NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Schlagdynamische Charakterisierung von Kunststoffen und Faserverbunden

Dr. N. Herzig, Prof. L.W. Meyer, Dr. M. Mayer

Nordmetall GmbH, Hauptstraße 16, D-09221 Adorf/Erzgebirge
www.nordmetall.net, info@nordmetall.net

4a Technologietag 2012 – Kunststoffe auf dem Prüfstand, 15./16.02.2012, Pichl

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

Inhalt

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

Inhalt

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

➢ Allgemeine Angaben:

- ⇨ Geschäftsführer: Dr.-Ing. Norman Herzig, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Lothar W. Meyer
- ⇨ derzeit 15 Mitarbeiter
- ⇨ Umsatz 2010: ca. 1,1 Mio EUR, 2011 ca. 1,3 Mio EUR

➢ Geschichte der Firma Nordmetall GmbH:

- ⇨ 1927 Gründung durch Hans Meyer: Herstellung versilberter Tafelwaren (bis 1970)
- ⇨ September 2003 – Neugründung der Nordmetall GmbH mit Firmensitz in Eibenberg
- ⇨ bis April 2009 – Dienstsitz in der TU Chemnitz, Professur Werkstoffe des Maschinenbaus unter der Leitung von Prof. Meyer
- ⇨ Juni 2005 – Eröffnung einer Zweigstelle in Chemnitz
- ⇨ seit April 2009 – vollständige Verlagerung des Dienstsitzes nach Adorf (bei Chemnitz) und Schließung der Zweigstelle in Chemnitz

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Nordmetall GmbH
Hauptstraße 16
09221 Adorf/Erzgebirge

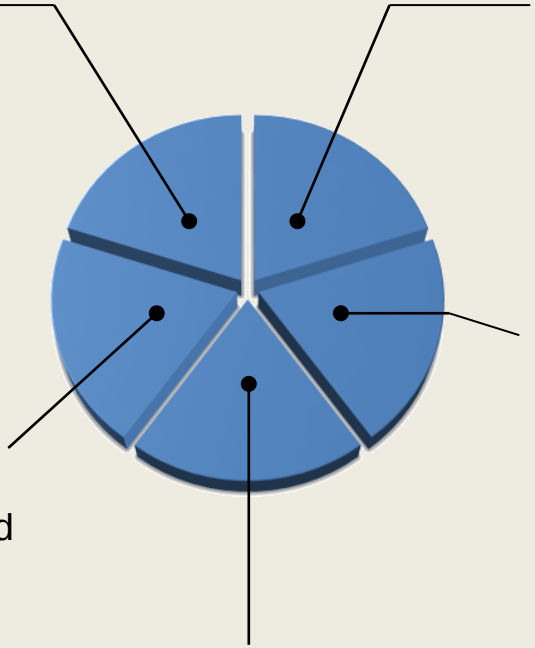
Tel.: +49 371 503490 0
Fax: +49 371 503490 11
Web: http://www.nordmetall.net
Email: info@nordmetall.net

Hauptgebäude der Nordmetall GmbH

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Werkstoff- und Bauteilprüfung

- standardisierte Werkstoffprüfung
- Technologische und Bauteilprüfung
- Prüfung von Metallen (Stähle, Leichtmetalle etc.), Kunststoffe, Verbundwerkstoffe, Keramiken und Gläser



Forschung und Beratung

- Entwicklung neuer Hochgeschwindigkeits-Prüfverfahren
- Beratung bei Werkstoffauswahl
- Schadensanalyse
- Hochgeschwindigkeits-Prozessmesstechnik beim Kunden

Werkstoffdesign und Werkstoff-entwicklung

- Severe Plastic Deformation (SPD)
- ECAP von Metallen
- Optimierung von Materialeigen-schaften für Hochgeschwindigkeits-anwendungen

Impact- und Crash-Testing

- Hochgeschwindigkeits-Werkstoff- und Bauteilprüfung
- mehrachsiges Verhalten bei hohen Geschwindigkeiten
- Hochgeschwindigkeitsmesstechnik (Kraft, Verschiebung, Temperatur- und Verformungsfeldmessung)
- experimentelle Blast- und Penetrationssimulation

Modellierung

- Konstitutive Gleichungen für die numerische Simulation von Umform-, Zerspanungs-, Blast- oder Penetrationsprozessen
- Konstitutive Beschreibung des Werkstoffverhaltens und hoch dynamischer Impakt- und Crashprozesse
- Modellierung von Festigkeit und Versagen

