



Technische
Universität
Braunschweig

ZeBra
ADVANCED FIRELAB



iBMB**MPA**
TU BRAUNSCHWEIG

Fachgebiet Brandschutz Devision of Fire Research

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590



Laborausrüstung / Stand 2025

Zentrum für Brandforschung Center of Fire Research

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

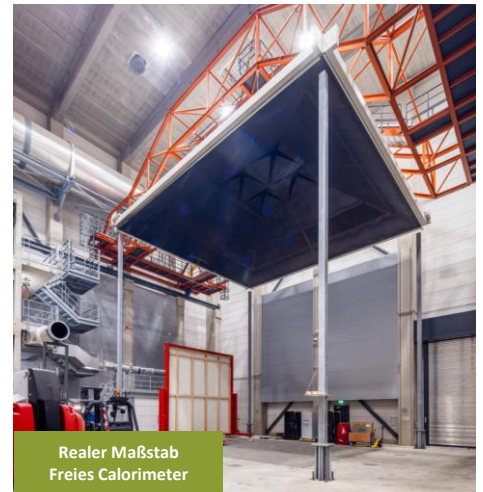
Ziele des ZeBra

- Brandschutz und Ressourceneffizienz in Gebäuden
- Optimierung innovativer Produkte im Hinblick auf den Brandschutz
- Effiziente und robuste Vorhersage der Brandentwicklung

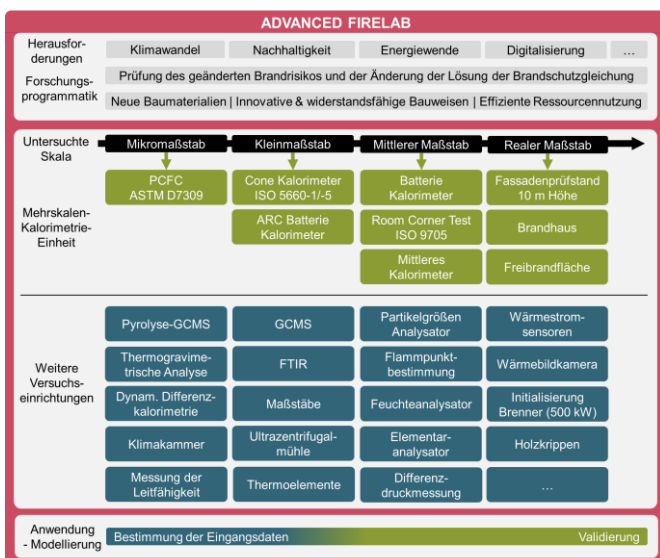
Reale Skala Brandhaus



Mittlere Skala
Batterie Kalorimeter



Realer Maßstab
Freies Kalorimeter



Interdisziplinäre Zusammenarbeit

- Grundlegende experimentelle Forschung zur Branddynamik und Analyse von Brandprodukten
- Entwicklung einer „neuen Generation“ von Vorhersagenmodellen
- „Advanced FireLab“ mit unterschiedlichen Kalorimetern für Wärmefreisetzungsraten bis 20 MW als Herzstück für experimentelle Forschung sowie Kalibrierung von Vorhersagemodellen

Inhaltsverzeichnis:

Ausstattung ZeBra

Groß-Kalorimeter-Untersuchungen

Cone-Kalorimeter K1 - G02	Seite 2
Room Corner Test-Kalorimeter K2 - G03	Seite 3
Fassaden-Brandhaus-Kalorimeter K3 - G041	Seite 4
Frei-Kalorimeter K4 - G042	Seite 5
Batterie-Kalorimeter K5 - G05	Seite 6

Cone-Kalorimeter K1 ISO 5660

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Das Cone-Kalorimeter dient zur Ermittlung wesentlicher brandspezifischer Kenngrößen von festen und flüssigen Stoffen. Zentrale abgeleitete Größen sind die Wärmefreisetzungs-, die Rauchentwicklungs- und die Abbrandrate. Es basiert auf der seit 1982 genutzten Sauerstoff-Verbrauchsmethode. Mittels eines konischen Heizers wird eine kleinskalige Probe mit konstanter Strahlungswärme beaufschlagt und über einen Funken zur Entzündung gebracht. Durch ein gekoppeltes Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer (FTIR) lassen sich zusätzlich die freigesetzten Brandgase untersuchen.

Als weitere Einheit steht eine Sauerstoffreduktionskammer zur Verfügung.



Ansicht des Cone-Calorimeters

Technische Daten

- Probengröße: 0,10 x 0,10 x 0,05 m³
- Prüfdauer: i. d. R. 30 min
- Horizontale und vertikale Prüfung möglich
- Wärmestromdichten: 5 - ca. 75 kW/m²
- Wärmefreisetzungsrate bis max. 10 kW
- Bestimmbare Gaskomponenten des FTIR u. a.: Wasser, Kohlenmonoxid/-dioxid, Alkohole, Carbonsäuren, Salzsäure, Cyanwasserstoff, Fluorwasserstoffsäure, Aldehyde, aromatische Kohlenwasserstoffe etc.
- Bestimmung von:
 - Wärmefreisetzungsrate (HRR),
 - Gesamtwärmefreisetzungsrate (THR),
 - Rauchproduktionsrate (SPR) und CO/CO₂-Freisetzungsraten,
 - Abbrandrate (MLR), Entzündungszeit (t_{ig}) und kritische Wärmestromdichte für die Entzündung (q_{crit}),
- Bestimmung der effektiven Verbrennungswärme und Verbrennungseffektivität möglich (mit Bombenkalorimeter-Untersuchung)



Probe im eingebauten Zustand unter Heizstrahler

Anwendungsbeispiel

- Wand- und Deckenbekleidungen
- Materialien für den Kraftfahrzeugbau
- Materialien für Schienenfahrzeuge (entsprechend DIN EN 45545-2)
- Kabel und Kunststoffe
- Dämmstoffe und Isolierungen
- Intumeszierende Beschichtungen / Dämmschichtbildner
- Vergleichende Betrachtungen gealterter / nicht gealterter Baustoffe, etc.

Room Corner Testraum K2 ISO 9705 / DIN EN 14390

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Der Room Corner Test ist ein Referenzverfahren welches nach ISO 9705 bzw. DIN EN 14390 für die Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichster Materialien, insbesondere Wand- und Deckenmaterialien, eingesetzt wird.

Für Forschungszwecke kann der Bereich unter der Haube für Versuche zusätzlich verwendet werden.

Mittels eines gekoppelten FTIR können die freigesetzten Brandgase auf deren Toxizität untersucht werden.



Ansicht des Room Corner Testraums, bestehend aus Testraum, Haube und Absaugrohr mit Messtechnik

Technische Daten

- Länge x Breite x Höhe:
3.600 mm x 2.400 mm x 2.000 mm
- Luftaustausch über Türöffnung:
800 mm x 2.000 mm
- Zündbrenner 0-300 kW
- Wärmefreisetzungsrate bis ca. 2.000 kW
- Volumenströme bis 15.000 m³/h realisierbar
- Bestimmung von:
Wärmefreisetzungsrate (HRR),
gesamte freigesetzte Wärme (THR),
Rauchproduktionsrate (SPR),
CO/CO₂-Freisetzungsraten
- Bestimmbare Gaskomponenten des FTIR u. a.:
Wasser, Kohlenmonoxid/-dioxid, Alkohole,
Carbonsäuren, Salzsäure, Cyanwasserstoff,
Fluorwasserstoffsäure, Aldehyde, aromatische
Kohlenwasserstoffe etc.



Versuch unter der Haube des Room Corner Testraums

Anwendungsbeispiel

- Wand- und Deckenbekleidungen
- Materialien für den Kraftfahrzeugbau
- Materialien für Schienenfahrzeuge
(entsprechend DIN EN 45545-2)
- Kabel und Kunststoffe
- Dämmstoffe und Isolierungen
- Intumeszierende Beschichtungen/
Dämmschichtbinder
- Vergleichende Betrachtungen gealterter/ nicht
gealterter Baustoffe, etc.

Fassaden- / Brandhaus- Kalorimeter K3.B / K3.F DIN 4102-20, 4102-24, BS

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Durchführung von Brandversuche mit angeschlossenem Großkalorimeter.

