

# **CU – INNOVATION DAY & MARILIGHT TECHNOLOGIETRANSFER- WORKSHOP**

**Brandschutz mit Composites – Mechanisches Verhalten unter Extrembedingungen  
und neue Ansätze zur Vorhersage der Brandschutzeigenschaften**

Alexandra Kühn, Martin Liebisch und **Marcel Andres**

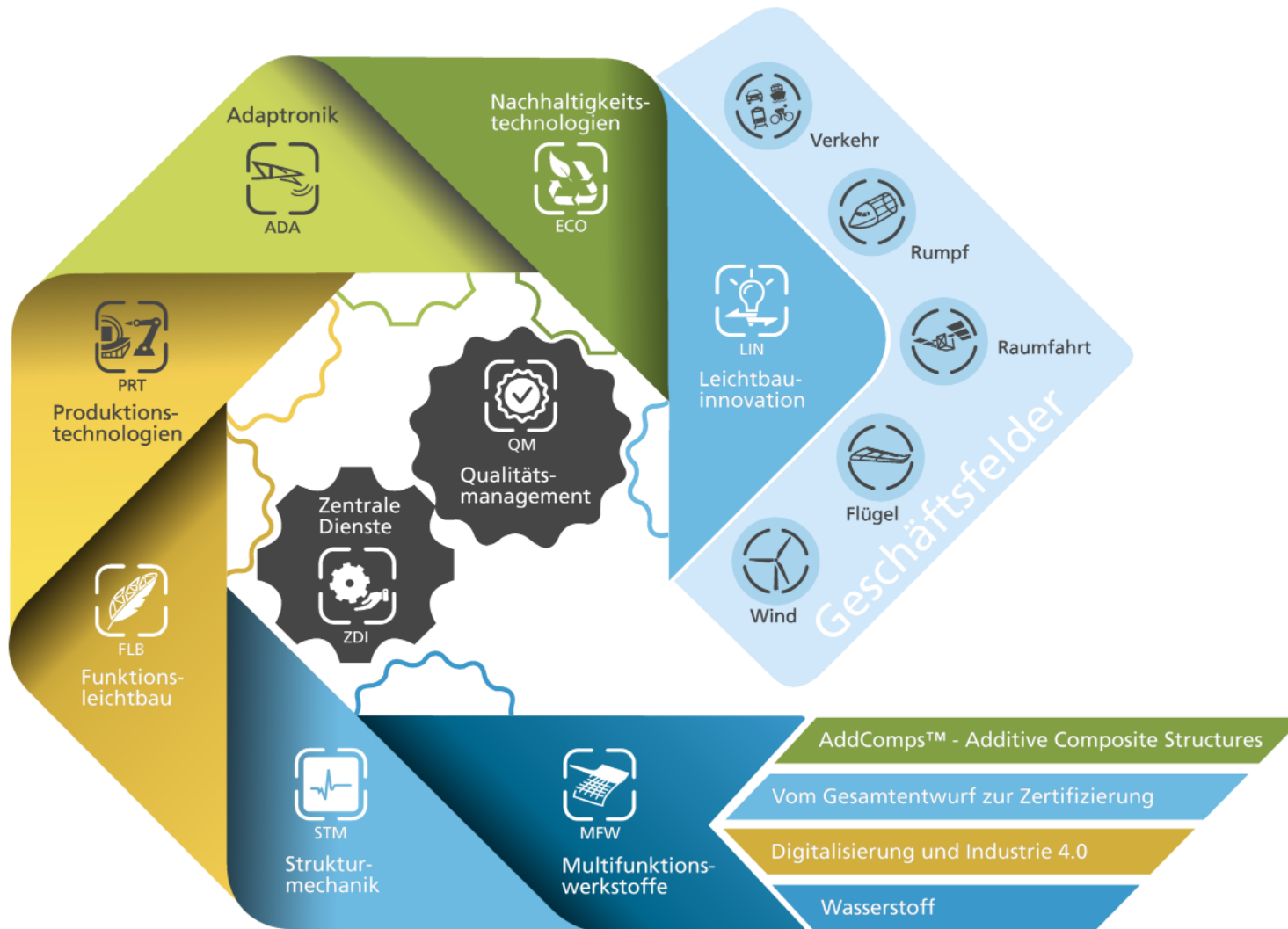


## Kurzübersicht

- Forschungszentrum der Bundesrepublik für Luft- und Raumfahrt
- F&E in den Bereichen: Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr sowie Sicherheit und Digitalisierung
- Ca. 10.000 Mitarbeitende
- 55 Institute und Einrichtungen
- Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington
- Potentielle Partner im Bezug zum heutigen Workshop
  - Institut für Antriebstechnik in Trauen
  - Institut für Maritime Energiesysteme in Geesthacht
  - Institut für Systemleichtbau



# Das Institut für Systemleichtbau



## 7 Wissenschaftliche Forschungsbereiche

- Komplette Prozesskette für den Systemleichtbau der Zukunft
- 180 Mitarbeiter in Braunschweig, Stade, Bremen, Aachen, Cochstedt

## Qualitätsmanagement – zertifiziert nach:

- ISO 9001
- Testlabore DIN ISO 17025 und Nadcap



## Zentrale Dienste

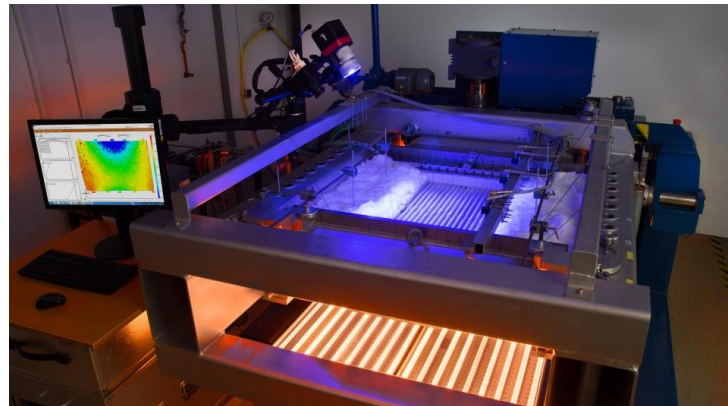
- Administrative Dienstleistungen für das Institut

## Brandschutz mit Composites

Normative Rahmenbedingungen

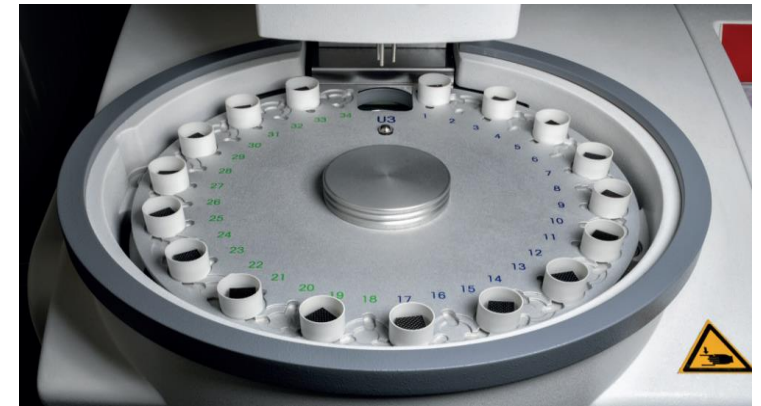
Test	EN45545	CS/FAR25 / ABD0031
Flammability	ISO 5658-2 Lateral flame spread is tested on the vertical surface of a test specimen using heat radiation and a pilot flame 800 x 155 x max 70 → Critical Radiation Intensity where the specimen is extinguished, CFE [kW/m <sup>2</sup> ]	§25.853(a) / AITM 2.0002A Flammability of nonmetallic Materials – Small Burner Test vertical (12s ± 60s) ... 305 x 75 → Burn length, After flame time, Drip flame time
Heat Release	ISO 5660-1 Heat Release Rate (25 and 50 kW/m <sup>2</sup> ) 100 x 100 Cone Calorimeter MARHE (Max. Average Rate of Heat Emission) [kW/m <sup>2</sup> ]	AITM 2.0006 Determination of Heat Release and Heat Release Rate of aircraft materials 150 x 150 (+0/-2) OSU (Ohio State University) Calorimeter → HR [kW*min/m <sup>2</sup> ] at 2min + HRR <sub>max</sub> [kW/m <sup>2</sup> ] at [s] (within 5min)
Smoke Density	EN 5659-2 / EN45545-2 (C) Raucherentwicklung und FTIR von gelisteten Komponenten (25 und 50 kW/m <sup>2</sup> ) (Determination of optical density by a single-chamber test) 75 x 75 (±1) Single Chamber	§28.853(d) / AITM 2.0007A Max. specific optical smoke density within 4 min (flaming/ non-flaming mode) 73 x 73 (±2) → Specific optical density after 4min No requirement (→) / AITM 3.0005
Toxicity	→ D <sub>3</sub> (4), D <sub>3</sub> max, VOF <sub>4</sub> , CIT <sub>50</sub> at 50kW/m <sup>2</sup> → CO <sub>2</sub> , CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>	Max. concentration of smoke gas components → tested together with smoke density, see above → HCN, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HF, HCl