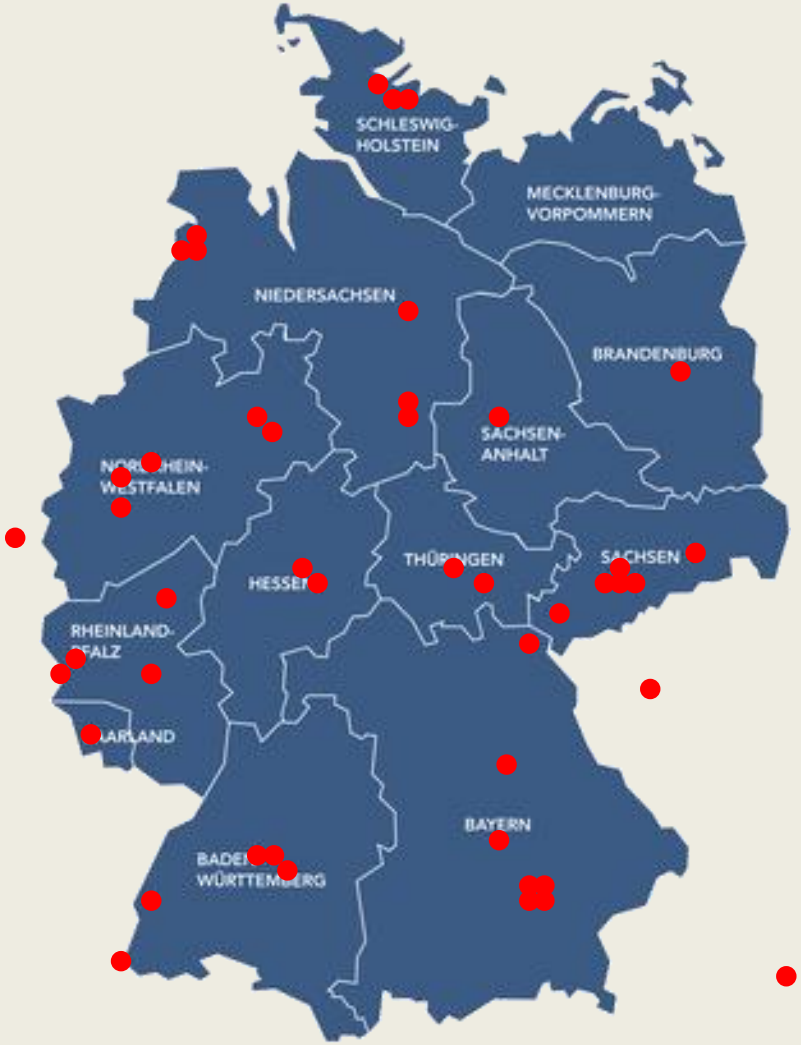
Portfolio der Nordmetall GmbH

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Belastungsart / Dehnrate [s^{-1}]		10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{0}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	Temperatur [°C]
einachsig Spannung / Dehnung	Zug	■	■	■	■	■	■	■	■		-190 … 1250
	Druck	■	■	■	■	■	■	■	■		-190 … 1250
	Torsion	■	■	■	■	■	■				-190 … 1100
	Biegung	■	■	■	■	■	■				-190 … RT
	Scherung	■	■	■	■	■	■	■			RT
zweiachsig Spannung / Dehnung	FLC-Bestimmung	■	■	■	■						-190 … 400
	Plain-Strain -Belastung	■	■	■							RT
	Druck-Scher-Belastung	■	■	■	■	■	■	■	■		-190 … 1200
	Gaskanone – Druck-Scherbelastung							■	■	■	RT
	Biaxialer Zug-Zug (exp. Blast-Simulation)				■	■	■				RT
	Zug-Torsions- u. Druck-Torsions-Hopkinson					■	■				RT
	Instrumentierte Kerbschlagbiegung						■	■			-190 … 600
	Biaxiale Zug-Biege-Belastung	■	■	■	■	■	■				RT
	Bruchzähigkeit K [$Nmm^{-2/3}\ s^{-1}$]			■	■	■	■	■	■	■	-190 … 400
dreiachsig	Gaskanone (exp. Penetrationssimulation)							■	■	■	RT
	Plattenimpakt (IPCP Moskau)									■	-190 … 600
	Dreiachsige Zug-Belastung	■	■	■	■	■	■	■	■		-190 … 600