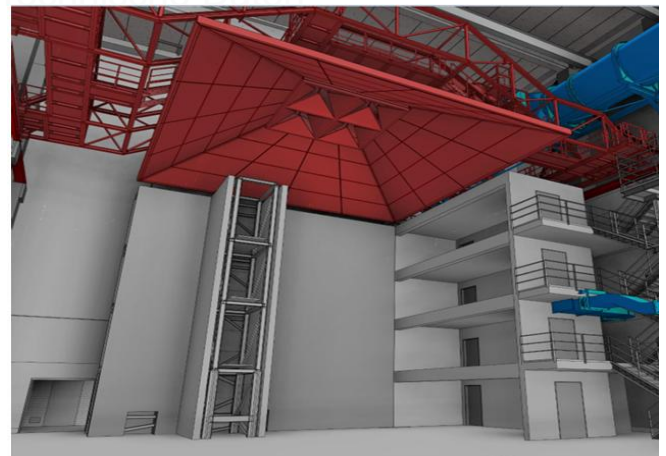
Fassadenprüfstand (K3.F)

- 12 m hoch, bis zu 3 x 6 m breite Eckanordnungen
- Prüfungen nach DIN 4102-Teil 20 und Teil 24
- Prüfungen nach British Standard BS 8414-1

Brandhaus (K3.B)

- 4 geschossiger Versuchsstand 12 m,
- Öffnungsbreiten bis 9 m, lichte Höhe 2,7 m
- Prüfungen in Kombination mit Fassade

Technische Daten



Ansicht des Fassadenprüfstand und des Brandhaus

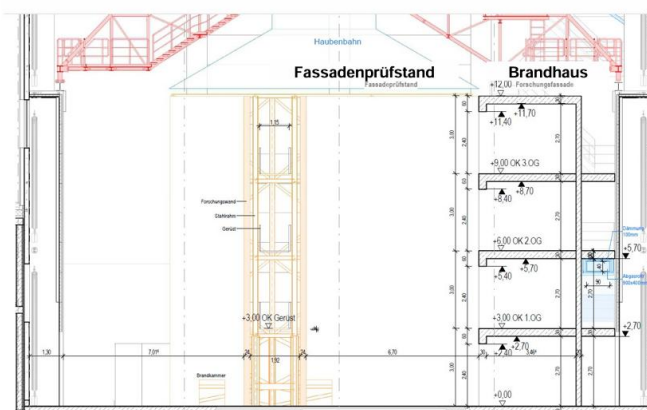
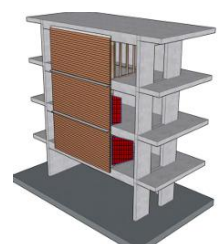
Technische Daten

- Haube 12 x 12 m
- Kranbahn 24 t
- Zündbrenner 0-500 kW
- Wärmefreisetzungsrate bis ca. 20 MW
- Volumenströme bis 280.000 Bm³/h (Betrieb), 150.000 Nm³/h (Norm) realisierbar
- Zuluftklappen umlaufend individuell regelbar
- Vielstellenmesstechnik bis 800 Fühler

- Bestimmung von:
 - Wärmefreisetzungsrate (HRR),
 - gesamte freigesetzte Wärme (THR),
 - Rauchproduktionsrate (SPR),
 - CO/CO₂-Freisetzungsraten
- Bestimmbare Gaskomponenten des FTIR u. a.:
 - Wasser, Kohlenmonoxid/ -dioxid, Alkohole,
 - Carbonsäuren, Salzsäure, Cyanwasserstoff,
 - Fluorwasserstoffsäure, Aldehyde, aromatische Kohlenwasserstoffe

Anwendungsbeispiel

- Fassaden,
- Brand im Bereich Raum/Fassade,
- Dämmstoffe und Isolierungen
- Nachwachsende Rohstoffe,
- Hinterlüftete Konstruktionen
- Klärung von Fragen:
 - Brandpropagation,
 - Brandüberschlag, Flash Over
 - Löschung



Systemzeichnung Fassadenprüfstand/Brandhaus

Frei-Kalorimeter K4 (Frei-, Batterie-, Lagerbrände etc.)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Durchführung von Brandversuche mit angeschlossenem Großkalorimeter.

Freikalorimeter (K4)

Freie Anordnungen, Batterien, Lager, verschiedenste Brandlasten

Zuluftklappen umlaufend individuell regelbar,
Randschürzen auf 4 m über Boden einstellbar,
Stützen an den Ecken der Haube für vertikale Messebenen nutzbar.



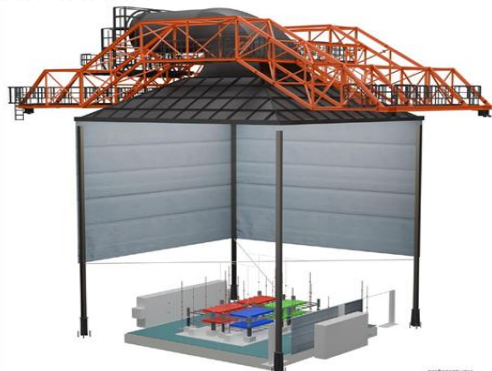
Ansicht des Frei-Kalorimeters

Technische Daten

- Haube: 12 x 12 m, verfahrbar
- Haubenhöhe: 12 m mit Schürzen auf bis zu 4 m umlaufend
- Kranbahn: 12,5 to
- Bodenwaage: Fläche 9 x 9 m, Last bis 22,5 to
- Zündbrenner: 0 - 500 kW
- Wärmefreisetzungsrate bis ca. 20 MW
- Volumenströme bis 350.000 Bm³/h (Betrieb), 250.000 Nm³/h (Norm) realisierbar
- Vielstellenmesstechnik bis 800 Fühler

- Bestimmung von:
 - Wärmefreisetzungsrate (HRR),
 - gesamte freigesetzte Wärme (THR),
 - Rauchproduktionsrate (SPR),
 - CO/CO₂-Freisetzungsraten
- Bestimmbare Gaskomponenten des FTIR u. a.:
 - Wasser, Kohlenmonoxid/-dioxid, Alkohole,
 - Carbonsäuren, Salzsäure, Cyanwasserstoff,
 - Fluorwasserstoffsäure, Aldehyde, aromatische Kohlenwasserstoffe

Beschreibung



Ansicht des Batterieversuchs im Frei-Kalorimeter

Anwendungsbeispiel

Elektrospeicher/Akku,
Schienenfahrzeuge,
Lageranordnungen,
Nachwachsende Rohstoffe.

Klärung von Fragen:

Brandpropagation,
Brandüberschlag,
Löschung

Container-/ Batteriekalorimeter K5

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Kalorimeter für die Erforschung des Brandverhaltens von Batterien/ Zündquellen.

Der Brandraum des K5 besteht aus einem bearbeiteten Überseecontainer mit einem aufgesetzten Rahmen, auf dem Ablufthaube und Kühlwasserbehälter aufgestellt sind.

Über die Aufstellung kann im gesamten Versuchsverlauf die Masse- sowie die Verlustrate des Probekörpers erfasst werden. Mittels eines gekoppelten FTIR können die Brandgase auf deren Toxizität untersucht werden.



