



**COTESA**  
COMPOSITES

**KVB**  
KONSTRUKTION  
UND  
VERBUNDBAUWEISEN

# Structural Health Monitoring für H<sub>2</sub>-Druckbehälter

Martin Semsch (KVB gGmbH)

Udo Berthold (COTESA GmbH)

CU - Innovation Day: Arbeitsgruppe Leichtbau für Wasserstoffsysteme

Wasserstoff – Enabler für nachhaltige Mobilitäts- und Transportkonzepte

19./20.09.2023 Voith Composites - Garching / Technologiezentrum Augsburg

*Nadcap*

1. Normen und Regelwerke
2. Sicherheitskonzepte für Druckbehälter
  - Belastung vs. Tragfähigkeit
  - Akzeptierte Risiken für Gasbehälter und Sicherheitsfaktoren
3. Bsp.: Flügelintegrierter Wasserstofftank
  - Vor- und Nachteile
  - Konzept APUS i-2
  - Tank- und Flügelfertigung
  - Kombination der Lastfälle
4. Qualitätssicherungsmaßnahmen und Structural Health Monitoring
  - Strategie bei Qualitätssicherungsmaßnahmen
  - Methoden und Bedeutung der Strukturüberwachung
  - Faser-Bragg-Gitter-Sensorik
5. Zusammenfassung & Ausblick

ISO/TR 13086	Gas cylinders — Guidance for design of composite cylinders
ISO/TR 19811	Gas cylinders — Service life testing for cylinders and tubes of composite construction
VERORDNUNG (EG) Nr. 79/2009	Typgenehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG
VERORDNUNG (EU) Nr. 406/2010	Durchführungsverordnung zur (EG) Nr. 79/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen
BAM-GGR 021	Baumusterspezifische Ermittlung der sicheren Betriebslebensdauer für Druckgefäße aus Faserverbundwerkstoffen (Composite-Druckgefäße) nach dem Konzept zusätzlicher Prüfungen (CAT)
BAM-GGR 022	Baumusterspezifische Festlegung der Prüffrist von Druckgefäßen aus Faserverbundwerkstoffen (Composite-Druckgefäße)
ISO 11119	Gas cylinders — Refillable composite gas cylinders and tubes — Design, construction and testing
ISO 11439	Gasflaschen - Hochdruck-Flaschen für die fahrzeuginterne Speicherung von Erdgas als Treibstoff für Kraftfahrzeuge
ISO 11515	Refillable Gas Bottles
DIN EN ISO 11623	Gas Cylinders Composites Design
DIN EN 12257	Transportable Gas Cylinders
DIN EN 12245	Fully Wrapped Bottles
DIN EN 13923	Filament Wound Pressure Vessels

United Nations  
“Recommendations on the Transport of Dangerous Goods – Model Regulations”

Vorschriften für den Transport gefährlicher Güter auf Straße und Schiene -  
RID/ADR 2023  
oder IATA Gefahrgutvorschriften (DGR) für Lufttransport

ISO 11119 - Gas cylinders — Refillable  
composite gas cylinders and tubes —  
Design, construction and testing

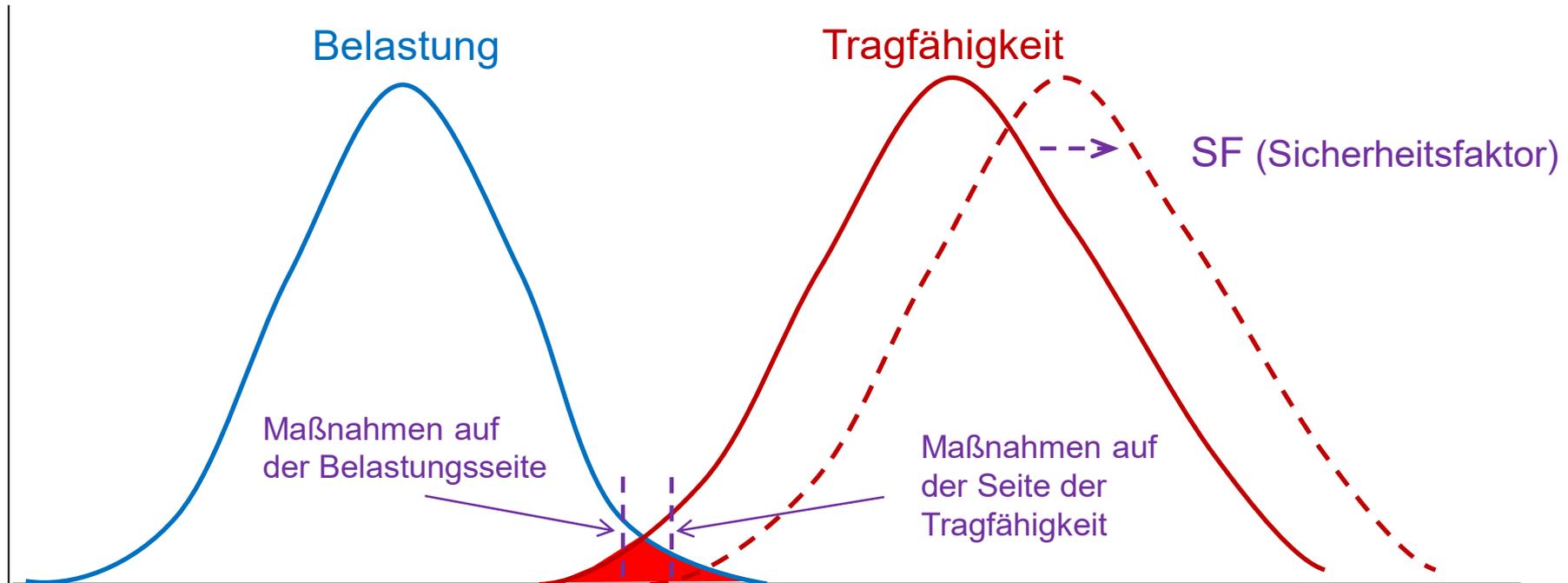
ISO/TR 13086 -  
Gas cylinders — Guidance for  
design of composite cylinders

