

HYDRAULISCH GEBUNDENER BETON ALS ALTERNATIVER WERKSTOFF IN DER FEINWERKTECHNIK

12. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“

DGFT Deutsche Gesellschaft für Feinwerktechnik e. V.

Dresden, 28. September 2018

Christoph Hahm

René Theska

Gliederung

1. Motivation zur Verwendung von Beton in der Feinwerktechnik
2. Replikation von luftlagertauglichen Oberflächen aus Naturstein
3. Qualifizierung balkenförmiger Probekörper mit Präzisionsflächen
4. Simulation der Gestaltänderung beim Aushärten von Beton
5. Betonleichtbauteile für dynamische Anwendungen
6. Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtungen
7. Zusammenfassung und Ausblick

1. Motivation zur Verwendung von Beton in der Feinwerktechnik

• Förderung der Betonforschung in der Feinwerktechnik - WARUM?



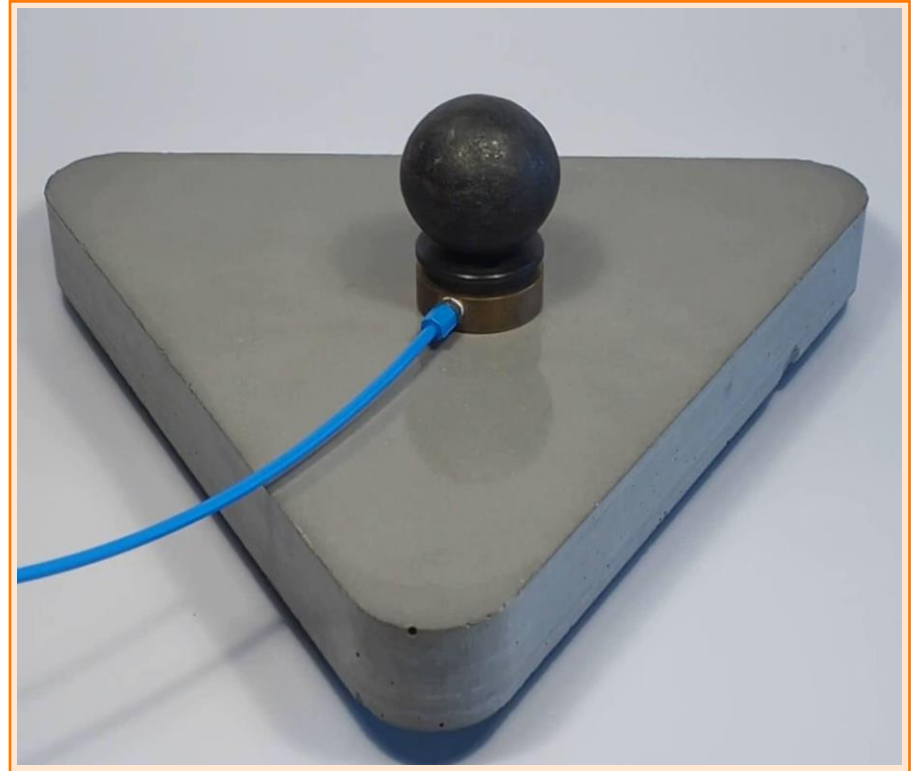
- ✓ Lagestabilität
- ✓ Spannungen
- ✓ Feinbearbeitung
- ✓ Wärmedehnung

- × Lieferzeiten
- × Prozesskosten
- × Abhängigkeit von Zulieferern



- ✓ Gestaltungsfreiheit
- ✓ Funktionsintegration

- × Kostenintensive Nachbearbeitung

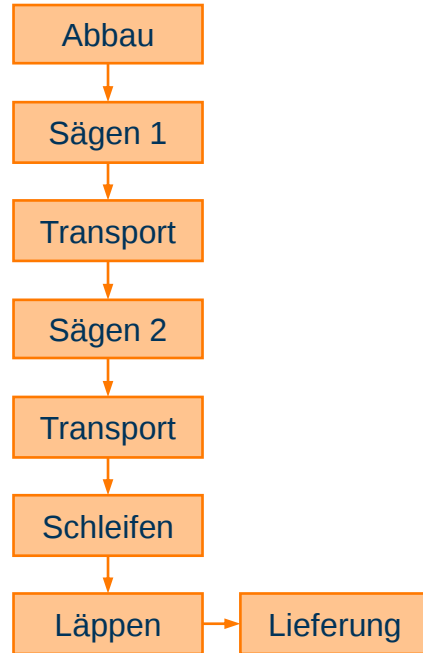


28.09.2018

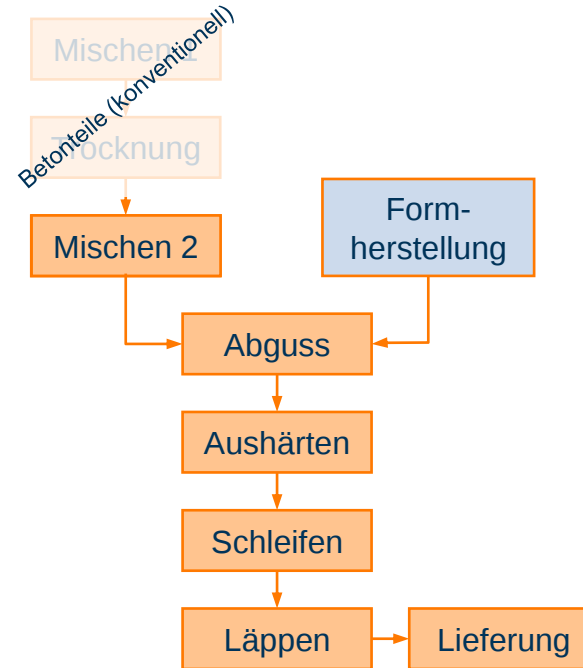
1. Motivation zur Verwendung von Beton in der Feinwerktechnik

• Kostenfaktoren bei der Herstellung von Präzisionskomponenten im Vergleich

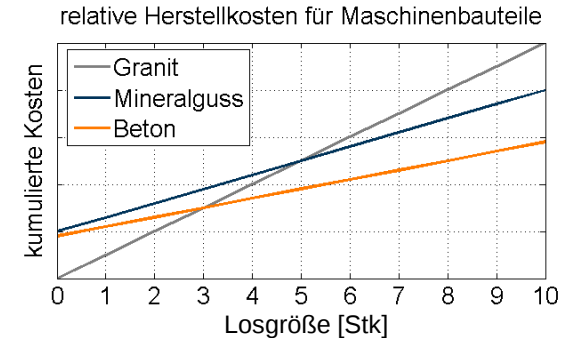
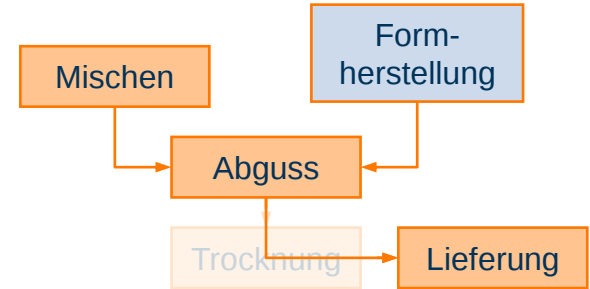
Natursteinbauteile