Ansicht des Containerkalorimeter K5, bestehend aus Testraum, Haube und Absaugrohr mit Messtechnik

Technische Daten

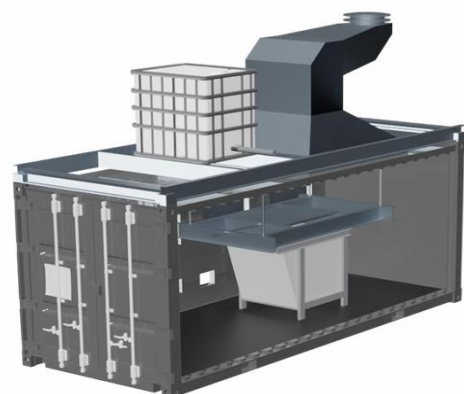
- Länge x Breite x Höhe (Brandraum, Standard-Seecontainer):
5.900 mm x 2.400 mm x 2.600 mm
- Zündbrenner 0-300 kW
- Wärmefreisetzungsraten bis ca. 5.000 kW
- Volumenströme bis 25.000 m³/h realisierbar

- Bestimmung von:
Wärmefreisetzungsrate (HRR),
Verbrennungswärme (THR),
Rauchproduktionsrate (SPR),
CO/CO₂-Freisetzungsraten
Massenverlust (ML)-/ Masseverlustrate (MLR)
- Bestimmbare Gaskomponenten des FTIR u. a.:
Wasser, Kohlenmonoxid/ -dioxid, Alkohole,
Carbonsäuren, Salzsäure, Cyanwasserstoff,
Fluorwasserstoffsäure, Aldehyde, aromatische
Kohlenwasserstoffe



Versuch in Brandraum K5

Anw



Innenansicht Containerkalorimeter mit hängender Probekörperaufstellung und Tauchbecken

Inhaltsverzeichnis:

Ausstattung ZeBra

Messtechnik-Kalorimeter

Fourier-Transformations-Infrarot-Gasanalysator - GX07	Seite 8
Thermografiekamera VarioCam - GX081	Seite 9
Thermografiekamera ImageIR 8300 - GX082	Seite 10
Batterielagerbehälter - GX11	Seite 11

Mobiler Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie Gasanalysator (FTIR)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Mit der Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) lassen sich Zusammensetzung und Konzentration von Brandgasen bestimmen.

Ein FTIR-Gasanalysator erfasst das Absorptionsspektrum des Messgases und identifiziert Moleküle anhand ihrer charakteristischen Absorptionsmuster.

Da die Intensität der Absorption proportional zur Konzentration ist, sind sowohl qualitative als auch quantitative Analysen möglich.

Es stehen drei Geräte zur Verfügung.

Technische Daten



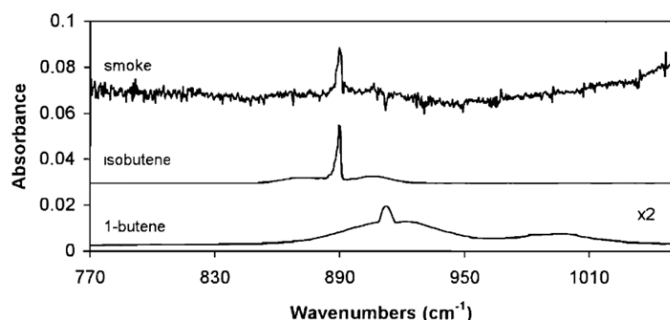
Ansicht der FTIR-Gasanalyseeinheit

Technische Daten

- Probengröße: 0,45 l
- Umgebungstemperatur: 5 - 30 °C
- Spiegel monolithisch und mit einer Goldschuttschicht
- Optische Weglänge: 5m
- Gasfluss: 2 - 10 l/min (je nach Probenahme)
- Gasfilter zur Entfernung von Partikeln (2µ)
- Bis zu 50 infrarotaktive Gase können simultan bestimmt werden

- Beispiele für bestimmbare anorganische Komponente: Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Salzsäure, Blausäure, Fluorwasserstoff, Methan, Stickstoffoxide, Ammoniak, Schwefeldioxid, Wasser
- Beispiele für bestimmbare organische Komponente: Formaldehyd, Acrolein, Phosgen, Benzol, Toluol, o-, m-, p-Xylol, Ethylbenzol, Styrol, Phenol, Chlorbenzol, Ethan, Acetylen, Ethanol, Aceton, Ethansäure etc.

Datenaufnahme



Beispielbild für Absorptionsspektrum

Anwendungsbeispiel

- Qualifizierung und Quantifizierung der Brandfolgeprodukte bei Brandversuchen
- Toxizitätsanalysen
- Ableitung verbrennungsschemischer Reaktionsmechanismen
- Brandgasanalysen

Thermographiekamera VarioCam HD

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Hochauflösender Thermografie-Kopf für präzise Temperaturmessung und Thermografie.

Der VarioCAM® HD Kopf ist eine modulare Komponente für die Integration in kundenspezifische thermografische Systeme. Er verfügt über einen leistungsstarken Detektor, fortschrittliche Optik und Echtzeit-Bildverarbeitung. Geeignet für industrielle Inspektionen, wissenschaftliche Forschung und Sicherheitsanwendungen liefert er genaue Temperaturwerte auf verschiedenen Oberflächen und in unterschiedlichen Umgebungen.

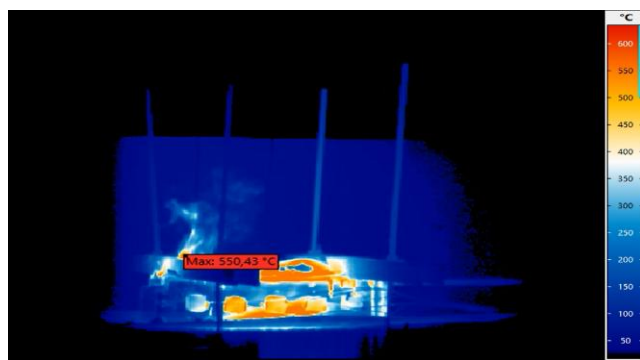


Kamera System VarioCAM HD

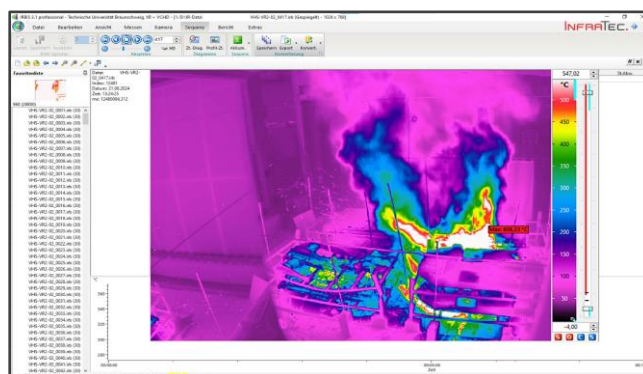
Technische Daten

- Spektralbereich: 7,5 – 14 μm
- Temperaturbereich: -40°C bis $+1200^{\circ}\text{C}$ (optional $> 2000^{\circ}\text{C}$)
- Temporaufauflösung: Besser als 0,05 K, optional 0,03 K je nach Kamera-/Detektor-Typ
- Emissionssteuerung: Einstellbar von 0,1 bis 1,0 in Schritten von 0,01
- Bildformat (Pixel): 1024 x 768, Resolution Enhancement* auf 2048 x 1536 (640 x 480), Resolution Enhancement* auf 1280 x 960
- Messgenauigkeit: $\pm 1,5$ K oder $\pm 1,5$ %
- Detektor: Ungekühltes Mikrobellometer-Focal-Plane-Array
- IR-Bildfrequenz: 30 Hz (1024 x 768), 60 Hz (640 x 480)
- Optik: 1.0/30 mm ($32,4 \times 24,6^{\circ}$) oder 1.0/30 mm ($29,2 \times 26^{\circ}$), Zoom: Bis zu 32-fach digital
- Bildspeicherung: GigE-Vision 30 Hz bzw. 60 Hz, optional interne SDHC-Karte*

Anwendungsbeispiele



Beispiel einer Infrarotaufnahme



Ansicht der Auswertungssoftware

Thermographiekamera ImageIR 8300 hp 355

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Hochleistungsfähige Mittelwellen-Infrarot-Thermografiekamera für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen.

Das ImageIR® 8300 hp 355 verfügt über einen kryogen gekühlten HgCdTe (MCT) Detektor mit hoher Auflösung, der präzise Temperaturmessungen und die Erkennung subtiler thermischer Phänomene ermöglicht. Es deckt einen Spektralbereich von 3 bis 5 Mikrometern ab und bietet eine schnelle Bildfrequenz von bis zu 200 Hz für Echtzeitbilder.

