbauteile sind ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal für urformend hergestellte Maschinenbauteile. Diese sind möglichst einfach zu gestalten, um einen größtmöglichen Kostenvorteil gegenüber Koppelstellen mit nachträglicher Montage zu erzielen. Die Elemente sind zusätzlich zum Stoffschluss mit einer beanspruchungsgerechten Formpaarung zu versehen. Allerdings darf das Formfüllverhalten durch die eingegossenen Elemente nicht negativ beeinflusst werden. Es ist auf die gleichmäßige Lastverteilung zu achten, sodass keine Spannungsspitzen an Querschnittsübergängen entstehen. Zusätzlich ist eine Geometrie zur Verankerung normal zur Betonbezugsfläche vorzusehen.

5.4 Zusammenfassung und Gestaltungsrichtlinien

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, einen geeigneten Beton mit geringen Schwindverformungen zu entwickeln, der die Herstellung von Bauteilen mit den gestellten Anforderungen an die Formtreue ermöglicht. Mit der entwickelten Technologie können Bauteile in vergleichbarer Qualität zu Naturhartgestein produziert werden. Eine hohe Gestaltungsvielfalt und ein hohes Einsparungspotenzial bringen zusätzliche Vorteile.

Tabelle 5.5: Entwurfsrichtlinien für die Entwicklung von Präzisionsbauteilen

<i>Richtlinie</i>	<i>Bemerkung</i>
1. Reduzierung der Anzahl der Präzisionsflächen	Die Funktionsgeometrie mit der höchsten Präzision (Ebtheit, Welligkeit und Rauheit) ist, soweit möglich, auf eine Ebene zu reduzieren und für den Herstellprozess horizontal auszurichten.
2. versetzte Präzisionsflächen mit identischen Normalenrichtungen	Für die Herstellung der Funktionsgeometrie auf verschiedenen Ebenen mit Parallelversatz ist die entsprechende Anzahl von Normalen mit einfacher Geometrie günstig, sofern die Ausrichtung der Relativlage zwischen den Abformnormalen innerhalb der geforderten Abweichungen möglich ist.
3. Präzisionsflächen mit verschiedenen Normalenrichtungen	Für die Herstellung von Funktionflächen, welche unter einem Winkelversatz angeordnet sind, sollten die Einzelflächen auf die entsprechende Anzahl von Betonteilen aufgeteilt und nachträglich gefügt werden.
4. Positionierhilfen für Einlegeteile mit Koppelstellen	Für die Lagedefinition zur Schalung ist eine entsprechende Geometrie für die Einhaltung der erforderlichen Anschluss- und Montagetoleranzen vorzusehen.
5. Nachbearbeitung von Koppelstellenelementen	Für die Sicherstellung geringer Lagetoleranzen zwischen Koppelstellen und urgeformten Präzisionsflächen ist in der Regel nach dem Abbinden des Betons eine mechanische Nachbearbeitung notwendig.
6. Verkürzung von Toleranzketten	Die Lageabweichungen der Koppelstellen an gegenüberliegenden Flächen werden maßgeblich durch die Schwindung beeinflusst.
7. Verwendung von Werkstoffen gleicher thermischer Dehnung	Bei der Verwendung von eingebetteten Elementen ist auf Werkstoffe mit ähnlichem Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzugreifen.
8. Grobe Tolerierung der sonstigen Bauteilkonturen	Sonstige Bauteilstrukturen können grob toleriert ausgeführt werden, sofern die Funktion hierdurch nicht gefährdet wird.
9. Gestaltänderungskorrektur durch Spannelemente	Für die nachträgliche Geometriekorrektur sind entweder mittelbare Spannelemente oder für die vorbeugende Geometriekorrektur unmittelbare Vorspannelemente vorzusehen.

Die angestrebten wissenschaftlich-technischen Ziele wurden weitgehend erreicht. Die enormen Anforderungen an die Prozessumgebung, insbesondere an die Sauberkeit lassen jedoch eine industrielle Umsetzung in der heute vorzufindenden Betonwerkumgebung nicht zu. Durch die Einhaltung der folgenden Richtlinien (siehe Tab. 5.5) wird die Entwicklung

von Präzisionsbetonbauteilen ermöglicht. Unter Verwendung der empfohlenen Betonmischungen können Präzisionsbauteile mit urgeformten Oberflächen für aerostatische Anwendungen mit einer mit Granit vergleichbaren Langzeitstabilität hergestellt werden.

6 Bauteile mit gesteigerter Betriebsfestigkeit

Die Betriebsfestigkeit von bewegten Bauteilen, welche hohen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, ist entscheidend für die Gewährleistung der Funktion und Betriebssicherheit von Maschinensystemen. Die Betriebsfestigkeit von Betonelementen kann durch die in Abschnitt 2.3.2 erläuterten Arten gesteigert werden.

Das Aufbringen von Beschichtungen in einem kalten Prozess ist die erfolgsversprechendste Variante zur Verfestigung der Bauteiloberfläche von Präzisionsbauteilen. Der Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Bauteils ist hierbei gering [Goj+14]. Für die Qualifizierung von innovativen Beschichtungssystemen zur Steigerung der Betriebsfestigkeit werden Beschichtungen ausgewählt, mit denen eine Beeinflussung der Randschicht bei minimalem Materialauftrag auf der Bauteiloberfläche zur erwarten ist. Hiermit wird die Maßhaltigkeit des abgeformten Betonbauteils sichergestellt.

6.1 Qualifizierung des Betriebsfestigkeitssteigerungspotenzials

Für die Ermittlung der Betriebsfestigkeitssteigerung von Bauteilen mit beliebiger Gestalt ist die Erstellung eines geeigneten Simulationsmodells erforderlich. Die hierfür notwendigen Schritte sind in Tab. 6.1 aufgeführt und nachfolgend detailliert beschrieben.

Tabelle 6.1: Entwicklung einer Strategie zur Simulation des Beschichtungseinflusses

<i>Entwicklungsschritt</i>	<i>Arbeitsinhalte</i>
1. Identifizierung von Wirkmechanismen	Bestimmung möglicher Effekte für die Betriebsfestigkeitssteigerung sowie die Klärung der Einflüsse und Wirkmechanismen auf Oberflächen von Betonbauteilen
2. Mathematische Modellbildung	Beschreibung des Einflusses auf die Bauteilsteifigkeit bzw. -festigkeit und die mathematische Beschreibung der Modifikation mechanischer Eigenschaften
3. Experimentelle Verifizierung	experimenteller Ansatz zur Beschichtungsqualifizierung, Methoden zur Verifizierung des Berechnungsmodells und Ableitung der Modellparameter
4. Umsetzung des Simulationsmodells	Übertragung der abstrahierten Beschichtungseigenschaften zur Simulation der Betriebsfestigkeitssteigerung von Bauteilen mit komplexer Geometrie

6.1.1 Beeinflussung der Betriebsfestigkeit durch Beschichtung

Die Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtung ist durch die Überlagerung verschiedener Effekte geprägt. Diese Effekte können nicht eindeutig voneinander getrennt werden und stehen in gegenseitiger Wechselwirkung. Die Wirkmechanismen zur Betriebsfestigkeitssteigerung und deren Wechselwirkungen sind schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt.



Abbildung 6.1: Wirkmechanismen bei der Betriebsfestigkeitssteigerung durch Oberflächenbeschichtung

In jedem Fall erfolgt der Ausgleich von Fehlstellen, eine Steifigkeitserhöhung und die Modifikation der Eigenspannungseigenschaft in Oberflächennähe. Diese Effekte haben unterschiedliche Einflüsse auf die Lebensdauerkennlinie nach *Wöhler* [Hai06], welche eine bewährte Möglichkeit zur Darstellung der Betriebsfestigkeit ist. Mit der ermittelten *Wöhlerlinie* für ein festgelegtes Bauteil können Aussagen über die zu erwartende Schädigung bei bekannter dynamischer Beanspruchung getroffen werden.

Beim Fehlstellenausgleich wird die Neigung der *Wöhlerlinie* durch Herabsetzung der Kerbwirkung, aufgrund von verschlossenen Oberflächenrissen beeinflusst. Die Erhöhung der Steifigkeit führt im Vergleich von beschichtetem und unbeschichtetem Zustand bei äquivalenter Last zu einer geringeren Bauteilverformung. Damit wird das relative Spannungsniveau im Basisbauteil herabgesetzt. Die direkte Beeinflussung der Eigenspannungen in der Bauteiloberfläche führt zu ähnlichen Effekten. Durch die Steifigkeitserhöhung und die Einprägung von Eigenspannungen wird die *Wöhlerlinie* parallel nach oben versetzt.

Im Simulationsmodell sind die Einflüsse aller Effekte einzubinden. Die Diskretisierung eines Ausgleichs von zufällig angeordneten und verteilten Oberflächendefekten in einem FE-Modell ist mit sehr hohem rechentechnischen Aufwand verbunden und nicht praktikabel. Die Messung des Eigenspannungszustandes in Oberflächennähe kann messtechnisch nach aktuellem Stand der Technik nicht zerstörungsfrei erfolgen. Da im Materialgefüge kein homogenes Kristallgitter mit diskreten Ebenen gebildet wird, können auch refraktome-

trische Messverfahren nicht zum Einsatz kommen. Bei der Erstellung von angeschliffenen Bauteilquerschnittsflächen zur lokalen Härtemessung wird die Eigenspannungscharakteristik selbst beeinflusst. Mit entsprechenden Tests können demzufolge keine verwertbaren Ergebnisse bezüglich des Eigenspannungszustandes ermittelt werden. Ein Modell zur Berechnung der Steifigkeitserhöhung durch Infiltration und großflächigen Materialauftrag kann hingegen für Primitivgeometrie analytisch beherrscht und versuchstechnisch verifiziert werden.

6.1.2 Mathematische Modellbildung für Primitivgeometrie

Die mathematische Beschreibung des Beschichtungseinflusses auf die Steifigkeit einer mechanisch beanspruchten quaderförmigen Geometrie erfolgt über die Zerlegung in differenzielle Steifigkeiten, welche sich in Form eines lokal variablen E-Moduls ausdrücken lassen. Das Material des Basisbauteils wird nachfolgend als **Substrat** bezeichnet.

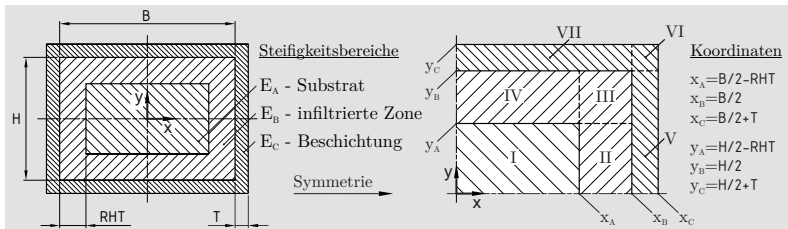


Abbildung 6.2: Einflusszonen und Integrationsintervalle innerhalb des Querschnitts eines beschichteten Quaders

Der Rechteckquerschnitt kann unter der Annahme, dass das Substrat makroskopisch homogen ist, in drei Bereiche mit 2-facher Symmetrie zum Flächenschwerpunkt aufgeteilt werden. In Abb. 6.2-links sind diese Bereiche eingezeichnet. Im Zentrum liegt der Bereich, der vollständig durch die Substrateigenschaften E_A (siehe Tab. 6.2) beschrieben wird.

Die auf das Substrat mit der **Schichtstärke** T aufgetragene äußere Schale ist durch die Beschichtungseigenschaften E_C gekennzeichnet. Im Übergangsbereich zwischen reinem Substrat und der aufgetragenen Beschichtung befindet sich die **Infiltrationszone** mit der **Eindringtiefe** RHT und der E-Modulverteilung E_B . Bei idealsymmetrischer Gestalt und symmetrischer Verteilung der mechanischen Größen kann die Analyse auf einen Quadranten (siehe Abb. 6.2- rechts) reduziert werden. Die mit diesem Modell ermittelten Werte für die Zug-, Biege- oder auch Torsionssteifigkeit des Gesamtquerschnitts entsprechen damit dem vierfachen der Steifigkeit eines Quadranten.

Tabelle 6.2: Formelzeichen für E-Modulverteilungen und E-Modulwerte für die Modellbildung zur Berechnung der Steifigkeitserhöhung durch Beschichtungen

E-Modul-Formelzeichen	Beschreibung/Ort
E_A Verteilung-Substrat	Steifigkeitsverteilung im Substrat $\hat{=}$ <i>Substrat-E-Modul</i> bei homogenem Material
E_B Verteilung-Infiltrationszone	Steifigkeitsverteilung innerhalb der infiltrierten Zone vom Bauteilrand bis zur <i>Eindringtiefe RHT</i>
E_C Verteilung-Beschichtung	Steifigkeitsverteilung im Beschichtungsmaterial vom Bauteilrand bis zur <i>Schichtstärke T</i>
E_0 Wert-Substrat	zwischen reinem Substrat und Infiltrationszone (Abstand zur Bauteiloberfläche = $-RHT$) $\hat{=}$ <i>Substrat-E-Modul</i> bei homogenem Material
E_1 Wert-Beschichtungsrand	am äußeren Rand der Beschichtung (Abstand zur Bauteiloberfläche = T)
E_2 Wert-Bauteilrand	direkt am Bauteilrand zwischen Infiltrationszone und Beschichtung

Weil das Beschichtungsmaterial nicht mit konstanter Konzentration bis zu einer diskreten Position eindringt, sondern zum Inneren hin abnimmt, wird von einem stetigen Abfall des Verhältnisses zwischen Beschichtungs- und Substratmaterial ausgegangen. Für die Beschreibung des E-Modulverlaufs in der infiltrierten Zone wird $E_0 = E_A$ und $E_2 = E_B$ max angesetzt. E_1 entspricht grundsätzlich dem E-Modul des Beschichtungsmaterials, kann jedoch durch zusätzliche Oberflächeneffekte erhöht oder herabgesetzt werden. Deshalb wird auch für die mathematische Beschreibung der Beschichtung von einem variablen Verlauf des E-Moduls ausgegangen. Zur Vermeidung von Sprüngen oder Unstetigkeiten im E-Modul-Verlauf innerhalb des Bauteiles wird eine stetig differenzierbare Ansatzfunktion gewählt. Für die Approximation der E-Modulverteilung im Quadranten wird daher ein trigonometrischer Ansatz in der Gestalt einer *COS*-Funktion gewählt. Die Ansatzfunktionen für die Intervalle I bis VII (siehe Abb.6.2-rechts) sind in den Gl. 6.1 bis 6.7 gezeigt.

$$E_I = E_A = \text{konst.} = E_0 \quad (6.1)$$

$$E_{II} = E_B(x) = \frac{1}{2}(E_2 + E_0) + \frac{(E_2 - E_0)}{2} \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \quad (6.2)$$

$$E_{III} = E_B(x,y) = E_0 + (E_2 - E_0) \dots \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \right] \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \right] \right\} \quad (6.3)$$

$$E_{IV} = E_B(y) = \frac{1}{2}(E_2 + E_0) + \frac{(E_2 - E_0)}{2} \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \quad (6.4)$$

$$E_V = E_C(x) = E_1 + (E_2 - E_1) \cos \left[\frac{\pi}{2T} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \quad (6.5)$$

$$E_{VI} = E_C(x, y) = E_1 + (E_2 - E_1) \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \right\} \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \right\} \quad (6.6)$$

$$E_{VII} = E_C(y) = E_1 + (E_2 - E_1) \cos \left[\frac{\pi}{2T} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \quad (6.7)$$

Damit ist die E-Modulverteilung über den Querschnitt beschrieben und die Steifigkeit kann für die mechanische Beanspruchung berechnet werden. Eine exemplarische E-Modulverteilung ist qualitativ in Abb. 6.3 durch ein Farbschema dargestellt. Nach den Grundsätzen der beanspruchungsgerechten Gestaltung ist eine Torsionsbeanspruchung zu vermeiden. Aus diesem Grund werden die folgenden Ausführungen auf die Berechnung der Zug- und Biegesteifigkeit beschränkt.

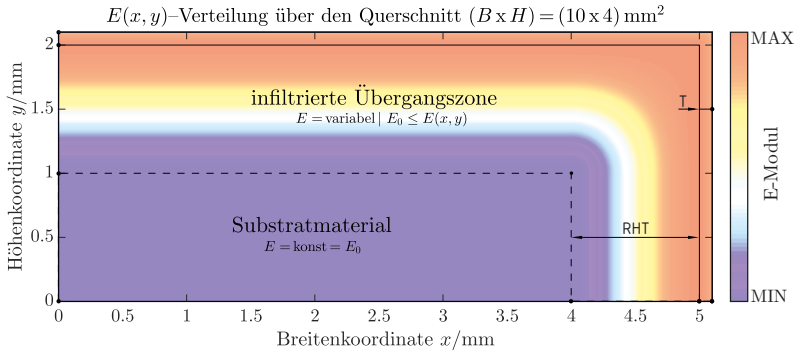


Abbildung 6.3: Approximierte E-Modulverteilung innerhalb des 1. Quadranten des Querschnitts eines beschichteten Quaders

Die **Zugsteifigkeit** C_{Zug} wird nach Gl. 6.8 berechnet und die **Biegesteifigkeit** $C_{Biegung}$ wird mit der unter Gl. 6.9 aufgeführten Proportionalität ausgedrückt. Die Länge L der *Schulterstäbe* nach *DIN 50125* [DIN50125] beträgt 35 mm. Durch die Lösung der Flächenintegrale über dA in den Intervallen I bis VII mit den Grenzkordinaten aus Abb. 6.2-rechts können die Steifigkeiten C_{Zug} und $C_{Biegung}$ analytisch oder numerisch errechnet werden. Die Lösungen der Integrale können im Anhang A.3 eingesehen werden.

$$C_{\text{Zug}} = \frac{1}{L} \int E(x,y) dA \quad (6.8) \quad C_{\text{Biegung}} \approx \frac{1}{L^3} \int y^2 E(x,y) dA \quad (6.9)$$

6.1.3 Versuchsgrundlagen für die Qualifizierung von Beschichtungen

Die Bestimmung des **Substrat-E-Moduls** = *E-Modul-Wert-Substrat* E_0 erfolgt durch die Prüfung von unbeschichteten Schulterstäben. Zur vollständigen mathematischen Beschreibung der Steifigkeit des beschichteten Querschnitts (siehe Abb. 6.3) ist die Bestimmung der geometrischen Schichteigenschaften *Eindringtiefe RHT* und *Schichtstärke T* (siehe Abb. 6.2-links) sowie die beiden Werte für *E-Modul-Wert-Beschichtungsrand* E_1 und *E-Modul-Wert-Bauteilrand* E_2 (siehe Abb. 6.4-rechts) notwendig. Die Gleichungen 6.8 und 6.9 sind linear unabhängig, da im Integral der Biegesteifigkeit der quadratische Abstand y^2 zur neutralen Faser berücksichtigt wird. Über die Kombination von Zug- und Biegesteifigkeitsprüfung von Schulterstäben eines Loses mit identischen Schichteigenschaften ist die Bestimmung von E_2 und einer 2. Größe (*RHT*, T oder E_1) möglich.

Durch die Variation von E_2 (siehe Abb. 6.4-links) zwischen E_0 und dem maximal zu erwarteten E-Modul des Beschichtungswerkstoffes $E_{C \text{ MAX}}$ kann bei vorhandener experimentell bestimmter Zug- und Biegesteifigkeit für einen Wert von E_2 jeweils genau ein korrespondierender Wert für die 2. Größe analytisch bestimmt werden. Mit diesen Wertepaaren werden zwei Graphen errechnet, die eine Äquivalenz zu den experimentell bestimmten Steifigkeiten darstellen. Der Schnittpunkt der beiden Graphen ergibt das Wertepaar, welches für die geprüften Proben zutreffend ist. Nach der Kombination von mathematischer Modellierung und versuchstechnischer Verifizierung ist die E-Modulverteilung im Querschnitt nicht nur qualitativ, sondern auch vollständig quantitativ bestimmt. Mit diesen Informationen wird das Modell für die Steifigkeitsbeeinflussung weiter abstrahiert und die Eigenschaften in ein Simulationsmodell für komplexere Geometrie überführt.

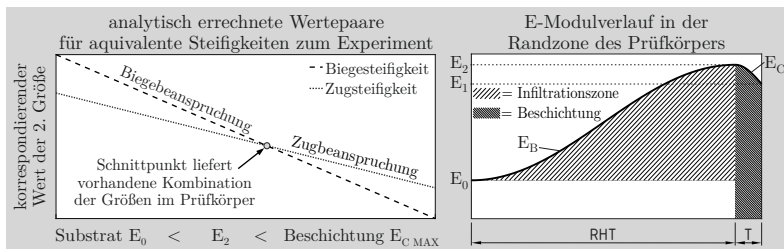


Abbildung 6.4: Qualitatives Diagramm zur Bestimmung des E-Moduls E_2 und einer weiteren Kenngröße des beschichteten Querschnittes (E_1 , *RHT* oder T)
- links | qualitativer E-Modulverlauf in der Randzone - rechts

In Abbildung 6.4-rechts ist ein qualitativer, approximierter E-Modulverlauf in den beschichteten Regionen eines Bauteils zu sehen. Innerhalb der Infiltrationszone steigt die *E-Modul-Verteilung-Infiltrationszone* E_B von E_0 auf E_2 an. E_2 entspricht dem maximal möglichen E-Modul des beschichteten Substratwerkstoffes $E_{B \text{ MAX}}$. Für den qualitativen Verlauf des E-Moduls innerhalb des Beschichtungsauftrages *E-Modul-Verteilung-Beschichtung* E_C gibt es drei Möglichkeiten:

1. Durch Auftreten von Mikrorissen oder anderen Schädigungen am äußeren Rand der Beschichtung kann E_C zum Rand hin etwas abfallen $E_1 < E_2$ (siehe Abb. 6.4-rechts).
2. Bei Vernachlässigung von Randeffekten ist $E_C = E_{B \text{ MAX}} = \text{konst.}$ und $E_1 = E_2$.
3. Wenn der maximale E-Modul des reinen Beschichtungswerkstoffes $E_{C \text{ MAX}}$ höher ist als $E_{B \text{ MAX}}$ und keine Randeffekte auftreten ist mit $E_1 > E_2$ zu rechnen.

Durch die Annahme $E_1 = E_2$ genügt die Messung einer der beiden Steifigkeiten zur vollständigen Beschreibung des Querschnitts. Umgekehrt ist es mit $E_1 = E_2$ auch möglich, durch die Zug- und Biegeprüfung zusätzlich zu E_2 auch eine der beiden geometrischen Größen *RHT* oder *T* zu ermitteln.

