

Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit – LBF



Dr. Matthias Enders

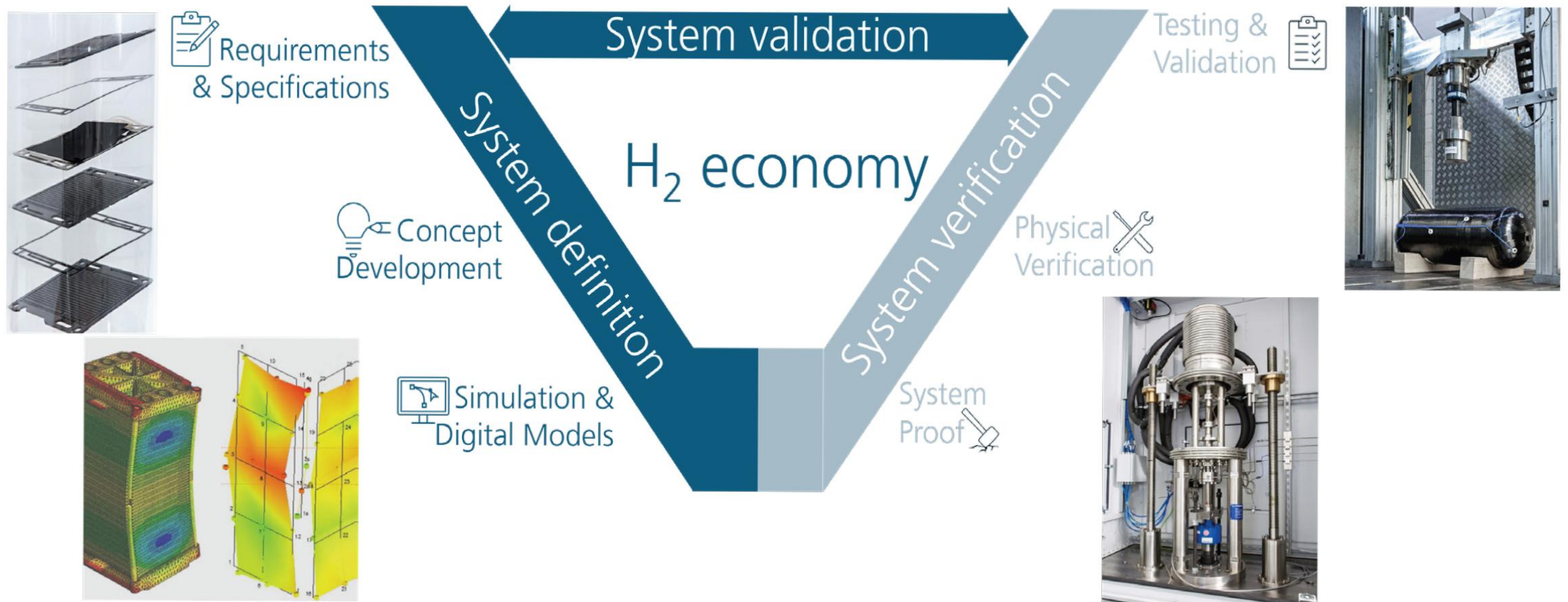
15.10.2026



Skalierbare Testmethodik zur Bewertung der Systemzuverlässigkeit von Brennstoffzellenstapeln in Nutzfahrzeugen unter Vibrationsbelastung

Fraunhofer LBF

Ihr Partner entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette



Motivation

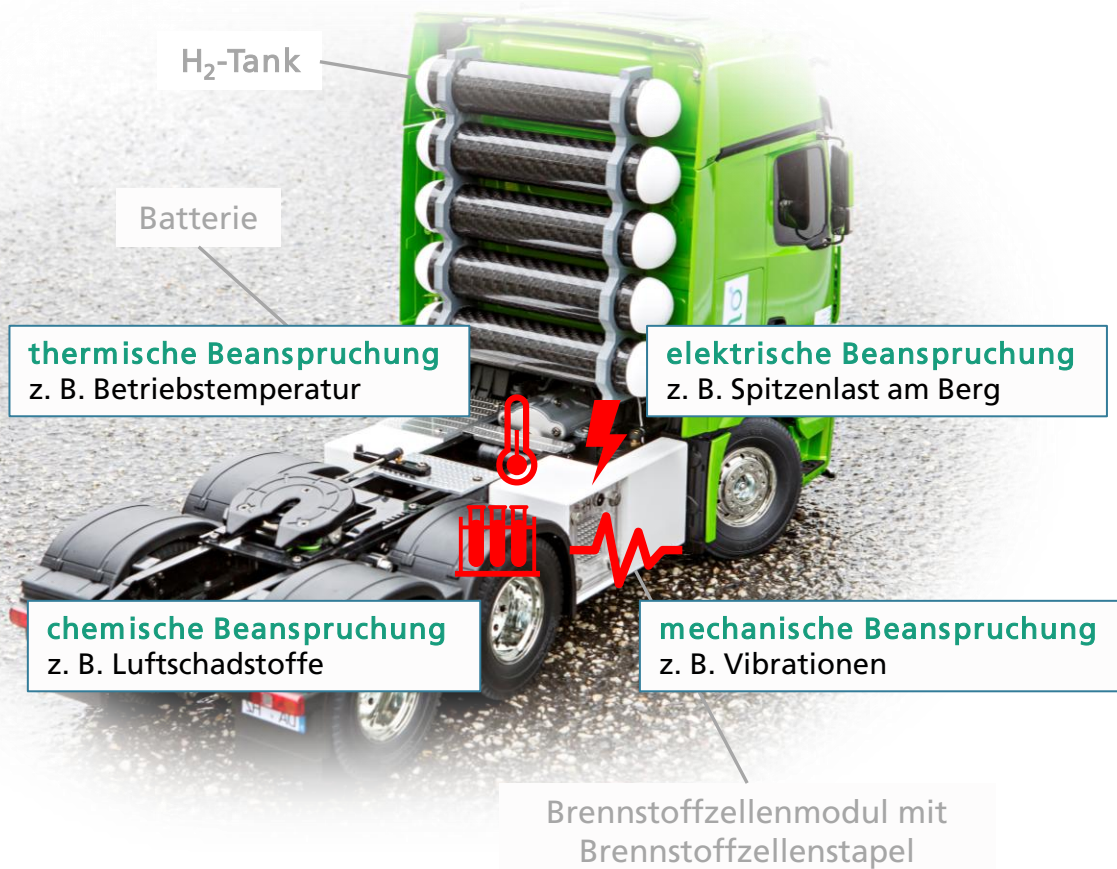
Elektrotraktion mit Wasserstoff-Brennstoffzellen – Beanspruchung und Zuverlässigkeit

mobiler Einsatz bedeutet hochgradig
multiphysikalische und chemische
Beanspruchungen

überlagerte Einflüsse auf die Zuverlässigkeit des
Stapels bisher noch wenig bekannt

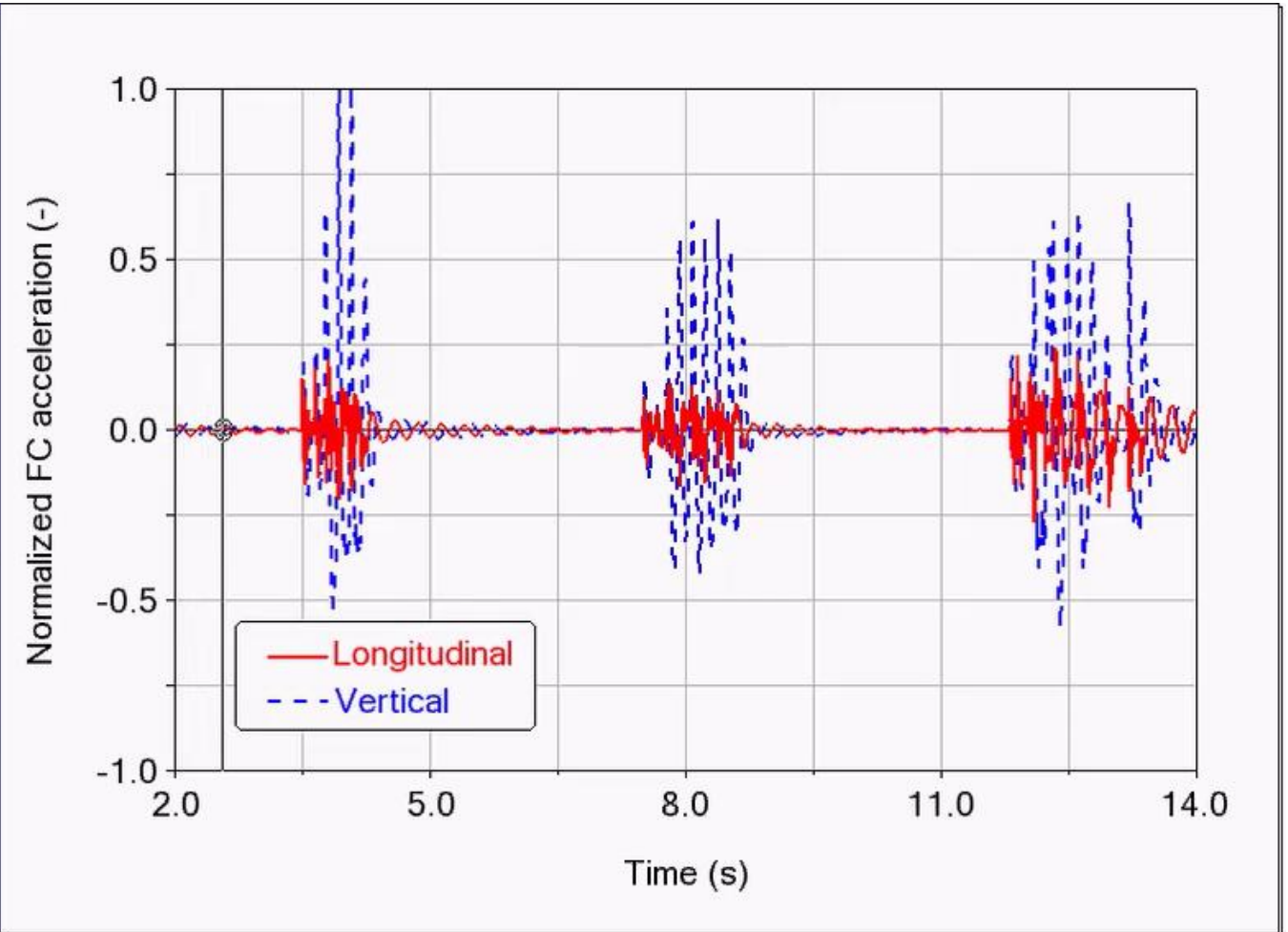
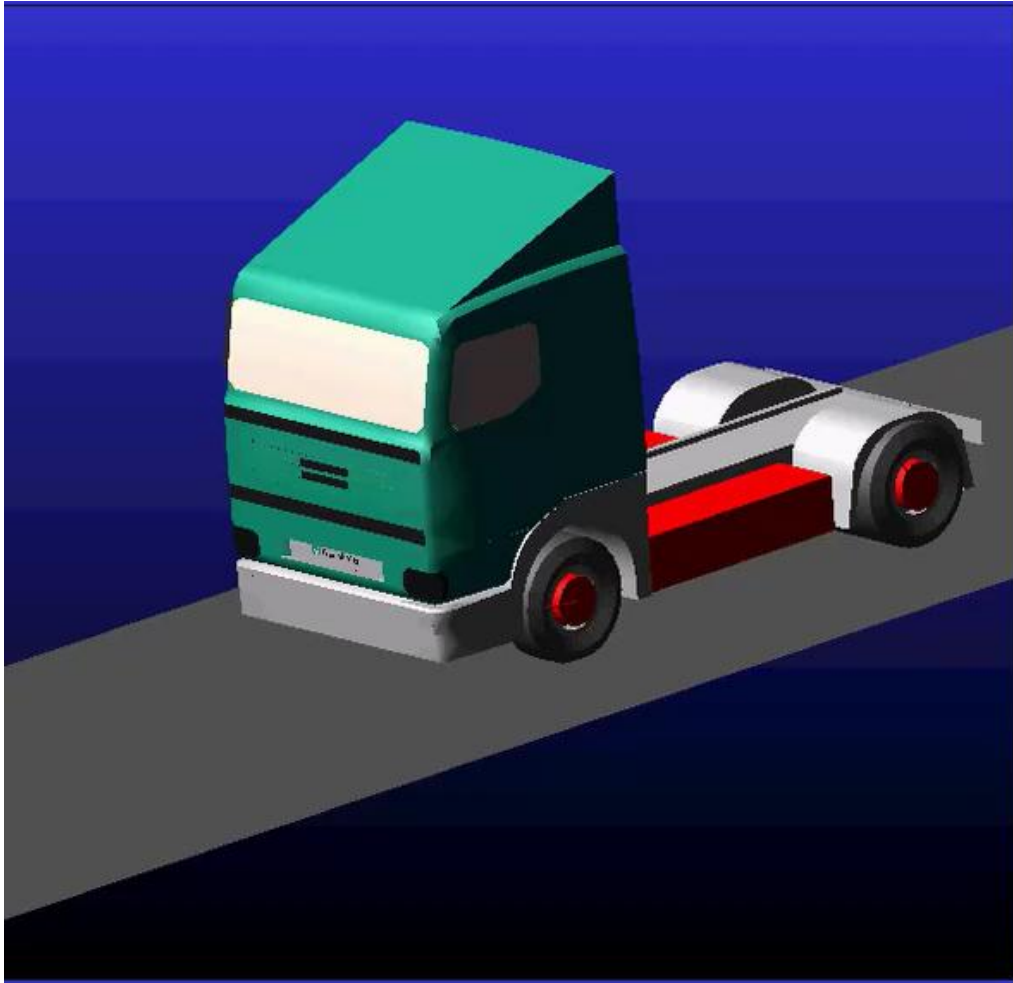
Labortests: meist einzelne Effekte auf Zellebene
Erprobung im Feld: Erfahrungen bisher begrenzt
Standardisierung: noch nicht abgeschlossen

