



OHLF OPEN HYBRID
LABFACTORY

Life Cycle Technologien für hybride Strukturen

Abschlussstreffen

15.05.2025

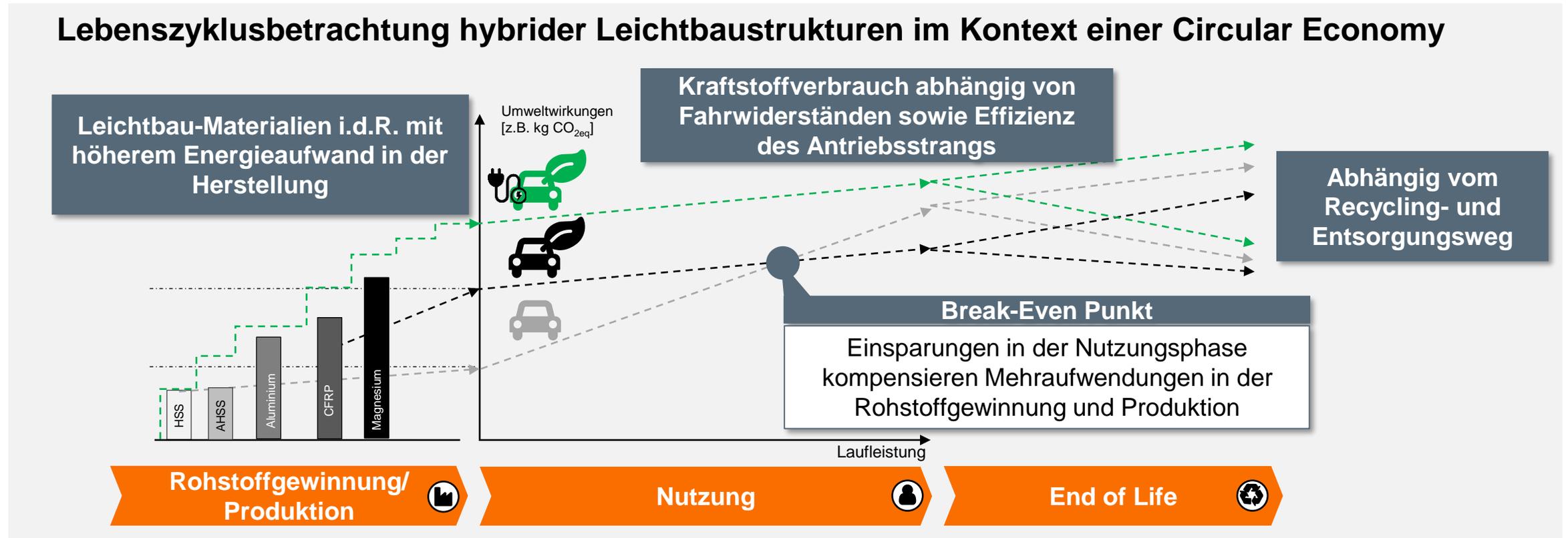
Agenda

- 1 | Life Cycle Technologien für hybride Strukturen
- 2 | Leitfaden für lebenszyklusoptimierte Multimaterialbauteile
- 3 | Definition Lebenszyklustechnologien
- 4 | Digitaler Lebenszyklus
- 5 | Nutzungsphase
- 6 | Reparatur
- 7 | End Of Life
- 8 | Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle
- 9 | Handlungsempfehlungen und Fazit

1

Life Cycle Technologien für hybride Strukturen

Life Cycle Technologien für hybride Strukturen - Motivation und Ziele



- Technologieentwicklung in Produktion, Nutzung und End-of-Life zur Erhöhung des Einsatzpotenzials hybrider Strukturen
- Datenerhebung sowie Multi-Ebenen-Modellierung für die lebenszyklusorientierte Analyse, Bewertung und Gestaltung

Life Cycle Technologien für hybride Strukturen - Lösungsweg

Datenbasierte Optimierung des Fertigungsprozesses

- Technologieentwicklung zur Erhöhung des Einsatzpotenzials
- Konzept zur fertigungsbegleitenden Datenerfassung und -auswertung (Lebenszyklusperformance)
- Integration von Sensorik (LCTs)

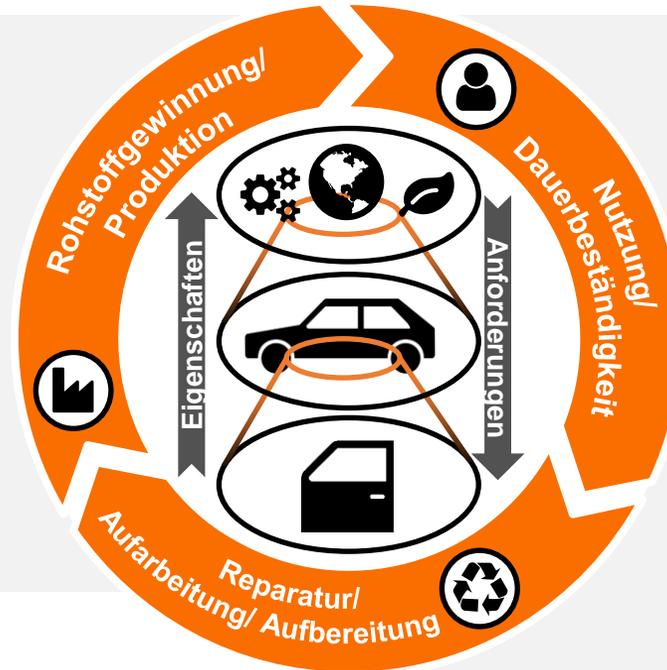


Abbildung der Nutzungsphase

- Abbildung des Lebenszyklus (Alterung und Schädigung)
- Multiskalenmodell des Lebenszyklus inklusive der Randbedingungen

Reparatur, Aufarbeitung und Aufbereitung

- Verfahren für geschädigten und gealterten Bauteile

- **Ökonomische** (LCC) und **ökologische** Bewertung (LCA) der gesamten Lebenszyklen
- **Leitfaden** zur Anwendung der Methodik für die lebenszyklusübergreifende Auslegung von Technologien auf Basis ökonomischer, ökologischer und funktionaler Kriterien

2

Leitfaden für lebenszyklusoptimierte Multimaterialbauteile

Leitfaden für lebenszyklusoptimierte Multimaterialbauteile

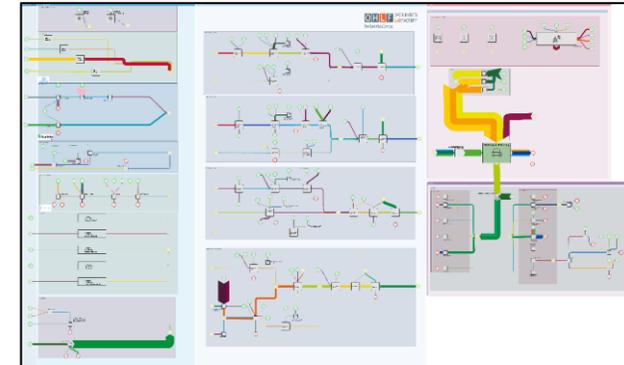
Leitfaden

- Praxisorientierte Leitfaden mit den wichtigsten Erkenntnissen aus dem Projekt
- Für lebenszyklusbasierte Entwicklung, Herstellung und Nutzung von hybriden Strukturen



Webbasiertes Bewertungsmodell

- Unterstützungstool für eine lebenszyklusbasierte Entwicklung, Herstellung und Nutzung von hybriden Strukturen
- Lebenszyklusübergreifende Bewertung von Materialien



Leitfaden für lebenszyklusoptimierte Multimaterialbauteile

Zielgruppe des Leitfadens:

- Entwickler, Hersteller, Instandhalter sowie Recycler von hybriden Bauteilen

Ziel des Leitfadens:

- Lebenszyklusbasierte Bewertung von Materialien ermöglichen
- Bestehende Hürden beim Einsatz von Hybridbauteilen verringern
- Anwendung von Hybridbauteilen in der Praxis erleichtern

→ **Wichtiges Instrument für die lebenszyklusbasierte Entwicklung, Herstellung und Nutzung von Hybridstrukturen**

Leitfaden für lebenszyklusoptimierte Multimaterialbauteile



Aufbau des Handlungsleitfadens:

- 1. Einführung in den Handlungsleitfaden**
 - *Definition Lebenszyklustechnologien*
- 2. Optimierung der Lebenszyklusphase**
 - *Nutzungsphase*
 - *Reparatur*
 - *End of Life*
- 3. Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle**
- 4. Handlungsempfehlung und Fazit**

3

Definition Lebenszyklustechnologien

Definition Lebenszyklustechnologien

- Herausforderungen durch Einsatz hybrider Komponenten
 - Veränderte Produktion
 - Verändertes Verhalten im Lebenszyklus
 - Erhöhte Anforderungen an End-of-Life



- Für ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus Wissen notwendig:
 - Bauteileigenschaften
 - Einflussfaktoren
 - Verhalten entlang Lebenszyklus

Ziel: Optimierter Lebenszyklus

Veröffentlichungen: [1] Data-Driven Business Models for Life Cycle Technologies: Exemplary Planning for HybridComponents; Wilde et al. (2021)

Definition Lebenszyklustechnologien

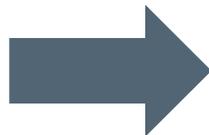
- Herausforderungen durch Einsatz hybrider Komponenten
 - Veränderte Produktion
 - Verändertes Verhalten im Lebenszyklus
 - Erhöhte Anforderungen an End-of-Life



- Für ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus Wissen notwendig:
 - Bauteileigenschaften
 - Einflussfaktoren
 - Verhalten entlang Lebenszyklus

Ziel: Optimierter Lebenszyklus

Daten-getriebene digitale Repräsentation des Lebenszyklus



- Sammlung von Daten (Zustand, Umwelteinflüsse...) entlang des Lebenszyklus
- Aufbereitung der Daten zur Erstellung einer digitalen Bauteilakte
- Ableitung von ökologisch und ökonomisch getriebenen Handlungsempfehlungen

Einsatz von Lebenszyklustechnologien (Life Cycle Technologies)

Veröffentlichungen: [1] Data-Driven Business Models for Life Cycle Technologies: Exemplary Planning for HybridComponents; Wilde et al. (2021)

Definition Lebenszyklustechnologien

Lebenszyklustechnologien

Datengetriebenes Geschäftsmodell

Physische Komponente

Messtechniken (in Komponente oder Werkzeug integriert)

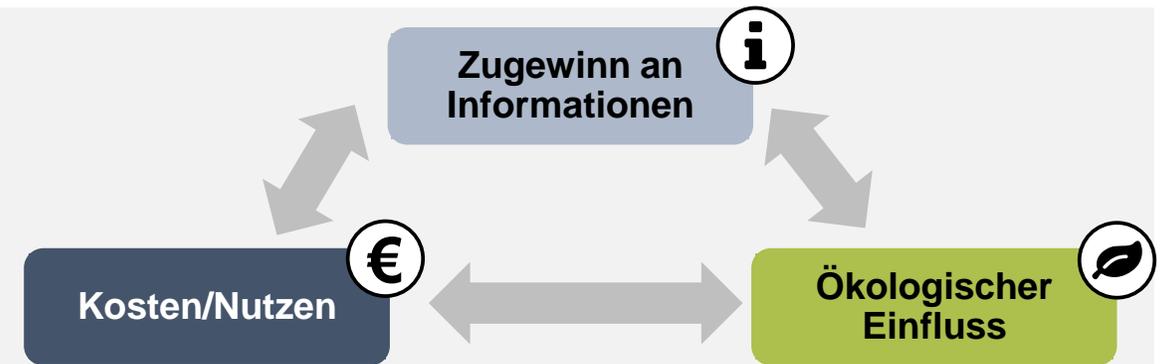
Physische Verbindung

Cyber Komponente

Kommunikation der Daten

Datennutzung

- **Zugewinn an Informationen:** Zusätzliche Information entlang des gesamten Lebenszyklus für Nutzung z.B. bei Planung von Reparaturen
- **Ökologischer Einfluss:** Potenzielle Einsparungen durch z.B. effektive Planung von Reparaturen oder des EoL, aber auch Nachteile durch z.B. Produktion LCTs
- **Kosten/Nutzen:** Aufwendungen für Integration vs. Nutzen

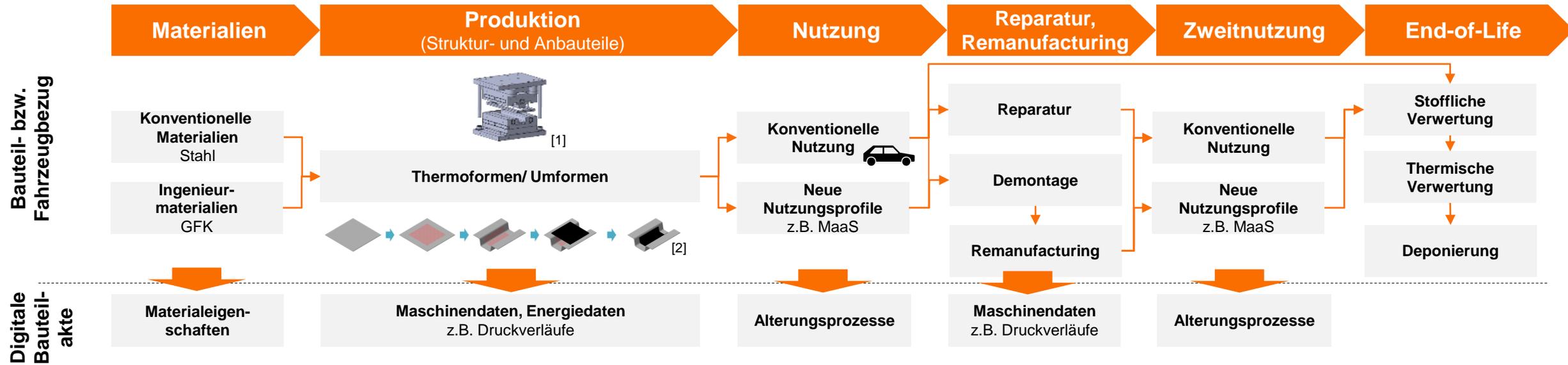


Veröffentlichungen: [1] Data-Driven Business Models for Life Cycle Technologies: Exemplary Planning for HybridComponents; Wilde et al. (2021)

4

Digitaler Lebenszyklus

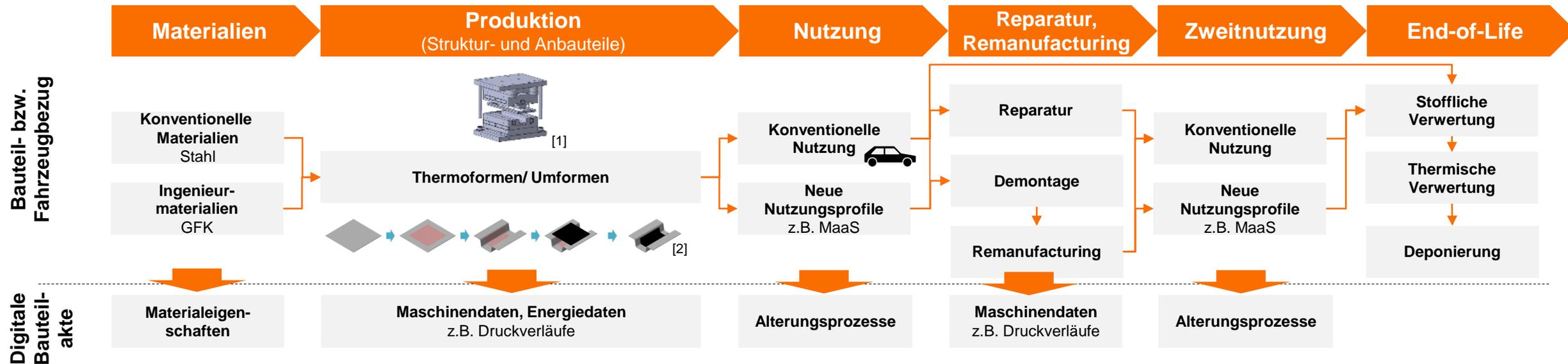
Digitaler Lebenszyklus - Digitale Bauteilakte und Datenakquise



Veröffentlichungen: [1] Data-Driven Business Models for Life Cycle Technologies: Exemplary Planning for HybridComponents; Wilde et al. (2021)
 [2] Ontology-based approach to support life cycle engineering: Development of a data and knowledge structure; Wilde et al. (2022)

Bildquellen: [1] TU BS IWF, [2] TU BS ifs, [3] FhG IST

Digitaler Lebenszyklus - Digitale Bauteilakte und Datenakquise



- Höhere Datenverfügbarkeit in jeder Lebenszyklusphase führt zu Möglichkeit bessere Vorhersagemodelle zu entwickeln
- Ganzheitliche Betrachtung und Optimierung des Lebenszyklus
- **Lösungsbaustein:** Digitales Abbild jeder Lebenszyklusphase
 - Konzept- und Methodenentwicklung zur Datenerfassung, -verarbeitung und Bewertung produktindividueller Nutzungs- und Verwertungspfade

Veröffentlichungen: [1] Data-Driven Business Models for Life Cycle Technologies: Exemplary Planning for HybridComponents; Wilde et al. (2021) Bildquellen: [1] TU BS IWF, [2] TU BS ifs, [3] FhG IST
 [2] Ontology-based approach to support life cycle engineering: Development of a data and knowledge structure; Wilde et al. (2022)

Digitaler Lebenszyklus - Digitale Bauteilakte und Datenakquise

Datenbasierte Optimierung des Fertigungsprozesses

- Technologieentwicklung zur Erhöhung des Einsatzpotenzials
- Konzept zur fertigungsbegleitenden Datenerfassung und -auswertung (Lebenszyklusperformance)
- Integration von Sensorik (LCTs)

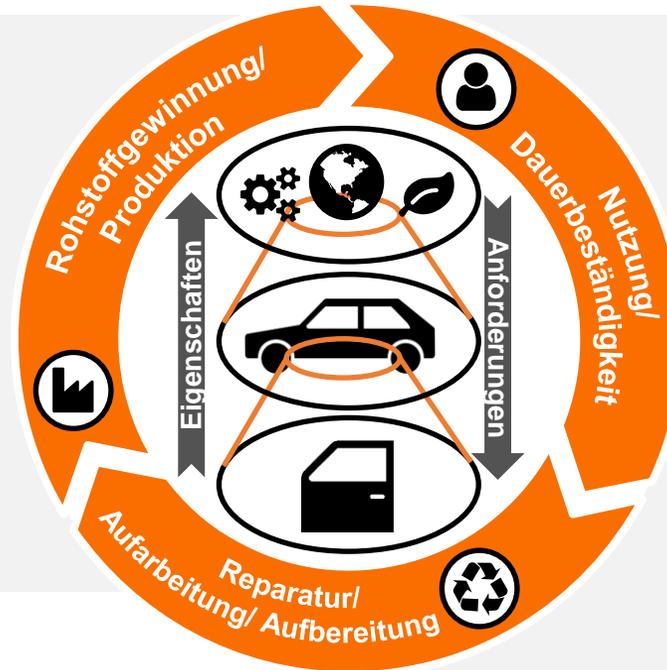


Abbildung der Nutzungsphase

- Abbildung des Lebenszyklus (Alterung und Schädigung)
- Multiskalenmodell des Lebenszyklus inklusive der Randbedingungen

Reparatur, Aufarbeitung und Aufbereitung

- Verfahren für geschädigten und gealterten Bauteile

- **Ökonomische** (LCC) und **ökologische** Bewertung (LCA) der gesamten Lebenszyklen
- **Leitfaden** zur Anwendung der Methodik für die lebenszyklusübergreifende Auslegung von Technologien auf Basis ökonomischer, ökologischer und funktionaler Kriterien

Digitaler Lebenszyklus - Digitale Bauteilakte und Datenakquise

Datenbasierte Optimierung des Fertigungsprozesses

- Technologieentwicklung zur Erhöhung des Einsatzpotenzials
- Konzept zur fertigungsbegleitenden Datenerfassung und -auswertung (Lebenszyklusperformance)
- Integration von Sensorik (LCTs)

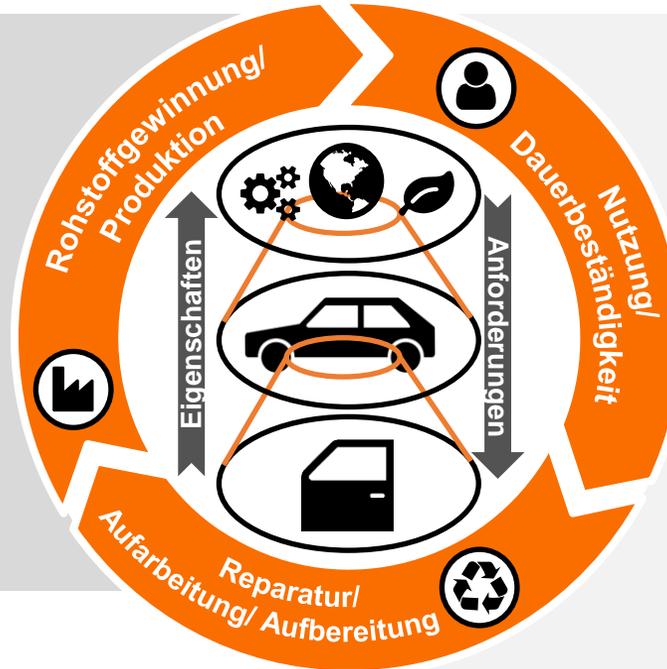


Abbildung der Nutzungsphase

- Abbildung des Lebenszyklus (Alterung und Schädigung)
- Multiskalenmodell des Lebenszyklus inklusive der Randbedingungen

Reparatur, Aufarbeitung und Aufbereitung

- Verfahren für geschädigten und gealterten Bauteile

- **Ökonomische** (LCC) und **ökologische** Bewertung (LCA) der gesamten Lebenszyklen
- **Leitfaden** zur Anwendung der Methodik für die lebenszyklusübergreifende Auslegung von Technologien auf Basis ökonomischer, ökologischer und funktionaler Kriterien

Digitaler Lebenszyklus - Datenerfassung mittels Sensorik

Temperaturdatenerfassung für Öfen

- Kontinuierliche Datenaufnahme aller verbauten Thermoelement
- Temperaturdaten werden an Server gesendet und können zentral ausgelesen werden
- Visualisierung der Daten über [Grafana](#) Dashboard



Digitaler Lebenszyklus - Datenerfassung mittels Sensorik

Energiedatenerfassung mittels SmartPi

- Mobiles Messgerät
- Erfassung von Energiedaten für alle Maschinen der Prozesskette (CNC-Cutter, CNC-Fräsen, Autoklav, Ofen, Presse, ...)