6.1.4 Simulationsmodell für Komplexgeometrie

Der ermittelte E-Modulverlauf (siehe Abb. 6.4-rechts) innerhalb der infiltrierten Zone bis zum äußeren Rand der Beschichtung ist maßgebend für die Steifigkeitserhöhung, welche durch die schraffierte Fläche unterhalb des E-Modulverlaufs repräsentiert wird. Die Berechnung der Steifigkeitserhöhung erfolgt ausschließlich auf Basis der durch die Beschichtung beeinflussten Zonen. Als Ansatzfunktionen bezüglich der Substratoberfläche $x = 0$ (– Innen | + Außen) werden die Gleichungen 6.10 und 6.11 verwendet.

$$E_B \rightarrow E_{\text{Infiltration}} = E_0 + \frac{(E_2 - E_0)}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi x}{RHT} \right) \right] \quad (6.10)$$

$$E_C \rightarrow E_{\text{Beschichtung}} = E_1 + \frac{(E_2 - E_1)}{2} \cos \left(\frac{\pi x}{T} \right) \quad (6.11)$$

Für die Berechnung der Auswirkungen von Beschichtungen auf komplexere Geometrie können hiermit die substitutiven Eigenschaften berechnet werden. Diese substitutiven Beschichtungseigenschaften werden in Form von Schalenelementen auf die beschichteten Bauteiloberflächen eingepreßt. Den Schalenelementen muss eine **Ersatzwandstärke** T_{subst} und ein **Ersatz-E-Modul** E_{subst} zugewiesen werden. Die äquivalente Steifigkeitserhöhung zum E-Modulverlauf aus Abb. 6.4-rechts wird gebildet, indem die schraffierte Fläche dem Produkt aus T_{subst} und E_{subst} entspricht (siehe Gl. 6.12).

$$\begin{aligned}
 E_{\text{subst}} T_{\text{subst}} &= \int_{-RHT}^0 E_{\text{Infiltration}}(x) dx + \int_0^T E_{\text{Beschichtung}}(x) dx - E_0 RHT \\
 &= \left(\frac{RHT}{2} + \frac{T}{\pi} \right) E_2 + \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) T E_1 - \frac{RHT}{2} E_0
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Die unter Gl. 6.12 aufgeführte Bedingung ermöglicht eine fehlerfreie Simulation von Zugbelastung. Bei Biegebeanspruchung tritt ein Fehler auf, der durch die fehlende Information des Abstandes zur neutralen Faser hervorgerufen wird. Dieser kann korrigiert werden, wenn die Schalenelemente mit einem Offset zur Körperkante versehen werden. Da die Schichtstärke und die Tiefe der infiltrierten Zone bei realen Bauteilen um mindestens eine Größenordnung kleiner ist als die Bauteilabmessungen, ist dieser Effekt vernachlässigbar und damit eine korrigierte Simulation nicht notwendig.

Die Simulation erfolgt mit den folgenden Schritten.

1. Import des CAD-Modells der Bauteilgeometrie in eine FEM-Umgebung
2. Vernetzung der Bauteilgeometrie mit Volumenelementen
3. Berechnung des Verformungszustandes des unbeschichteten Bauteils
4. Vernetzung der Bauteiloberfläche mit zusätzlichen Schalenelementen (Koinzidenzknoten zu den äußeren Volumenelementen)
5. Berechnung des Verformungszustandes des beschichteten Bauteils
6. Analyse der Verformungsrelation zur Ermittlung der Betriebsfestigkeitssteigerung

Die Betriebsfestigkeitssteigerung wird abschließend unter Nutzung des **relativen Steifigkeitsverhältnisses** $X_{C \text{ rel}}$ (Gl. 6.13) und der damit verbundenen Verschiebung der Wöhlerlinie errechnet. Sofern das Beschichtungsmaterial bei Zugbeanspruchung eine höhere ertragbare Bruchdehnung als das Substratmaterial aufweist, liegt die Annahme nahe, dass die Grenze für das Bauteilversagen trotz Beschichtung von der Festigkeit des Substratmaterials abhängt. Bei gleicher Dehnung einer identischen Bezugslänge l beim unbeschichteten (...₀) und beim beschichteten (...₁) Bauteil ist die statische relative Last bis zum Bruch proportional zum relativen Steifigkeitsverhältnis .

$$\varepsilon = \text{konst.} : C = \frac{F}{s} \rightarrow C \approx \frac{F}{\varepsilon l} \rightarrow F_1 = \frac{C_1}{C_0} F_0 = X_{C \text{ rel}} F_0 \tag{6.13}$$

Innerhalb der Infiltrationszone können auch Bereiche auftreten, die nicht von der Beschichtung benetzt wurden. Zusätzlich ist die Tiefe sehr klein, gegenüber den Abmessungen des Bauteils. Damit ist E_0 für die Festigkeit maßgeblich.

Für eine konstante Last entspricht das **relative Spannungsverhältnis** $X_{\sigma \text{ rel}}$ dem Reziproken vom **relativen Steifigkeitsverhältnis** $X_{C \text{ rel}}$ (Gl. 6.14).

$$F = \text{konst.} : C \approx \frac{FE}{\sigma l} \rightarrow X_{\sigma \text{ rel}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{C_0}{C_1} = \frac{1}{X_{C \text{ rel}}} \quad (6.14)$$

Sobald die Beanspruchung dynamisch ist und sich diese im Zeit- oder Betriebsfestigkeitsbereich befindet, kann der Kehrwert von $X_{C \text{ rel}}$ stellvertretend für die Spannungen in der Gleichung der **Wöhlerlinie** [Hai06] stehen und die **Betriebsfestigkeitssteigerung** X_N errechnet werden. Damit muss die Steifigkeitserhöhung bei einem **Wöhlerkoeffizienten** k zwischen 4 und 9 zum Erzielen einer Betriebsfestigkeitserhöhung um Faktor 10 zwischen 78% und 29% liegen [Feh12],[Heu14].

$$\frac{N_1}{N_0} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)^{-k} = \left(\frac{C_0}{C_1} \right)^{-k} = X_{C \text{ rel}}^k \rightarrow X_N = \left(X_{C \text{ rel}}^k - 1 \right) \cdot 100\% \quad (6.15)$$

Diese Abschätzung ist eine Minimalabschätzung. Durch die tatsächlich gesteigerte statische Festigkeit des infiltrierten Betons wird die **Wöhlerlinie** noch stärker nach oben verschoben. Hierdurch kann in der Realität eine höhere resultierende Betriebsfestigkeitssteigerung erwartet werden.

6.2 Experimentelle Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit

Für die Verifizierung des Simulationsmodells ist die Bestimmung bzw. Berechnung der geometrischen Kenngrößen **Eindringtiefe** RHT und **Schichtstärke** T sowie die mechanischen Größen E_0 , E_1 und E_2 über die Bestimmung der Zug- und der Biegesteifigkeit notwendig. Hierfür sind die Prüfmethode auf die filigranen Schulterstäbe anzupassen. Nach der Ermittlung der Beschichtungseinflussgrößen werden die Ersatzgrößen **Ersatzwandstärke** T_{subst} und **Ersatz-E-Modul** E_{subst} nach Gleichung 6.12 errechnet und in das Simulationsmodell für komplexere Geometrie übertragen.

6.2.1 Versuche zur Beschichtungsqualifizierung

Es wurden Versuche mittels Fluoreszenzmikroskopie von Bruchflächen durchgeführt, um Eindringtiefe RHT optisch zu vermessen. Hierfür wurden die Beschichtungslösungen mit fluoreszierenden Stoffen, z. B. $SnCl_2$ oder $CanDot$ versetzt. Die messtechnische Bestimmung der Eindringtiefe RHT war hierbei nicht möglich, da es keine erkennbare Grenze zwischen Infiltrationszone und Substratmaterial gibt und die fluoreszierenden Partikel nicht in die feinen Kapillaren der Substratoberfläche eingedrungen sind.

Die Eindringtiefe RHT kann über das Experiment in Kombination mit dem Rechenmodell nach der in den Abschnitten 6.1.2 und 6.1.3 dargestellten Vorgehensweise ermittelt werden. In diesem Fall wird die Ordinate in Abb. 6.4-links bei der Auswertung mit variierenden Werten für die Eindringtiefe RHT belegt. Die Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis von z. B. dem E-Modul an der Beschichtungsfläche E_1 , welcher mittels der Härtemessung von dünnen Schichten ermittelt werden kann [KS06]. Durch den vergleichsweise geringen Substrat-E-Modul E_0 ist die Substratverformung hierbei nicht vernachlässigbar.

Die Messung der Schichtstärke T erfolgt mittels Profilometrie, wobei eine AFM-Spitze entlang einer partiell beschichteten Oberfläche geführt wird. Über eine Regressionsrechnung für die Messwertkoordinaten werden zwei parallele Geraden im beschichteten und im unbeschichteten Bereich angenähert, wobei der Versatz die Schichtstärke ergibt.

Ermittlung der Zugsteifigkeit

Die Ermittlung der Zugsteifigkeit erfolgt mit Standardprüfmaschinen. Die Proben sind hierbei frei von parasitären Spannungen in der Prüfmaschine fixiert worden. Um Formtoleranzen wie z. B. eine Schraubenform entlang der Achse oder geringe Aufwölbungen der Proben zuzulassen, wurden für die Einspannung spezielle Spannbacken entwickelt. Diese sind als Sphärensegmente ausgeführt, welche sich frei in kegeligen Kalotten ausrichten können. Die Krümmungsmittelpunkte beider Seiten liegen im gespannten Zustand möglichst nah beieinander und auf der Probenachse, sodass der Ausrichtvorgang beim Spannen frei von lateralen und longitudinalen Bewegungen erfolgen kann.

Ermittlung der Biegesteifigkeit

Die Messung der Biegesteifigkeit wird ebenfalls an einer Standardprüfmaschine im 3-Punkt-Biegeversuch mit einer freien Biegelänge (*Prüflänge*) L von 35 mm durchgeführt. Für die Gewährleistung einer zwangarmen Probenaufnahme wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt. Die Vorschrift für die Einrichtung der Prüfmaschine ist dem Anhang A.4 zu entnehmen.

Indirekte Messung der Zugsteifigkeit

Um trotz der geometrischen Toleranzen und eventuell auftretender Inhomogenitäten im Material verwertbare Ergebnisse zu erhalten, werden mindestens 6 bis 10 Probekörper je Beschichtungszustand jeweils für die Zug- und die Biegeprüfung benötigt. Hinzu kommen die Probekörper für die Referenzmessungen zur Bestimmung von E_0 und der Steifigkeiten unbeschichteter Proben. Die *Chargenprobenanzahl* n_{Charge} für die Beschichtungsversuche

einer Charge werden über Gl. 6.18 mit einer *minimalen Probenzahl* n_i von 6 bis 10 und der Anzahl der zu untersuchenden *Beschichtungsvarianten* i ermittelt.

$$n_{\text{Charge}} = 2n_i(1 + i) \quad (6.16)$$

Aufgrund der hohen benötigten Probenanzahl wurde die Verformung der Prüfkörper indirekt über die Wegmessung der Prüfmaschine aufgenommen. Die Gesamtverformung wird durch die serielle Anordnung der Maschinensteifigkeit und der Probensteifigkeit beeinflusst. Durch die Messung der Verformung der Maschine mit einem sehr steifen Probekörper wird die Maschinensteifigkeit ermittelt. Die rechnerische Ermittlung der Verformung der Schulterstäbe bei der Zugprüfung ist hiermit möglich. Um auf die Verformung des Normquaders innerhalb der Schulterstäbe mit $B \cdot H \cdot L = 10 \cdot 4 \cdot 35 \text{ mm}^3$ zu schließen, ist das *Übersetzungsverhältnis* X als Verschiebungsrelation zwischen den Backenzentren mit dem *Abstand* A (siehe Abb. 4.6-links) und der *Prüflänge* L einzubeziehen.

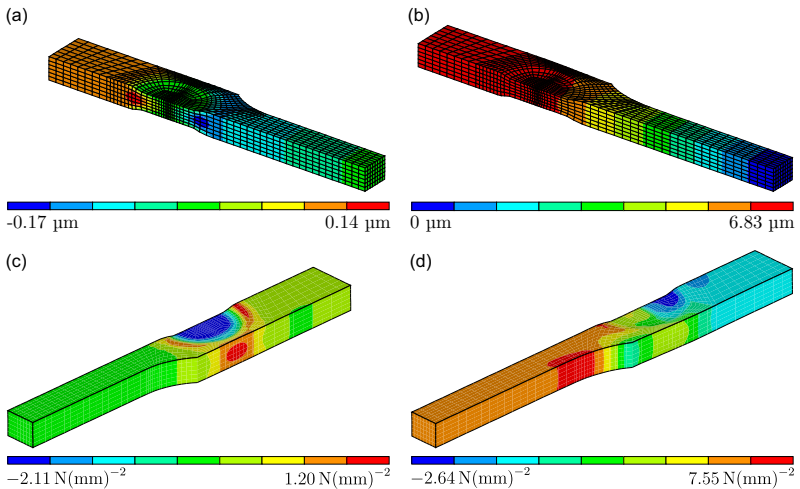


Abbildung 6.5: FEM-Simulation der Probenverformung in Richtung der Längsachse ΔL (a,b) und die zugehörigen Zugspannungen σ_z (c,d) unter Einwirkung einer Klemmkraft von 1 kN (links) und einer zusätzlichen Zugkraft von $F = 300 \text{ N}$ (rechts)

Für die Ermittlung von X ist eine FEM-Simulation verwendet worden, welche die Verschiebung in L unter Berücksichtigung der Spann- und Längskraft errechnet. In Abb. 6.5 sind die Simulationsergebnisse für eine Klemmkraft von 1 kN (links) und mit

einer zusätzlichen Zugkraft von 300 N (rechts) dargestellt. In Abb. 6.5 (c) ist anhand des grünen Bereiches innerhalb der parallelen Prüfkörperlänge eine Druckvorspannung von $\sigma_Z \approx -0,4..-0,6 \text{ N}(\text{mm})^{-2}$ zu erkennen. Hiermit ist das Druckspannungsoffset von ca. -20 N zu Beginn einer Zugprüfung zu erklären, welches als Folge der Materialverdrängung durch die Klemmkraft entsteht. Die Zugspannungen bei zusätzlicher axialer Last (d) sind im Normprüfbereich konstant. Bei der Simulation wurde ein E-Modul von $36 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ und eine Poissonzahl von $\nu = 0,2$ angenommen.

Messfehler bei der Steifigkeitsmessung

Die Fehler bei der Steifigkeitsmessung wurden systematisch nach *GUM* (\cong *Guide to the expression of the Uncertainty in Measurement*) betrachtet (siehe Anhang A.5) und in die Auswerteprozeduren einbezogen, um die Aussagekraft der Ergebnisse der einzelnen Messreihen beurteilen zu können [JCGM100]. Wenn die Streuungen der ermittelten Steifigkeit eines Loses innerhalb der Messunsicherheit nach GUM liegen, können zufällige Fehler ausgeschlossen werden.

Messung der Maschinensteifigkeit

Die Messfehler werden sehr stark durch die Maschinensteifigkeit C_{Masch} und den Messfehler bei der Ermittlung der Maschinensteifigkeit U_{CM} beeinflusst. Für optimale Ergebnisse muss C_{Masch} sehr hoch sein und U_{CM} minimiert werden.

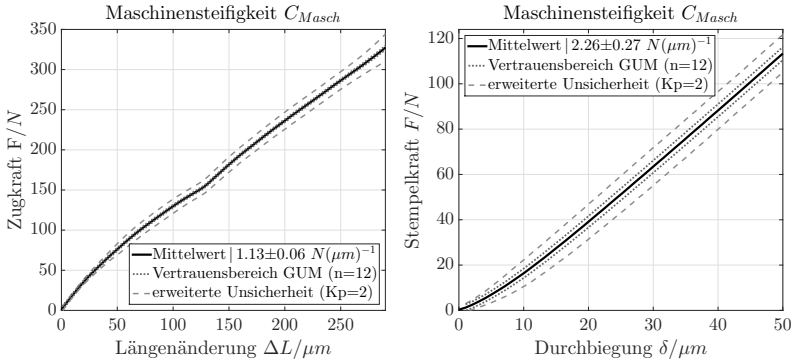


Abbildung 6.6: Ergebnisse der Maschinensteifigkeitsmessungen für die Zugprüfung (links) und die Biegeprüfung (rechts)

Zur Messung von C_{Masch} der verwendeten Universalprüfmaschine *ZWICK Roell Z1010* wurden 12 Messungen durchgeführt, um die Messunsicherheit mit einem "Fleißfaktor" ($\sqrt{n_{CM}}$) zu minimieren. Die Messungen hierfür wurden mit Stahlquadern durchgeführt.

In Abb. 6.6-links ist die Steifigkeitskennlinie der Maschine für die Zugprüfung dargestellt. Bei einer Zugkraft von ca. 150 N ist ein Setzeffekt zu erkennen. Dieser wird durch einen Stick-Slip-Effekt beim Nachrücken der Sphärensegmente in die verformte Kegelbohrung erzeugt. Die Nachsetzbewegung erweist sich als hochreproduzierbar und wurde bei der Messung von Betonproben berücksichtigt. Der progressive Verlauf im unteren Bereich der Biegesteifigkeitskennlinie (rechts) ist auf den Hertz'schen Kontakt der Zylinderstifte zurückzuführen und wurde ebenfalls berücksichtigt.

6.2.2 Mechanische Prüfung beschichteter Betonproben

Bis zum Abschluss dieser Arbeit ist es nicht gelungen, belastbare Messungen der Zugsteifigkeit über die indirekte Verformungsmessung durchzuführen. Dies ist vorwiegend der sehr geringen Steifigkeit der Prüfmaschine geschuldet. Die zu erwartende Steifigkeit der Proben ist nach Gl. 6.18 mindestens eine Größenordnung höher als die Steifigkeit der Maschine. Bei einem E_0 von $30..50\text{N}(\text{mm})^{-2}$ beträgt die Zugsteifigkeit der Betonproben schon $34..57\text{N}(\mu\text{m})^{-1}$. Der Einfluss der Streuung bei den Werten der Maschinenverformung liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die Probenverformung selbst. Deshalb werden weiterführend lediglich die Ergebnisse zu den Biegesteifigkeitsmessungen vorgestellt.

Da die Steifigkeit der Maschinenanordnung für die Beanspruchung bei der Biegeprüfung doppelt so hoch im Vergleich zur Zugprüfung ist (vgl. Abb. 6.6 rechts und links) und die zu erwartende Probensteifigkeit hierbei ca. um das 19-fache geringer ist (siehe Gl. 6.19), kann für die Biegesteifigkeit von verlässlichen Messergebnissen ausgegangen werden.

$$C_{\text{Zug}} = \frac{EBH}{L} \quad \text{aus} \quad C_{\text{Zug}} = \frac{F}{s} \quad \text{mit} \quad s = \frac{FL}{EBH} \quad (6.17)$$

$$C_{\text{Biegung}} = \frac{4EBH^3}{L^3} \quad \text{aus} \quad C_{\text{Biegung}} = \frac{F}{\delta} \quad \text{mit} \quad \delta = \frac{FL^3}{48EI_Z} \quad \text{und} \quad I_z = \frac{BH^3}{12} \quad (6.18)$$

$$C_{\text{Zug}} : C_{\text{Biegung}} = \frac{L^2}{4H^2} : 1 \approx 19 : 1 \quad (6.19)$$

Die Ermittlung der Biegesteifigkeiten von Schulterstäben, welche mit den Beschichtungen gemäß Tab. 4.5 versehen wurden, war unter vertretbarer Streuung der Messreihen möglich. Bei den Messungen wurden die subjektiven Aussagen über die Haptik und die qualitative Beschichtungserscheinung durch die physikalischen Eigenschaften der beschichteten Schulterstäbe bestätigt. Die einzelnen Messdiagramme sind im Anhang A.6 dargestellt.

Innerhalb der Beschichtungssysteme *V24c* und *V26f* wurden weitere Variationen vorgenommen. Die Messreihen der Versuchsreihe mit den weiterentwickelten Beschichtungen sind in Abb. 6.7 dargestellt. Die Messreihen der ausgewählten Charge (Abb. 6.7) weisen ebenfalls eine geringe Streuung auf. Dies ist in der geringen Messunsicherheit von ca. $0,1 \text{ N}(\mu\text{m})^{-1}$ ersichtlich.

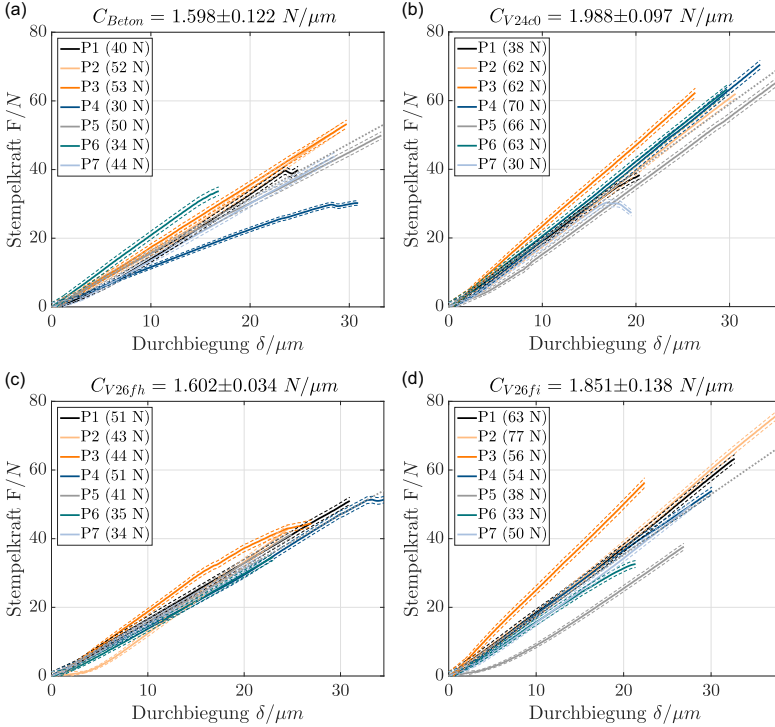


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Biegesteifigkeitsmessungen einer ausgewählten Charge mit unterschiedlichen Beschichtungszuständen

Die Steifigkeit der Probekörper konnte mit allen Beschichtungsvarianten signifikant erhöht werden. Die Proben der Beschichtungen *V24c0* (b) und *V26fh* (c) zeigen ein besonders reproduzierbares Verhalten. Mit der Beschichtung *V26fh* wird jedoch kaum eine Steifigkeitserhöhung erzielt. Durch die Beschichtung *V24c0* ist mit 24% der größte Zuwachs an Steifigkeit zu erkennen. Da dieses Beschichtungssystem eine geringere Wasserbeständigkeit (siehe Tab. 4.5) als *V26* hat, ist dieses System nur für Betonbauteile, welche nicht in

Kontakt mit Kühl-Schmierstoffen treten, geeignet. Die robusteste Beschichtung mit 16% Steifigkeitserhöhung ist die Beschichtung *V26fi* (d).