Materialperformance im Brandfall

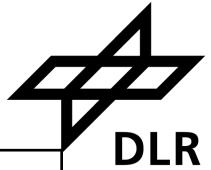


Ausblick:

Neue Möglichkeiten zur Vorhersage der Brandschutzeigenschaften



# Vergleich der EN45545 / FAR25 (Auswahl)

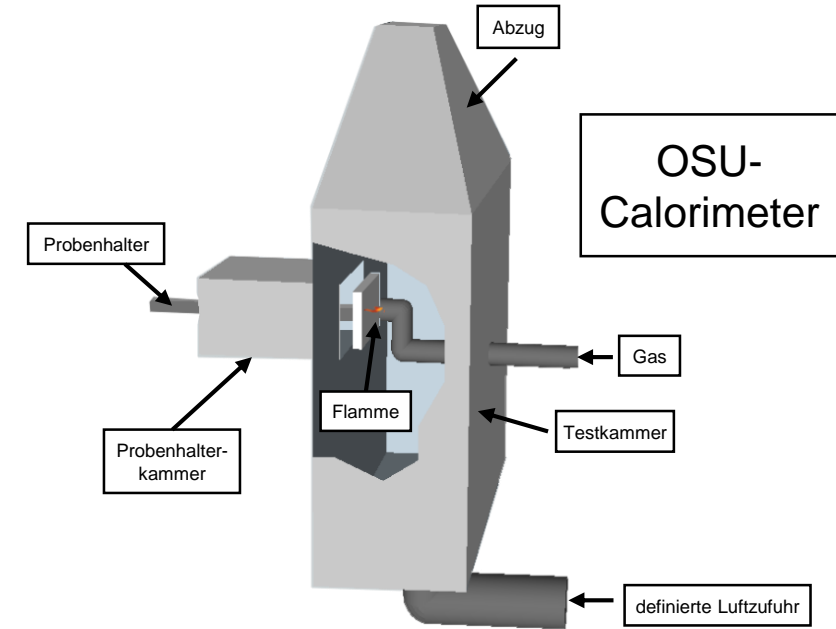
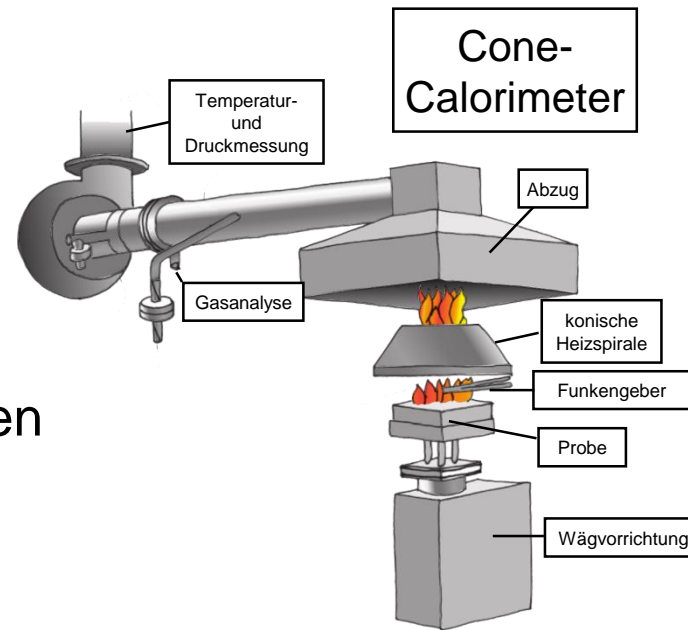


Test	EN45545	CS/FAR25 / ABD0031
Flammability	ISO 5658-2 Lateral flame spread is tested on the vertical surface of a test specimen using heat radiation and a pilot flame 800 x 155 x max 70 → Critical Radiation Intensity where the specimen is extinguished, CFE [kW/m <sup>2</sup> ]	§25.853(a) / AITM 2.0002A Flammability of nonmetallic Materials – Small Burner Test vertical (12s <u>or</u> 60s) ... 305 x 75 → Burn length, After flame time, Drip flame time
Heat Release	ISO 5660-1 Heat Release Rate (25 and 50 kW/m <sup>2</sup> ) 100 x 100 Cone Calorimeter MARHE (Max. Average Rate of Heat Emission) [kW/m <sup>2</sup> ]	AITM 2.0006 Determination of Heat Release and Heat Release Rate of aircraft materials 150 x 150 (+0/-2) OSU (Ohio State University) Calorimeter → HR [kW*min/m <sup>2</sup> ] at 2min + HRRmax [kW/m <sup>2</sup> ] at [s] (within 5min)
Smoke Density	EN 5659-2 / EN45545-2 (C) Rauchentwicklung und FTIR von gelisteten Komponenten (25 und 50 kW/m <sup>2</sup> ) (Determination of optical density by a single-chamber test) 75 x 75 (±1) Single Chamber	§28.853(d) / AITM 2.0007A Max. specific optical smoke density within 4 min (flaming/ non-flaming mode) 73 x 73 (±2) → Specific optical density after 4min
Toxicity	→ D <sub>S</sub> (4), D <sub>S</sub> max, VOF4, CIT <sub>G</sub> at 50kW/m <sup>2</sup> → CO <sub>2</sub> , CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>	No requirement (→) / AITM 3.0005 Max. concentration of smoke gas components → tested together with smoke density, see above → HCN, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HF, HCl

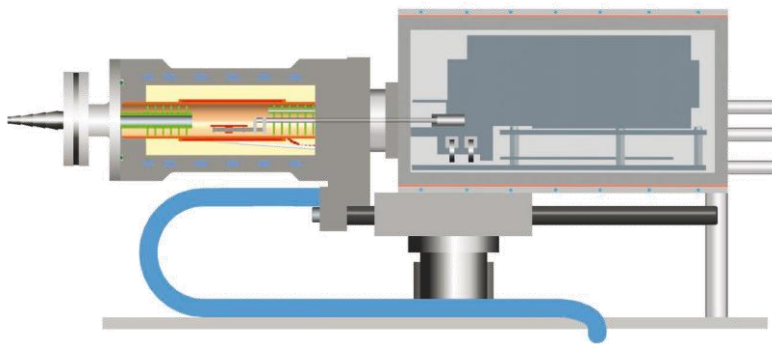
- Ähnliche Untersuchungen in der Luftfahrt und im Schienenverkehr (Entflammbarkeit, Wärmefreisetzung, Rauchgasdichte und Toxizität)
- Unterschiede bzgl. einzelner Parameter und Prüfkörpergeometrien
- Unterschiedliche Brandprüfungen durchzuführen (z.B. Cone Calorimeter vs. OSU Calorimeter), die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können