Quelle: emanager.eu

Drag and Drop or Select Files

Select quantity:
Energy

Select date
02/09/2023 → 02/09/2023

Select start time:
11:07:35

Select end time:
22:07:35

Energy consumption:

| Name | Energy [Wh] |
|--------------|-------------|
| Energy 1 | 26549 |
| Energy 2 | 29298 |
| Energy 3 | 29911 |
| Total energy | 85758 |



Digitaler Lebenszyklus - Datenerfassung mittels Sensorik

Integration von DuraAct™-Flächenwandlern



Aushärtegrad (Aktiv)

- Detektion des Aushärtezustandes
- Änderung der Amplituden und Dämpfung



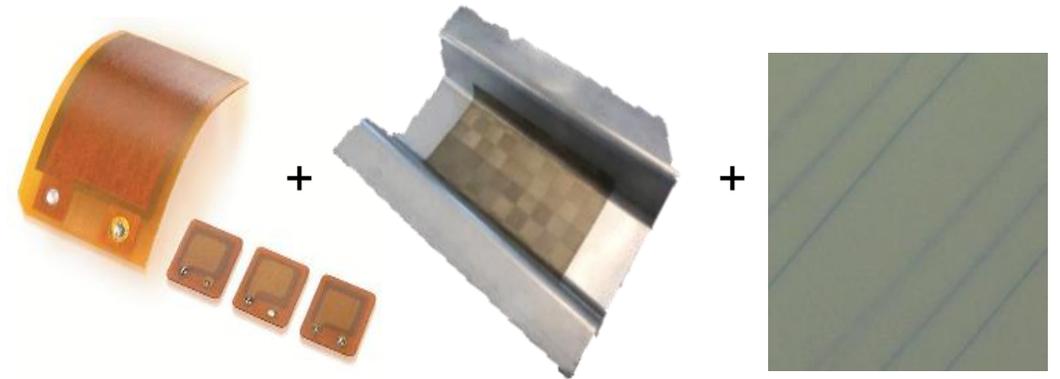
Impactereignisse (Passiv)

- Detektion von Strukturschädigungen
- Wandlung mechanischer in elektrischer Energie



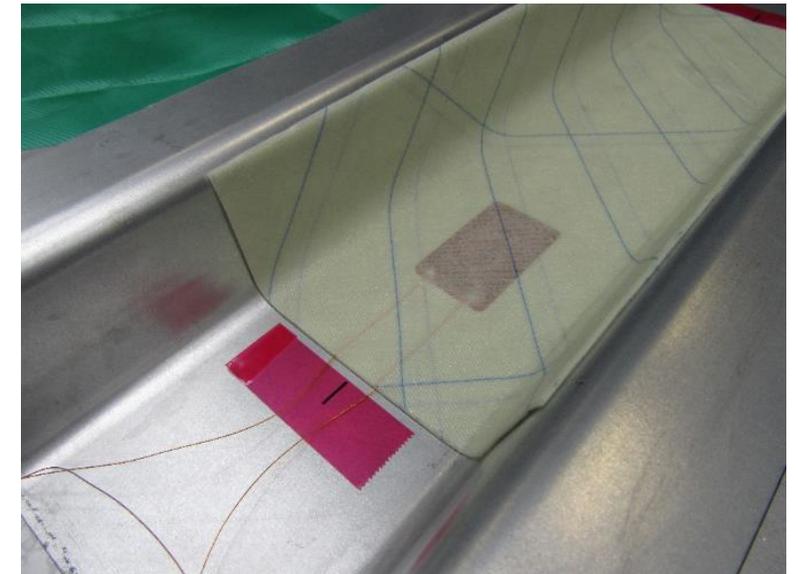
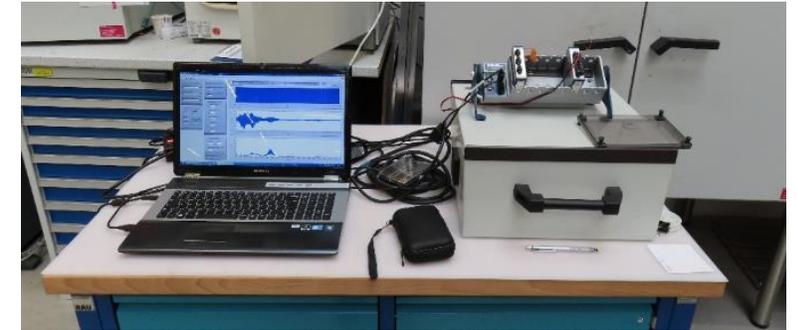
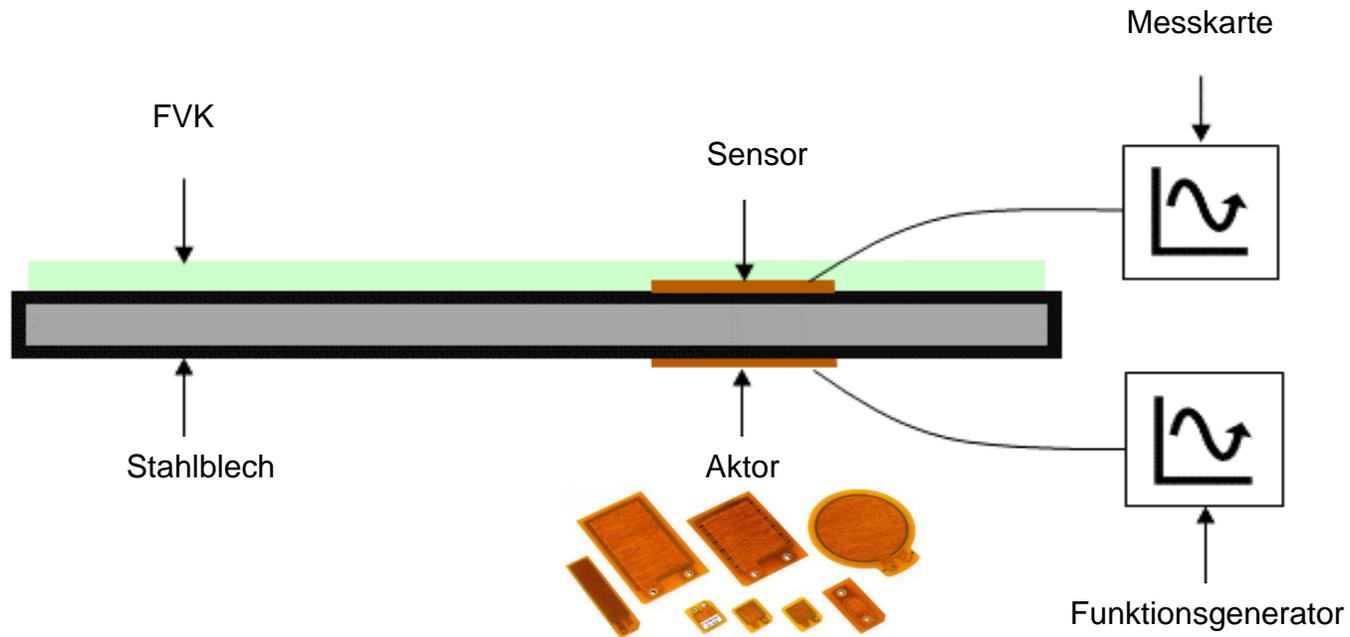
Strukturüberwachung (Aktiv)

- Detektion von Delaminationen in dem Verbund und der Grenzschicht
- Änderung der Amplituden und Dämpfung



Digitaler Lebenszyklus - Datenerfassung mittels Sensorik

Integration von DuraAct™-Flächenwandlern

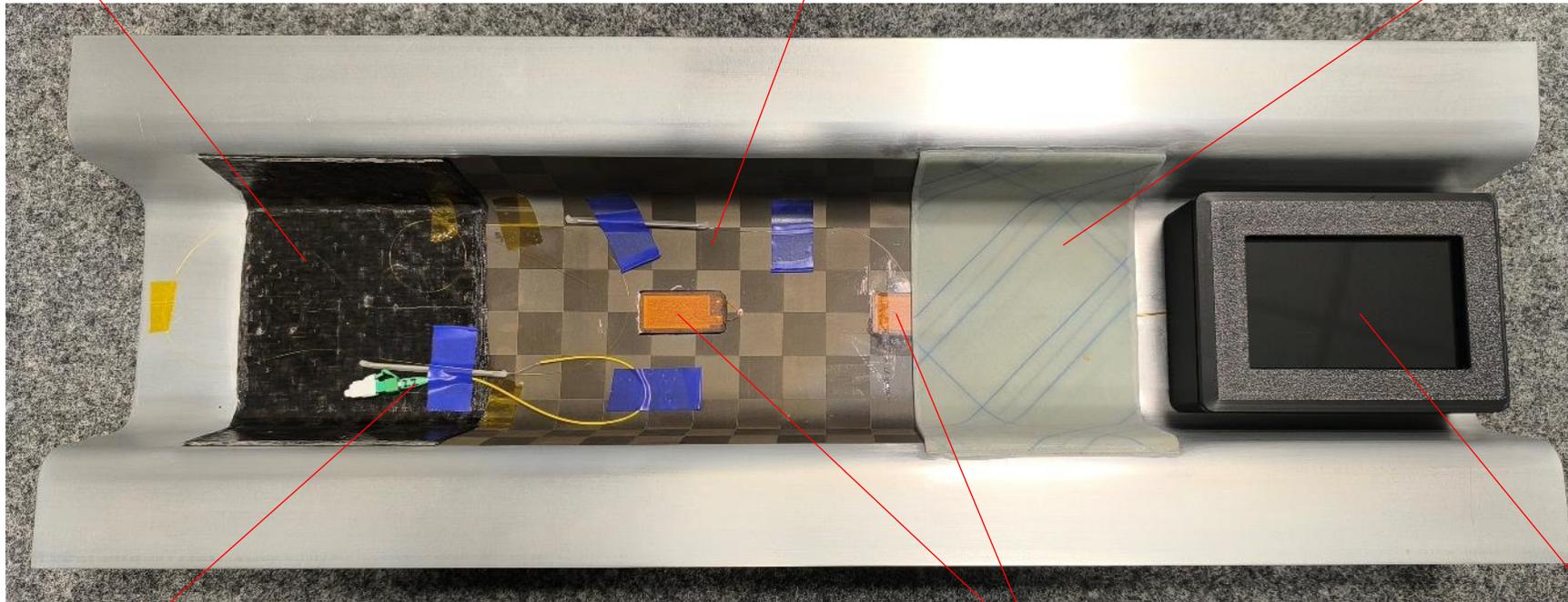


Digitaler Lebenszyklus - Datenerfassung mittels Sensorik

GFK/PA6-Thermoplast

Laserstrukturierte Oberfläche

Glasfaserprepreg



Faseroptischer Sensor inkl. Pigtails(FOS)

Piezoelektrischer DuraAct™-Flächenwandler

DAQ

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

Material- und Grenzschichtcharakterisierung

Quasistatische Zug- und Schubversuche an GFK-Proben → Bestimmung der elastischen Eigenschaften.

Schäl-, Zugscher- und Biegeversuche an Hybrid-Proben → Inputs für Simulationen.

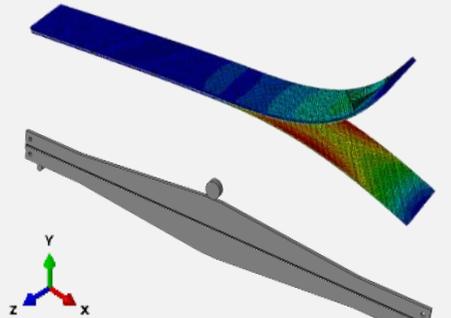


Inputs für Material- und Grenzschicht-simulationen



Grenzschichtsimulation auf Probenebene

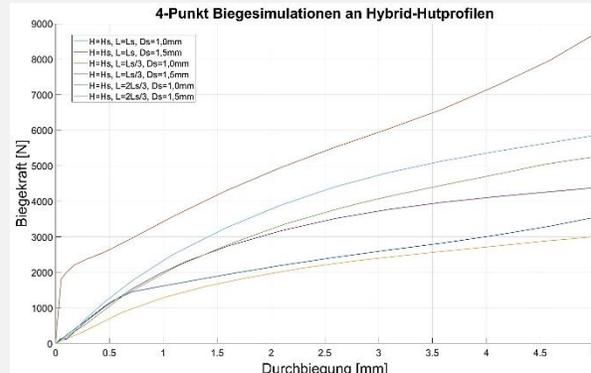
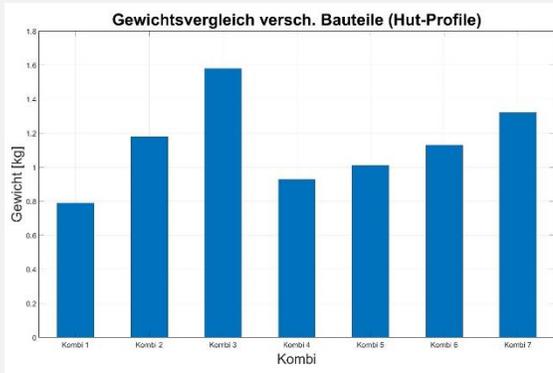
Kohäsivzonenmodellierung (CZM) zur Verifizierung von experimentell bestimmten Grenzschichteigenschaften (Inputs für das Bauteilmodell)



Verifizierte Eigenschaften als Inputs



Performance Vorhersage als Basis für LCA



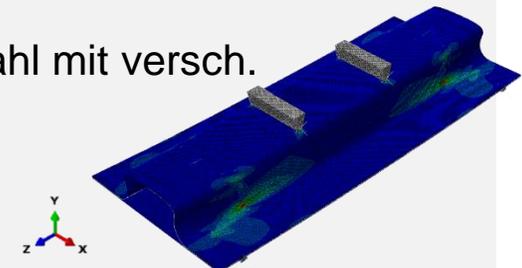
Performance-Gewichtsanalyse

Ergebnisse aus Simulationen



Bauteilmodellierung (Demonstrator)

- 3/4-Punkt-Biege- und Klimawechselsimulationen an Hut-Profilen
 - Hybrid mit versch. Blechdicken und GFK Patch-Größen
 - Monolithischer Stahl mit versch. Stärken



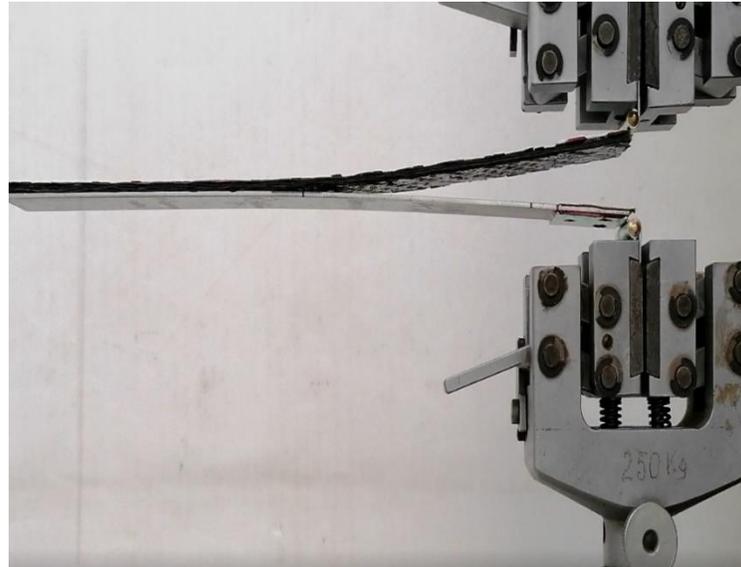
Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Versuche



Zugversuche an GFK Proben

Bestimmung von:
 E, ν, G (Engineering Constants)

- Elastische Kennwerte (E, ν) von Stahl aus Datenblatt genommen.



Mode-I Schälversuche an Double Cantilever Beam (DCB) Proben

Bestimmung von:
Energiefreisetzungsrate (Mode-I):
 G_{Ic}



Mode-II 3-Punkt-Biegeversuche an Tapered End Notch Flexure (TENF) Beam Proben

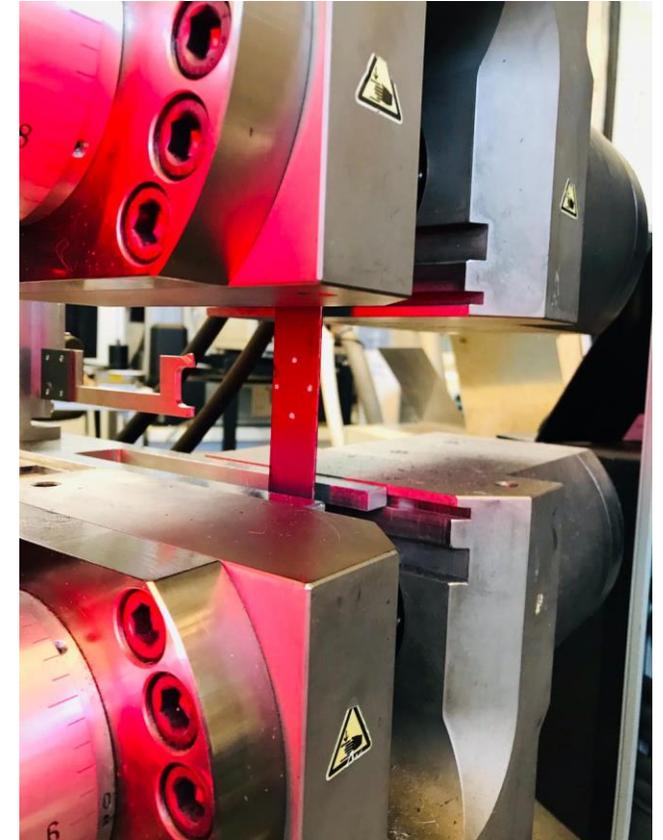
Bestimmung von:
Energiefreisetzungsrate (Mode-II): G_{IIc}

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Zug- und Schubversuche

- Zugversuche nach DIN EN ISO 527-4 (Kette- und Schußrichtungen)
- Schubversuche nach DIN EN ISO 14129
- GFK-Proben, Abm. 250 x 25 x 2mm (siehe Bilder)
- Prüfanlage: Instron 150
- Dehnungsmesssystem: Videoextensometer
- Prüfgeschwindigkeit: 2 mm/min
- Bestimmung elastischer Kennwerte des GFK für die Simulationen:
 - ENGINEERING CONSTANTS:
↳ $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$
Elastizitätsmodule Poissonzahlen Schubmodule
- Verifizierung der Eigenschaften durch Simulationen

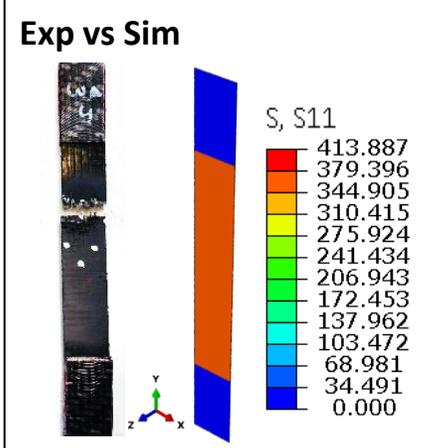
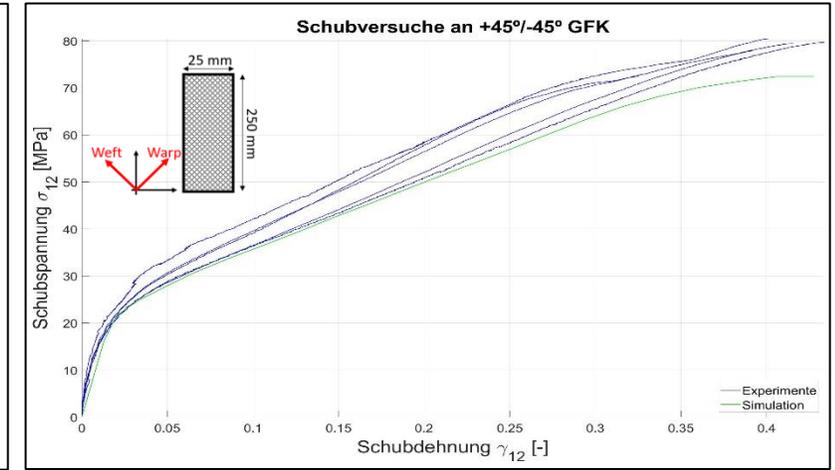
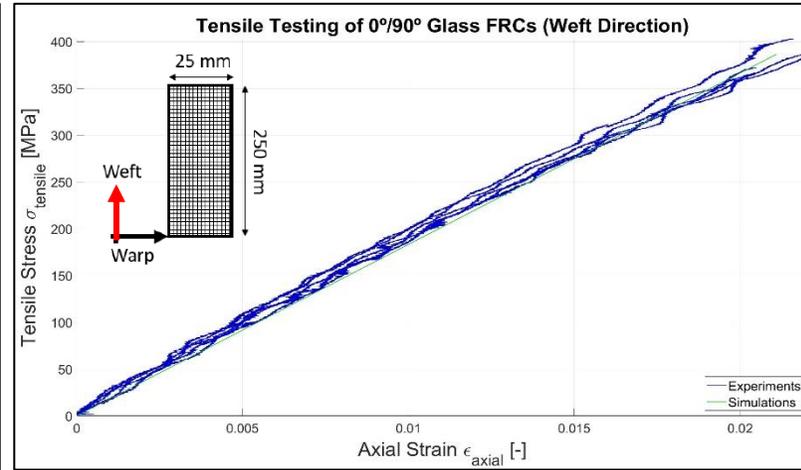
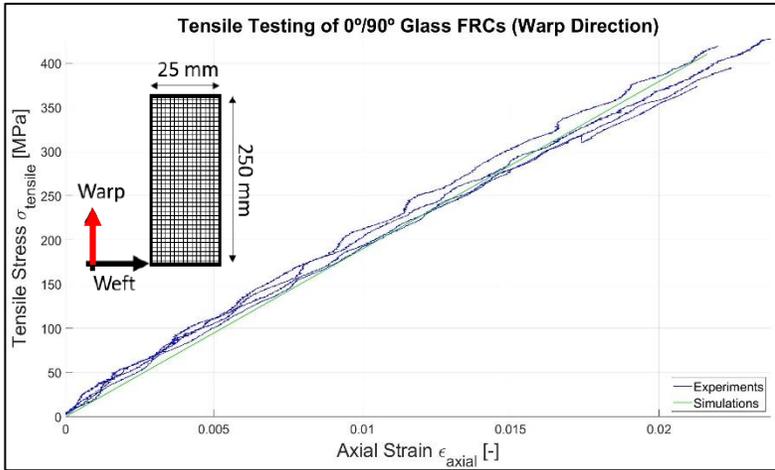


Lakierte GFK Probe

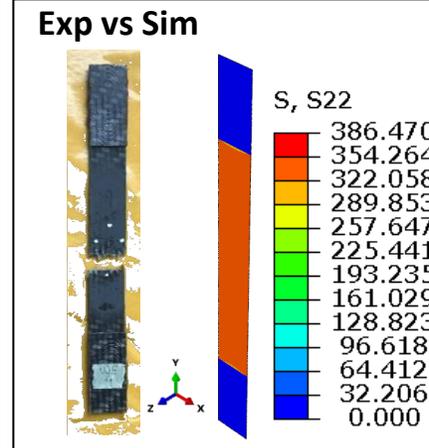


Instron 150 Prüfanlage mit Videoextensometer

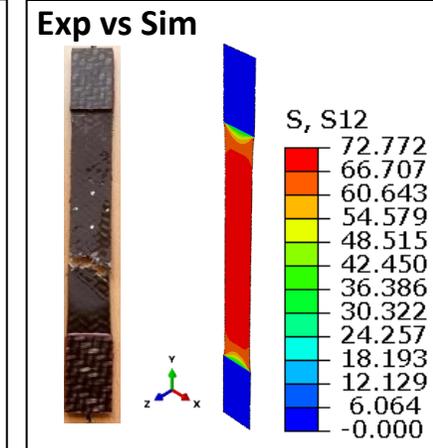
Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethode - Zug- und Schubversuche



Bestimmte Eigenschaften:
Norm: DIN ISO 527-4
 $E_1 = 21,025 \text{ Gpa}$
 $\nu_{12} = 0,14$
 $\sigma_{\text{max}} = 403,67 \text{ Mpa}$
 $\epsilon_{\text{axial,max}} = 0,02238$
 $\epsilon_{\text{quer,max}} = -0,00286$



Bestimmte Eigenschaften:
Norm: DIN ISO 527-4
 $E_2 = 19,381 \text{ Gpa}$
 $\nu_{21} = 0,15$
 $\sigma_{\text{max}} = 382,42 \text{ Mpa}$
 $\epsilon_{\text{axial,max}} = 0,02134$
 $\epsilon_{\text{quer,max}} = -0,00155$

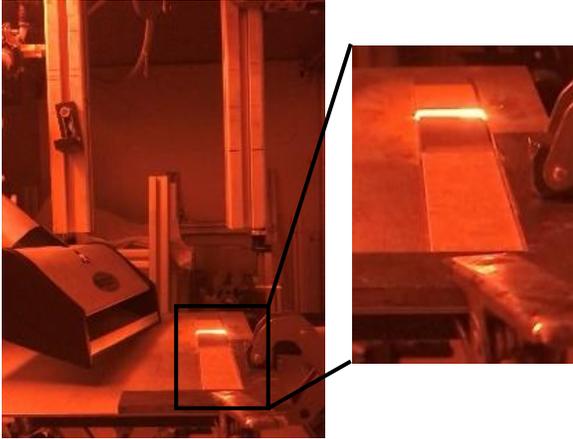


Bestimmte Eigenschaften:
Norm: DIN ISO 14129
 $G_{12} = 1,876 \text{ Gpa}$
 $\gamma_{12} = 0,40026$
 $\sigma_{12} = 78,16 \text{ Mpa}$
G-Modul:
 $G_{12} = \frac{\sigma_{0.005} - \sigma_{0.001}}{0.005 - 0.001}$

- Gute Übereinstimmung zwischen experimentell bestimmten Kennwerte und Eigenschaften aus Datenblatt.
- Die $\sigma - \epsilon$ Kurven aus Versuche und Simulationen stimmen sehr gut überein.