Hier setzen die Arbeiten des Fraunhofer LBF an:
➤ Neue Methoden zur Absicherung der
Zuverlässigkeit in Nutzfahrzeuganwendungen (Lkw)



Einfluss von Vibrationen

Der Hauptgrund für eine verkürzte Lebensdauer und häufige Ausfälle



Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugkarosserien

Unterschiedliche Integrationsansätze führen zu unterschiedlichen Einbaupositionen

Tief montiert – seitlich, mittig, über der Vorderachse im Rahmen



Source: MPREIS Hydrogen



Source: MAHLE



Source: AVL

Hoch montiert – hinter der Fahrerkabine



Source: Amogy

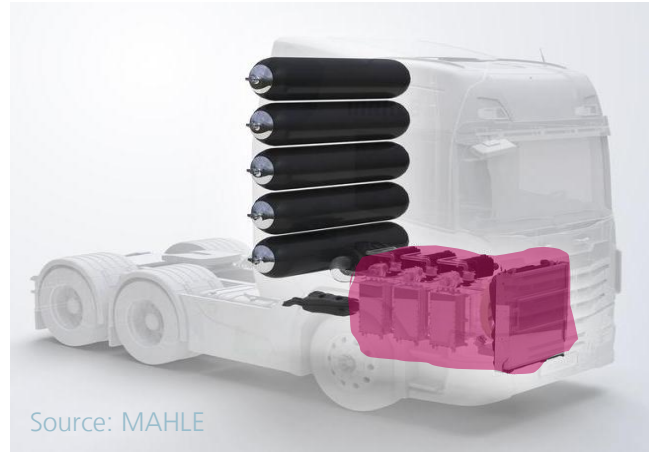
Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugkarosserien

Unterschiedliche Integrationsansätze führen zu unterschiedlichen Einbaupositionen

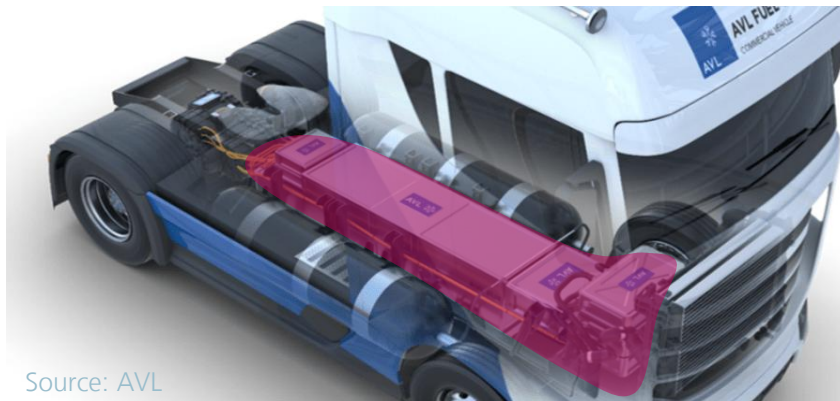
Tief montiert – seitlich, mittig, über der Vorderachse im Rahmen



Source: MPREIS Hydrogen



Source: MAHLE



Source: AVL

Hoch montiert – hinter der Fahrerkabine

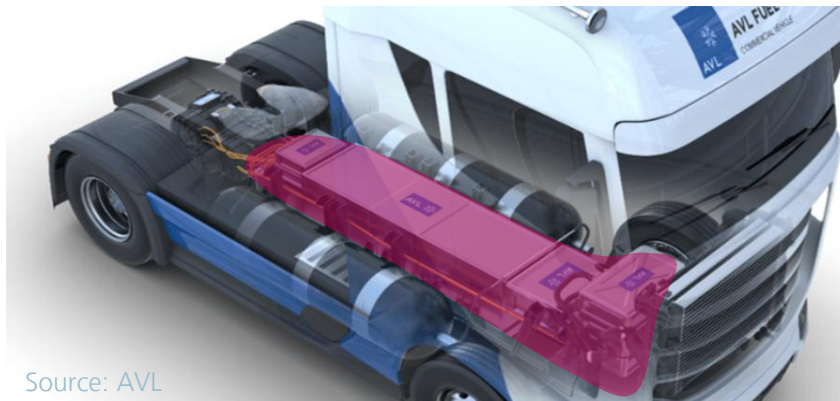
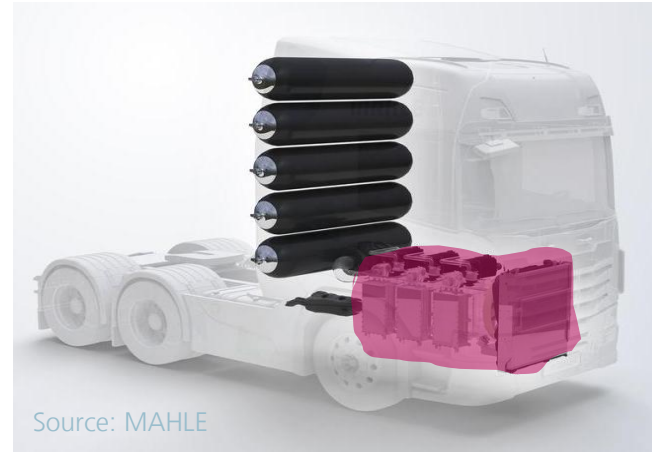


Source: Amogy

Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugkarosserien

Unterschiedliche Integrationsansätze führen zu unterschiedlichen Einbaupositionen

Tief montiert – seitlich, mittig, über der Vorderachse im Rahmen

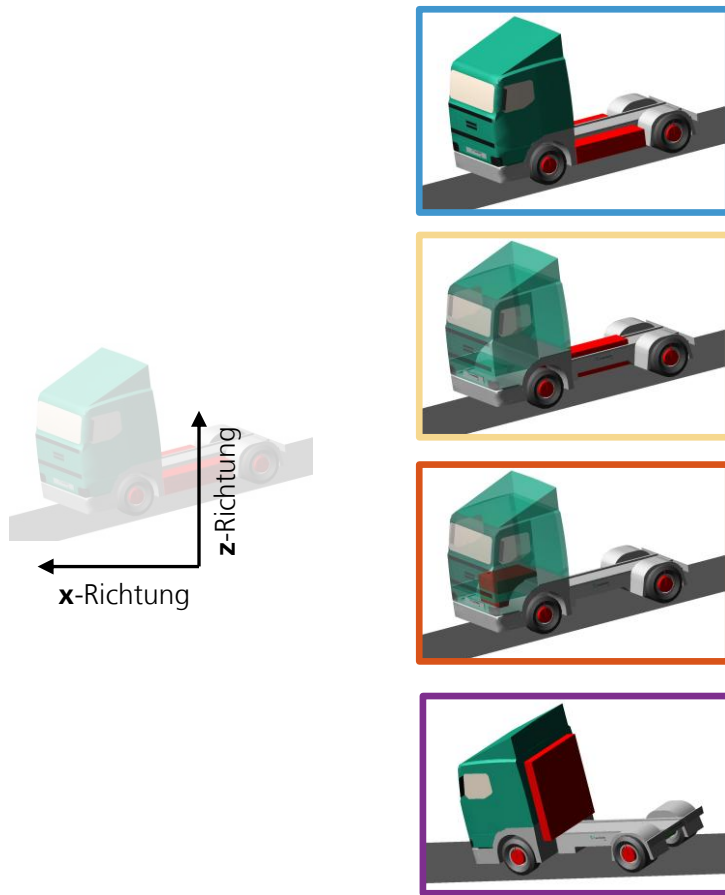


Hoch montiert – hinter der Fahrerkabine



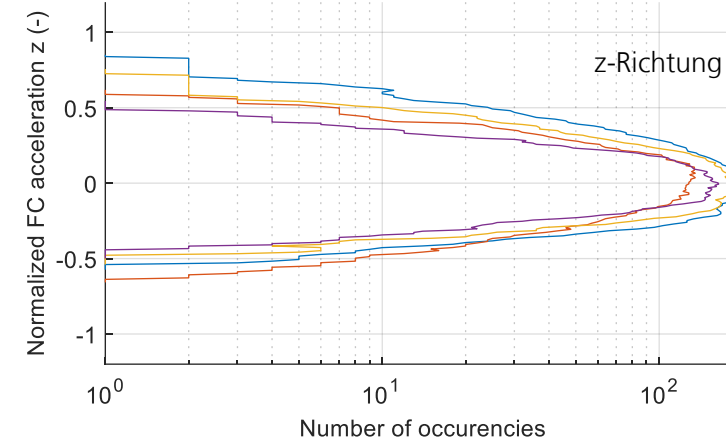
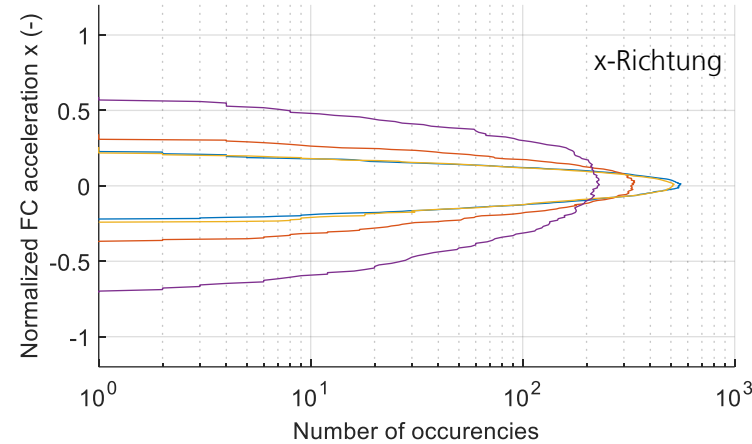
Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugkarosserien

Einfluss der Einbauposition auf mechanische Schädigung durch Vibrationen



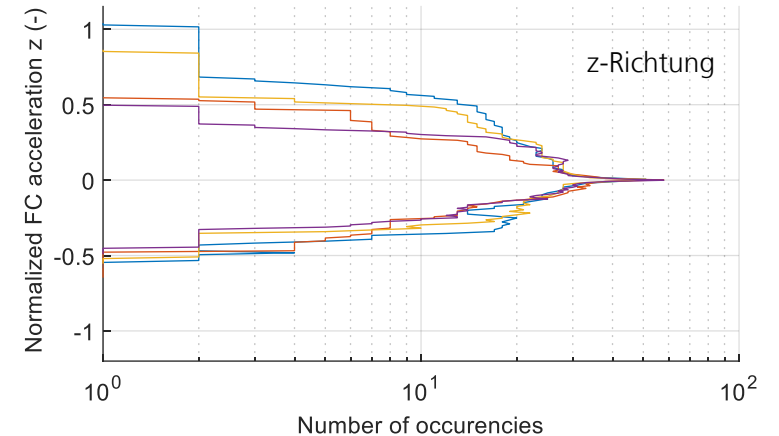
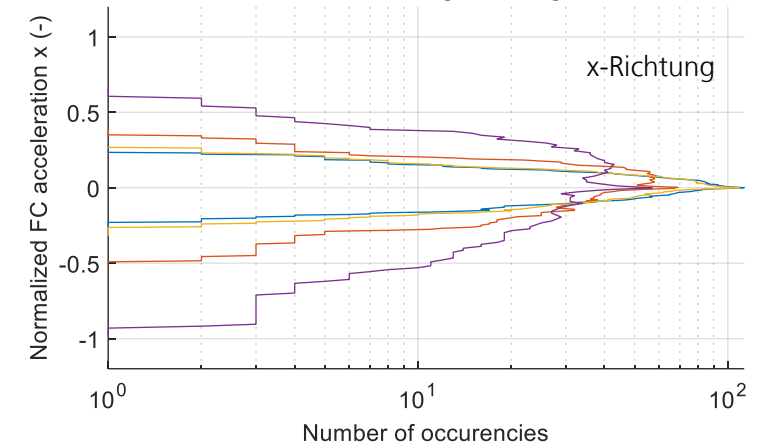
Schlechtweg @ 50 km/h

Level crossing counting



Schwellen @ 50 km/h

Level crossing counting



Brennstoffzellensysteme in Fahrzeugkarosserien

Einfluss der Einbauposition auf mechanische Schädigung durch Vibrationen

- Vibrationsauswirkungen sind vielfältig und hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel:
- der Position im Fahrzeug,
 - der Struktur und Befestigung des Zellstapels, und
 - der Integration der BoP-Komponenten (Balance of Plant)

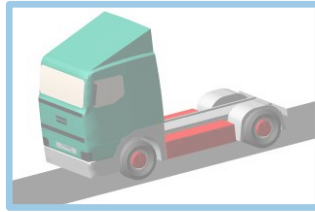
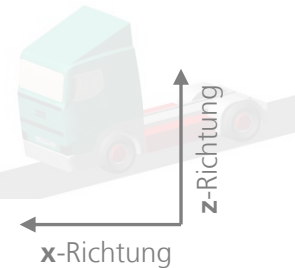
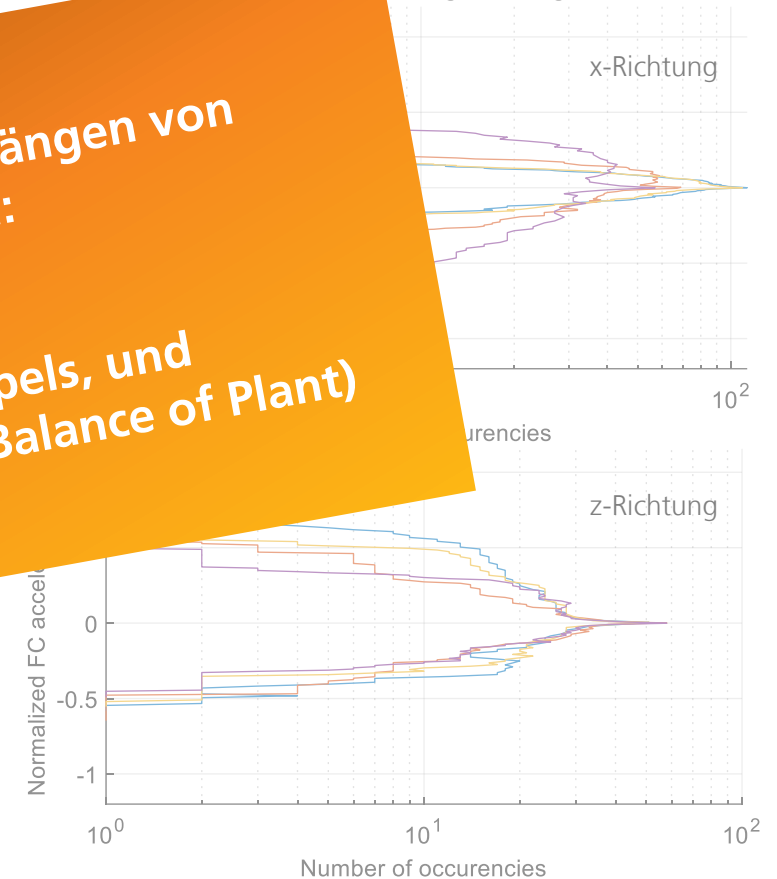
Schlechtweg @ 50 km/h

