

Auslegung von Composite Bauteilen am Beispiel von GFK-Sandwich-Konstruktionen im Brückenbau

Dr.-Ing. Jan Rothe

3. Fachkongress Composite Simulation

20.03.2014 Fellbach

Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

Firmenportrait

Suisse Technology Partners

- Standort: Neuhausen, Schweiz
- Langjährige Erfahrung als F&E Standort internationaler Aluminium-Firmen
- 42 Mitarbeiter mit überwiegend grosser Erfahrung
- Kompetenzbereiche
 - Werkstofftechnologie
 - Labordienstleistungen
 - Engineering
 - Intellectual Property (IP)
 - Innovations-Management



— 1888 ————— 2000 ————— 2009 ————— 2011 —→

Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

Sandwichbauweise



COLEVO | SUSTAINABLE
LIGHTWEIGHT
CONSTRUCTIONS

3A
COMPOSITES

- Vorgefertigte Elemente mit hoher Qualität
- Kurze Installationszeit
- Dauerhaftigkeit und geringer Unterhalt
- Rutschfester Gehwegbelag oder Asphalt
- Applikationen:
 - Fussgänger- und Strassenbrücken
 - Brückendeck-Ersatz oder -Erweiterung
 - Brücken zwischen & innerhalb von Gebäuden
 - mobile Brücken
 - ...



Erfolgreiche Symbiose der Kompetenzen



Grundsätzliche Machbarkeit und Klärung der wirtschaftlichen Attraktivität im Verbund mit weiteren Partnern (EPFL...)

Hersteller

- Businessverantwortung
- Gesamtprojektverantwortung
- Marktkompetenz
- Prozessentwicklung für die Herstellung des Sandwichbauteils
- Entwicklung und Herstellung von industriell verklebtem FSC Balsa Furnier



BANOVA
GROWN LIGHT • MADE STRONG

Entwicklungspartner

- prozessgerechte Konzeptstudie und Vorauslegung
- Erstellung von Berechnungsmethoden (mit und ohne Schädigung)
- Materialcharakterisierung und Tests (quasi-statisch, Ermüdung, Bewitterung, etc.)
- Ausarbeitung von Detaillösungen
- Auftragsbezogene Erstellung von Brückenstatiken

Beispiel: Strassenbrücke über Avançon bei Bex, VD

- Baujahr 2011
- Breite 7.5 m
- Länge 11.0 m
- „285-22“ (145 kg/m²) strukturell verklebt auf 2 Stahl-Längsträger
- Achsschemel 60 to!



Bilder: 3A Composites

Beispiel: Thal Mesmeren

- Baujahr 2012
- Breite 2.0 m
- Spannweite 5.0 m
- „160-6.7“ (65 kg/m²)
- komplette Vormontage inklusive Geländer



Beispiel: Boncourt Passerelle des Clavières



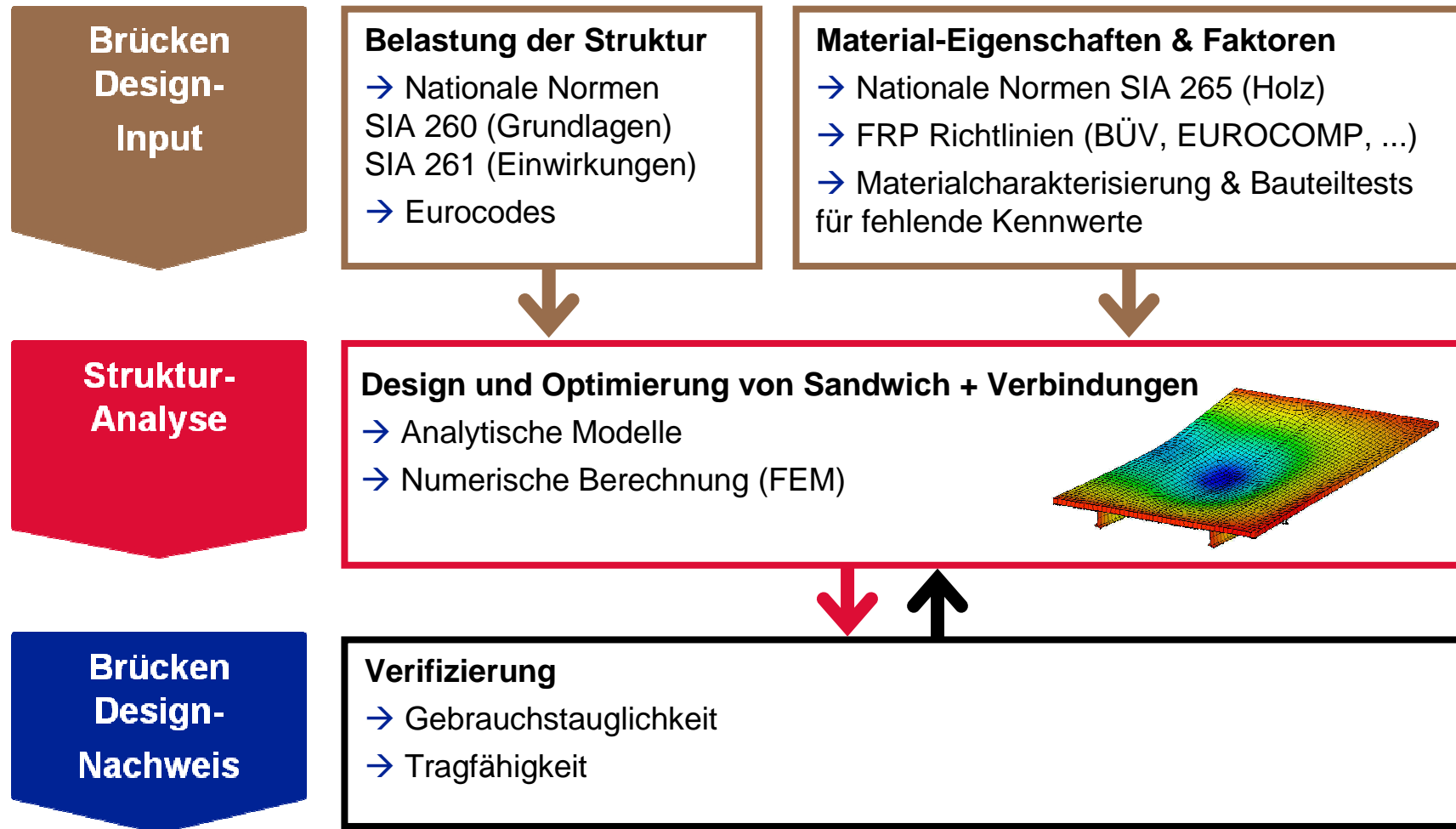
- Baujahr 2013
- Breite 2.2 m
- Länge ≈ 30 m ($2 \times 9.65 + 5.8 + 3.9$)
- Spannweite 1.9 m als Durchlaufträger
- „77-3.6“ (32 kg/m^2) verklebt
- Vorteil: fussgängerinduzierte Biegeschwingung unkritisch dank Leichtbau



Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

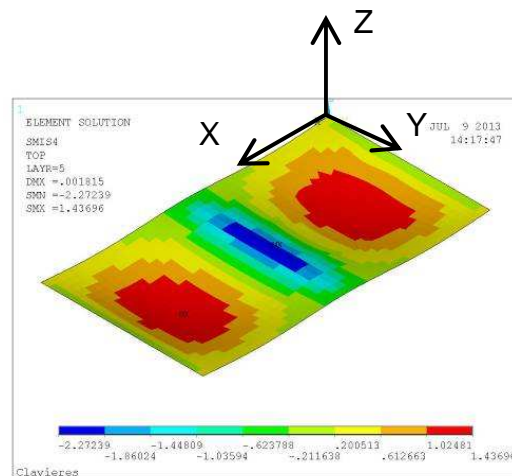
Bemessungskonzept



2 unterschiedliche Ansätze

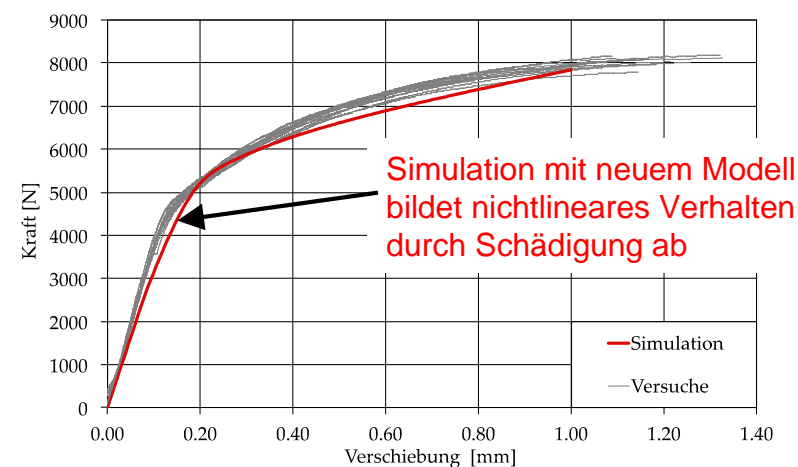
Brückenstatik ohne Schädigung

- Berechnung der Verformungen & Schnittkräfte analytisch oder mit FEA
- Bestimmung der Traglasten des Verbundquerschnittes analytisch
- Nachweis der Tragfähigkeit durch Vergleich Schnittkräfte mit Traglasten
- Detailnachweise, z.B. Anbindung von Geländerpfosten



Nichtlin. FE-Modell mit Schädigung

- Abbildung nichtlineares Verhalten z.B. Tragvermögen im Grenzfall (Missbrauchslasten)
- Entwicklung & Implementierung eines geeigneten Schädigungsmodells in Anlehnung an Govindjee et al. u. Puck
- Berechnung der Verformungen & Spannungen in allen Laminatschichten inklusive Schädigung



Teilsicherheitskonzept für GFK nach BÜV- „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“

- Modifikationsfaktoren
 - A_1 : Einwirkungsdauer 20a (Kriechen)
→ $A_1(t_a)$: mit t_a basierend auf der Klasse der Lasteinwirkungsdauer
 - A_2 : Medieneinfluss (Bewitterung, UV-Belastung, etc.)
 - A_3 : Temperatur

$$A_{\text{mod}}^f = A_1^f(t_a) A_2^f A_3^f$$

$$A_{\text{mod}}^E = A_1^E(t_a) A_2^E A_3^E$$

$$A_{\text{mod}}^D = A_1^D(t_a) A_2^D A_3^D$$

- Teilsicherheitsfaktoren γ_M (z.B. für den Grenzzustand der Tragfähigkeit)
- Bemessungswert des Widerstandes

$$R_d(t_a) = \frac{R_k}{\gamma_M \cdot A_{\text{mod}}}$$

Teilsicherheitskonzept für Holzkern nach SIA 265

- Modifikationsfaktoren
 - η_M : Bauteilgrösse, Temperatur, Einwirkungsdauer
 - η_t : stossartige Einwirkungen
 - η_w : Holzfeuchte
- Teilsicherheitsfaktoren γ_M (z.B. für den Grenzzustand der Tragfähigkeit)

$$R_d = \frac{\eta_M \cdot \eta_t \cdot \eta_w}{\gamma_M} R_k$$

- Kriechen (Feuchtekategorie 1)
 - Abminderung der Steifigkeiten: G/A_{mod} , E/A_{mod}

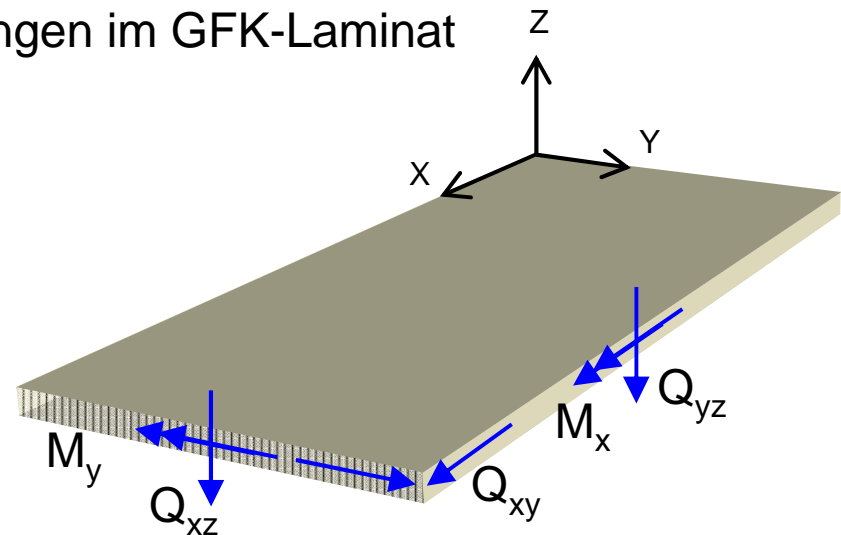
$$w_\infty = (1 + \varphi) w_0 = 1.6 w_0 = A_{\text{mod}} w_o$$

Tragfähigkeit – Spannungen

- Nachweis lagenweise in einer numerischen Analyse
→ Anschaulichkeit/Prüfbarkeit bei vielen Lastfallkombinationen ungenügend

alternativ

- Nachweis durch Vergleich der Schnittkräfte mit den Traglasten der Sandwichplatte
- Funktionstrennung im Sandwich
→ Biegemomente M_x , M_y : Normalspannungen im GFK-Laminat
→ Querkräfte Q_{xz} , Q_{yz} : Schub im Kern
→ M_{xy} , Q_{xy} : Schub im GFK-Laminat klein