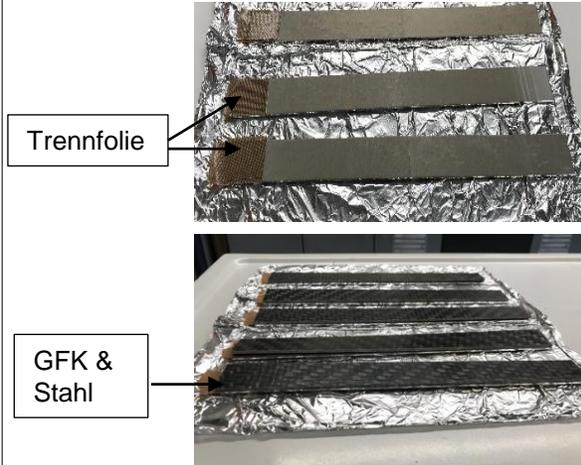
Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Probenherstellung

Metall-Oberflächenbehandlung



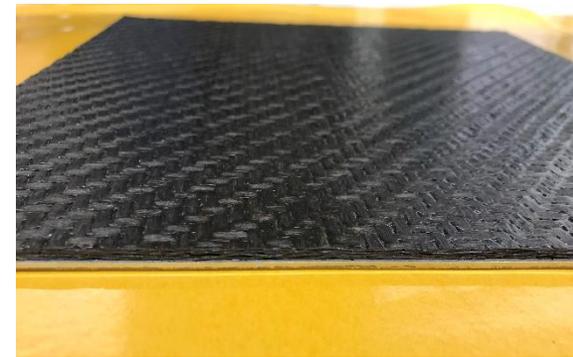
- Rechteckige Proben für DCB und Streifen für TENF
- Laservorbehandlung:
 - Geschwindigkeit: 2000 mm/s
 - Frequenz: 55 kHz
 - Leistung: 100

Vorbereitung Probekörper



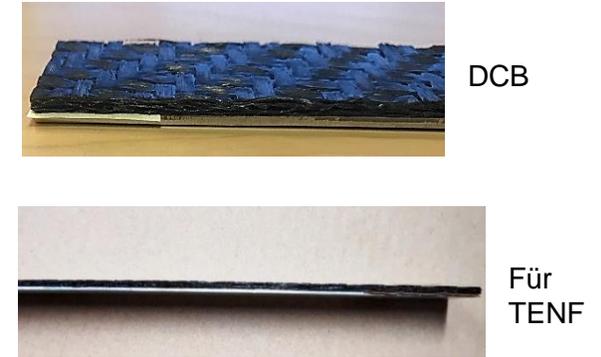
- Reinigung der GFK und Stahloberflächen mit Isopropanol
- Teflon-Trennfolien: Anriss für DCB und TENF-Proben

Herstellung (Pressprozess)



- Vorwärmen von GFK und Stahl bei 270 °C (5-7min)
- Pressprozess:
 - Temperatur: 110 °C
 - Zeit: 10 min
 - Druck: Verschiedene (Für DCB)

Probe für die Versuche



- Langer Anriss bei TENF Proben
- TENF Fügeiteile an Streifen gefügt
- Scharniere an DCBs zum Einspannen in Versuchsvorrichtung

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Mode-I Schälversuche

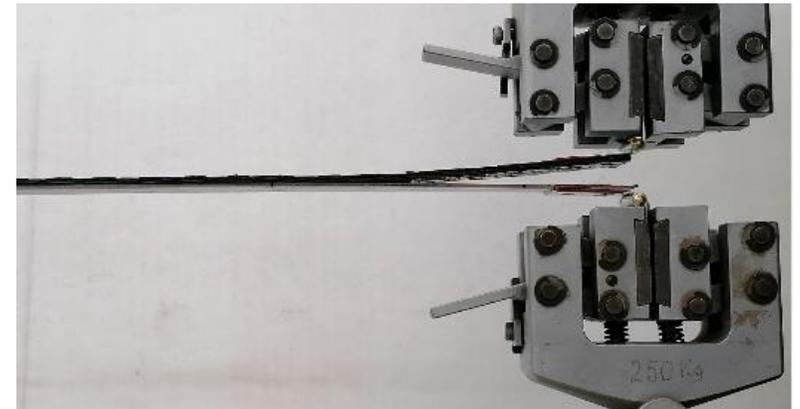
- Mode-I Schältests nach DIN EN 6033
- GFK-Stahl DCB proben, Abm. 250 mmx 25 mm (siehe Bilder)
- Prüfanlage: Zwicky 1 kN

- Prüfphase:
 - Anriss: Traversenweg bis zum Vorriss (25mm) mit 1 mm/min
 - Haltephase: Traversenweg bleibt Konstant
 - Weiterreißen: Traversenweg bis zum gesamten Risslänge (100mm) mit 10 mm/min
 - Ende der Prüfung (Entladung)

- Bestimmung Energiefreisetzungsrate von Mode-I (G_{Ic}) für die Simulationen
- Verifizierung der Eigenschaften durch Simulationen (Kohäsivzonenmodell)



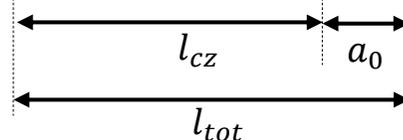
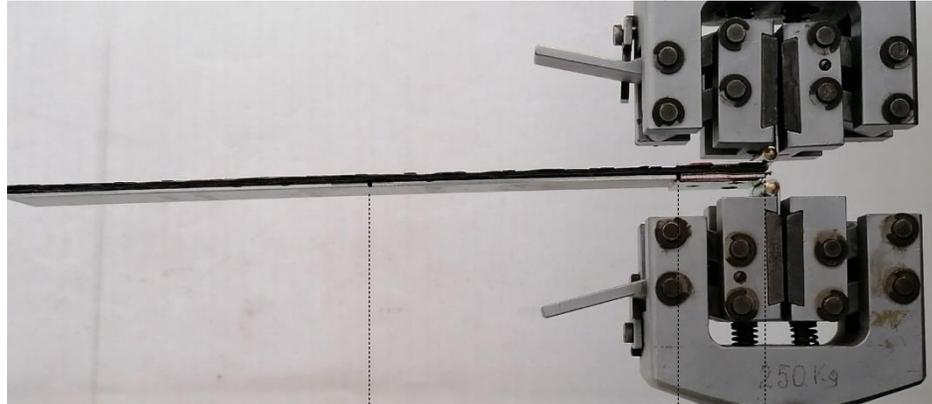
DCB Probe nach DIN EN 6033



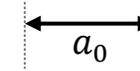
Schältests (Mode-I) an DCB Proben, Zwicky 1kN Prüfanlage

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethode - Mode-I Schälversuche

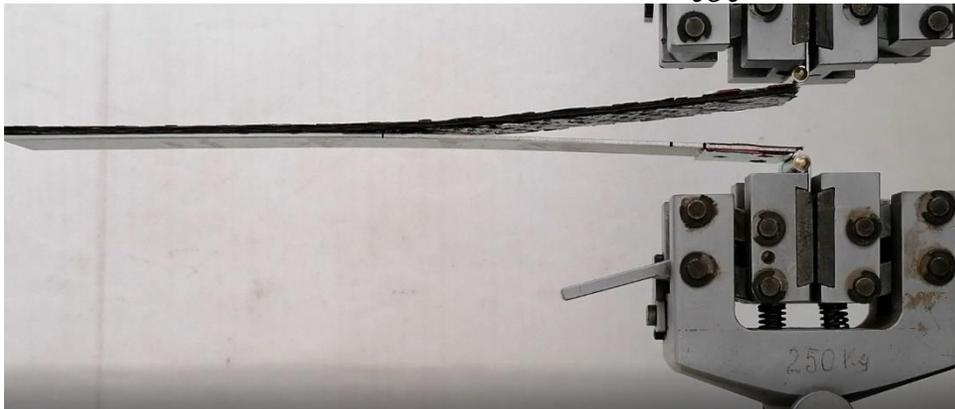
Phase 0: Vor der Prüfung



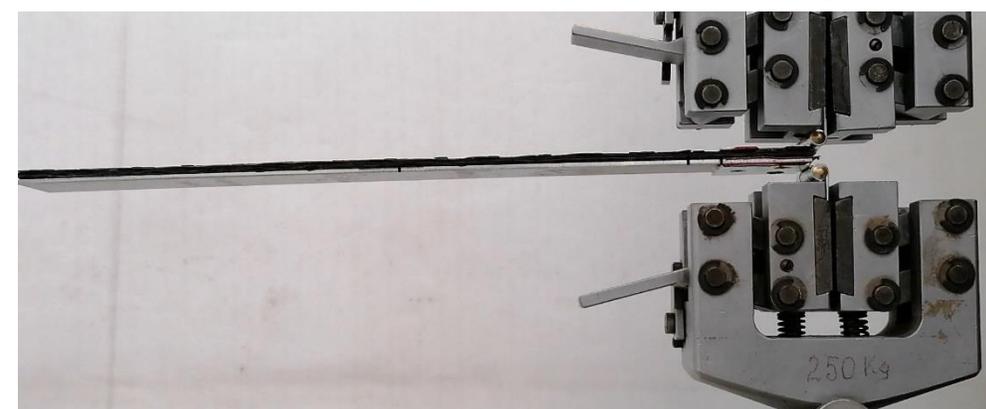
Phase 1 & Phase 2: Anriss (a_0) und Haltephase



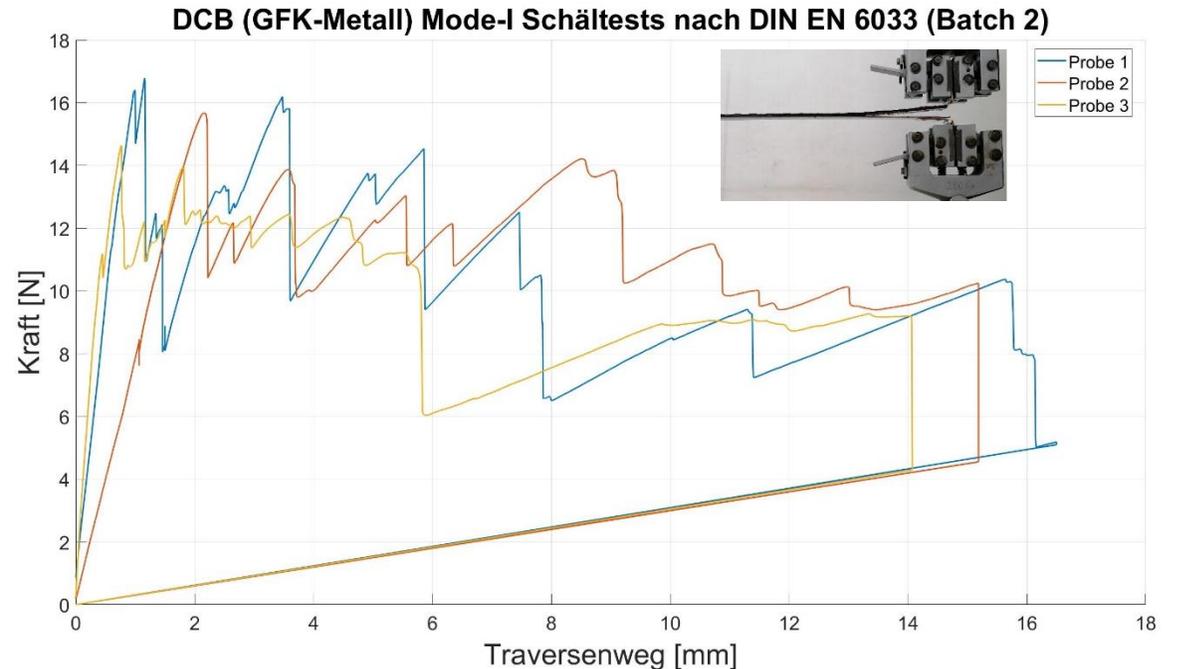
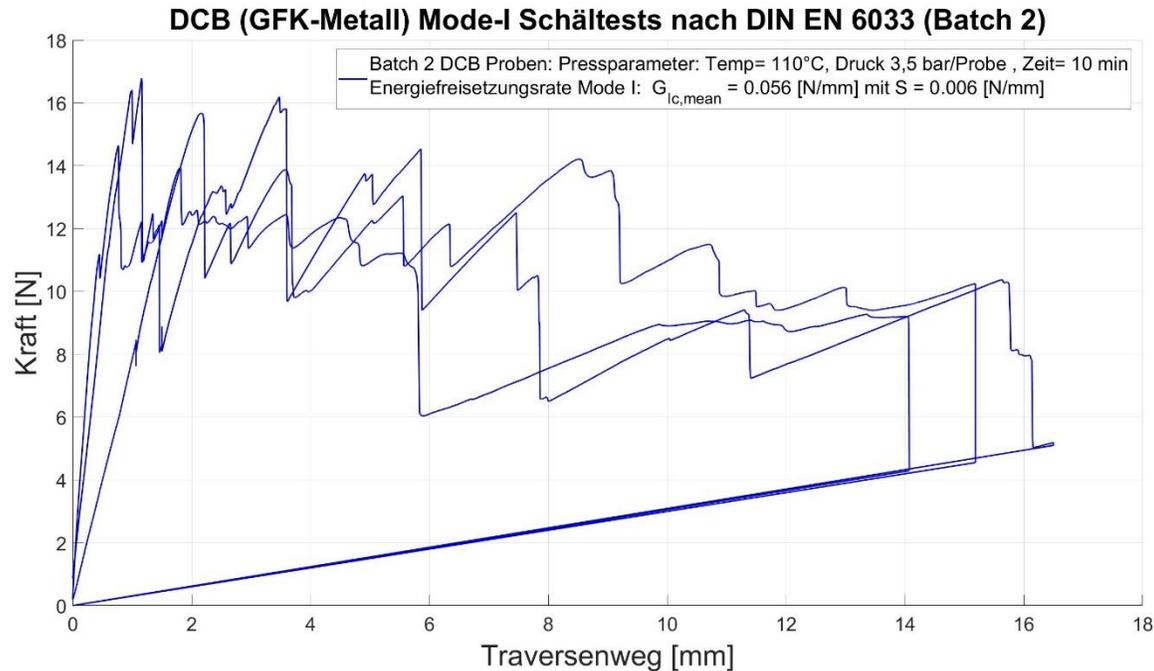
Phase 3: Weiterreißen bis zum l_{tot}



Phase 4: Entladung (Ende der Prüfung)



Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Mode-I Schälversuche



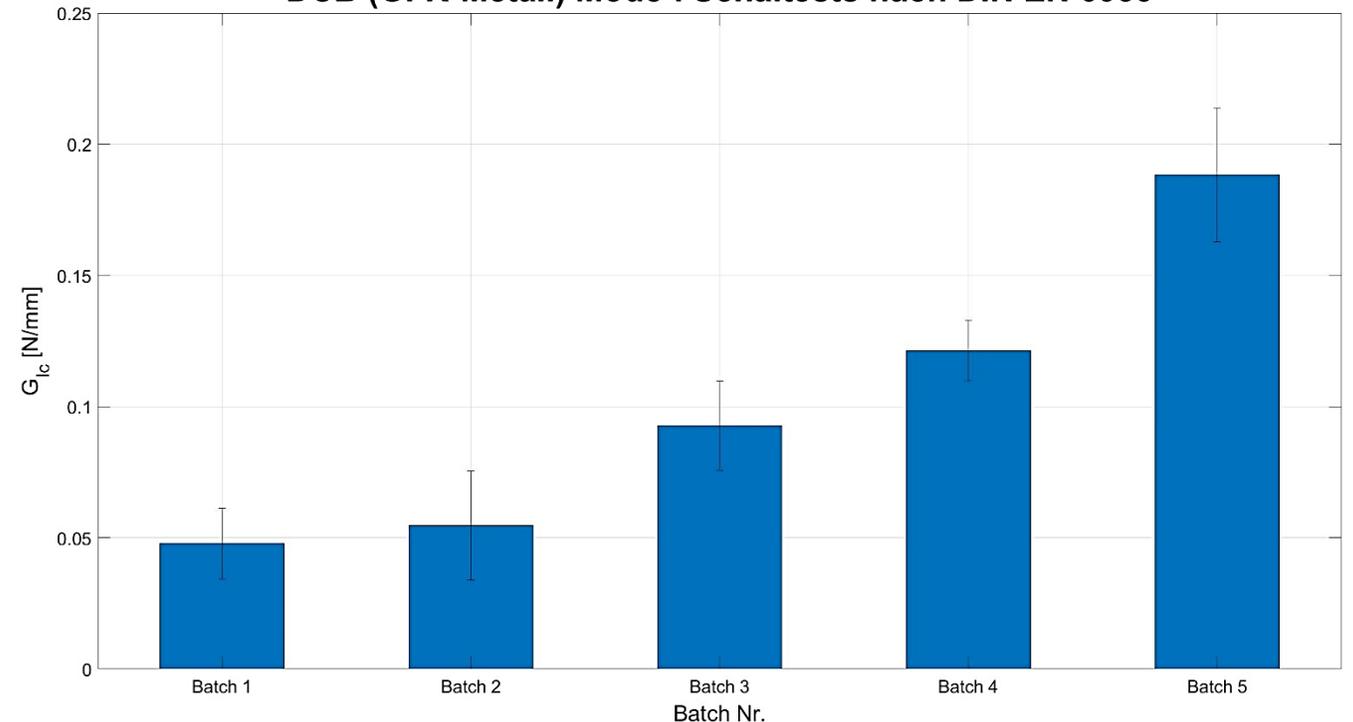
- Nach der ersten lokalen Delamination beginnt die Kraft abzunehmen
- Auf der Probe sind An- und Endrisspunkte markiert
- Zur Hilfe bei der Auswertung der Ergebnisse werden Videos der Versuche aufgezeichnet
- Die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve → Gesamtbruchenergie
- Abweichungen in den Ergebnissen nach der ersten lokalen Delamination beobachtet: Mittelwert von G_{IC} berechnet

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden - Mode-I Schälversuche

Ergebnisse ($G_{Ic}=f(P)$)

| Batch Nr. | Prozessparameter | | | G_{Ic} [N/mm] |
|-----------|------------------|-------------------|---------|-----------------|
| | T [°C] | P [bar] (5 Probe) | t [min] | |
| 1 | 110 | 15 | 10 | 0,048 |
| 2 | | 17,5 | | 0,056 |
| 3 | | 20 | | 0,0927 |
| 4 | | 22,5 | | 0,1214 |
| 5 | | 25 | | 0,1882 |

DCB (GFK-Metall) Mode-I Schältests nach DIN EN 6033



- G_{Ic} bei dem höheren Druck hergestellten DCBs höher.
- bei dem Pressdruck über 25 bar (für 5 Proben) sind die Proben zu komprimiert und können nicht verwendet werden

Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethode - Mode-II 3-Punkt-Biegeversuche, Bestimmung G_{IIc}

- 3-Punkt-Biegeversuche nach Marzi *et al* an:
 - TENF-Proben, Abm: 740mm x 6mm
 - Prüfanlage: Instron 150 bei 0,05 mm/min
- Bestimmung der kritischen Last (P_c), um den Riss auszulösen.
- Risswachstum ist auf das Plateau in F- δ Kurve ausgewertet.
- Probe mit versch. Anrisslänge (a):
→ a= 115mm, 125mm, 135mm, 145mm, 155mm

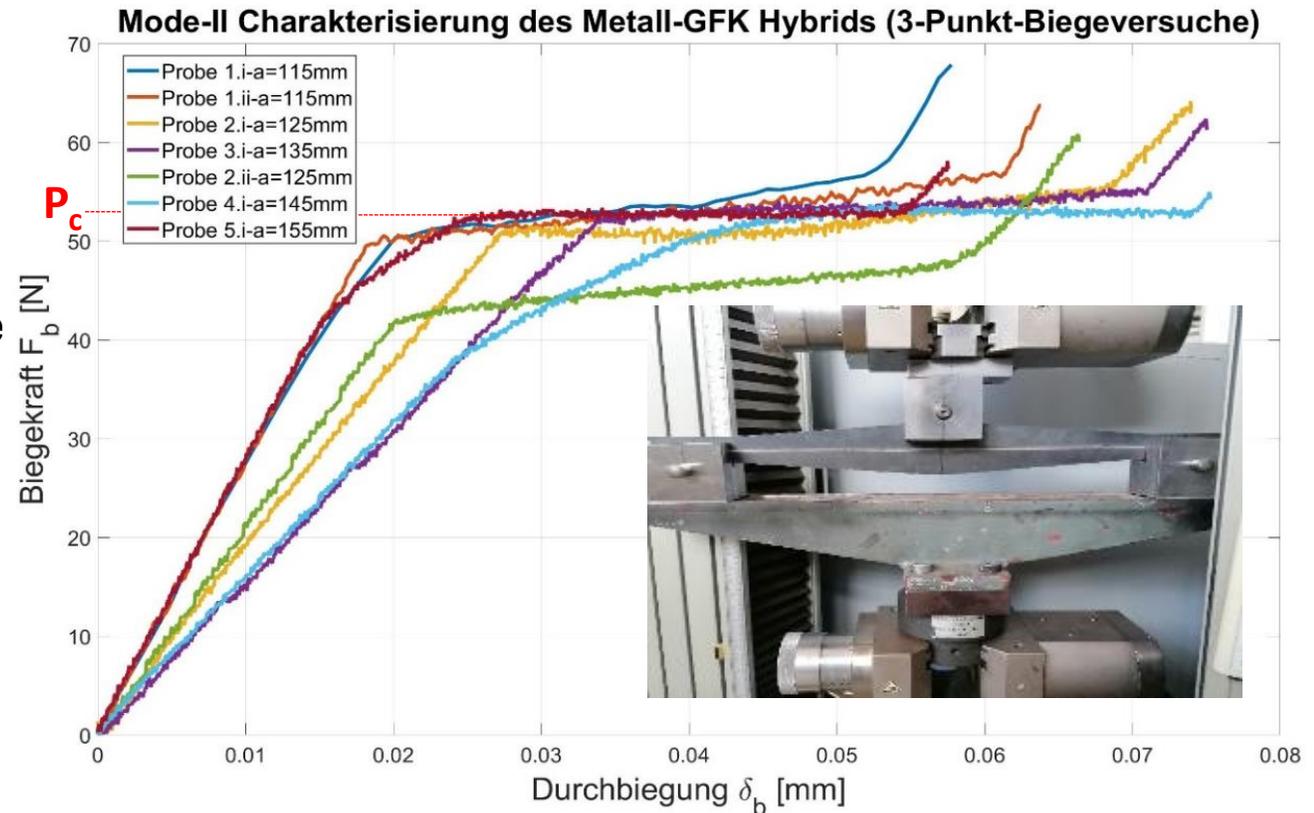
$$G_{IIc} = \frac{P_c^2}{2b} \left(\frac{\partial C}{\partial a} \right)$$

→ Compliance-Method [Marzi *et al.*]

b = Breite der Probe (mm)

$\left(\frac{\partial C}{\partial a} \right)$ = Nachgiebigkeit-Differenzial

a = Anrisslänge (mm)

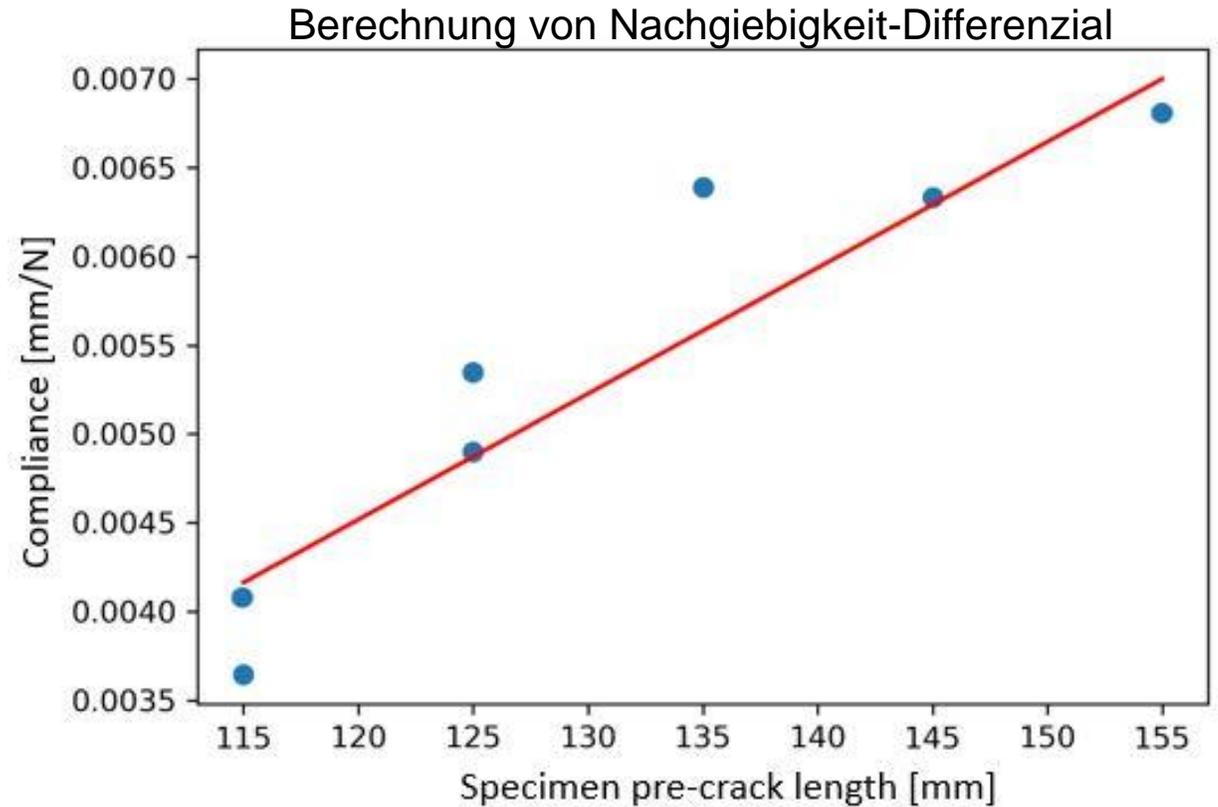


Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethode - Mode-II 3-Punkt-Biegeversuche, Bestimmung G_{IIc}

| Specimen number | K [N/mm] | $C = \frac{1}{K}$ [mm/N] |
|-----------------|---------------|--------------------------|
| 1a | 2571.90 | 3.88×10^{-4} |
| 1b | 2741.176 | 3.648×10^{-4} |
| 2a | 1869.56 | 5.3488×10^{-4} |
| 2b | 2095.945 | 4.77×10^{-4} |
| 3a | 1564.84 | 6.39×10^{-4} |
| 4b | 1578.996 | 6.333×10^{-4} |
| 5b | 1553.591 | 6.43×10^{-4} |

Steifigkeit

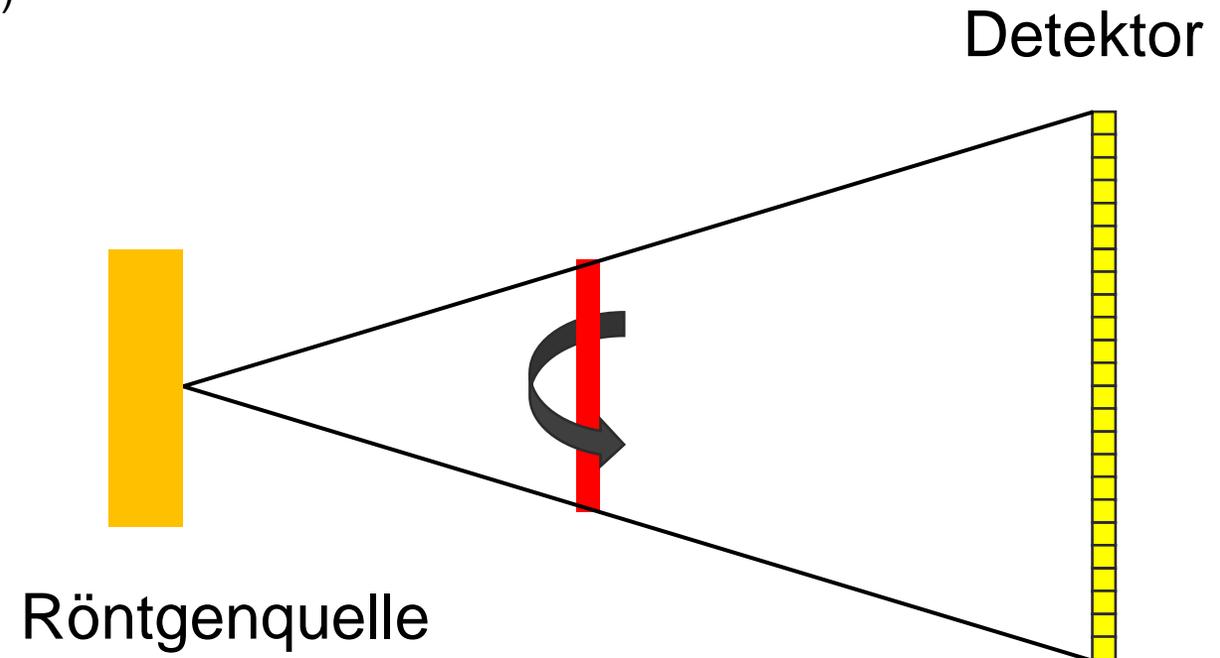
Nachgiebigkeit



$$G_{IIc} = \frac{P_c^2}{2b} \left(\frac{\partial C}{\partial a} \right) \approx 0,02 \text{ N/mm}$$