Level crossing counting



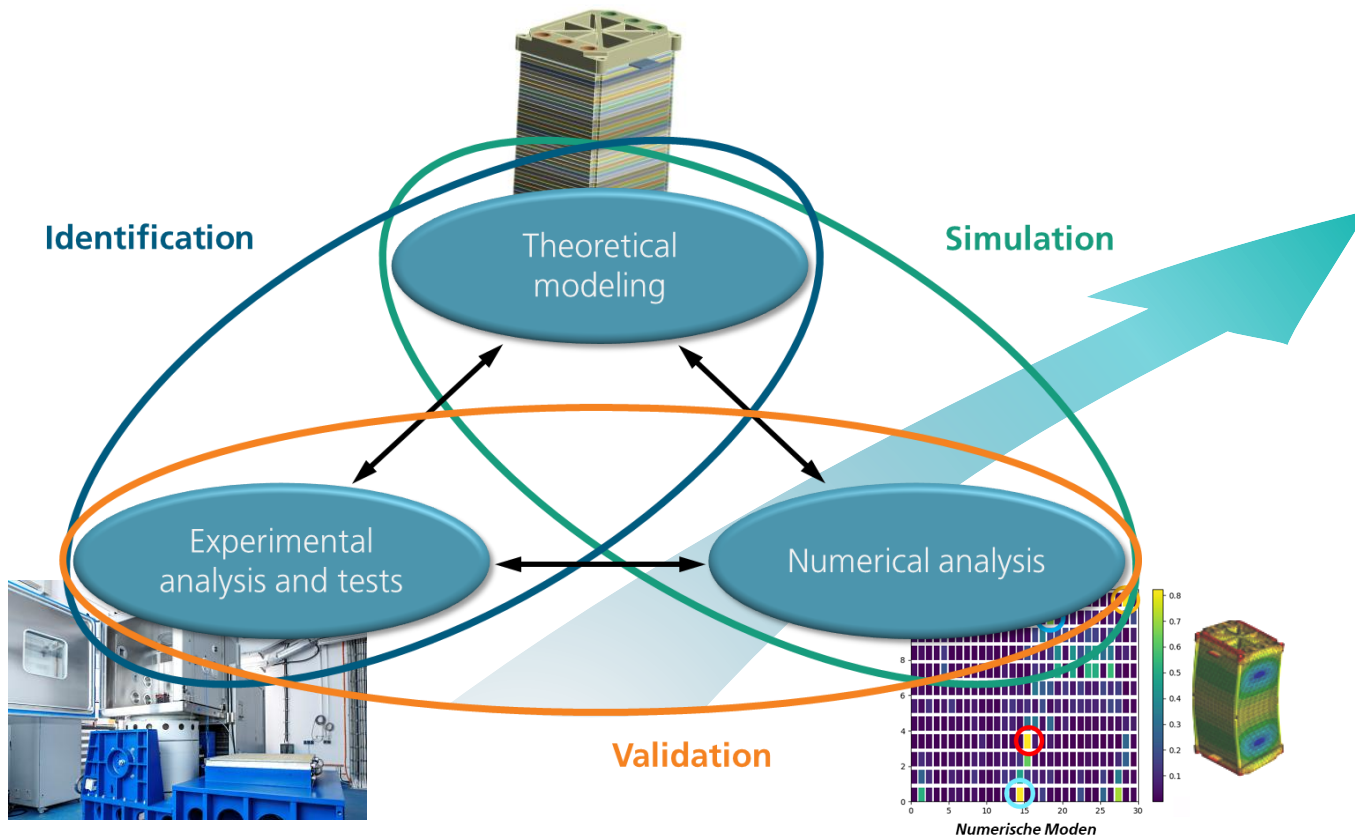
Schwellen @ 50 km/h

Level crossing counting



Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Werkzeugkasten des Strukturdynamikers



Modellbasierte Entwicklung und **systemische Analyse** ermöglichen bereits in der Entwicklungsphase:

- die **Definition von Anforderungen** an Komponenten sowie die Auswahl und **Parametrierung** bewährter Konzepte
- die Berücksichtigung von **Wechselwirkungen** zwischen Komponenten/Teilsystemen und realistischen **Randbedingungen**.

Dies unterstützt eine fundierte **Entscheidungsfindung** und einen frühzeitigen **Erkenntnisgewinn**.

Source: D. J. Ewins. *Exciting vibrations: the role of testing in an era of supercomputers and uncertainties*. Meccanica - An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics. DOI 10.1007/s11012-016-0576-y

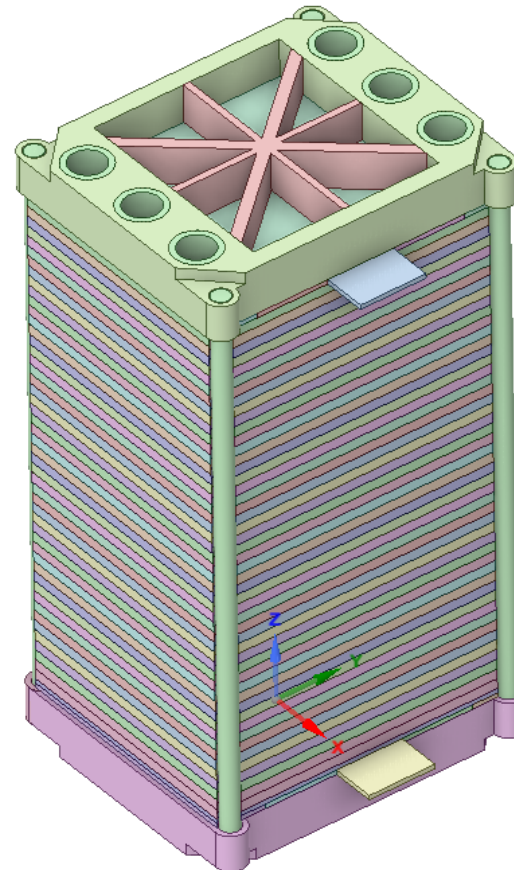
Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Modellerstellung

BZ100



ZSW: Zentrum für Sonnenenergie-
und Wasserstoffforschung



Beeinflussende Parameter

- Zellmodellierung
- Mechanische Vorspannung
- Kontakt zwischen den Zellen
- Temperatur
- Medien (coolant, H₂)

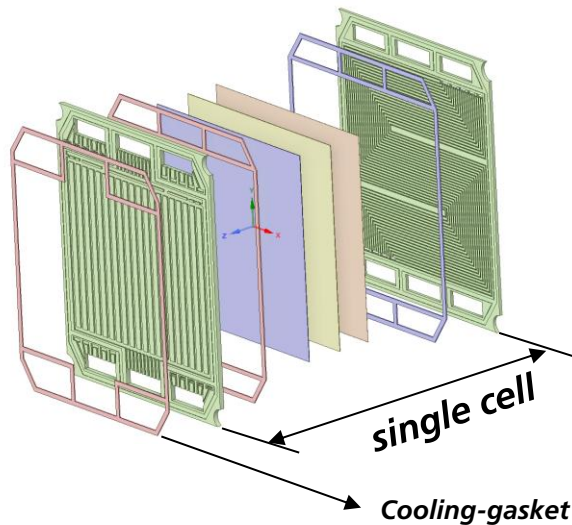
Herausforderungen

- Unbekanntes Materialverhalten
 - temperaturabhängig
 - druckabhängig
- Komplexe Strukturen
- Unbekannte Vorspannung

Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Homogenisierter Zellansatz zur Reduzierung der Komplexität

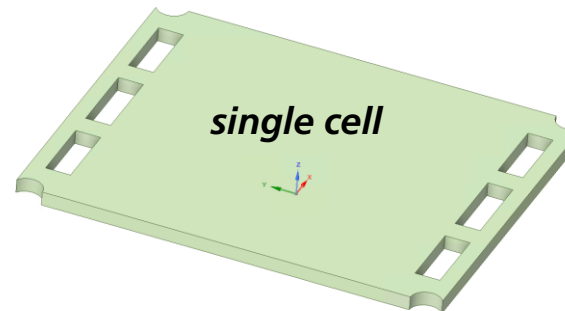
Detaillierte Zelle



Herausforderung:

- Dünne Schichten
- Komplexes Materialverhalten
- Hohe Anzahl von Freiheitsgraden

Homogenisierte Zelle



Ansatz und Vorgehensweise:

- Homogenisierung der Materialeigenschaften
- Anpassung der modalen Parameter und Anpassung der Modellparameter

Modelldesign



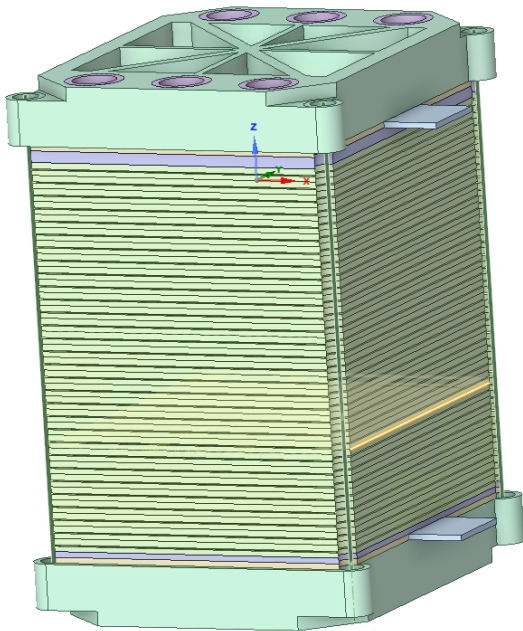
Stack:

- 48 homogenisierte Zellen
- Über die gesamte Fläche verteilter Kontakt (auf der Kühlseite wirkend)

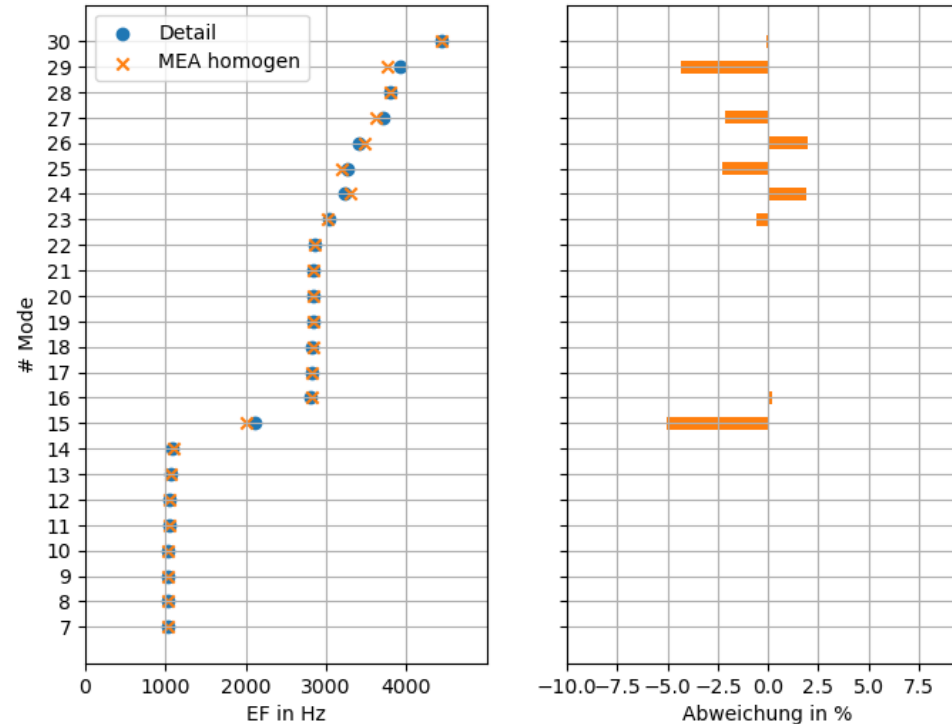
Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Homogenisierter Zellansatz zur Reduzierung der Komplexität

**30 Zellen
detailliert**



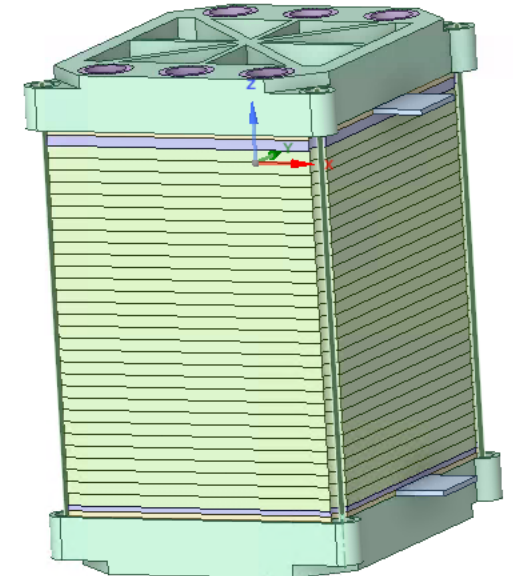
**Berechnungszeit ca.
28 h**



Ergebnis:

- Strukturelles dynamisches Verhalten wird gut abgebildet
- Fehler $< \pm 5 \%$

**30 Zellen
homogenisiert**

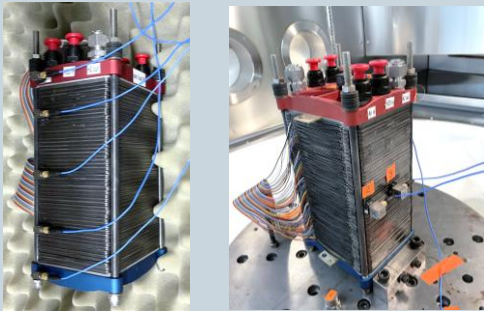


**Berechnungszeit ca.
28 min**

Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Vorgehen: Multiskalenansatz zur Modellkalibrierung

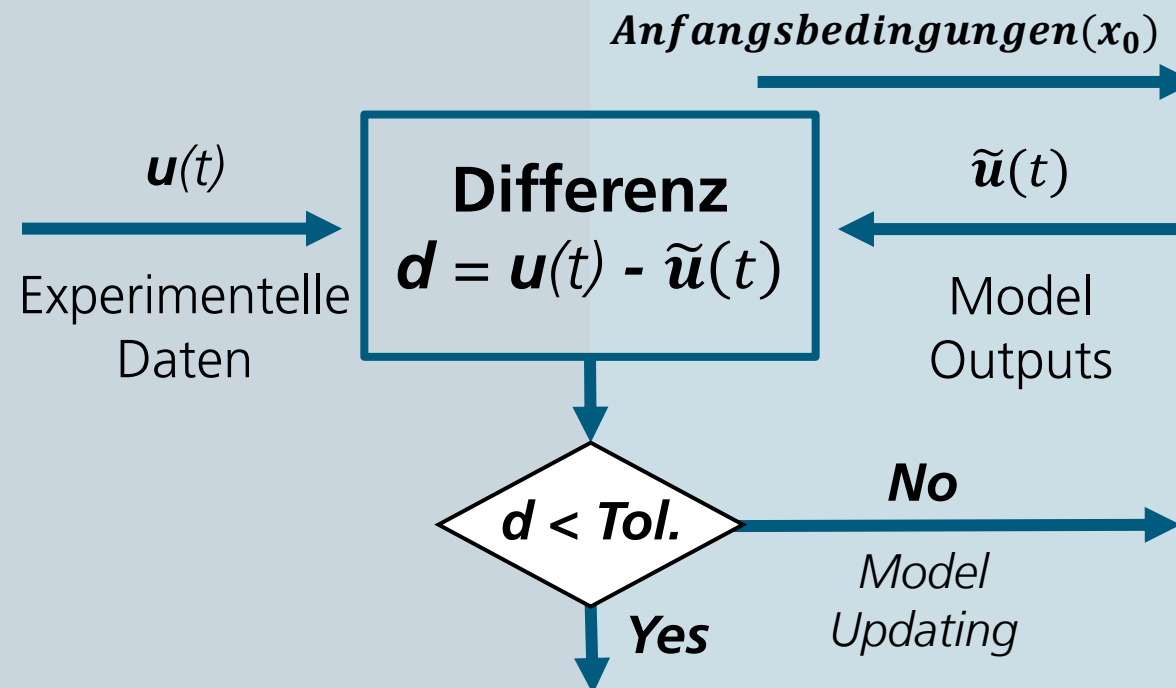
Reales System



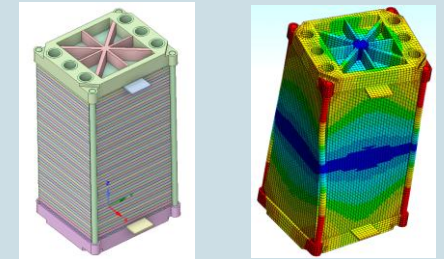
Experimentelle Analyse

- Frei-Frei-Randbedingungen (bis zu 1600 Hz)
- Shaker Test (bis zu 2000 Hz)

Labor Virtuell



Digital Twin (FE Analyse)

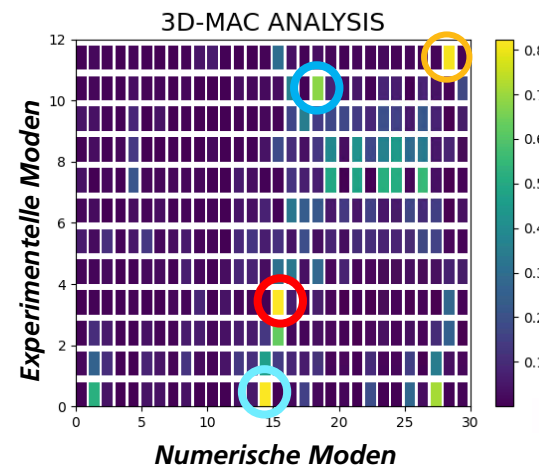
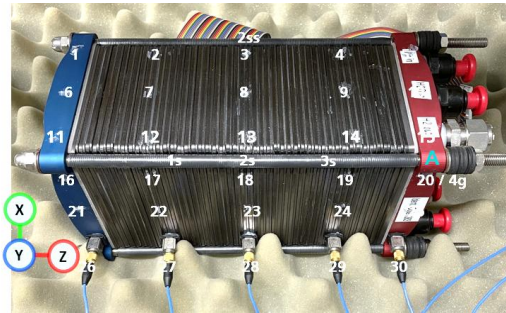
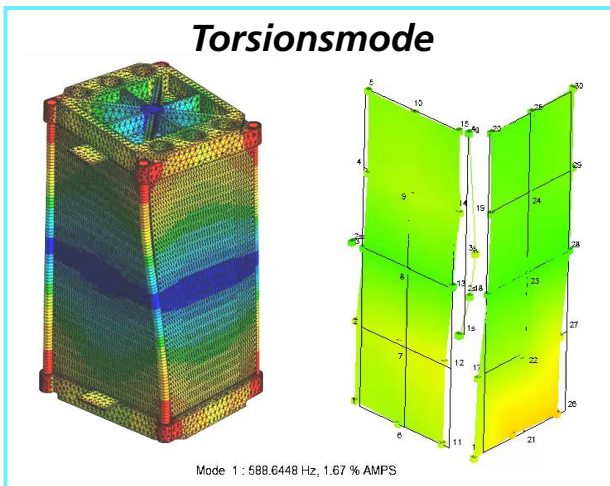
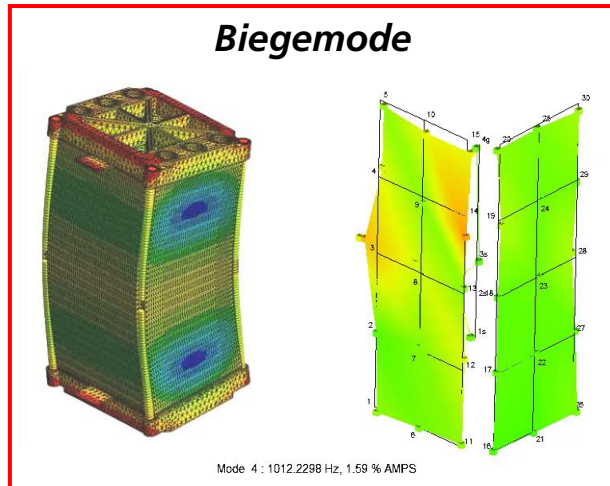


Unbekannte Parameter

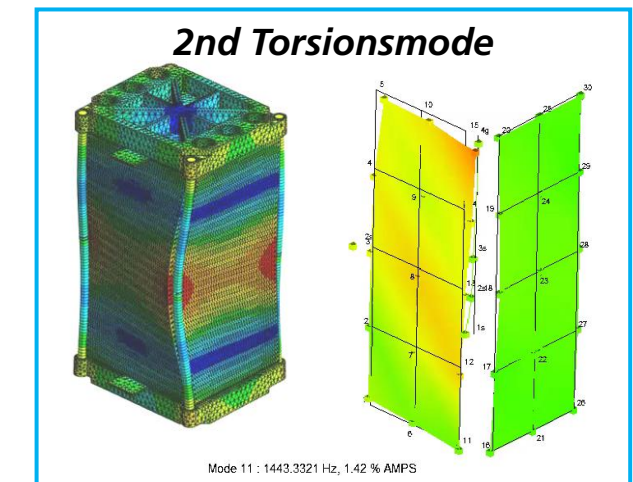
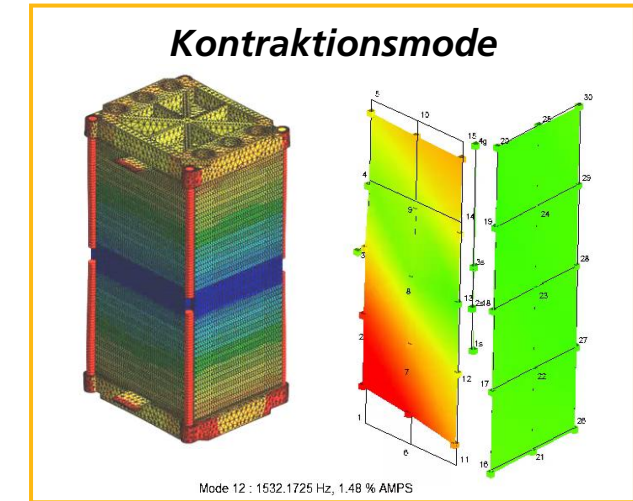
- Materialeigenschaften der Komponenten
- Eigenschaften der Zellkontakte
- Verspannkraft des Stacks
- Shaker-Eigenschaften

Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

1. Frei-Frei experimentelle Analyse: Identifizierung der Moden (MAC-Analyse)



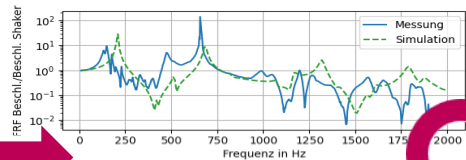
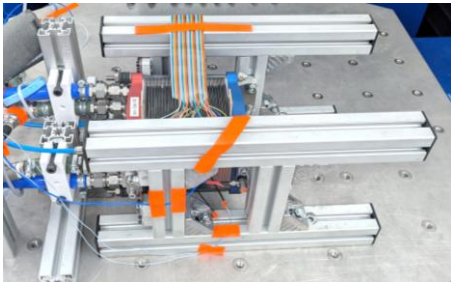
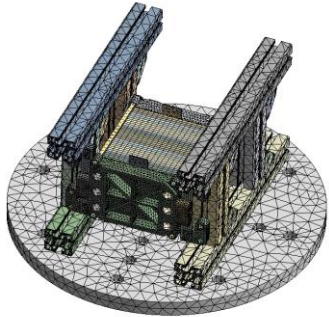
Modenformen	Frequenz [Hz]
Torsion	588,645
Biegung	1012,230
2nd Torsion	1443,332
Kontraktion	1532,173



Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

2. Experimentelle Shaker Tests: Modellabgleich

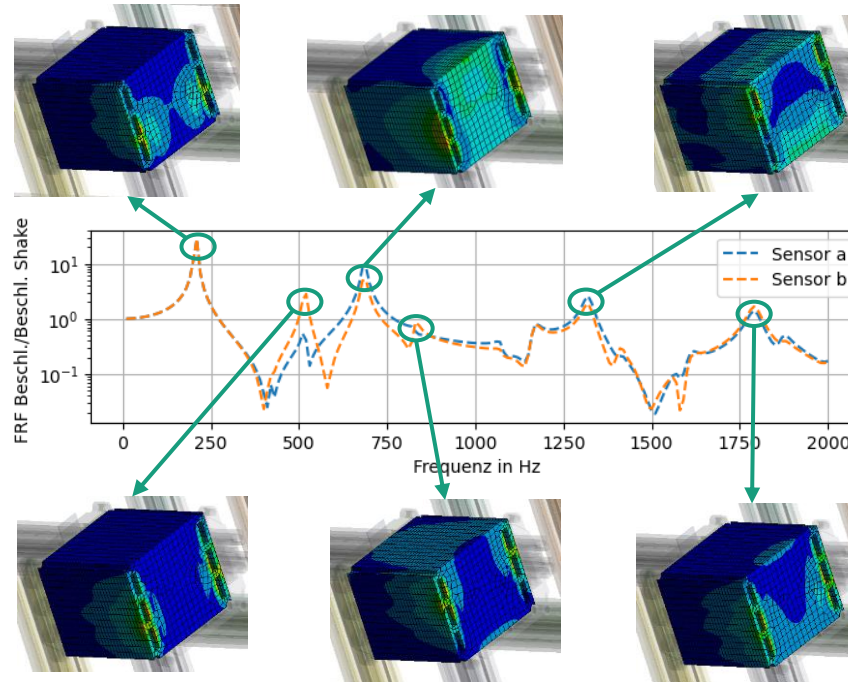
Modellabgleich



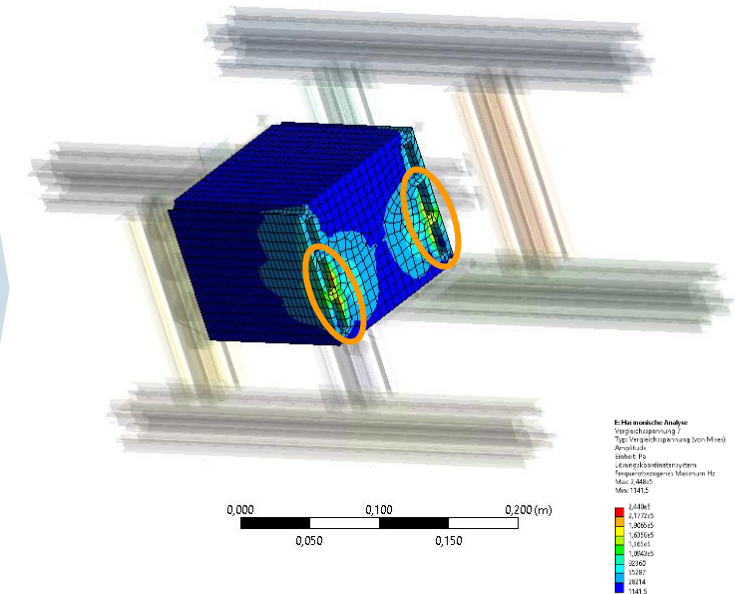
Input aus
1. Optimierung

Modell
Updating

Simulierte Spannungsverteilung in den Zellen



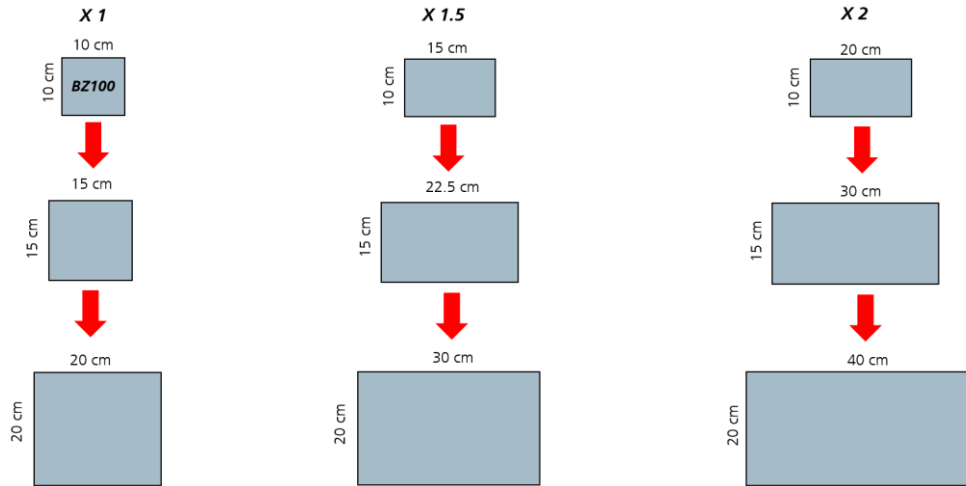
Frequenzbezogene maximale Amplitude



- Größte Spannung über den gesamten Frequenzbereich in der obersten Zelle
- Größte Spannung in der Nähe der Leitungslöcher

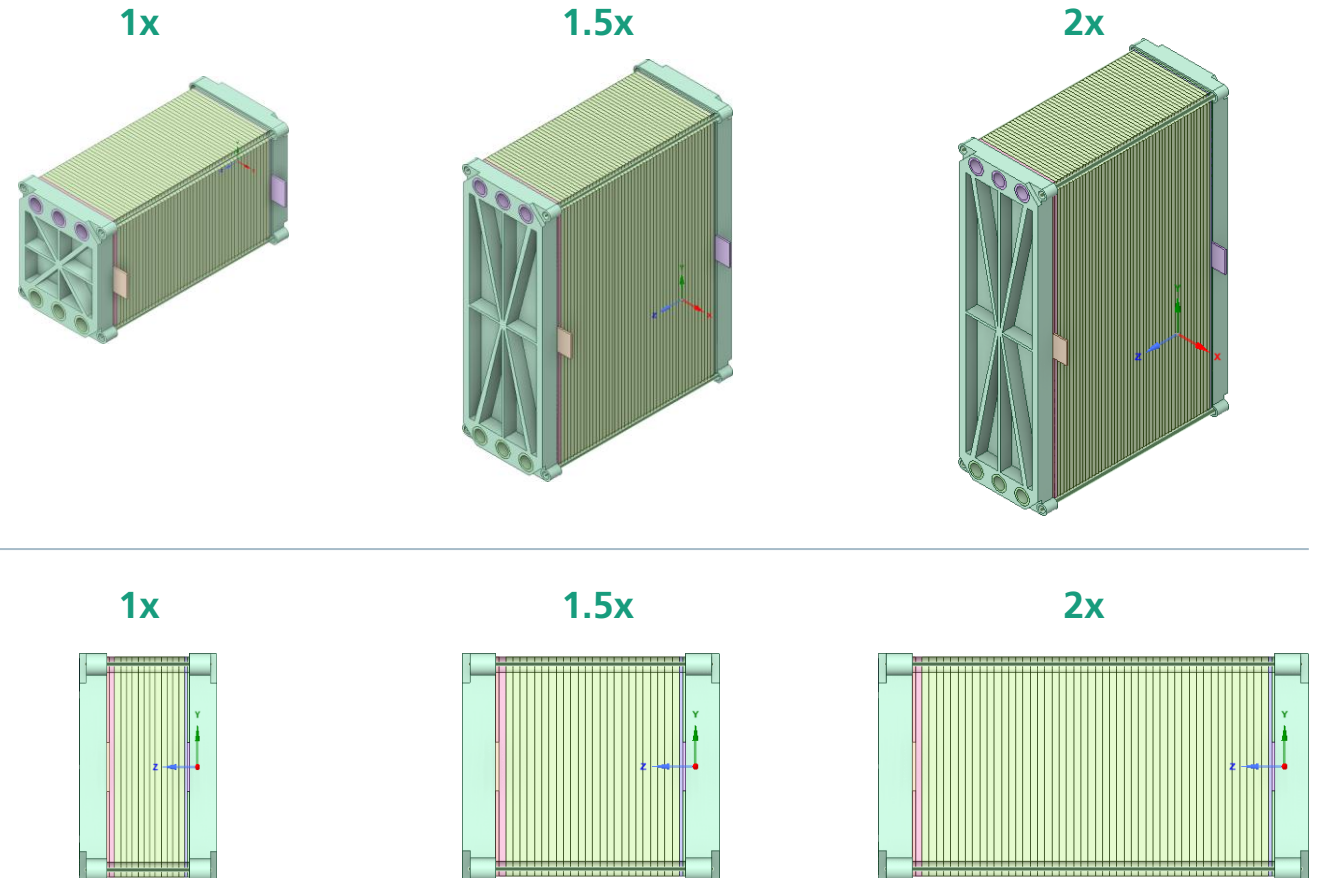
Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Skalierungsanalyse



Skalierungsanalyse

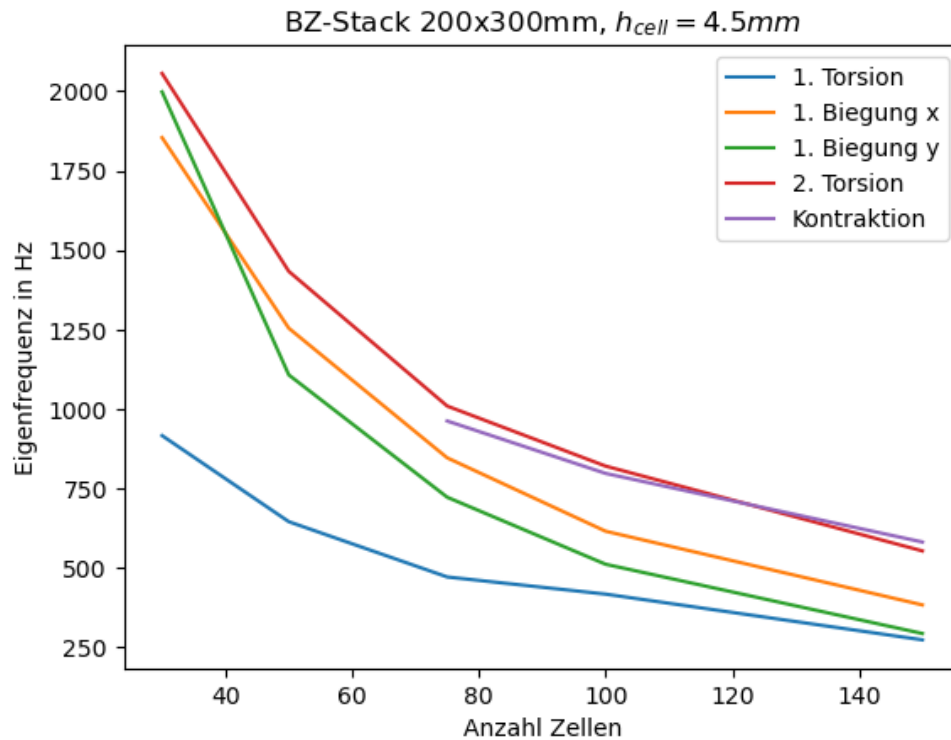
- Übertragbarkeit von experimentellen Analysen an kleinen Stacks auf Stacks aus Automotive-Anwendungen
- Untersuchung von 4 Parametern
 - Stack-Breite
 - Seitenverhältnis
 - Zellenzahl
 - Zellenhöhe



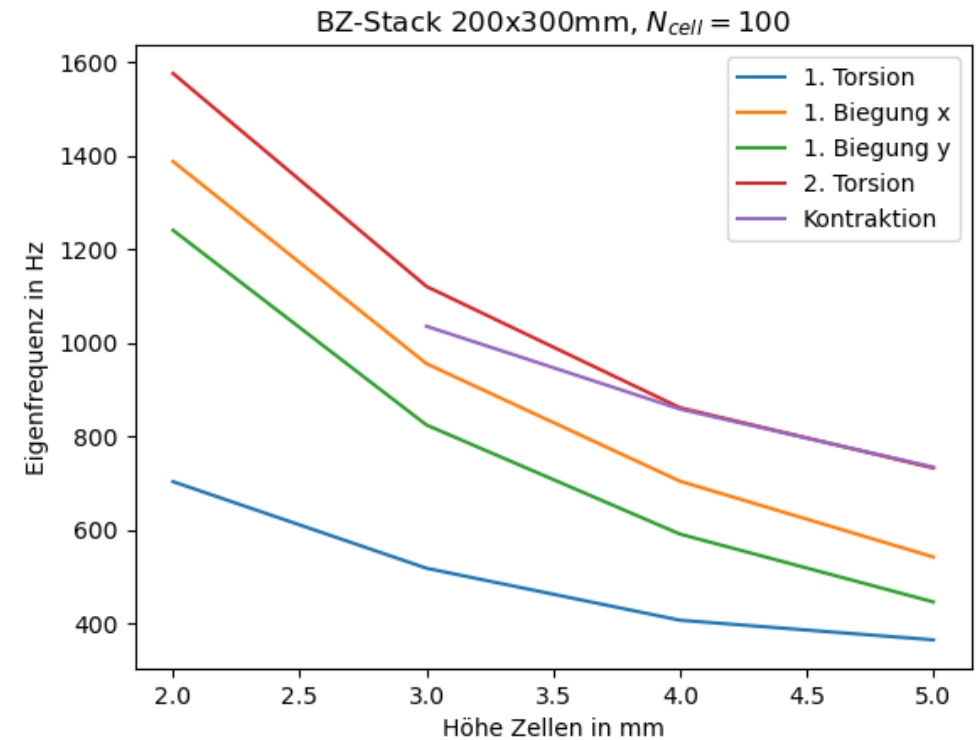
Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Skalierungsanalyse – Zellhöhe und Zellzahl

Zellzahl



Zellhöhe

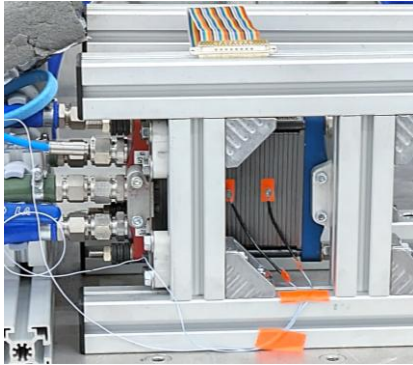


Höherer Stack weist geringere Eigenfrequenzen auf:

- Bei höherer Anzahl an Zellen
- Bei größerer Zellhöhe

Effizienter Modellierungsansatz für BZ-Stack-Schwingungen

Skalierungsanalyse – Vergleich mit Automotive-Anwendung



BZ-100-Stack

- $N_{\text{cell}} = 30$
- $h_{\text{cell}} = 4,5 \text{ mm}$
- Grundfläche ca. $11,1 \times 13,6 \text{ cm}$



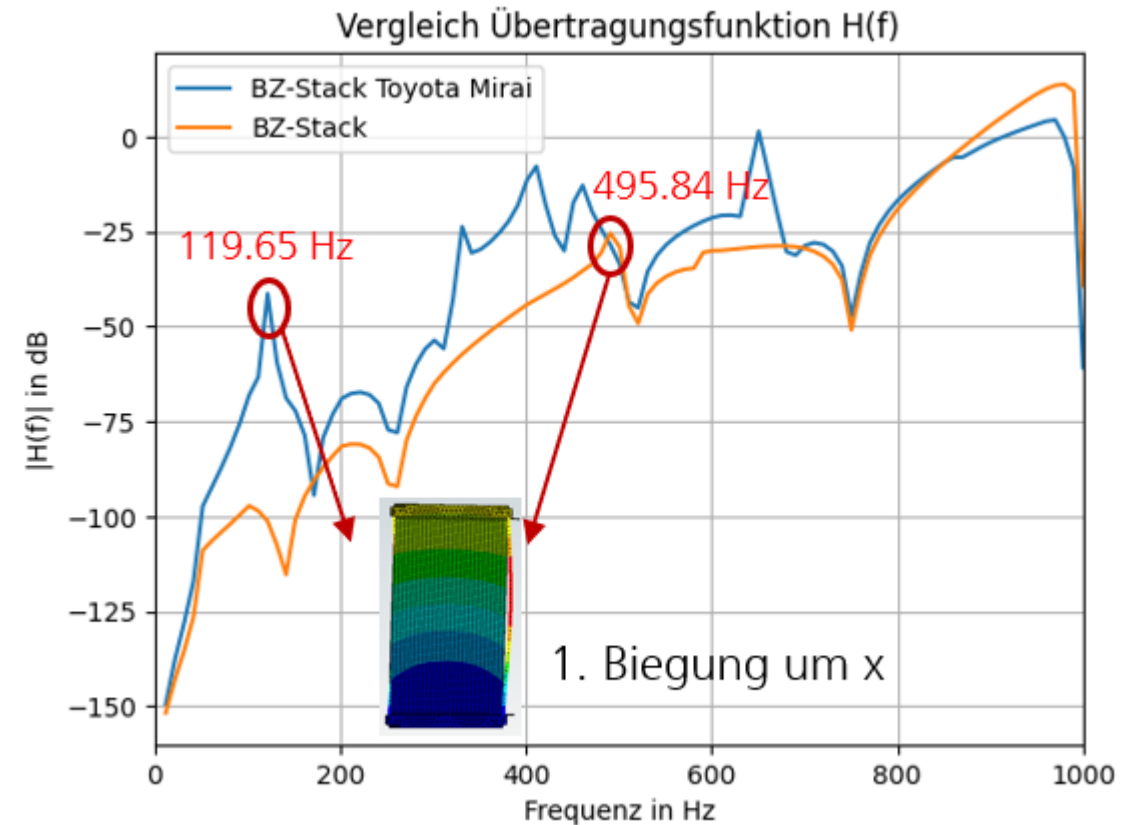
New fuel cell stack (Mirai)