Mineralguss / Betonteile



Präzisionsbetonbauteile



2. Replikation von luftlagertauglichen Oberflächen aus Naturstein

• Der Abformprozess



28.09.2018

3. Qualifizierung balkenförmiger Probekörper mit Präzisionsflächen

• messtechnische Untersuchungen zu Langzeitstabilität und Funktionalität

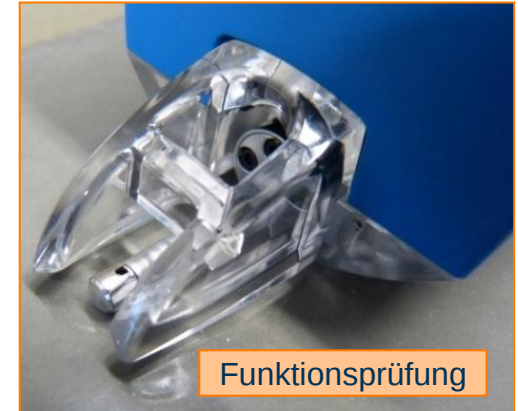


- Globale Geradheitsabweichung (Formabweichung)
 - absolute Geradheit → Beurteilung der Betonmischung
 - relative Geradheit → Langzeitgeometriestabilität
- Lokale Gestaltabweichungen
 - Welligkeit
 - Rauheit

} Gewährleistung der Betriebssicherheit von aerostatischen Elementen

Einflussfaktoren

- ⇒ Zuschlagstoffe
- ⇒ Abformumgebung
- ⇒ Schwinden /Quellen
- ⇒ Betriebsumgebung
- ⇒ Autoklavierung (künstliches Altern)



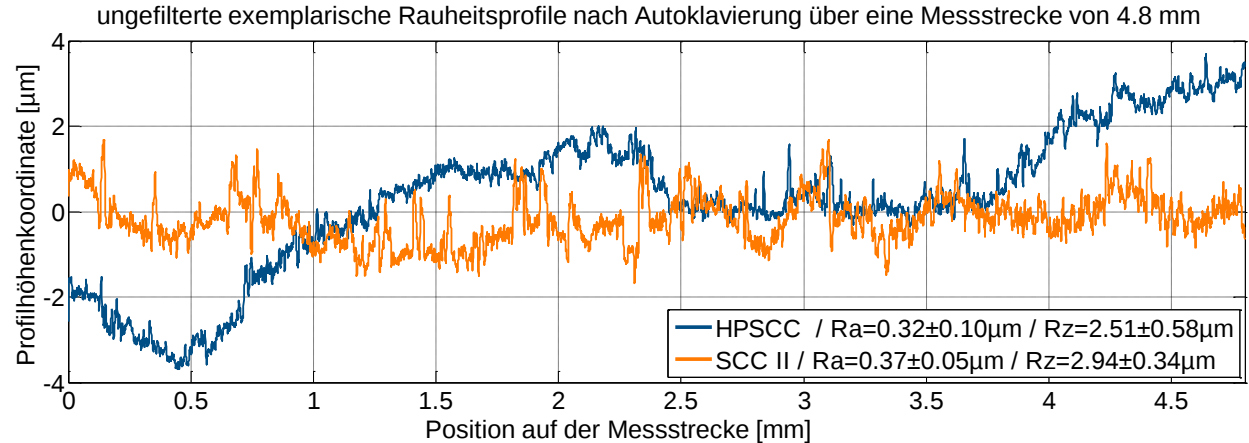
28.09.2018

3. Qualifizierung balkenförmiger Probekörper mit Präzisionsflächen

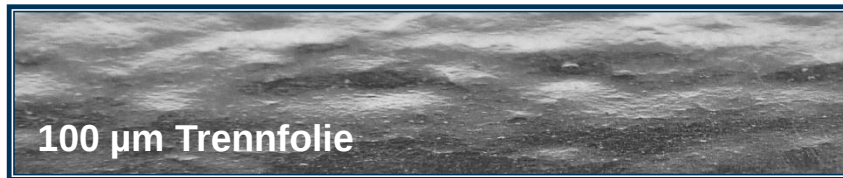
• Charakterisierung von lokalen Gestaltabweichungen und Funktionsprüfung

■ Rauheitsmessungen (Variation der Nachbehandlung)

- ohne Nachbehandlung
= Aushärtung an der Umgebungsluft bei 20°C
→ $Ra = (0.16..0.23)\mu m$
→ $Rz = (1.47..2.11)\mu m$
- Autoklavierung
= ein Monat bei 90°C und 100% Luftfeuchtigkeit
→ $Ra = (+100..+61)\%$
→ $Rz = (+71..+39)\%$



■ Welligkeitsausbildung bei Trennfolien mit verschiedenen Wandstärken



100 μm Trennfolie



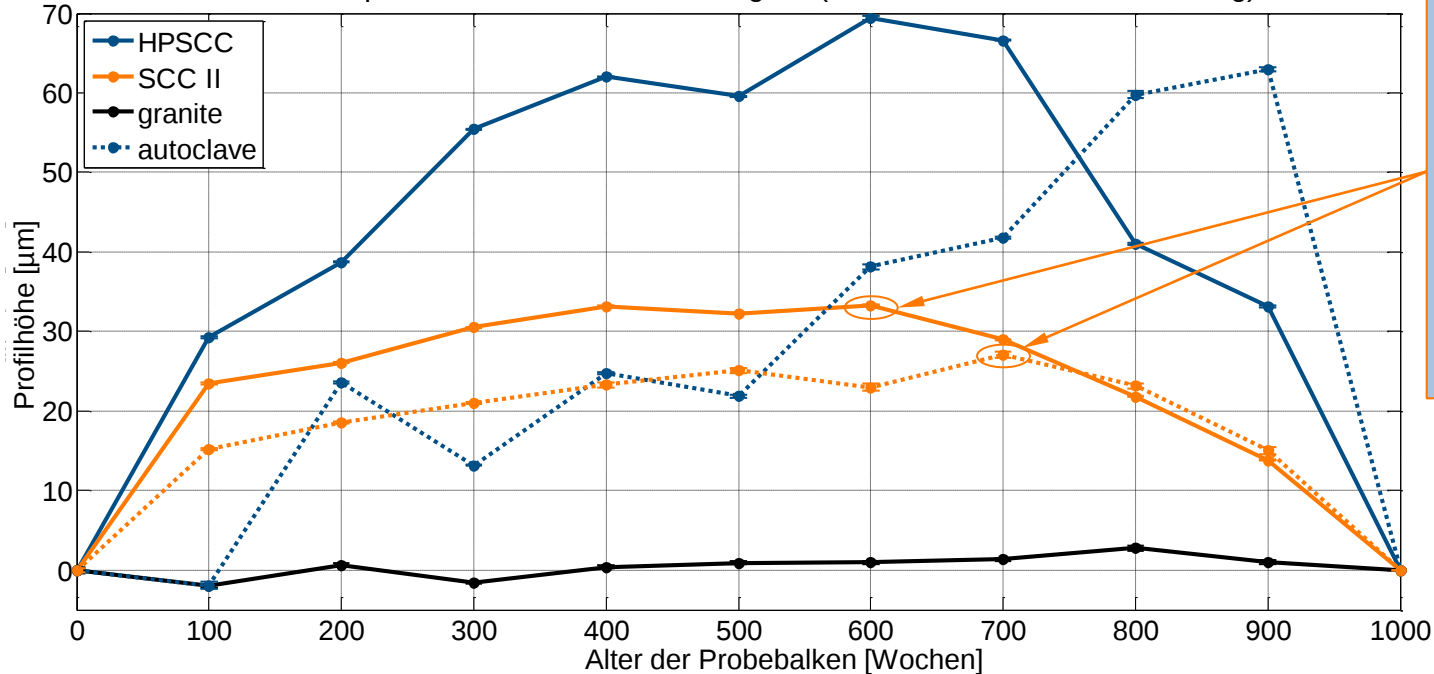
20 μm Trennfolie

3. Qualifizierung balkenförmiger Probekörper mit Präzisionsflächen

• Langzeitmessungen der Geradheitsabweichung (Formabweichung)