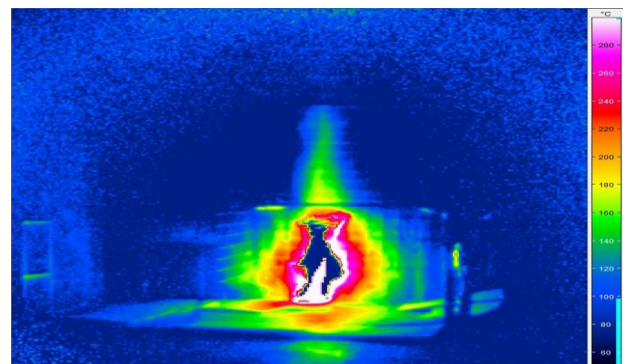


Kamera System ImageIR 8300 hp 355

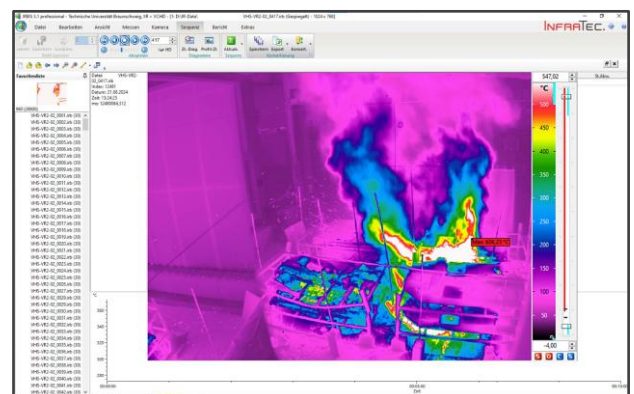
Technische Daten

- Auflösung: 1024x1024
- Pixelpitch: 15 µm / 20 µm
- Bildrate: Bis zu 200 Hz
- NETD (Empfindlichkeit): < 20 mK
- Spektralbereich: 3 – 5 µm
- Abmessungen :
~241x120x160 mm / ~235x120x160 mm
- Temperaturbereich:
-40°C bis +1500°C
- Objekttypen:
Weitwinkel, Standard, Tele, Makro, Mikro
- Brennweiten:
12 mm – 200 mm (Standard)
- Min. Objektstand:
Von 14 mm (Mikro) bis 6000 mm (Tele)
- Pixelgröße (Makro/Mikro):
Von 1,9 µm bis 90 µm
- Gewicht (ohne Optik): ~3,3 kg

Anwendungsbeispiele



Beispiel einer Infrarotaufnahme



Ansicht der Auswertungssoftware

Transport- und Lagerbehälter Lithium-Ionen-Batterien & Akkus

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Lagerbehälter für Lithium-Ionen-Batterien/ Lithium-Ionen Akkus

Für die Durchführung von Groß- und Kleinversuchen mit Lithium-Ionen-Batterien und Akkus im ZeBra ist es erforderlich, Versuchskörper vor ggf. auch nach dem Versuch zwischenzulagern.

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Batterieversuchskörper serienreife haben, müssen diese als Gefahrgut angesehen und entsprechend gelagert werden.

Technische Daten



Ansicht des Lagerbehälters

Technische Daten

- Länge x Breite x Höhe (Außen)
2.880 mm x 2.080 mm x 1.045 mm
- Länge x Breite x Höhe (Innen)
2.590 mm x 1.790 mm x 600 mm
- Verpackungsanweisung LP 906 (1) für max.
144,5 kWh BEV Batterien
960 kg Zuladung
- Anforderungen der ADR erfüllt

•

Beschreibung



Gestapelte Lagerbehälter (unbefüllt)

Anwendungsbeispiel

- Lagerung von Batteriezellen und -module:
Vor der Versuchsdurchführung
Lagerung mehrerer kleinerer Batteriekörper während mehrteiligen Versuchsserien
Nach der Versuchsdurchführung zur Überbrückung eines Zeitraums bis zur Zuführung zum Recycling/ der Entsorgung

Inhaltsverzeichnis: Ausstattung ZeBra Labor-Untersuchungen

Elementaranalyse CHNO - L01	Seite 13
Pyrolyse-GCMS - L02	Seite 14
TGA-DSC-GCMS-FTIR - L03	Seite 15
Ultra Zentrifugalmühle ZM 200 - L04	Seite 16
Partikelanalysator CAMSIZER - L06	Seite 17
Flammpunktprüfer - L08	Seite 18
Micro-Kalorimeter K6 - L10	Seite 19
Dilatometer - L13	Seite 20

CHNS-O2-Elementaranalyse

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Elementaranalyse wird eingesetzt, um eine schnelle und präzise Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von festen und flüssigen Materialien durchzuführen. Bei dem Verfahren wird die Probe hohen Temperaturen ausgesetzt. Dabei findet eine Verbrennung (CHNS-Analysator) bzw. eine Pyrolyse (Sauerstoff-Analysator) statt. Nach der Trennung mithilfe eines chromatographischen Verfahrens werden die freigesetzten Gase oder Dämpfe analysiert. Die Elementaranalyse ermöglicht die Bestimmung der Gehalte von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff.



View of the CHNS analyzer and the oxygen analyzer (O₂)

Technische Daten

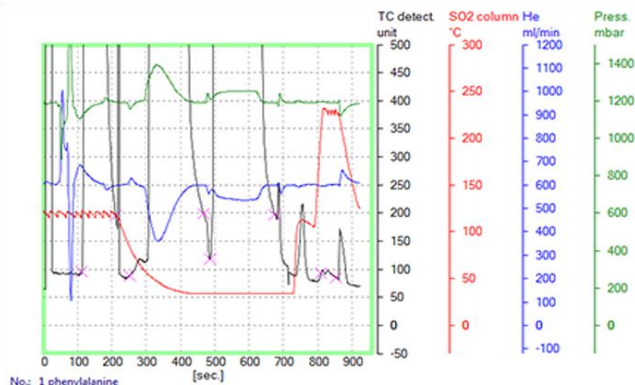
Sauerstoffanalysator O2

- Analysezeit: ca. 14 Minuten
- Gerätegröße: 48 cm x 55 cm x 63 cm
- Maximaltemperatur: 1450 °C
- Probenhalter mit 120 Positionen
- Konzentrationsanalyse von Sauerstoff
- Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD)
- Verwendete Gase: Helium
- Dreifach Ofensystem

CHNS-Makroanalysator

- Analysezeit: ca. 3 bis 4 Minuten pro Element
- Gerätegröße: 48 x 55 x 57 cm
- Maximaltemperatur: 1200 °C
- Probenhalter mit 60 Positionen
- Konzentrationsanalyse von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel in einer Messung
- Verwendete Gase: Helium und Sauerstoff
- Dreifach Ofensystem

Beschreibung



Auswertung einer Standardprobe (Quelle: Elementar)

Anwendungsbeispiel

- Überwachung und Untersuchung von Brandrückständen
- Bestimmung des Heizwerts von Materialien
- Einschätzung der Entstehung von Rauch und Ruß
- Vorhersage der entstehenden Brandgase von Materialien, insbesondere toxischer Komponenten

Pyrolyse Gaschromatograph-Massenspektrometer (pyGC-MS)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Pyrolyse Gaschromatograph-Massen-spektroskopie ermöglicht die hochflexible und effiziente automatisierte Pyrolyse fester und flüssiger Proben bei bis zu 1000 °C mit nach folgender Analyse der thermischen Zersetzungsprodukte im GC/MS.

Hochmolekulare organische Substanzen werden hierbei unter definierten Bedingungen thermisch in niedermolekulare Verbindungen zersetzt, bevor sie auf die gaschromatographische Säule gelangen.

Durch kleine Probenmengen und ohne große Aufbereitung können detaillierte Ergebnisse erzielt werden, die mit anderen Analysetechniken nicht möglich sind.