3.1 kW/L
(Maximum output: 114 kW / volume: 37 L; weight: 56 kg)



BZ-Stack Toyota Mirai

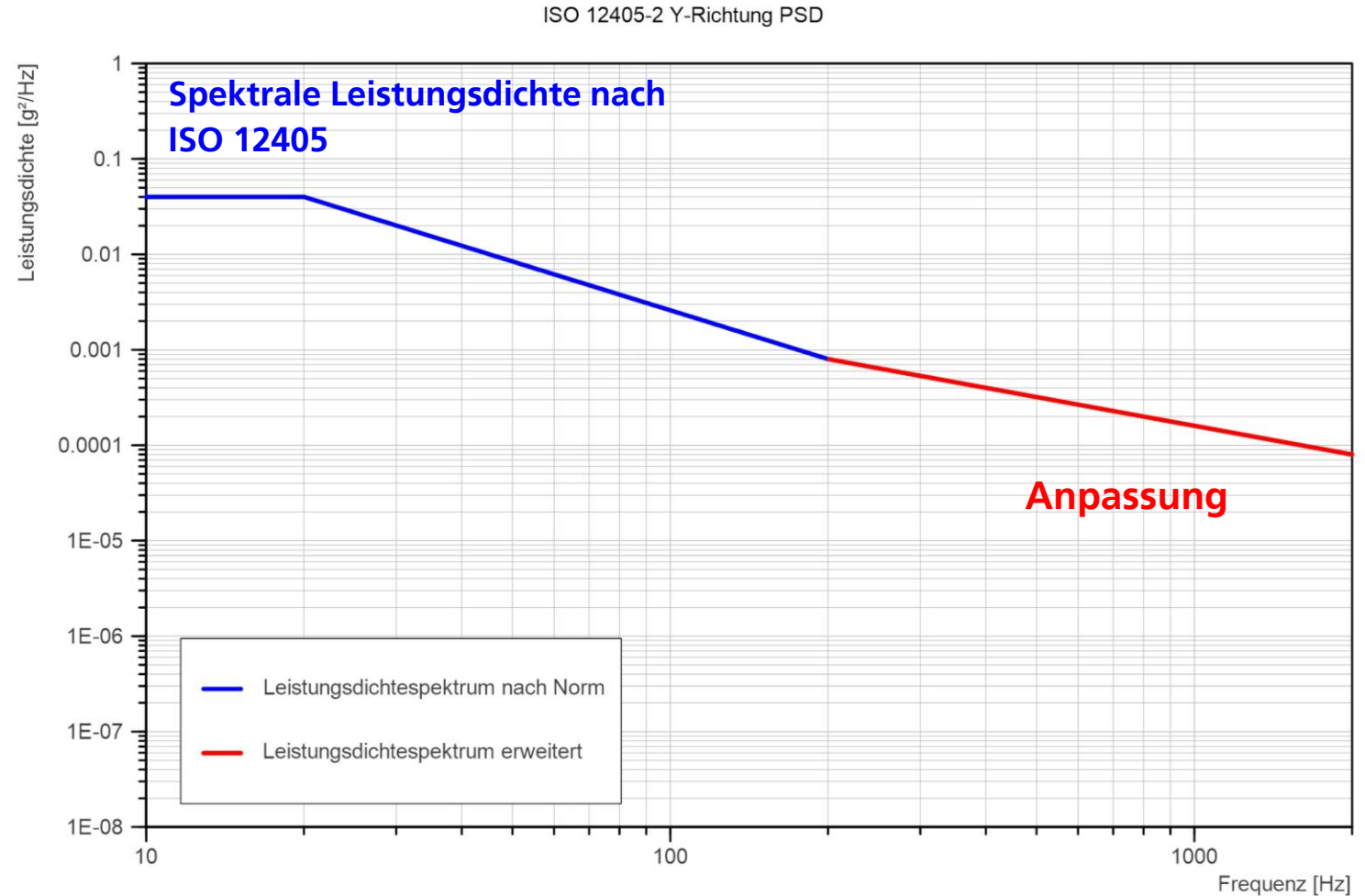
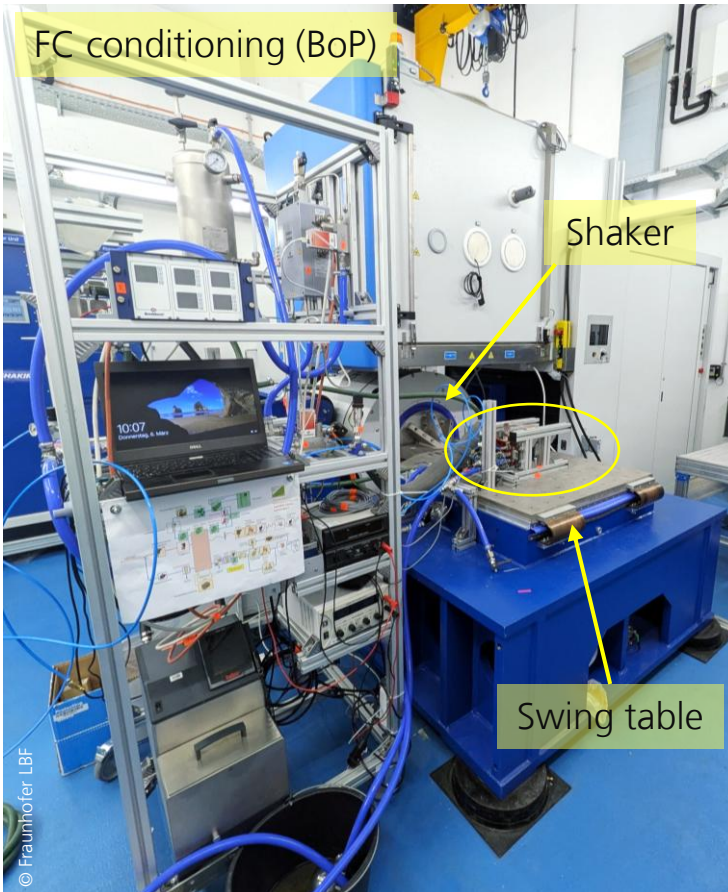
- $N_{\text{cell}} = 370$
- $h_{\text{cell}} = 1,34 \text{ mm}$
- Volumen = 37 L
 - Z.B Grundfläche ca. $20 \times 35 \text{ cm}$



- Eigenfrequenzen bei größerem Stack deutlich geringer
- ⇒ **Anpassung des Testspektrums** für kleineren Stack (z.B. 30 Zellen), um ähnliche Belastungen zu erzeugen

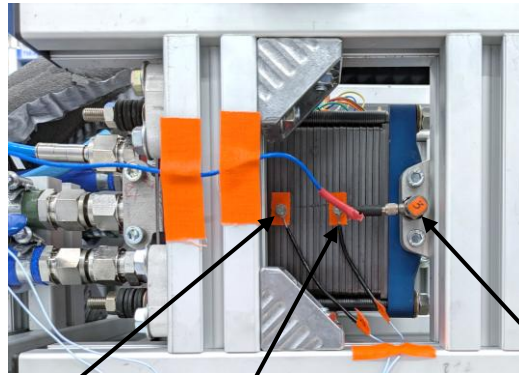
Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Anpassung des PSD-Profiles der ISO 12405



Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Leistungsdichte Vergleich bei Anregungsfrequenzerweiterung



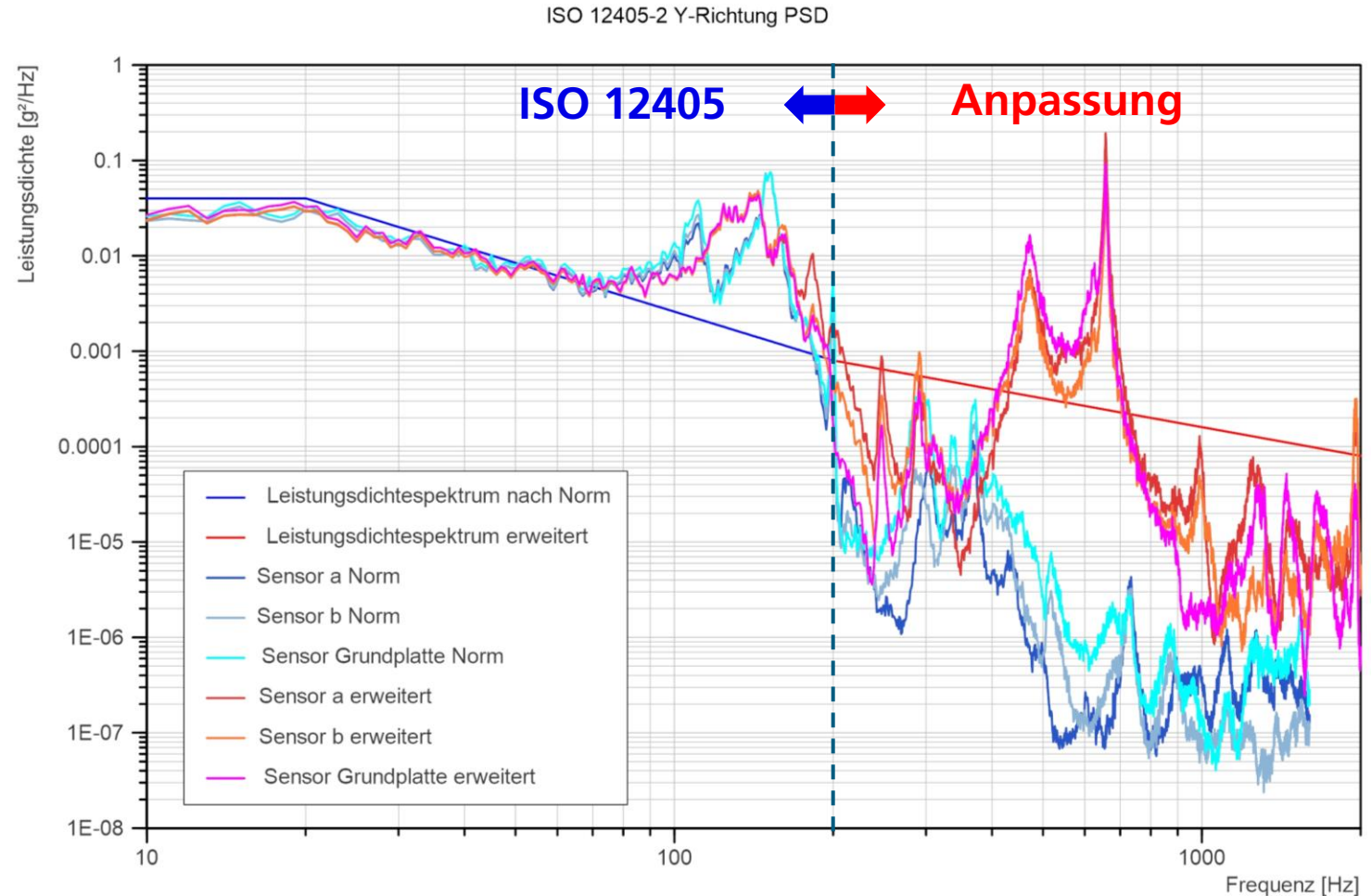
Sensor a

Sensor b

Sensor Grundplatte

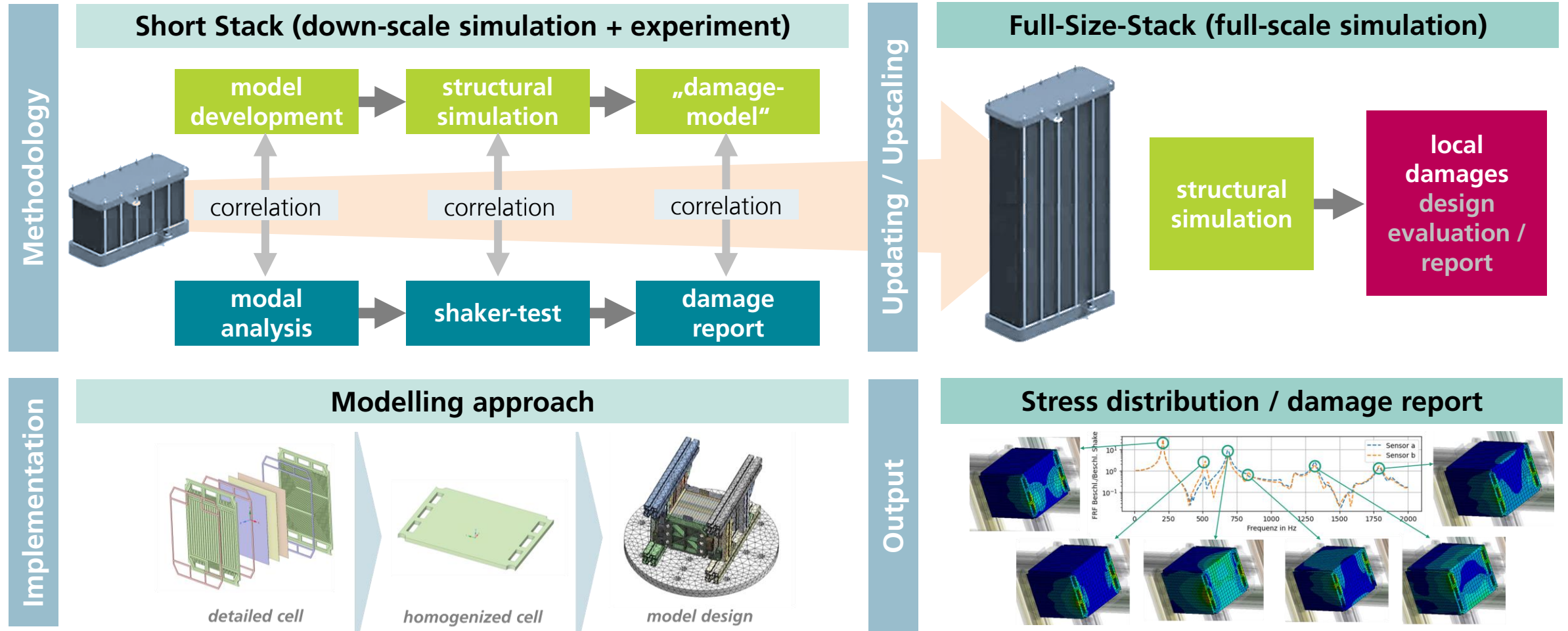
Vergleich der Reaktion der BZ auf die Anpassung des Frequenzbereichs