■ Geradheitsprofile ausgewählter Probek balken nach dem Gießen

Geradheitsprofil 5 Wochen nach dem Abguss (absolute Geradheitsabweichung)



Geradheitsabweichung (absolut):

SCC-Balken (25..35) µm

→ 5% verglichen mit Standardbeton

→ ABER: **15-fache** Abweichung zum Präzisionsgranitbalken

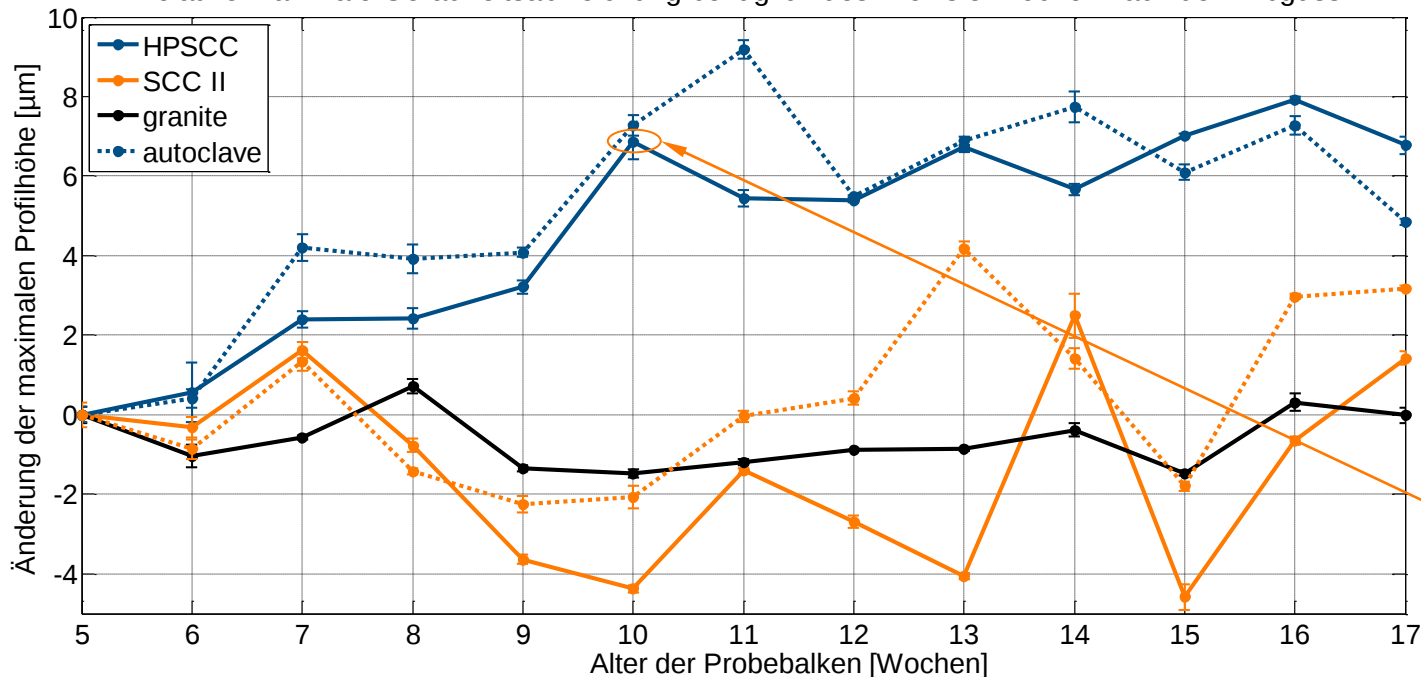
→ Autoklavbehandlung ohne erkennbaren Einfluss

3. Qualifizierung balkenförmiger Probekörper mit Präzisionsflächen

- Langzeitmessungen der Geradheitsabweichung (Formabweichung)

- Zeitlicher Verlauf der Geradheitsabweichung ausgewählter Probekörper über 4 Monate

relative maximale Geradheitsabweichung bezüglich des Profils 5 Wochen nach dem Abguss



(relativ):

→ HPSCC benötigt mehr Stabilisierungszeit

→ Langzeitstabilität ähnlich Granitreferenz

28.09.2018

4. Simulation der Gestaltänderung beim Aushärten von Beton

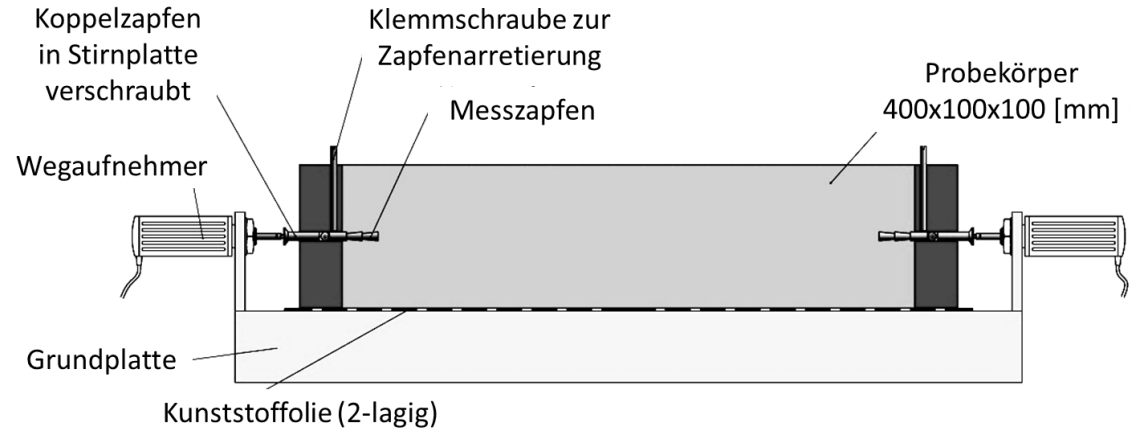
• Anforderungen an das Modell zur Simulation der Gestaltabweichung

■ Eingangsgrößen

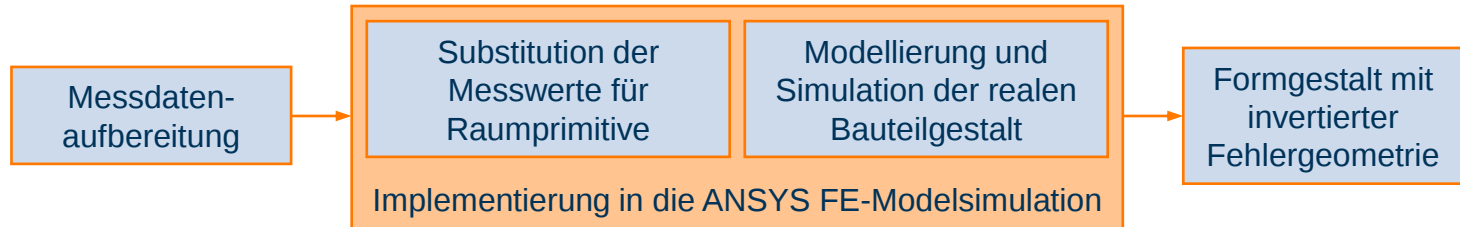
1. Geradheitsabweichung
2. Schwindung entlang der Längsachse