Ansicht der Pyrolyse GC-MS

Technische Daten

- Gerätegröße: 68 cm x 49 cm x 51 cm
- Mehrere Pyrolysetechniken verfügbar: Gepulste, sequentielle und fraktionierte Pyrolyse
- Thermische Desorption mit Lösungsmittelentgasung und Pyrolyse derselben Probe
- Split- oder Splitlos-Betrieb
- Effiziente und zuverlässige Automatisierung
- Optimierte Probenhalter für flüssige und feste Proben
- Maximaler Temperaturanstieg von 120 °C/min
- Flexibles Baukastensystem
- Automatischer Linerwechsel nach vorgegebener Anzahl an Injektionen, um fehlerhafte Analyseergebnisse durch Kontamination zu vermeiden
- Die Widerstandsheizung mit Pt-Filament bietet eine wählbare Pyrolysetemperatur von 350 1000 °C
- Ofenabkühlzeit ca. 4 min (von 450 °C auf 50 °C), 100 K/min



Thermodesorptionseinheit

Anwendungsbeispiel

- Charakterisierung von komplexen Materialproben
- Toxizitätsanalysen
- Analyse von Brandrückständen
- Identifizierung von Brandgasen
- Rauchgasanalyse
- Analyse von Kunststoffen und Polymeren
- Untersuchung von Brandursachen

TGA/DSC mit FTIR bzw. GC/MS Kopplung

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die thermischen Eigenschaften von Materialien lassen sich mithilfe der thermogravimetrischen Analyse (TGA) und der Differenzkalorimetrie (DSC) untersuchen. TGA misst die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur, während DSC Veränderungen im Wärmefluss erfasst. So können Phänomene wie Schmelzen, Kristallisation, Verdampfung und chemische Reaktionen analysiert werden.

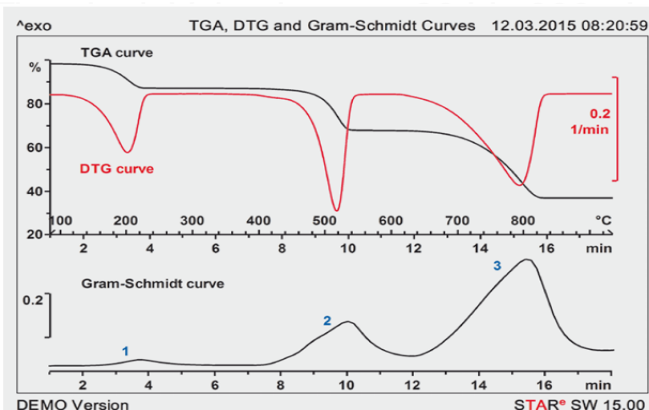
Durch die Kopplung mit FTIR lassen sich gleichzeitig Infrarotspektren aufnehmen, und die zusätzliche Einbindung von GC/MS ermöglicht die Trennung und Identifizierung flüchtiger organischer Verbindungen. Zusammen bieten diese Methoden eine umfassende Charakterisierung von Materialproben



Ansicht der TGA/DSC- IST16-GCMS Kopplung

Technische Daten

- Analyse von Proben von Raumtemperatur bis 1000 °C
- Simultane Bestimmung von thermischen Effekten durch DSC Wärmestrommessung
- Gasdichte Messzelle für eine definierte Messumgebung
- Hohe Temperaturgenauigkeit
- Bis zu 34 Proben können mit unterschiedlichen Methoden abgearbeitet werden
- Tiegel mit Volumina von 20 bis 900 µL und verschiedenen Materialien



TGA-FTIR Messergebnis (Quelle: Mettler Toledo)

Anwendungsbeispiel

- Untersuchung von Brandverhalten von Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen
- Emissionsanalyse, um die Gefahrenpotentiale von Bränden zu verstehen und geeignete Maßnahmen zum Schutz zu treffen
- Entwicklung von Brandschutzmaterialien
- Identifizierung von Brandbeschleunigern und Brandrisiken
- Analyse von Brandrückständen, um Rückschlüsse auf die Brandursache und -entwicklung zu ziehen

ULTRA-Zentrifugalmühle ZM 200

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Ultra-Zentrifugalmühle ZM-200 wird zur schnellen Feinzerkleinerung von weichen bis mittelharten und faserigen Materialien eingesetzt.

Die Zerkleinerung in der Ultra-Zentrifugalmühle ZM-200 erfolgt durch Prall- und Scherwirkung zwischen Rotor und feststehendem Ringsieb. Das Aufgabegut gelangt durch den Trichter mit Rückspritzschutz auf den Rotor.

Durch die Zentrifugalbeschleunigung wird es nach außen geschleudert und beim Auftreffen auf die mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden, keilförmigen Rotorzähne vorzerkleinert. Die Feinzerkleinerung erfolgt dann zwischen dem Rotor und dem Sieb.

Baustoffe

Maschinenbau

Elektronische Komponenten

Holz

Metallurgie

Recycling

Umwelt



Ansicht der Ultra-Zentrifugalmühle

Technische Daten

- Aufgebaut: weich, mittelhart, spröde, faserig
- Endfeinheit < 40 µm
- Charge/Aufgabemenge:
 - 300 ml mit Standardkassette
 - 20 ml mit kleiner Kassette
 - 1000 ml mit Papierfilterbeutel
 - 4500 ml / 2500 ml mit Zyklon
- Rotorumfangsgeschwindigkeit: 31-93 m/s
- Siebgrößen:
 - Trapezlochung, Rundlochung, 14 Siebgrößen
- Schonende Verarbeitung der Materialien
- Kurze Verweildauer der Probe im Mahlraum
- Erhalt der ursprünglichen Eigenschaftsmerkmale der Probe
- Effiziente Zerkleinerung von weichen bis mittelharten und faserigen Materialien



Zustand der Ultra-Zentrifugalmühle

Anwendungsbeispiel

- Baustoffe
- Maschinenbau
- Elektronische Komponenten
- Holz
- Metallurgie
- Recycling
- Umwelt

CAMSIZER® X2 (ISO 13322-2) Partikelanalysator

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Der CAMSIZER X2 basierend auf dem Prinzip der Dynamischen Bildanalyse (ISO 13322-2), bestimmt präzise die Partikelgröße und Partikelform von Pulvern, Granulaten und Suspensionen in einem Messbereich von 0,8 µm bis 8 mm.

Bei der Analyse ultrahelle LED Stroboskop-Lichtquellen und zwei hochauflösende digitale Kameras erreichen eine Aufnahmerate von über 300 Bildern pro Sekunde, die eine leistungsfähige Software in Echtzeit auswertet.

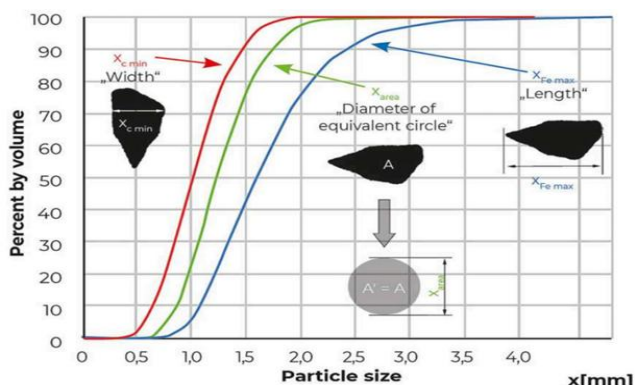
Die Partikelinformationen ist sowohl für den F&E Bereich als auch für Routineaufgaben in der Qualitätskontrolle hervorragend geeignet.



Ansicht des CAMSIZER X2

Technische Daten

- Messprinzip: Dynamische Bildanalyse (ISO 13322-2)
- Messbereich:
 - 0,8 µm bis 8 mm
 - 10 µm bis 8 mm (Freifalldispersion)
 - 0,8 µm bis 5 mm (Druckluftdispersion)
 - 0,8 µm to 1 mm (Nassdispersion)
- Art der Analyse: Trocken- und Nassmessung
- Messzeit: 1 bis 3 min, Anzahl der Kameras: 2
- Probenmenge: < 20 mg - 500 g
- Messmethode: > 300 Bilder pro Sekunde
- Größe des Messfeldes: 20 x 20 mm
- Auflösung: 0,8 µm pro Pixel
- Messparameter: Partikelgröße, Partikelform & Konvexität



Vergleichbarkeit zu Siebanalyse und Laserbeugung

Anwendungsbeispiel

- Die Partikelgrößenbestimmung in vielen verschiedenen Industriezweigen als Teil der Qualitätskontrolle eingesetzt, z. B.:
- Metall- und Erzpulver
- Zement
- Baustoffe
- pharmazeutische Pulver
- Holzfasern
- Kunststofffasern Kunststoffpulver