Hinsichtlich der statischen Festigkeit ist anzumerken, dass es bei allen Beschichtungsvarianten und den unbeschichteten Proben zu sehr starken Streuungen von bis zu 133% kommt. Ein Grund hierfür kann die beobachtete Existenz von makroskopischen Fehlstellen sein, welche nicht vom Beschichtungsmaterial ausgefüllt werden können. Diese Fehlstellen werden hauptsächlich durch an der Schalung anhaftende Luftbläschen verursacht.

6.2.3 Ermittlung der Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichten

Die Ermittlung der Betriebsfestigkeitssteigerung infolge der *Steifigkeitserhöhung* X_C = $(X_{C\text{rel}} - 1)$ erfolgt nach Gl. 6.15 mit minimalem und maximalem k . Für die Beschichtung *V24c0* liegt die zu erwartende Betriebsfestigkeitssteigerung für $k = 9$ bei $X_N = 613,8\%$.

Tabelle 6.3: Kalkulatorische Betriebsfestigkeitssteigerung der beschichteten Schulterstäbe

<i>Sol-Gel Lösung</i>	<i>V13f</i>	<i>V18b</i>	<i>V24b</i>	<i>V26e</i>
Steifigkeit ($C_{\text{Beton}} = 1,079 \text{ N } \mu\text{m}^{-1}$)	1,091 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	1,112 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	1,326 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	1,245 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$
Steifigkeitserhöhung X_C	1,1%	3,1%	22,9%	15,4%
Betriebsfestigkeitssteigerung $k = 4$	4,5%	12,8%	128,1%	77,3%
Betriebsfestigkeitssteigerung $k = 9$	10,5%	31,1%	539,3%	262,5%
<i>Sol-Gel Lösung</i>	<i>V24c0</i>	<i>V26fh</i>	<i>V26fi</i>	
Steifigkeit ($C_{\text{Beton}} = 1,598 \text{ N } \mu\text{m}^{-1}$)	1,988 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	1,602 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	1,851 $\text{N } \mu\text{m}^{-1}$	
Steifigkeitserhöhung X_C	24,4%	0,3%	15,8%	
Betriebsfestigkeitssteigerung $k = 4$	139,5%	1,0%	15,8%	
Betriebsfestigkeitssteigerung $k = 9$	613,8%	2,3%	275,4%	

Für eine Betriebsfestigkeitserhöhung um eine Größenordnung sind weitere Beschichtungsmodifikationen vorzunehmen. Die maximale kalkulatorische relative Betriebsfestigkeit von Faktor 7 stellt dabei eine solide Basis für die Weiterentwicklung dar.

6.2.4 Übertragung des Rechenmodells auf beliebige Geometrie

Die Bestimmung von E_0 erfolgt nach Gl. 6.18 unter Verwendung der ermittelten Steifigkeit der unbeschichteten Proben aus Abb. 6.7 (a). Mit $C_{\text{Beton}} = 1,598 \text{ N}(\mu\text{m})^{-1}$ wird $E_0 = 26,8 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$. Dieser Wert ist sehr niedrig, verglichen mit der Zielforderung von

$E \geq 50 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ bei der Betonentwicklung für Gestellbauteile (siehe Tab. 4.1). Dieser geringe Wert ist ebenfalls auf das Vorhandensein von makroskopischen Fehlstellen zurückzuführen, welche sich hauptsächlich auf der äußeren Randfaser in der Nähe von y_{MAX} befinden und damit erhöhten Einfluss ($\approx y^2$) auf C_{Biegung} haben.

Der ermittelte *E-Modul-Wert-Substrat* E_0 der unbeschichteten Schulterstäbe der in Abbildung 6.7 vorgestellten Charge ist 48% höher als bei den Schulterstäben der vorherigen Charge aus Anhang A.6, welche eine Woche nach der Herstellung ausgeschalt wurden. Die Proben für die modifizierten Beschichtungen wurden fast einen Monat in Feuchteschrank und Schalung gelagert. Daher ist davon auszugehen, dass die Hydratation vollständig und unter optimalen Bedingungen verlief.

Unter den geschilderten Einschränkungen der versuchstechnischen Bedingungen können die Ersatzgrößen nur sehr ungenau bestimmt werden. Die Schichtstärkemessungen für *V24c0* mittels Profilometer ergaben $T \approx 70..100 \mu\text{m}$. Die Eindringtiefe konnte nur sehr unscharf auf $RHT \approx 200 \mu\text{m}$ begrenzt werden. Verlässliche Messwerte können aktuell nur mit der Biegesteifigkeitsmessung erzielt werden. Es war daher nicht möglich, Randeffekte zu identifizieren bzw. die Variation einer zweiten Größe vorzunehmen.

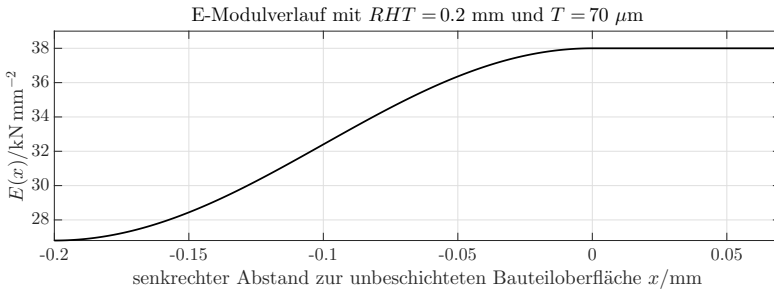


Abbildung 6.8: Approximierter E-Modulverlauf in der Randzone beschichteter Bauteile zur Berechnung der Eigenschaften von Ersatzschalenelementen

Bei den nachfolgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass der E-Modul in der Beschichtungszone konstant ist und dem Wert am Rand des Substrates entspricht. Mit der Vernachlässigung möglicher Randeffekte wird die Festlegung $E_1 = E_2 = E_{\text{subst}}$ getroffen. Bei Zugrundelegung einer minimalen Schichtstärke von $T = 70 \mu\text{m}$ und einer Eindringtiefe von $RHT = 200 \mu\text{m}$ für die Berechnung kann nach der Auswertung entsprechend den Gleichungen 6.9 und A.3 ein $E_{\text{subst}} = 38 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ vorausgesetzt werden. Damit ergibt sich der in Abb. 6.8 dargestellte E-Modulverlauf über die Randzone. Nach Lösung von Gl. 6.12 wird $T_{\text{subst}} = 100 \mu\text{m}$ festgelegt. Hiermit ist jetzt die vereinfachte Simulation einer komplexeren, beschichteten Geometrie möglich.

6.3 Zusammenfassung – Leichtbau

6.3.1 Auswirkungen von Sol-Gel-Systemen auf Betonleichtbauteile

Die Funktion der Beschichtung mittels Sol-Gel-Systemen hinsichtlich der Erhöhung der Bauteilsteifigkeit wurde nachgewiesen. Zusätzlich führen diese Beschichtungen durch eine gesteigerte Farbintensität zur Erhöhung der subjektiv wahrgenommenen Oberflächenqualität und zeichnen sich durch eine verbesserte Haptik aus. Die Beschichtungsvariationen *V24c0* und *V26fi* werden daher für die Beschichtung von Bauteilen aus Beton empfohlen.

Durch das vorgestellte Verfahren konnte für die gewählten Probekörper eine 2- bis 7-fache Betriebsfestigkeit im Vergleich zum nicht beschichteten Schulterstab prognostiziert werden. Die gewünschte Verbesserung von einer Größenordnung wurde experimentell nicht erreicht. Die Ergebnisse der Abschätzung, wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben wurde, liefern die minimal zu erwartende Steigerung der Betriebsfestigkeit. Es sind weiterführende Arbeiten für die Beschichtungsentwicklung und die Qualifizierung des Einflusses auf die Betriebsfestigkeit notwendig.

Mit den erhöhten Steifigkeiten aus Tab. 6.3 kann ein über Gl. 6.18 ein **effektiver E-Modul** E_{effektiv} gebildet werden, welcher über den Querschnitt als konstant angenommen wird. Dessen relative Erhöhung gegenüber dem unbeschichteten Beton stellt eine Äquivalenz zur Steifigkeitserhöhung dar (siehe Gl. 6.20).

$$C_{\text{spez}} = \frac{E_{\text{effektiv}}}{\rho_{\text{effektiv}}} = \frac{E_0 + \Delta E}{\rho_{\text{effektiv}}} \approx \frac{E_0}{\rho_0} X_{C \text{ rel}} \Rightarrow \Delta C_{\text{spez}} \approx C_0 \text{ spez} (X_{C \text{ rel}} - 1) \quad (6.20)$$

Die Defizite bei der spezifischen Steifigkeit (−33%) bzw. Festigkeit (−34%) aus Tab. 2.6 im Vergleich mit der von Stahl werden durch die Beschichtung *V24c0* mit +24% nahezu ausgeglichen, wenn die Dichte des ausgehärteten Gels in etwa der von Beton entspricht und das Schichtvolumen sehr klein gegenüber dem Volumen des Substrates ist. Ist die Dichte des ausgehärteten Sols geringer als die des Betons und die Abmessung T liegt in einer Größenordnung mit der Wandstärke, wird dieser Effekt noch verstärkt.

Für die vollständige versuchstechnische Verifizierung sind Neuentwicklungen zur berührungslosen Messung von Verformungen mit Submikrometerauflösung erforderlich, da aufgrund der großen Streuung der Festigkeiten ein hohes Risiko für die Zerstörung von induktiven oder kapazitiven Messsystemen besteht. Eine mögliche Alternative ist die Nutzung von optischen Methoden, wie dem Grauwertkorrelationsverfahren, z. B. mittels einer verbesserten *GOM Aramis* [Zei22],[KA22].

Auch ein steiferer Aufbau für die Zugprüfung mit indirekter Messung der Längenänderung der Prüfkörper kann verwendet werden. Die Prüfmaschine sollte eine Steifigkeit von $C_{\text{Masch}} \geq 100 \text{ N } \mu\text{m}^{-1}$ aufweisen, um mit der in Anhang A.5 beschriebenen Vorgehensweise zu reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen.

Die im Modell entwickelten Ansätze müssen in weiterführenden Arbeiten an realen Bauteilen untersucht werden. Hierfür sind Dauerschwingversuche an Bauteilen mit größeren Abmessungen notwendig, um die Skalierbarkeit der Ergebnisse abzusichern und mit anerkannten Richtlinien für den Betriebsfestigkeitsnachweis in Beziehung zu setzen.

6.3.2 Empfehlungen zur Herstellung von Betonleichtbauteilen

Für eine beschichtungsgerechte Gestaltung sollten tiefe und enge Taschen vermieden werden, damit die Gefahr von großen Ansammlungen des Sols mit daraus resultierenden großen Schichtstärken vermieden wird. Anderenfalls kann die Schwindung beim Austrocknen des Sols zu zusätzlichen Zugspannungen im Substrat und zur Rissbildung durch Eigenspannungen in der Beschichtung führen. Überschüssig aufgetragenes Sol sollte vor dem Aushärten über dynamische Verfahren von den Oberflächen beseitigt werden. Hierfür bietet sich besonders die Rotationsbeschichtung an. Auch ein kontrolliertes Verdrängen des überschüssigen Sols mittels eines leichten Druckluftschleiers ist hierfür empfehlenswert.

Die Richtlinien aus Abschnitt 5.4 und die gussteilgerechte Gestaltungslehre haben auch für Leichtbauelemente aus Beton Gültigkeit [Röd93]. Der Vorgang der Formfüllung für die Herstellung von dünnwandigen Bauteilen sollte eher einem Ausfüllen anstatt eines Einfüllens entsprechen. Hierbei soll die schon im Voraus zum größten Teil entlüftete Mischung von der unteren Schalungsfläche aus eingebracht werden, um die Luft vor dem sich ausbreitenden Beton herzuschieben.

Für eine maximale Steifigkeit von dünnwandigen Betonbauteilen sind diese bis zum Erreichen der Endfestigkeit (≥ 28 Tage) in der Schalung unter Satttdampfmosphäre zu lagern, um das Trocknungsschwinden zu verhindern und eine optimale Hydratation des Zementes zu gewährleisten. Die relative Wirkung der Beschichtung nimmt für steigende Wandstärken ab, da sich der relative Einfluss auf E_{effektiv} (siehe Gl. 6.20) verringert. Unbewehrte Bauteile sollten daher so gestaltet und ausgelegt werden, dass an den Stellen, wo mit maximaler Zugspannung zu rechnen ist, die minimale Wandstärke existiert.

7 Technologievalidierung

Im Kapitel 5 wurde die Herstellung von Betonbauteilen mit zu Naturstein vergleichbaren Eigenschaften bezüglich Langzeitstabilität und erreichbarer Rauheit von Funktionsflächen belegt. Die Gestaltänderungspotenziale wurden analysiert und es wurde eine Simulationsstrategie entwickelt, um Bauteile auf Basis von Beton mit ausreichend geringen Formabweichungen herzustellen. Zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Erhöhung der Betriebsfestigkeit durch die Oberflächenbeschichtung im Sol-Gel-Prozess wurden in Kapitel 6 Wirkmechanismen analysiert, die Beschreibung der Beschichtungseinflüsse vorgenommen und eine Vorgehensweise zur Vorhersage der Betriebsfestigkeitserhöhung von Bauteilen entwickelt. Hierbei erfolgte die Beschichtungsqualifizierung in Kombination von mathematischem Modell und Experiment, welche substituierte Eigenschaften der Beschichtungen zur Simulation von beliebiger Geometrie lieferte.

Die erzielten Ergebnisse aus den Kapiteln 5 und 6 haben gezeigt, dass Beton eine Alternative zu Naturstein für Präzisionsbauteile darstellt und als Konstruktionswerkstoff für Leichtbauteile alternativ zu metallischen Werkstoffen eingesetzt werden kann. Die entwickelte Technologie zur urformenden Herstellung von hochwertigen Präzisionsoberflächen wurde messtechnisch qualifiziert und belegt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die stellvertretend für hohe Präzisionsansprüche gewählte Realisierung von Führungsflächen für aerostatische Anwendungen erreicht werden kann. Die favorisierten Spezialbetonmischungen SCC II der *Bauhaus-Universität Weimar* und der kommerziell verfügbare HPSCC sind durch hervorragende Frischbetoneigenschaften gekennzeichnet und nahezu frei von Sedimentationserscheinungen.

Der durch die *Bauhaus-Universität Weimar* entwickelte Beton SCC II hat eine hohe Druckfestigkeit $f_{ck, SCC II} = 110 \text{ N mm}^{-2}$ und eine hohe Zugfestigkeit $f_{ctm, SCC II} = 8,1 \text{ N mm}^{-2}$ (siehe Tab. 1.1). Das Verhältnis Druck-Zugfestigkeit von $\approx 13 : 1$ liegt damit in Bereichen, wie es normalerweise nur bei niedrigeren Festigkeitsklassen $\leq C50/55$ als bei $C55/67$ (Vgl. Gl. 2.2-14 : 1) zu erwarten ist [DIN1045-1]. Das Zusammenspiel der Fraktionen der Gesteinskörnung mit optimaler Packungsdichte in Verbindung mit der ausgewogenen Menge der Flüssigkeitszugabe ergibt die hohe Festigkeit. Die Verwendung der Mischung *CEMIIA-LL 42,5* für die Erfüllung der Anforderungen an die Betone für den Präzisionsmaschinenbau (Vgl. Tab. 4.1) ist daher als sehr zielführend einzustufen [Flo+14].

Die auf Basis des *SCC II* projektierten Betone für kleine Wandstärken sind durch geringere Steifigkeiten und Festigkeiten geprägt. Je kleiner die Wandstärke ist, desto geringer fällt die Steifigkeit aus. Die makroskopischen Materialeigenschaften werden hierbei kaum durch die Verzahnungswirkungen zwischen den Gesteinszuschlägen beeinflusst. Die Entwicklung von optimierten Zusammensetzungen für Wandstärken von ≤ 4 mm kann erst durch die Erhöhung der Härte bzw. Festigkeit des Zementsteins ermöglicht werden. Betonleichtbauteile sind daher aktuell nur mit Mindestwandstärken von ≥ 20 mm sinnvoll einsetzbar.

Durch die Entwicklung von Oberflächensystemen auf Sol-Gel Basis zur Steigerung der Betriebsfestigkeit durch die Firma *ETC Products GmbH* konnte im Rahmen dieser Arbeit die weitgehende Beseitigung der Defizite in der Festigkeit der Betone gegenüber Aluminium und Stahl nachgewiesen werden. Die Verstärkung versagensgefährdeter Bauteile sollte durch steifigkeitserhöhende Beschichtungen erfolgen, um die Spannungen im Basisbauteil bei äquivalenten Beanspruchungen auf ein geringeres Niveau zu bringen.

7.1 Konzepte für Bearbeitungsmaschinen und Messgeräte

Mit den unter den Abschnitt 5.4 bzw. 6.3.2 erarbeiteten Richtlinien ist die Entwicklung von Maschinenkonzepten möglich, welche ganzheitlich oder bauteilweise mit Beton als Basiswerkstoff herstellbar sind. Durch das thermisch äquivalente Werkstoffverhalten von bewegten und unbewegten Bauteilen kann bspw. der Aufwand für die Referenzierung der geometrischen Eigenschaften zwischen verschiedenen Bearbeitungs- oder Messvorgängen minimiert werden. Leichtbauteile aus Beton haben durch deren geringe Wandstärke eine relativ kleine Wärmespeicherfähigkeit. Außerdem ist in Relation zum Volumen eine sehr große Bauteiloberfläche für den konvektiven Wärmeaustausch vorhanden. Damit ist die Zeit für das Erreichen von stationären Zuständen auf ein Minimum begrenzt.

Bei den Gestellbauteilen mit sehr hoher Abstützmasse ist das Verhältnis von Bauteiloberfläche zum Volumen viel geringer, wodurch der Wärmeübergang zur Umgebungsluft verzögert wird. Die relativ große Wärmekapazität von Beton (Vgl. Tab. 2.4) ist für die Verwendung in den angestrebten Maschinensystemen vorerst vorteilhaft, führt jedoch in Kombination mit bewegten dünnwandigen Leichtbauteilen bei Temperaturschwankungen zu Unterschieden bei der Bauteiltemperatur. Durch die gute Integrationstauglichkeit ist jedoch die Unterbringung von Leitungen für Kältemittel zur aktiven Temperierung der Gestellbauteile gegeben. Hiermit ist die Wärmeabfuhr von Antriebsaggregaten und die Regelung der Bauteilgestalt von Gestellbauteilen sehr einfach möglich. Somit kann die Synchronisation der Temperaturen von statischen und bewegten Bauteilen erfolgen.

Wenn nach den Richtlinien gemäß Abs. 5.4 mehrere Einzelteile starr verbunden werden müssen, um die Realisierung der Eigenschaften eines kombinierten Bauteils hervorzu- bringen, ist eine Dimensionierung nach Steifigkeit zwingend erforderlich. Im Hinblick auf eine ausgewogene Verformung ist das kombinierte Bauteil so auszuführen, dass die Nachgiebigkeit der am Kraftfluss beteiligten Einzelteile möglichst konstant verteilt ist [WB06]. Die Einzelteile für zusammengesetzte Bauteile sind deshalb mit einer ähnlichen Zusammensetzung zu fertigen. Alternativ können die einzelnen Querschnitte so ausge- legt werden, dass der effektive E-Modul E_{effektiv} gemäß Gl. 6.20 auch für verschiedene Wandstärken äquivalent ist. Durch die Synchronisation der Bauteiltemperaturen und die konstante Verteilung der Nachgiebigkeiten im Kraftfluss sind auch Maschinenkonzepte möglich, welche trotz überbestimmter Anordnungen keinen Zwang im System aufweisen. Hierdurch kann die Steifigkeit bei gleicher Bauteilgestalt erhöht werden.

7.2 Wirtschaftlichkeit und Koppelstellengestaltung

Da die Materialkosten für Beton mit maximal 70 €/t viel geringer sind als für Naturstein mit ca. 500 €/t, amortisieren sich die Kosten für die Schalung mit zusätzlicher Präzisions- fläche als Abformnormal zur Herstellung von Oberflächen für aerostatische Anwendungen je nach Komplexität schon in einer Kleinserie unter 10 Stück. Die Abformnormale können bspw. im Moduleinsatz für verschiedene Serien verwendet werden, was die Werkstück- einzelkosten weiter verringert. An Präzisionsbauteilen sind i. d. R. viele Elemente für kraftschlüssige Festhaltungen für Anbauteile unterzubringen.

Für die Verankerung dieser Koppelstellenelemente steht eine Vielzahl von kommerziell verfügbaren Komponenten zur Verfügung und die Theorie zur Koppelstellenauslegung ist hinreichend genau beschrieben [Bre+17]. Dennoch müssen die aufnehmbaren Kräfte im Einzelfall mit der jeweiligen verwendeten Spezialbetonmischung geprüft werden. Die am häufigsten verwendeten Koppelstellenelemente sind einfache Gewindebuchsen mit einer definierten Außenkontur.

An sehr großen Maschinenteilen kann die Menge an integrierten Gewindebuchsen mehrere 100 Stk betragen. Wird die An- bzw. Unterbringung der Gewindebuchsen für Naturhart- gestein und Beton gegenübergestellt, kann eine relative Kostenreduktion abgeschätzt werden. In Tab. 7.1 werden die Herstellkosten für die Bestückung von Präzisionsbauteilen mit M8-Gewindebuchsen miteinander verglichen. Im Naturstein werden hierbei gerändelte Edelstahlbuchsen *M8 Ø17x50 DIN82-RGE 1* ($\approx 1,20$ €/Stk) in Kernlochbohrungen manu- ell verklebt. In Betonbauteile werden Sechskantgewindebuchsen mit umlaufender Ringnut aus Edelstahl *M8 SW21x50* ($\approx 1,80$ €/Stk) direkt vor dem Gießen an der Schalung angebracht, welche hierbei gleichzeitig als Positionierlehre dienen kann.