- Messwertaufnahme über 2 Monate
- Qualifizierung für jede neu entwickelte Betonmischung notwendig

■ Messaufbau zur Aufnahme der Schwindung entlang der Längsachse



■ Simulationsschema



4. Simulation der Gestaltänderung beim Aushärten von Beton

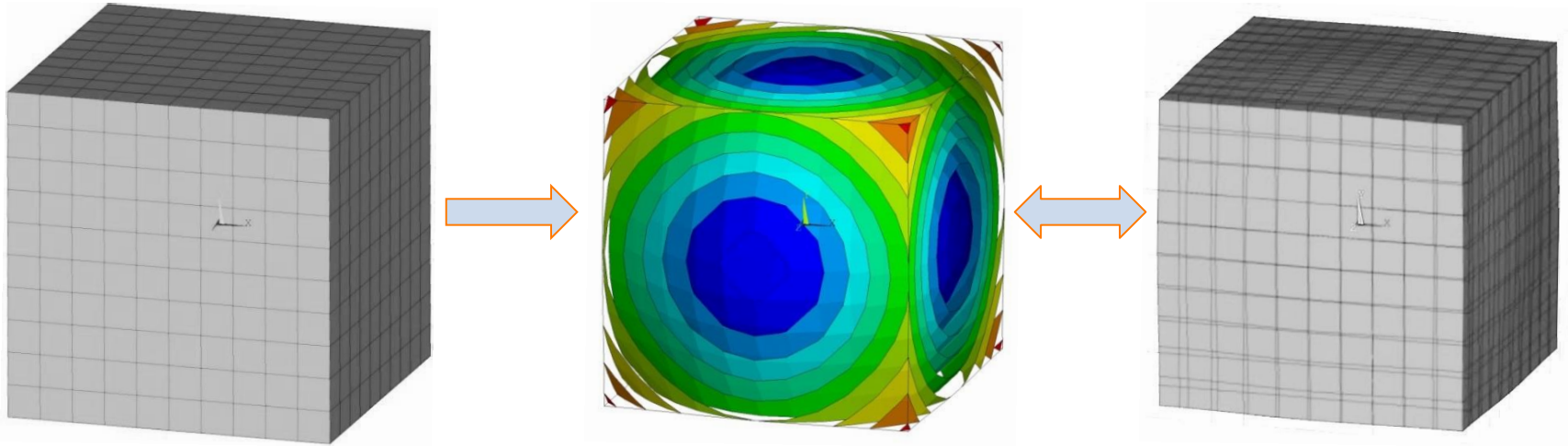
• Anforderungen an das Modell zur Simulation der Gestaltabweichung

■ Modellansatz

- Verwendung vorhandener Werkzeuge in ANSYS
- Simulation über Gradientenfeld (Temperaturfelder)
- substituierte Größen (2 Wegmessungen / 2 Parameter)

■ Anwendung der Temperaturfeldmethode

- Temperatur stellt Gestaltänderungspotential dar T_{BEZUG}
- Definition der Randbedingungen $T=T(x,y,z)=0..1$
- „Thermische Dehnung“ liefert Bauteilgestalt α_{ERSATZ}



4. Simulation der Gestaltänderung beim Aushärten von Beton

• Exemplarische simulierte Oberflächenwölbung

■ Eingangsparameter (Proportionalität)

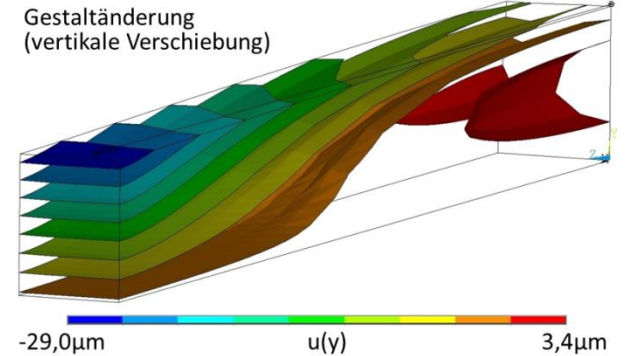
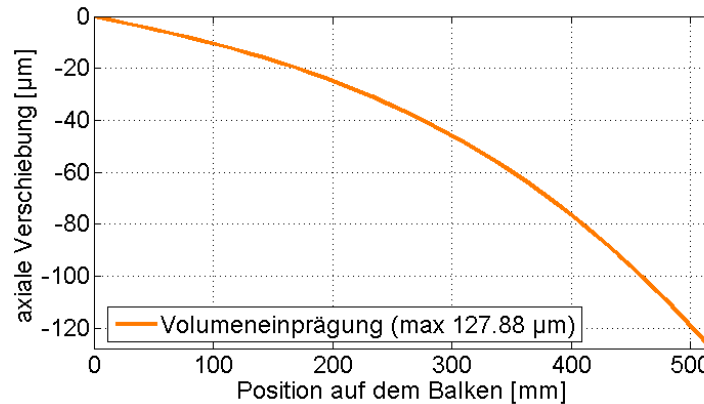
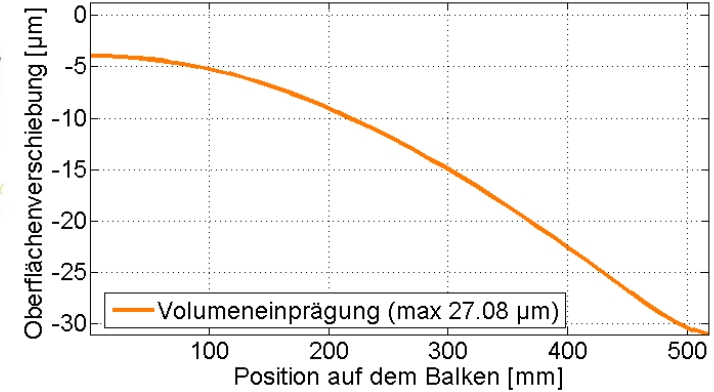
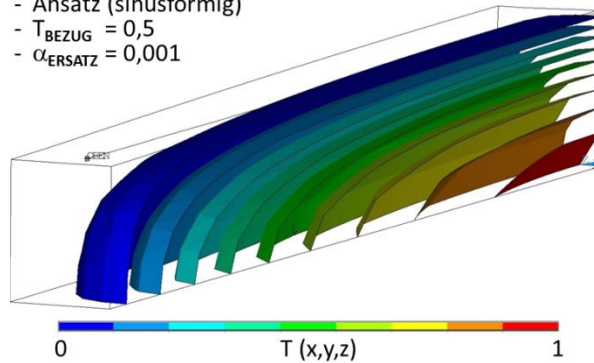
- Schwindung
(240 $\mu\text{m}/\text{m}$)
- Aufwölbung
(30 $\mu\text{m}/\text{m}$)