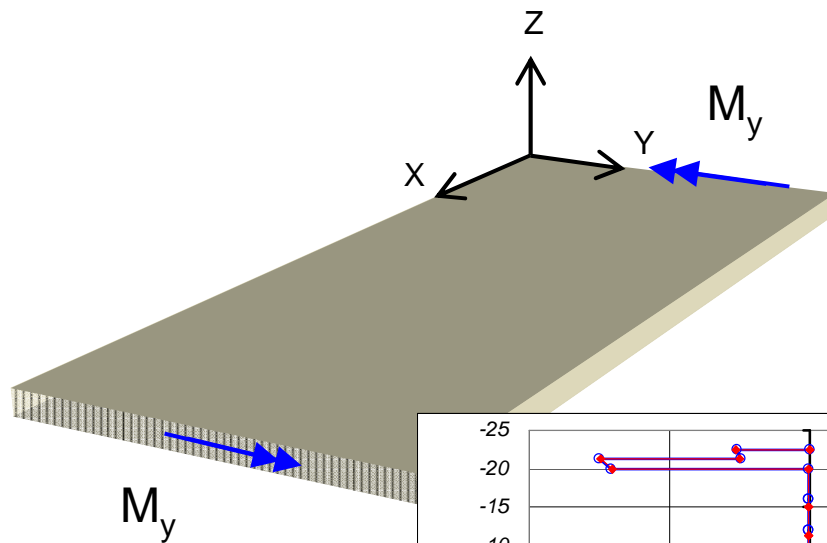


Tragfähigkeit – Spannungen

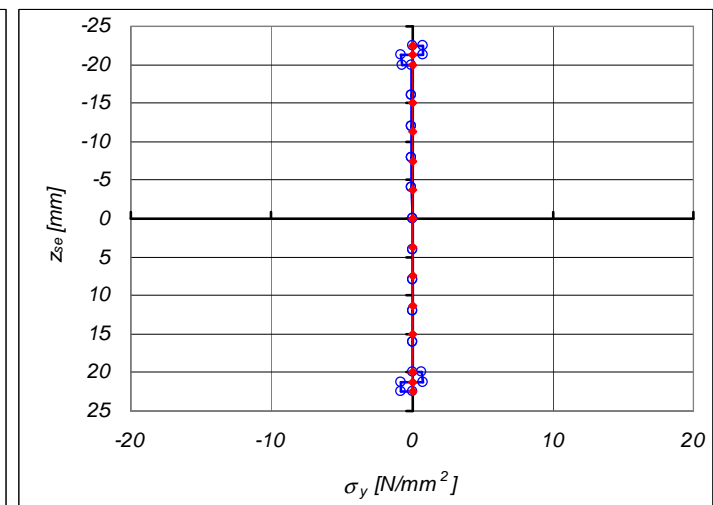
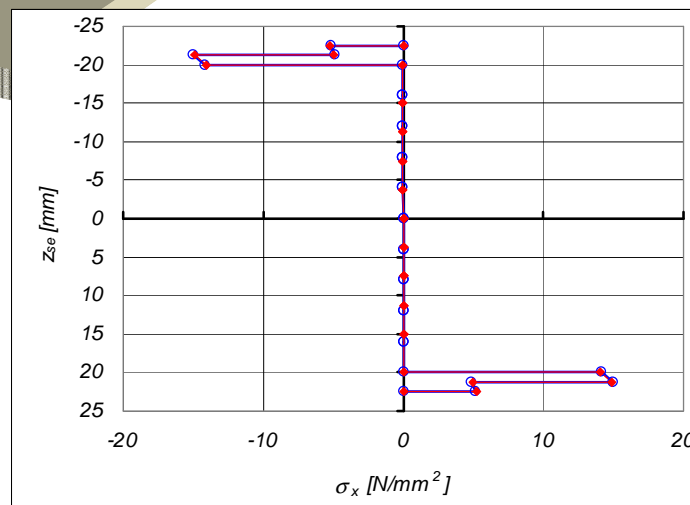
- Annahme: im GFK-Laminat führen Spannungen in x zu kleinen Spannungen in y und umgekehrt
 - Spannungsnachweis getrennt für beide Tragrichtungen
 - Querschnittswerte im elastischen Zentrum für inhomogene Querschnitte (E-Modul gewichtet)
 - ideale Gesamtfläche $A_{x,ideell}$, $A_{y,ideell}$
 - ideale Flächenmomente 2. Grades $I_{x,ideell}$, $I_{y,ideell}$
- linear-elastisches Materialverhalten
 - keine Schädigung, d.h. keine Zwischenfaserbrüche zugelassen
 - hohe Anforderungen an Dichtigkeit

Tragfähigkeit – Spannungen

- Vergleich der Spannungen nach CLT (Blau) und Stabtheorie (Rot)
 - Sandwichaufbau mit GFK-Deckschichten (50% Fasern in x und 50% in y)