Die Preise für Kaufteile wurden ohne Berücksichtigung von Mengenrabatten aus Katalogen entnommen. Bei hohen Stückzahlen und in Abhängigkeit vom aktuellen Stahlpreis können die Preise variieren. Für die Kalkulation der stückbezogenen Fertigungskosten wurde ein Maschinenstundensatz von 100 €/Stunde und die Fertigungslohnkosten mit 40 €/Stunde angesetzt. Die Einsparung bei vergossenen Gewindebuchsen liegt trotz der höheren Kosten der Kaufteile bei etwa 20%. Bei Einbettung von komplexeren Einlegeteilen wird der Vorteil gegenüber Eingelassenen Bauteilen in Natursteinbauteilen noch deutlicher.

Tabelle 7.1: Kumulierte Herstellkosten für die Bestückung von Präzisionsbauteilen mit M8-Gewindebuchsen im Vergleich

<i>Arbeitsschritt/Einzelkostenpositionen</i>	<i>Zeit/Stk</i>	<i>Kosten/Stk</i>
Kernbohrung Ø20x55 im Naturstein bohren und Kern entfernen	40 s	1,12 €
Selbstkosten – Gewindebuche M8 Ø17x50 DIN82–RGE 1 (1.4305)	—	1,20 €
Selbstkosten – 2-K-EP-Injektionsharzkleber	—	0,50 €
Kleberdosierung, manuelle Positionierung, Verkleben und Endreinigung	90 s	1,00 €
Kumulierte Kosten pro Gewindebuche im Naturstein	—	3,82 €
Formkosten – Positionierung und Durchgangsbohrung Ø8,5 in Schalung	20 s	0,56 €
Selbstkosten – Gewindebuchsen mit Ringnut M8 SW21x50 (1.4305)	—	1,80 €
manuelle Positionierung und Verschraubung mit der Schalung	40 s	0,45 €
manuelle Positionierung und Verschraubung mit der Schalung	20 s	0,23 €
Kumulierte Kosten pro Gewindebuche im Beton	—	3,04 €

Allerdings sind die Kosten für die Einlegeteile in Bauteilen aus Beton sowie auch aus Naturstein gegenüber kompletten metallischen Bauteilen viel höher, weil die Funktionsmerkmale hier in den meisten Fällen direkt in das Bauteil eingebracht werden können und keine extra zu beziehenden Kaufteile darstellen. Da die Werkstoffkosten für dünnwandige Bauteile mit sehr hohen Spanvolumenanteil mindestens dem Doppelten vom Naturstein entsprechen, werden hier die hohen Materialkosten die Einsparungen bei der Koppelstellengestaltung bei Weitem übertreffen.

7.3 Versuchstechnische Verfahren und Messtechnik

Für die Vermessung der Geradheit von Präzisionsflächen wurde ein automatisches Messgerät (siehe Abs. 5.2.2) entwickelt. Mit den zugehörigen Algorithmen zur statistischen Messdatenauswertung konnte die Messunsicherheit um über eine Größenordnung reduziert werden. Mit dem Messgerät sind exakte Anschlussmessungen über lange Zeiträume mit reproduzierbaren Ergebnissen möglich. Durch moderate Hardwaremodifikationen kann das

heitsbestimmung von Probekörpern bis 10 m Länge erweitert werden. Mit der Einbindung einer zweiten Messachse für die Bestimmung des Rollwinkels kann zusätzlich der "Schraubenfehler" bestimmt werden, indem ein Neigungsmesssystem 90° quer zur optischen Achse des AKF am Spiegel angebracht wird.

Das im Abs. 5.3.1 dargelegte Simulationsverfahren zur Ermittlung der Gestaltänderung in Folge der Schwindprozesse im Beton wurde im Abs. 5.3.2 verifiziert, kann jedoch nach aktuellem Stand der Technik nicht mit vertretbarem Aufwand auf komplexere Geometrie angewendet werden.

Die prinzipielle Funktionstauglichkeit des entwickelten Verfahrens zur Verifizierung der Auswirkung von Beschichtungen auf die Steifigkeit von Bauteilen aus porösem Material wurde in den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 gezeigt. Auch die Methode zur Ermittlung der Betriebsfestigkeitsteigerung (Abs. 6.2.3) wurde, wenn auch nur in einem vereinfachten Umfang, demonstriert. Die Übertragung der Ergebnisse auf beliebige Geometrie ist mit der in Abschnitt 6.2.4 aufgezeigten Simulationsstrategie sehr einfach möglich. Zur vollständigen versuchstechnischen Verifizierung müssen die Versuchsaufbauten entsprechend den Empfehlungen aus Abschnitt 6.3.1 weiterentwickelt bzw. modifiziert werden.

Das entwickelte Verfahren kann auch auf die Verifizierung der Oberflächenbehandlung von Bauteilen aus anderen Werkstoffsystemen übertragen werden. Für die Beschreibung der veränderten Werkstoffeigenschaften in Oberflächennähe ist stets von Querschnitten mit stetig veränderlichen E-Modul (siehe 6.1.2 und 6.1.3) auszugehen.

Somit besteht die Möglichkeit, die Einflüsse einer Randschichthärtung von metallischen Bauteilen, wie es beim Nitrieren oder Induktionshärten erfolgt, zu untersuchen. Hierbei entfällt lediglich das Beschichtungsoffset ($T \rightarrow 0$) und ggf. ist zwischen Bauteilrand und Übergangzone ein Abschnitt mit konstantem E-Modul vorzusehen, welcher der Rand- oder Einhärtetiefe entspricht. Der E-Modul im gehärteten Bereich wird der Härte des martensitischen Gefüges angepasst. Zusätzlich können Effekte beschrieben werden, die durch die plastische Materialumformung entstehen. Wenn die Eindringtiefe im Bereich der Rauheit liegt, ist auch die Beschreibung von beschichteten Bauteilen aus nicht porösem Material, z.B. im Bereich der Fertigung von optischen Bauelementen, möglich.

7.4 Validierung der Simulationsverfahren

Die Validierung der FEM Simulationsverfahren erfolgt anhand von Bauteilen mit der Geometrie des unter Abs. 4.3.3 vorgestellten **Demonstrators** als exemplarisches Maschinenbauteil. Aufgrund der ebenen Funktionsfläche eignet sich die Geometrie für die Vermessung der Bauteilgestalt als auch für die Prüfung des Beschichtungseffektes auf die dünnwandige Stützstruktur an der Bauteilunterseite. Die Geometrie des dünnwandigen Demonstrators ist in Abb. 7.1-links dargestellt.

7.4.1 Simulation der Gestaltänderung

Für die Validierung der FE-Methodik zur Vorhersage der Gestaltänderung ist die komplexe Geometrie der Demonstratoren zur Erstellung eines FE-Modells zu vereinfachen und zu abstrahieren. Die Simulation erfolgt durch die Einprägung der Potenzialwerte entsprechend der Ansatzfunktion aus Gl. 5.3, wobei die Einprägung auf eine Dimension reduziert wird.

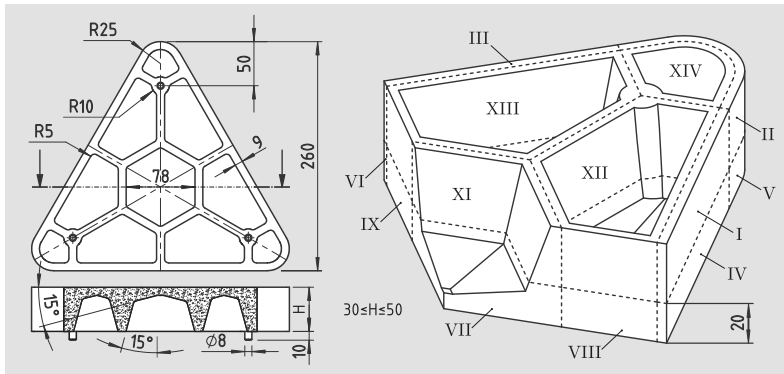


Abbildung 7.1: Demonstrator für die Validierung der Simulationsverfahren (links-Zeichnung der Bauteilgestalt | rechts-Zerlegung und Vereinfachung der Geometrie für die Simulation der Gestaltabweichungen)

Modellgenerierung

Die gewählte Geometrie ist dreifach symmetrisch. Die Geometrie wiederholt sich alle 120° um die zentrale Hochachse. Deshalb wird für die Simulation nur ein Drittelmodell verwendet. Die Reduzierung auf ein Sechstelmodell wurde nicht durchgeführt, um die Festlegung der Randbedingungen für die Simulation zu vereinfachen. Der Schwerpunkt

der vorliegenden Geometrie liegt mit einer Höhe $H = 45$ mm und bei Vernachlässigung der geschlossenen Taschenböden ca. 20 mm unterhalb der Funktionsfläche.

Für die Erstellung der benötigten Schwerachsenpfade (vgl. Abs. 5.3.2) wird das Volumen in 14 Untervolumina aufgeteilt (siehe Abb. 7.1-rechts) und mit dem ANSYS®-Elementtyp *SOLID98* vernetzt. Die Hauptteilungsebene ist die Horizontale, welche den Gesamtschwerpunkt beinhaltet. Die deckungsgleichen Schnittlinien benachbarter Untervolumina definieren die Pfade zur Potenzialeinprägung. Hiermit wird sichergestellt, dass die Knoten benachbarter Volumina ebenfalls koinzident sind und beim anschließenden Verschmelzen keine zusätzlichen Kontaktbedingungen notwendig sind.

Die Potenzialpfade sollten den Schwerachsen der zerklüfteten horizontalen Schnittfläche entsprechen. Zur Vereinfachung der Vernetzung wurden die äußeren Untervolumina (I.VI) etwas schmaler ausgeführt. Die Potenzialeinprägung erfolgt durch eine eindimensionale Ansatzfunktion in Polarkoordinaten, wobei das größte Potenzial an den Elementen angelegt wird, welche sich am Innenkreis des Schwerachsenpfades am zentralen Hexagon befinden. Das geringste Potenzial wird an dem Element, welches sich auf der äußeren Ecke des Pfades befindet, aufgeprägt. Zwischen diesen beiden Grenzradien wird das Potenzial gemäß der Ansatzfunktion aus Gl. 5.3 variiert. Mit $T = 0$ werden die Außenkanten des Modells festgehalten.

Simulationsergebnisse

Die Simulation wurde mit den unter Abs. 5.3.2 verifizierten Randbedingungen für die balkenförmigen Probekörper durchgeführt. Für diese Proben führen die Materialkonstanten $\alpha_{\text{ERSATZ}} = 0,001$ (*ALPX*) und $T_{\text{BEZUG}} = 0,5$ (*REFT*) zumindest bei der 3D-Potenzialfeldeinprägung mit $T = T(x,y,z)$ zu sehr guten Ergebnissen.

In Abb. 7.2-links sind die absoluten simulierten Verschiebungen der Funktionsfläche dargestellt. Bezogen auf die Ausgleichsebene (Horizontale in 0) 1. Ordnung entspricht die Darstellung exakt der Ebenheit. Damit ist die errechnete Ebenheitsabweichung (*TIR*) hierbei ca. 120 μm . Aufgrund der relativ großen Ebenheitsabweichung kann hier jedoch kein Zusammenhang zwischen der Oberflächentopographie und der verrippten Supportstruktur gefunden werden.

Um ein Topographieprofil zu erhalten, womit die Charakteristik der Auswirkungen der Versteifungsrippen sichtbar wird, wurde eine quadratische (parabolische) Approximation der Oberflächentopographie durchgeführt. Mit der Differenzbildung zwischen beiden Oberflächen wird die Ebenheit 2. Ordnung (Abb. 7.2-rechts) generiert. Wenn das Abformnormal eine parabolische Konvexität aufweist, ist die Abweichung 2. Ordnung der erzielbare Restfehler. Damit kann die Ebenheit um eine Größenordnung verbessert werden. Im Gegensatz

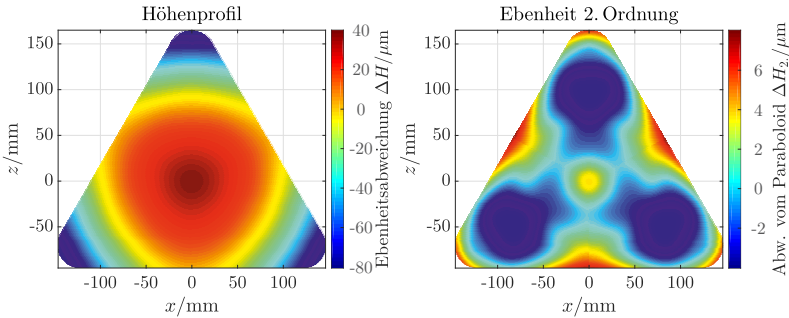


Abbildung 7.2: Simulationsergebnisse zur Vorhersagen der Ebenheitsabweichung des Demonstrators (links-Ebenheit | rechts-Ebenheit 2. Ordnung)

zu mechanisch bearbeiteten Flächen, wo die Versteifungen der Supportstruktur infolge des Print-Through-Effektes direkt im Ebenheitsprofil sichtbar werden, ist hier keine direkte Proportionalität zwischen Rippenanordnung und Ebenheitsabweichung zu erkennen.

Ableich mit Messergebnissen

Das in Abb. 7.3 geplottete Diagramm zeigt das simulierte Geradheitsprofil über die gesamte Präzisionsfläche des Demonstrators zwischen der Mitte einer Außenkante über den Flächenschwerpunkt bis hin zur gegenüberliegenden Spitze. Im Anhang A.7 sind die Messdiagramme der drei adäquaten 120° versetzten Messstrecken auf der Oberfläche eines exemplarischen Demonstrators mit $H = 45\text{ mm}$ einzusehen.

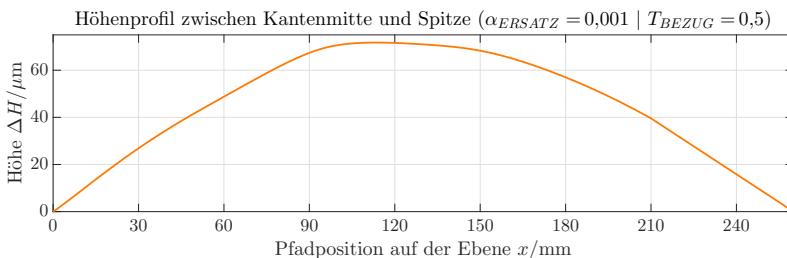


Abbildung 7.3: Geradheitsprofil der Oberfläche zwischen der Mitte einer Seitenkante bis zu gegenüberliegenden Spitze

Beim direkten Vergleich der absoluten Geradheitsabweichung wird deutlich, dass die simulierte Geradheitsabweichung nur ca. der Hälfte der gemessenen entspricht, jedoch der qualitative Verlauf mit der Messung übereinstimmt. Durch eine Verdoppelung von α_{ERSATZ} auf 0,002 und die Halbierung von T_{BEZUG} auf 0,25 können adäquate Ergebnisse erzielt werden ohne das Schwindmaß längs der Fläche zu beeinflussen.

Die Generierung verlässlicher Simulationsergebnisse bei beliebiger Geometrie ist erst mit der Klärung des Zusammenhangs zwischen den zu verwendenden Materialkonstanten und der Wandstärke bzw. dem Volumen-Oberflächen-Verhältnis möglich. Hierfür sind weiterführende Untersuchungen notwendig, wobei die Abmessungen von Bauteilen zukünftiger Versuchsreihen über die von Laborabmessungen hinausgehen müssen.

7.4.2 Simulation der Betriebsfestigkeitssteigerung

Zur Validierung des Modells zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit wurde die Durchbiegung der Funktionsfläche zweier Demonstratoren vor und nach der Beschichtung mit der Beschichtungsvariante *V26ff* bei steigender Last nach dem Prinzip aus Abb. 7.4-links bis zu einer **Masse** $m = 60 \text{ kg} \hat{=} F \approx 588,6 \text{ N}$ gemessen. Die Beschichtung erfolgte über den manuellen Anstrich der Mantelflächen des Stützvolumens. Die Funktionsfläche wurde nicht beschichtet. Nach einer Aushärtezeit von 3 Tagen wurde die Steifigkeit erneut geprüft.

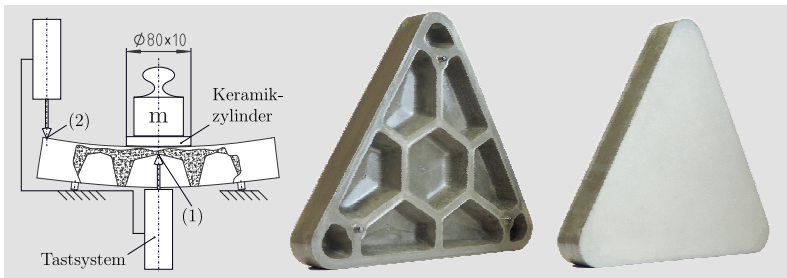


Abbildung 7.4: Prinzipielle Anordnung für die Bestimmung der Demonstratorsteifigkeit (links) und die beschichteten Demonstratoren #1 und #2 (rechts)

Die mechanische Beanspruchung für die Steifigkeitsmessung wurde durch das Aufbringen von Gewichten realisiert, welche zentral über einen Keramikzylinder mit den Abmessungen $\text{Ø}80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ mit der Funktionsfläche gekoppelt werden. Der Keramikzylinder ist sehr steif und deckt den größten Teil der hexagonalen Tasche an der gegenüberliegenden Seite (siehe Abb. 7.4-rechts) ab. Dadurch ist die taktile Messung der Durchbiegung mittels eines induktiven Feinzeigers (Tastsystem) im Zentrum der hexagonalen Tasche (1) mit minima-

lem Messfehler möglich. Der zweite Referenzpunkt für die Analyse der Durchbiegung liegt auf der Funktionsfläche in der Nähe des äußersten Randes einer Ecke (2). Die Differenz der Verschiebungswerte beider Taster liefert den Wert der Durchbiegung.

Die Auswertung der Steifigkeitsmessungen sind in Abb. 7.5-links dargestellt. Für jede Messreihe wurden $n = 6$ Messungen ausgewertet. Die Unsicherheit für die Bestimmung der Masse beträgt $\Delta m = 0,1 \text{ kg}$ und bei der Längenmessung wird eine Unsicherheit von $\Delta s = 0,1 \mu\text{m}$ angesetzt. Die Abschätzung der Messunsicherheit erfolgt nach Gl. 7.1 als modifizierte Form der Darstellung in Anhang A.5. Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Gravitationskonstanten wird hierbei vernachlässigt, weil diese bei der relativen Steifigkeitserhöhung nicht zu Fehlern bei der Auswertung führt.

$$\Delta C = \sqrt{\left(\frac{g\Delta m}{s}\right)^2 + \left[\frac{mg}{s^2} \left(2\Delta s + \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}\right)\right]^2} \quad (7.1)$$

Die gepunkteten Linien in Abb. 7.5 repräsentieren die Steifigkeit der unbehandelten Demonstratoren. Für die Darstellung der Steifigkeit der beschichteten Proben werden durchgezogene Linien verwendet. Auf die Anzeige der Vertrauensbereiche wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Auffällig ist der extrem steile Verlauf der Kennlinie des unbehandelten Demonstrators #2 (blaue Punktlinie) bei geringen Lasten. Hierfür ist wahrscheinlich die große Empfindlichkeit des Längenmesssystems in Kombination mit einer lateralen Verschiebung beim manuellen Aufbringen der Gewichte verantwortlich. Eine ähnliche Tendenz kann auch beim Demonstrator #1 erkannt werden.

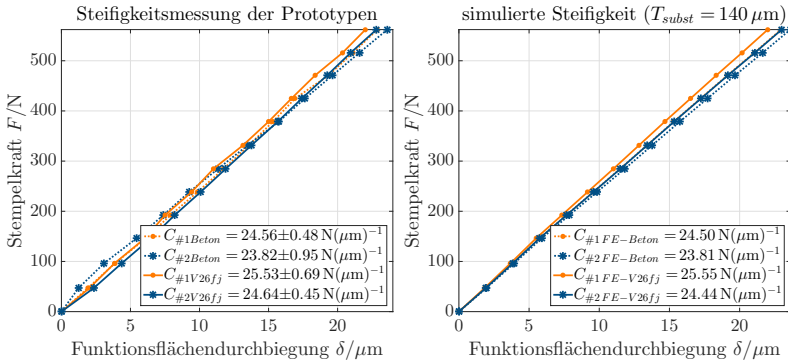


Abbildung 7.5: Steifigkeitsmessungen von beschichteten und unbeschichteten Demonstratoren (links) und der Vergleich zu den Simulationsergebnissen (rechts)

Für die Simulation der Steifigkeitserhöhung wurde die Vorgehensweise gemäß Abschnitt 6.2.4 verwendet und die experimentell verifizierten, substitutiven Beschichtungsparameter Ersatz-E-Modul $E_{\text{subst}} = 38 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ und Ersatzwandstärke $T_{\text{subst}} = 100 \mu\text{m}$ angesetzt. Die Analyse wurde ebenfalls mit einem Drittmodell entsprechend der Geometrie in Abb. 7.1-links, basierend auf nur einem Volumenkörper, durchgeführt.

Zunächst erfolgte die Simulation des unbehandelten Bauteilvolumens (*SOLID186*) zur Bestimmung des Substrat-E-Moduls $E_0 = 21,5 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ im Rechenmodell (siehe Abb. 7.6-a). Nach dem Abgleich mit den Steifigkeitsmessungen wurden die Oberflächenelemente (*SHELL93*) appliziert. Die experimentell ermittelte Steifigkeitserhöhung der Demonstratoren (siehe Tab. 7.2) konnte mit den angesetzten Werten nicht simuliert werden. Erst eine Erhöhung der Ersatzwandstärke T_{subst} auf $140 \mu\text{m}$ lieferte für die Durchbiegungen δ bzw. die Steifigkeitserhöhungen X_c äquivalente Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Messungen.