Prüfmöglichkeiten bei Nordmetall GmbH (Auswahl)

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING



● *Partner der Nordmetall GmbH*

Unsere Partner in Deutschland

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Partner der Nordmetall GmbH

Unsere internationalen Partner

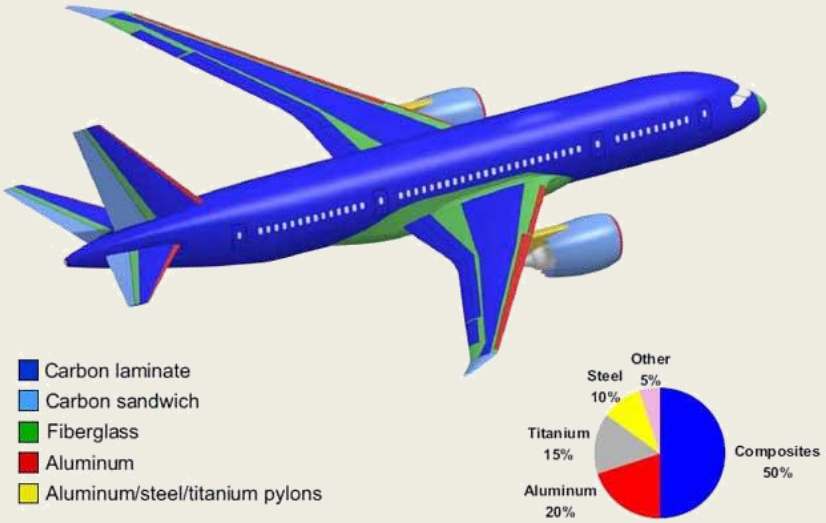
NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

Inhalt

Quelle: Chronik der ZfP

Dynamische Werkstoff- und Bauteilprüfung
– Motivation –



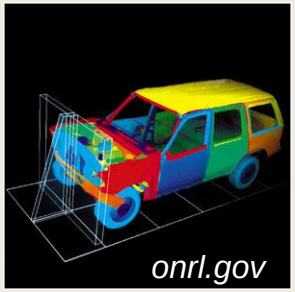
1001.crash.com

chemie-am-auto.de

- Erhöhte Anforderungen an Leichtbau erfordern ein Umdenken in Konstruktion und Design, v.a. in der Luftfahrt- und Automobilbranche.
- Daraus resultiert wachsende Bedeutung von Kunststoffen und Faserkunststoff-verbunden (FKV).
- Neue Materialien substituieren bisherige metallische Werkstoffe.

Kunststoffe und FKV in Automobiltechnik und Luftfahrt

- Erhöhter Kostendruck und kürzere Entwicklungszeiten haben das Werkzeug der numerischen Simulation fest im Entwicklungsprozess etabliert
- aber:
  - ⇨ Exakte Modellierung bedingt *Kenntnis des Werkstoffverhaltens*
  - ⇨ Materialverhalten als Funktion der Dehnrate, Temperatur, Belastungsart und –richtung kaum verfügbar
  - ⇨ Es fehlen größtenteils *validierte Werkstoffmodelle und Materialkarten*
- **Unsere Motivation**
  - ⇨ Vollständige Werkstoffcharakterisierung, von Experiment über FE-Kartenerstellung aus einer Hand