ISO/TR 19811 - Gas cylinders —  
Service life testing for cylinders and  
tubes of composite construction

BAM-GGR 022 -  
Baumusterspezifische  
Festlegung der Prüffrist  
von Druckgefäßen

BAM-GGR 021 -  
Baumusterspezifische  
Ermittlung der sicheren  
Betriebslebensdauer...

## Belastung vs. Tragfähigkeit



### Lösungsansatz

- Sicherheitsfaktor für die Auslegung
- Maßnahmen zur Reduzierung des kritischen Bereichs

Kritischer Bereich

## Akzeptierte Risiken für Gasbehälter\*

Leckage vor Bruch

$$FR < \frac{3}{pV}$$

Toxische oder brennbare Gase:

$$FR < \frac{1}{100} \frac{3}{pV}$$

Brennbare Gase, wenn Zündung ausgeschlossen:

$$FR < \frac{3}{pV}$$

Beispiel:

120 Liter/ 700bar

FR Leckage vor Bruch (Zündung ausgeschlossen):  $< 3,57 \cdot 10^{-5}$  (d.h. SR >99,996%)

FR Bersten:  $< 3,57 \cdot 10^{-7}$  (d.h. SR >99,99996%\*\*)

Maßgeblich für die Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit ist die maximal auftretende Betriebslast.

\* Nach BAM-GGR 021, Ausgabe 21. September 2017

\*\* Anmerkung: Dieser Wert entspricht auch in etwa dem in ISO/TR 13086 vorgeschlagenen Wert von 99,9999%

## Sicherheitsfaktoren

**Table 1 — Fibre Stress Ratios to achieve 0,999999 reliability**

Fibre Material	Hoop Wrapped, Metal Lined (Type 2)	Fully Wrapped, Metal Lined (Type 3)	Fully Wrapped, Non-metal Lined (Type 4)
Glass	2,65	3,50	3,50
Aramid	2,25	3,00	3,00
Carbon	2,25	2,25	2,25
<p>NOTE 1 Values of 2,35, 2,35, and 2,75 are used on carbon, aramid, and glass respectively for Type 2 cylinders in standards for CNG where settled temperature is 15 °C.</p> <p>NOTE 2 Values of 2,35, 3,1, and 3,65 are used on carbon, aramid, and glass, respectively, for Types 3 and 4 in some standards for CNG where settled temperature is 15 °C.</p> <p>NOTE 3 Values of 2,00 are used for carbon for Types 2, 3, and 4 in ISO/TS 15869 for pressures greater than or equal to 350 bar.</p>			

ISO TR 13086-1 Auslegungleitlinien Gasflaschen Teil 1 Berstverhältnisse bezogen auf Prüfdruck