Durch die Art der Anregung schwingt die Brennstoffzelle auch im nicht angeregten höheren Frequenzbereich. Bei zusätzlicher Anregung bis 2000 Hz verstärkt sich die Reaktion



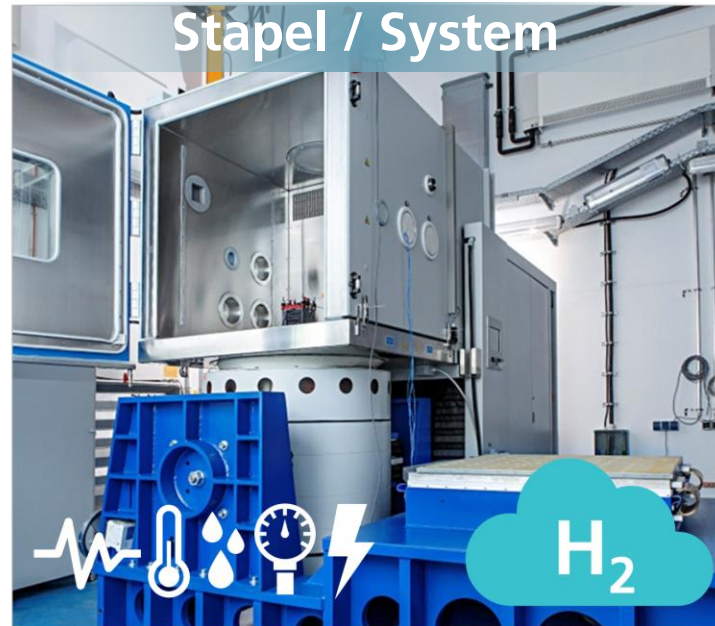
Skalierbare Belastungsprüfung von Brennstoffzellenstapeln

Von short stack to full-size-stack



Skalierbare Belastungsprüfung von Brennstoffzellenstapeln

Ganzheitliche Analyse multiphysikalischer Einflüsse über alle Ebenen - von Material bis System



Elektrochemische und multiphysikalische Zelltestung

- Umweltsimulation mit fundierter Zustandsanalytik
- Entwicklung realistischer, beschleunigter Testverfahren
- Bewertung neuer Fertigungsmethoden, Materialien und Designs

Simulation von Vibrations- und Strukturverhalten

- Entwicklung strukturmechanischer Modelle (Digitaler Zwilling)
- Kombination virtueller Modelle und zerstörungsfreier Diagnostik
- Identifikation von Belastungshotspots

Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Tests unter realen Betriebsbedingungen (mit und ohne Wasserstoff)

Vollständige Testschleife

1. Initiale Charakterisierung:

- CT-Messung
- Dichtigkeitsmessung
- Polarisationskurve, EIS , OCV ...

H₂

2. Vibrationstest (Betriebsbedingungen):

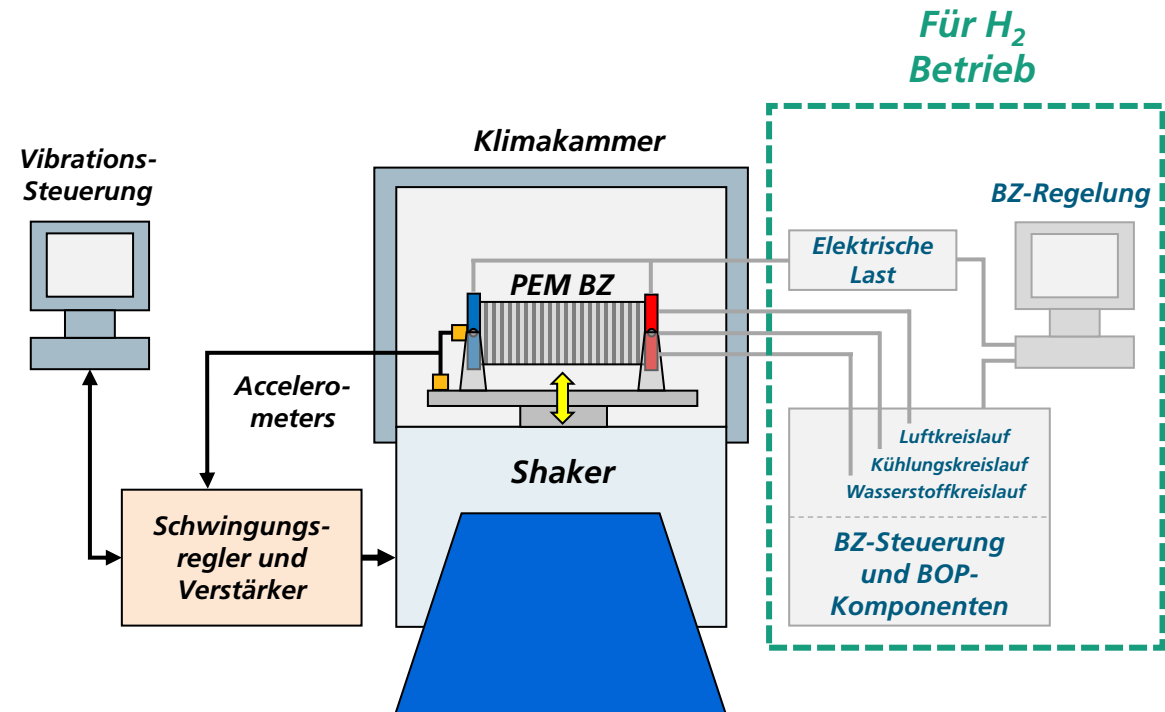
- (Zellspannungsüberwachung)
- Dichtigkeitsmessung
- Vibrationszustand

(H₂)

3. Zustandsbewertung:

- CT-Messung
- Dichtigkeitsmessung
- Polarisationskurve, EIS , OCV ...

H₂



Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Tests unter realen Betriebsbedingungen (mit und ohne Wasserstoff)

Vollständige Testschleife

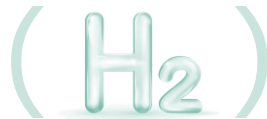
1. Initiale Charakterisierung:

- CT-Messung
- Dichtigkeitsmessung
- Polarisationskurve, EIS , OCV ...



2. Vibrationstest (Betriebsbedingungen):

- (Zellspannungsüberwachung)
- Dichtigkeitsmessung
- Vibrationszustand



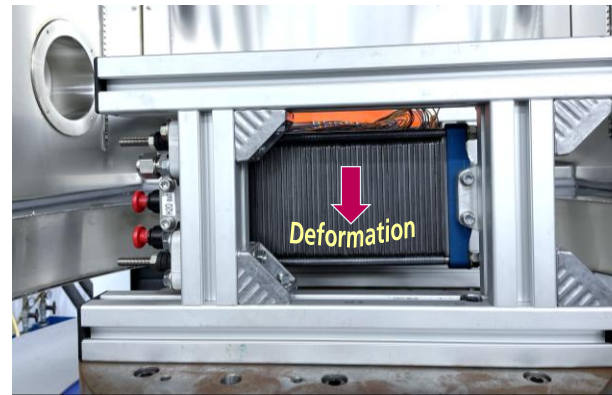
3. Zustandsbewertung:

- CT-Messung
- Dichtigkeitsmessung
- Polarisationskurve, EIS , OCV ...