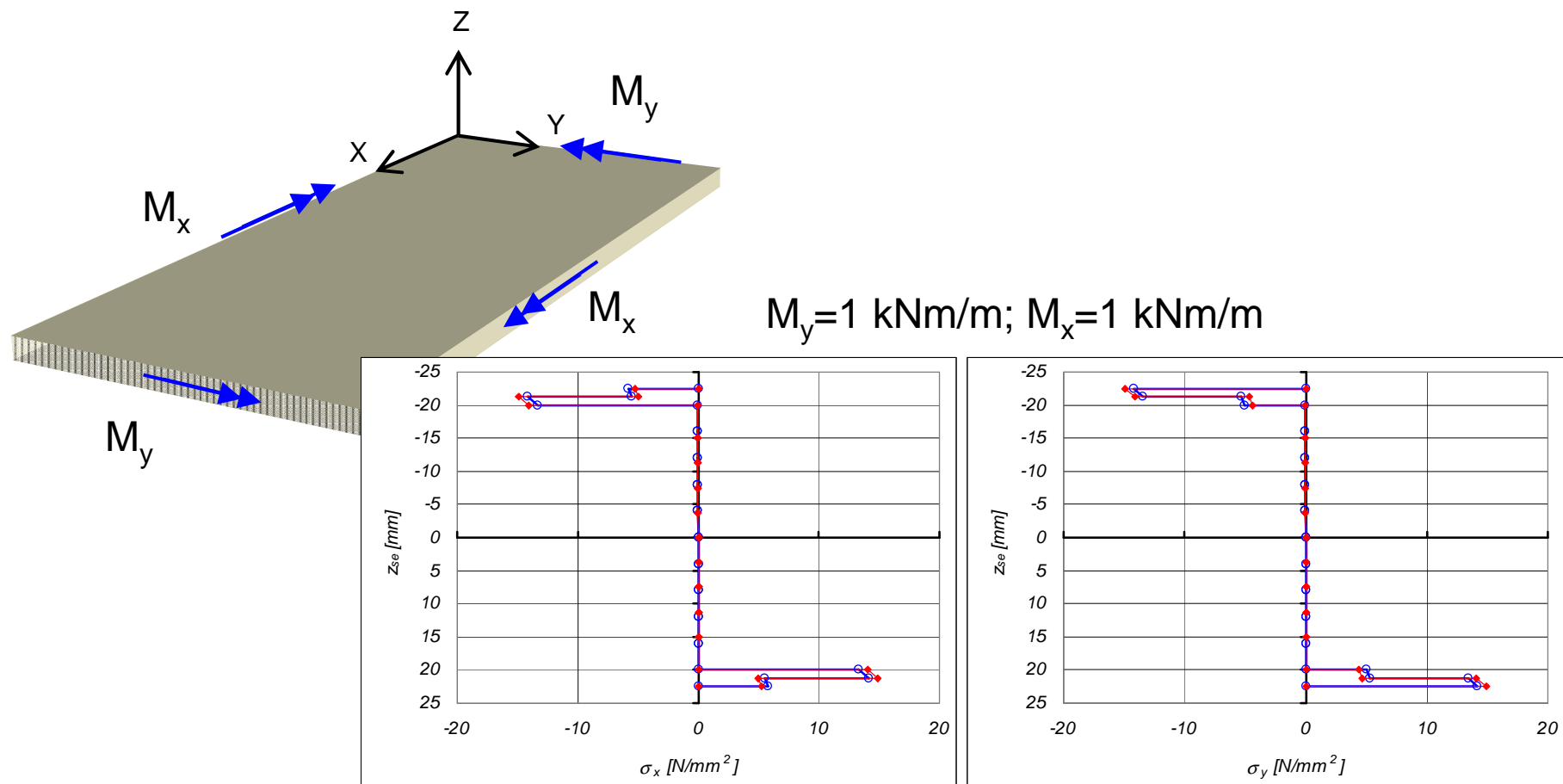


$M_y = 1 \text{ kNm/m}$; $M_x = 0 \text{ kNm/m}$



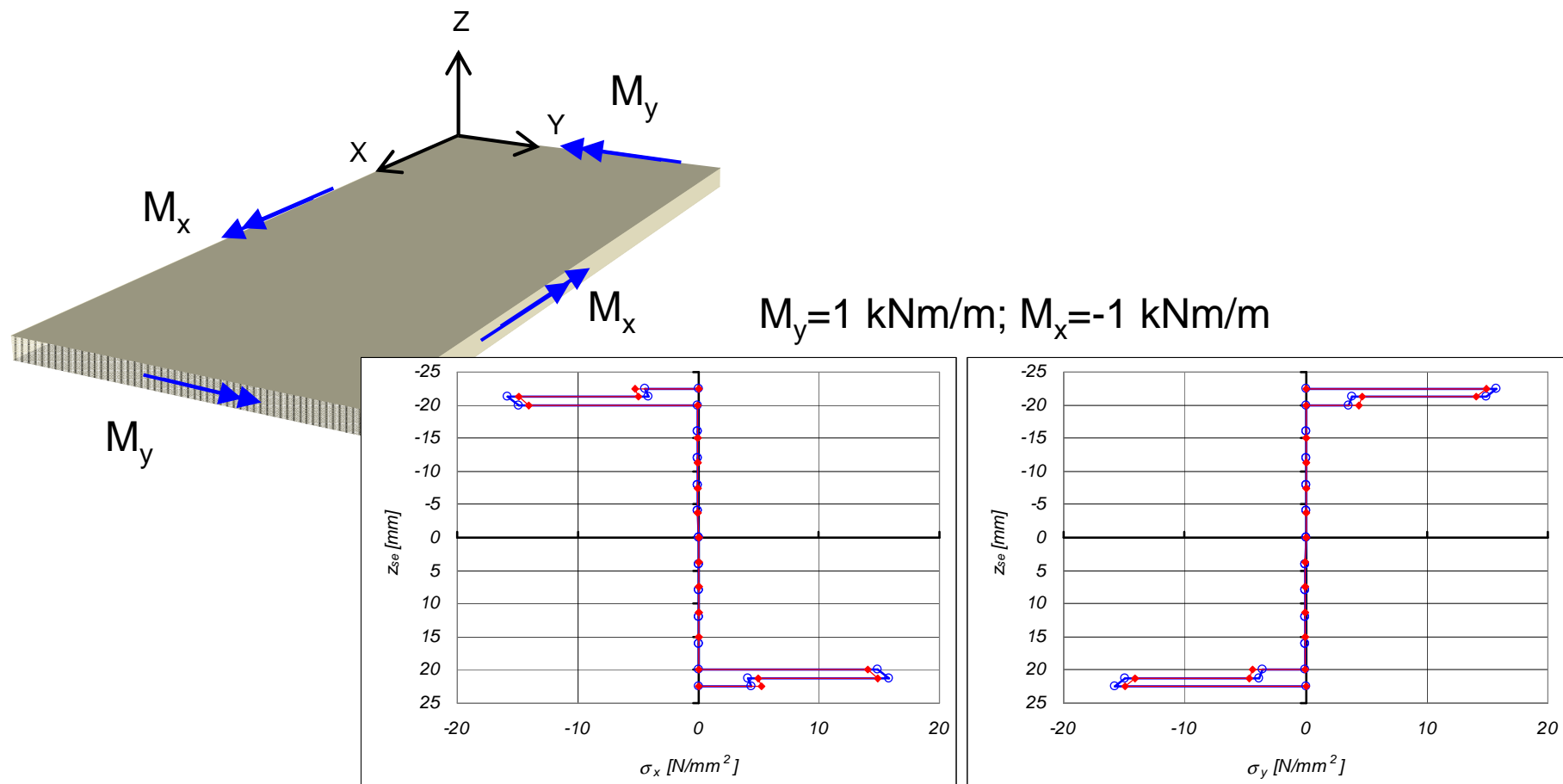
Tragfähigkeit – Spannungen

- Vergleich der Spannungen nach CLT (Blau) und Stabtheorie (Rot)
 - Sandwichaufbau mit GFK-Deckschichten (50% Fasern in x und 50% in y)



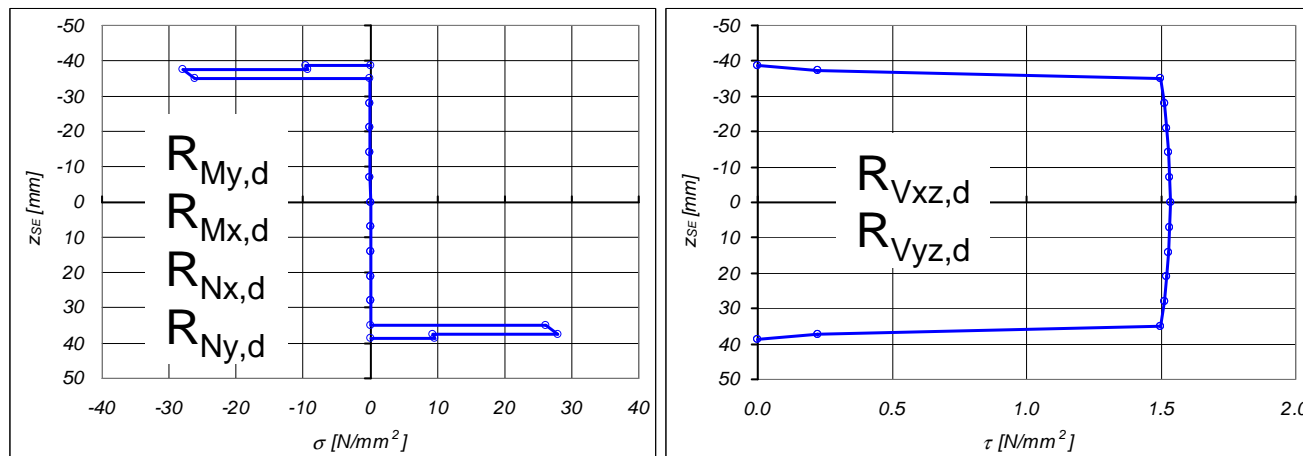
Tragfähigkeit – Spannungen

- Vergleich der Spannungen nach CLT (Blau) und Stabtheorie (Rot)
 - Sandwichaufbau mit GFK-Deckschichten (50% Fasern in x und 50% in y)



Tragfähigkeit – Spannungsnachweis

- Bestimmung der Traglasten (Beanspruchbarkeiten)



- vereinfachter BÜV-Nachweis (Vergl. Beanspruchung mit Beanspruchbarkeit)

$$\frac{E_{N,d}}{R_{N,d}} + \frac{E_{M,d}}{R_{M,d}} + \frac{E_{V,d}}{R_{V,d}} \leq 1$$

→ Funktionstrennung im Sandwich

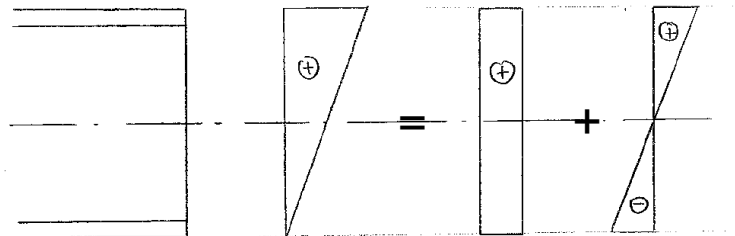
$$\frac{|E_{Vxz,d}|}{R_{Vxz,d}} + \frac{|E_{Vyz,d}|}{R_{Vyz,d}} \leq 1$$

$$\max \left\{ \frac{E_{Nx,d}}{R_{Nx,d}} \pm \frac{|E_{My,d}|}{R_{My,d}} \right\} \leq 1$$

$$\max \left\{ \frac{E_{Ny,d}}{R_{Ny,d}} \pm \frac{|E_{Mx,d}|}{R_{Mx,d}} \right\} \leq 1$$

Tragfähigkeit – Spannungen aus Temperatur

- Besonderheit für Sandwich: hoher Spannungsgradient $\Delta T = 40 \text{ K}$!