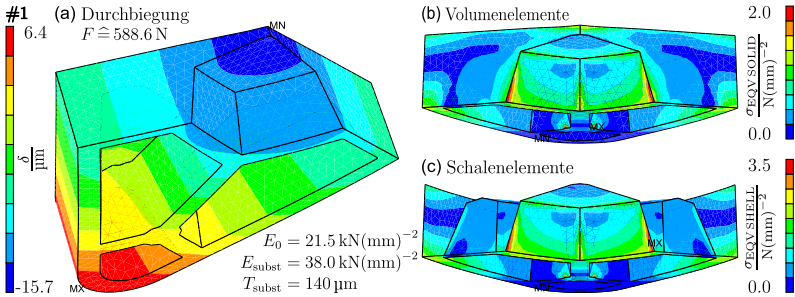


Abbildung 7.6: FEM-Simulation der Durchbiegung δ des mit *V26ff* beschichteten Demonstrators #1 (a) unter $m = 60 \text{ kg} \hat{=} F = 588,6 \text{ N}$ Last und die zugehörigen Vergleichsspannungen σ_{EQV} im Substrat (b) und in der Beschichtung (c)

Anhand der **Vergleichsspannungen nach Mises** σ_{EQV} an der Substratoberfläche in Abb. 7.6-(b) und in der Beschichtung (c) ist deutlich die Versteifungswirkung zu erkennen. Aufgrund des hohen Ersatz-E-Moduls E_{subst} wird eine höhere maximale $\sigma_{\text{EQV SHELL}} = 3,5 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ im Gegensatz zu $\sigma_{\text{EQV SOLID}} = 2,0 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ eingepreßt.

Die Rauheit der Mantelflächen der Demonstratoren ist höher als die der Schulterstäbe für die Beschichtungsverifikation. Zudem wird beim manuellen Auftrag Druck ausgeübt, sodass durch die resultierende Pumpwirkung mehr Beschichtungsmaterial in die Oberfläche eindringen kann. Deshalb erscheint die Erhöhung der Schichtstärke für die Simulation von komplexerer Geometrie naheliegend. Für die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Beschichtungsverfahren bzw. weiteren technologischen Parametern und der für die Simulation notwendigen Schichtstärke sind weiterführende Testreihen erforderlich.

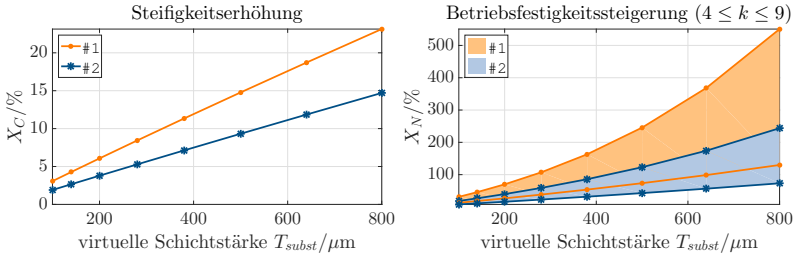


Abbildung 7.7: Steifigkeitserhöhung von beschichteten Demonstratoren bei steigender virtueller Schichtdicke T_{subst} (links) und die resultierenden minimal bzw. maximal zu erwartenden Betriebsfestigkeitssteigerungen (rechts)

Tabelle 7.2: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für die Bestimmung der Steifigkeit bei verschiedenen Beschichtungszuständen (Geometrie nach Abb. 7.1)

	Demonstrator #1			Demonstrator #2		
	$H = 39 \text{ mm} \mid \delta_0 = 22,9 \mu\text{m} \mid E_0 = 21,5 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$			$H = 31 \text{ mm} \mid \delta_0 = 23,6 \mu\text{m} \mid E_0 = 35,9 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$		
	Messung	Simulation 1	Simulation 2	Messung	Simulation 1	Simulation 2
T_{subst}	—	100 μm	140 μm	—	100 μm	140 μm
δ_{MAX}	22,0 μm	22,2 μm	22,0 μm	22,8 μm	23,0 μm	22,8 μm
X_C	+4,1%	+3,2%	+4,1%	+3,5%	+2,6%	+3,6%

Der höhere Wert der Steifigkeitserhöhung $X_{C\#1}$ gegenüber $X_{C\#2}$ (Abb. 7.7-links und siehe Tab. 7.2) ist durch die Überlagerung zweier Effekte zu erklären:

1. Bei gleichen Beschichtungsparametern bewirkt der größere Unterschied von Ersatz-E-Modul $E_{subst} = 38,0 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ zum Substrat-E-Modul $E_{0\#1} = 21,5 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ im Vergleich zu $E_{0\#2} = 35,9 \text{ kN}(\text{mm})^{-2}$ eine stärkere Versteifung des Bauteils.
2. Infolge der größeren Querschnittshöhe $H_{\#1} = 39 \text{ mm}$ gegenüber $H_{\#2} = 31 \text{ mm}$ sind die Auswirkungen der Beschichtung auf die Biegesteifigkeit höher.

Bei einer steigenden Ersatzwandstärke von $T_{subst} = 100 \mu\text{m}$ auf $T_{subst} = 800 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 7.7-links) nimmt das Verhältnis der Steifigkeitserhöhungen von $X_{C\#1}/X_{C\#2} = 1,61$ zu $X_{C\#1}/X_{C\#2} = 1,57$ marginal ab, da mit steigender Ersatzwandstärke T_{subst} bei geringerer Querschnittshöhe H ein stärkerer Eingriff in die absolute Bauteilgeometrie erfolgt.

Die Betriebsfestigkeitssteigerung X_N (siehe Tab. 7.3) nach Gl. 6.15 fällt hierbei mit +11,1% bis +45,8% sehr moderat aus. Durch die Erhöhung von Schichtstärke T und Eindringtiefe RHT kann bei einer resultierenden Ersatzwandstärke $T_{subst} = 800 \mu\text{m}$ eine Betriebsfes-

tigkeitssteigerung von +73,1% bis +550,7% erzielt werden. Bei einer Bauteilgeometrie mit geringen Kerbwirkungen ist die Annahme von $k = 9$ zutreffend. Hierdurch ist für Demonstrator #1 bei einer Ersatzwandstärke $T_{subst} = 800 \mu\text{m}$ mit mehr als der doppelten maximalen Betriebsfestigkeitssteigerung $X_{N\text{MAX}}$ im Vergleich zu Demonstrator #2 zu rechnen. Eine Betriebsfestigkeitssteigerung X_N von +550% entspricht ungefähr dem Wert, der beim Kugelstrahlen von Schraubendruckfedern (siehe Abs. 2.3.2) erreicht wird [Hai06].

Tabelle 7.3: Betriebsfestigkeitssteigerung X_N bei verschiedenen T_{subst} nach Gl. 6.15

T_{subst}	140 μm		380 μm		800 μm	
	$k = 4$	$k = 9$	$k = 4$	$k = 9$	$k = 4$	$k = 9$
Wöhlerkoeffizient						
$\bar{X}_{N\#1}$	+18,2%	+45,8%	+53,7%	+163,0%	+129,9%	+550,7%
$\bar{X}_{N\#2}$	+11,1%	+26,7%	+31,7%	+85,8%	+73,1%	+234,8%

8 Zusammenfassung

8.1 Erkenntnisse

In der vorliegenden Arbeit wurde die Verwendung von Beton für dessen Anwendung in der Präzisionstechnik betrachtet. Als Primärziel der Arbeit galt es nachzuweisen, dass die, aus Kostengründen naheliegende, urformende Herstellung von Bauteilen aus Beton mit integrierten Präzisionsführungsflächen für aerostatische Anwendungen möglich ist.

In Kooperation mit der *Bauhaus-Universität Weimar* erfolgte die Entwicklung und Auswahl geeigneter Betonmischungen. Die für die Präzisionstechnik spezifischen Ur- und Abformtechnologien wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und deren Eignung an spezifischen Probegeometrien gezeigt. Die Proben wurden hinsichtlich der erreichbaren Oberflächengüte sowie der Langzeitformstabilität über einen Zeitraum von fast 10 Jahren untersucht und mit Bauteilen mit einer mechanisch feinbearbeiteten Referenzoberfläche aus Naturhartgestein verglichen. Dabei wurden die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gewonnen:

- Die Rauheit der abgeformten Oberflächen konnte auf ca. $\frac{1}{5}$ der Rauheit der Referenz reduziert werden.
- Insgesamt ist die erreichte Oberflächenqualität mit der Referenz vergleichbar, wobei jedoch eine erhöhte, aber unkritische Welligkeit festgestellt wurde.
- Nach dem Abklingen der Gestaltänderungen konnte eine hohe Langzeitformstabilität nachgewiesen werden. Die Langzeitstabilität der Geradheit von Probekörpern ausgewählter Betonmischungen liegt bei $\leq 5 \mu\text{m(m)}^{-1}$.
- Zur quantitativen Abschätzung der Schwindverformung wurde ein Simulationsmodell erarbeitet, welches die Berücksichtigung der Gestaltänderung im Entwurfsprozess durch die präventive Anpassung der formgebenden Schalung ermöglicht.

Darüber hinaus erfolgte die Erarbeitung der Grundlagen für die Realisierung bewegter Bauteile von Führungssystemen aus Beton mit erhöhter spezifischer Steifigkeit und gesteigerter Betriebsfestigkeit. Diese Aspekte, wie auch die genannte Anwendung, wurden bis dato in der Literatur nicht betrachtet. Hierzu wurden Methoden und Verfahren zur Qualifizierung der Veränderung der mechanischen Eigenschaften infolge einer Bauteilbeschichtung entwickelt.

Die folgenden Erkenntnisse sind in diesem Kontext zu nennen:

- Die Möglichkeit zur Herstellung bewegter Bauteile in Leichtbauweise mit mechanischen Eigenschaften, die mit Bauteilen aus Eisen- und Nichteisenlegierungen vergleichbar sind, wurde nachgewiesen.
- Ein Verfahren für die Qualifizierung der Auswirkung von Beschichtungen auf die Steifigkeit und die Betriebsfestigkeit von dünnwandigen Bauteilen wurde entwickelt.
- Darüber hinaus erlaubt das entwickelte Verfahren die Untersuchung weiterer Oberflächeneffekte auf die Steifigkeit von beschichteten Bauteilen mit porösen Bauteiloberflächen oder Bauteilen mit veränderten mechanischen Oberflächeneigenschaften.
- Der entwickelte Simulationsansatz und das zugehörige Verfahren ist sehr einfach auf dünnwandige Bauteile mit beliebiger Geometrie übertragbar.
- Sofern nach der Herstellung homogenes Material im Bauteil vorliegt und eine gleichmäßige Schichtstärke zwischen 50 μm und 500 μm realisiert werden kann, ist je nach Geometrie und Wandstärke mit den untersuchten Beschichtungsvarianten eine Steigerung der Betriebsfestigkeit um ca. Faktor 2 bis 6 zu erwarten.

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen kann die Verwendbarkeit von Beton in der Präzisionstechnik, auch vor dem Hintergrund der strengen, im einstelligen Mikrometerbereich liegenden Anforderung von Präzisionsführungen, als grundsätzlich nachgewiesen gelten. Die abgeleiteten Gestaltungs- bzw. Entwurfsrichtlinien sowie die technologischen Hinweise liefern die ingenieurtechnischen Grundlagen zur Konstruktion von Präzisionsbauteilen aus Beton. Weiterhin erlauben die vorgestellten Simulationsansätze die lösungsspezifische Gestaltoptimierung der Bauteile wie auch die Bestimmung einer verformungspräventiven Schalung für die Verwendung von Beton. Ferner wurden auch die Grundlagen für die Entwicklung von Bauteilen mit erhöhter spezifischer Steifigkeit gelegt.

8.2 Ausblick

Die entwickelte Technologie zur Verwendung von Beton als Basismaterial für Bauteile von Maschinen und Geräten weist ein hohes Potenzial auf. Gleichwohl erfordert die Herstellung von Betonfertigbauteilen für die direkte Verwendung in der Präzisionstechnik einen Paradigmenwechsel in der Betonwerkumgebung und spezifische Kenntnisse der Werkstoffeigenschaften und Randbedingungen bei der Herstellung seitens des Konstrukteurs. Vor diesem Hintergrund lassen sich aufbauend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit interessante Themen für nachfolgende wissenschaftliche Untersuchungen zur Verwendung von Beton als Konstruktionswerkstoff für Präzisionsmaschinenbauteile, wie auch im allgemeinen Maschinenbau, ableiten. Diese betreffen technologische Detailfragen hinsichtlich der konkreten Umsetzung der Bauteilfertigung bzw. der Betonwerkumgebung. Beispielfhaft seien hier folgende Themengebiete als Ausgangspunkt für zukünftige Forschungsaktivitäten genannt:

- Gestaltung von Prozessfolgen und Realisierung der räumlichen Trennung zwischen Gussmassenaufbereitung, Formenherstellung und Gussmassenverarbeitung
- Langzeituntersuchungen zur Geometriestabilität von größeren Maschinenbauteilen mit charakteristischen Abmessungen ≥ 10 m
- Untersuchungen zur Kosten- und Ökologiebilanz der Vorort-Herstellung gegenüber zentralisierter Fertigung zur vollständigen Ausschöpfung des Potenzials der urformenden Herstellung
- Möglichkeiten der Abformung von Präzisionsoberflächen an weniger präzisen Bereichen von Präzisionsbauteilen aus Beton oder gar solchen aus anderen Werkstoffen.
- Weiterentwicklung und Automatisierung der Simulation zur Bestimmung der zu erwartenden Gestaltänderung infolge der Schwindverformung unter Berücksichtigung der errechneten Verformungsdaten auf das CAD-Modell

Die Weiterentwicklung der favorisierten Betonmischungen hinsichtlich einer E-Modulsteigerung ist für die Verbesserung der schwingungsmechanischen Eigenschaften und im Hinblick auf das hohe Potenzial für eine Leichtbauteilfertigung zielführend.

Das Entwicklungspotenzial von Sol-Gel-Systemen auf der Basis von SiO_2 sollte ausgeschöpft werden. Durch die Applikation von Beschichtungen mit hoher Steifigkeit wird eine Verbesserung der statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften von Betonbauteilen erreicht.

Die folgenden Zielsetzungen sollten hierfür in zukünftigen Arbeiten adressiert werden:

- Weiterentwicklung oder Neuentwicklung von Sol-Gel-Systemen bzw. von alternativen Beschichtungen zur Steifigkeitserhöhung von Bauteilen aus Beton
- Verbesserung der versuchstechnischen Umgebung für eine optimale Verifikation des Betriebsfestigkeitsmodells zur Erstellung genauerer Prognosen für die zu erwartende Betriebsfestigkeitssteigerung
- Erhöhung der maximal möglichen Schichtstärke unter Berücksichtigung der Zugspannungen infolge der Schwindung des Beschichtungsmaterials

Grundsätzlich ist auch die Möglichkeit zur Anwendung des Simulationsmodelles und des zugehörigen versuchstechnischen Verfahrens zur Steifigkeitserhöhung und Betriebsfestigkeitssteigerung von Bauteilen auf weitere Bauteile mit nachbehandelten Oberflächen und Oberflächenbereichen zu überprüfen. Hierbei können die Änderungen der mechanischen Eigenschaften von z. B. randschichtgehärteten Bauteilen aus Eisen- und Nichteisenlegierungen sowie von infiltrierten Bauteilen aus der additiven Fertigung untersucht werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gestaltabweichungen von Oberflächen für aerostatische Führungen	21
2.2	Beispielhafte Topographie einer geometrisch ebenen Rechteckfläche mit der zugehörigen Regressionsebene (links) und das Ebenheitsprofil (rechts) bezogen auf die Regressionsebene	22
2.3	Anordnung der Elemente für eine Gebäudedecke unter Verwendung von SL-Modulen der Firma <i>Heinze Cobiax Deutschland GmbH</i> [Cob22]	28
2.4	verschiedene Bewehrungsarten und die realisierbaren Mindestwandstärken für Stahl-, Carbonstab- und Textilbeton des <i>C³-Netzwerkes</i> [Car18]	30
2.5	REM Aufnahme eines Kohlenstofffaserbündels mit Bindemittel (links) [MS21] und der innere Aufbau einer Textilbetonplatte mit einer Gitterstruktur aus Polyamidfasern (rechts) [Sty21]	31
2.6	Beschichtungsarten für die Beschichtung von Neuteilen aus porösem Material mit sehr hoher Oberflächengüte [EN1504-2], [VDZ06]	34
4.1	Betonbestandteile ohne grobe Gesteinszuschläge (a) und Mischvorgang (b)	43
4.2	REM-Aufnahmen von unbeschichtetem Beton (a), rissiger Sol-Gel Schicht (b) und einer gleichmäßigen Schicht (c)	49
4.3	Probekörperherstellung: gereinigte Natursteinoberfläche (a), positionierte Schalung (b), Einfüllprozess (c) und befüllte Schalung (d)	51
4.4	Exemplarisches Rauheitsprofil eines Abformnormals aus Naturhartgestein	52
4.5	Schalungen zur Herstellung von Pyramidenstümpfen (a) und ein Pyramidenstumpf mit $(15 \cdot 15) \text{ mm}^2$ Grundfläche, 18 mm Höhe und 18° Formschräge (b)	55
4.6	Abmessungen der Schulterstäbe für die mechanische Prüfung (links) und eine gefüllte Schalung bei der Probenherstellung (rechts)	56
4.7	Supportstruktur mit spiegelnder Funktionsfläche in Kleinserienfertigung (links) und eine Nahaufnahme der Funktionsfläche (rechts)	56
5.1	Anordnungsprinzip zur Messung der Schwindung	60
5.2	Prinzipielle Anordnung für die Geradheitsmessung mittels AKF	61
5.3	exemplarische Rauheitsprofile von verschiedenen Betonoberflächen	63
5.4	Reflexion eines Hell-Dunkel-Überganges an den Präzisionsflächen in sehr spitzem Winkel, aufgenommen bei verschiedenen Trennschichtstärken	63
5.5	Rauheitsprofile verschiedener Betonoberflächen nach dem Autoklavieren	64

5.6	Schwindungsmessung der <i>Bauhaus-Universität Weimar</i> – relative axiale Verschiebung der <i>Schwindprismen</i> mit den Abmessungen $(100 \cdot 100 \cdot 400) \text{ mm}^3$ innerhalb der ersten 28 Tage: Gesamtschwinden autogenes Schwinden (links) und das Trocknungsschwinden (rechts) [Flo+14]	65
5.7	automatisches Geradheitsmessgerät mit AKF	66
5.8	max. Abweichung vom Mittelwert bei manueller Messung (< 6 Wochen) bzw. max. erweiterte Standardabweichung für automatische Messungen	67
5.9	exemplarische Höhenprofile der Präzisionsflächen von Probekörpern (links) und der zeitliche Verlauf der maximalen Geradheitsabweichung (rechts)	68
5.10	zeitlicher Verlauf der Geradheit bezüglich des Höhenprofils in der 8. Woche (links) und die max. erweiterte Standardabweichung (rechts)	69
5.11	zeitlicher Verlauf der Geradheit bezüglich des Höhenprofils nach 5 Monaten (links) und die zugehörige erw. Standardabweichung (rechts)	70
5.12	Verfahrensansatz für die Ermittlung einer Schalungsgeometrie zur präventiven Kompensation der Schwindverformung	73
5.13	Qualitative Darstellung der Gestaltänderungssimulation mittels Potenzialfeldern (a-Idealgeometrie mit Gestaltänderungspotenzial b-simulierte Verformung c-positive Kompensationsgeometrie)	73
5.14	FEM-Simulation der Gestalt eines Achtelmodells der Probekörpern (links: Randbedingungen für den stationären Zustand rechts: Ausgangsgeometrie und verformtes Modell)	76
5.15	FEM-Simulationsergebnisse des Achtelmodells der Probekörpern	77
6.1	Wirkmechanismen bei der Betriebsfestigkeitssteigerung durch Oberflächenbeschichtung	84
6.2	Einflusszonen und Integrationsintervalle innerhalb des Querschnitts eines beschichteten Quaders	85
6.3	Approximierte E-Modulverteilung innerhalb des 1. Quadranten des Querschnitts eines beschichteten Quaders	87
6.4	Qualitatives Diagramm zur Bestimmung des E-Moduls E_2 und einer weiteren Kenngröße des beschichteten Querschnitts (E_1 , RHT oder T) - links qualitativer E-Modulverlauf in der Randzone - rechts	88
6.5	FEM-Simulation der Probenverformung in Richtung der Längsachse ΔL (a,b) und die zugehörigen Zugspannungen σ_z (c,d) unter Einwirkung einer Klemmkraft von 1 kN (links) und einer zusätzlichen Zugkraft von $F = 300 \text{ N}$ (rechts)	93

6.6	Ergebnisse der Maschinensteifigkeitsmessungen für die Zugprüfung (links) und die Biegeprüfung (rechts)	94
6.7	Ergebnisse der Biegesteifigkeitsmessungen einer ausgewählten Charge mit unterschiedlichen Beschichtungszuständen	96
6.8	Approximierter E-Modulverlauf in der Randzone beschichteter Bauteile zur Berechnung der Eigenschaften von Ersatzschalenelementen	98
7.1	Demonstrator für die Validierung der Simulationsverfahren (links-Zeichnung der Bauteilgestalt rechts-Zerlegung und Vereinfachung der Geometrie für die Simulation der Gestaltabweichungen)	106
7.2	Simulationsergebnisse zur Vorhersagen der Ebenheitsabweichung des Demonstrators (links-Ebenheit rechts-Ebenheit 2. Ordnung)	108
7.3	Geradheitsprofil der Oberfläche zwischen der Mitte einer Seitenkante bis zu gegenüberliegenden Spitze	108
7.4	Prinzipielle Anordnung für die Bestimmung der Demonstratorsteifigkeit (links) und die beschichteten Demonstratoren #1 und #2 (rechts)	109
7.5	Steifigkeitsmessungen von beschichteten und unbeschichteten Demonstratoren (links) und der Vergleich zu den Simulationsergebnissen (rechts) . .	110
7.6	FEM-Simulation der Durchbiegung δ des mit <i>V26ff</i> beschichteten Demonstrators #1 (a) unter $m = 60 \text{ kg} \hat{=} F = 588,6 \text{ N}$ Last und die zugehörigen Vergleichsspannungen σ_{EQV} im Substrat (b) und in der Beschichtung (c) .	111
7.7	Steifigkeitserhöhung von beschichteten Demonstratoren bei steigender virtueller Schichtdicke T_{subst} (links) und die resultierenden minimal bzw. maximal zu erwartenden Betriebsfestigkeitsteigerungen (rechts)	112
A.1	Probekörperaufnahme für den 3-Punkt-Biegeversuch	141