# Standardbrandprüfungen

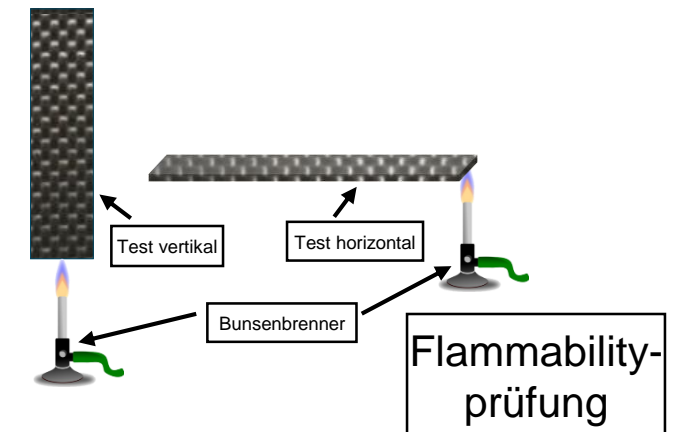
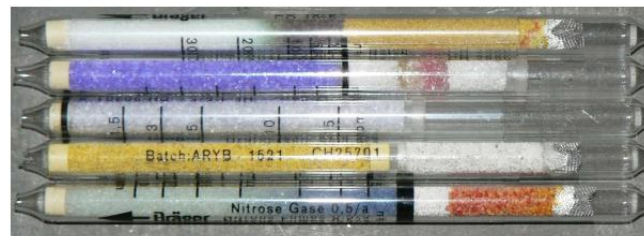
- Abbildung spezieller Brandszenarien
- Randeinflüsse durch Probendimensionen und Umgebungsbedingungen
- aufwändige Probenvorbereitung



Thermo-  
gravimetrische  
Analyse (TGA)



Brandprüfung Smoke  
Toxicity  
(„Dräger-Röhrchen“)

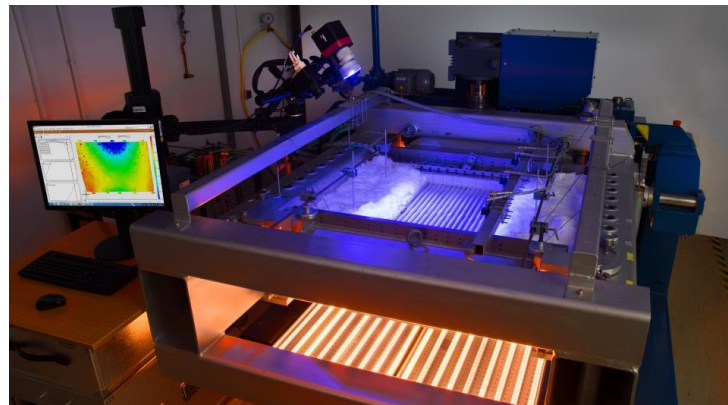


## Brandschutz mit Composites

Normative Rahmenbedingungen

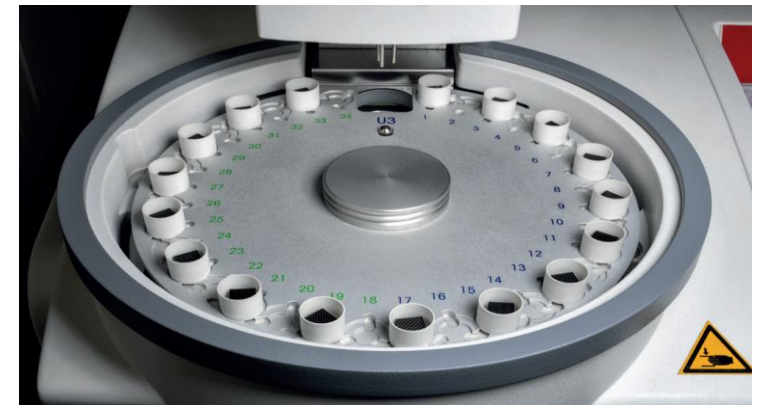
Test	EN45545	CS/FAR25 / ABD0031
Flammability	ISO 5658-2 Lateral flame spread is tested on the vertical surface of a test specimen using heat radiation and a pilot flame 800 x 155 x max 70 → Critical Radiation Intensity where the specimen is extinguished, CFE [kW/m <sup>2</sup> ]	§25.853(a) / AITM 2.0002A Flammability of nonmetallic Materials – Small Burner Test vertical (12s ± 60s) ... 305 x 75 → Burn length, After flame time, Drip flame time
Heat Release	ISO 5660-1 Heat Release Rate (25 and 50 kW/m <sup>2</sup> ) 100 x 100 Cone Calorimeter MARHE (Max. Average Rate of Heat Emission) [kW/m <sup>2</sup> ]	AITM 2.0006 Determination of Heat Release and Heat Release Rate of aircraft materials 150 x 150 (+0/-2) OSU (Ohio State University) Calorimeter → HR [kW*min/m <sup>2</sup> ] at 2min + HRR <sub>max</sub> [kW/m <sup>2</sup> ] at [s] (within 5min)
Smoke Density	EN 5659-2 / EN45545-2 (C) Raucherentwicklung und FTIR von gelasteten Komponenten (25 und 50 kW/m <sup>2</sup> ) (Determination of optical density by a single-chamber test) 75 x 75 (±1) Single Chamber	§28.853(d) / AITM 2.0007A Max. specific optical smoke density within 4 min (flaming/ non-flaming mode) 73 x 73 (±2) → Specific optical density after 4min No requirement (→) / AITM 3.0005
Toxicity	→ D <sub>3</sub> (4), D <sub>3</sub> max, VOF <sub>4</sub> , CIT <sub>10</sub> at 50kW/m <sup>2</sup> → CO <sub>2</sub> , CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>	Max. concentration of smoke gas components → tested together with smoke density, see above → HCN, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HF, HCl

Materialperformance im Brandfall



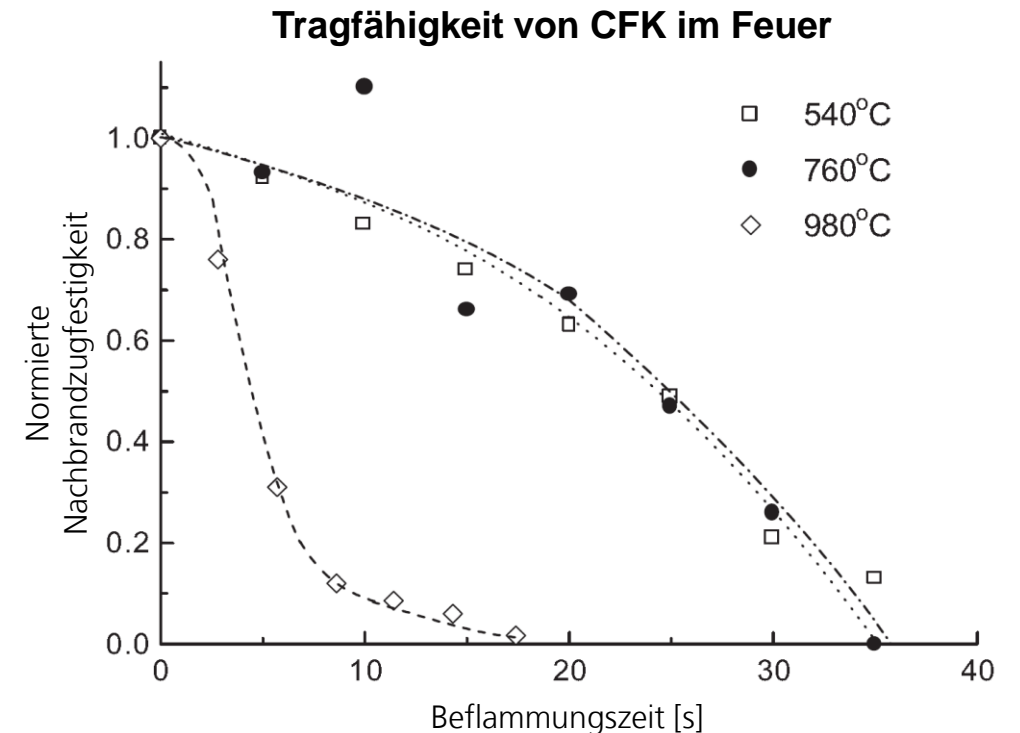
Ausblick:

Neue Möglichkeiten zur Vorhersage der Brandschutzeigenschaften



# Motivation und Grundlagen

- Zunehmender Einsatz von Composites in diversen Branchen
- FKV anfällig im Brandfall
- Gefährdung durch Strukturversagen
- Flammenschutzmittel nötig
  - Reduktion der Brandgefährdung
  - Physikalische und chemische Möglichkeiten (u.a. umfangreiche ATH-Untersuchungen durchgeführt)
- Mechanische Eigenschaften  $\neq$  flammwidrigem Verhalten
  - Beispiele: EP-Harz und/oder Phenolharze
- Wenige Untersuchungen von Composites bei kombiniertem Lastfall (Brand + mechanische Last)