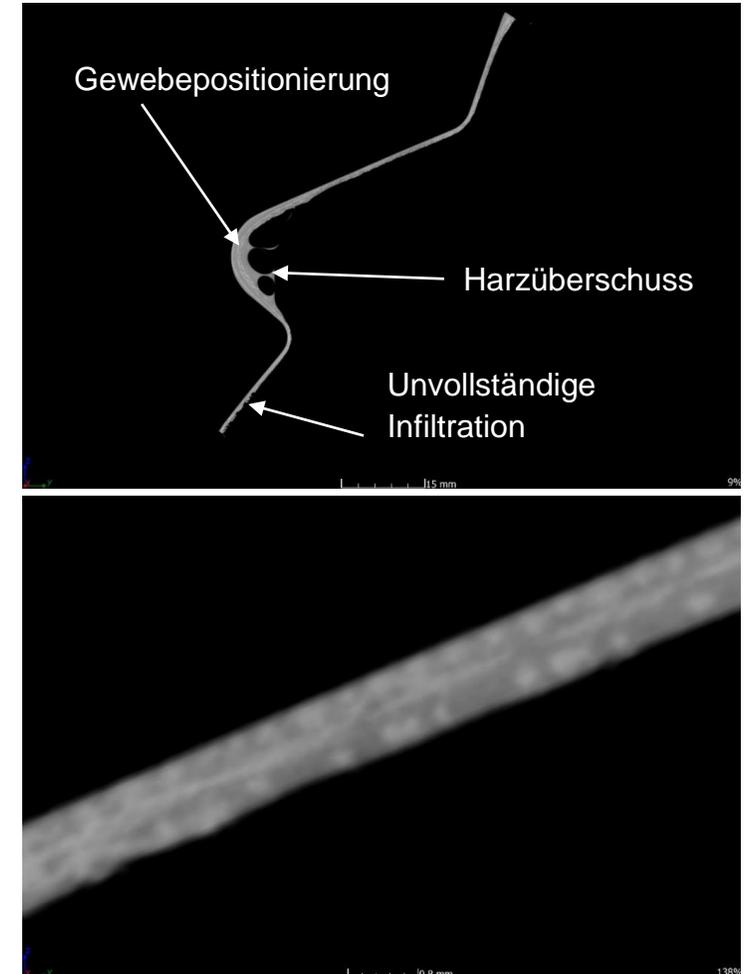
Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

- Zerstörungsfreie Prüfung: Computer-Tomographie
- Eine CT-Aufnahme ist ein dreidimensionales Röntgenbild ...
 - ... bestehend aus Bildwürfeln (Voxeln, analog zu Pixeln)
 - ... mit unterschiedlichen Grauwerten (16 Bit)
- Vorgehen
 - Radiographie der Probe anfertigen („Projektion“)
 - Probe um ca. 0,2 Grad drehen
 - Weitere Projektion aufnehmen
 - Usf. bis Umdrehung komplett
 - Projektionen zu dreidimensionalem Bild umrechnen
 - „Rekonstruktion“



Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

- Zerstörungsfreie Prüfung: Computer-Tomographie
- Zusammenhang Messvolumen und Auflösungsvermögen
 - Naturfaserverstärktes Bauteil: Heckklappe aus Carbonfaser / Naturfaser / Epoxidharz
 - Probengröße ca. 25 cm
 - Komplettscan mit einer Auflösung von 54 μm
 - Darstellung von Fehlstellen, Gewebepositionierung, Bauteilgeometrie
 - Einzelne Fasern werden nicht aufgelöst



Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

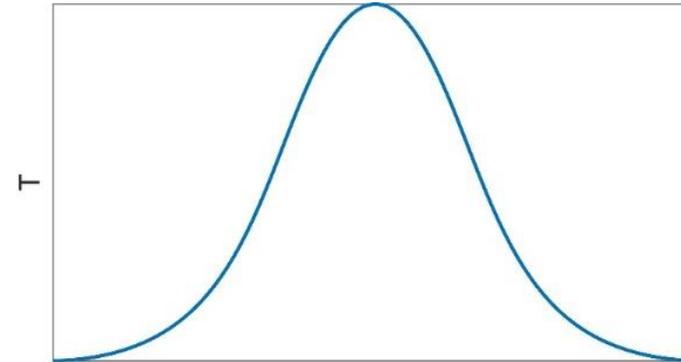
- Zerstörungsfreie Prüfung: Computer-Tomographie
- Zusammenhang Messvolumen und Auflösungsvermögen
 - Naturfaserverstärktes Bauteil: Heckklappe aus Carbonfaser / Naturfaser / Epoxidharz
 - Probengröße < 1 cm
 - Scan mit einer Auflösung von 3 μm
 - Einzelne Fasern werden aufgelöst



Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

- Zerstörungsfreie Prüfung: Wärmefluss-Thermographie

- Prinzip

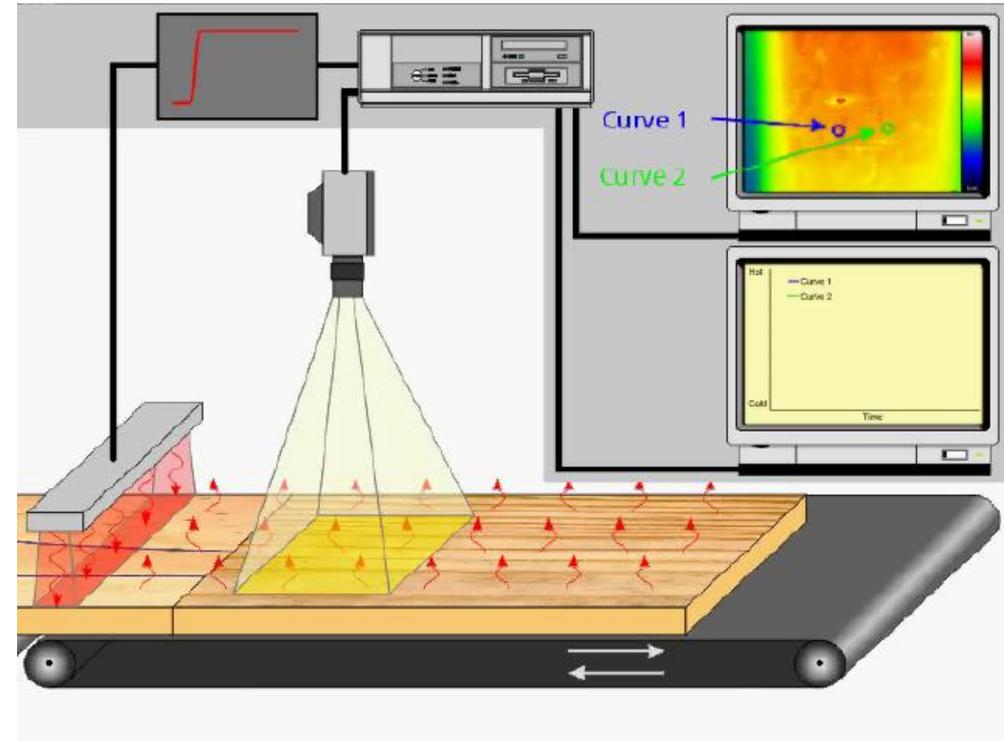
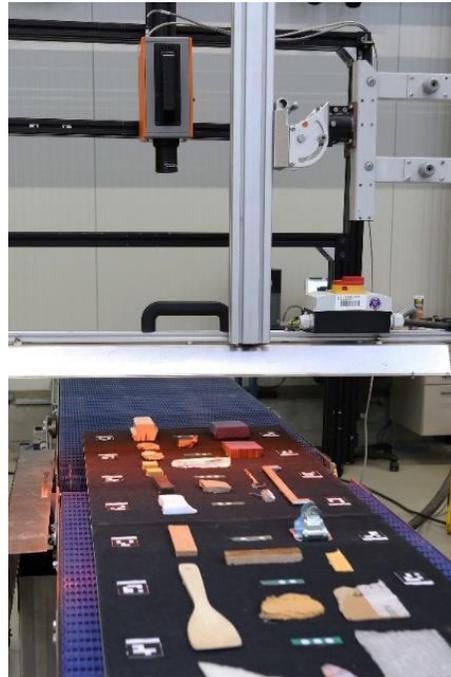


Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

■ Zerstörungsfreie Prüfung: Wärmefluss-Thermographie

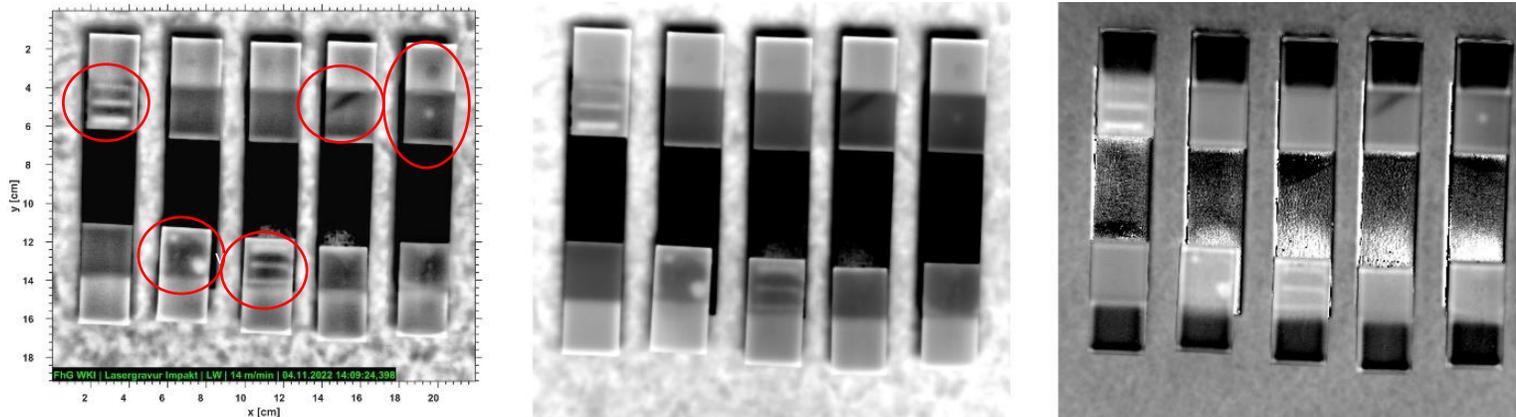
■ Durchführung

- IRCAM Geminis15 mK
- 640x512 Pixel
- 120 Hz



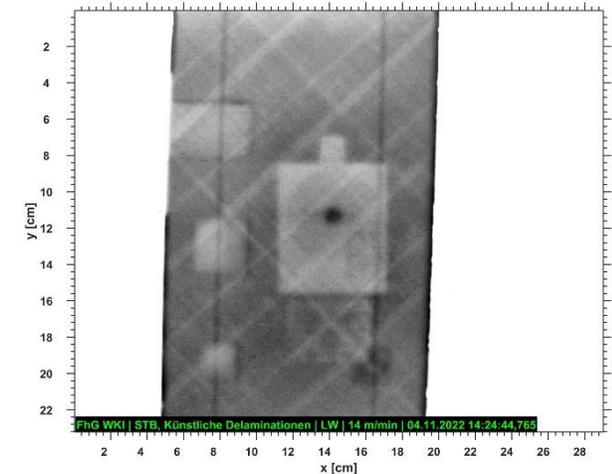
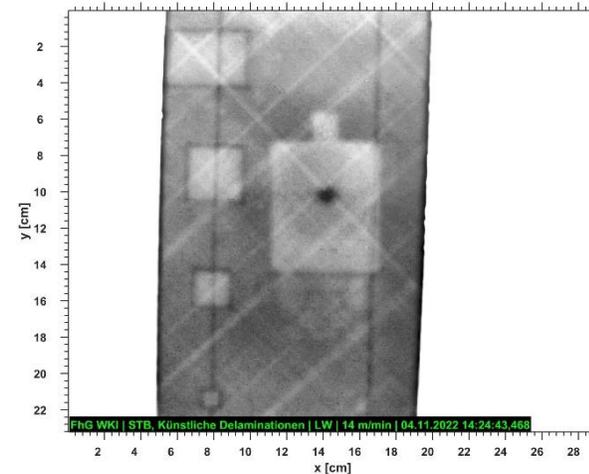
Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

- Zerstörungsfreie Prüfung: Wärmefluss-Thermographie
- Wärmefluss-Thermographie an Proben von INVENT
 - Thermographie-Bilder von künstlichen Impactschäden (rote Markierungen)
 - Links: Rohbild
 - Mitte und rechts: Amplituden- und Phasenbild



Digitaler Lebenszyklus - Materialien und Prüfmethoden

- Zerstörungsfreie Prüfung: Wärmefluss-Thermographie
- Wärmefluss-Thermographie an Proben von INVENT
 - Thermographie-Bilder unterschiedlicher Bereiche derselben Probe
 - Signaturen künstlicher Delaminationen (jeweils linke Bildhälfte)
 - Spiegelbild der Thermographie-Kamera (jeweils rechte Bildhälfte)



5

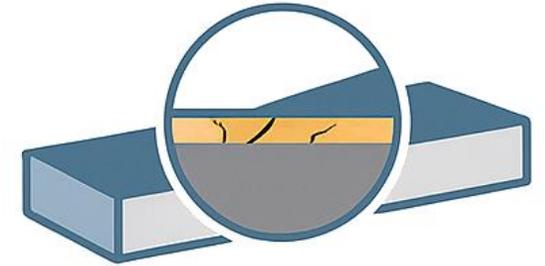
Nutzungsphase

Nutzungsphase - Beschleunigte Eigenschaftsentwicklung unter Umgebungseinflüssen



Motivation

- Einsatz in unterschiedlichen Klimazonen (z.B. Europa ↔ Asien) mit variierenden Umweltbedingungen
- Jahreszeitlich bedingte Belastungen (Temperatur, Feuchte, Salz)
- Kritische Beanspruchung der Grenzschicht zwischen Metall und Kunststoff



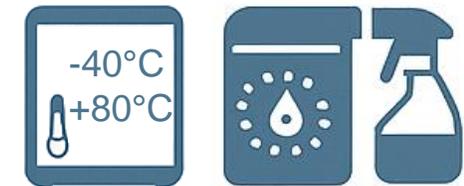
Ziel

- Kontinuierliche Bewertung der Langzeitstabilität unter realitätsnahen Einsatzbedingungen
- Identifikation material- und fügebedingter Alterungsmechanismen



Vorgehensweise

- Condition Monitoring bei zyklischen Klima- und Korrosionsprüfungen, z.B. nach PV2005 (-35 bis +80 °C, 30% - 80% rel. Luftfeuchte) oder PV1209 (5 Tage Salzsprühnebeltest, 2 Tage - 40 bis + 80 °C)



Nutzungsphase - Beschleunigte Eigenschaftsentwicklung unter Umgebungseinflüssen

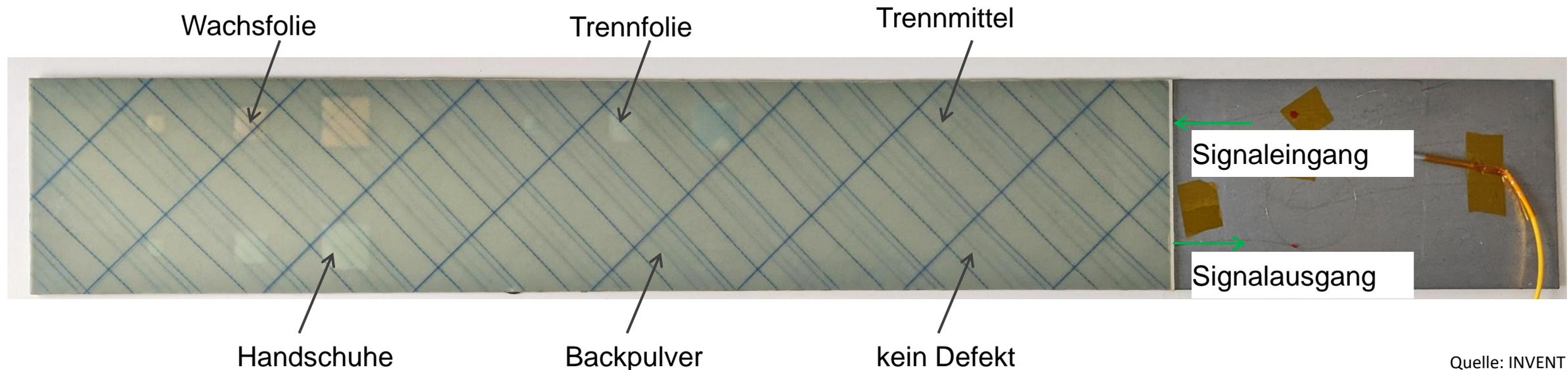
Fragestellung

- Können mit faseroptischen Sensoren (FOS) Schäden in der Grenzschicht festgestellt werden?

→ Überprüfung der Detektierbarkeit von Fehlstellen/Schäden mittels FOS

Vorgehen

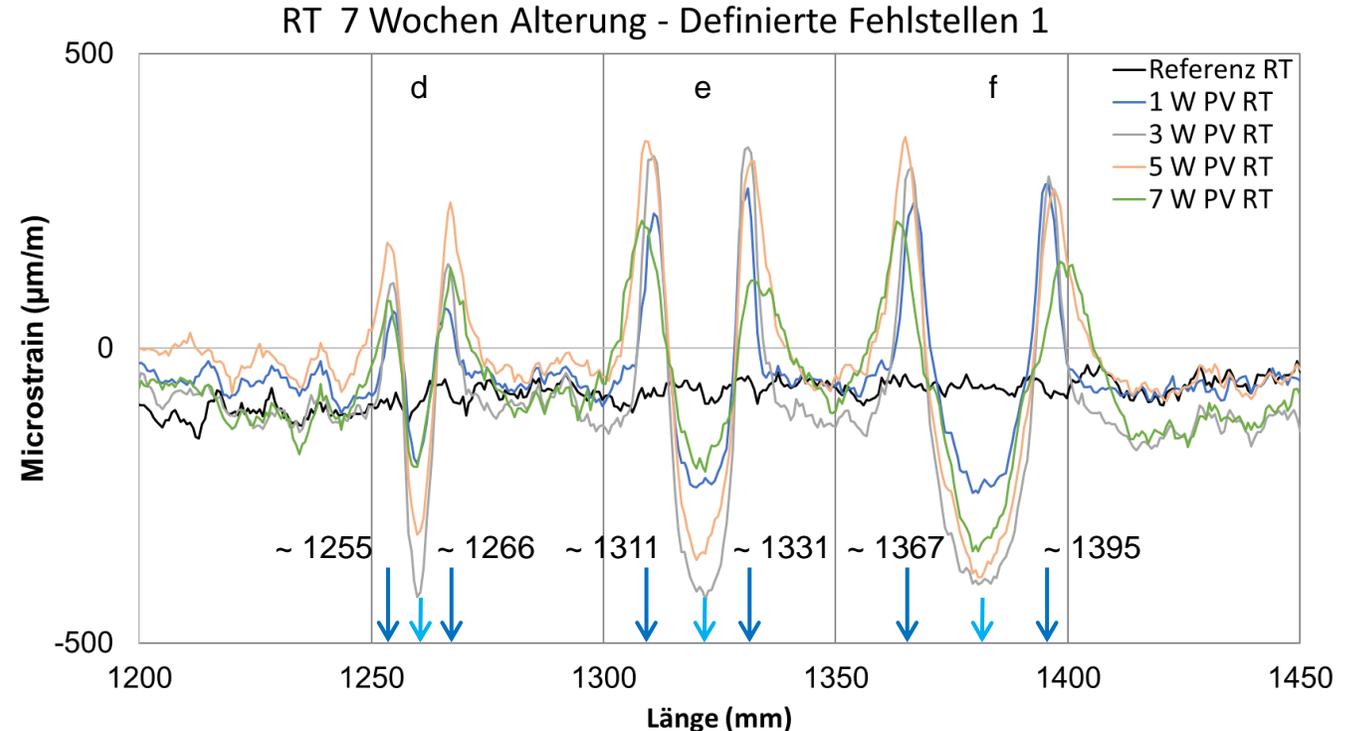
- Einbringen von künstlichen Fehlstellen mit definierter Größe und Position
- Verlegung von FOS durch die Fehlstellen
- Messung des Referenzsignals bei Raumtemperatur und Vergleich mit Messwerten bei -40 °C und $+80\text{ °C}$



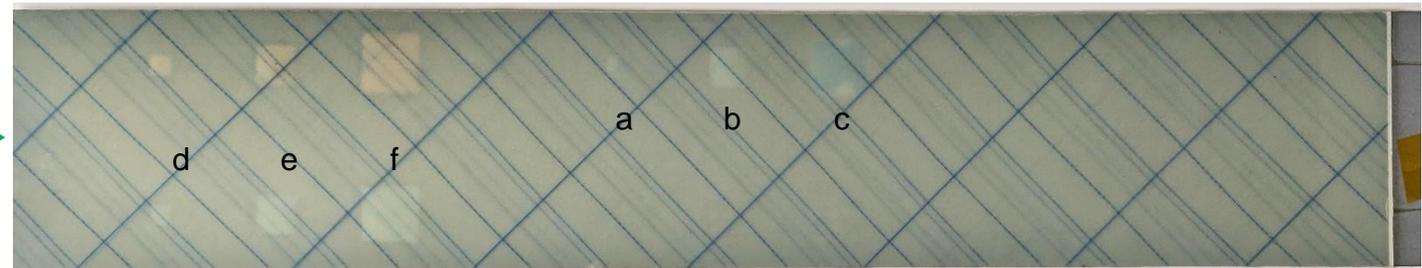
Quelle: INVENT

Nutzungsphase - Beschleunigte Eigenschaftsentwicklung unter Umgebungseinflüssen

- Spitzenwerte zeigen die Position der definierten Fehlstellen verursacht durch Handschuhe
- Maximalwerte im Zugbereich begrenzen ca. die Breite der jeweiligen Fehlstellen
 - $d_{SOLL} = 10 \text{ mm}$, $d_{IST} \sim 11 \text{ mm}$
 - $e_{SOLL} = 20 \text{ mm}$, $e_{IST} \sim 20 \text{ mm}$
 - $f_{SOLL} = 30 \text{ mm}$, $f_{IST} \sim 28 \text{ mm}$
- Zunehmende Alterungsdauer verstärkt die aufgetretenen Effekte
- Fehlstellen können mit FOS detektiert werden



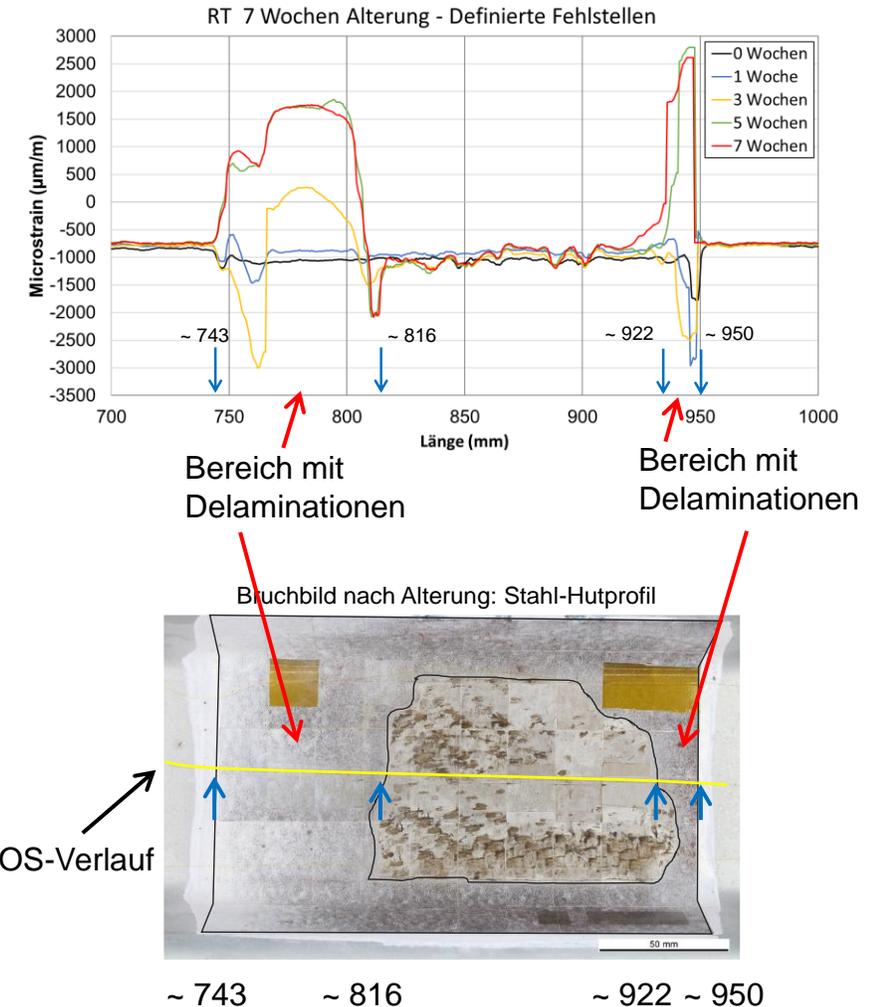
→
~ 1180 mm



Nutzungsphase - Beschleunigte Eigenschaftsentwicklung unter Umgebungseinflüssen

Können mit FOS Grenzschichtveränderungen festgestellt werden?

- Messverlauf zeigt Zunahme von Dehnungen im Verlauf der PV 2005 Alterung sowohl in der Intensität als auch Länge:
 - Hauptsächlich zwischen ~743 mm und ~816 mm und
 - Zwischen ~922 mm und ~950 mm
- Delaminationen nehmen auf Grund des Alterungseinflusses zu, ungefähre Maße der Delaminationen:
 - Bereich 1: ca. 73 mm
 - Bereich 2: ca. 28 mm
- Definierte Fehlstellen zeichnen sich nicht eindeutig im Messverlauf ab, da diese durch reale Fehlstellen überdeckt wurden
- Bruchbilder bestätigen Delaminationen zwischen ca. 743-816 mm und ca. 922-950 mm
- **Alterungseffekte, die zu Delaminationen führen, können detektiert werden**



6

Reparatur

Reparatur

Was kann/darf repariert werden?



Reparaturen im Strukturbereich sind nicht vorgesehen und unüblich



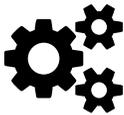
Eine geänderte und geeignete Konstruktion kann dies ggf. ändern



Neue Fahrzeugkategorien und Nutzungsszenarien können das Reparaturverhalten ändern

In welchem Fall wäre eine Reparatur möglich?