onrl.gov

passco.de

crash_welt.de

soldiersystems.net

i192.com

1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

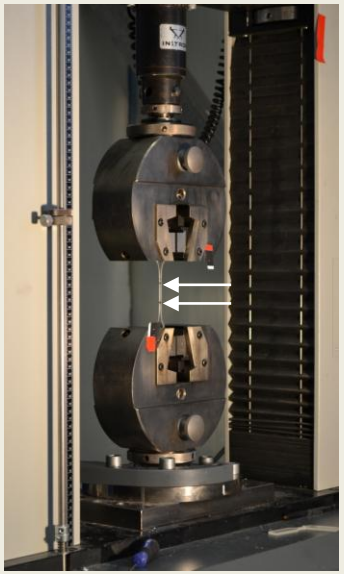
Inhalt

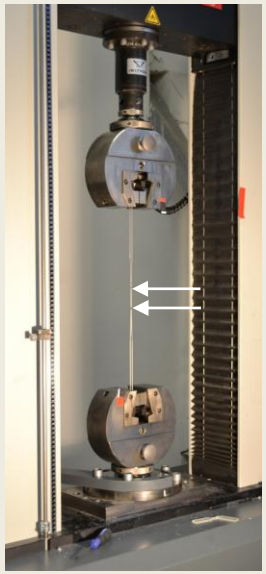
- mechanische oder servo-hydraulische Universalprüfmaschinen
- max. Kräfte bis 250 kN realisierbar
- Verformungsgeschwindigkeiten von 10^{-4} bis 10^{1} s^{-1} realisierbar
- Zug-, Druck-, Biegebelastung

mech. UPM 100 kN

hydr. UPM 250 kN

P R O B L E M





L Ö S U N G

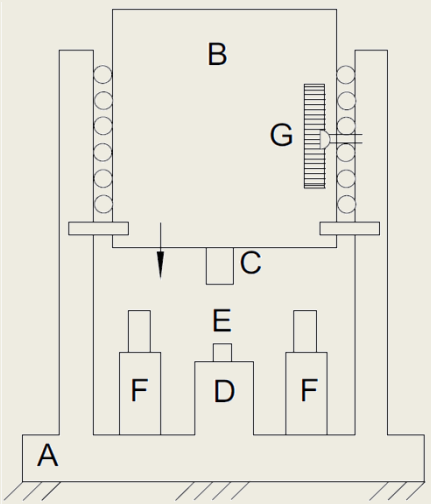
⇨ berührungslose elektro-optische Messverfahren

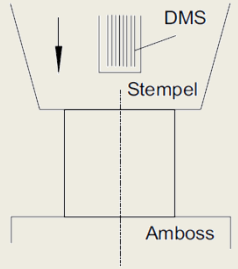
⇨ Kopplung mit HG-Aufnahmetechnik für qd-Versuche erforderlich

Quasistatische und quasidynamische Versuchstechnik

Fallwerksaufbauten

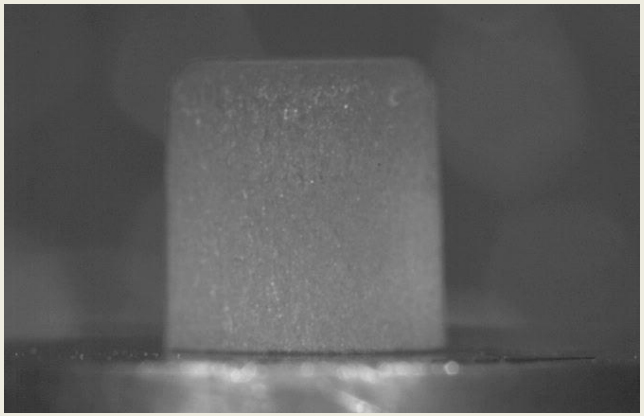
- angepasste Fallwerksaufbauten für spezielle Prüfaufgaben
- Fallgewichte zwischen 5 kg und 5000 kg
- Bereitgestellte Verformungsenergien von < 5 J bis 50.000 J
- Impact-Geschwindigkeiten 1-5 m/s
- Dehnraten 10^2 bis $>5 \cdot 10^2$ s^{-1}
- an Werkstoffverhalten angepasste Kraftmessglieder
- breites Temperaturspektrum prüfbar
  - Tieftemperatur bis -190°C
  - Hochtemperatur bis >250°C (für Kunststoffe und FVK)





Detail der Belastung einer Druckprobe

A = Rahmen
B = Fallgewicht
C = Stempel mit Kraftmessung
D = Amboss
E = Probe
F = Bremseinrichtung
G = inkrementales, opto-elektronisches Wegmesssystem



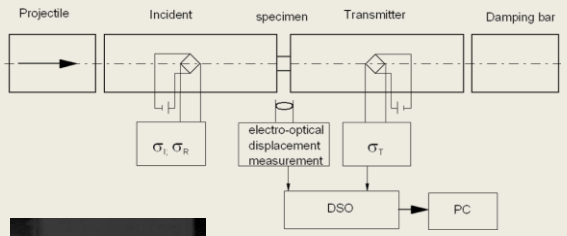
Dynamische Druck- und Biegebelastung - Fallwerk