Effekte von Temperatur und Dauer eines Gasbrandes auf die Nachbrandzugfestigkeit eines 1,9mm dicken Kohlenstofffaser-Epoxy-Verbunds

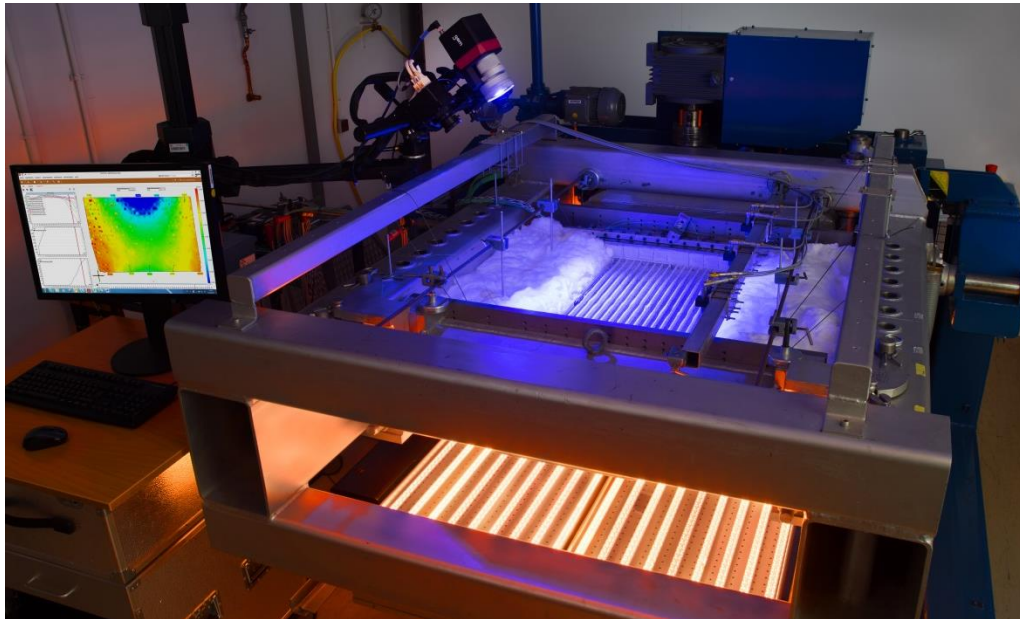


# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche



## Beispielhafte Anwendungen am DLR:

- Simulation von thermomechanisch belasteten Strukturen
- Simulation von Brandszenarien am Coupon u.v.m.



Thermex-Anlage für thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche



CuFex-Anlage für Brandversuche mit mechanischer Belastung

# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche

## Thermex-Prüfstand

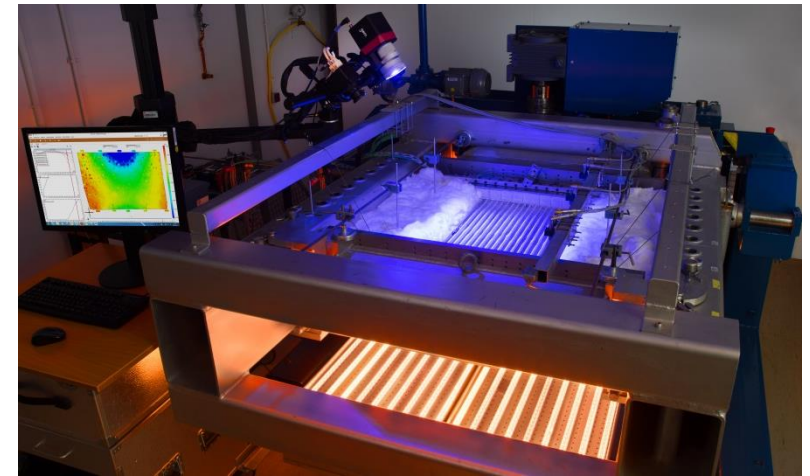


### Composite-Strukturen für Bereiche mit hohen Thermallasten

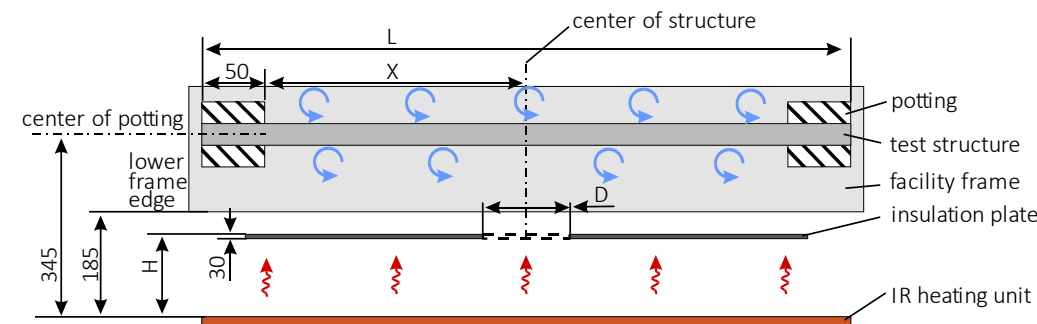
- Verschiedene Ansätze
  - Hochtemperatur-Matrixsystem (z.B. BMI, CE, PEEK)
  - Ableiten von Wärme (z.B. durch Pechfasern)
  - Strukturkonzept (Sandwich, Spant/Stringer, Hohlkammer)
  - Aktive Kühlung