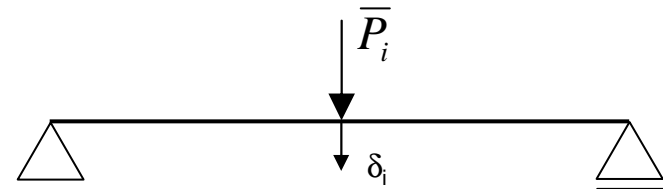


- unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten
 - innere Spannungen aber keine Schnittkräfte an statisch bestimmten Systemen
 - Spannungen infolge Zwängungen an statisch unbestimmten Systemen
- Spannungsnachweis über Schnittkräften nicht möglich, da $\alpha_{T,\parallel} \neq \alpha_{T,\perp}$
- Nachweiskonzept
 - Option 1: Teilsicherheitsfaktor global erhöhen (konservativ)
 - Option 2: FE-Analyse und Spannungsnachweis für kritische LFK

Gebrauchstauglichkeit – Verformungen

- i.A. numerische Berechnung der Verformungen erforderlich
- alternativ

δ_i an nach dem Prinzip der virtuellen Kräfte



$$\sum_i \bar{P}_i (EI_c \delta_i) = \underbrace{\int_x \bar{M}_y M_y dx}_{\text{Biegung}} + \underbrace{\frac{EI_c}{GA_c} \int_x \kappa_z \bar{Q}_z Q_z dx}_{\text{Querkraft}} + \underbrace{EI_c \bar{N} \alpha_t \cdot \Delta T_x \cdot dx}_{\text{gleichförmige Temperaturänderung}} + \underbrace{EI_c \int_x \bar{M}_y \frac{\alpha_t \Delta T_z}{h_z} dx}_{\text{ungleichförmige Temperaturänderung}}$$

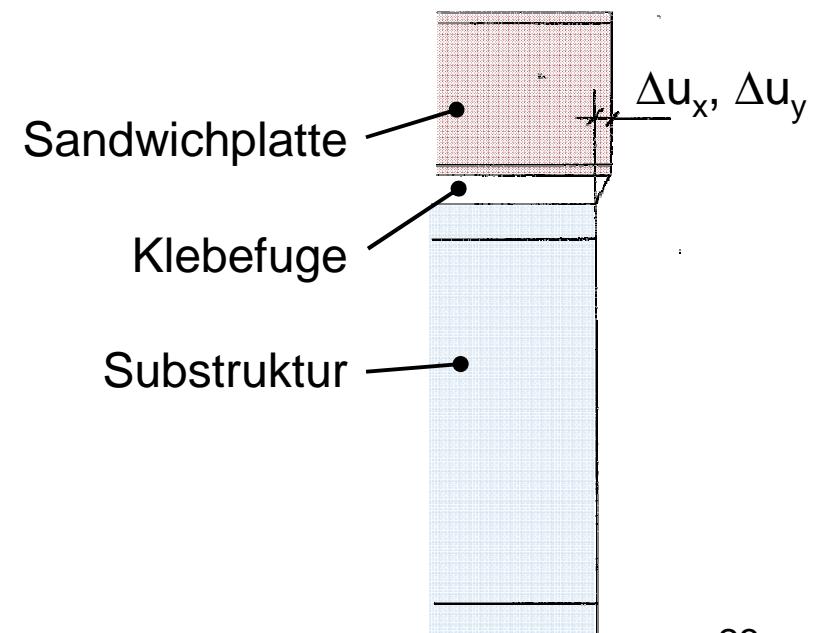
- Schubdeformation nicht vernachlässigbar
→ für Sandwich gilt: $\kappa_z = 1.0$

$$\kappa_z = \frac{A}{I_y^2} \int_A \left[\frac{s_y(z)}{b(z)} \right]^2$$

Gebrauchstauglichkeit – Verformungen

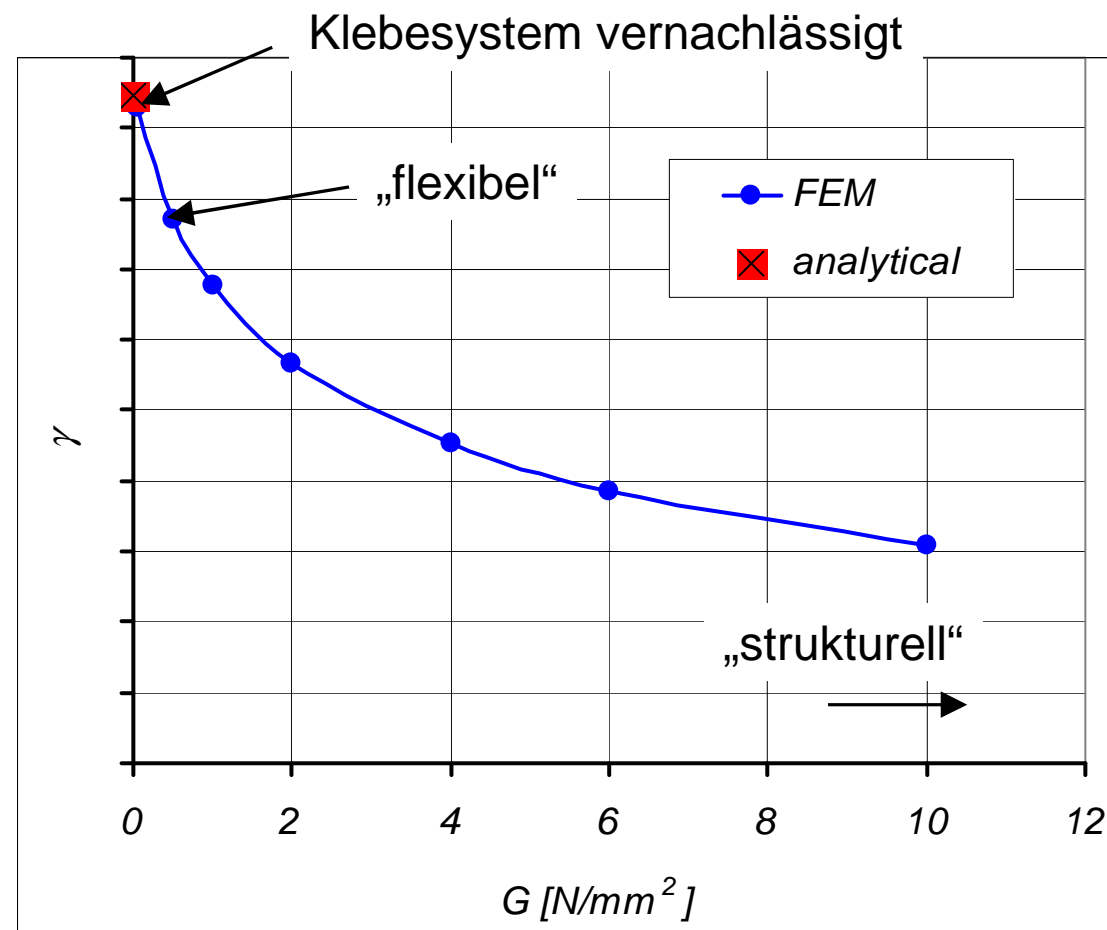
- Einfluss des Klebesystems
 - strukturell → gleiche Verformung der Sandwichplatte wie Substruktur
 - flexibel → Relativverschiebungen in Plattenebene
- Nachweise
 - Schub-Gleitung im Klebesystem
 - Dehnfugen