1. Metallteil n. reparabel, Patch i.O. -> Neues Metallteil, bestehender Patch



2. Metallteil n. reparabel, Patch n.i.O. -> Keine Reparatur, da Austausch beider Fügeteile

3. Metallteil reparabel, Patch i.O. -> Erneutes Fügen bestehendes Metallteil & Patch

4. Metallteil reparabel, Patch n.i.O. -> Erneutes Fügen bestehendes Metallteil & neuer Patch

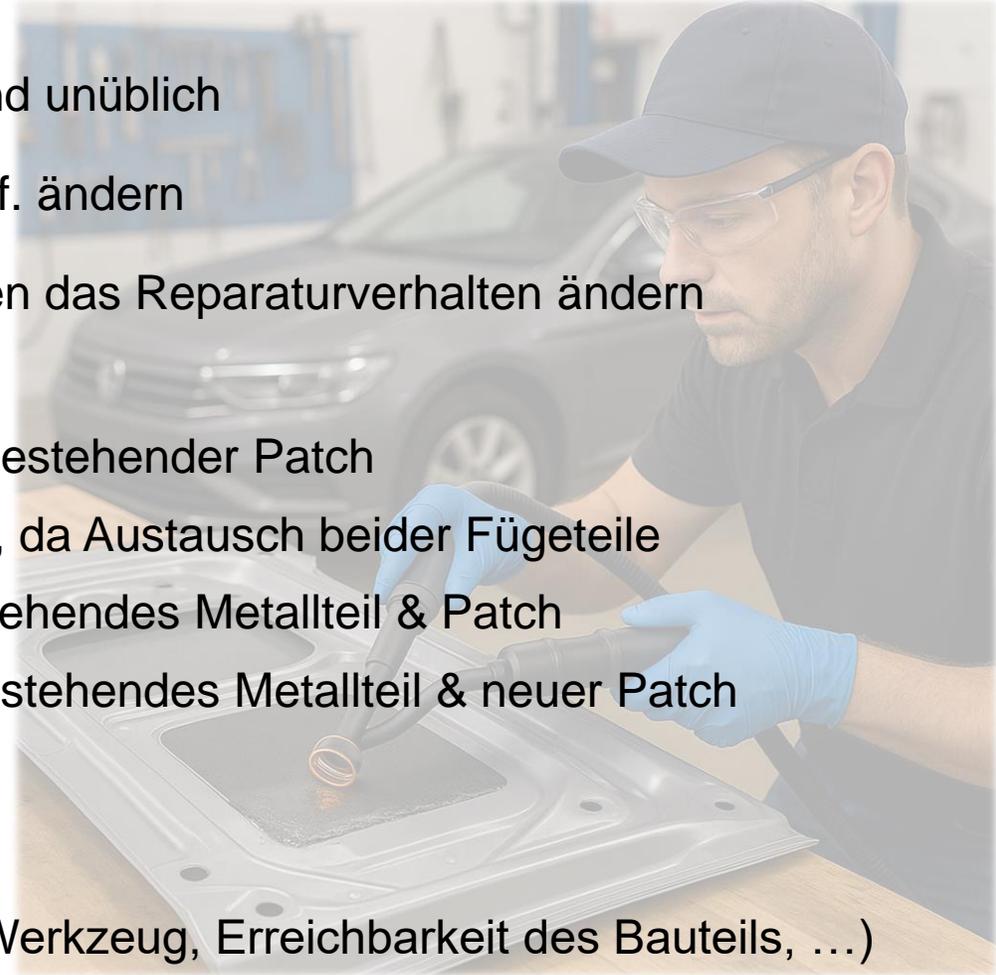
Zu betrachtende Umgebungen



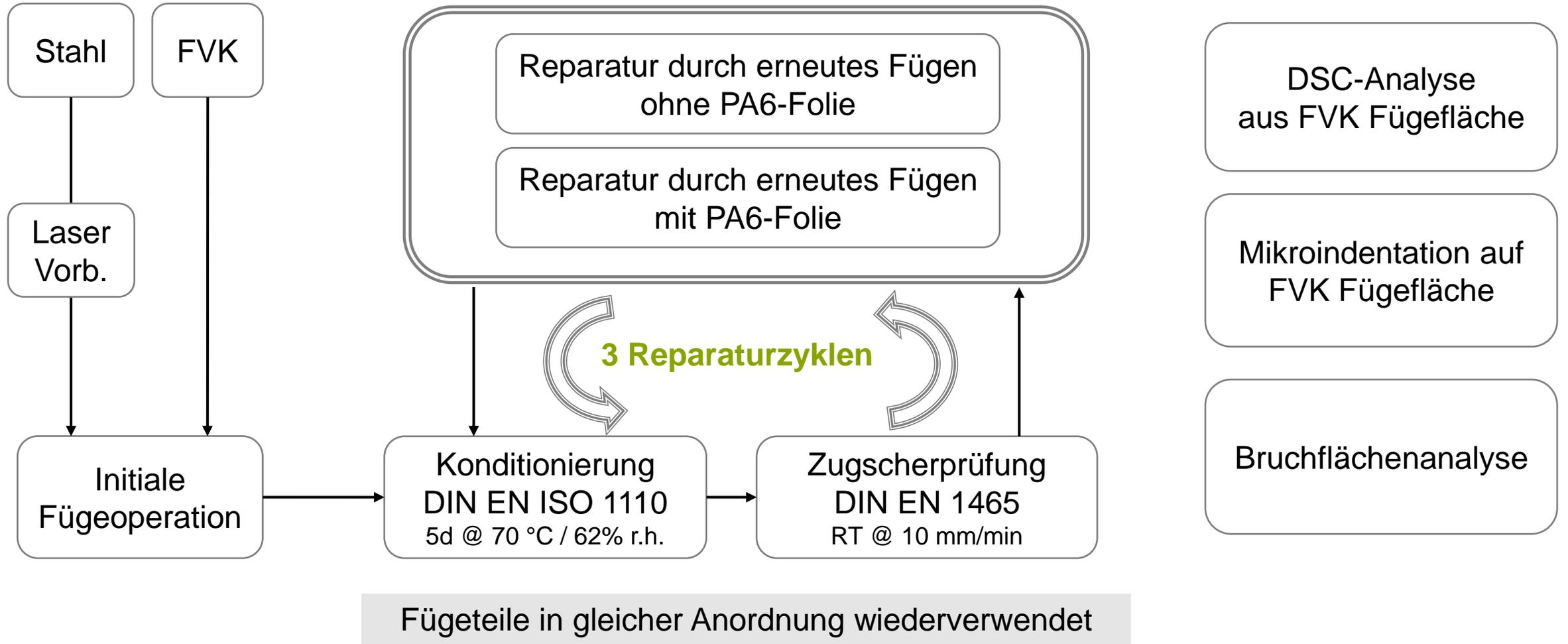
Labor (Coupon- oder Teilproben, höhere Genauigkeit)



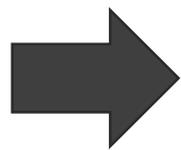
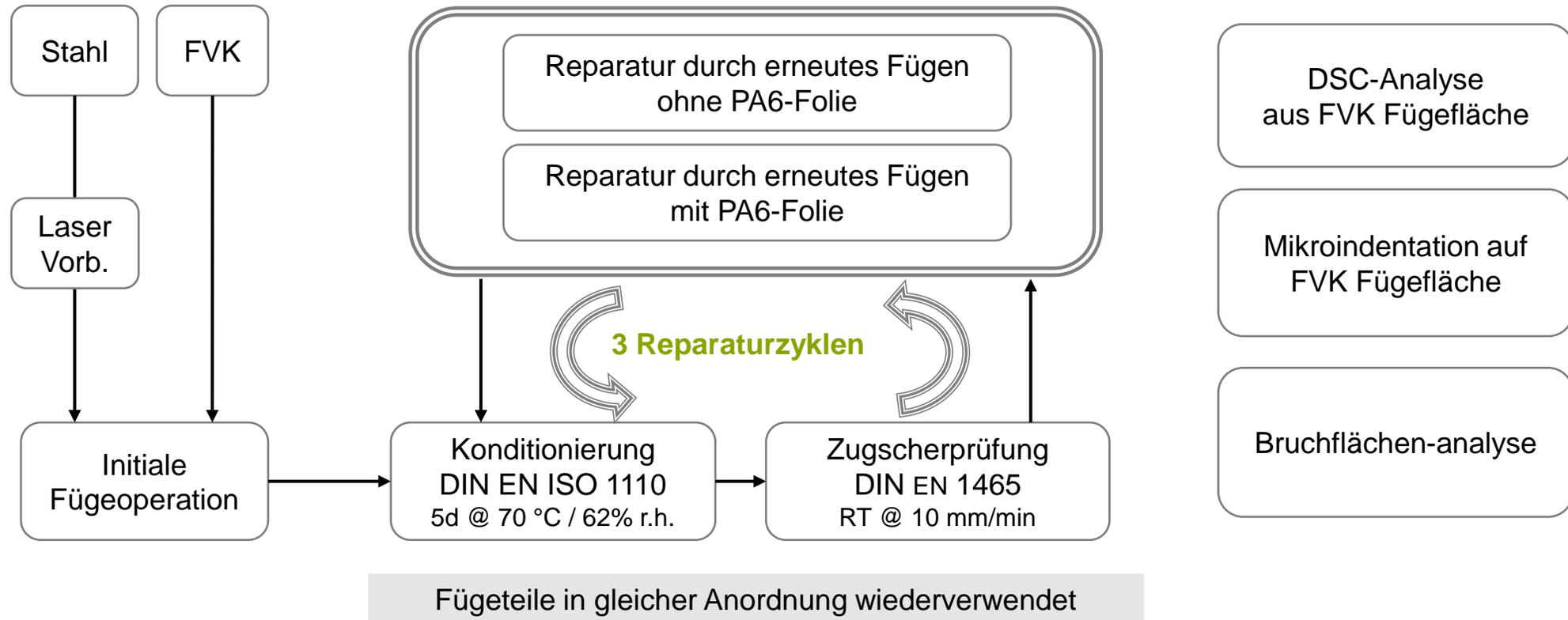
Werkstatt (Verschmutzung der Umgebung, verfügbares Werkzeug, Erreichbarkeit des Bauteils, ...)



Reparatur - Ablauf des Reparaturzyklus

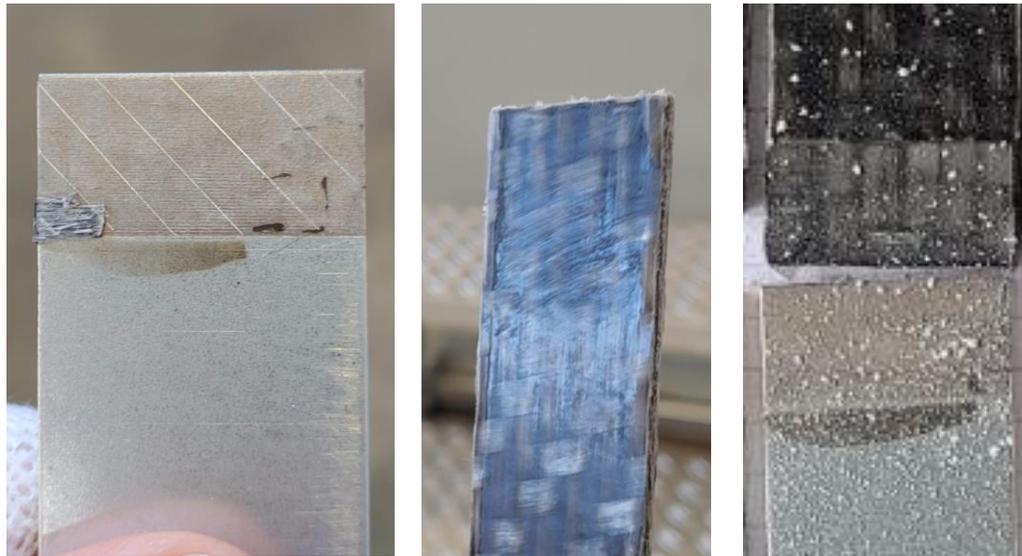


Reparatur - Ablauf des Reparaturzyklus



- (1) Wie wirkt eine Werkstattumgebung auf das Reparaturergebnis?
- (2) Wie verändert sich die Grenzschicht durch die Reparatur?

Reparatur - Einfluss einer Werkstattumgebung auf die Reparaturergebnisse



Kratzer

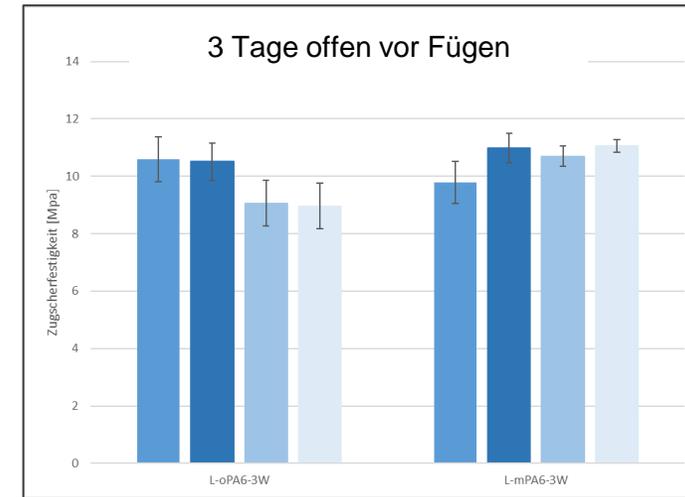
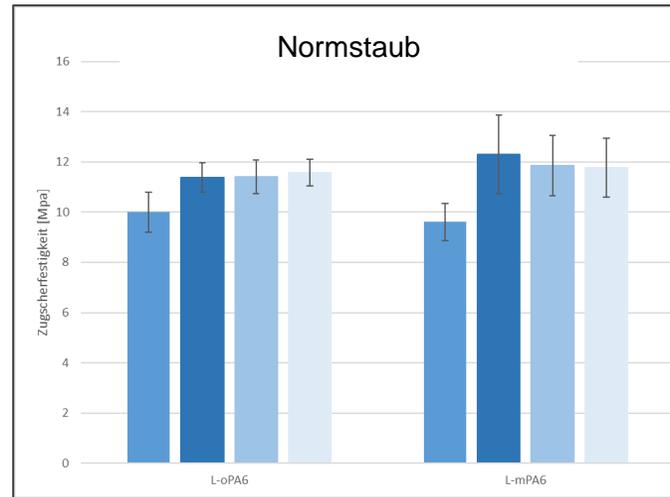
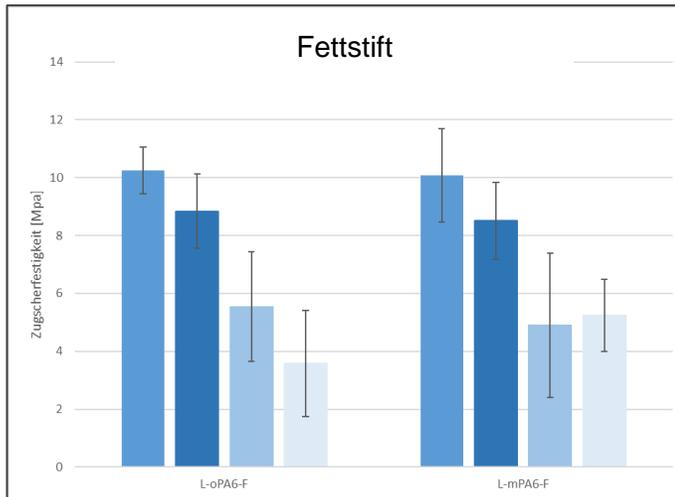
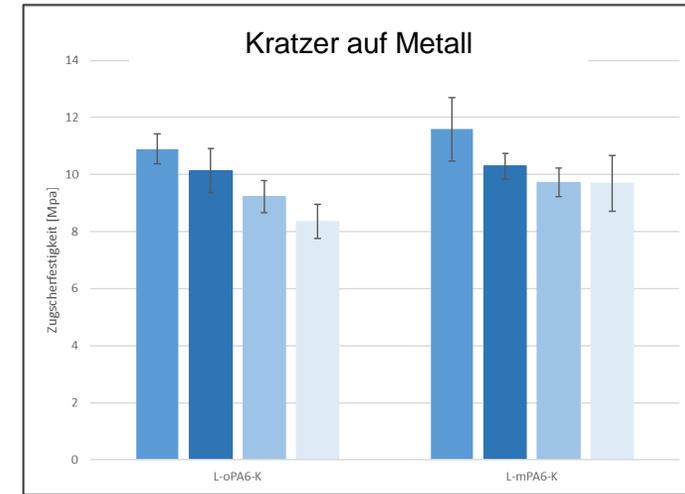
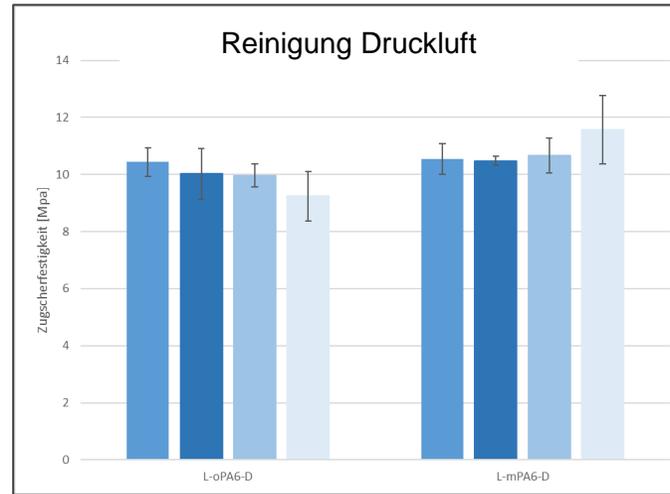
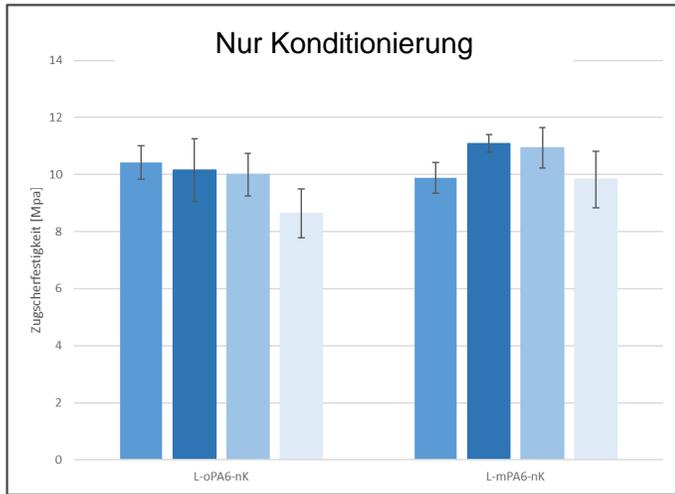
Fettstift

Normstaub

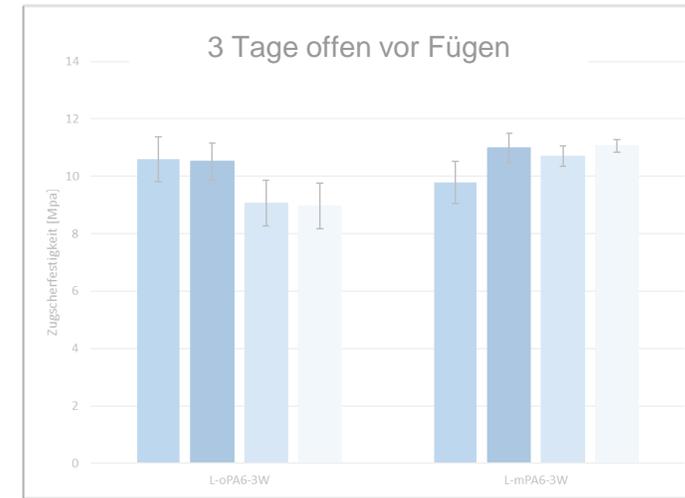
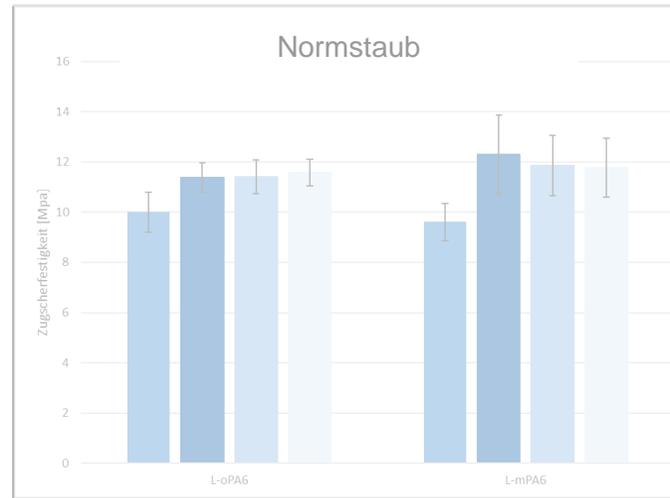
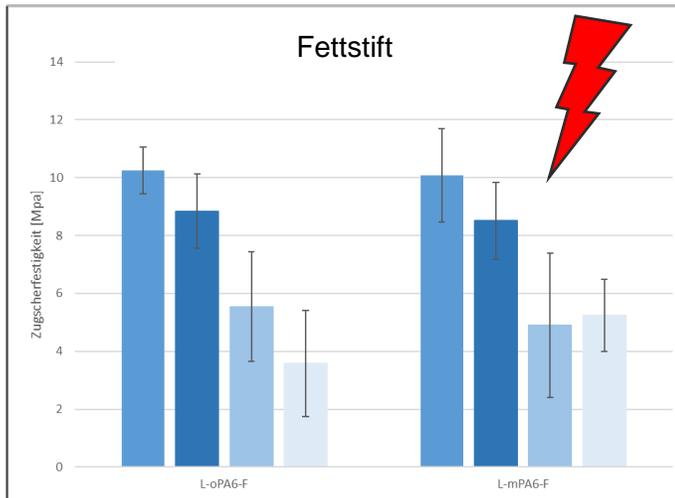
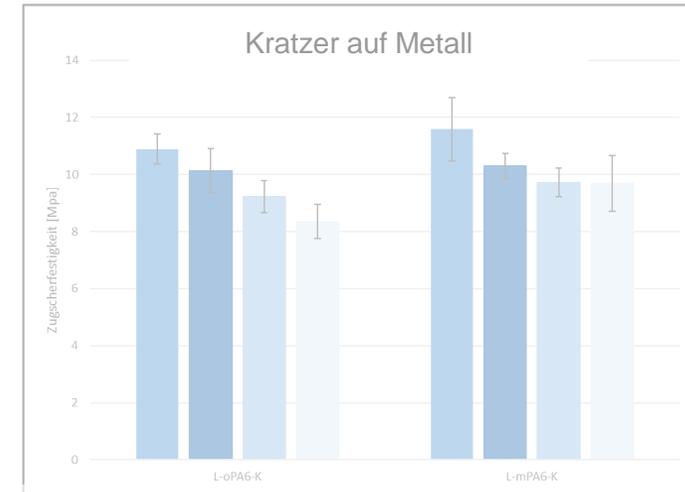
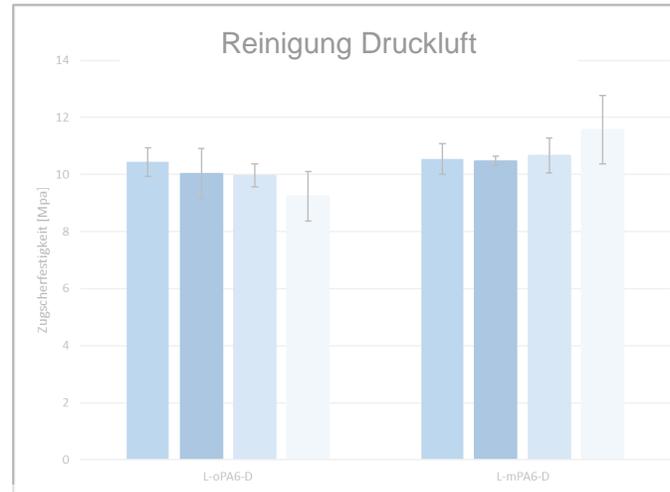
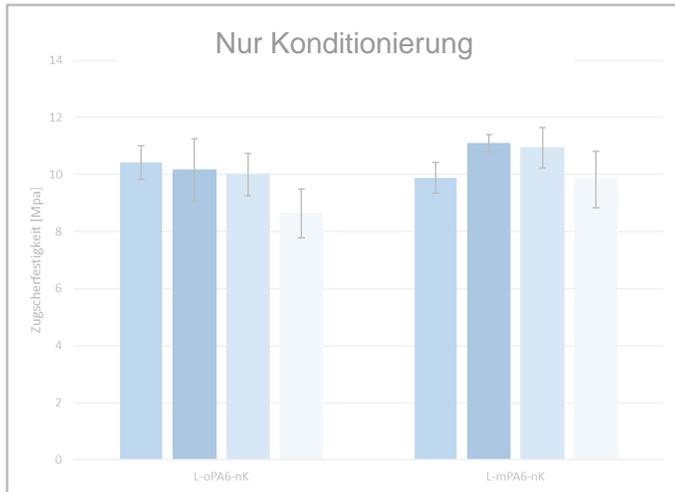
Vorbehandlungen vor dem Fügen sollen mögliche Fehler bei der praxisnahen Reparatur des Hybridbauteils in der Werkstatt nachbilden und den Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit zeigen.

| Vorbehandlung | Beschreibung |
|------------------------|---|
| Nur Konditioniert (nK) | Die Proben werden nicht vor der Reparatur bewusst vorbehandelt. Diese Probenserie dient zum Vergleich von Einflussparametern. |
| Druckluft (D) | Beide Seiten der Fügestelle werden 10s mit Druckluft besprüht. Wird vor jeder Reparatur wiederholt. |
| Kratzer (K) | Es werden diagonale Kratzer mit einem Anreißer auf die Stahlfügefläche aufgebracht. Wird nur vor der ersten Reparatur durchgeführt, da die Kratzer erhalten bleiben. |
| Fettstift (F) | Mit dem Sonax Gummi Pflegestift mit Hirschtalg wird eine dünne Fettschicht auf beiden Seiten der Probe aufgetragen (ca. 15mg). Dieser Vorgang wird vor jeder Reparatur wiederholt. |
| Normstaub (N) | Mit einem Puderpinsel wird eine geringe Menge Prüfstaub nach DIN auf beide Fügeflächen aufgetragen. Dieser Vorgang wird vor jeder Reparatur wiederholt. |
| 3 Werkstatttage (3W) | Die Proben werden vor dem Fügen offen 3 Tage in der Werkstatt platziert. Dieser Vorgang wird vor jeder Reparatur wiederholt. |
| 10 Werkstatttage (10W) | Ein Teil der Proben wird vor dem Fügen 10 Tage offen in der Werkstatt platziert (10Wo) und ein Teil der Proben wird 10 Tage geschlossen in einem Plastikbeutel aufbewahrt (10Wg). Dieser Vorgang wird vor jeder Reparatur wiederholt. |

Reparatur - Einfluss einer Werkstattumgebung auf die Reparaturergebnisse



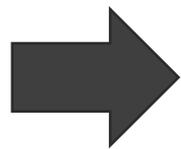
Reparatur - Einfluss einer Werkstattumgebung auf die Reparaturergebnisse



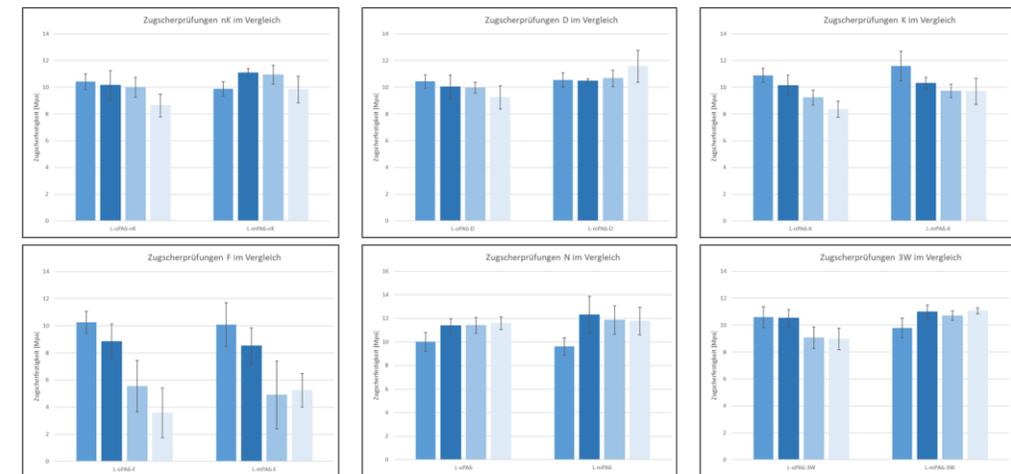
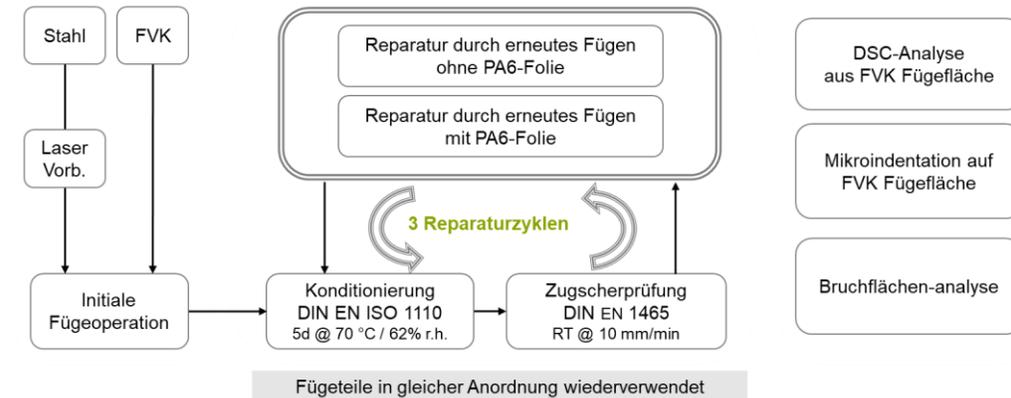
Reparatur

Wie wirkt eine Werkstattumgebung auf das Reparaturergebnis?