### Untersuchung des mechanischen Verhaltens in Abhängigkeit vom Thermalverhalten

- Einfluss versch. Materialsysteme
- Einfluss versch. Strukturkonzepte



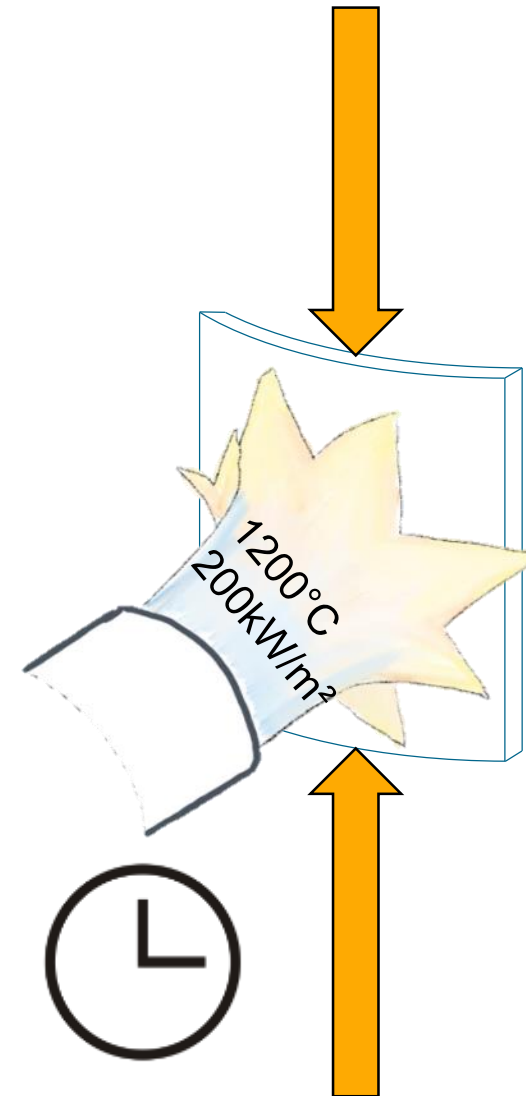
THERMEX-Anlage



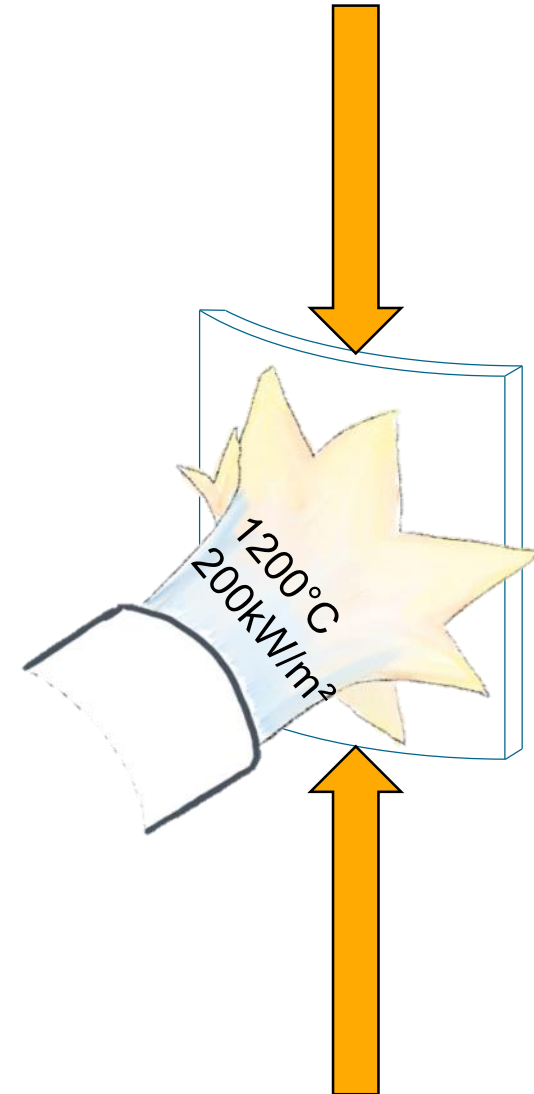
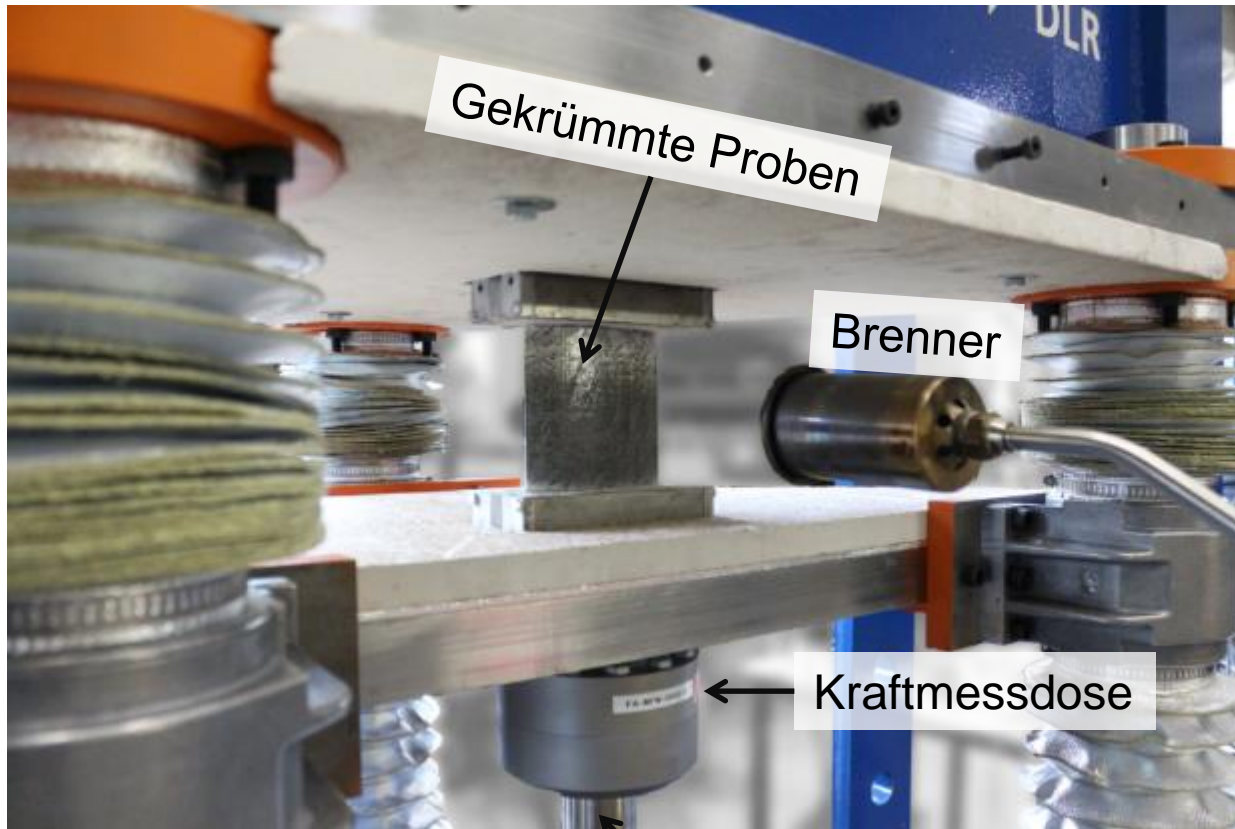
Funktionsprinzip THERMEX-Anlage

# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche CuFEx-Prüfstand

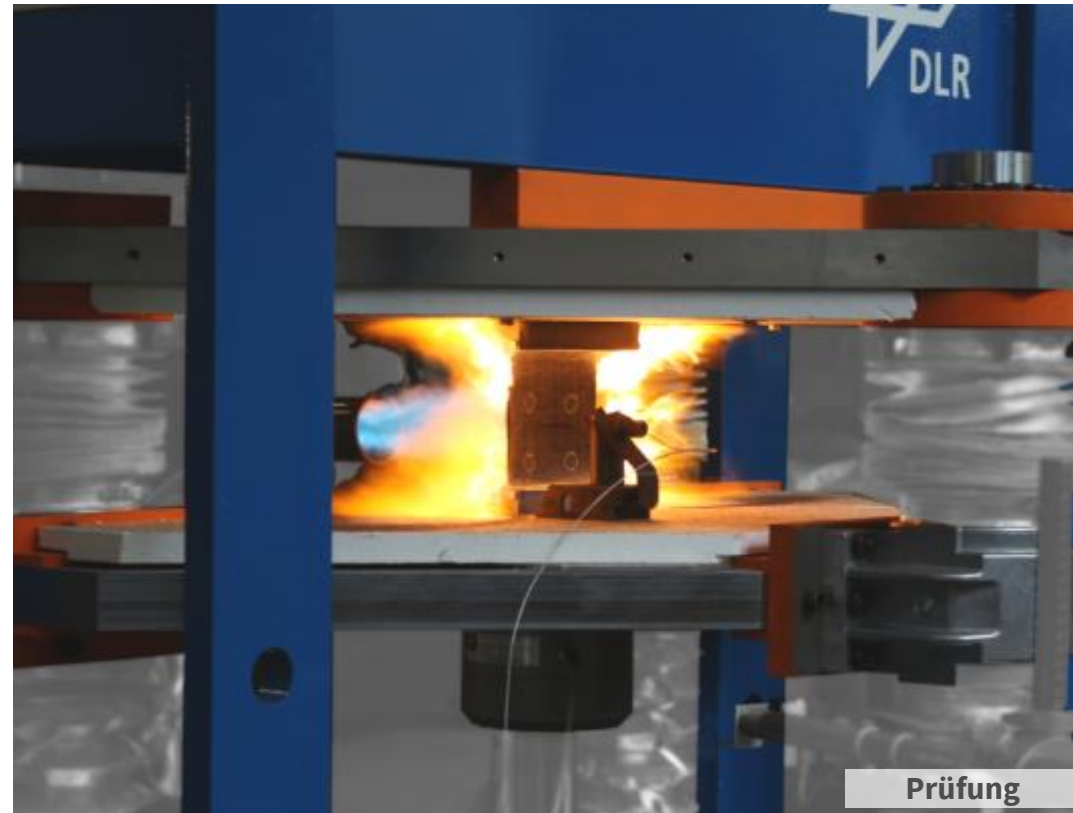
- **Compression under Fire Exposure (CuFEx)**
  - Ziel: Untersuchung der mechanischen Restleistung in einem Brandszenario
  - Neue Anlage, die eine Kombination von mechanischer Belastung und gleichzeitiger Brandeinwirkung ermöglicht
- **Einfaches Testverfahren**
  - Probekörpergröße: 120mm x 200mm
  - Gekrümmter Probekörper zur Gewährleistung der mechanischen Stabilität gegen Knicken
  - Quasi-statische axiale Druckvorspannung (50MPa)
  - Feuerbelastung: Öffnung kann verwendet werden, um die exponierte Oberfläche zu reduzieren
  - Messung von Kraft und Rückseitentemperatur



# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche CuFEx-Prüfstand – Impressionen



# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche CuFEx-Prüfstand – Impressionen