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\Delta u_x}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta u_y}{t}\right)^2}$$



Gebrauchstauglichkeit – Verformungen

- Einfluss der Schubsteifigkeit des Klebesystems auf die Schub-Gleitungen

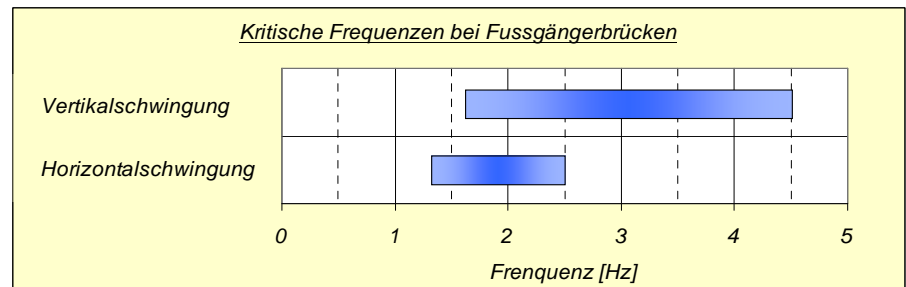


Gebrauchstauglichkeit – fussgängerinduzierte Schwingungen

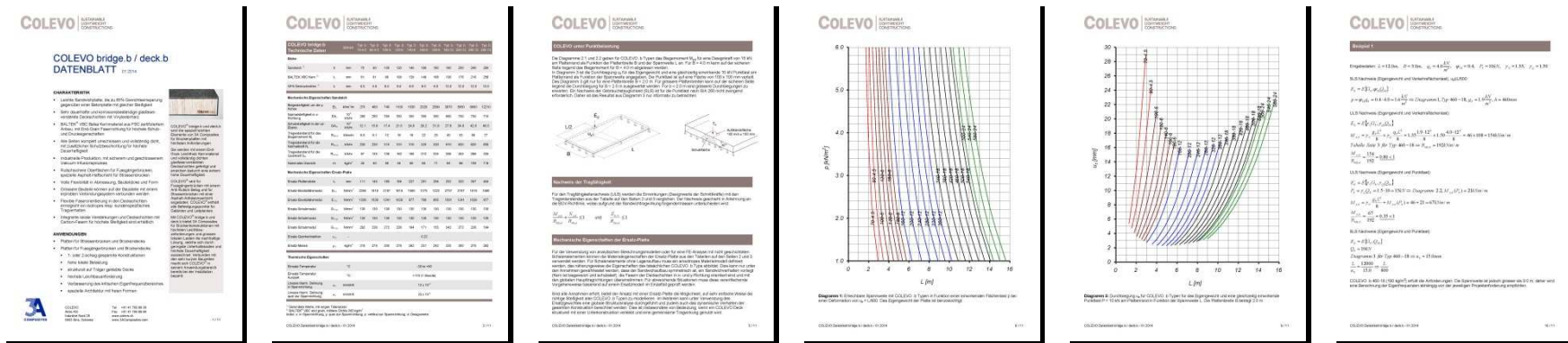
- Bestimmung der Eigenfrequenzen
z.B. die 1. vertikale Biegeschwingung

$$f_{1,v} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m'}}$$

- Bewertung nach nationalen Standards
z.B. SIA 260
 - Anhebung der Eigenfrequenzen dank extremen Leichtbau mit „Colevo“
- die vertikale Biegeschwingung konnte mit Hilfe des Sandwich-Leichtbaukonzeptes für die „Passerelle des Clavières“ aus dem kritischen Frequenzbereich gebracht werden



COLEVO Grobdimensionierung für den Ingenieur



Eingabe

Geometrieparameter

L = 5.05 m

B = 2 m

Lasten und Beiwerte

$g_{A,k}$ = 20 kg/m²

q_k = 4 kN/m²

Q_k = 10 kN

φ = 1

ψ = 0.4

$u_{z,zul} = L / 600 = 8.4$ mm

Y_G = 1.35

Y_Q = 1.50

Gesamtergebnis **Durchstanzen** **Durchbiegung** **Tragfähigkeit** **Geländer** **Hilfe**

Für die Verkehrsflächenlast wird der Nachweis der zulässigen Durchbiegung geführt, der vom aufgeführten COLEVO-Typ erfüllt wird. Zusätzlich wird die Durchbiegung aus Einzellast am Plattenrand informativ angegeben.

COLEVO-Typ **160-12**

Bauhöhe **160** mm

Gewicht **84** kg/m²

Nachweis für Verkehrsflächenlast

$E_d = E \{ G_k, \psi, q_k \}$

$\frac{u_z}{u_{z,zul}} = \frac{6.4}{8.4} = 0.76 \leq 1$

Durchbiegung aus Einzellast am Plattenrand

$E_d = E \{ G_k, Q_k \}$

$u_z = L / 543 = 9.3$ mm

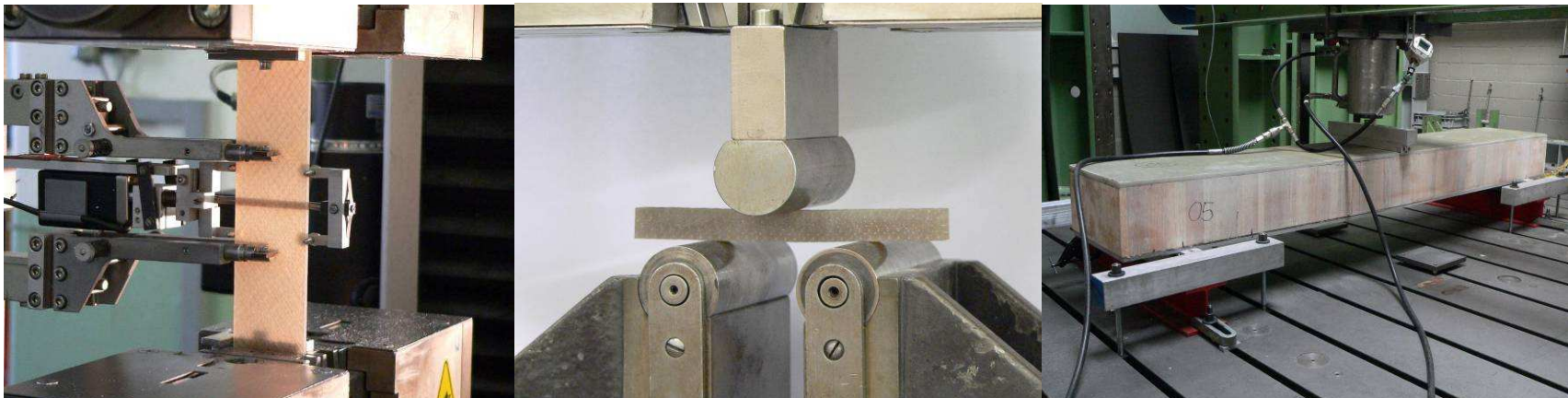
- **Datenblätter** und **Web Tool** mit Login <http://colevo.ch/de/calculationtool>
- Flächenlast und asymmetrische Punktlast
- Typische Spannweite für einachsiger gespanntes Deck oder Brückenplatte
- Nachweis nach SIA, inklusive Geländer
- Resultat mit Angabe COLEVO Typ
- Web Tool mit mehr Konfigurationen
- Datenblatt mit Ersatzsteifigkeiten für eigene Analysen mit Schalelementen ohne Lagenaufbau

Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

Materialcharakterisierung

- Statische Materialeigenschaften
 - GFK-Lamine
 - Kernmaterialien
 - Zug, Druck, Schub & Interaktionen
- Haftung
- etc.
- Biegeversuche am Sandwichverbund
- Anbindung Geländerpfosten
- Ermüdungsversuche
- strukturelle Verbindung von Sandwichelementen
- Haftung zwischen Fahrbahnbelag und Sandwich
- Salzsprühtest



Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

Bruchmodell nach A. Puck (1996)

- empirische Bruchflächen im Spannungsraum für FB, ZFB, Delamination

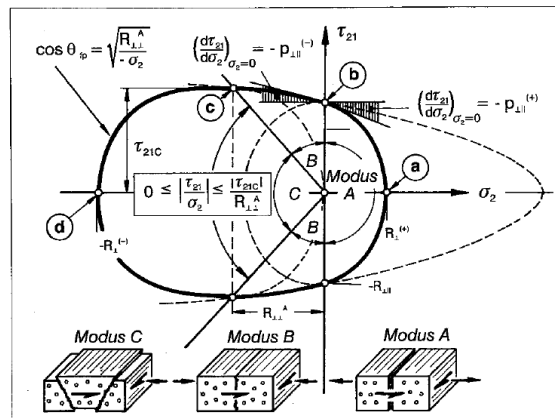
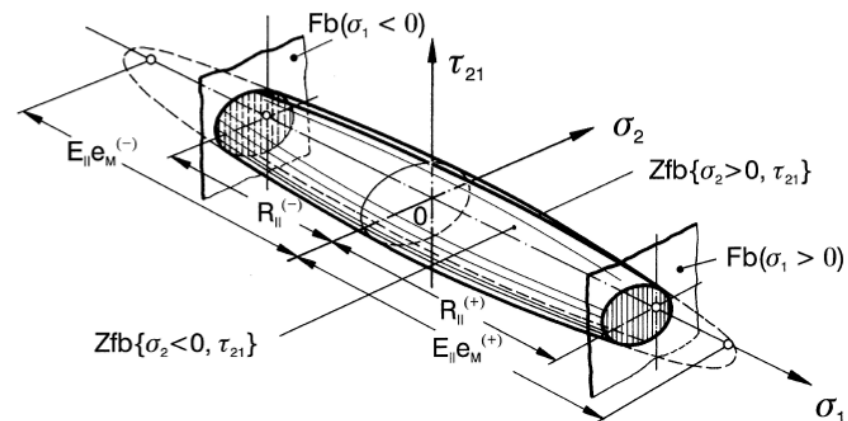


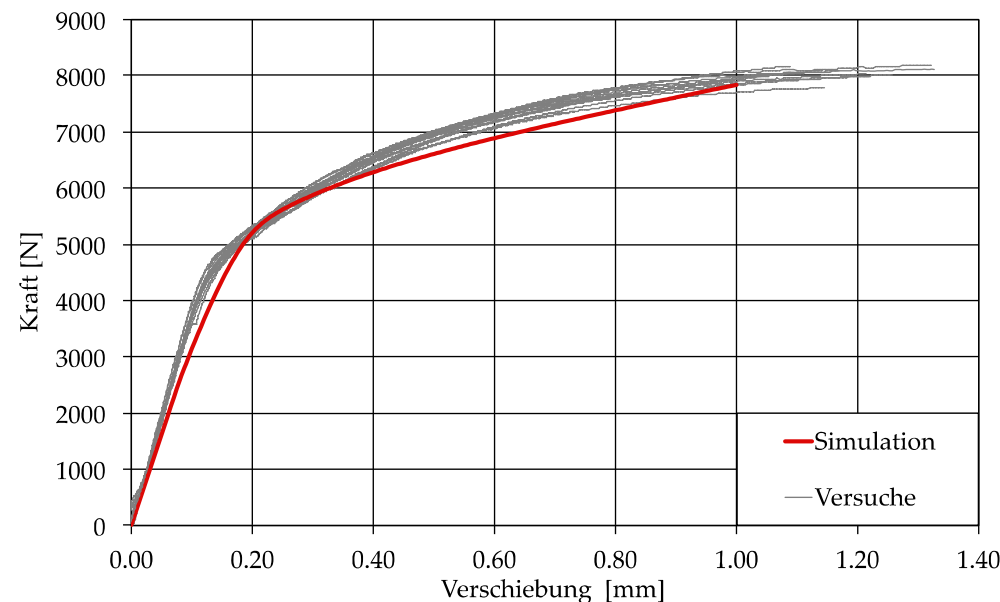
Bild 5.1: (σ_2, τ_{21}) -Bruchkurve für $\sigma_1 = 0$, zusammengesetzt aus Ellipsen- und Parabelabschnitten nach den Gln. (5.1) bis (5.3). Zu beachten sind die Bereichsgrenzen der Bruch-Modi A, B, C.



- „Nach-Rissbildungs-Bereich“ ist viel grösser als der rissfreie Lastbereich
- Abminderung der Elastizitätsgrößen für $\varepsilon_{IFF} > 1$

Entwicklung eines Schädigungsmodells

- in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (Prof. Böhlke, Bachelorarbeit Jonas Hund)
- Einführung eines Schädigungsmodells für FVK
 - Beachtung des nicht-linearen Kraft-Verformungs-Verhaltens
 - detaillierte Beurteilung der Schädigung in den faserverstärkten Deckschichten für hochbelastete Bauteile