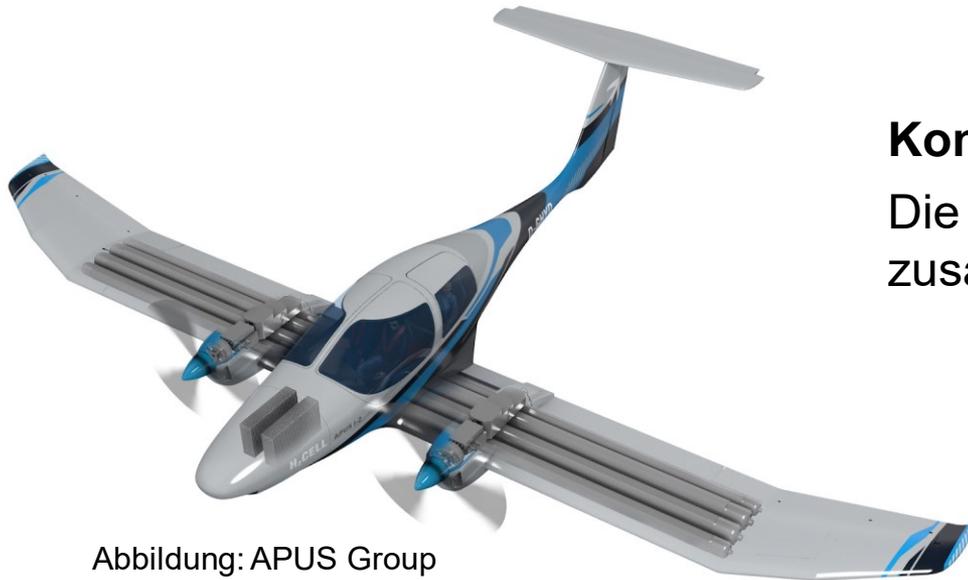


Abbildung: APUS Group

## Konzept:

Die Tankröhren im Flügel übertragen zusätzlich Flug- und Bodenlasten

Projekt gefördert im  
Rahmen von LuFoV-3



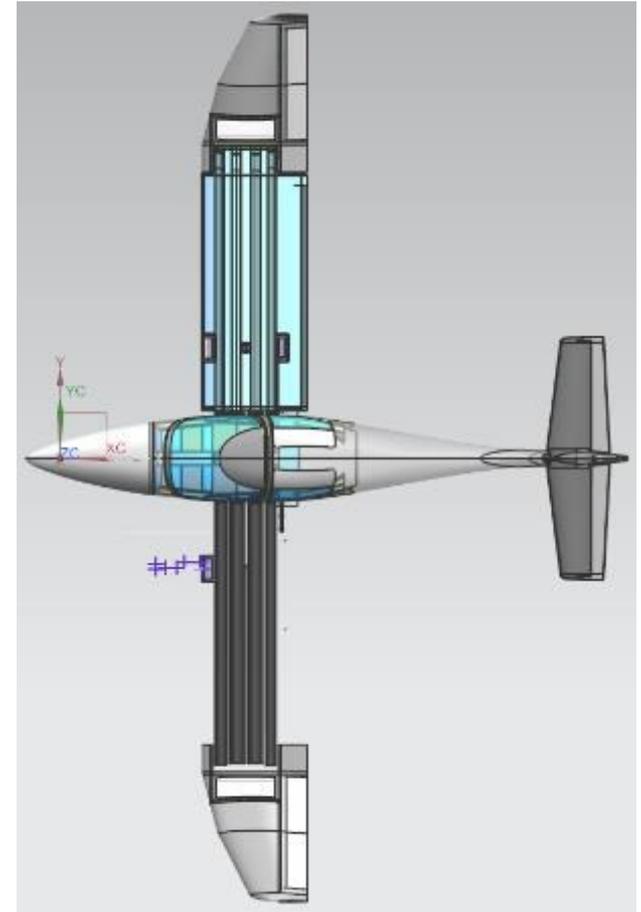
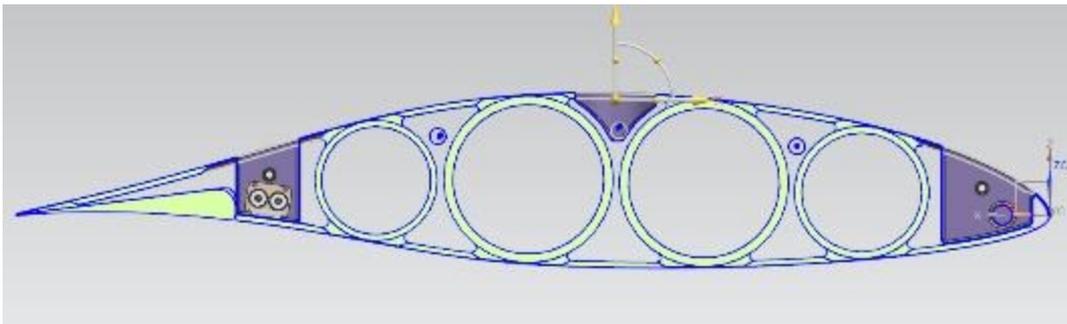
## Vorteile gegenüber nichtlasttragenden Tanks:

- Einsparung von Strukturmasse
- Bessere Bauraumausnutzung und damit mehr Behältervolumen

## Nachteile gegenüber nichtlasttragenden Tanks:

- Behälter schlecht geschützt
- Kombinierte Lastfälle
- Schwierige Lasteinleitung
- Auslegung hochkomplex
- Schwierige Inspektion

## Konzept APUS i-2



## Tank- und Flügelherstellung



Abbildung: COTESA GmbH



Abbildung: KVB gGmbH

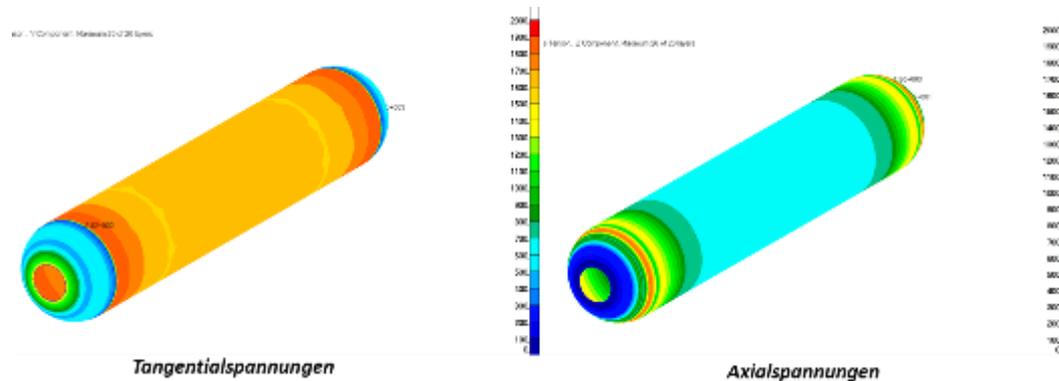
AERO 2022, Friedrichshafen,  
Ausstellung des Mockups der Apus i-2  
mit der Pilotröhre vom flügelintegrierten Tank

Tankröhren, eingebettet in die Unterschale des Flügels

LuFo-Projekt HYDROTUBE (Kooperation APUS Group, COTESA GmbH, TU Dresden-ILR, KVB gGmbH)