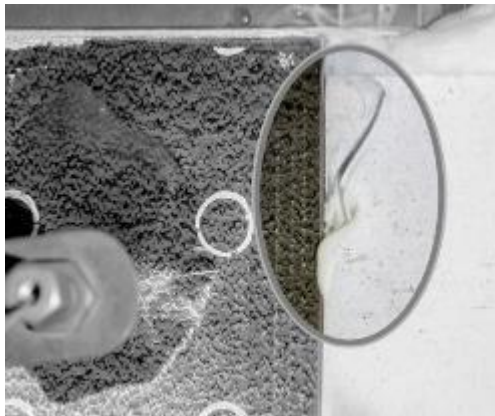


# Thermomechanisch gekoppelte Strukturversuche CuFEx-Prüfstand – Impressionen

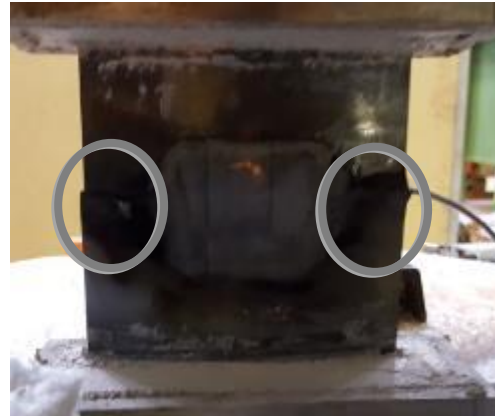


# CuFEx-Testergebnisse

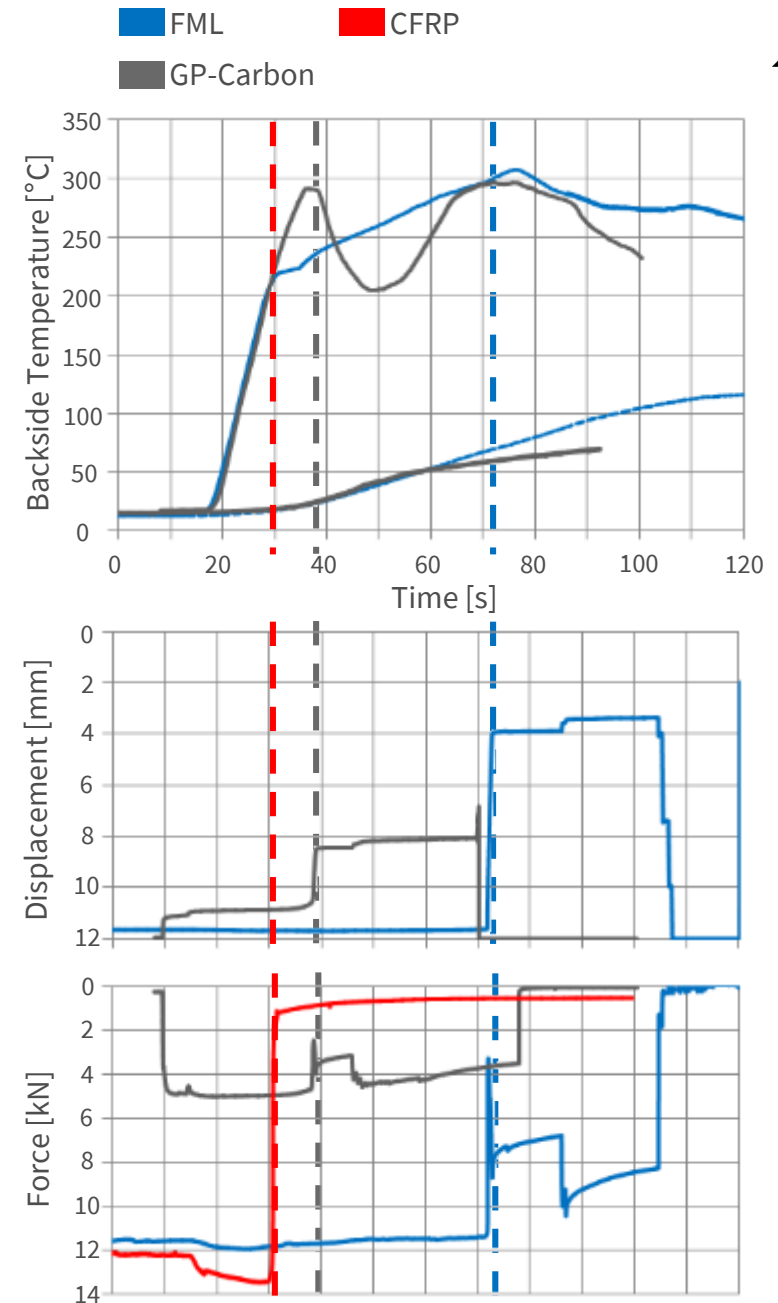
- CFK-Referenz versagt nach  $\approx 15$ s
- GP-Versagen nach  $\approx 25$ s @ 20MPa aufgrund von Stabilitätsversagen
- FML-Versagen nach  $\approx 55$ s @ 50MPa durch Delamination an freien Kanten



Delamination führt zum Austritt von Isoliergas



Probenvorderseite nach der Prüfung, Stabilitätsversagen an den Probenkanten sichtbar



# Weitere Ergebnisse aus der Brandschutzkampagne

- Es wurden Brandversuche durchgeführt, um das verbesserte FST-Verhalten von Flugzeugstrukturen durch die im Rahmen der FSS (Future Sky Safety) untersuchten Materialien im Vergleich zu herkömmlichen Materialien nachzuweisen
  - Innere Strukturen: Allgemein: Phenol-Glas im Vergleich zu GP-Kohle
  - Primär-/Sekundärstrukturen: Aluminium im Vergleich zu FML