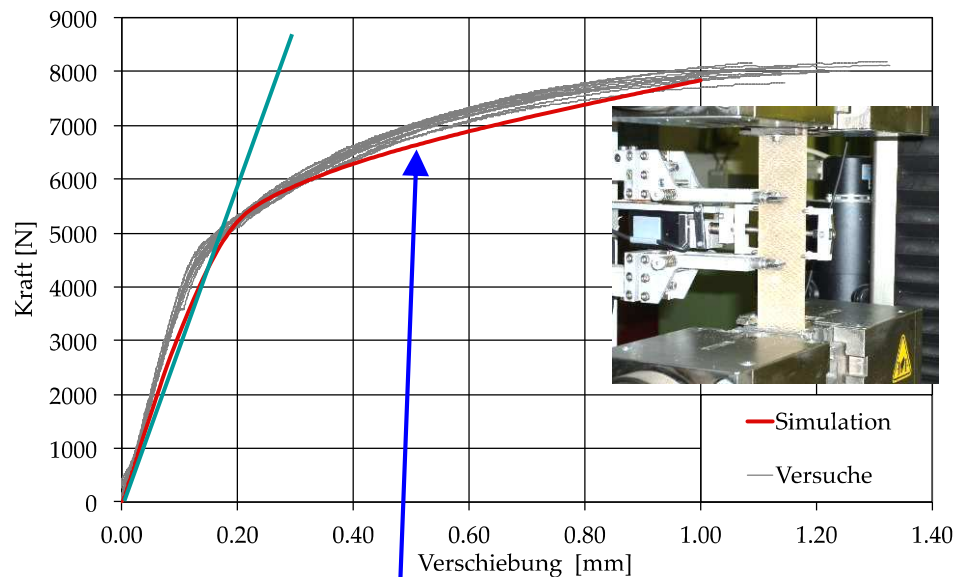


Vergleich von Simulation und Versuchen

BSc.-Arbeit J. Hund, Prof. Thomas Böhlke, KIT

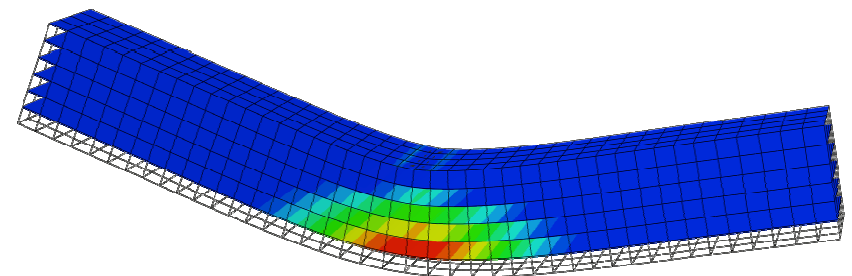
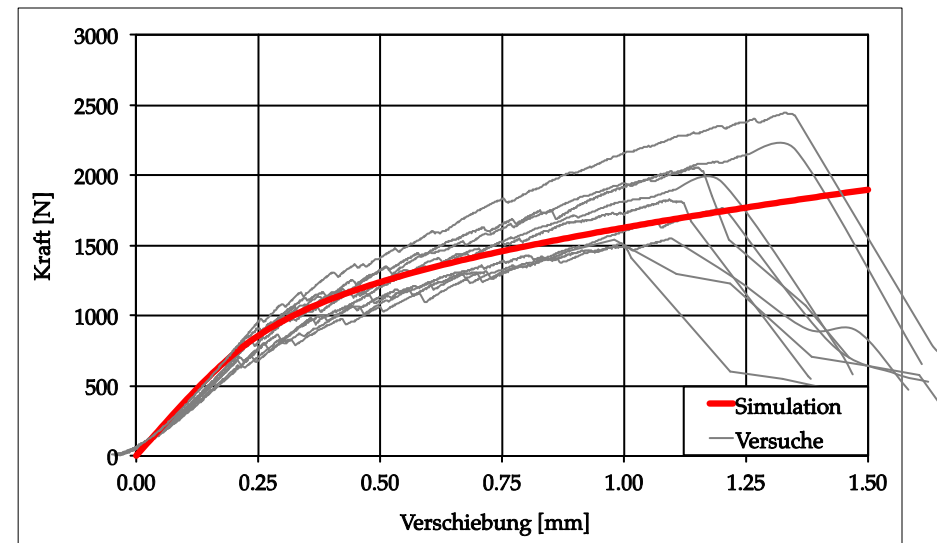
- Zugversuche an verschiedenen Winkellaminaten

linear-elastisches Verhalten mit Versagen bei üblichen Modellen



Simulation mit neuem Modell bildet nichtlineares Verhalten durch Schädigung ab

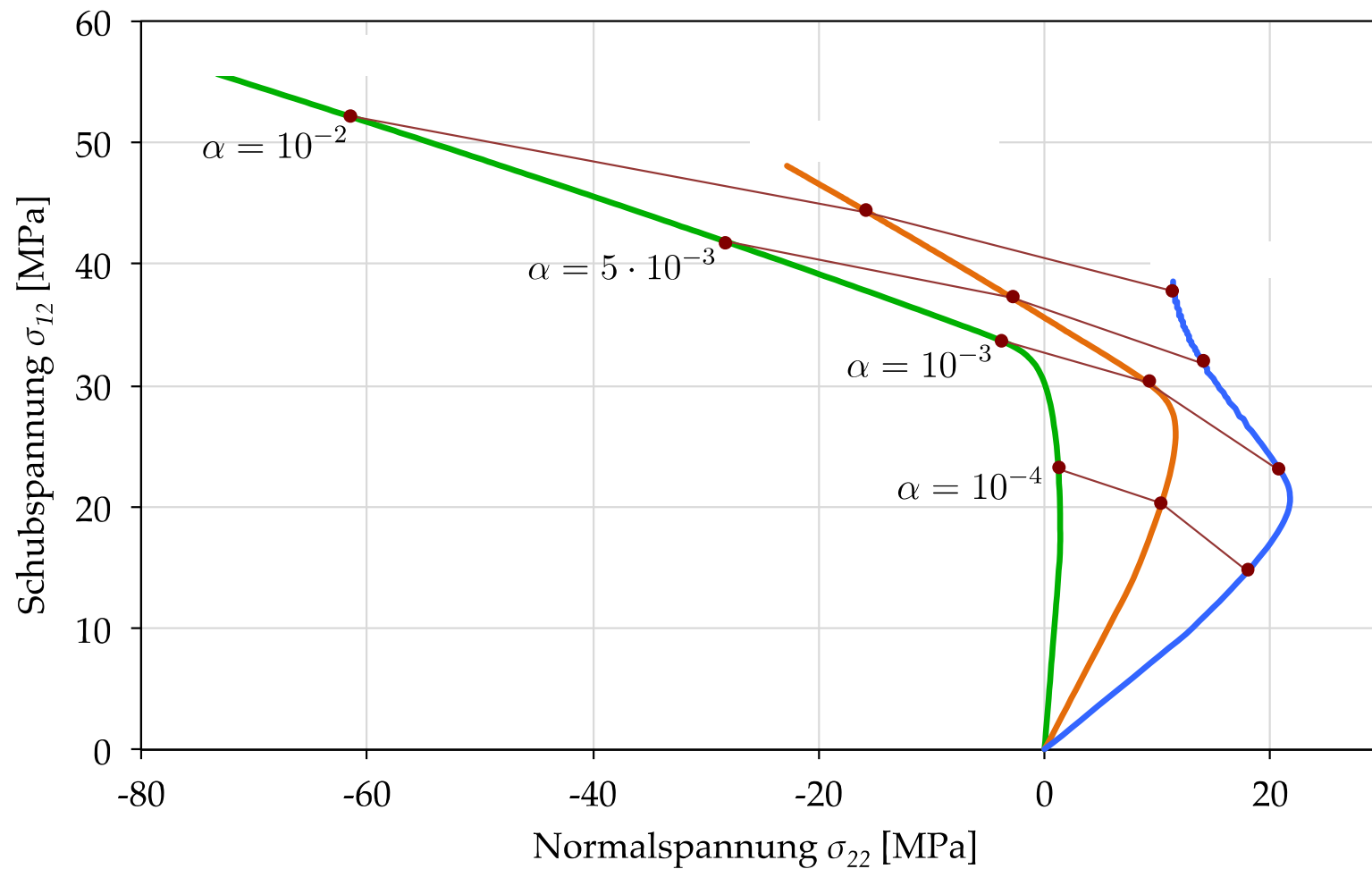
- Dreipunkt-Biegebalken, Fasern in Balkenquerrichtung



Schädigung im Laminat

BSc.-Arbeit J. Hund, Prof. Thomas Böhlke, KIT

- Nichtlineare Entwicklung der Spannungen bei Zugversuchen



Inhalt

- Firmenportrait Suisse Technology Partners
- Vorstellung der Sandwichbauweise für Brücken
- Bemessungskonzept – Brückenstatik
- Materialcharakterisierung, Bauteilversuche
- Neues Schädigungsmodell
- Fazit und Ausblick

Fazit und Ausblick

- Composites-Werkstoffe im Baubereich seit über 20 Jahren erfolgreich
- Composites-Bauweise erfüllt Normen-Anforderungen an Brückenbauwerke
- Normen müssen angepasst/ergänzt werden
- Composites sollten Inhalt der Bauingenieurausbildung sein
- Vertrauen in Composites-Werkstoffe muss noch gesteigert werden
- Abbildung des nicht-linearen Materialverhaltens mit neuem Schädigungsmodell