- Viermaliges Fügen & Prüfen mit gleicher Fügeteilzuordnung
- Konzept 1: keine zusätzliche PA6-Folie einlegen
- Konzept 2: zusätzlich PA6-Folie vor erneutem Fügen eingelegt
- Verlust an Zugscherfestigkeit liegt bei max. 10 %
- **Gleicher Fügestand & gleiche Parameter für Wiederfügen nutzbar**
- **Wiederfügen der Proben grundsätzlich möglich**



Reparatur unter Werkstattbedingungen möglich

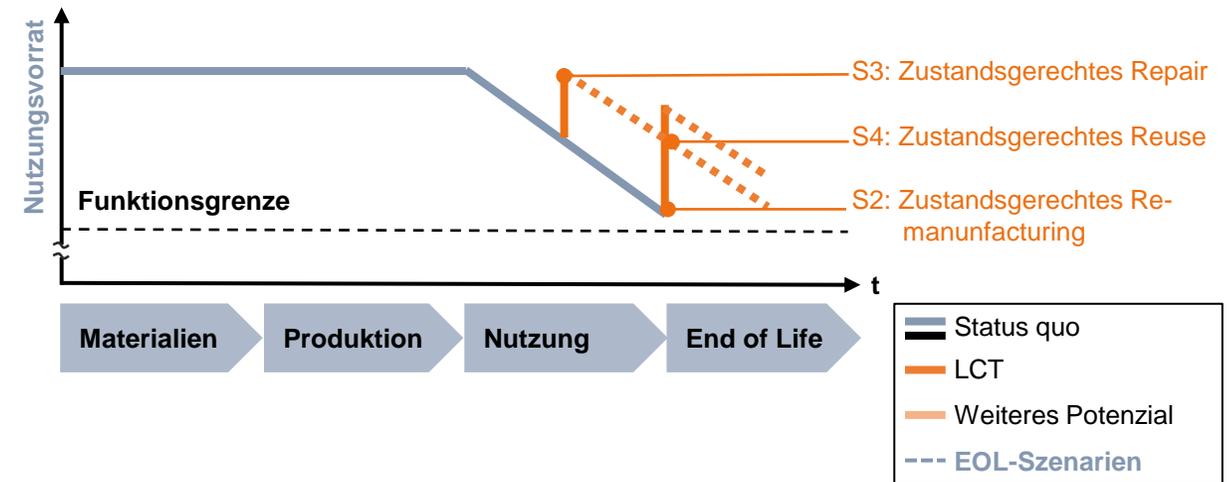


7

End Of Life

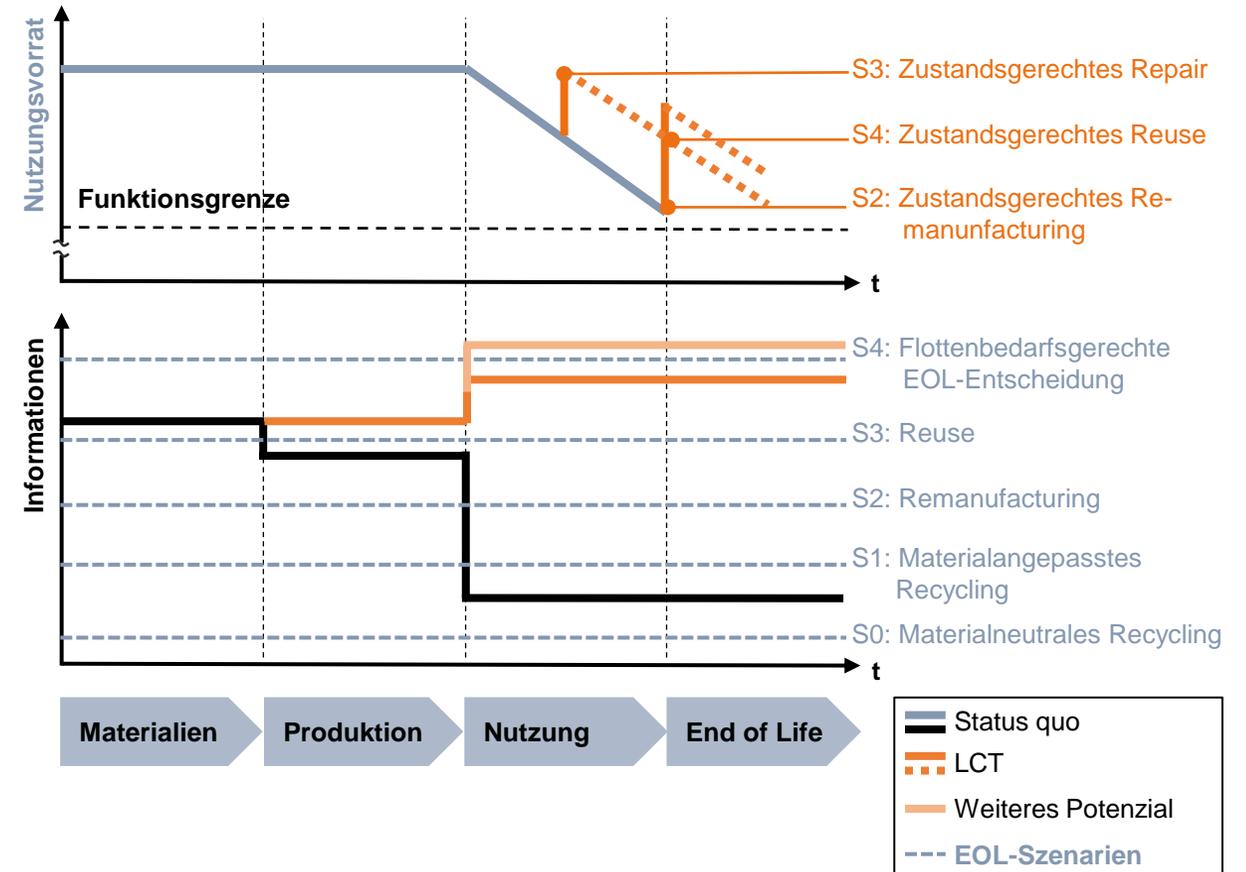
End of Life – Zusammenhang EOL-Szenarien und Informationen

- Nutzungsvorrat („Bauteilgesundheit“) durch Alterungs- und Abnutzungseffekte mit der Zeit reduziert
- Zustandsinformationen ermöglichen zustandsgerechte R-Strategien

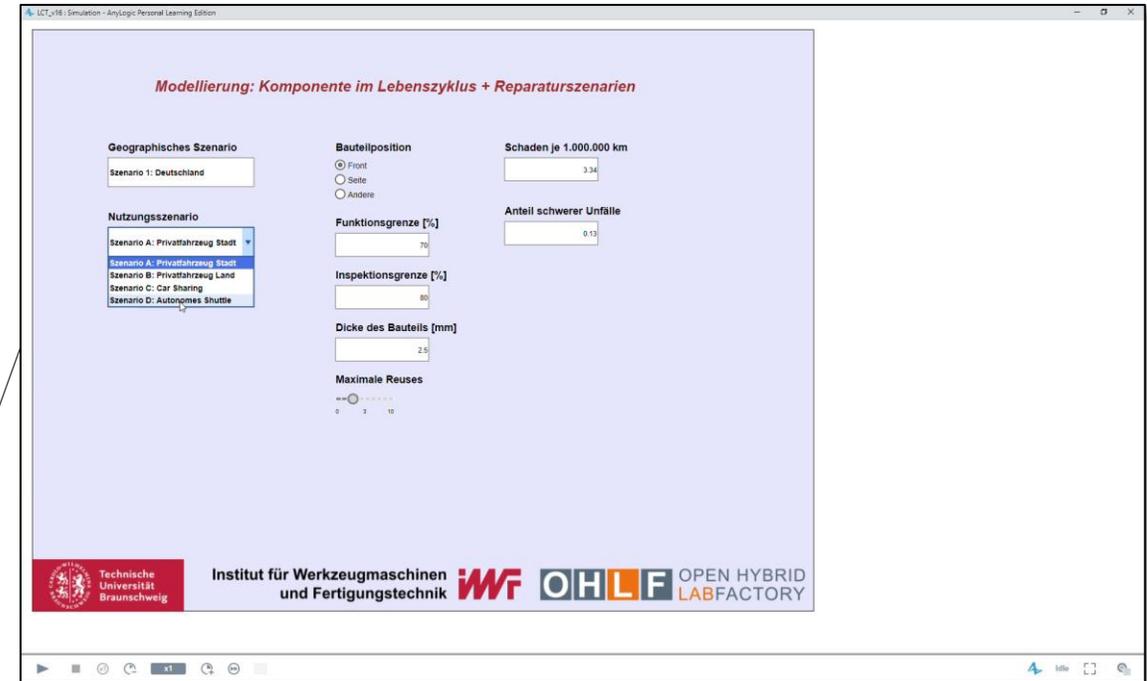
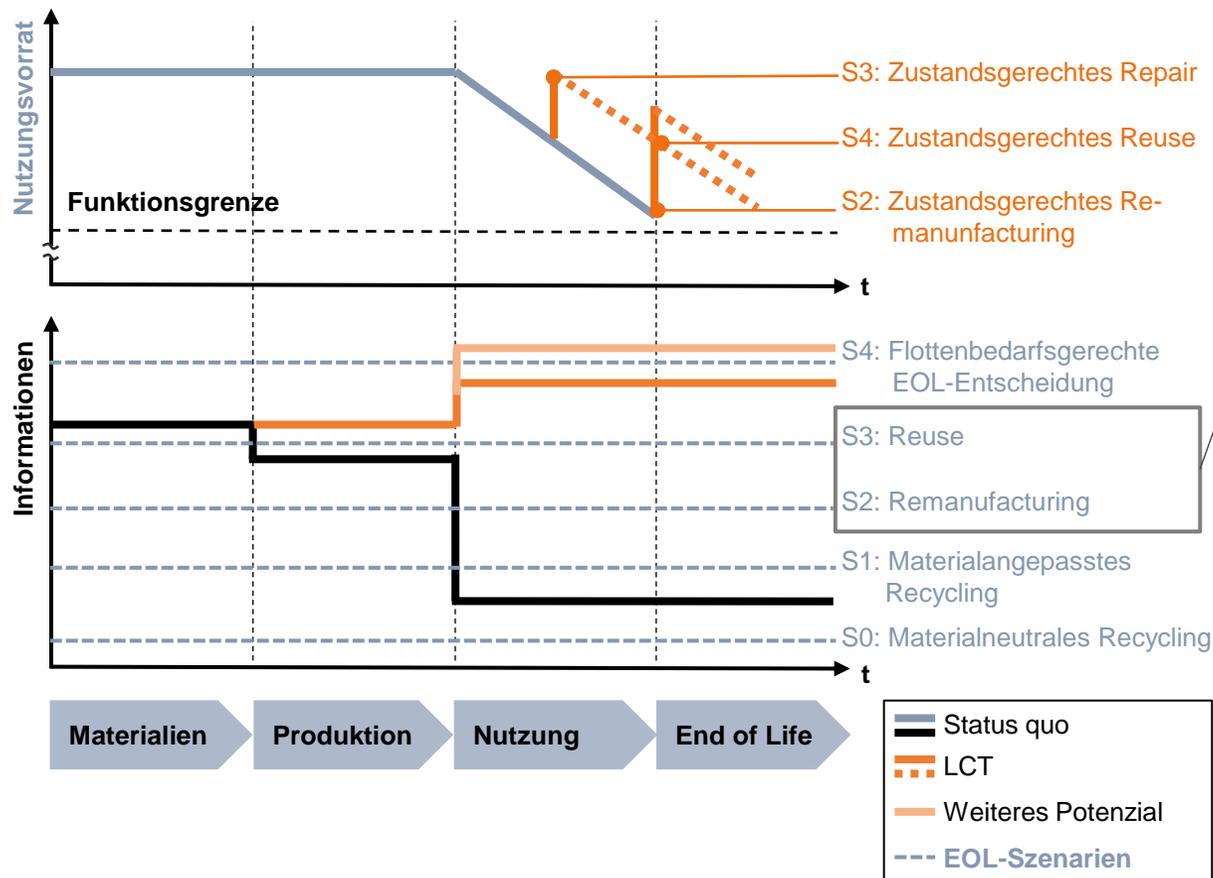


End of Life – Zusammenhang EOL-Szenarien und Informationen

- Nutzungsvorrat („Bauteilgesundheit“) durch Alterungs- und Abnutzungseffekte mit der Zeit reduziert
- Zustandsinformationen ermöglichen zustandsgerechte R-Strategien
- Status quo EOL: Materialneutrales / generisches Recycling (Schredder, Sortierverfahren)
- Zusätzliche Informationen ermöglichen bessere EOL-Szenarien
- Daten aus Produktions- und Nutzungsphase können Reuse und Remanufacturing ermöglichen



End of Life – Zusammenhang EOL-Szenarien und Informationen

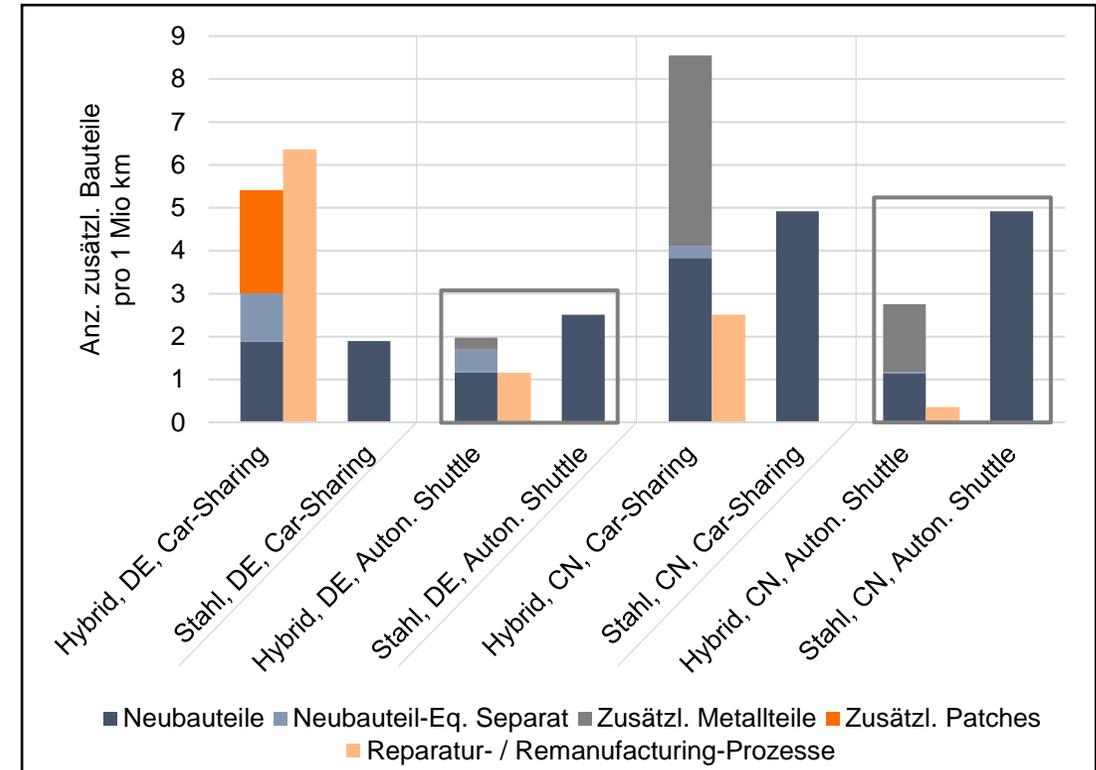


➤ Simulation von Alterungsprozessen und Schädigungsereignissen von hybriden Bauteilen mit SHM in Fahrzeugflotte



End of Life – Simulationsergebnisse

- Simulation von Alterungsprozessen und Schädigungsereignissen von hybriden Bauteilen mit SHM in Fahrzeugflotte
- Analyse welches Potenzial durch SHM für Reuse und Remanufacturing entsteht → Anzahl zusätzlich benötigter Bauteile pro 1 Mio km in Fahrzeugflotte von 1000 Fahrzeugen
- Vorteil von hybridem Bauteil mit SHM ggü. Stahl ohne SHM abhängig von Alterungs- und Korrosionsprozessen
- Durch SHM ermöglichtes Remanufacturing + Reuse kann insbesondere bei Autonomen Shuttles Anzahl der zusätzlich benötigten Bauteile reduzieren
- Grund: Alterungsgrenze wird wegen intensiver Nutzung nicht überschritten, dadurch ist Bauteil weiterhin gut nutzbar

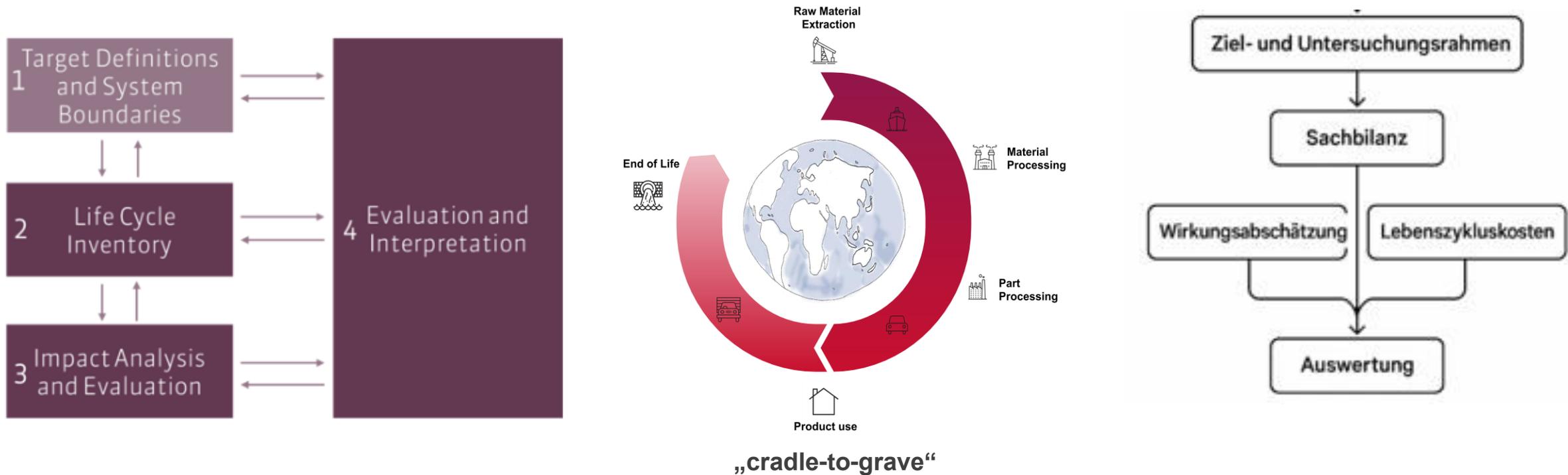


8

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Einführung LCA/LCC

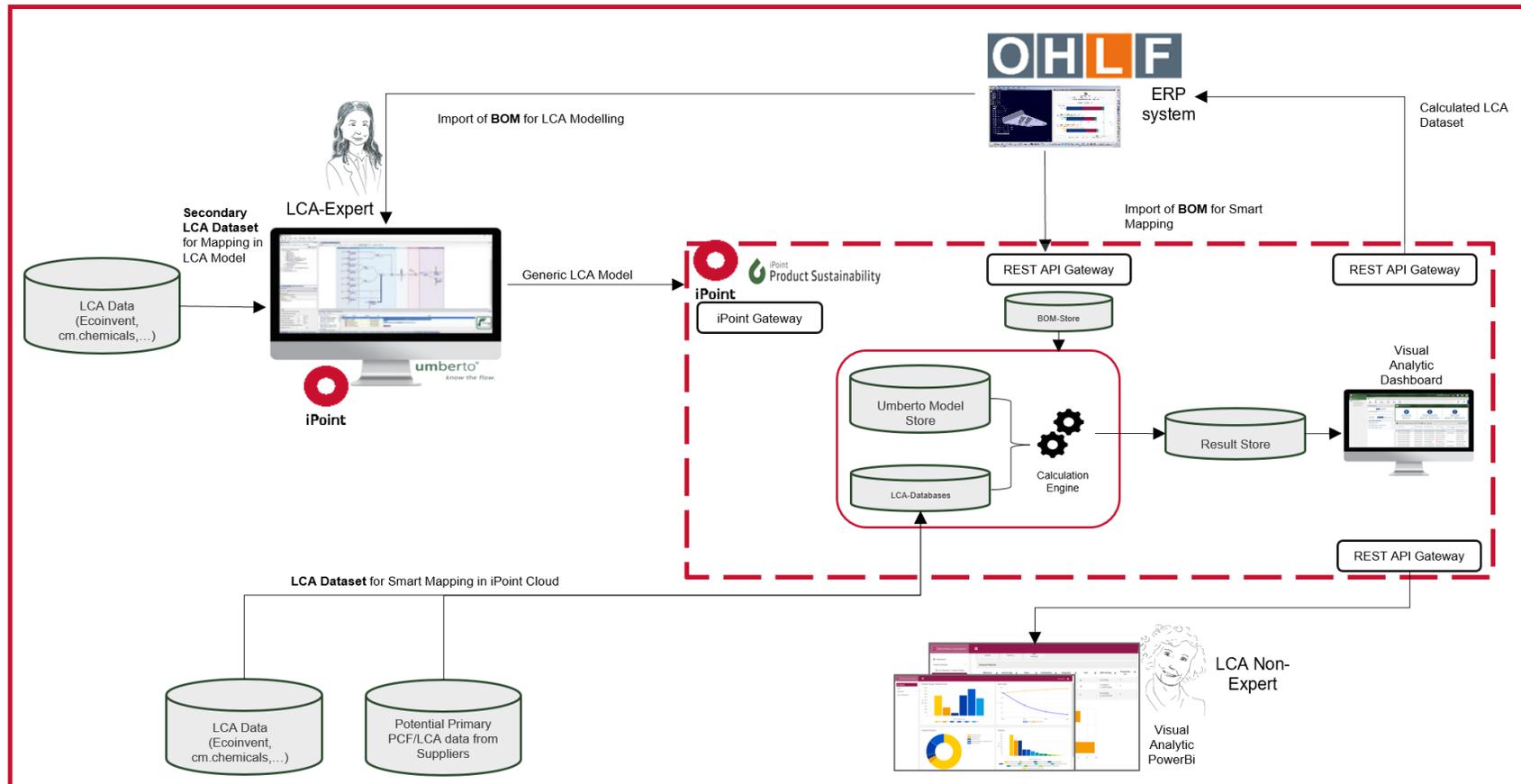
- *LCA nach ISO 14040/14044 ist ein standardisierter Prozess zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts oder Systems über dessen gesamten Lebenszyklus.*



- LCC ergänzt die LCA in der Produktentwicklung, indem sie die Kosten und ökologischen Aspekte über den Lebenszyklus hinweg verbindet