Flammpunktprüfer nach Pensky-Martens EN ISO 2719

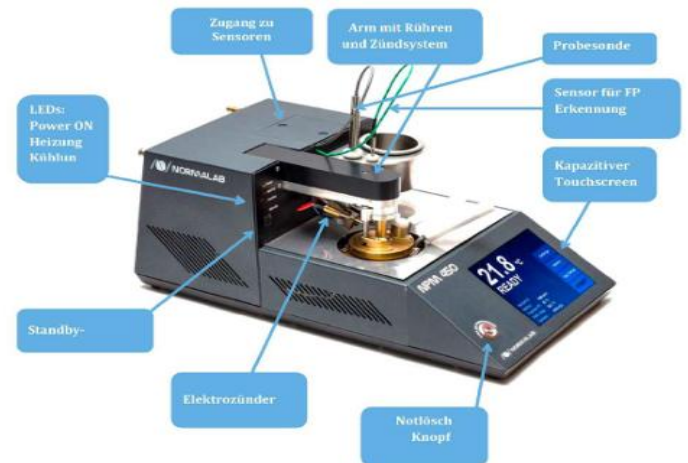
Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Verfahren nach Pensky-Martens mit geschlossenem Tiegel (EN ISO 2719:2016)

Der Prüfgegenstand wird im geschlossenen Tiegel mit Hilfe eines elektrisch betriebenen Ofens mit Heißluftbad erwärmt und kontinuierlich gerührt. Während man die Temperatur langsam steigert, wird in festgelegten zeitlichen Abständen versucht, mit einer Zündquelle (Flamme), die man durch eine sich öffnende Deckelaussparung einführt, das Dampf/Luft Gemisch zu entzünden. Die Temperatur, ab der eine Entflammung auf der Oberfläche der Flüssigkeit beobachtet wird, wird als Flammpunkt bezeichnet. Die Bestimmung des Flammpunkts nach Pensky-Martens ist in einem Temperaturbereich von 40°C bis 370°C anwendbar.

Ein Flammpunktprüfer kann verwendet werden



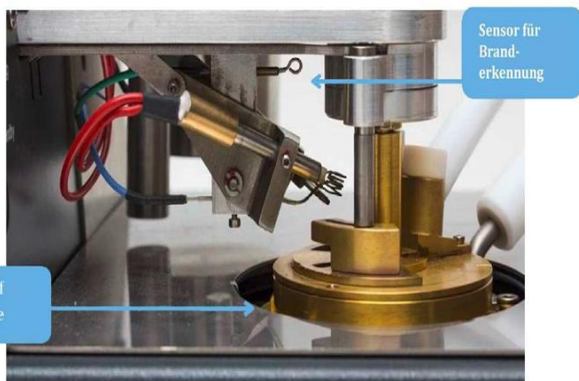
Flammpunktprüfer

Technische Daten

- ASTM D 93 – EN 22719 – IP 34 – ISO 2719
- Thermoelementhalterständer Prüftemperatur Bereich: 0 bis 410°C
- Flammpunkterkennung durch Thermoelement
- Probentemperaturfühler: Typ Platinwiderstand Pt100
- Kombiniertes-Zündsystem (Elektro und Gas)
- Integrierte barometrische Korrektur
- Automatische Wiederzündung der Gasflamme
- Schnelles Aufheizen und Abkühlen
- Heizrate 0 bis 15°C/min
- Sicherheitsstopp 0 bis 30 °C (über Flammpunkt)
- Elektrische Zündung geregelt / überwacht
- Rührgeschwindigkeiten 50 bis 300 U/min (+/-3 U/min)
- Brandmeldesystem mit Ionisationssensorelektrode, die über dem Zündsystem platziert ist, Blitzerkennung

Anwendungsbeispiel

- Ein Flammpunktprüfer kann verwendet werden, um die Brandeigenschaften von Materialien besser charakterisieren zu können
- So liegt der Flammpunkt von Teer bei 90 °C, bei Asphalt dagegen bei 205 °C
- Die Unterschiede beim Flammpunkt zwischen festen und flüssigen Materialien sind mitunter sehr hoch
- So liegt der Flammpunkt von z.B. Methanol bei 11 °C und bei Motoröl bei 80 °C
- Es können z.B. Flüssigkeiten die dazu neigen unter den Prüfbedingungen einen



Anschlüsse

Mikrokalorimeter (MCC)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Das Mikrokalorimeter ist ein Instrument zur präzisen Messung der Wärmeenergie, die bei der Verbrennung kleiner Substanzmengen freigesetzt wird.

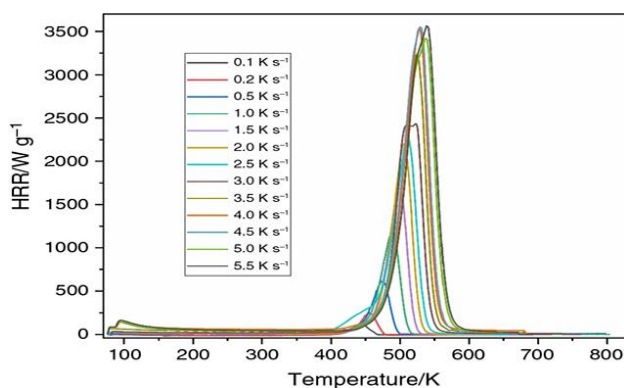
Es dient der Analyse thermischer Eigenschaften von Materialien, der Heizwertbestimmung von Brennstoffen und der Charakterisierung chemischer Reaktionen im Mikroskalen-Bereich. Bei dem Verfahren wird eine Probe zunächst in der Pyrolysekammer unter inerten Bedingungen mit einer konstanten Heizrate erhitzt und zersetzt. Die Zersetzungsprodukte werden in eine Brennkammer geleitet, wo unter Sauerstoffeinfluss Oxidationsreaktionen möglich sind. Die Energiefreisetzung wird über die Sauerstoffverbrauchs-kalorimetrie abgeleitet.



Mikrokalorimeter

Technische Daten

- Probengröße: 1 bis 5 mg
- Heizrate: 0,4 bis 4 °C
- Ofentemperatur: 25 bis 1000 °C
- Wiederholbarkeit von $\pm 5 \%$
- Quantitative Ergebnisse können in wenigen Minuten generiert werden
- Absaugsystem mit einem Volumenstrom von 100 cm³/min
- Automatische Steuerung von Temperatur und Gasdurchflussmengen
- Bestimmung von spezifischer Wärmefreisetzungsrate (W/g), Verbrennungswärme (J/g) und Zündtemperatur (°C)



Temperaturabhängige Wärmefreisetzung
<https://doi.org/10.1007/s10973-021-10963-4>

Anwendungsbeispiel

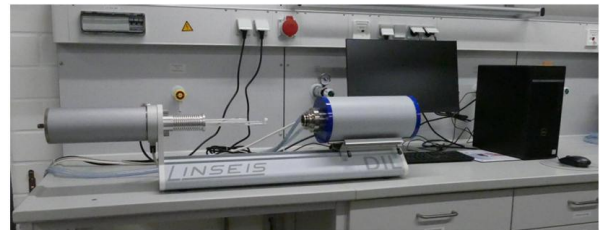
- Materialbewertung
- Entwicklung von Brandschutzmitteln
- Erforschung des Brandverhaltens von Materialien und Entwicklung brandschutztechnischer Maßnahmen
- Bestimmung von Eingangsparametern für numerische Brandsimulationen
- Validierung von Brandschutzstandards

Dilatometer L76 Horizontal

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Das Dilatometer wird zur Bestimmung der thermischen Ausdehnung, Schrumpfung und des Sinterverhaltens sowie der Dimensionsänderungen von festen, pulverförmigen und pastösen Materialien verwendet. Es basiert auf der Push-Rod-Methode, die in der Materialprüfung und -forschung weit verbreitet ist. Eine kleine Probe wird in einem Ofen einem kontrollierten Heizprogramm unterzogen, während ihre Dimensionsänderung kontinuierlich mit hoher Präzision gemessen wird. Das System ermöglicht Tests bei Temperaturen bis zu 1600 °C und arbeitet je nach Materialanforderungen unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen, wie z. B. Inertgas oder Vakuum.