■ Temperaturfeld- ansatz

- 3D: $T=T(x,y,z)$
- 2D: $T=T(x,z)$
- 1D: $T=T(x)$

Eingeprägtes Potenzialfeld

- Ansatz (sinusförmig)
- $T_{\text{BEZUG}} = 0,5$
- $\alpha_{\text{ERSATZ}} = 0,001$

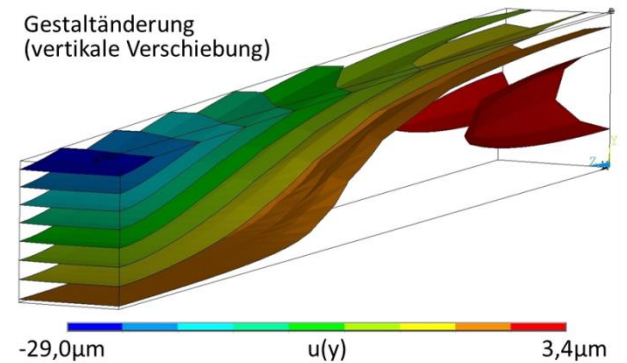
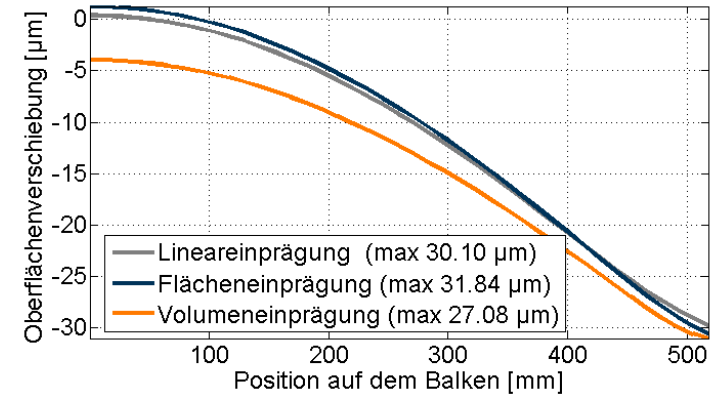


28.09.2018

4. Simulation der Gestaltänderung beim Aushärten von Beton

● Zusammenfassung

- Simulation der Schwindverformung mittels Temperaturfeldmethode
- Anpassung von T_{BEZUG} und α_{ERSATZ} für verschiedene Mischungen
- Anpassung von T_{BEZUG} und α_{ERSATZ} für verschiedene Mindestwandstärken anpassen
- 1D: $T=T(x)$ in der Schwerachse von Profilen
- Prüfung des Verfahrens für Betonleichtbauteile
- Präzisionsbetonleichtbauteile für dynamische Beanspruchung

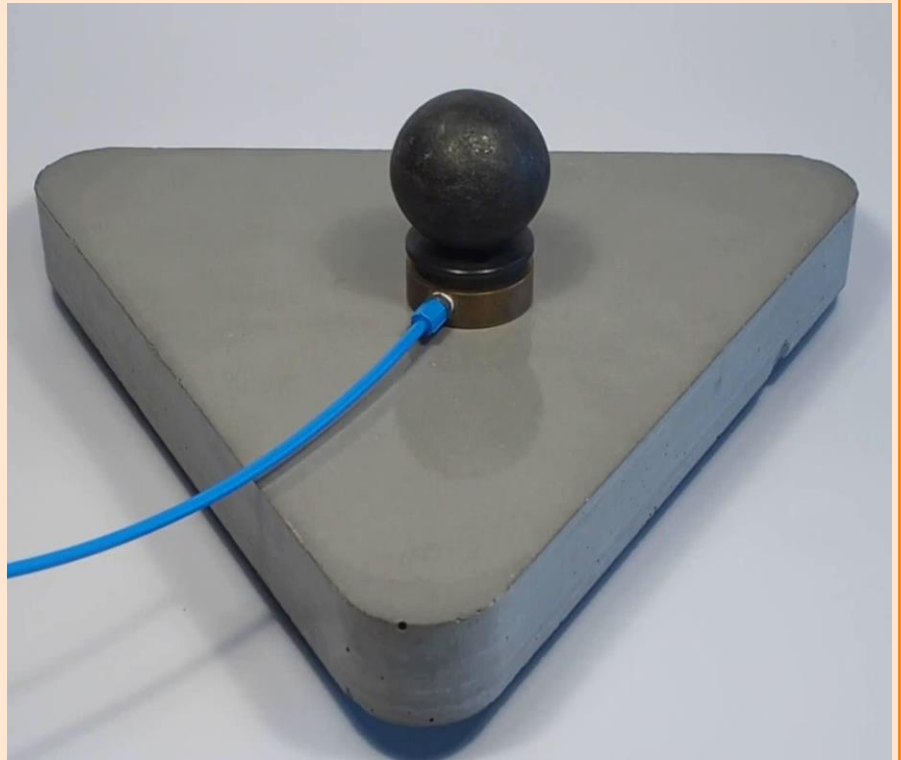


28.09.2018

Zwischenstand

• Erfolgsfaktoren für Präzisionssysteme auf Basis von hydraulisch gebundenem Beton

- ✓ Möglichkeit zum Ersatz von Naturstein
- ✓ Lieferzeitverkürzung / Kostensenkung
- ✓ urgeformte Präzisionsflächen
- ✓ kontrollierbare Gestaltabweichungen
- ✓ Langzeitstabilität ähnlich Naturstein
- ✓ multifunktionale Komplexbauteile

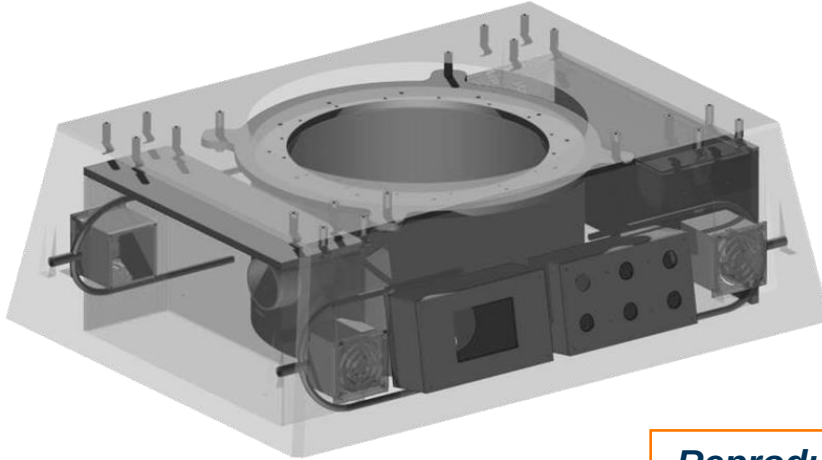


28.09.2018

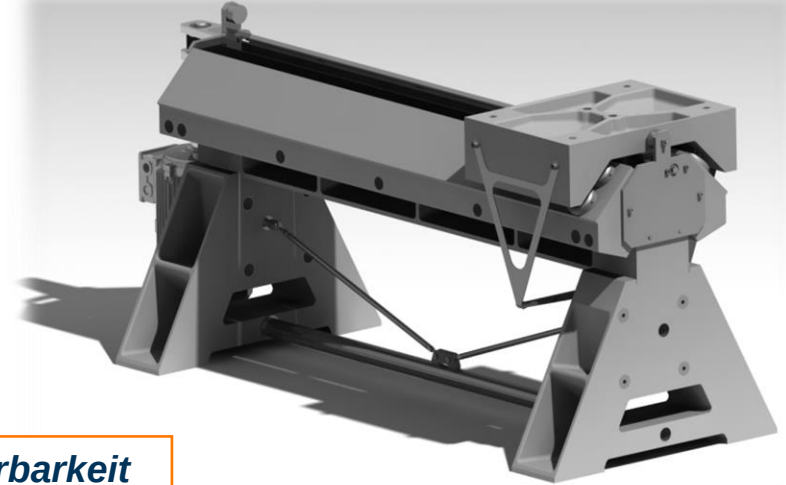
5. Betonleichtbauteile für dynamische Anwendungen