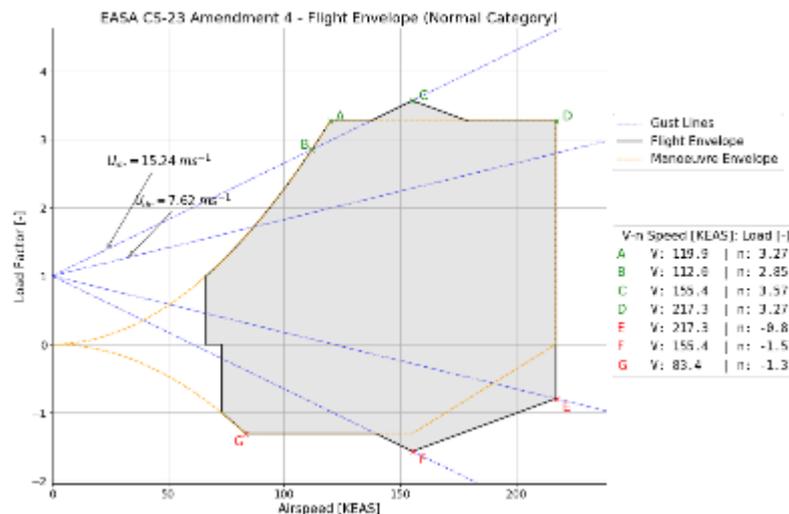
## Kombinierte Lastfälle:

Überlagerung von mechanischen Lasten mit dem Innendrucklastfall



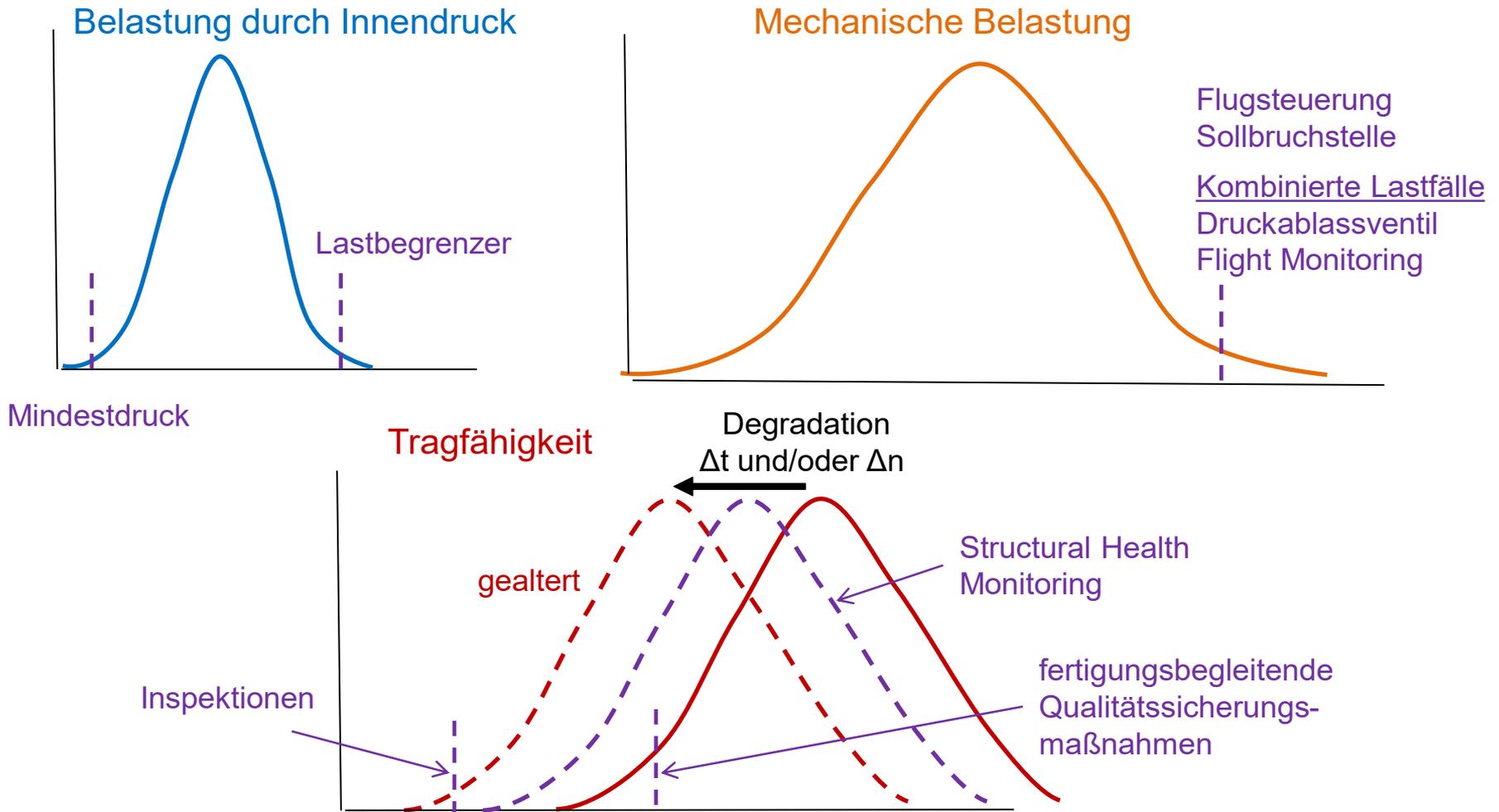
## Lastfälle

- Innendruck der Tankröhre
- Höhenrudermanöver
- Seitenrudermanöver
- Landestoß
- Querrudermanöver
- Laterale und vertikale Böe
- Stationäres Abfangen
- Rollen am Boden
- Bruchlandung
- Kabinendruck
- Einseitiger Triebwerksausfall
- maximaler Triebwerkschub



## Kombinierte Lastfälle

Innendruck + mechanische Belastung vs. Tragfähigkeit



## Strategie: Sicherer Prozess



Faserverbundherstellung ist ein „Spezialprozess“ bei dem die Materialeigenschaften erst im Prozess der Bauteilherstellung entstehen.