Tabellenverzeichnis

1.1	Bereiche für mechanische und thermische Eigenschaften ausgewählter Konstruktionswerkstoffe [Oel18], [Tho18], [Fis18], [Rei21], [Rei22], [Ste03], [TSS07]	1
2.1	Vor- und Nachteile des Einsatzes von Naturstein	10
2.2	Vor- und Nachteile für den Einsatz von Reaktionsharzbeton	14
2.3	Schwindformen von hydraulisch gebundenem Beton in chronologischer Reihenfolge [TFB01]	17
2.4	Vor- und Nachteile für den Einsatz von hydraulisch gebundenem Beton	19
2.5	Varianten zur Herstellung von luftlagertauglichen Funktionsflächen nach Fertigungsverfahren und Zeitpunkt der Formgebung [DIN8580]	25
2.6	Mittlere spezifische Steifigkeiten und spezifische Festigkeiten verschiedener Werkstoffe mit Leichtbaupotenzial errechnet aus den Werten der Tabelle 1.1	27
2.7	Prinzipien und Verfahren zur Instandhaltung von Betontragwerken [Rau18]	35
4.1	Primäre Anforderungen an Betone für Maschinengestelle mit Präzisionsflächen	42
4.2	Mechanische und thermische Kennwerte der favorisierten Betone	45
4.3	Abreißfestigkeiten verschiedener Beschichtungssysteme für Bauteile aus SCC I und SCC II nach 7 Tagen und nach 28 Tagen	47
4.4	Eigenschaften von Oberflächenschutzsystemen für Beton [Sch92]	48
4.5	Chemische Eigenschaften der entwickelten Sol-Gel Systeme	50
5.1	mittelfristige relative Geradheitsabweichungen in der Balkenmitte und die Qualifizierung bezüglich der Forderung von $\Delta H \leq 3 \mu\text{m m}^{-1}$ Geradheit	69
5.2	Langzeitstabilität und Stabilisierungszeitraum des Höhenprofils in der Balkenmitte und die Erfüllung der Forderung von $\Delta H \leq 3 \mu\text{m m}^{-1}$	70
5.3	Klimatische Bedingungen und deren Maximalabweichungen während der Untersuchungen zur Langzeitstabilität	71
5.4	Konstruktionsvarianten für verschiedene Schalungen	80
5.5	Entwurfsrichtlinien für die Entwicklung von Präzisionsbauteilen	81
6.1	Entwicklung einer Strategie zur Simulation des Beschichtungseinflusses	83
6.2	Formelzeichen für E-Modulverteilungen und E-Modulwerte für die Modellbildung zur Berechnung der Steifigkeitserhöhung durch Beschichtungen	86

6.3	Kalkulatorische Betriebsfestigkeitssteigerung der beschichteten Schulterstäbe	97
7.1	Kumulierte Herstellkosten für die Bestückung von Präzisionsbauteilen mit M8-Gewindebuchsen im Vergleich	104
7.2	Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für die Bestimmung der Steifigkeit bei verschiedenen Beschichtungszuständen (Geometrie nach Abb. 7.1)	112
7.3	Betriebsfestigkeitssteigerung X_N bei verschiedenen T_{subst} nach Gl. 6.15 . . .	113

Literaturverzeichnis

- [Agg+08] Aggarwal, P.; Siddique, R.; Aggarwal, Y.; Gupta, S.: „Self-Compacting Concrete – Procedure for Mix Design“. In: *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* Nr. 12 / Januar-Juni (2008).
- [Ale85] Alexander, M. G.: „Towards standard tests for abrasion resistance of concrete report on a limited number of tests studied, with a critical evaluation“. In: *Materials and Structures* Nr. 4 (1985), S. 297–307.
- [Arx95] Arx, U.: *Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz*. Bd. Nr. 245 : Umweltgefährdende Stoffe. Schriftenreihe Umwelt. Bern: BUWAL, 1995.
- [Bar93] Bartz, W. J.: *Luftlagerungen – Grundlagen und Anwendungen*. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Bd. 78. Kontakt & Studium Tribologie. Ehningen bei Böblingen: expert-Verl., 1993.
- [Bau18a] Bauhaus-Universität Weimar: „Die neue Instandhaltungs – Richtlinie des DAfStb“. F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde. S. 62-77. Weimar: 20. IBAUSIL, 2018.
- [Bau18b] Bauhaus-Universität Weimar: „Impaktsicherheit von Baukonstruktionen durch mineralisch gebundene Komposite – DFG Graduiertenkolleg 2250“. F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde. S. 418-429. Weimar: 20. IBAUSIL, 2018.
- [Ber13] Berkefeld, A.: „Der Silicium- α -Effekt – Experimentelle Untersuchungen der Hydrolyse von C α - und C γ -funktionalisierten Alkoxytriorganylsilanen“. Diss. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2013.
- [Bod22] Bodo Möller Chemie GmbH: *Additive für Kunststoffe*. 2022. URL: <https://bm-chemie.com/de/loesung/kunststoffadditive-pigmente/kunststoffadditive/> (zuletzt abgerufen am 11.09.2022).
- [Bre+17] Brecher, C.; Jasper, D.; Schmidt, S.; Fey, M.; Neunzig, C.: „Statische und dynamische Koppelstellenkräfte in Werkzeugmaschinen zur Auslegung von Beton-Gestellbauteilen“. In: *Konstruktion* Nr. 4 (2017), S. 72–77.
- [Bun12] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: *Maschinenkomfortabel gebettet*. 2012. URL: <https://www.sudholt-wasemann.de/maschinenbauteile-aus-uhpc.html> (zuletzt abgerufen am 20.09.2022).

- [Car18] Carbon Concrete Composite e. V.: *Bildmaterial zum C³-Projekt*. 2018. URL: <https://www.bauen-neu-denken.de/pressematerial/> (zuletzt abgerufen am 30.08.2022).
- [Car37] Carlson, R. W.: „Drying Shrinkage Of Large Concrete Members“. In: *American Concrete Institute* Nr. 33 (1937), S. 327–336.
- [CH17] Curbach, M.; Häußler-Combe, U.: „Jahresbericht 2017“. Institut für Massivbau. Dresden: Technische Universität Dresden, 2017. URL: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/forschung/publikationen/jahresberichte/Jahresbericht2017_WEB.pdf?lang=de (zuletzt abgerufen am 15.09.2022).
- [Cob05] Cobiax Deutschland GmbH: *Cobiax-Hohlkörpermodule für Stahlbetondecken*. 2005. URL: <https://www.cobiax.com/de/de/produkte/> (zuletzt abgerufen am 06.09.2022).
- [Cob22] Cobiax Deutschland GmbH: *A DEEP DIVE INTO COBIAX*. 2022. URL: <https://media.cobiax.com/> (zuletzt abgerufen am 16.09.2022).
- [CR13] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G.: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik – Eine Einführung*. Hrsg. von Scheffler, M. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH-Verl., 2013.
- [Cze55] Czernin, W.: „Betonhärtung bei höheren Temperaturen“. In: *Zement und Beton* Nr. 2 (1955), S. 513.
- [Deu07] Deutsche Bauchemie e.V.: *Moderne Fließmittel in der Betontechnologie – Herstellung und Verwendung von Beton mit PCE*. 1. Ausg., Januar 2007. Frankfurt am Main: Dt. Bauchemie e.V, 2007.
- [DIB13] DIBt - Deutsche Institut für Bautechnik: „Europäische Technische Zulassung ETA-13/0330. Hybridturm System Max Bögl“. Berlin, 12. Juni 2013.
- [DIN1045-1] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Konstruktion und Auslegung*. 2008.
- [DIN1045-2] DIN 1045-2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. 2022.
- [DIN1048-5] DIN 1048-5: *Prüfverfahren für Beton, Festbeton, gesondert hergestellter Probekörper*. 1989.
- [DIN40686] DIN 40686: *Oberflächen dichter keramischer Werkstücke für die Elektrotechnik – Messung der Rauheit*. 1983.

- [DIN4760] DIN 4760: *Gestaltabweichungen – Begriffe und Ordnungssystem*. Berlin, 1982.
- [DIN50125] DIN 50125: *Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben*. 2022.
- [DIN50441–5] DIN 50441–5: *Messung geometrischer Dimensionen von Halbleiterplatten – Begriffe zur Gestalts- und Ebenheitsabweichung*. 2001.
- [DIN8580] DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. 2003.
- [DIN876–1] DIN 876–1: *Prüfplatten: Prüfplatten aus Naturhartgestein*. 1984.
- [DL09] Degischer, H. P.; Lüftl, S., Hrsg.: *Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Weinheim: WILEY-VCH, 2009.
- [Don06] Donat, H.: „Aerostatische Führungen und Luftlagerungen“. Dissertation. Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [EN12350–10] DIN EN 12350–10: *Prüfung von Frischbeton – Teil 10: Selbstverdichtender Beton – L-Kasten-Versuch*. 2010.
- [EN12350–11] DIN EN 12350–11: *Prüfung von Frischbeton – Teil 11: Selbstverdichtender Beton – Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch*. 2010.
- [EN12350–8] DIN EN 12350–8: *Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch*. 2019.
- [EN12350–9] DIN EN 12350–9: *Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch*. 2010.
- [EN12390–1] DIN EN 12390–1: *Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. 2021.
- [EN12390–13] DIN EN 12390–13: *Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. 2021.
- [EN13693] DIN EN 13693: *Betonfertigteile – Besondere Fertigteile für Dächer*. 2010.
- [EN13748–2] DIN EN 13748–2: *Terrazzoplatten Teil 2: Terrazzoplatten für die Verwendung im Außenbereich*; 2005.
- [EN1504–2] DIN EN 1504–2: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton*; 2005.
- [EN1504–3] DIN EN 1504–3: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 3: Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung*; 2006.

- [EN15050] DIN EN 15050: *Betonfertigteile – Fertigteile für Brücken*. 2012.
- [Erb07] Erbe, T.: „Untersuchung der Eigenschaften von Reaktionsharzbeton und Vergleich mit etablierten Gestellwerkstoffen“. Diplomarbeit. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [Etm93] Etmanski, B.: „Zum Eigenschaftsprofil hochgefüllter Reaktionsharzverbundwerkstoffe“. Dissertation. Kassel: Universität Kassel, 1993.
- [Feh12] Fehlmann, P.: „Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken“. Inst. für Baustatik und Konstruktion. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2012.
- [Fis18] Fischer, J.: *Werkstoffe - Produkte*. 2018. URL: <https://www.jfa.de/> (zuletzt abgerufen am 12.09.2022).
- [Flo+14] Flohr, A.; Dimmig-Osburg A.; Hahm, C.; Theska, R.: „Funktionsfertig urgeformte Betonbauteile für den Präzisionsmaschinenbau“. In: *BWI - Beton Werk International* Nr. 6 (2014), S. 45–52.
- [Goj+14] Goj, B.; Brokmann, U.; Bartsch, H.; Rädlein, E.; Müller, J.: „Thin-film capable ceramics for humidity and temperature sensing applications“. In: *Ilmenau Scientific Colloquium* 2014 (2014).
- [Gra02] Graubner, C. A.: „Eigenschaften von SVB: Kriechen, Schwinden, Schalungsdruck, Entlüftungsverhalten“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2002).
- [Gro98] Gropp, H.: „Verfahren zur Herstellung von Teilen aus einem kalt ausgehärteten Mineralguss“. Innovative Fertigungstechnologie GmbH. Offenlegungsschrift: DE 19714736 A 1, 1998.
- [Hai06] Haibach, E.: *Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 3., korrigierte und erg. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2006. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10183104>.
- [Hei17] Heidelberg Cement AG: *Betontechnische Daten*. 2017. URL: <https://www.betontechnische-daten.de/de> (zuletzt abgerufen am 13.09.2022).
- [Heu14] Heumann, G.: „Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung bestehender Bauwerke aus Stahlbeton und Spannbeton“. Materialprüfanstalt für das Bauwesen. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2014.
- [Hum51] Hummel, A.: *Das Beton-ABC. Schwerbeton, Leichtbeton ; Ein Lehrb. f. d. zielsichere Herstellg von Beton u. e. wirksame Baustellenüberwachg*. 11. überarb. Aufl. Mit 17 Zahlentaf. u. 126 Abb. Berlin: Ernst & Sohn, 1951.

- [ISO12780-1] DIN EN ISO 12780-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geradheit – Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Geradheit*. 2014.
- [ISO12781-1] DIN EN ISO 12781-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Ebenheit – Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Ebenheit*. 2011.
- [ISO1518-1] DIN EN ISO 1518-1: *Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Kratzbeständigkeit – Teil 1: Verfahren mit konstanter Last*. 2022.
- [ISO16750-5] ISO 16750-5: *Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 5: Chemical loads*. 2010.
- [ISO4287] DIN EN ISO 4287: *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. 2010.
- [ISO7784-1] DIN EN ISO 7784-1: *Beschichtungsstoffe – Bestimmung des Abriebwiderstandes – Teil 1: Verfahren mit Schleifpapier belegten Rädern und rotierender Probe*. 2016.
- [Jac+08] Jacobs, F.; Hunkeler, F.; Carmine, L.; Germann, A.; Hirschi, T.: „Schwinden von Beton“. In: *Der Bauingenieur* Nr. 3 (2008).
- [Jac02] Jackisch, U.-V.: *Mineralguss für den Maschinenbau. Herstellung und Eigenschaften eines modernen Werkstoffs für hochpräzise Maschinengestelle*. Bd. 231. Die Bibliothek der Technik. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2002.
- [JCGM100] 100:2008: *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Sèvres Cedex, France, 2008.
- [KA22] Klug, H.-P.; Appel, U.: *ARAMIS Benutzerhandbuch - Software ARAMIS v6*. 2022. URL: <https://docplayer.org/17443208-Aramis-benutzerhandbuch-software-aramis-v6.html> (zuletzt abgerufen am 10.09.2022).
- [Kah+16] Kahnt, A.; Schladitz, F.; Tietze, M.; Lieboldt, M.; Curbach, M.: „C3-Carbonbeton: Eine Materialkombination für die Zukunft des Bauens“. In: *BWI – BetonWerk International* Nr. 6 (2016), S. 22–28.
- [Kau99] Kaufmann, H.: *Einfluß der Behandlungsparameter beim induktiven Randschichthärten auf die Schwingfestigkeit. Abschlußbericht ; Laufzeit: 01.08.94 - 31.07.98*. Darmstadt: Fraunhofer-Inst. Betriebsfestigkeit LBF, 1999.
- [Kra18] Krause, W., Hrsg.: *Konstruktionselemente der Feinmechanik*. 4., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018.

- [KS06] Kunz, J.; Studer, J.: „Druck-Elastizitätsmodul über Shore-A-Härte ermitteln“. In: *Kunststoffe International* 2006.Nr. 6 (2006), S. 92–94. URL: <https://www.kunststoffe.de/en/search?search.text=PE103590&submit=search&all=1> (zuletzt abgerufen am 10.09.2022).
- [Loh97] Lohmeyer, G.: *Beton-Technik. Handbuch für betongerechte Planung und Ausführung*. 2. Aufl. Düsseldorf: Beton-Verl., 1997.
- [Lud18] Ludwig, H.-M.: „Beton holt technologisch auf“. In: *VDI-Nachrichten* Nr. 39 (2018).
- [Mas10] Maschinen Markt: *Epucet weicht Schleifzentrum ein*. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG. 2010. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/epucet-weiht-schleifzentrum-ein-a-269237/> (zuletzt abgerufen am 11.09.2022).
- [Mei09] Meinke, H.: *Oberflächenmesstechnik*. 2009. URL: https://mb-master.htw-berlin.de/files/Stg/MB/Versuchsanleitungen_Messtechnik/Oberflaeche.pdf (zuletzt abgerufen am 20.09.2022).
- [Möl21a] Möller-Wedel: *AKF ELCOMAT3000 Bedienungsanleitung*. 2021. URL: <https://www.haag-streit.com/de/moeller-wedel-optical/produkte/elektronische-autokollimatoren/elcomat-produktreihe/elcomat-3000/> (zuletzt abgerufen am 01.09.2021).
- [Möl21b] Möller-Wedel: *AKF ELCOMAT3000 Produktdatenblatt*. 2021. URL: <https://www.haag-streit.com/de/moeller-wedel-optical/produkte/elektronische-autokollimatoren/elcomat-produktreihe/elcomat-3000/> (zuletzt abgerufen am 01.09.2021).
- [Mos13] Moser, K.: *Faser-Kunststoff-Verbund. Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*. 1., Softcover reprint of the original 1st ed. 1992. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2013.
- [MS21] Müller, C.; Spanka, G.: *CARBON CONCRETE COMPOSITE – C³-Environment. Characterisation and leaching tests for the determination of the environmental safety of C³*. Hrsg. von Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2021. URL: <https://mitglieder.vdz-online.de/forschung/abgeschlossene-projekte/c3-umwelt-charakterisierungs-und-auslaugversuche-zur-bestimmung-der-umweltvertraeglichkeit-von-c3/> (zuletzt abgerufen am 10.09.2022).

- [New06] New Way Air Bearings: *Air bearing application and design guide*. 2006. URL: https://www.newwayairbearings.com/sites/default/files/new_way_application_and_design_guide_%20Rev_E_2006-01-18.pdf (zuletzt abgerufen am 20.09.2022).
- [Nic85] Nickau, R.-G., Hrsg.: *Werkzeugmaschinenstelle aus Methacrylatharzbeton*. Unter Mitarb. von Verein Deutscher Ingenieure e.V. Bd. Reihe 2, Nr. 94. Forschungsbericht VDI. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.
- [Nie78] Nietzelt, M.: „Führungsflächen an Werkzeugmaschinenstellen und Verfahren zu ihrer Herstellung“. VEB Werkzeugmaschinenkombinat. Patentschrift: DD 00133201 A1, 1978.
- [Nor18] Nordmann Rassmann GmbH: *VERNETZER, BESCHLEUNIGER, VERZÖGERER, CO*. 2018. URL: <https://www.nordmann.global/de/spezialitaeten-chemikalien-produktsuche/vernetzer-beschleuniger-verzoegerer-co> (zuletzt abgerufen am 13.10.2021).
- [Oel18] Oelze - Präzisions-Messzeugfabrik GmbH: *Konstruktionsmerkmale*. 2018. URL: <http://www.oelze-precision.de/de/konstruktionsmerkmale> (zuletzt abgerufen am 09.09.2022).
- [OO95] Okamura, H.; Ozawa, K.: *Mix Design for Self-Compacting Concrete*. Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers, 1995.
- [Per02] Perrson, B.: „Eight-year exploration of shrinkage in high performance concrete“. In: *Cement and Concrete research* (2002).
- [Per12] Perović, B.: *Hydrostatische Führungen und Lager. Grundlagen, Berechnung und Auslegung von Hydraulikplänen*. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20298-8>.
- [Rau18] Raupach, M.: *Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. Grundlagen, Planung und Instandsetzungsprinzipien nach neuer Norm. 2.*, überarb. Auflage. edition beton. Erkrath: Bau & Technik, 2018.
- [Rei09] Reinhardt, W.: „Oberflächenbehandlungssystem zur Oberflächenvergütung mineralischer Stoffe und mineralischer Zuschläge“. Reinhardt Beton GmbH. Patentschrift: DE 102005040965 B4, 2009.
- [Rei21] Reitz Natursteintechnik KG: *Maschinenbauteile aus Granit*. 2021. URL: <https://www.reitz-natursteintechnik.de/de-de/maschinenkomponenten/maschinenbauteile/maschinenbauteile-aus-granit/?hsLang=de-de> (zuletzt abgerufen am 10.09.2022).

- [Rei22] Reitz Natursteintechnik KG: *Maschinen aus Beton*. 2022. URL: <https://www.reitz-natursteintechnik.de/de-de/maschinenkomponenten/maschinenbauteile/maschinenbauteile-aus-beton/> (zuletzt abgerufen am 13.09.2022).
- [Röd93] Rödter, H.: *Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG) - ein moderner und kostenreduzierender Werkstoff für den Konstrukteur*. Lehrgang Nr. 16828/53.065. Ostfildern: TAE, 1993.
- [Rog86] Rogers, A.: „A process for constructing machine tools“. Cemtronics Inc. Patentschrift: EP 0253930 A1, 1986.
- [Rös02] Rössler, A.: „Schwingfestigkeitsverhalten von SiCr-Federstählen nach einer mechanischen Oberflächenbehandlung und Warmauslagerung“. Diss. München: Technische Universität München, 2002.
- [Rös18] Röser, F.: „Über die Reaktivität von Betonzusatzstoffen - Ein versuchsbasiertes Hydratationsmodell“. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2018.
- [Sah87] Sahm, D.: „Reaktionsharzbeton für Gestellbauteile spanender Werkzeugmaschinen, Werkstoffseitige Möglichkeiten zur Verbesserung der Fertigungstechnik und des Betriebsverhaltens“. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1987.
- [Sau16] Sauer, B., Hrsg.: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. 9. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39501-7>.
- [Sch07] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearb. und erw. Aufl. VDI. Berlin, Heidelberg und New York, NY: Springer, 2007.
- [Sch16] Schladitz, F.: *Der Werkstoff für den Leichtbau*. Version 23. 2016. URL: <http://openaccess.tu-dresden.de/ojs/index.php/ddtr/article/view/317/219> (zuletzt abgerufen am 20.09.2022).
- [Sch58] Schäffler, H.: „Merkblatt – Allgemeine Empfehlungen für die Anwendung der Wärmebehandlung bis 100°C in Betonwerken“. In: *Betonstein-Zeitung des NHUNGBundesverbandes der Betonsteinindustrie* (1958).
- [Sch92] Schuhmann, H.: *Handbuch Betonschutz durch Beschichtungen – Praxis und Anwendungen, Normen und Empfehlungen*. Ehningen bei Böblingen: expert-Verl., 1992.