• Präzisionssysteme auf Basis von hydraulisch gebundenem Beton

Gestellkomponenten



bewegte Bauteile



hohe Masse
günstig

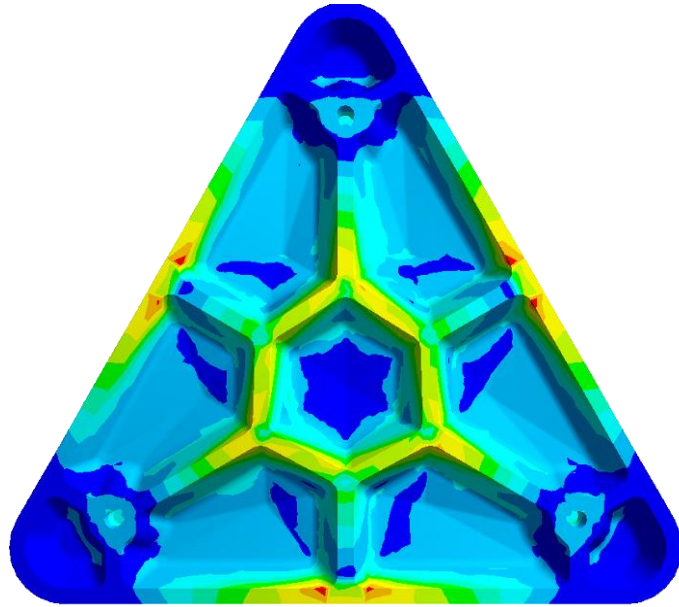
Reproduzierbarkeit

- Langzeitstabilität
- Wärmedehnung
- **Steifigkeit!!!**
- innere Dämpfung

geringe Masse
benötigt

5. Betonleichtbauteile für dynamische Anwendungen

• Leichtbaustrukturen aus hydraulisch gebundenem Beton



Zugfestigkeit / Druckfestigkeit
1 / 10

Gestaltung

beanspruchungs-
gerecht

Vorspannung

Druckvorspannung
(Spannbeton)

Armierung

Kohle-/Glasfaser oder
Bewehrungsstahl

Steifigkeit

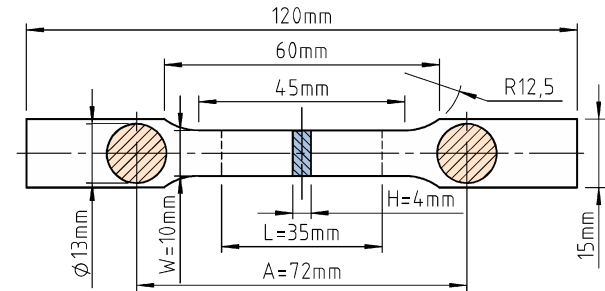
Bauteiloberflächen
(versiegeln, ebnen)

– keine analytische Beschreibung möglich

– hohe Anzahl von Versuchsreihen nötig
zur Beschichtungsqualifizierung

– Betriebsfestigkeitsversuche sehr
kostenintensiv für reale Bauteile

→ **Reduktion auf mathematisch
beherrschbare Raumprimitive**
DIN 50125 E 4 x 10 x 35



28.09.2018

5. Betonleichtbauteile für dynamische Anwendungen

- Herstellung von Proben zur Verifizierung der Beschichtungseigenschaften



28.09.2018

6. Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtungen

• Wirkmechanismen bei der Betriebsfestigkeitssteigerung durch Bauteilbeschichtung

■ Herangehensweise

- Betriebsfestigkeitssteigerung
Erhöhung der Zugfestigkeit
- Entwicklung von geeigneten
Sol-Gel-Beschichtungen
- Bestimmung des
Beschichtungseinflusses
- praktikable Methode zur
Lebensdauervorhersage
- **versuchstechnische**
Absicherung

■ Wirkmechanismen zur Betriebsfestigkeitssteigerung

Fehlstellenausgleich

- Ausfüllen von Rissen und Luftporen
- Einebnung der Bauteiloberfläche
- Verhinderung oder Verzögerung der Rissfortpflanzung
- Abflachung der Wöhlerkurve

Steifigkeits- erhöhung

- Einhüllung mit Werkstoff höherer Zugfestigkeit
- Infiltration der Randzonen des Basiskörpers
- Versteifung des Bauteils
- Erhöhung der statischen Festigkeit
- Parallelversatz der Wöhlerlinie

Eigenspannungs- einprägung

- Gezielte Schwindung des Beschichtungswerkstoffes
- Druckeigenspannungen in Oberflächennähe
- Verschiebung des Spannungsniveaus
- Parallelversatz und Abfkachung der Wöhlerlinie

$$\frac{N_{schicht}}{N_{roh}} = \left(\frac{\sigma_{schicht}}{\sigma_{roh}} \right)^{-k} = \left(\frac{C_{roh}}{C_{schicht}} \right)^{-k}$$

N = Schwingspiele; σ = Spannung; C = Steifigkeit

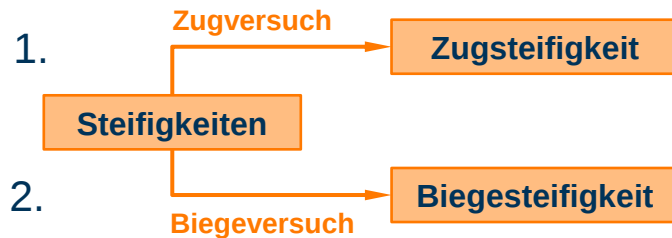
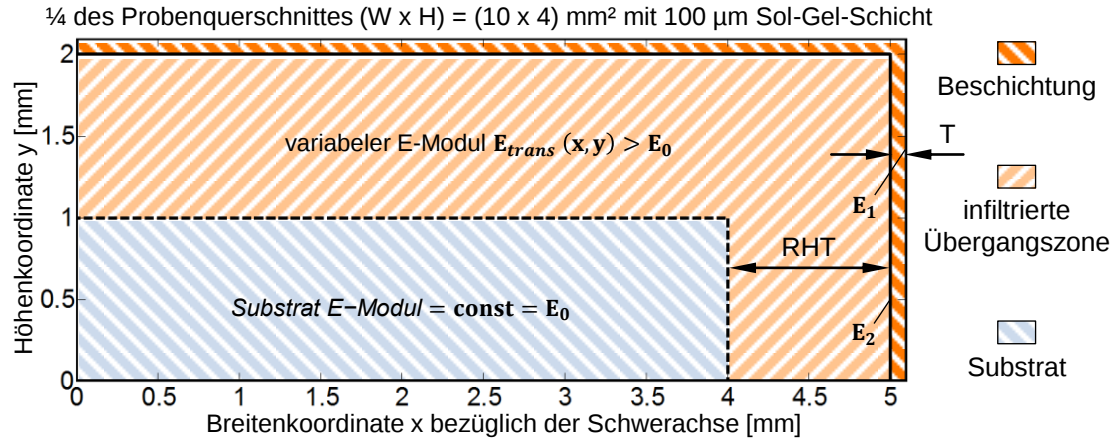
- ➔ Diskretisierung des Fehlstellenausgleichs sehr komplex
- ➔ Bestimmung der Eigenspannungseigenschaft problematisch
- ➔ **Steifigkeitserhöhung am einfachsten quantifizierbar**

6. Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtungen

• Steifigkeitserhöhung durch Oberflächenbeschichtung

■ Vorgehensweise

1. mathematische Beschreibung
2. experimentelle Untersuchungen
3. Beschichtungseigenschaften
4. substituierte FE-Modellparameter
5. Simulation von Komplexgeometrie



$$C_{Zug} = \frac{1}{L} \int E(x,y) dA$$

$$C_{Biegung} \sim \frac{1}{L^3} \int y^2 E(x,y) dA$$

Die E-Modulverteilung $E(x,y)^*$ im Probenquerschnitt ist experimentell zu bestimmen

*) Annahmen: - stetig differenzierbar
- harmonisch approximiert

6. Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtungen

● Bestimmung der charakteristischen E-Modulgrenzwerte

■ Berechnung von E_1 und E_2 :

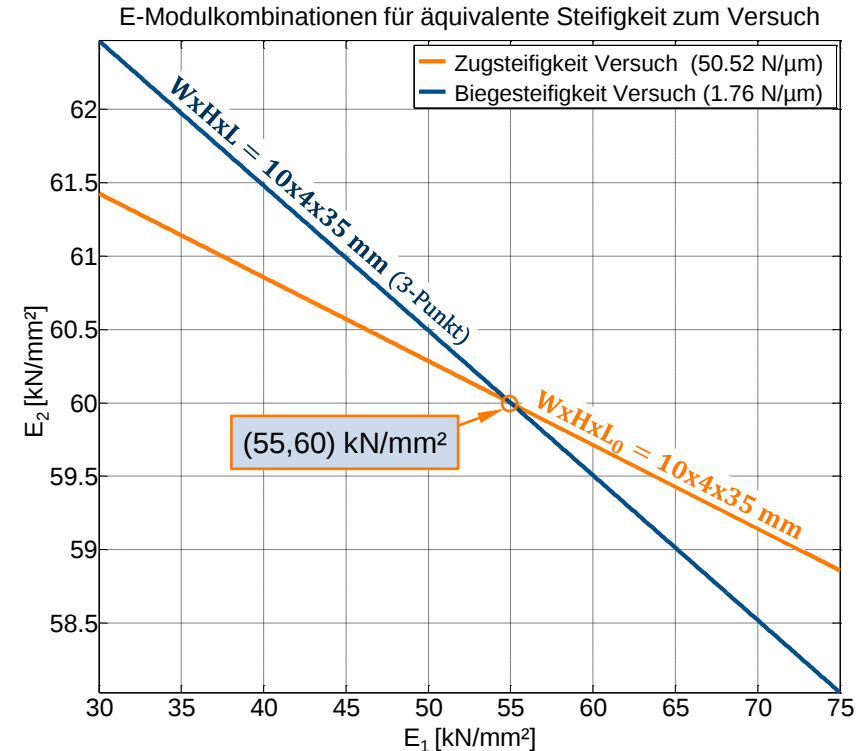
- Variation der E-Module in definierten Bereichen
 - MIN = E-Modul des Substrates
 - MAX = maximaler E-Modul des Beschichtungsbasiswerkstoffes
- alle Kombinationen einer Linie repräsentieren E_1 - E_2 -Paare mit äquivalenter Prüfkörpersteifigkeit

E_1 = E-Modul an der Beschichtungsoberfläche

E_2 = E-Modul am äußeren Rand des Basisteils

● $0 = C_{Zug\ analytisch}(E_1, E_2) - C_{Zug\ Versuch}$

● $0 = C_{Biegung\ analytisch}(E_1, E_2) - C_{Biegung\ Versuch}$



28.09.2018

6. Betriebsfestigkeitssteigerung durch Beschichtungen

• Schalenparameter zur vereinfachten FEM Simulation der Steifigkeitssteigerung

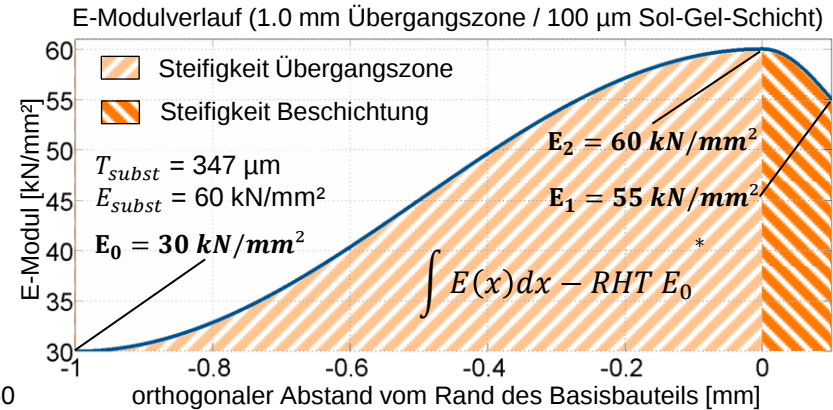
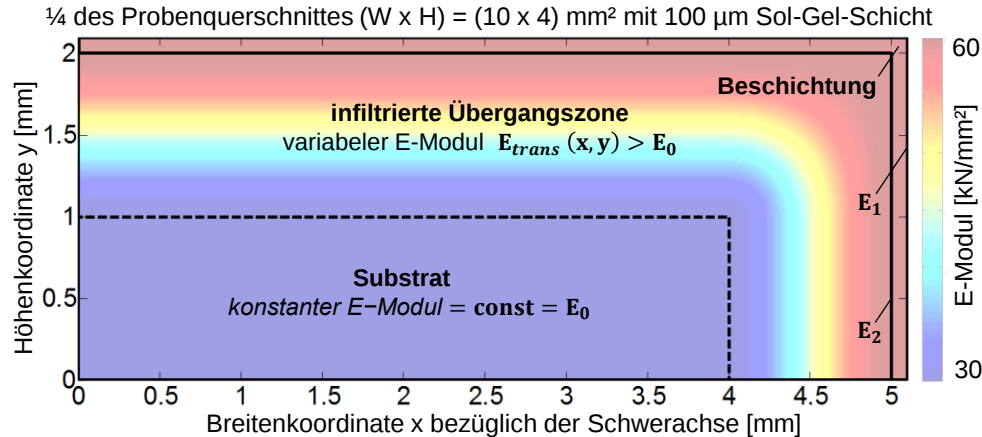
■ theoretischer E-Modulverlauf in der Randzone

- E-Modulverlauf in der Übergangszone

$$E_{trans} = E_0 + \frac{E_2 - E_0}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi x}{RHT} \right) \right]$$