Ansicht des Dilatometers

Technische Daten

- Probendurchmesser: 7 mm, 12 mm, 20 mm
- Heizrate: 0,1 bis 50 °C/Min
- Temperaturbereich: Raumtemperatur bis 1600 °C
- Messbereich: 25 - 2500 Mikrometer
- Kontaktkraft: 0,02 bis 1 N
- Maximale Eingangsleistung: 3600 W
- Bestimmung von:
 - Änderung der absoluten Probenlänge,
 - Wärmeausdehnungskoeffizient,
 - Schrumpfung,
 - Sinterung unter kontrollierter Aufheizrate usw.
 - Thermische Längenänderungen bei verschiedenen Materialien, einschließlich Feststoffen, Schmelzen, Pulvern, Pasten, Keramiken und Fasern.



Ofen mit einer Ziegelprobe

Anwendungsbeispiel

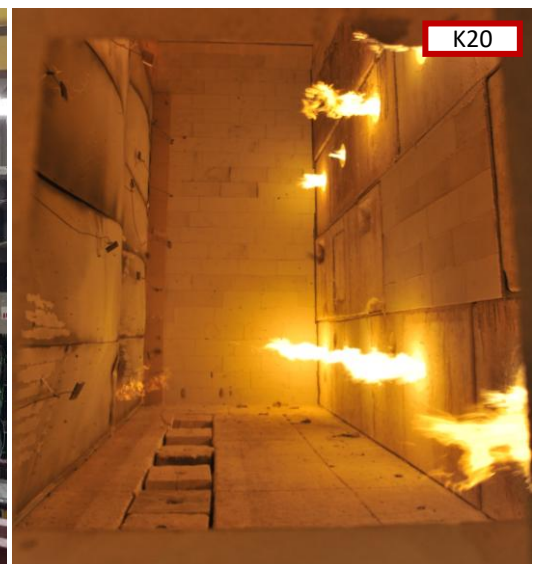
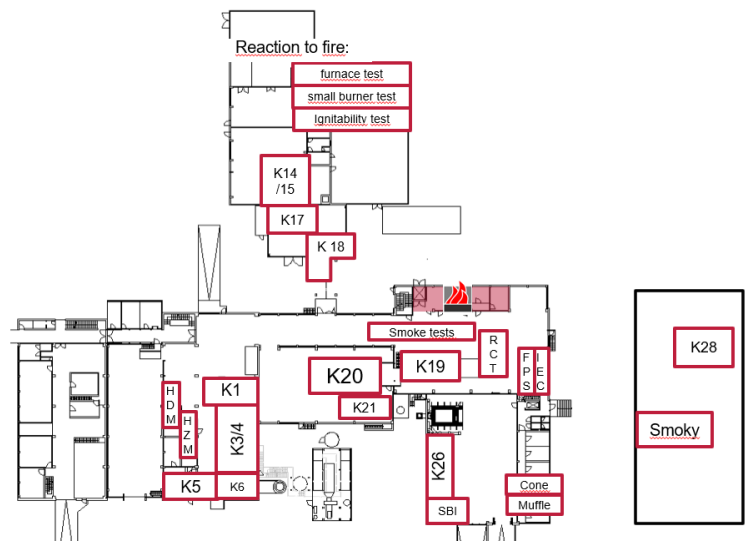
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE)
- Metallurgie und Legierungsentwicklung
- Keramik- und Glastechnologie
- Polymere und Kunststoffe
- Baustoffe
- Kernmaterialien

Institute of Building Materials, Concrete Construction and Fire Safety, Department of Fire Safety

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Purpose of the iBMB

- Teaching
 - Fire safety
 - Civil engineering
 - Architecture and environmental engineering
- Research
 - Experimental
 - Numerical
- Knowledge Transfer
 - Braunschweig Fire Symposium
 - Symposium Structural fire engineering
 - Standards (DIN, CEN, ISO)
 - Consulting, surveys



Fire testing facilities for building elements and structures (K1 – K28)

e.g.:

- Wall and fire wall furnace (K5)
- Column test furnace (K19)
- Slab-/ Wall test furnace (K20)

Inhaltsverzeichnis: Ausstattung iBMB-fgf Bauteil-Untersuchungen

Heißzuganlage - XG01	Seite 23
Heißdruckanlage - XG02	Seite 24
Großer (Stützen-) Prüfstand (Oskar) - XK19	Seite 25
Decken- und Wandprüfstand (Loreley) - XK20	Seite 26
Brandraumkamera - XM07	Seite 27

Heißzuganlage DIN EN ISO 6892-1, DIN EN ISO 6892-2

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Heißzuganlage dient zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Materialien unter erhöhten Temperaturen. Zur Durchführung der Warmzugprüfung bei erhöhten Temperaturen wird das vorhandene Ofensystem um die Prüfprobe integriert.

Die Versuchspalette umfasst sowohl stationäre als auch instationäre Warmzugversuche. Dabei besteht die Flexibilität, verschiedene Randbedingungen wie beispielsweise die Aufheizrate, einzustellen. Die Versuche können sowohl mittels Wegsteuerung als auch mittels Kraftsteuerung durchgeführt werden.



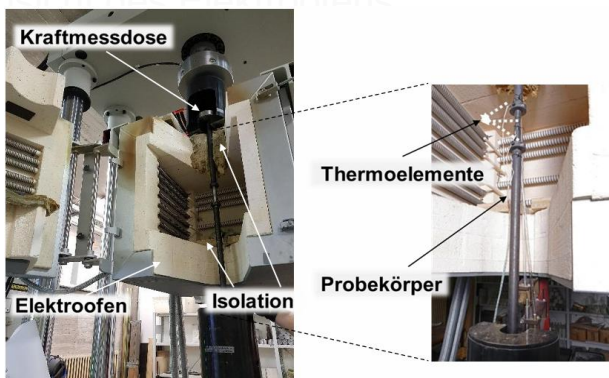
Ansicht der Heißzuganlage



Technische Daten

- Zur Heißzuganlage:
 - Leistung: max. 1000 kN
 - Prüfprobe: Rundprobe, Flachprobe
 - Prüfmöglichkeit:
 - Vertikale Zugprüfung
 - Dehngesteuerte und kraftgesteuerte,
 - Stationäre und instationäre Zugprüfung
- Zum Elektroofen:
 - Temperaturleistung: 20 °C – 700 °C
 - Aufheizrate: 2 - 5 k/min
- Bestimmung der mechanischer Eigenschaften von Materialien bei der Raumtemperatur
- Bestimmung der mechanischer Eigenschaften von Materialien unter erhöhten Temperaturen
- Durchführung der Zugprüfung an unterschiedlichen Stahlsorten und Probenformen

Ansicht des Elektroofens



Probe im eingebauten Zustand im Elektroofen

Anwendungsbeispiel

- Zugprüfung von Materialien bei erhöhten Temperaturen mit Integration des vorhandenen Ofensystems
- Zugprüfung von Stahlproben
- Entwicklung und Forschung
- Werkstoffprüfung
- Statische, quasistatische Zugversuche
- Prüfaufgaben und Güteüberwachung

Heißdruckanlage

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Heißdruckanlage dient zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Materialien unter erhöhten Temperaturen.

Zur Durchführung der Heißdruckprüfung bei erhöhten Temperaturen wird das vorhandene Ofensystem um die Prüfprobe integriert. Die Versuchspalette umfasst sowohl stationäre als auch instationäre Versuche im Hochtemperaturbereich.

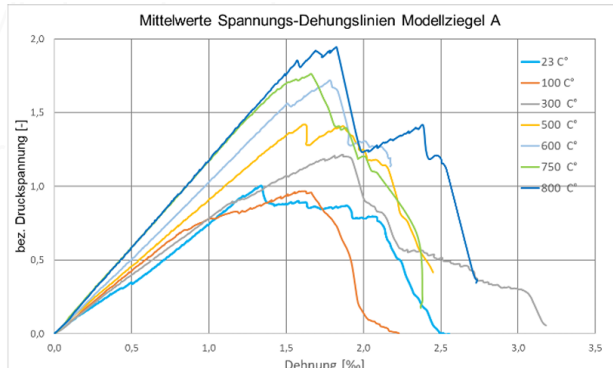
Dabei besteht die Flexibilität, verschiedene Randbedingungen wie beispielsweise die Aufheizrate, einzustellen. Die Versuche können sowohl mittels Wegsteuerung als auch mittels Kraftsteuerung durchgeführt werden.