- [Sch98] Schenkel, M.: „Zum Verbundverhalten von Bewehrung bei kleiner Betondeckung“. Institut für Baustatik und Konstruktion. Forschungsbericht. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998.
- [Sei70] Seidner, L.: „Maschinengestell aus Spambeton“. (Deutschland). Eduard Seidner Maschinenfabrik. Offenlegungsschrift: DE 1575278 A1, 1970.
- [SF08] Sparowitz, L.; Freytag, B.: „Ultra-Hochfester Faserbeton (UHPC)“. In: *Forschungsjournal der TU Graz*, Nr. 7 (2008), S. 6–7.
- [SS16] Schladitz, F.; Schlüter, D.: „Multifunktionaler Carbonbeton – Mehr als nur ein Baumaterial“. In: *Dresdner Transferbrief* Nr. 1 (2016), S. 15. URL: <http://openaccess.tu-dresden.de/ojs/index.php/ddtr/article/view/318/220> (zuletzt abgerufen am 20.09.2022).
- [Ste03] Steiger, T.: „Charakterisierung von heterogen zusammengesetzten Werkstoffen und Rissbildung am Beispiel von Polymerbeton“. Diss. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2003.
- [Str10] Strohbusch, J.: „Beitrag zur Verformungsberechnung im Stahlbetonbau mit kritischer Bewertung bestehender Regelungen“. Bauingenieurwesen. Siegen: Universität Siegen, 2010.
- [Sty21] Stylepark: *Der Blick ins Innere einer Fassadenplatte aus Textilbeton zeigt gut sichtbar die Gitterstruktur. Foto © R. Thyroff*. 2021. URL: <https://www.stylepark.com/de/news/der-baustoff-der-zukunft> (zuletzt abgerufen am 12.09.2022).
- [TFB01] TFB: „Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton“. In: *Cementbulletin* (2001).
- [Thi08] Thienel, K.-Ch.: *Werkstoffe des Bauwesens – Festbeton*. Manuskript. Universität der Bundeswehr München, 2008.
- [Tho18] Thome Präzision GmbH: *Granit – Ein moderner Werkstoff für hochpräzise Teile*. 2018. URL: <https://www.thome-praezision.de/deu/praezisionsgranitteile-messplatten.html#werkstoff> (zuletzt abgerufen am 13.09.2022).
- [TSS07] Telle, R.; Salmang, H.; Scholze H.: *Keramik*. 7., vollst. neubearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg und New York, NY: Springer, 2007.
- [TUD17] TUDALIT e.V. und C³-Carbon Concrete Composite e.V.: „Carbon- und Textilbetonage“. Tagungsband. 2017.
- [Vae03] Vaerst, K.: „Maschinensockel mit Führungsflächen und Verfahren zu dessen Herstellung“. Siemens AG. Patentschrift: DE 10251228 C1, 2003.

- [VDI2627] VDI/VDE 2627 Blatt 1: *Messräume: Klassifizierung und Kenngrößen – Planung und Ausführung*. 2015.
- [VDZ06] Verein Deutscher Zementwerke e.V. *Oberflächenschutz und Instandsetzung – Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken*. 2006.
- [VDZ14] Verein Deutscher Zementwerke e.V. *Zement-Merkblatt B21 – Betonieren bei extremen Temperaturen*. 2014.
- [VDZ59] Verein Deutscher Zementwerke e.V. *Zement-Kalk-Gips H21 – Über den Einfluß der Dampfbehandlung auf Zementklinker verschiedener Zusammensetzung*. Düsseldorf, 1958.
- [Wal97] Walther, R.: *Bauen mit Beton – Einführung für Architekten und Bauingenieure*. Berlin: Ernst, 1997.
- [WB06] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen – Konstruktion und Berechnung*. 8., neu bearb. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2006.
- [Wes81] Wesche, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile*. 2., neubearb. Aufl. Wiesbaden: Bauverl., 1981.
- [Wir22] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V.: *Selbstverdichtender Beton mit Flugasche*. 2022. URL: https://www.win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/Anwendungen/Anwendung_Selbstverdichtender_Beton_SVB_mit_Flugasche_2016-09.pdf (zuletzt abgerufen am 13.09.2022).
- [WW86] Weber, H.; Wenderoth, G.: *Stahlbeton – Schadensursachen, Schadensdiagnose, Schutz und Instandsetzung*. Sindelfingen: expert-Verl., 1986.
- [Zei22] Zeiss, G. O.M.: *GOM_Technical-White-Paper_DIC_DE*. 2022. URL: <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-testing> (zuletzt abgerufen am 10.09.2022).

A Anhang

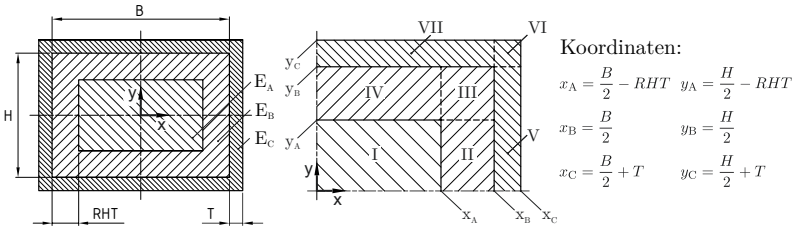
A.1 Auszug | DAfStb Richtlinie zur Instandhaltung [Rau18]

System-bezeichnung	Kurzbeschreibung	Anwendungsgebiete	Eigenschaften	Bindemittel
OS 1 (OS A)	Hydrophobierung	Feuchteschutz	Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme	Silan Siloxan
OS 2 (OS B)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen	Vorbeugender Witterungsschutz	Reduzierung der Wasseraufnahme, der Chloridmigration und der Kohlendioxiddiffusion,	Polymerdispersion, Mischpolymerisat (geflüst) Polyurethan (PUR)
OS 4 (OS C)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen (erhöhte Dichtleit)	wie vor und Eignung für beschichtete Bewehrung und reduzierten Wassergehalt im Beton	Verbesserung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands, farbliche Gestaltung möglich	Silan oder Siloxan (Hydrophobierung)
OS 5a (OS DI) OS 5b (OS DI)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen	Witterungsschutz, Tausalzschutz	wie vor mit begrenzter Rissfurtherückung	Polymerdispersion, Polymer-Zemementgemisch
OS 7 (TL/TP-BEL-EP)	Beschichtung unter Dichtungsschichten von befahrbaren Flächen	Grundierung, dünne Beschichtung (Brückenabdichtung)	Porenverschluss, Rauhheitsausgleich, hitzebeständig bis 250 °C (kurzzeitig)	Epoxidharz (EP)
OS 9 (OS E)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen mit erhöhter Rissfurtherückungsfähigkeit	Witterungs- und Tausalzschutz für Flächen mit Rissen	Verhinderung der Wasseraufnahme und des Eindringens von beton- und stahlangreifender Stoffen	PUR modifiziertes EP 2-K-Polyethylmethacrylat
OS 10 (TL/TP-BEL-B3)	Beschichtung, Dichtschicht, rissüberbrückend, für befahrbare Flächen	Abdichtung von Bauteilen mit Ironnüssen (Brücke, Tunnelsohle)	Verhinderung der Wasseraufnahme und des Eindringens von beton- und stahlangreifenden Stoffen Rissfurtherückung hitzebeständig bis 250 °C (kurzzeitig)	PUR
OS 11 (OS F)	Beschichtung für befahrbare Flächen mit Rissfurtherückung	Abdichtung von Bauteilen mit Ironnüssen (Parkhaus, Freizeits, Brückenköpfe)	wie OS 9	PUR modifiziertes EP, 2-K-Methylmethacrylat
OS 13	Beschichtung für befahrbare Flächen mit starker mechanischer Belastung	geschlossene Parkgaragen und Tiefgaragen	wie OS 9 zusätzlich Widerstand gegen Chemikalien, Verschleiß, Schlag und rückseitige Durchfeuchtung	PUR modifiziertes EP, 2-K-Methylmethacrylat

A.2 Verfahrensrichtlinien zum Abformen von Führungsflächen

1. Die präzisionsbearbeiteten Urformnormale sind mit äußerster Sorgfalt zu behandeln (Kratzer werden als Erhebungen abgeformt).
2. Die Abformnormale sind ausschließlich mit fusselfreien Lappen und klarem, entkalktem Wasser zu reinigen (Rückstände und sonstige Verunreinigungen werden als Vertiefungen abgeformt).
3. Nach dem Abtrocknen ist die Oberfläche nach Möglichkeit berührungslos abzusaugen (Staubkörner und andere Verunreinigungen werden als Vertiefungen abgeformt).
4. Die Trennfolie ist mit Hilfe eines dünnen Wasserfilms und speziellen silikonhaltigen (sehr weichen) Spachteln aufzurakeln (Kratzer werden als Erhebungen abgeformt).
5. Die Schalungen sind vorsichtig ohne Relativbewegung zwischen Folie und Form senkrecht und gleichmäßig aufzusetzen und zu verspannen.
6. Bei der Formfüllung ist eine laterale Relativbewegung des einfließenden Betons bezüglich der abzuformenden Präzisionsoberfläche durch Nachführen der Einfüllung zu vermeiden.
7. Nach dem Entlüften der Betons hat das gegossene Bauteil für eine Woche in der Schalung zu verweilen und ist vor Zugluft zu schützen, um ein schnelles, lokales Austrocknen zu verhindern.
8. Die Bauteile unterliegen einer Schwindverformung und erreichen erst nach 2 Monaten ihren stabilen Endzustand.
9. Die fertigen Bauteile sind erst 2 Monate nach der Herstellung und 2 Wochen nach der Aufstellung am klimatisch stabilisierten Bestimmungsort endgültig zu vermessen.

A.3 Lösung zu 6.1.2 – Steifigkeiten beschichteter Quader



Ansatzfunktionen für den lokalen E-Modul in den Intervallen I-VII:

$$E_I = E_0 = \text{konst.} \quad x = (0..x_A) \text{ und } y = (0..y_A) \quad \text{I}$$

$$E_{II} = E_B(x) \quad x = (x_A..x_B) \text{ und } y = (0..y_A) = \frac{1}{2}(E_2 + E_0) + \frac{(E_2 - E_0)}{2} \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \quad \text{II}$$

$$E_{III} = E_B(x, y) \quad x = (x_A..x_B) \text{ und } y = (y_A..y_C) \\ = E_0 + (E_2 - E_0) \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \right] \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \right] \right\} \quad \text{III}$$

$$E_{IV} = E_B(y) \quad x = (0..x_A) \text{ und } y = (y_A..y_B) = \frac{1}{2}(E_2 + E_0) + \frac{(E_2 - E_0)}{2} \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \quad \text{IV}$$

$$E_V = E_C(x) \quad x = (x_B..x_C) \text{ und } y = (0..y_B) = E_1 + (E_2 - E_1) \cos \left[\frac{\pi}{2T} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \quad \text{V}$$

$$E_{VI} = E_C(x, y) \quad x = (x_B..x_C) \text{ und } y = (y_B..y_C) \\ = E_1 + (E_2 - E_1) \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(x - \frac{B}{2} \right) \right] \right\} \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{RHT} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \right\} \quad \text{VI}$$

$$E_{VII} = E_C(x, y) \quad x = (0..x_B) \text{ und } y = (y_B..y_C) = E_1 + (E_2 - E_1) \cos \left[\frac{\pi}{2T} \left(y - \frac{H}{2} \right) \right] \quad \text{VII}$$

Berechnung der Zugsteifigkeit $C_Z = C_{\text{Zug}}$:

$$C_Z = \frac{4}{L} \left[E_0 x_A y_A + y_A \int_{x_A}^{x_B} E_B(x) dx + \int_{y_A}^{y_B} \int_{x_A}^{x_B} E_B(x, y) dx dy + x_A \int_{y_A}^{y_B} E_B(y) dy \dots \right. \\ \left. \dots + y_B \int_{x_B}^{x_C} E_C(x) dx + \int_{y_B}^{y_C} \int_{x_B}^{x_C} E_C(x, y) dx dy + x_B \int_{y_B}^{y_C} E_C(y) dy \right]$$

Berechnung der Biegesteifigkeit $C_B = C_{\text{Biegung}}$:

$$C_B = \frac{192}{L^3} \left[E_0 x_A \int_0^{y_A} y^2 dx + \int_0^{y_A} \int_{x_A}^{x_B} y^2 E_B(x) dx dy + \int_{y_A}^{y_B} \int_{x_A}^{x_B} y^2 E_B(x, y) dx dy + x_A \int_{y_A}^{y_B} y^2 E_B(y) dx \dots \right. \\ \left. \dots + \int_0^{y_A} \int_{x_B}^{x_C} y^2 E_C(x) dx + \int_{y_B}^{y_C} \int_{x_B}^{x_C} y^2 E_C(x, y) dx dy + x_B \int_{y_B}^{y_C} y^2 E_C(y) dx \right]$$

Lösungen der Integrale zur Berechnung der Zugsteifigkeit:

$$I_Z := E_0 x_A y_A = E_0 \left(\frac{B}{2} - RHT \right) \left(\frac{H}{2} - RHT \right)$$

$$II_Z := y_A \int_{x_A}^{x_B} E_B(x) dx = \frac{RHT}{2} \left(\frac{H}{2} - RHT \right) (E_0 + E_2)$$

$$V_Z := y_B \int_{x_B}^{x_C} E_C(x) dx = \frac{HT}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) E_1 + E_2 \right]$$

$$III_Z := \int_{y_A}^{y_B} \int_{x_A}^{x_B} E_B(x, y) dx dy = \frac{RHT^2}{4} (E_0 + 3E_2)$$

$$VI_Z := \int_{y_B}^{y_C} \int_{x_B}^{x_C} E_C(x, y) dx dy = \frac{4T^2}{\pi^2} \left[\left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) E_1 + E_2 \right]$$

$$IV_Z := x_A \int_{y_A}^{y_B} E_B(y) dy = \frac{RHT}{2} \left(\frac{B}{2} - RHT \right) (E_0 + E_2)$$

$$VII_Z := x_B \int_{y_B}^{y_C} E_C(y) dy = \frac{BT}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) E_1 + E_2 \right]$$

Lösungen der Integrale zur Berechnung der Biegesteifigkeit:

$$I_B := E_0 x_A \int_0^{y_A} y^2 dx = \frac{E_0}{4} \left(\frac{B}{2} - RHT \right) \left(\frac{H}{2} - RHT \right)^3$$

$$II_B := \int_0^{y_A} \int_{x_A}^{x_B} y^2 E_B(x) dx dy = \frac{RHT}{6} (E_0 + E_2) \left(\frac{H}{2} - RHT \right)^3$$

$$III_B := \int_{y_A}^{y_B} \int_{x_A}^{x_B} y^2 E_B(x, y) dx dy = \frac{RHT^2}{16\pi^2} \left\{ \left[\left(\frac{E_0}{3} + E_2 \right) \pi^2 + 2(E_0 - E_2) \right] 4RHT^2 \dots \right. \\ \left. \dots - 2HRHT \left[(E_0 + 3E_2) \pi^2 + 4(E_0 - E_2) \right] + H^2 \pi^2 (E_0 + 3E_2) \right\}$$

$$IV_B := x_A \int_{y_A}^{y_B} y^2 E_B(y) dy = \frac{RHT}{8\pi^2} \left\{ \left[(E_0 + E_2) \frac{\pi^2}{3} + 2(E_0 - E_2) \right] 4RHT^2 \dots \right. \\ \left. \dots - 2HRHT \left[(E_0 + E_2) \pi^2 + 4(E_0 - E_2) \right] + H^2 \pi^2 (E_0 + E_2) \right\} \left(\frac{B}{2} - RHT \right)$$

$$V_B := \int_0^{y_A} \int_{x_B}^{x_C} y^2 E_C(x) dx = \frac{H^3 T}{12\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) E_1 + E_2 \right]$$

$$VI_B := \int_{y_B}^{y_C} \int_{x_B}^{x_C} y^2 E_C(x, y) dx dy = \frac{4T^2}{\pi^4} \left[\left(H^2 + 2HT + \frac{4T^2}{3} \right) \frac{E_1 \pi^4}{4} \dots \right. \\ \left. \dots + (H + 2T)^2 (E_1 + E_2) \pi^2 + 8\pi HT (E_1 - E_2) + 64T^2 (E_1 - E_2) \right]$$

$$VII_B := x_B \int_{y_B}^{y_C} y^2 E_C(y) dy = \frac{TB}{8\pi^3} \left[\left(H^2 + 2HT + \frac{4T^2}{3} \right) E_1 \pi^3 \dots \right. \\ \left. \dots + (H + 2T)^2 (E_1 + E_2) 2\pi^2 + 16\pi HT (E_1 - E_2) + 64T^2 (E_1 - E_2) \right]$$

A.4 Ermittlung der Biegesteifigkeit im 3-Punkt-Biegeversuch

In Abb. A.1 ist die Prüfanordnung für die Biegesteifigkeitsmessung im 3-Punkt-Biegeversuch dargestellt. Der Schulterstab (7) ist sehr empfindlich gegenüber Querkräften und Scherspannungen. Deshalb wurde die Aufnahme der Prüfkörper so gestaltet, dass die Formfehler frei von Zwang und unter Beibehaltung der Prüfvoraussetzungen ausgeglichen werden können. Die Umsetzung erfolgt mittels drei in Idealanordnung parallelen Stiften. Der Druck- und Zentrierstift (5) ist starr mit dem Druckstempel (6) verbunden. Zum Ausgleich von Gestaltabweichungen der Schulterstäbe ist die freie Ausrichtung der Auflagestifte (4) in den Zylindersegmenten (3), durch Verdrehung im V-Nut-Gestell (1) um die Längsachse möglich. Die Drehachse fällt hierbei mit der oberen Probenfläche zusammen, womit der Lateralversatz am Druck- und Zentrierstift (5) minimal ist und der Schulterstab (7) durch reine Biegung beansprucht wird.

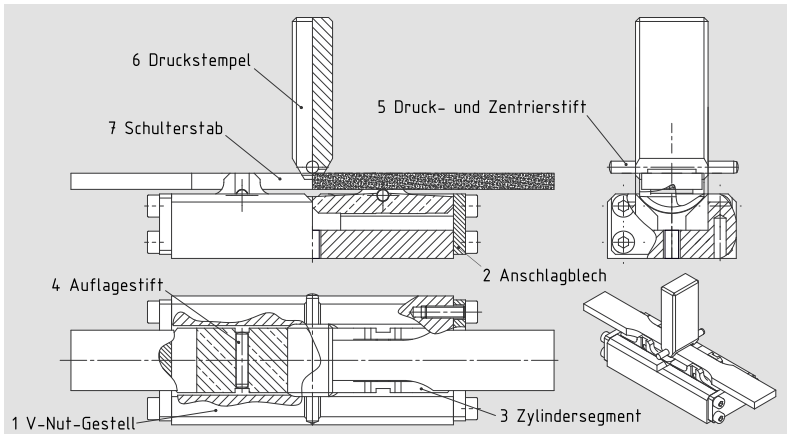


Abbildung A.1: Probekörperaufnahme für den 3-Punkt-Biegeversuch

Reproduzierbare Prüfvoraussetzungen für die zentrale Krafteinleitung und eine freie Biegelänge von $L = 35$ mm werden in den folgenden Schritten geschaffen:

1. Das V-Nut-Gestell (1) wird ohne die Zylindersegmente (3) in der unteren Festhaltung der Prüfmaschinen eingespannt.
2. Der Druck- und Zentrierstift (5) am Druckstempel (6) wird in der lateralen V-Nut im V-Nut-Gestell (1) positioniert.
3. Die obere Festhaltung wird so justiert und gespannt, dass die Position des Druck- und Zentrierstiftes (5) unverändert bleibt.
4. Der Druckstempel (6) wird herausgefahren und die zwei Zylindersegmente (3) mit den Auflagestiften (4) werden eingelegt.

A.5 Messfehler bei den Steifigkeitsmessungen nach GUM

Bestimmung der Probensteifigkeit

C_{Probe} = Probensteifigkeit

C_{Masch} = Maschinensteifigkeit

s_{Norm} = Probenverformung

s_{Mess} = Gesamtverschiebung

X = Übersetzungsverhältnis

F = Prüfkraft

L = Länge des Prüfquaders

A = Abstand der sphärischen Backen

$$C_{Probe} = \frac{F}{s_{Norm}} = \frac{A}{XL \left(\frac{s_{Mess}}{F} - \frac{1}{C_{Masch}} \right)}$$

3-Punkt-Biegeversuch:

$(X, L, A) = 1$ und $\Delta A = 0$

$$C_{Masch} = \frac{F}{s_{Mess}} \begin{cases} \frac{\partial C_{Masch}}{\partial F} = \frac{1}{s_{Mess}} \\ \frac{\partial C_{Masch}}{\partial s_{Mess}} = -\frac{F}{s_{Mess}^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial C_{Probe}}{\partial A} = \frac{1}{XL\xi} \\ \frac{\partial C_{Probe}}{\partial F} = -\frac{A}{XL\xi^2} \cdot \left(-\frac{s}{F^2}\right) \\ \frac{\partial C_{Probe}}{\partial s} = -\frac{A}{XL\xi^2} \cdot \frac{1}{F} \\ \frac{\partial C_{Probe}}{\partial C_{Masch}} = -\frac{A}{XL\xi^2} \cdot \frac{1}{C_{Masch}^2} \end{cases}$$

Parameter und Toleranzen der Prüfordnung

n_{CM}, n_C = Losgrößen (Maschine und Prüfkörper)

σ_{CM}, σ_C = Standardabweichungen

ΔL = \emptyset (Normquaderlänge)

ΔX = \emptyset (Fehler des Übersetzungsverhältnisses)

ΔF_{rel} = Fehler Klasse I in ISO376 (0.05..0.15)%

U_F = Gesamtfehler bei der Kraftmessung

$\Delta s, \Delta A$ = Positionsreproduzierbarkeit = $\pm 2\mu\text{m}$

U_s, U_A = Positionier- / Abstandsfehler

$U_{CM_{Mess}}$ = Messfehler bei der Maschinensteifigkeit

U_{CM} = Gesamtfehler bei der Maschinensteifigkeit

$U_{C_{Mess}}$ = Messfehler bei der Probensteifigkeit

U_C = Gesamtfehler bei der Probensteifigkeit

Verteilungen

Typ A / Rechek

$$U_F = \frac{\Delta F_{rel} \cdot F}{\sqrt{3}}$$

$$U_s = U_A = \frac{\Delta s}{\sqrt{3}}$$

Typ B / Gauß

$$U_{Ci_{Mess}} = \frac{\sigma_{Ci}}{\sqrt{n_{Ci}}} \quad i=M, C$$

Unsicherheit bei der Bestimmung der Maschinensteifigkeit ($C_{Probe} \rightarrow \infty$)

$$U_{CM} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{Masch}}{\partial F} U_F \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Masch}}{\partial s_{Mess}} U_s \right)^2 + U_{CM_{Mess}}^2}$$