Nicht jede Materialeigenschaft kann zerstörungsfrei geprüft werden.

## Strategie z.B. Maßnahmen im Nasswickelprozess

Typischer Fehler*	Vermeidungsstrategie*	Erkennungsmethode*
Einlagerung von Fremdkörpern und Fremdstoffen	Ordnung und Sauberkeit, Reinraum	Ultraschallprüfung, Sichtprüfung
Unzureichende Vernetzung von Reaktionsharzen	Gut kontrollierter Mischprozess, Temperaturkontrolle	DSC/DMA an Harzproben (Begleitproben und WE-Proben)
Fehlerhafter Harzgehalt	Gut kontrollierter Tränkungsprozess, gut kontrollierte Fadenspannung, Temperaturkontrolle (Harzbad/ Raum)	Dickenmessung, Temperaturmessung Messung des Harzverbrauchs, Wägung
Faserwelligkeiten	gut kontrollierte Fadenspannung	Sichtprüfung, lokale Dehnungsmessung in Druckversuchen

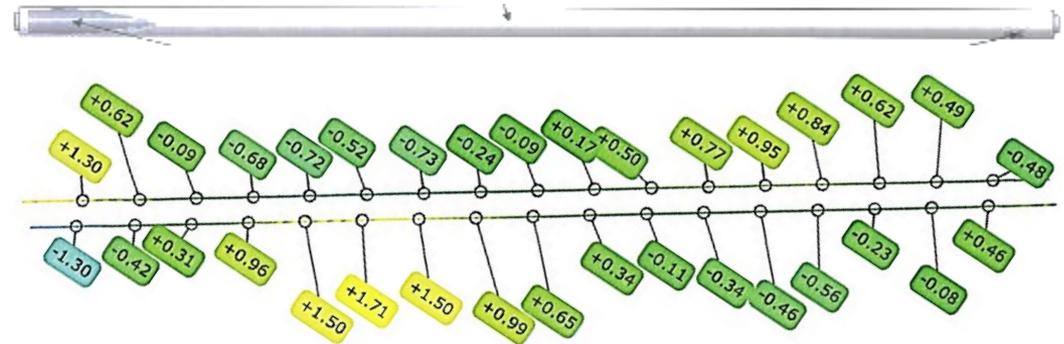
\*... Auswahl

## Fertigungsabweichungen

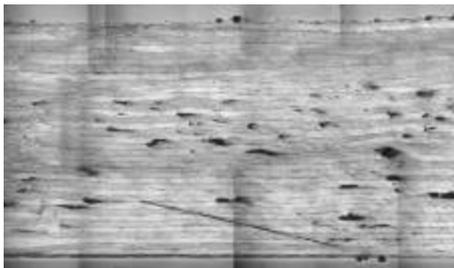
Dickwandigkeit  
der Laminatstruktur



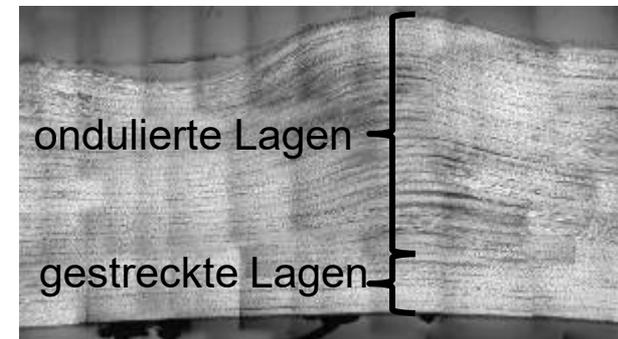
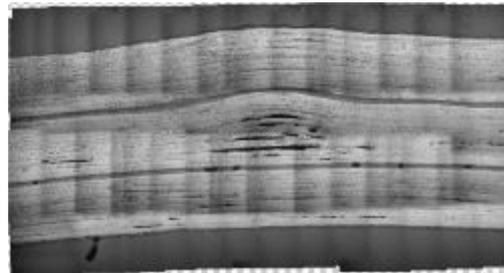
Einhaltung von Maßtoleranzen  
bei einer Länge von 9,25



Poren im Laminat



Welligkeit des Laminats



## Methoden und Bedeutung der Strukturüberwachung

### SHM-Methoden

- Ultraschalluntersuchungen
- Schwingungsbewertung
- Dehnungsmessung mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS)
- Schallemissionsmessungen / Akustikemission
- Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

### SHM = abgestimmte Lösung von

- Sensoren
- Messverstärkern
- Sensorintegration
- Datenerfassungssoftware
- Datenübertragung und
- Datenauswertung

### SHM zu teuer ?

- Betrachtung des Komplettsystems (Implementierung, Gewichts- einsparung, Inspektionsaufwand, Ausfallzeiten, Schäden)
- Zeitbasierte Inspektionsintervalle → zustandsbasierte Inspektionsintervalle
- Wichtigstes Kriterium: Risikobewertung