Heißdruckmaschine und eingebauter Probekörper inkl. Temperatur- und Verformungseinrichtung (rechts unten)

Technische Daten

- Belastungseinheit: max. 4000 kN
- Probenhöhe: max. 1000 mm
- Max. Temperatur: 800 °C
- Elektrofen Aufheizrate: 2 - 5 K/min
- Abkühlrate: < 1 K/min
- Zylinderproben mit:
Durchmesser 80 - 150 mm
Länge 240 - 300 mm
- Prüfmöglichkeiten:
Weggesteuerte und kraftgesteuerte vertikale Druckprüfung
Stationäre und instationäre Druckprüfung



Bei verschiedenen Temperaturen in stationären Versuchen ermittelte Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Modellziegeln

Anwendungsbeispiel

- Druckprüfung von Materialien bei erhöhten Temperaturen mit Integration des vorhandenen Ofensystems
- Heißdruckversuche an Baustoffproben: Würfel oder Zylinder aus Beton, Keramik, Porenbeton, Kalksandstein- und Ziegelementen

Großer (Stützen)-Prüfstand – Oskar (K19)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Der Brandofen 'Oskar' dient der Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer des Bauteils, der Bestimmung der Temperaturentwicklung im Bauteil sowie der Erfassung horizontaler und vertikaler Verformungen während des Brandes.

Das Bauteil wird im Brandofen aufgebaut. Die mechanische Belastung erfolgt durch eine Hydraulikpresse. Die Belastung des Bauteils wird durch max. 6 Ölbrenner im Brandofen erzeugt.

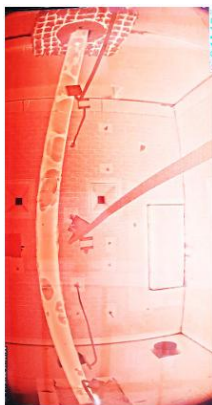
Das Verhalten des Bauteils während des Brandes kann mittels einer Brandraumkamera aufgenommen werden.



Ansicht des Brandofens „Oskar“

Technische Daten

- Ofengrundfläche (Prüffläche):
3,6 x 3,6 m² (B x L)
- Prüfhöhe:
3,6 bis 5,6 m (H) (modular)
max. 7,6 m (ohne Belastung)
- Belastung: Vertikal, Druck
- Leistung:
3300 kN - 100 mm Lastexzentrizität
4000 kN - 30 mm Lastexzentrizität
max. 6500 kN - 11 mm Lastexzentrizität
- Bestimmung von Feuerwiderstandsdauer des Bauteils
- Bestimmung von Temperaturentwicklung im Bauteil
- Bestimmung der horizontale und Vertikale Verformung des Bauteils im Brand
- Bestimmung der Bauteilverhalten im Brand



Probe im eingebauten Zustand im Brandversuch

Anwendungsbeispiel

- Stützen und Wände
- Schränke und Brandschutzklappen
- Tore, Türen und Verglasungen
- Der Ofen kann auch für Untersuchungen der Branddynamik brennender Gegenstände herangezogen werden. Durch Anschluss einer Haube können die Rauchgase analysiert und z. B. die Wärmefreisetzungsrate abgeleitet werden

Decken-/ Wandprüfstand – Loreley (K20)

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

Die Kammer 20 (Loreley) ist die größte Brandkammer des iBMB der TU Braunschweig.

Es besteht die Möglichkeit brandbeanspruchte Bauteile im Realmaßstab während des Brandversuchs zusätzlich mechanisch zu belasten.

Die Brandkammer kann äußerst variabel eingesetzt werden.

Es können mehrere Aufbauten auch parallel installiert werden.

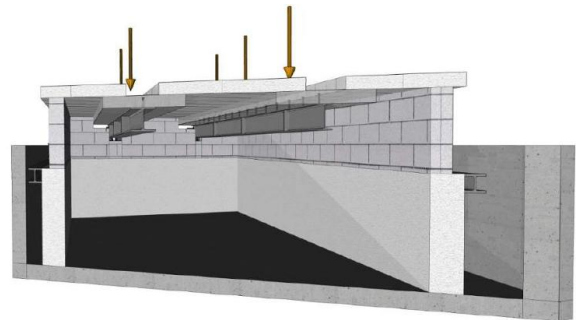
Die Kammer 20 steht in einer eigenen Halle.



Brandversuch an mechanisch belasteten Stahlträgern

Technische Daten

- Normprüfungen: DIN EN 13501 Teil 2
- Prüffläche (horizontal): ca. 5 x 10 m (B x L)
- Ofenhöhe: > 2,5 m (modular erweiterbar)
- In zwei separate Brennkammern unterteilbar
- Belastung (vertikal): 6 Pressen à 300 kN
- Belastung (horizontal): 6 Pressen à 200 kN + 3 Pressen à 1000 kN
- Brenner: Öl, 10 Stück



Brandversuch an mechanisch belasteten Stahlträgern

Beschreibung



Brandversuch an einem mechanisch unbelastetem Wandaufbau aus Sandwichelementen

Anwendungsbeispiel

- Decken und Unterdecken
- Wand-Decken-Anschlüsse
- Träger
- Räume
- Verglasungen
- Kabeltrassen
- Tübbinge
- Entrauchungsanlagen
- Tore

Brandraumkamera

Technische Universität Braunschweig | Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz | FG Brandschutz
brandschutz@ibmb.tu-bs.de | Telefon +49 (0) 531-391-5590

Beschreibung

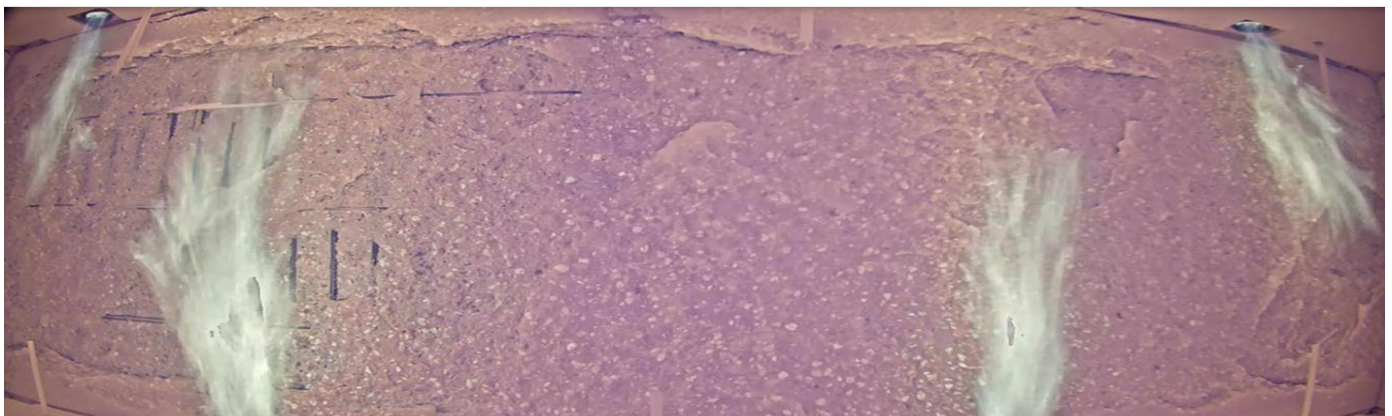
Die Brandraumkamera (Fa. PIEPER) ermöglicht die Live - Videoaufnahme des Bauteilverhaltens eines Probekörpers oder Versuchsaufbaus während eines Brandversuchs. Hierbei kann die Ausrichtung der Kameralinse axial oder radial erfolgen.

Technische Daten

- max. Temperaturbereich: bis 1500 °C
- Kühlung: druckluft- und wassergekühlt
- Einsatzdauer: mind. 48 Stunden
- Auflösung: 768 x 494 Pixel



Verformungsverhalten einer Verbundstütze



Untersuchung des Abplatzverhaltens an Betonen