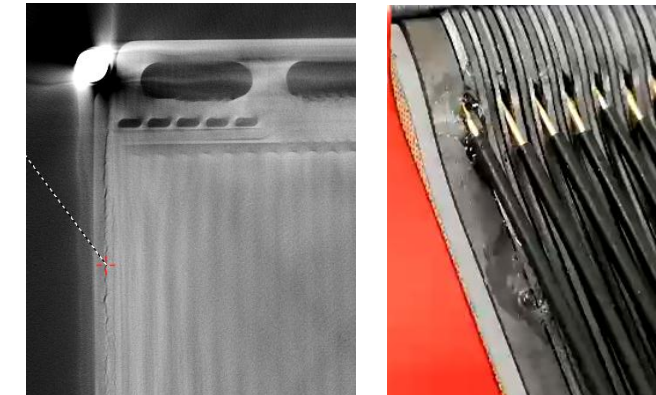


Beispiele für Schwingungseinflüsse auf Brennstoffzellenstapel

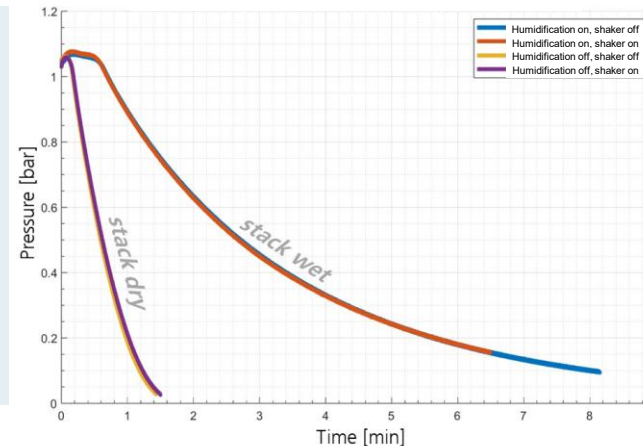
Deformation



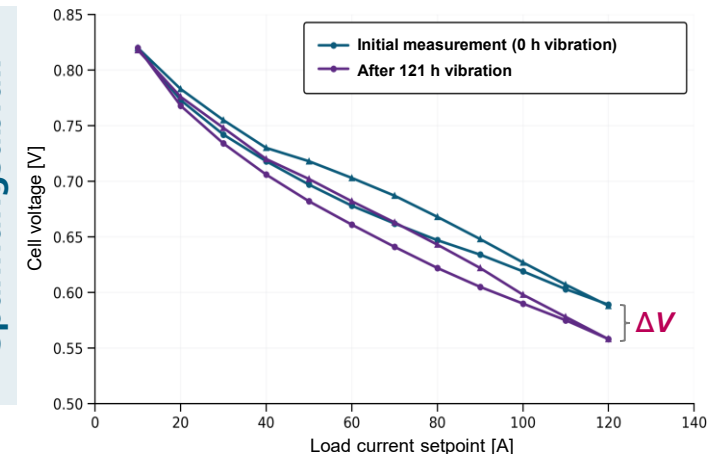
Risse / Blasen



Leckage



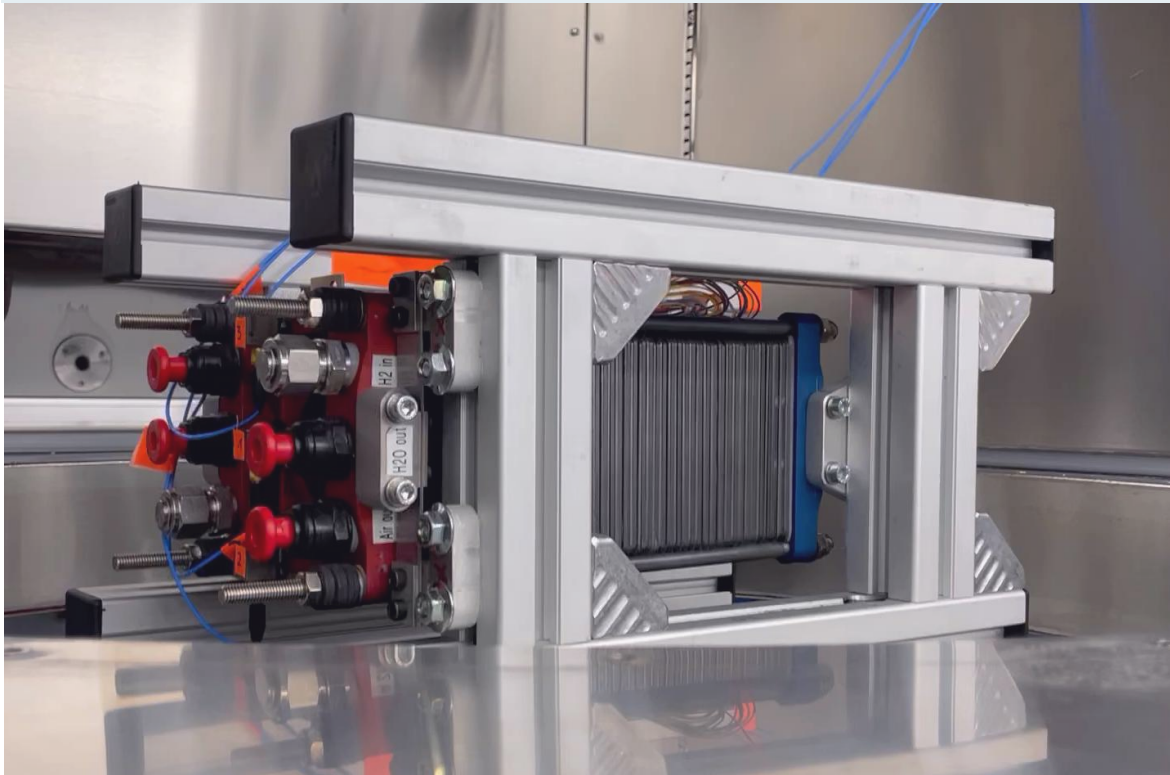
Spannungsabfall



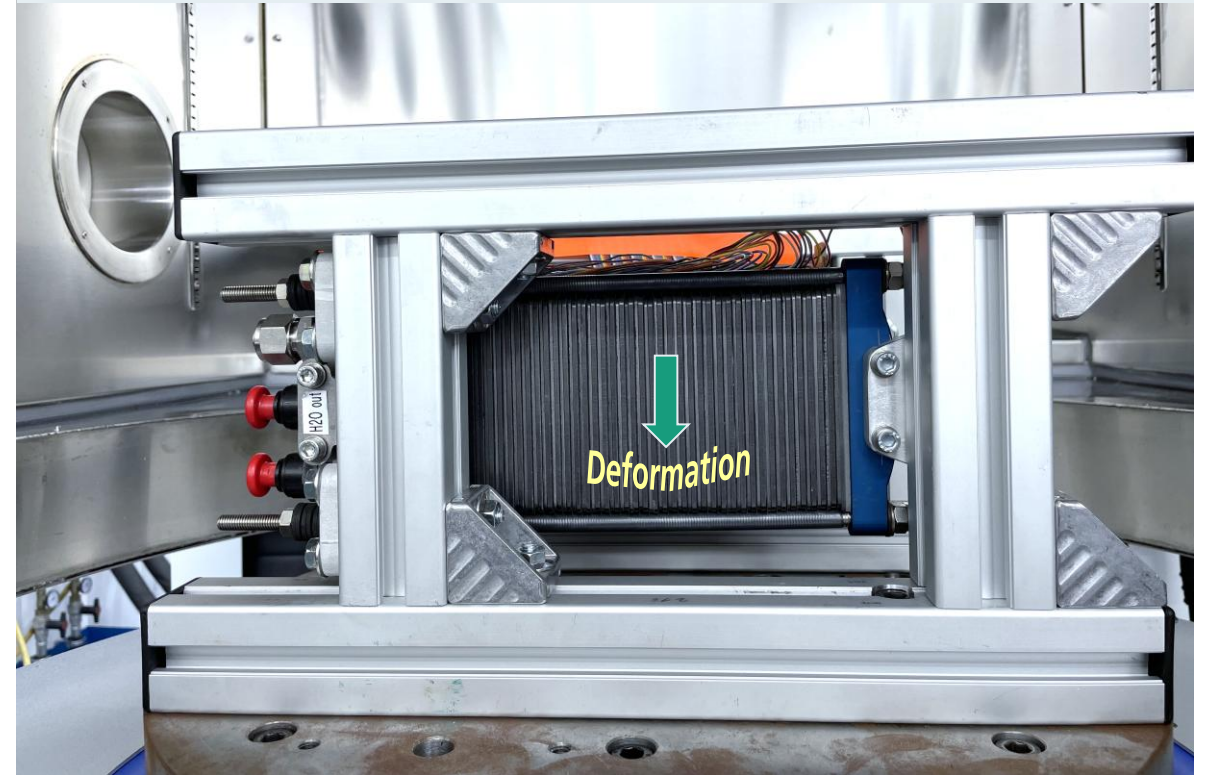
Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Tests unter realen Betriebsbedingungen (mit und ohne Wasserstoff)

Durchführung von Schwingungsprüfungen:
Spektrale Leistungsdichte gemäß ISO 12405 für Einbaulage



Ergebnis: Verschiebung nach 21 h in z-Richtung visuell erkennbar
=> genauere Untersuchung mittels zerstörungsfreien CT-Analyse



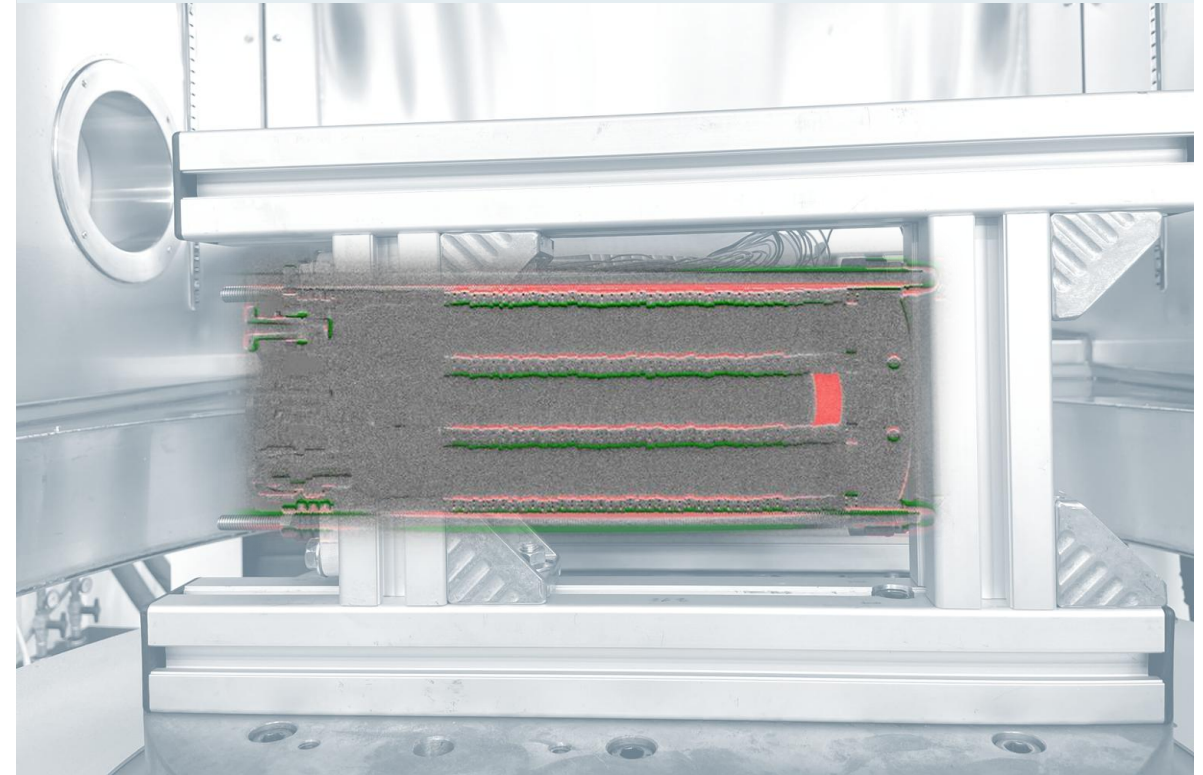
Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Tests unter realen Betriebsbedingungen (mit und ohne Wasserstoff)

Durchführung von Schwingungsprüfungen:
Spektrale Leistungsdichte gemäß ISO 12405 für Einbaulage



Ergebnis: Verschiebung nach 21 h in z-Richtung visuell erkennbar
=> genauere Untersuchung mittels zerstörungsfreier CT-Analyse



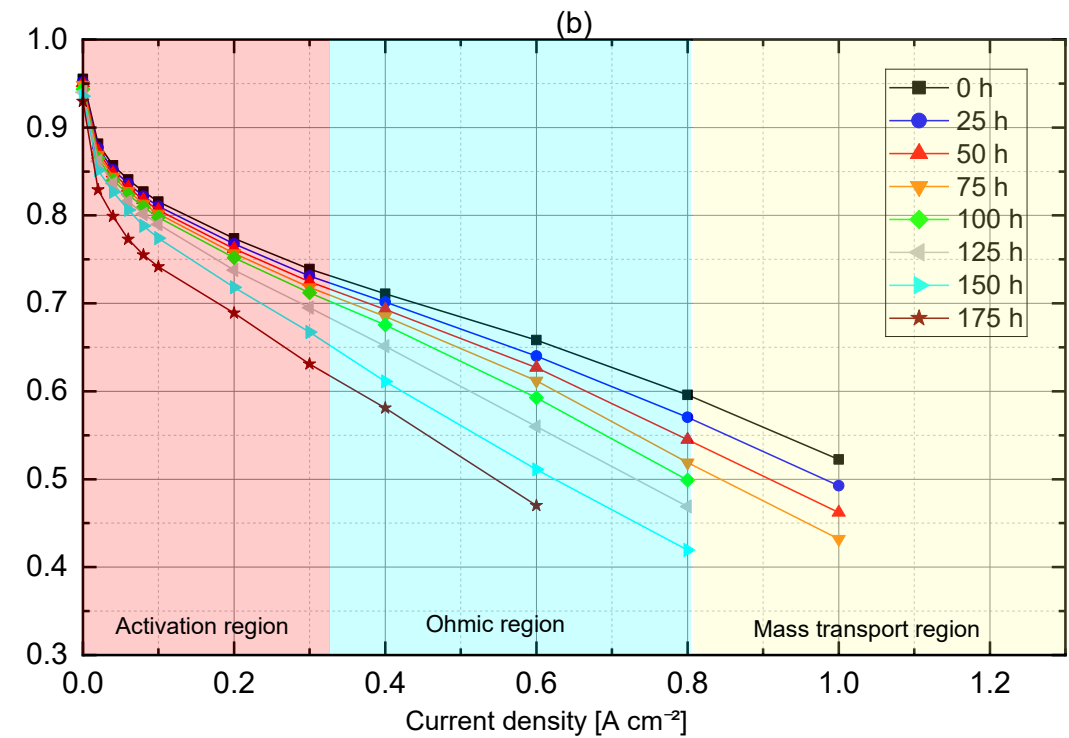
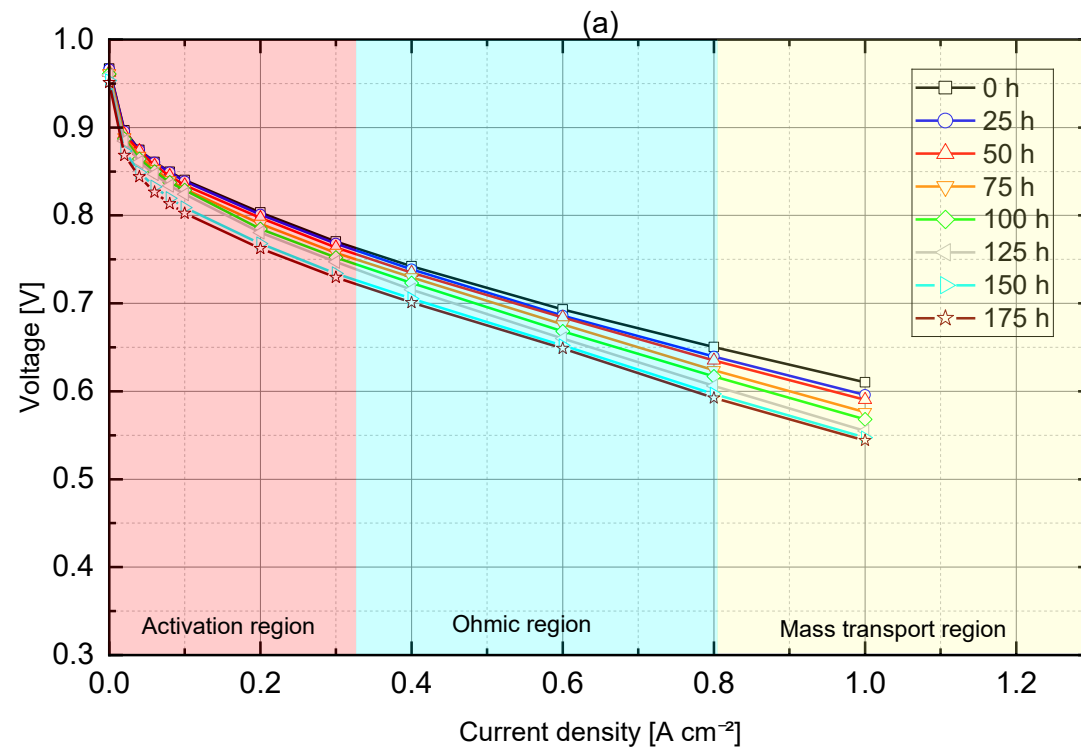
Beanspruchungsuntersuchung von Schwingungseinflüssen auf BZ-Stapel

Polarisationskurve



Ohne Vibration (175 h AST)

Mit Vibration (175 h AST)



Fazit

Realistische und flexible Validierung während der Entwicklung

- Vibrationen können die Leistung, Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen erheblich beeinflussen
- Vibrationsauswirkungen sind vielfältig und hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel:
 - der Position im Fahrzeug,
 - der Struktur und Befestigung des Zellstapels, und
 - der Integration der BoP-Komponenten (Balance of Plant)

Am LBF entwickeln wir kompakte und effiziente numerische sowie experimentelle Methoden, um die Auswirkungen von Vibrationen früh im Entwicklungsprozess zu analysieren und zu verstehen. Dabei greifen wir auf 20 Jahre Erfahrung in der Schwingungsanalyse zurück.

- **Vertieftes Produktverständnis:** Liefert detaillierte Einblicke in die funktionalen und strukturellen Eigenschaften des Produkts.
- **Flexible Tests:** Ermöglicht die Prüfung von Produktvarianten und damit eine schnellere Markteinführung.
- **Realistische Tests:** Hilft dabei Ausfallrisiken durch realistische Tests und vielfältige nutzungsbedingte Belastungen genauer zu quantifizieren.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt



Dr. Matthias Enders
System Reliability
Tel. +49 175 7387756
matthias.enders@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
www.lbf.fraunhofer.de

Dr. Jürgen Nuffer
System Reliability
Tel. +49 6151 705-281
juergen.nuffer@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
www.lbf.fraunhofer.de