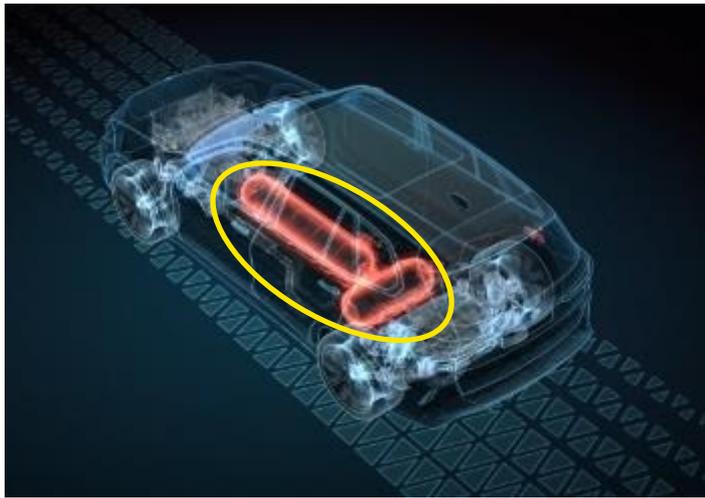
## Methoden und Bedeutung der Strukturüberwachung

### Sensorintegration Wasserstoffdrucktank

Reduktion des Sicherheitsfaktors

- Beispiel PKW mit Wasserstoffantrieb:
- Tankvolumen 100 l – 200 l, Nenndruck 700 bar

Klassischer Wasserstofftank  
55 kg – 110 kg



-23%

Sensorüberwachter Wasserstofftank  
40 kg – 85 kg



Bild: BMW i Hydrogen NEXT [BMW]

## Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

- Grundmaterial Lichtwellenleitfaser aus z.B. SiO<sub>2</sub>
- Sensorfaser bestehend aus Coating (Polyimid, Ormocer),
- Faser-Bragg-Gitter (Länge 1-3 mm) durch UV-Laser und Phasenmaske eingeschrieben

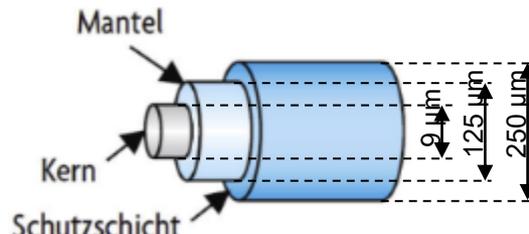
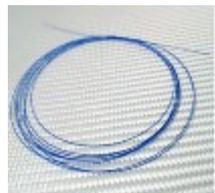


Bild: Aufbau [Goldbacher]

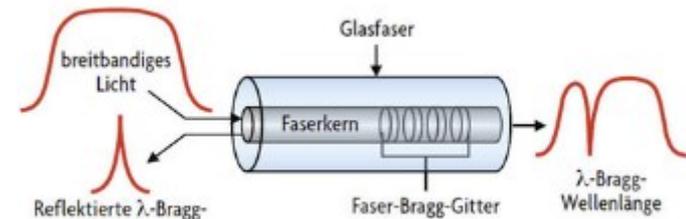
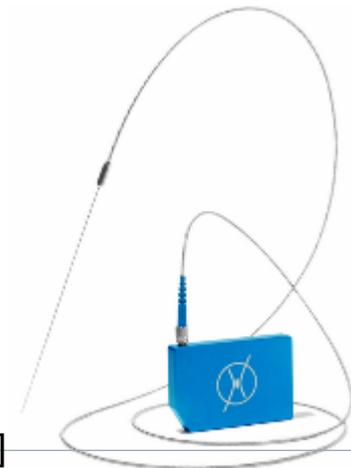


Bild: Schematische Darstellung des Wirkprinzips [Goldbacher]

- Mess- und Datenerfassungssystem
  - stationäre Auswerteeinheit 206 x 274 x 79 mm
  - mobile Auswerteeinheit (74 x 50 x 15 mm, 60 g, 1 Watt)



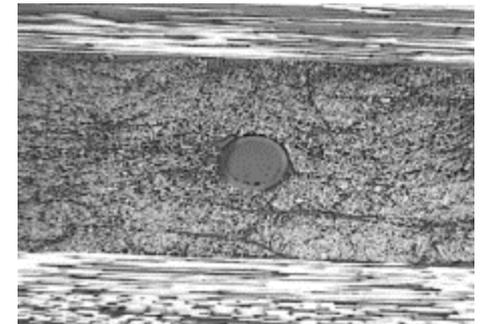
Bilder: [https://fisens.com/]



## Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

### Vorteile

- Kompakt und Leicht
- hoher Miniaturisierungsgrad
- Multiplexingfähigkeit
- Simultane Auswertung mehrerer Sensoren (16 x 20 Signale = 320 Sensoren)
- Elektromagnetisch verträglich
- Hohe Dauerfestigkeit ( $10 \times 10^7$  Lastwechsel)
- Korrosionsbeständigkeit



### Herausforderungen

- Lichtverlust bei engen Biegeradien
- Thermische Abhängigkeit beeinflusst Dehnungsmessung
- Sensibilität der Sensorfaser
- Anschaffungskosten