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Einführung LCA/LCC

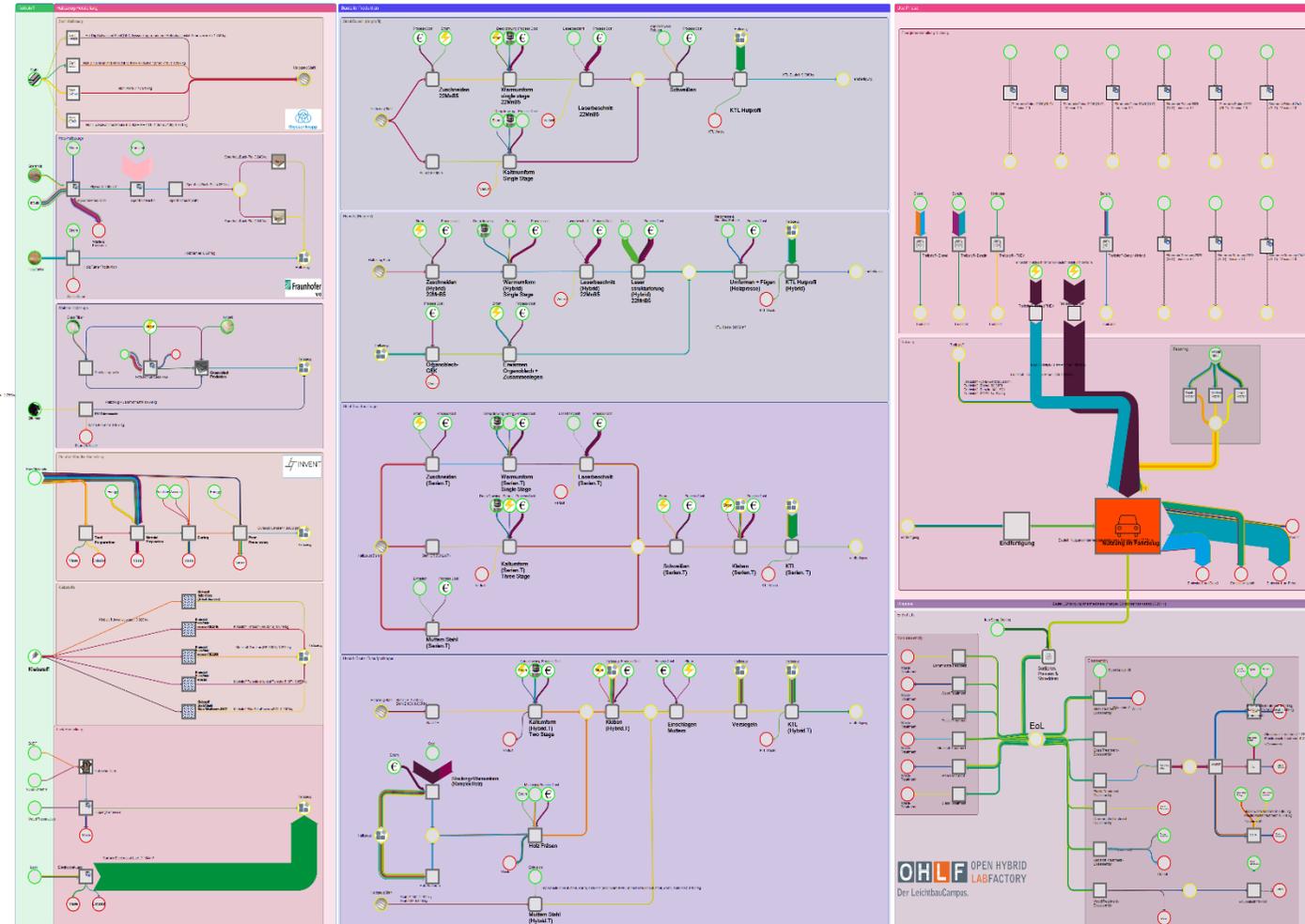
- *Konzeption einer intelligenten Schnittstelle zur Messdatenzuordnung und LCA-Integration in ERP-Systeme*



Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Einführung LCA/LCC

■ Integriertes LCA und LCC-Modell in der Umberto-Software

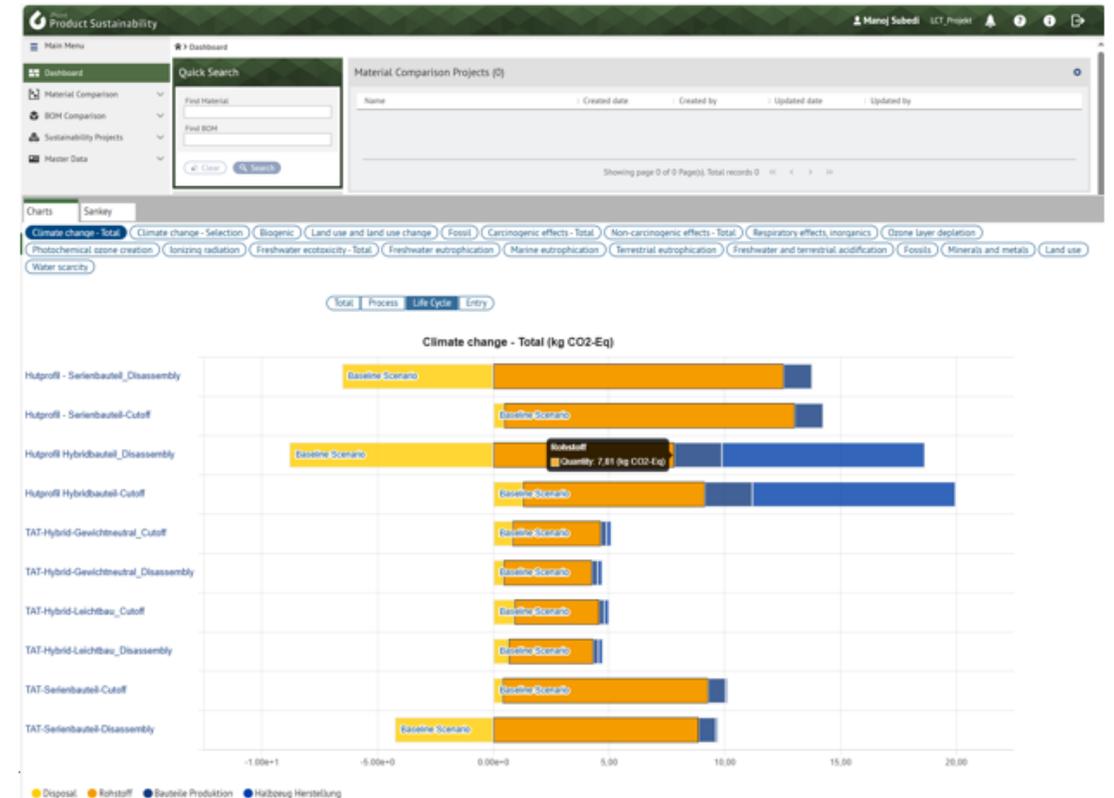
- Generisches LCA-Modell für serielle und hybride Hutprofile und Türaufprallträger
- Umweltwirkungen und Kosten in einem Modell abgebildet.
- Szenarien zu Strommix (2020, 2030, 2040), Materialsubstitution und Produktionsprozessen entwickelt. Nutzungsphase je nach Antriebssystem (Benzin, Diesel, PHEV, Elektro) modelliert. Regionale Fahrprofile für Deutschland und China integriert (ländlich, städtisch, Carsharing, Privat-PKW, Shuttle-Verkehr). Potentielle Reparaturen Szenarien.
- End-of-Life-Szenarien mit Recyclingpfaden und CO₂-Gutschriften berücksichtigt.



Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Visual Analytics

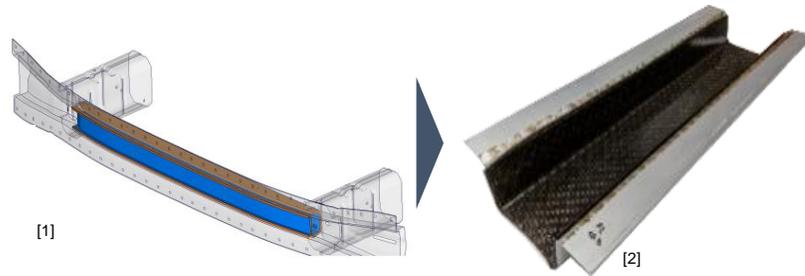
- Interaktive Dashboards zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung.

Ermöglichen es Nicht-LCA-Experten, Nachhaltigkeitsszenarien zu erstellen, zu bewerten und komplexe Daten einfach zu visualisieren.



Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Berechnung von Beispielkomponenten

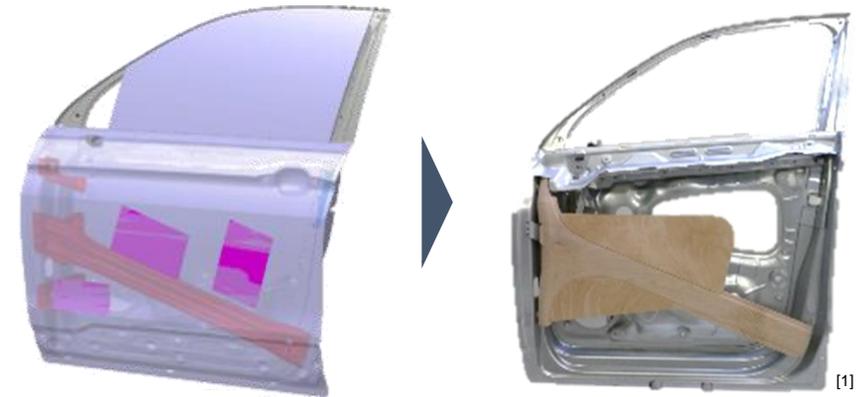
Hybrider Organoblech (PA6-Glasfaser) – Stahl-Stoßfängerquerträger



Reduktion der Umweltwirkungen durch:

- Energieersparnisse in Nutzungsphase durch 12% geringere Masse

Hybrider Buchenholz furnier-Stahl Türaufprallträger



Reduktion der Umweltwirkungen durch:

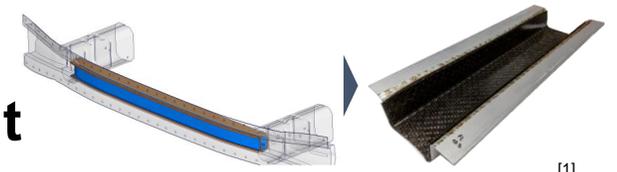
- Nutzung bio-basiertes Material
- Funktionsintegration der akustischen Dämmung
- Energieersparnisse in Nutzungsphase durch 10% geringere Masse

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten

- Analyse verschiedener zeitlicher, geographischer Szenarios sowie Antriebsart und Nutzungsart
- Anpassung des Hintergrundsystems (zeitlich nur Anpassung der Strombereitstellung) und der Nutzungsphase (Nutzungsverhalten anhand WLTP-Zyklen und Laufleistungen)

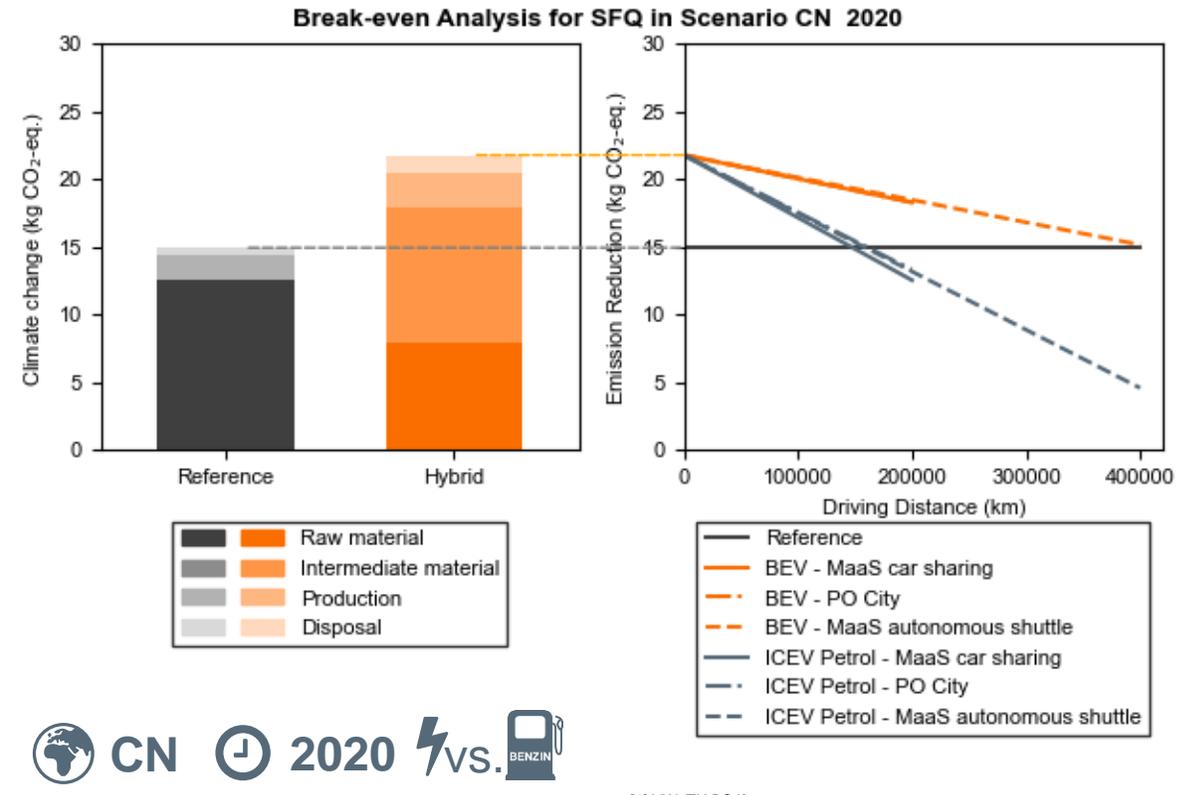
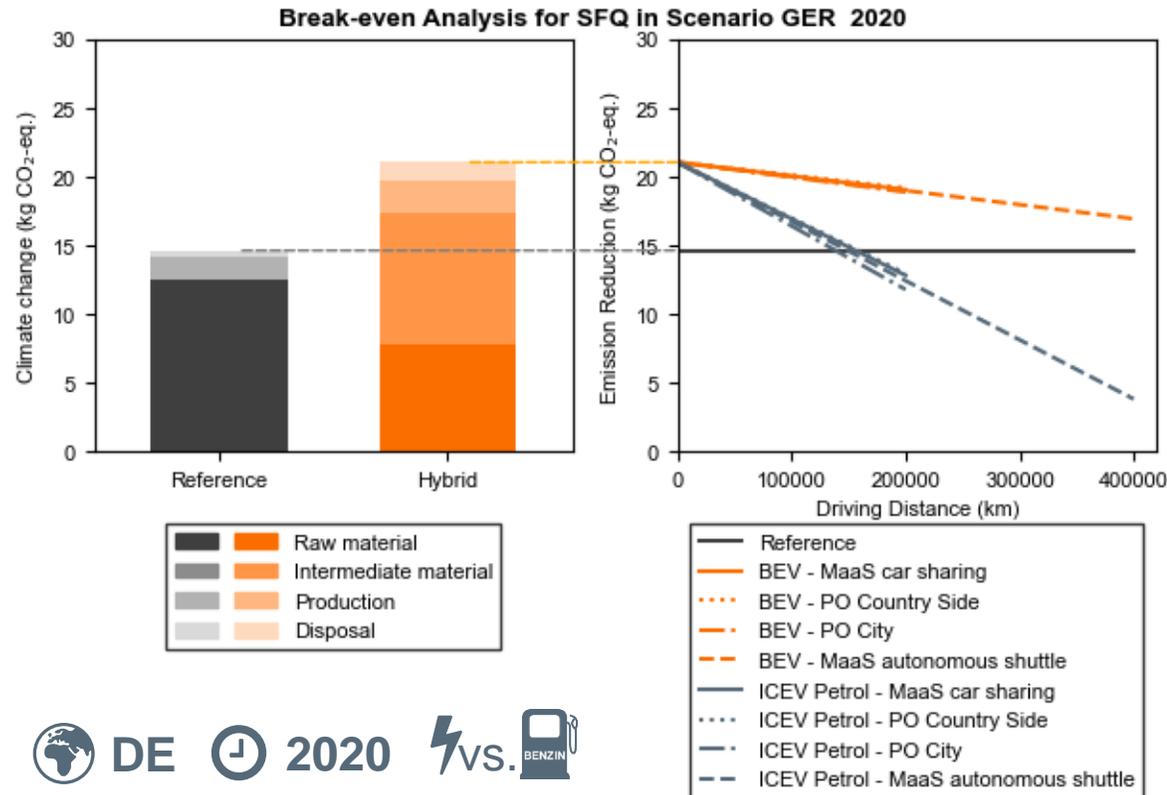
| | Option 1 | Option 2 | Option 3 | Option 4 | Option 5 |
|-------------------------------|---|--|--|--|---|
| Produktions- und Nutzungsort | Deutschland  DE | Metropole im Perflussdelta / China  CN | Produktion in Polen, Nutzung in Deutschland  PL / DE | | |
| Produktions- und Nutzungsjahr | 2020  2020 | 2030  2030 | 2040  2040 | | |
| Nutzungsart | Car-Sharing  | Autonomes Taxi  | Privatfahrzeug städtisch  | Privatfahrzeug ländlich  | |
| Antriebsart | Elektrisch  | Plug-In Hybrid  | Benzin  | Diesel  | H ₂ -Brennstoffzelle H ₂ |

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Assessment



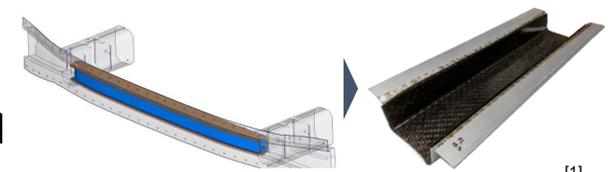
[1]

- Höhere Produktionsemissionen in Szenario CN
- Break-even bei ICEV immer erreicht
- Break-even bei BEV CN fast für Szenario autonomes Shuttle erreicht



[1] VW, TU BS ifs

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Assessment

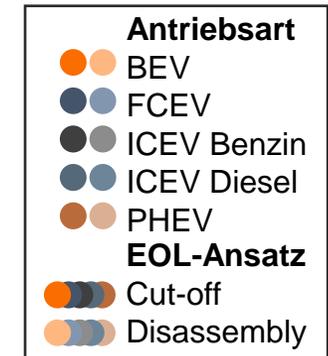
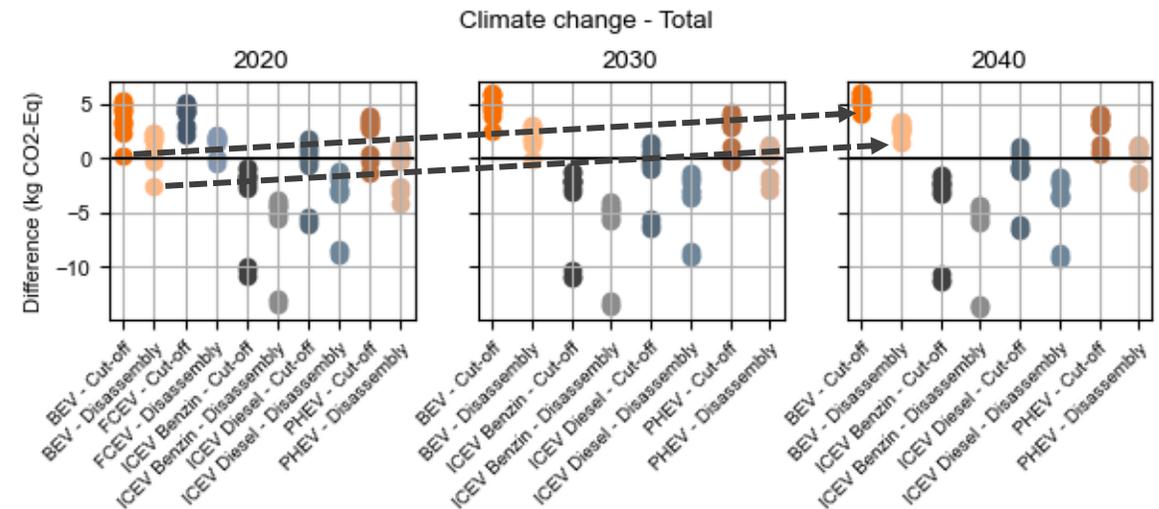


[1]

- Aggregierte Darstellung aller Szenarien als Punktdiagramm mit Differenz:

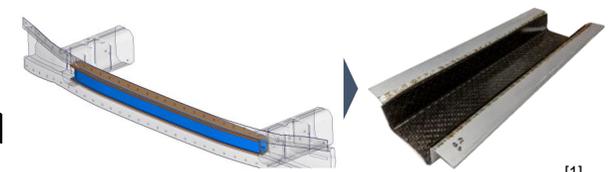
Umweltwirkungen (Hybrid) – Umweltwirkungen (Referenz)

- Negative Werte → Geringere Umweltwirkungen der hybriden Bauweise = Vorteilhaft
- EOL-Ansatz: Cut-off und Disassembly (System expansion: höchstmöglicher Verwertungsgrad)
- Meiste Szenarien mit ICEV vorteilhaft für hybrides Bauteil
- Wenige vorteilhafte Szenarien für hybride Bauweise bei BEV und PHEV 2020 → nimmt mit Zukunftsszenarien ab



[1] VW, TU BS ifs [2] piqsel.com

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Assessment

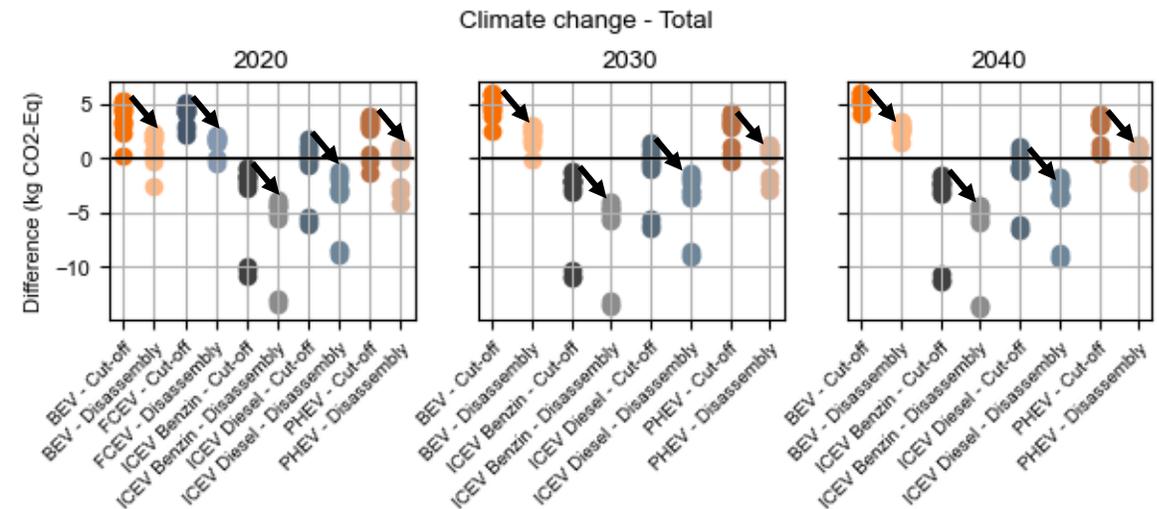


[1]

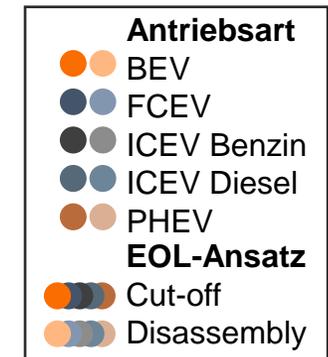
- Aggregierte Darstellung aller Szenarien als Punktdiagramm mit Differenz:

Umweltwirkungen (Hybrid) – Umweltwirkungen (Referenz)

- Negative Werte → Geringere Umweltwirkungen der hybriden Bauweise = Vorteilhaft
- EOL-Ansatz: Cut-off und Disassembly (System expansion: höchstmöglicher Verwertungsgrad)
- Meiste Szenarien mit ICEV vorteilhaft für hybrides Bauteil
- Wenige vorteilhafte Szenarien für hybride Bauweise bei BEV und PHEV 2020 → nimmt mit Zukunftsszenarien ab
- Reduktion der Umweltwirkung durch sortenreine Trennung + Recycling

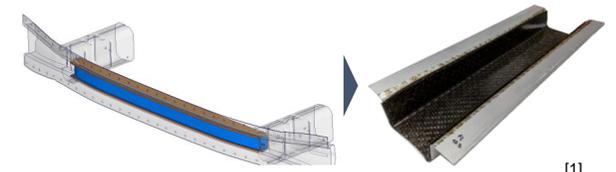


[2]