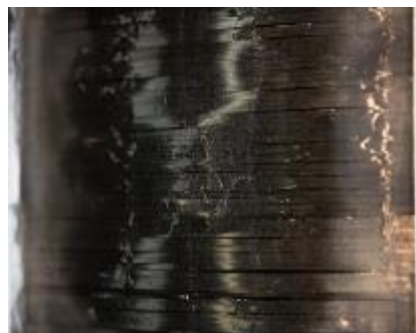


Aluminium: Durchbrennen  
nach ca. 1min



Phenol-Glas: Vollständig  
zersetzte Matrix

FML: Kein Durchbrennen  
oder Zersetzung auf der  
Innenseite



GP-Kohle: Fast keine  
Reaktionen, die zu einem  
Brand führen



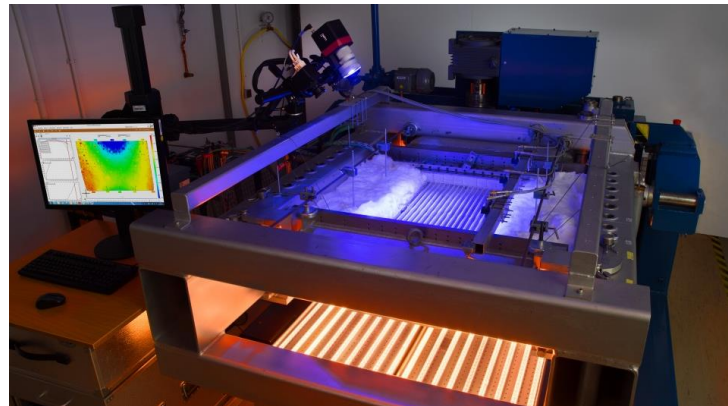


## Brandschutz mit Composites

Normative Rahmenbedingungen

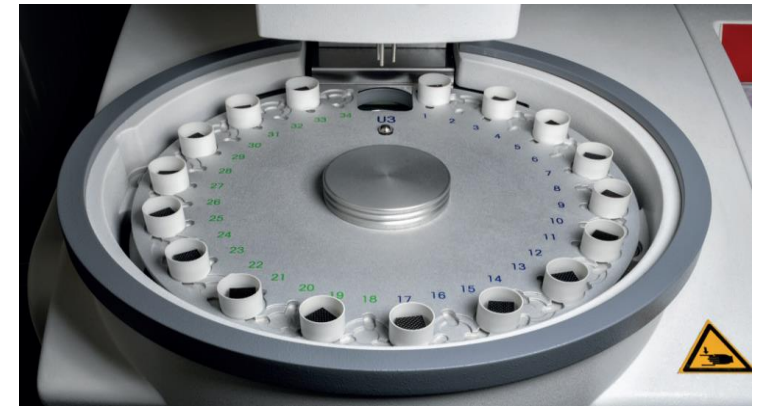
Test	EN45545	CS/FAR25 / ABD0031
Flammability	ISO 5658-2 Lateral flame spread is tested on the vertical surface of a test specimen using heat radiation and a pilot flame 800 x 155 x max 70 → Critical Radiation Intensity where the specimen is extinguished, CFE [kW/m <sup>2</sup> ]	§25.853(a) / AITM 2.0002A Flammability of nonmetallic Materials – Small Burner Test vertical (12s ± 60s) ... 305 x 75 → Burn length, After flame time, Drip flame time
Heat Release	ISO 5660-1 Heat Release Rate (25 and 50 kW/m <sup>2</sup> ) 100 x 100 Cone Calorimeter MARHE (Max. Average Rate of Heat Emission) [kW/m <sup>2</sup> ]	AITM 2.0006 Determination of Heat Release and Heat Release Rate of aircraft materials 150 x 150 (+0/-2) OSU (Ohio State University) Calorimeter → HR [kW*min/m <sup>2</sup> ] at 2min + HRR <sub>max</sub> [kW/m <sup>2</sup> ] at [s] (within 5min)
Smoke Density	EN 5659-2 / EN45545-2 (C) Raucherentwicklung und FTIR von gelisteten Komponenten (25 und 50 kW/m <sup>2</sup> ) (Determination of optical density by a single-chamber test) 75 x 75 (±1) Single Chamber	§28.853(d) / AITM 2.0007A Max. specific optical smoke density within 4 min (flaming/ non-flaming mode) 73 x 73 (±2) → Specific optical density after 4min No requirement (→) / AITM 3.0005
Toxicity	→ D <sub>3</sub> (4), D <sub>3</sub> max, VOF <sub>4</sub> , CIT <sub>10</sub> at 50kW/m <sup>2</sup> → CO <sub>2</sub> , CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>	Max. concentration of smoke gas components → tested together with smoke density, see above → HCN, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HF, HCl

Materialperformance im Brandfall



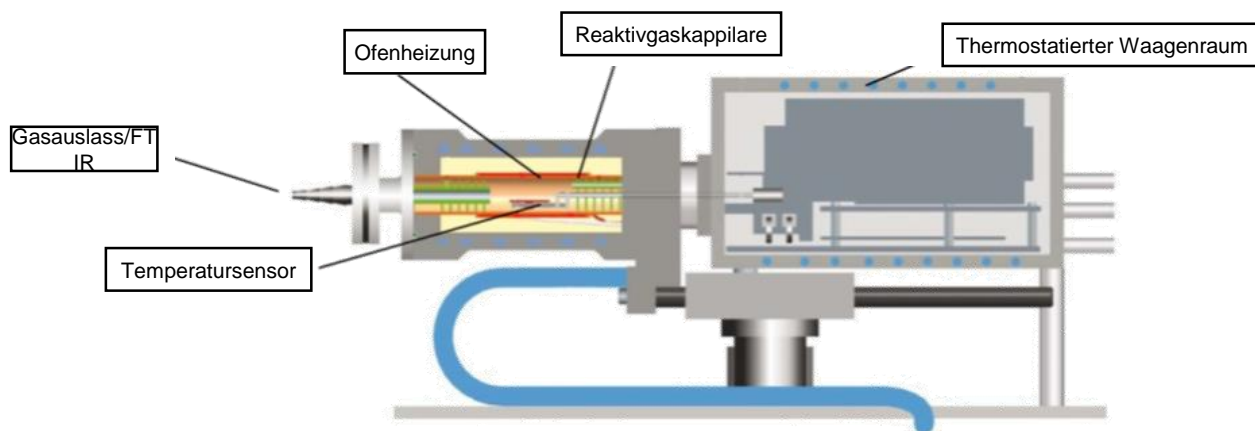
Ausblick:

Neue Möglichkeiten zur Vorhersage der Brandschutzeigenschaften

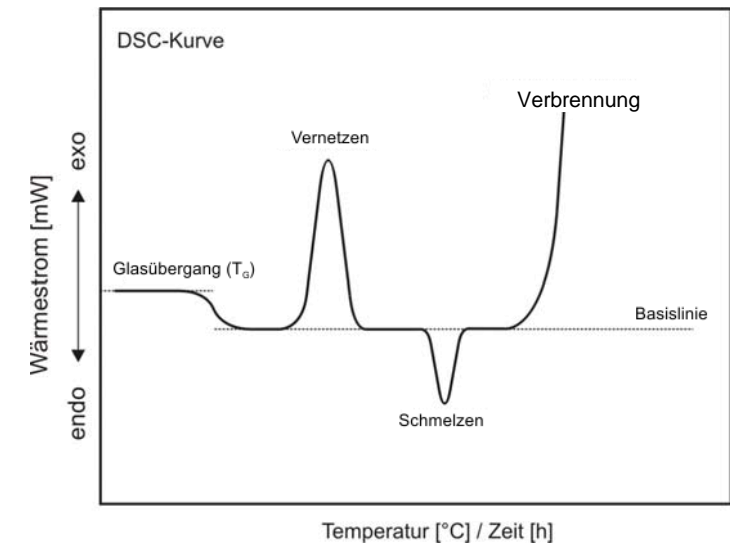
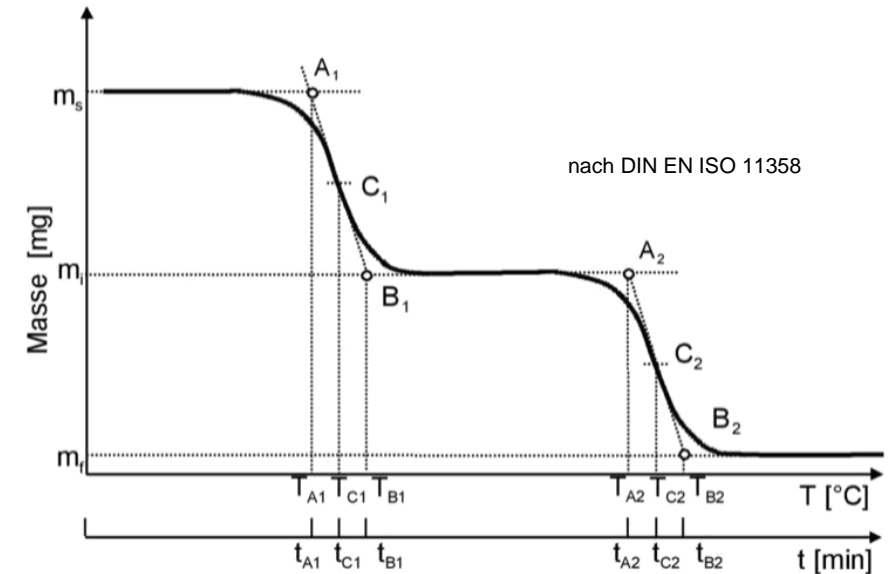


# Messgerät TGA/DSC – Thermogravimetrie und Differenzkalorimetrie

- Etabliertes Kombigerät aus der Thermoanalyse
- Messung des Massenverlaufs einer Probe im Temperaturprogramm
- Gleichzeitige Bestimmung des Wärmestroms durch Temperatursensoren unter dem Tiegelträger