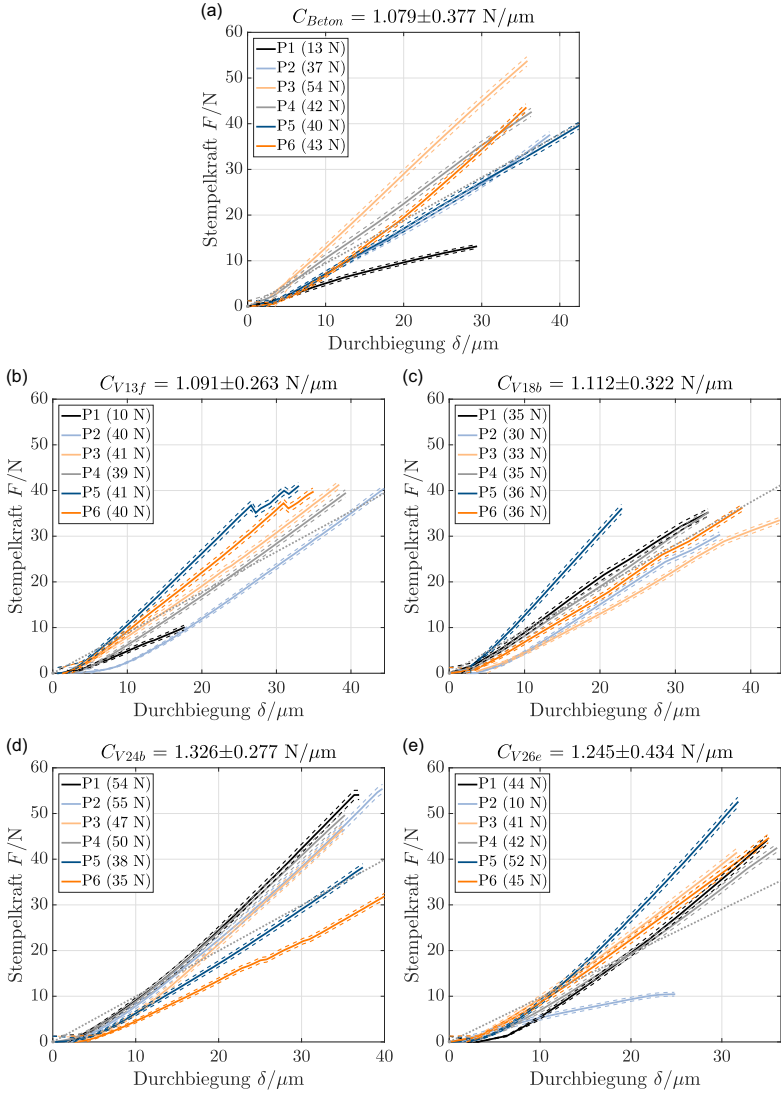
$$U_{CM} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_{rel} \cdot F}{\sqrt{3} \cdot s_{Mess}} \right)^2 + \left(-\frac{F \cdot \Delta s}{\sqrt{3} \cdot s_{Mess}^2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{CM}}{\sqrt{n_{CM}}} \right)^2}$$

Gesamtunsicherheit bei der Bestimmung der Probensteifigkeit

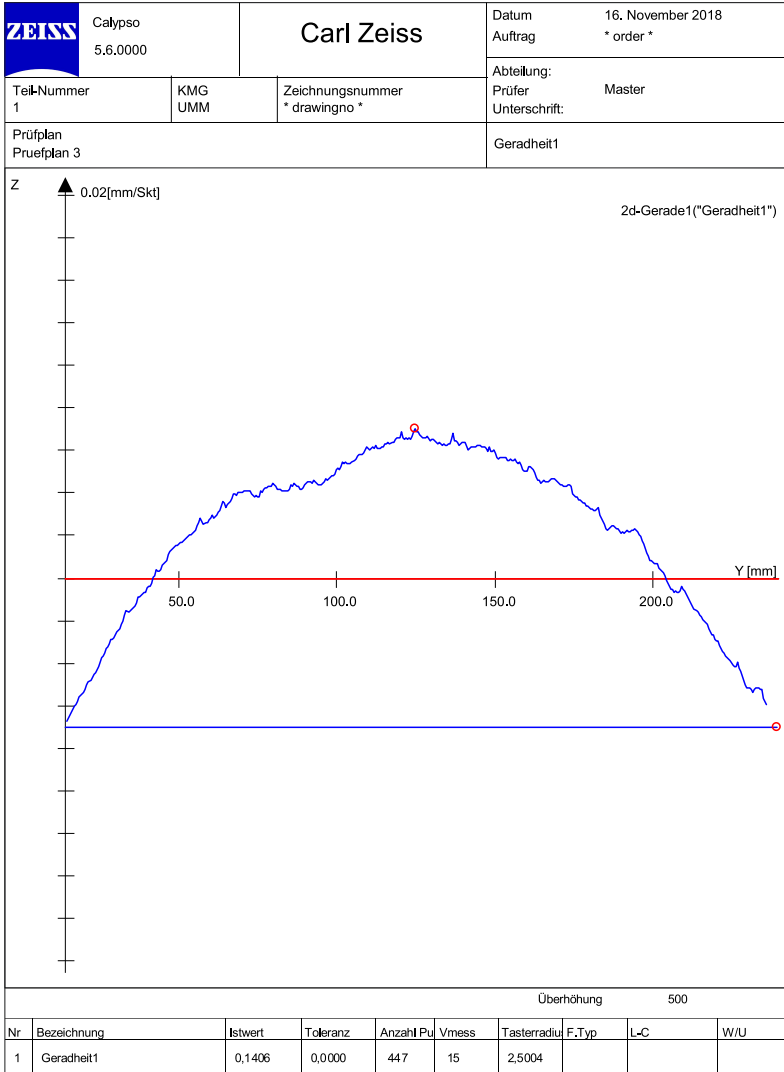
$$U_C = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{Probe}}{\partial A} U_A \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Probe}}{\partial F} U_F \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Probe}}{\partial s_{Mess}} U_s \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{Probe}}{\partial C_{Masch}} U_{CM} \right)^2 + U_{C_{Mess}}^2}$$

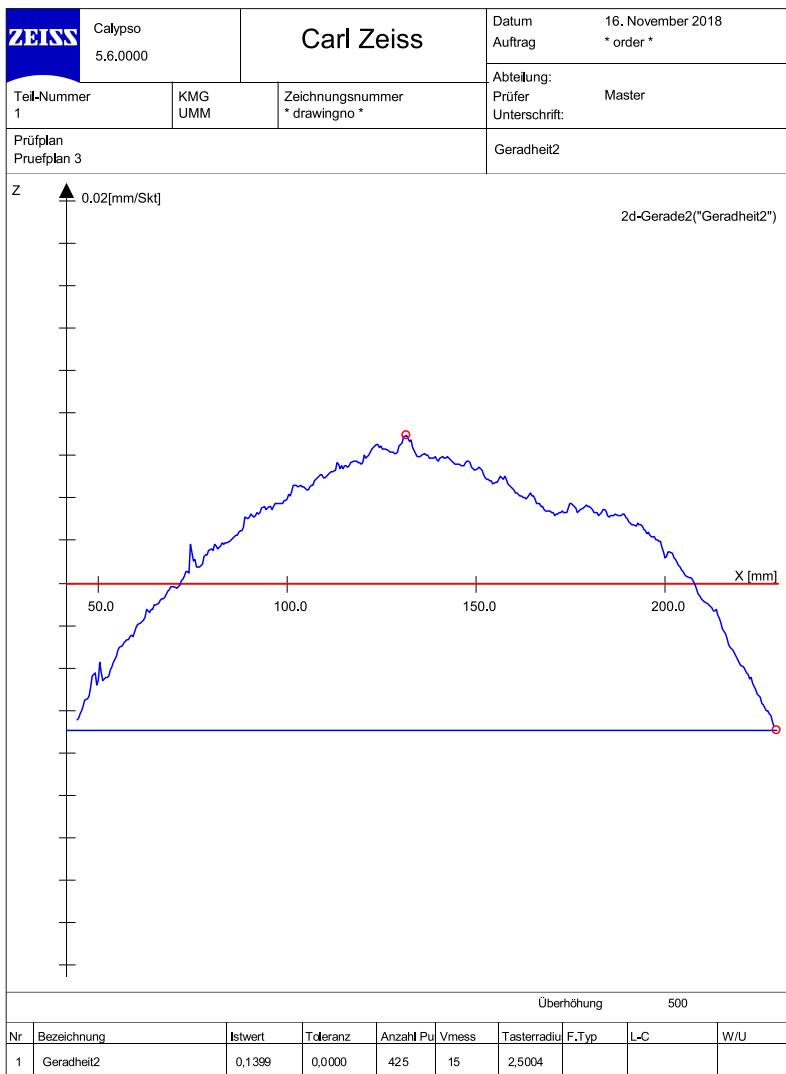
$$U_C = \frac{A}{XL} \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{\sqrt{3} \cdot A\xi} \right)^2 + \left(\frac{s_{Mess} \Delta F_{rel}}{\sqrt{3} \cdot F\xi^2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta s}{\sqrt{3} \cdot F\xi^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{CM}}{C_{Masch}^2 \xi^2} \right)^2 + \left(\frac{XL \sigma_C}{A \sqrt{n_C}} \right)^2}$$

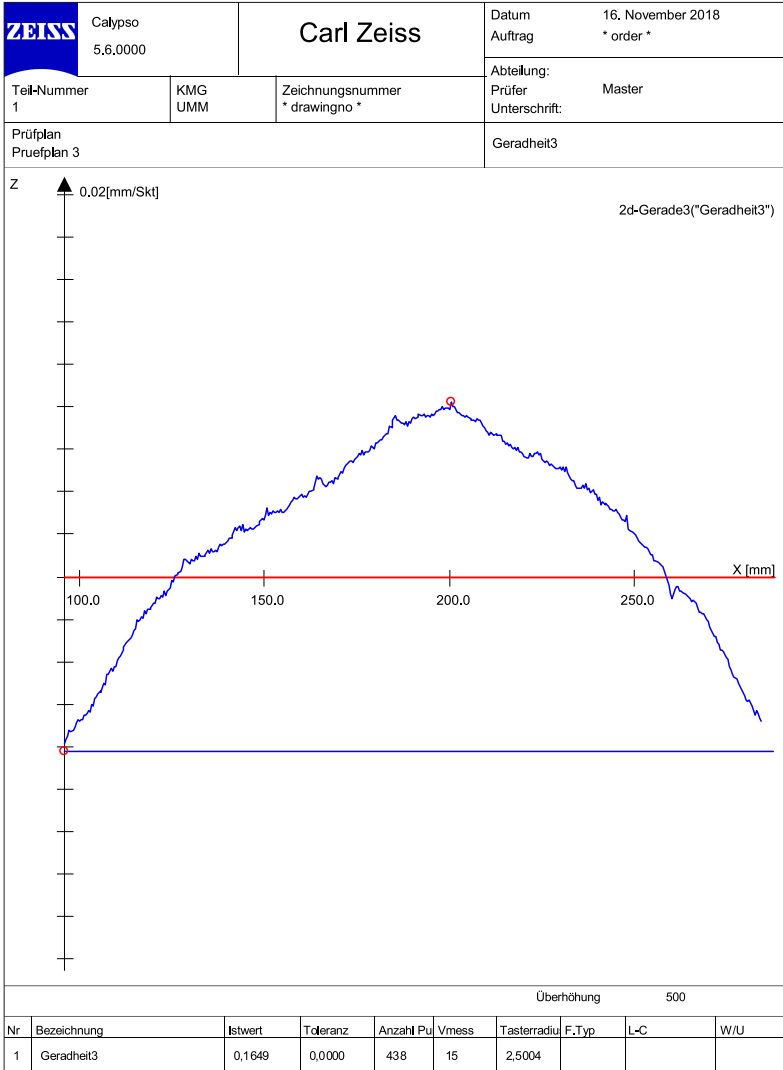
A.6 Biegesteifigkeitsmessungen der Charge Nr. III



A.7 Geradheitsmessungen am Demonstrator







Liste der bisher erschienenen Bände, Stand 29.11.2023

Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (IMK), 1990 – 2010

- Band 1 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.):
Forschung und Lehre im Institut für Maschinenelemente und Konstruktion
(Institutsbericht). ISLE, Ilmenau 1999. ISBN 3-932633-37-7.
- Band 2 Spiller, Frank:
Möglichkeiten der rechentechnischen Umsetzung von Erkenntnissen aus der
Konstruktionssystematik unter Nutzung der Featuretechnologie (Dissertation
TU Ilmenau 1998). ISLE, Ilmenau 1998. ISBN 3-932633-20-2.
- Band 3 Leibl, Peter:
Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion
kostengünstiger Produkte (Dissertation TU Ilmenau 1998). ISLE, Ilmenau
1998. ISBN 3-00-003695-4.
- Band 4 Lutz, Steffen:
Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern (Dissertation TU
Ilmenau 2000). ISLE, Ilmenau 2000. ISBN 3-932633-47-4.
- Band 5 Kletzin, Ulf
Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und
Federanforderungen (Dissertation TU Ilmenau 2000). ISLE, Ilmenau 2000.
ISBN 3-932633-48-2.
- Band 6 Volz, Andreas K.:
Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der
Crashsimulation (Dissertation TU Ilmenau 1998). ISLE, Ilmenau 2000.
ISBN 3-932633-52-0.
- Band 7 Brix, Torsten:
Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie (Dissertation
TU Ilmenau 2001). ISLE, Ilmenau 2001. ISBN 3-932633-67-9.
- Band 8 Rektor der TU Ilmenau und Institut für Maschinenelemente und Konstruktion
der TU Ilmenau (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss Jena GmbH: .
Vom Arbeitsblatt zum virtuellen Prototyp – 50 Jahre Konstruktionssystematik
(Institutsbericht). ISLE, Ilmenau 2002. ISBN 3-932633-68-7.
- Band 9 Liebermann, Kersten:
Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für
Schraubendruckfedern (Dissertation TU Ilmenau 2003). ISLE, Ilmenau 2003.
ISBN 3-932633-74-1.
- Band 10 Meissner, Manfred; Denecke, Klaus:
Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an der
Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003 (Institutsbericht). ISLE,
Ilmenau 2003. ISBN 3-932633-82-2.
- Band 11 Geinitz, Veronika:
Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2006). ISLE, Ilmenau 2006. ISBN 3-938843-11-X.
- Band 12 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (Hrsg.):
Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von Univ.-
Prof.Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Hans-Jürgen Schorcht (Institutsbericht). ISLE, Ilmenau 2005.
ISBN 3-932633-97-0.

- Band 13 Wittkopp, Tobias:
Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern (Dissertation TU Ilmenau 2005). ISLE, Ilmenau 2005. ISBN 3-938843-07-1.
- Band 14 Frank, Stefan:
Justierdrehen – eine Technologie für Hochleistungsoptik (Dissertation TU Ilmenau 2007). ISLE, Ilmenau 2008. ISBN 978-3-938843-35-4.
- Band 15 Schilling, Thomas:
Augmented Reality in der Produktentstehung (Dissertation TU Ilmenau 2008). ISLE, Ilmenau 2008. ISBN 978-3-938843-42-0.
- Band 16 Lotz, Markus:
Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und Positioniermaschinen (Dissertation TU Ilmenau 2009). ISLE, Ilmenau 2009. ISBN 978-3-938843-46-8.
- Band 17 Hackel, Tobias:
Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für Nanopräzisionsmaschinen (Dissertation TU Ilmenau 2010). Monsenstein & Vannerdat, Münster 2010. ISBN 978-3-86991-111-3.
- Band 18 Frank, Thomas:
Konzeption und konstruktive Gestaltung der Messkreise von Nanomessmaschinen (Dissertation TU Ilmenau 2010). Monsenstein & Vannerdat, Münster 2010. ISBN 978-3-86991-194-6.

Berichte aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK), 2010 – ...

- Band 19 Sondermann, Mario:
Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme (Dissertation TU Ilmenau 2010). Universitätsverlag, Ilmenau 2011. ISBN 978-3-939473-94-7. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000489.
- Band 20 Husung, Stephan:
Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung von Virtual Reality während der Produktentwicklung (Dissertation TU Ilmenau 2011). Universitätsverlag, Ilmenau 2012. ISBN 978-3-86360-026-6. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000510.
- Band 21 Dobermann, Dirk:
Stabilisierung der Bildlage abbildender optischer Systeme (Dissertation TU Ilmenau 2012). Universitätsverlag, Ilmenau 2013. ISBN 978-3-86360-056-3. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000409.
- Band 22 Taubmann, Peter:
Analyse der Ventildfederbewegung als Beitrag zur Beeinflussung der Verschleißursachen an den Auflageflächen (Dissertation TU Ilmenau 2013). Universitätsverlag, Ilmenau 2013. ISBN 978-3-86360-059-4. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000043.
- Band 23 Erbe, Torsten:
Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess (Dissertation TU Ilmenau 2013). Universitätsverlag, Ilmenau 2013. ISBN 978-3-86360-060-0. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000129.

- Band 24 Ginani, Luciano Selva:
Optical Scanning Sensor System with Submicron Resolution (Dissertation TU Ilmenau 2013). Universitätsverlag, Ilmenau 2013. ISBN 978-3-86360-068-6.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000337.
- Band 25 Heidler, Nils:
Untersuchungen zylindrischer Gasführungselemente für Hochvakuumanwendungen (Dissertation TU Ilmenau 2015).
Universitätsverlag, Ilmenau 2016. ISBN 978-3-86360-130-0.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000598.
- Band 26 Reich, René:
Möglichkeiten und Grenzen bei der Auslegung von Schraubendruckfedern auf Basis von Umlaufbiegeprüfungen (Dissertation TU Ilmenau 2016).
Universitätsverlag, Ilmenau 2016. ISBN 978-3-86360-139-3.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000247.
- Band 27 Resch, Jens:
Kontextorientierte Entwicklung und Absicherung von festen Verbindungen im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie (Dissertation TU Ilmenau 2016). Universitätsverlag, Ilmenau 2016. ISBN 978-3-86360-143-0.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000373.
- Band 28 Scheibe, Hannes:
Aktiv-adaptive Polierwerkzeuge zur Herstellung rotationssymmetrischer Asphären (Dissertation TU Ilmenau 2016). Universitätsverlag, Ilmenau 2017.
ISBN 978-3-86360-147-8. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000551.
- Band 29 Reeßing, Michael:
Softwarewerkzeuge für den phasen- und domänenübergreifenden Entwurf (Dissertation TU Ilmenau 2016). Universitätsverlag, Ilmenau 2017.
ISBN 978-3-86360-169-0. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000892.
- Band 30 Lux, Rüdiger:
Wärmebehandlung von SiCr-legiertem, ölschlussvergütetem Federstahldraht (Dissertation TU Ilmenau 2018). Universitätsverlag, Ilmenau 2018.
ISBN 978-3-86360-185-0. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000210.
- Band 31 Thomisch, Marco:
Methodik zur Bestimmung optimaler Parameter beim Drahtumformen (Dissertation TU Ilmenau 2018). Universitätsverlag, Ilmenau 2018.
ISBN 978-3-86360-187-4. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000300.
- Band 32 Wohlfahrt, Fabian:
Kraftgesteuerte Messzelle für Dilatometeranwendungen (Dissertation TU Ilmenau 2018). Universitätsverlag, Ilmenau 2019. ISBN 978-3-86360-193-5.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000443.
- Band 33 John, Kerstin:
Untersuchung von Umlenkelementen zur Anwendung in der interferometrischen Längenmesstechnik (Dissertation TU Ilmenau 2018).
Universitätsverlag, Ilmenau 2019. ISBN 978-3-86360-197-3.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000555.
- Band 34 Mack, Benjamin:
Untersuchungen zum Schadensmechanismus Torsionsschwingbruch durch Kontakttermüdung an Schraubendruckfedern (Dissertation TU Ilmenau 2018).
Universitätsverlag, Ilmenau 2019. ISBN 978-3-86360-198-0.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000564.

- Band 35 Hesse, Miriam:
Untersuchung der Absicherung von Montageprozessen am Beispiel von Produktionsanläufen in der Automobilindustrie (Dissertation TU Ilmenau 2019). Universitätsverlag, Ilmenau 2020. ISBN 978-3-86360-221-5.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000681.
- Band 36 Scheler, Marcel:
Auswahl robuster Wirkprinzipien auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDDAnsatzes (Dissertation TU Ilmenau 2020). Universitätsverlag, Ilmenau 2020. ISBN 978-3-86360-225-3.
DOI 10.22032/dbt.45602. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020000270.
- Band 37 Schienbein, Ralf:
Grundlegende Untersuchungen zum konstruktiven Aufbau von Fünffachs-Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (Dissertation TU Ilmenau 2020). Universitätsverlag, Ilmenau 2020. ISBN 978-3-86360-229-1.
URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020000376.
- Band 38 Mahboob, Atif:
Modelling and Use of SysML Behaviour Models for Achieving Dynamic Use Cases of Technical Products in Different VR-Systems (Dissertation TU Ilmenau 2020). Universitätsverlag, Ilmenau 2021. ISBN 978-3-86360-234-5.
DOI 10.22032/dbt.47179. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020000595.
- Band 39 Weber, Christian:
Weimar – a Personal Tribute. Universitätsverlag, Ilmenau 2023.
DOI 10.22032/dbt.58077. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023100040.
- Band 40 Hahm, Christoph:
Direkt abgeformte Betonbauteile für Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau. Universitätsverlag, Ilmenau 2023.
DOI 10.22032/dbt.59146. URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023000307.

Christoph Hahm: Direkt abgeformte Betonbauteile für Präzisionsanwendungen im Maschinen- und Gerätebau

Für Bauteile von Maschinen- und Geräten mit hohem Präzisionsanspruch findet häufig Naturstein Verwendung, der langzeitstabil ist und fein bearbeitet werden kann. Die Gestaltungsmöglichkeiten sind aufgrund der kosten- und zeitintensiven Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen stark eingeschränkt. Mit Beton können vergleichbare Eigenschaften erzielt und komplexe Gestaltmerkmale kostengünstig urformend hergestellt werden. Das unvermeidliche Schrumpfen und Quellen wird durch eine entwickelte Simulationsmethode vorherbestimmt. Darauf basierend werden Schalungen entworfen, aus denen Bauteile mit der gewünschten Gestalt hervorgehen. Die Langzeitstabilität wurde experimentell nachgewiesen. Eine weitere Betriebsfestigkeitssteigerung wird durch das Aufbringen von Beschichtungen erreicht. Damit werden selbst betonbasierte Leichtbauteile mit abgesicherter Betriebsfestigkeit für dynamische Beanspruchung möglich. Die Vorhersage der gewünschten Wirkung erfolgt durch analytische und experimentelle Methoden.