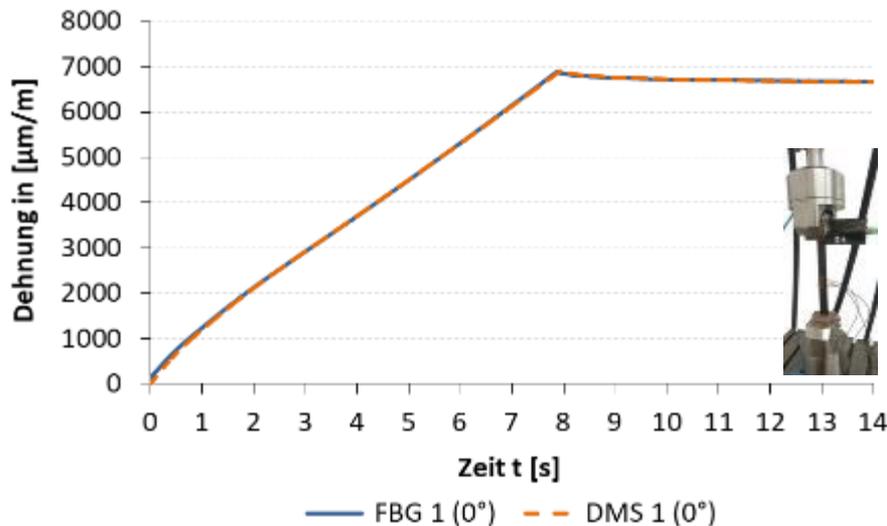




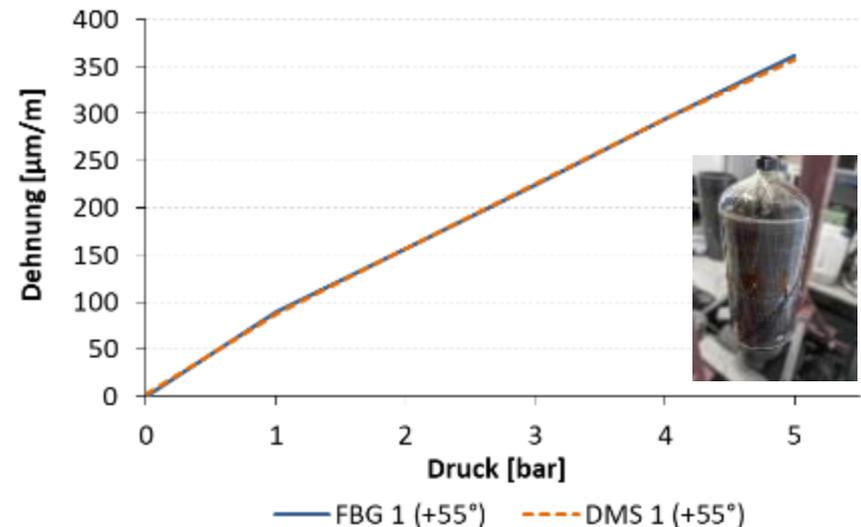
## Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

### Beurteilung der Messgenauigkeit mittels Vergleichsmessung mit Dehnmessstreifen

→ gute Übereinstimmung der Messergebnisse im niedrigen und hohen Dehnungsbereich bei Zugprobekörpern und Bauteilstrukturen



Vergleichsmessung FBG-DMS  
Zugprüfkörper

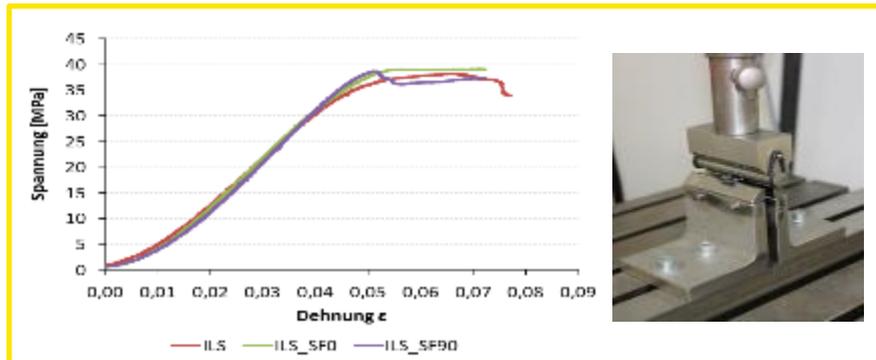


Vergleichsmessung FBG-DMS  
Druckbehälter

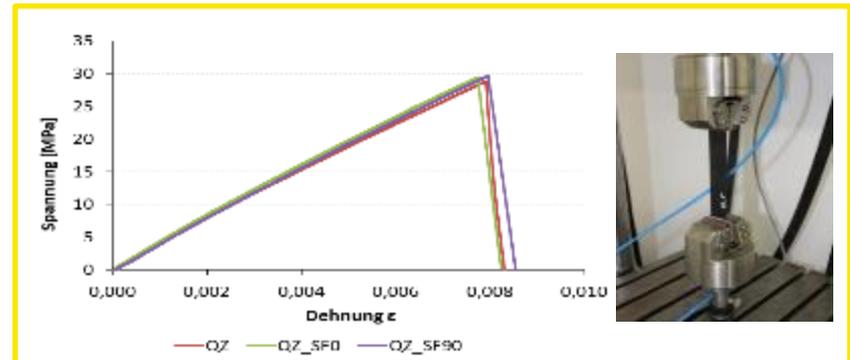
## Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

### Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Verbundeigenschaften

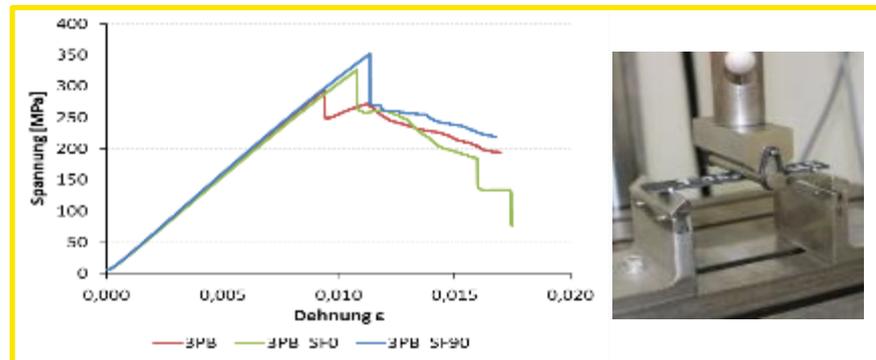
→ Geringer Einfluss der Sensoren auf die mechanischen Verbundeigenschaften bei faserbundgerechter Integration der Sensoren



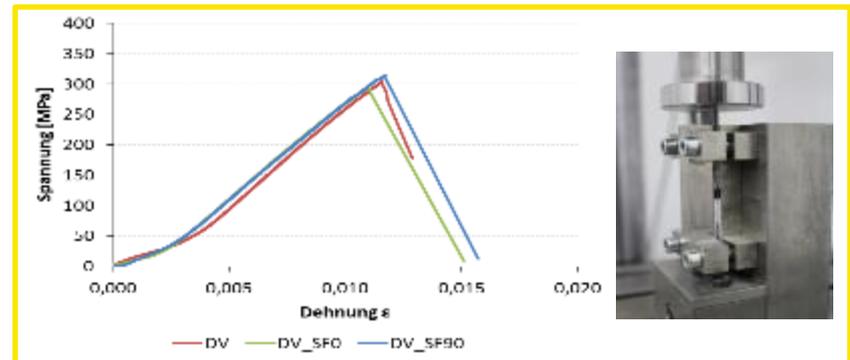
ILS Versuch



Querzugversuch



3-Punkt-Biege Versuch



Druckversuch

## Faser-Bragg-Gitter-Sensorik

### Anwendungsgebiete



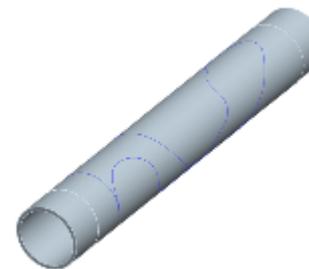
CFK-Drehgestellrahmen



GFK-Druckbehälter



Fahrwerkselemente



CFK-Torsionsfedern



GFK-Messstab

## Zusammenfassung

- Structural Health Monitoring und durchgängige Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung erhöhen maßgeblich die Sicherheit von Druckbehältern.
- In aktuellen Normen findet die Integration von SHM-Systemen bei der Festlegung von Sicherheitsfaktoren keine Beachtung.
- Der Einsatz von SHM-Systemen kann
  - eine Verringerung des Risikos / Erhöhung der Sicherheit
  - eine Reduzierung des Strukturgewichts
  - verringerte Inspektionsaufwände
  - frühzeitiges Erkennen von Schädenbewirken.
- Die Faser-Bragg-Gitter-Sensorik bietet ein hohes Potential für die Gewährleistung der Sicherheit und Reduzierung der Inspektionsaufwände bei Druckbehältern.

## Ausblick

### Entwicklungspotential für SHM-Systeme

- Ein großes Potential für die Erweiterung der Anwendungsfälle / Einsatzgebiete, insbesondere im Bereich der mobilen Anwendung und bei Windenergiesystemen für SHM-Systeme ist vorhanden.
- Insbesondere im Luftfahrtbereich (=sehr hohe Leichtbauanforderungen) können SHM-Lösungen den erzielbaren Leichtbaugrad erhöhen

### Forschungspotential bzw. –bedarf für SHM-Systeme

- Schadensdetektion und Schadensfrüherkennung bei FVK-Druckbehälter
- Langzeitverhalten von SHM-Systemen
- Datenübertragung / Datenauswertung
  - Drahtlose Datenübertragung
  - Zusammenhang der Degradation und detektierbaren physikalischen Größen
  - Definition von Aktionen bei Eintritt/Feststellung Schadensereignissen



**COTESA GmbH**  
Bahnhofstraße 67  
09648 Mittweida  
Deutschland

T: +49 3727 9985 0  
F: +49 3727 9985 129  
E: [info@cotesa.de](mailto:info@cotesa.de)  
[www.cotesa.de](http://www.cotesa.de)

**KVB gGmbH**  
Gärtitzer Straße 1  
04720 Großweitzschen  
Deutschland

T: +49 3431 73425 90  
E: [info@kvb-forschung.de](mailto:info@kvb-forschung.de)  
[www.kvb-forschung.de](http://www.kvb-forschung.de)

© COTESA GMBH. Alle Rechte vorbehalten.  
Vertrauliches und urheberrechtlich geschütztes Dokument.

Dieses Dokument mit allen enthaltenen Informationen ist alleiniges Eigentum der COTESA GmbH. Die Zustellung dieses Dokuments oder die Veröffentlichung seines Inhalts begründen keinen Anspruch auf das geistige Eigentum. Dieses Dokument darf ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung der COTESA GmbH nicht vervielfältigt oder Dritten gezeigt werden. Dieses Dokument und sein Inhalt dürfen nur für konventionelle Zwecke verwendet werden.