Quelle: Mettler-Produktbroschüre

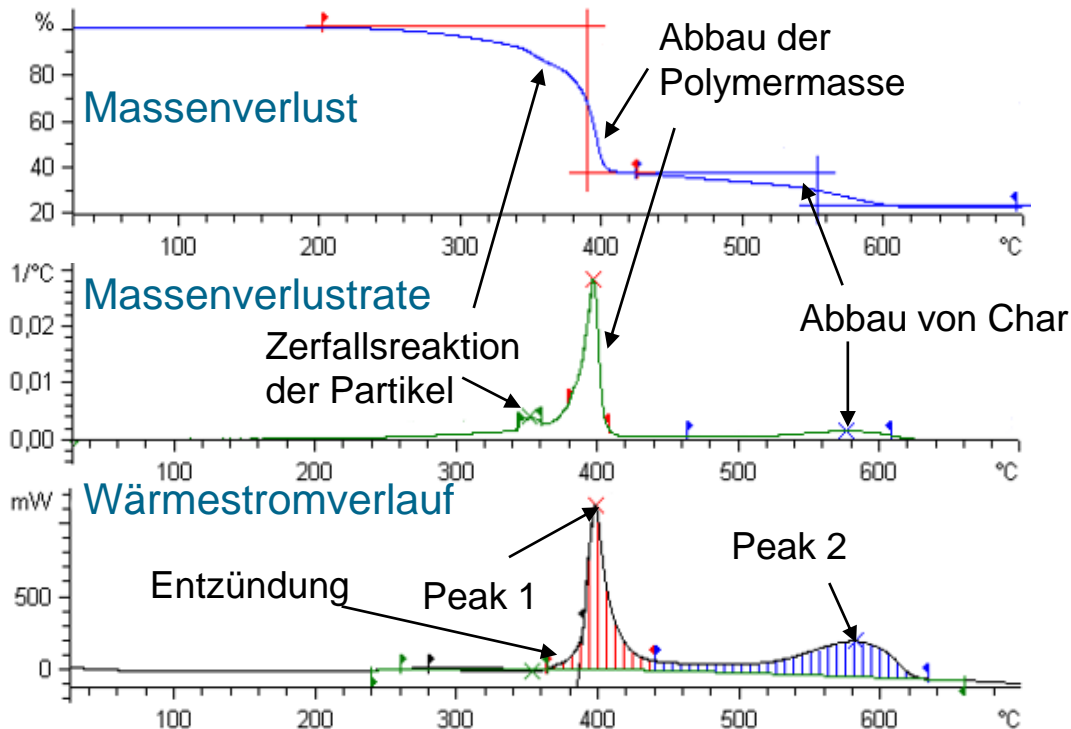
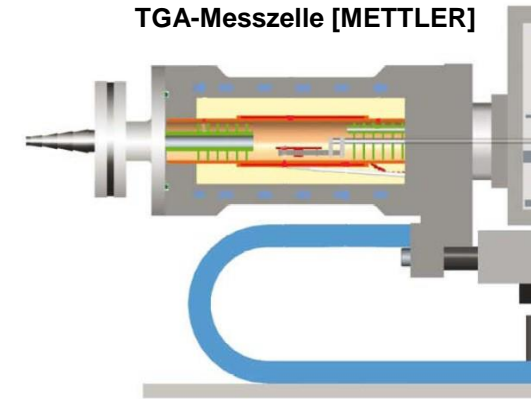


nach DIN EN ISO 11357

# Bestimmung der Brandeigenschaften mit der TGA-DSC

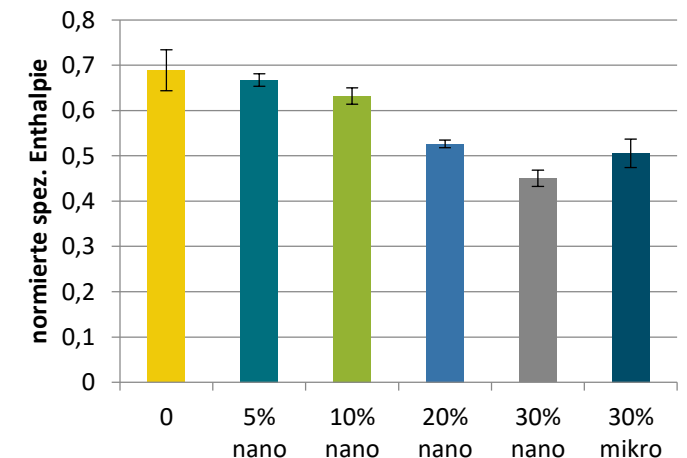


- gleichzeitige Messung von Massenabbau und Wärmeentwicklung auf Werkstoffebene anhand der Messkurven Massenverlust, Massenverlustrate und Wärmestrom



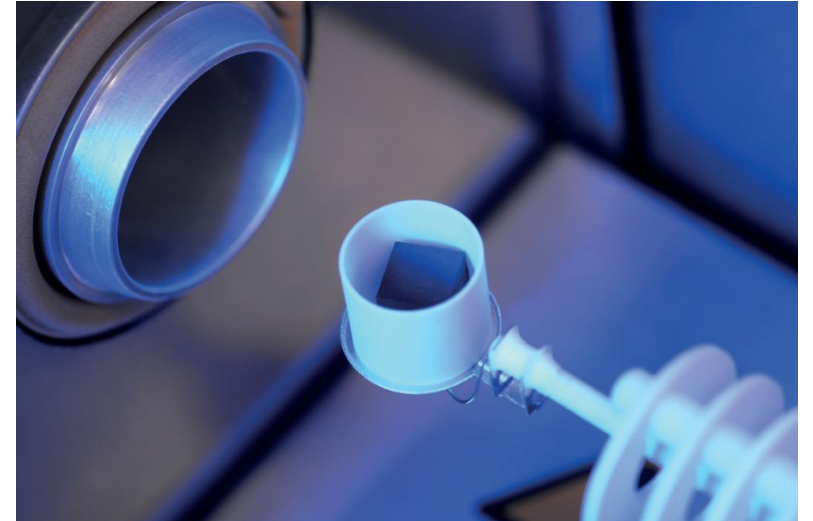
- Charakteristische Merkmale:**
  - Enthalpie in Peak 1 kennzeichnet den Abbau der Polymermasse
  - Enthalpie in Peak 2 kennzeichnet den Abbau von Char
- Entzündungstemperatur
- Zerfallsreaktion der ATH-Partikel
- Kühlung und Verzögerung der Entzündung

Entwicklung der Enthalpie von Peak 1 für Polymere mit ATH-Flammschutzpartikeln

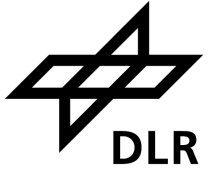


# Ausblick und nächste Schritte

- Endgültige Festlegung der Versuchsrandbedingungen
  - TGA-Tiegel 600-900  $\mu\text{l}$
  - Probengewicht 70-90 mg
  - Dynamische Aufheizung RT-1000°C, Heizrate 5-10K/min
  - Atmosphäre technische Luft
- Ausarbeitung des Normentwurfs
  - Normungsgruppe gebildet
  - Aktuell bei den Ringversuchen (Vergleichsversuche mit verschiedenen TGA-DSC Modellen (METTLER, Netzsch, TA)
    - innerhalb der nächsten 18 Monate ist die Veröffentlichung geplant
- Projekt DataFireSim
  - Konsortium mit Alstom, Ostfalia, Weilburger, SupraTix und der DB
  - Start: 03/2024
  - Weiterentwicklung der simulativen Vorhersagen des Brandverhaltens
  - Brandscreeningverfahren basierend auf den Ergebnissen der TGA/DSC und FTIR
    - Korrelationssuche zwischen Materialkombinationen und finalen FST-Eigenschaften u.v.m



# Kontakt Daten



## Dr.-Ing. **Alexandra Kühn**

Telefon +49 531 295-3723

[Alexandra.Kuehn@dlr.de](mailto:Alexandra.Kuehn@dlr.de)

Vorhersage und Modifikation der  
Brandschutzeigenschaften, TGA/DSC,  
Standardisierung, ...

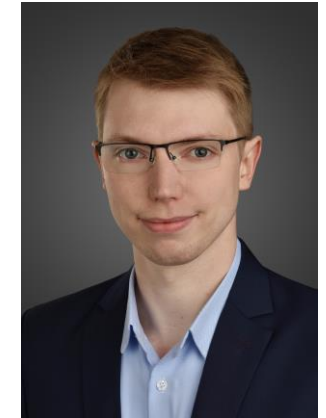


## **Marcel Andres, M.Sc.**

Telefon +49 531 295-3228

[Marcel.Andres@dlr.de](mailto:Marcel.Andres@dlr.de)

Geschäftsfeldleiter Verkehr,  
Brandschutzsichere Composites in Rail,  
NFK, Fertigungsverfahren, ...



## **Martin Liebisch, M.Sc.**

Telefon +49 531 295-2908

[Martin.Liebisch@dlr.de](mailto:Martin.Liebisch@dlr.de)

Simulation des Brandverhaltens,  
Mechanische Eigenschaften der Composites  
im Brandfall, Quantifizieren von  
Sicherheitsfaktoren, ...