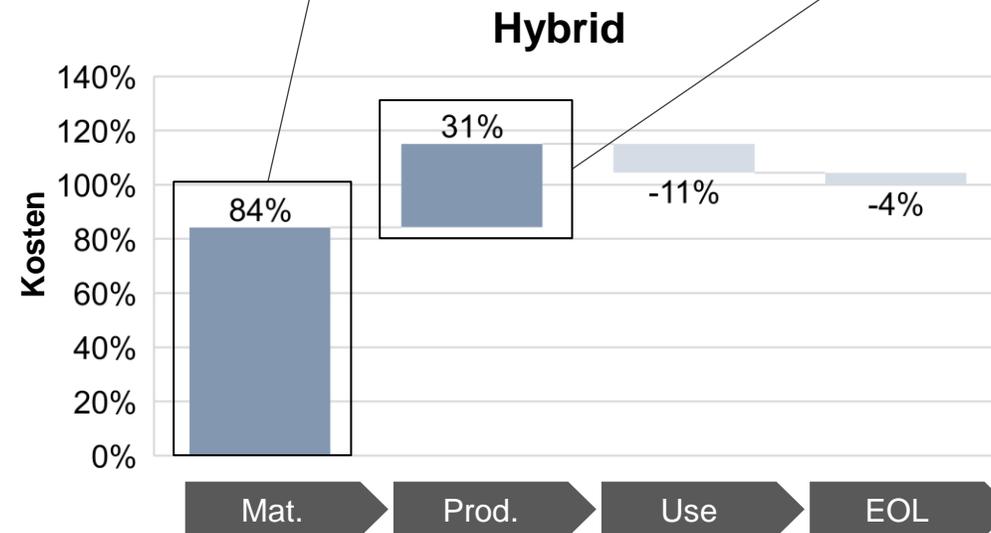
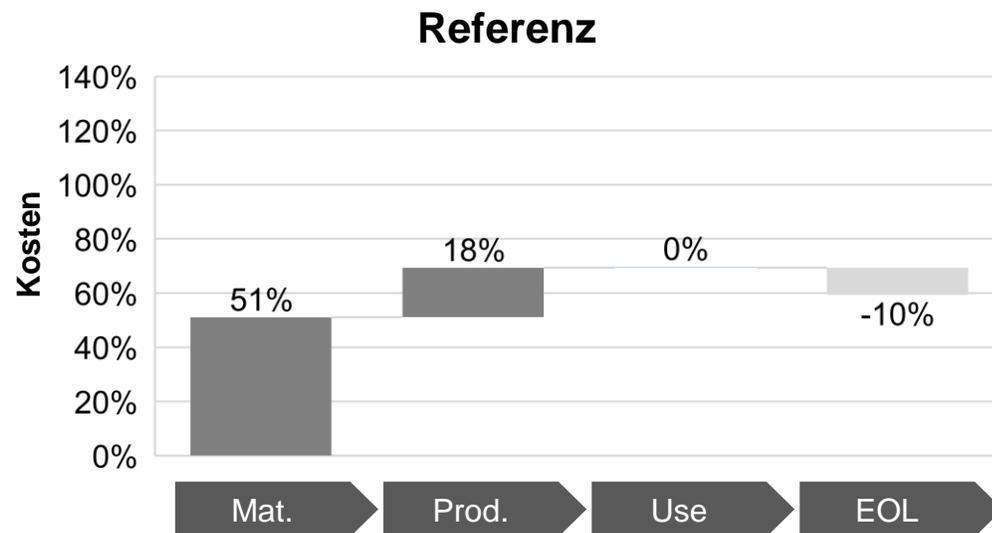
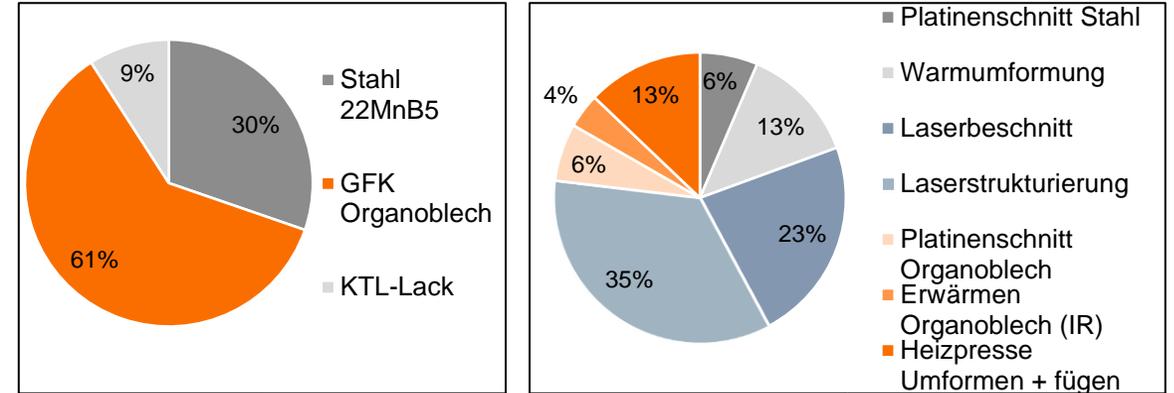
[1] VW, TU BS ifs [2] piqsel.com

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Costing



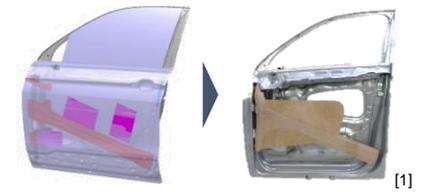
[1]

- Szenario „Elektrofahrzeug, private Nutzung in Deutschland im ländlichen Raum“
- Höhere Kosten v.a. durch höhere Materialkosten des hybriden Bauteils
- Etwas höhere Produktionskosten und etwas geringere EOL-Gutschrift



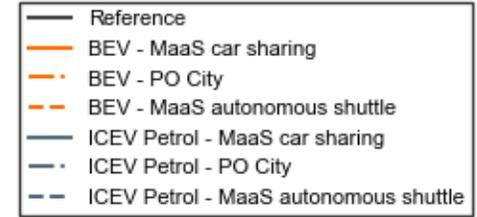
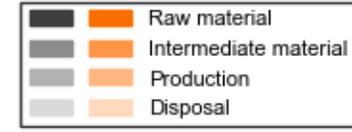
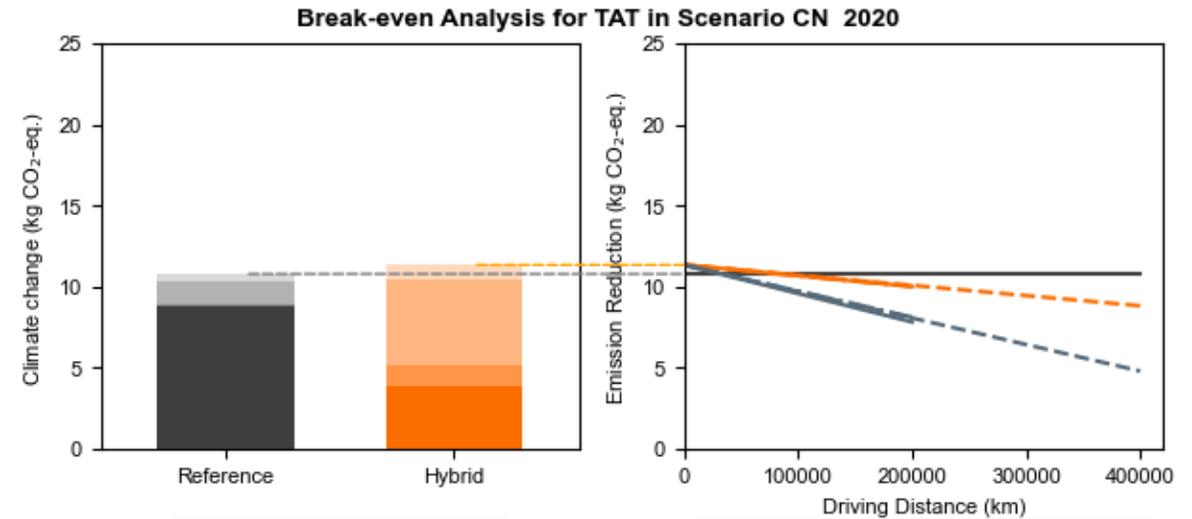
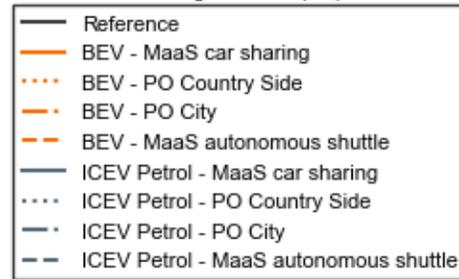
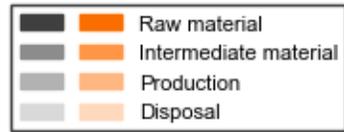
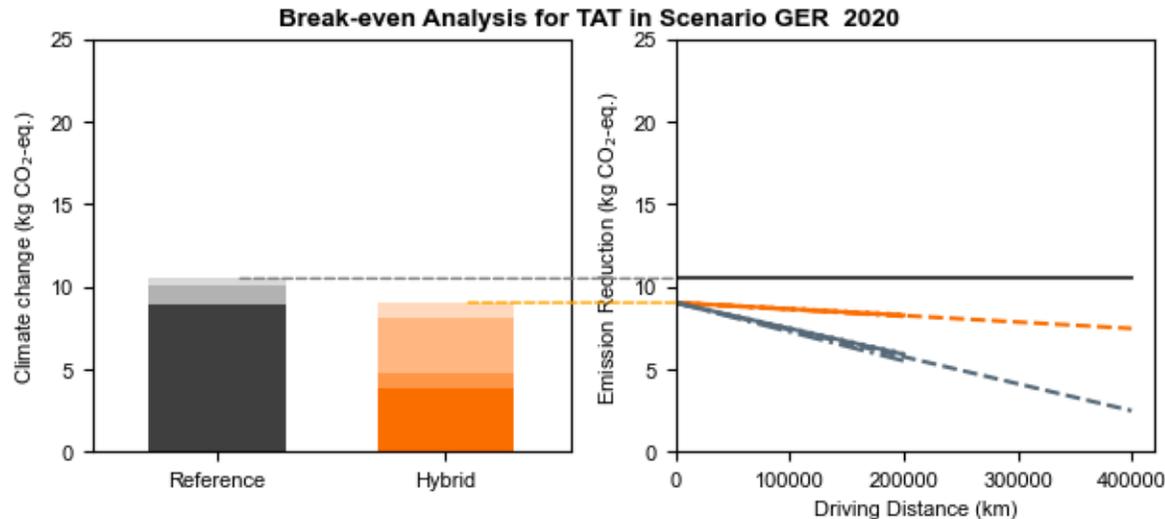
[1] VW, TU BS ifs

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Assessment



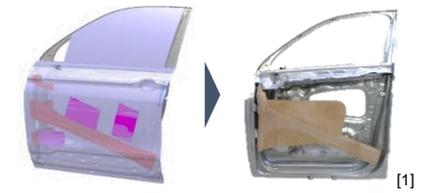
[1]

- Hybride Bauweise bereits vor Nutzungsphase im Szenario DE vorteilhaft
- Deutlich höhere Produktionsemissionen im Szenario CN, aber Break-even in allen Szenarien



[1] VW

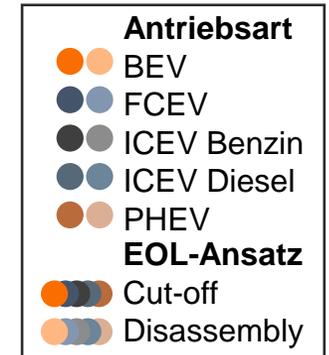
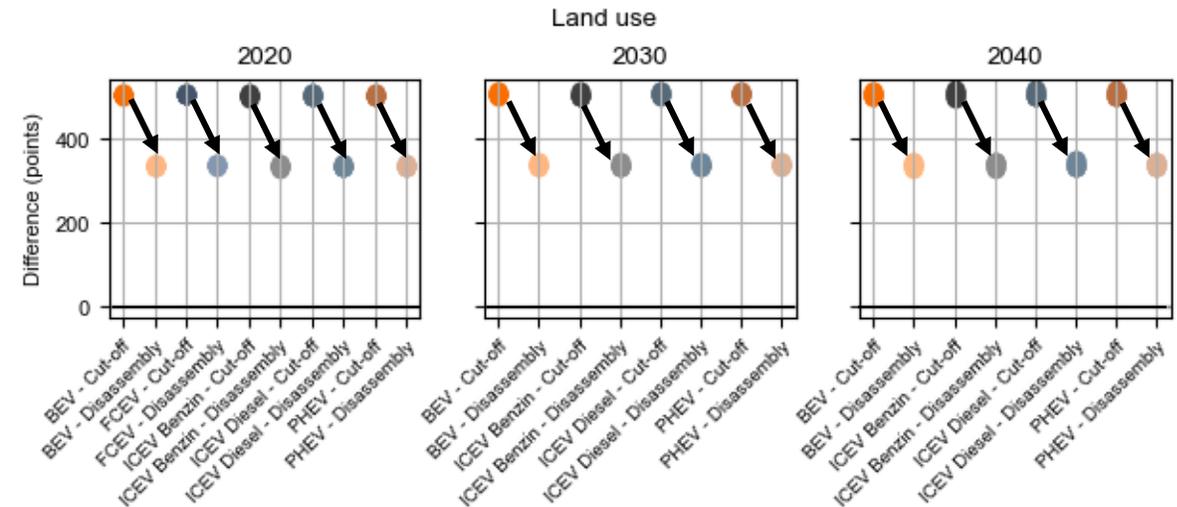
Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Assessment



- Aggregierte Darstellung aller Szenarien als Punktdiagramm mit Differenz:

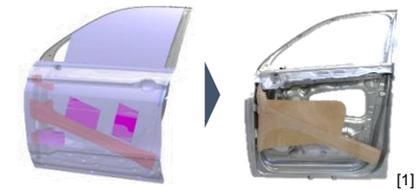
Umweltwirkungen (Hybrid) – Umweltwirkungen (Referenz)

- Negative Werte → Geringere Umweltwirkungen der hybriden Bauweise = Vorteilhaft
- EOL-Ansatz: Cut-off und Disassembly (System expansion: höchstmöglicher Verwertungsgrad)
- In allen Szenarien hat hybride Bauweise höhere Umweltwirkungen bei Landnutzung als Referenz
- Recycling von hybridem Bauteil reduziert Umweltwirkungen bei Landnutzung deutlich

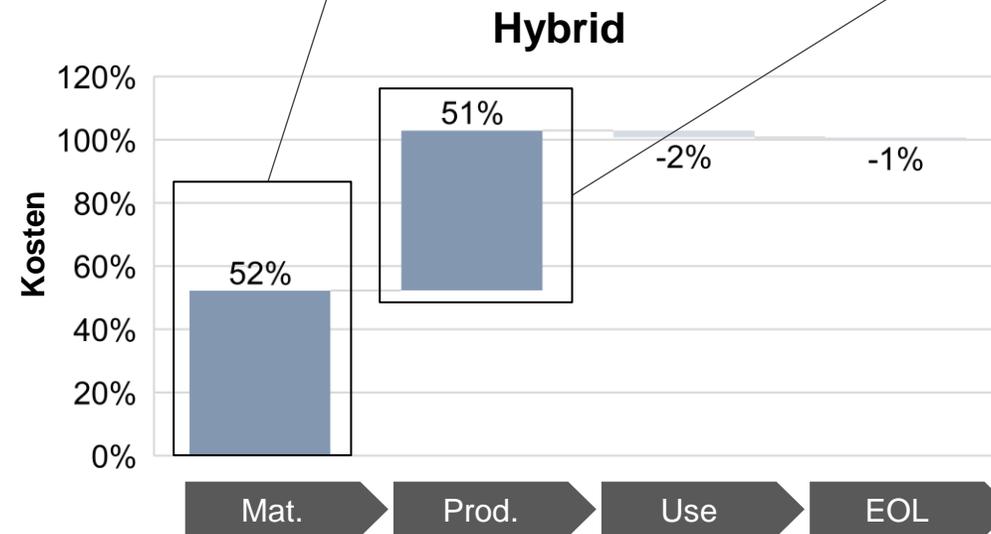
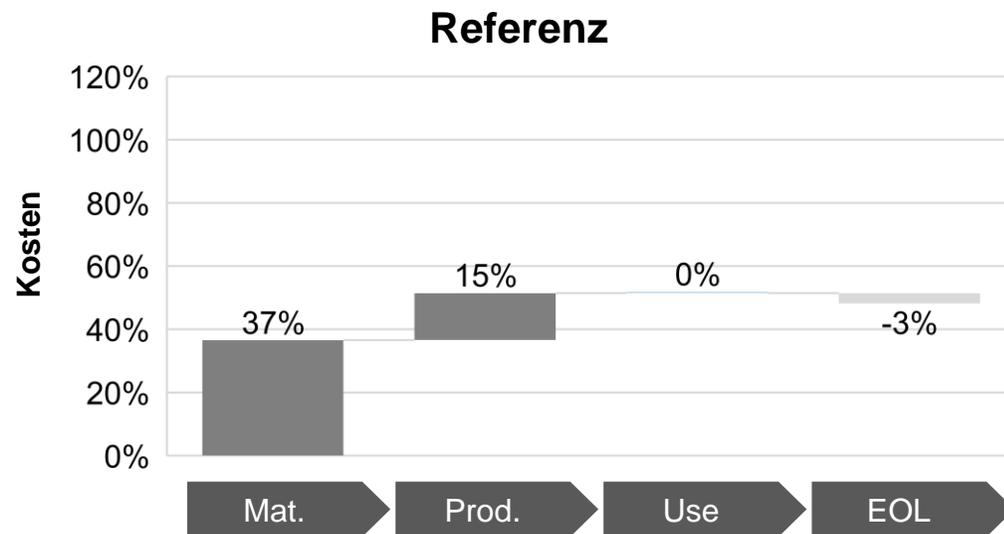
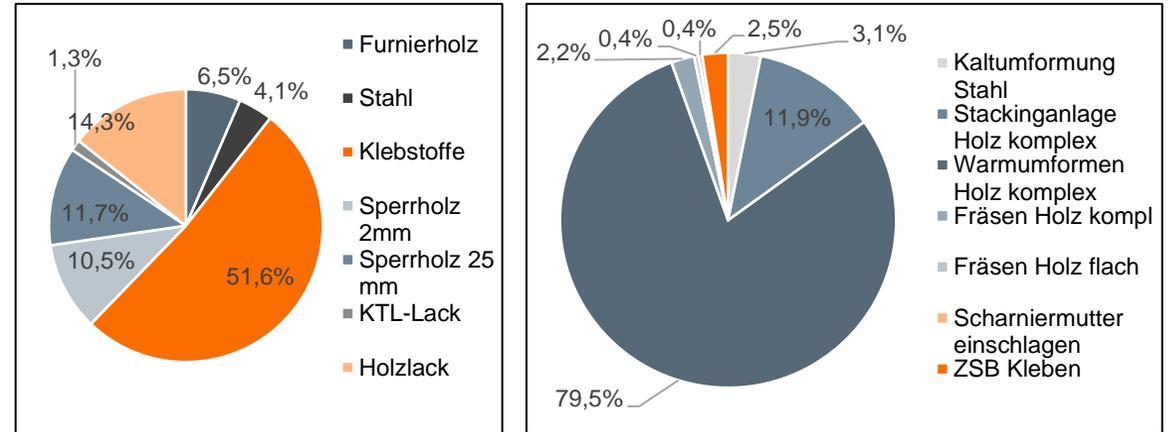


[1] VW [2] pre-sustainability

Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle – Berechnung von Beispielkomponenten: Life Cycle Costing

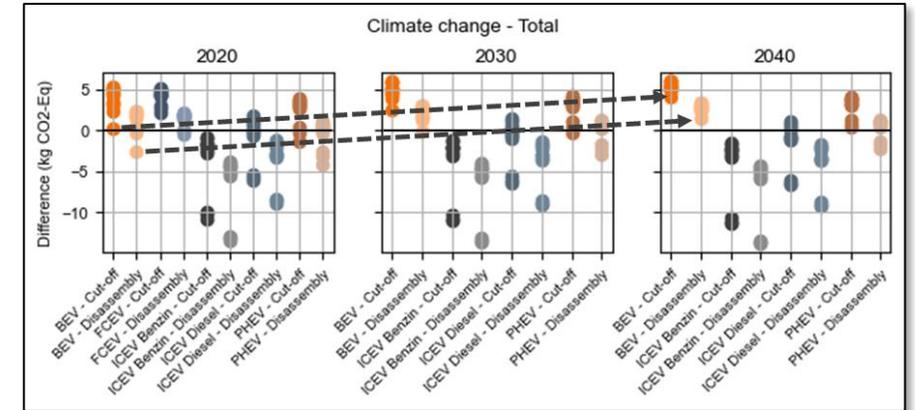


- Szenario „Elektrofahrzeug, private Nutzung in Deutschland im ländlichen Raum“
- Kosten des Referenzbauteils deutlich geringer
- Etwas höhere Materialkosten beim hybriden TAT
- Besonders großer Unterschied bei den Produktionskosten des hybriden TAT



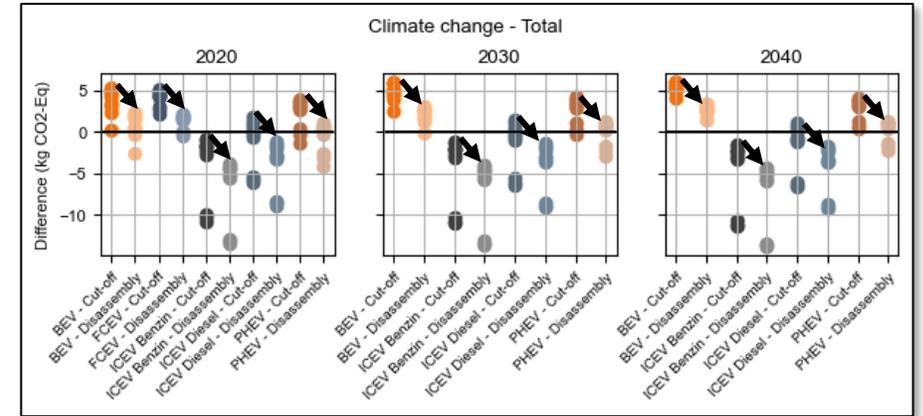
Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Interpretation der Beispiele & Übertrag auf allgemeine Anwendungsfälle

- Hebel für Reduktion der Umweltwirkungen und Kosten durch Leichtbau wird bei BEV mit zukünftig grünere Strom reduziert
- Dadurch Verschiebung der Hotspots von Nutzungsphase in Material- und Produktionsphase



Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Interpretation der Beispiele & Übertrag auf allgemeine Anwendungsfälle

- Hebel für Reduktion der Umweltwirkungen und Kosten durch Leichtbau wird bei BEV mit zukünftig grünerem Strom reduziert
- Dadurch Verschiebung der Hotspots von Nutzungsphase in Material- und Produktionsphase
- Hohe Demontagetiefe und damit sortenreinere Materialtrennung führt zu besserem Recycling → Potenzielle Reduktion der Umweltwirkungen



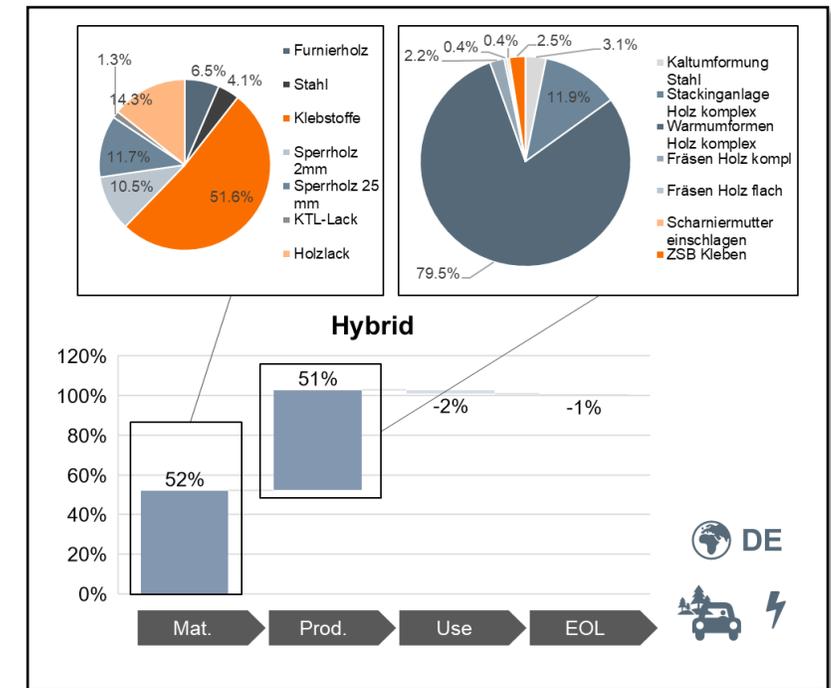
Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Interpretation der Beispiele & Übertrag auf allgemeine Anwendungsfälle

- Hebel für Reduktion der Umweltwirkungen und Kosten durch Leichtbau wird bei BEV mit zukünftig grünem Strom reduziert
- Dadurch Verschiebung der Hotspots von Nutzungsphase in Material- und Produktionsphase
- Hohe Demontagetiefe und damit sortenreinere Materialtrennung führt zu besserem Recycling → Potenzielle Reduktion der Umweltwirkungen
- Nutzung bio-basierter Materialien können Klimawandel-Impact reduzieren → Problemverschiebung muss beachtet werden



Lebenszyklusübergreifende Bewertungsmodelle - Interpretation der Beispiele & Übertrag auf allgemeine Anwendungsfälle

- Hebel für Reduktion der Umweltwirkungen und Kosten durch Leichtbau wird bei BEV mit zukünftig grünem Strom reduziert
- Dadurch Verschiebung der Hotspots von Nutzungsphase in Material- und Produktionsphase
- Hohe Demontagetiefe und damit sortenreinere Materialtrennung führt zu besserem Recycling → Potenzielle Reduktion der Umweltwirkungen
- Nutzung bio-basierter Materialien können Klimawandel-Impact reduzieren → Problemverschiebung muss beachtet werden
- Teurere Materialien + lange Prozesszeiten in Produktion für hybride Bauteile können zu höheren Kosten führen
 - Komplexität der Bauteile reduzieren um Verschnitt und Prozesszeiten zu reduzieren
 - Schnellere + günstigere Produktionsprozesse nutzen



9

Handlungsempfehlungen und Fazit

Handlungsempfehlungen und Fazit

- Frühzeitige LCA/LCC-Schleifen: Hot-Spots in Konzeptphase identifizieren und reduzieren
- Datenerfassung und -überwachung während des gesamten Lebenszyklus
 - Insbesondere Materialprüfung, Fertigungsdaten und Sensorik im Bauteil
 - Umfang der Datenerfassung muss auf Geschäftsmodell angepasst sein
- Fokus auf Materialien mit geringen Umweltwirkungen (z.B. Rezyklate, bio-basierte Materialien)
- Recycling- & Reparaturgerechtes Design erleichtert die Materialtrennung
- Werkstatttaugliche Reparaturprozesse einsetzen, um Reparatur und R-Strategien zu ermöglichen
- EOL-Szenarien (Reuse / Remanufacture / Recycle) analysieren, um Potenzial für Lebensdauererlängerung auszuschöpfen
- Kontinuierliche Optimierung hinsichtlich Funktions-, Kosten- und Umwelt-Kriterien

Multimaterialbauteile für alle Lebenszyklusphasen optimieren



OHLF OPEN HYBRID
LABFACTORY

Life Cycle Technologien für hybride Strukturen

Vielen Dank!

15.05.2025