- E-Modulverlauf im reinen Beschichtungsmaterial

$$E_{schicht} = E_1 + \frac{E_2 - E_1}{2} \cos \left(\frac{\pi x}{2T} \right)$$



■ substituierte FE-Modellparameter

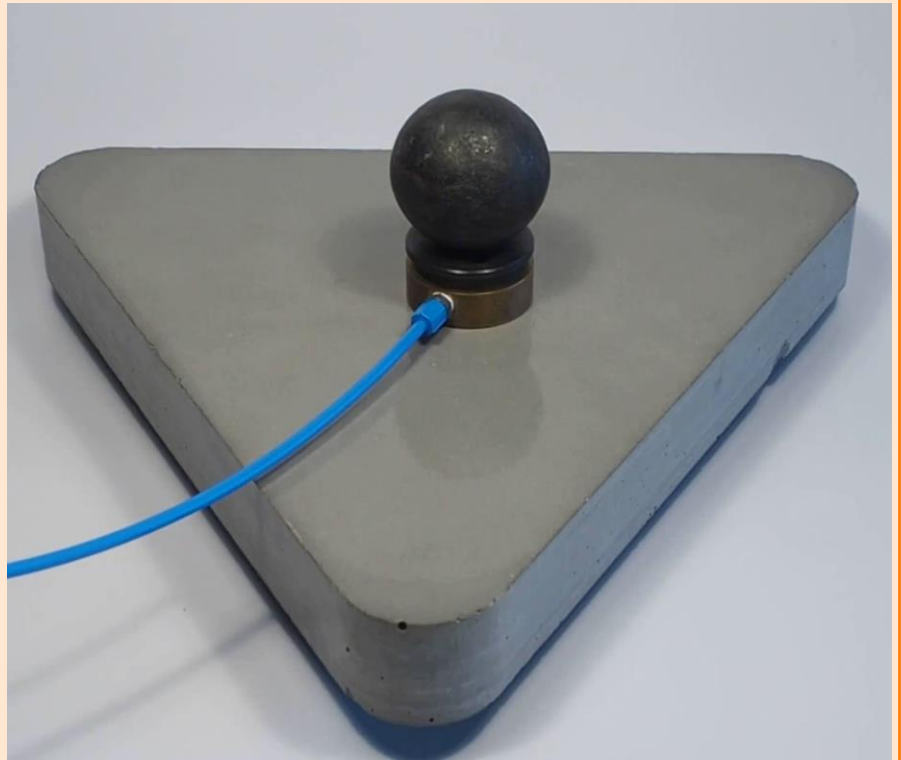
- E-Modul der Ersatzschalenelemente $E_{subst} = E_2$
- virtuelle Schalenwandstärke T_{subst}

$$T_{subst} = \frac{\left(\frac{RHT}{2} + \frac{2T}{\pi} \right) E_2 + T \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) E_1 - \frac{RHT}{2} E_0}{E_2}$$

7. Zusammenfassung und Ausblick

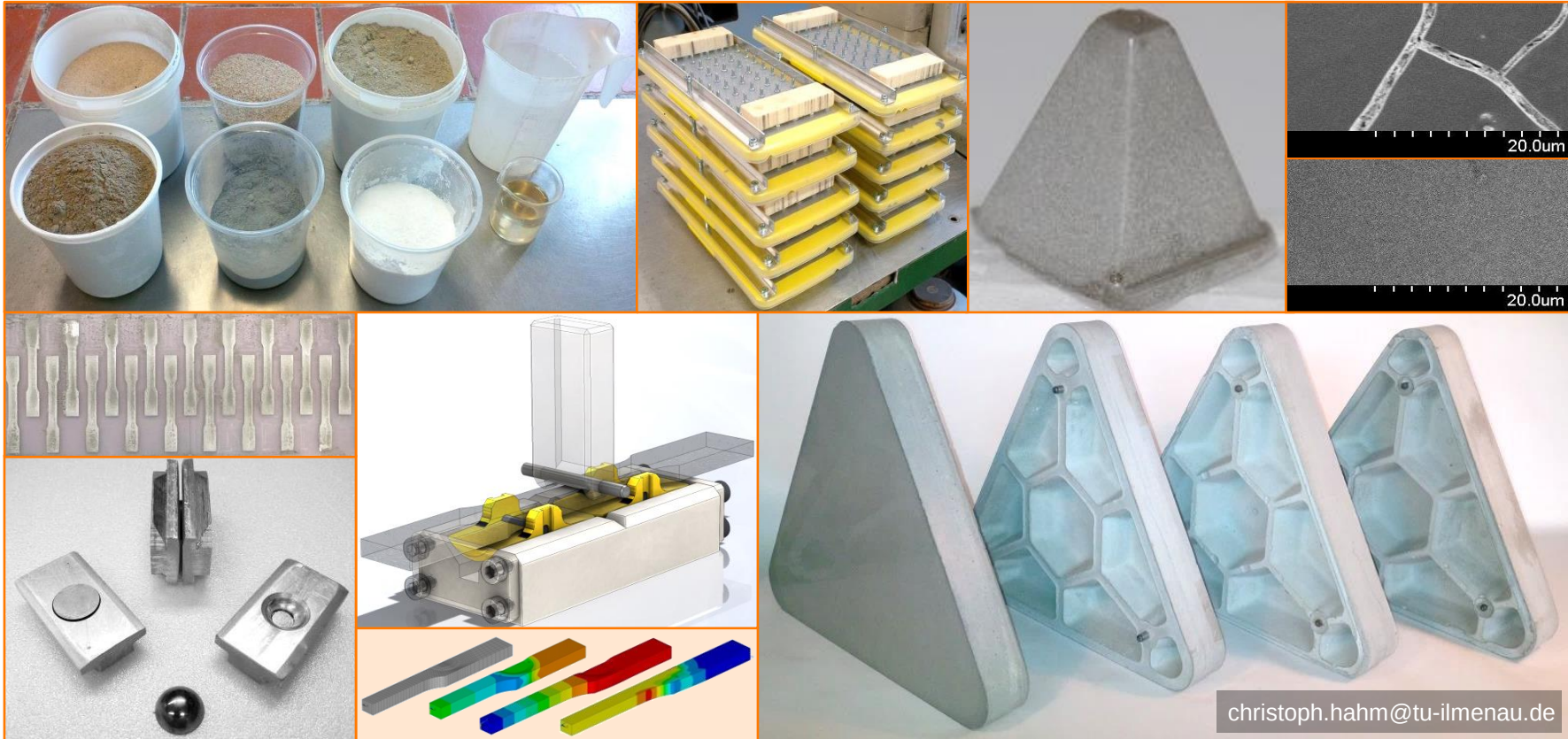
• Erfolgsfaktoren für Präzisionssysteme auf Basis von hydraulisch gebundenem Beton

- ✓ Möglichkeit zum Ersatz von Naturstein
- ✓ Lieferzeitverkürzung / Kostensenkung
- ✓ urgeformte Präzisionsflächen
- ✓ kontrollierbare Gestaltabweichungen
- ✓ Langzeitstabilität ähnlich Naturstein
- ✓ multifunktionale Komplexbauteile
- ✓ bewegte Bauteile in Leichtbauweise
- ✓ spezielle Funktionsbeschichtungen
- ✓ Qualifizierung der Beschichtungswirkung
- ✓ quantifizierte Betriebsfestigkeitssteigerung



28.09.2018

7. Zusammenfassung und Ausblick



28.09.2018