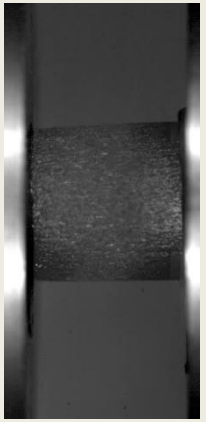
Split-Hopkinson-Pressure-Bar (SHPB)

- angepasste Hopkinsonaufbauten für spezielle Prüfaufgaben
- Dehnraten zwischen 10^3 und $>10^4$ s^{-1}
- Auswertung auf Basis der Theorie der Ausbreitung eindimensionaler elastischer Wellen
- breites Temperaturspektrum prüfbar
  - Tieftemperatur bis -190°C
  - Hochtemperatur bis >250°C (für Kunststoffe und FVK)

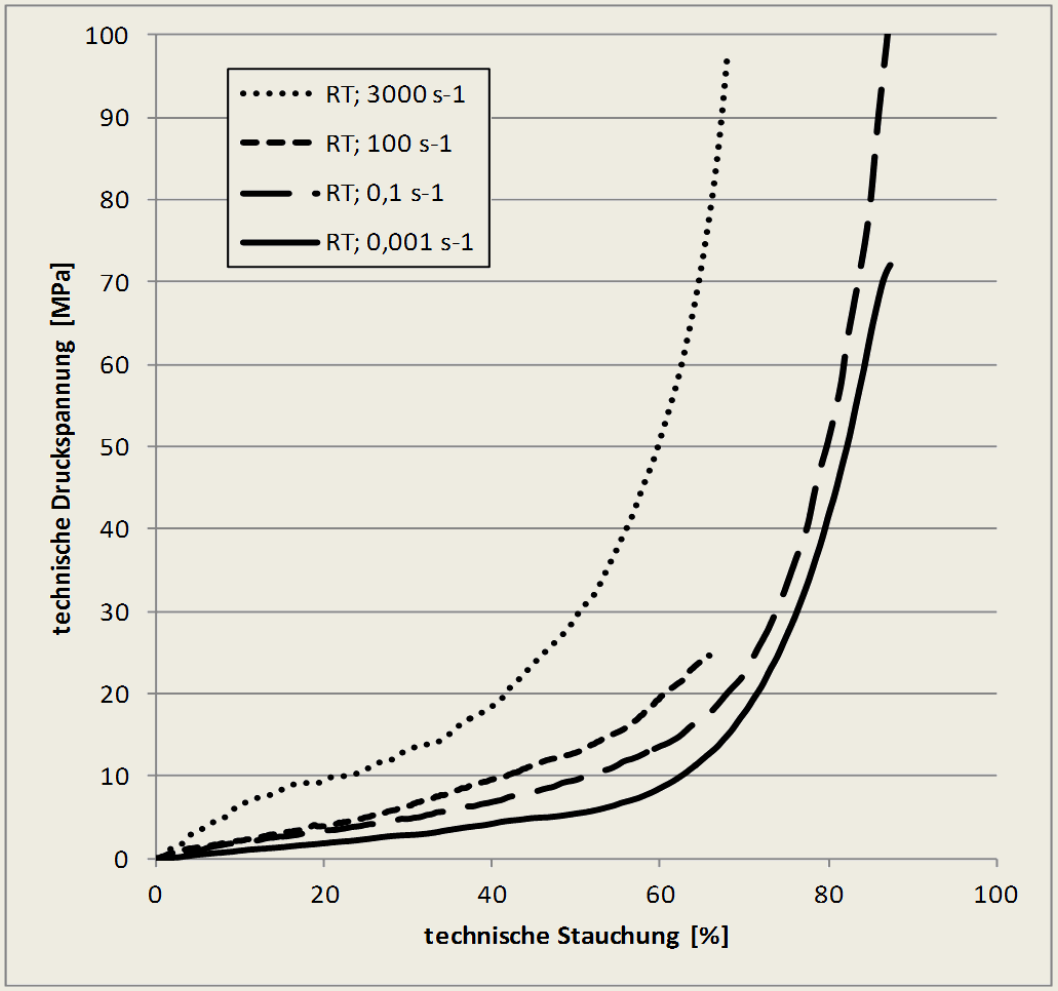
$$\sigma(t) = E_0 \cdot \frac{A_0}{A} \cdot \varepsilon_T(t)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t)\,dt$$





Vulkollan D15 bei verschiedenen Geschwindigkeiten

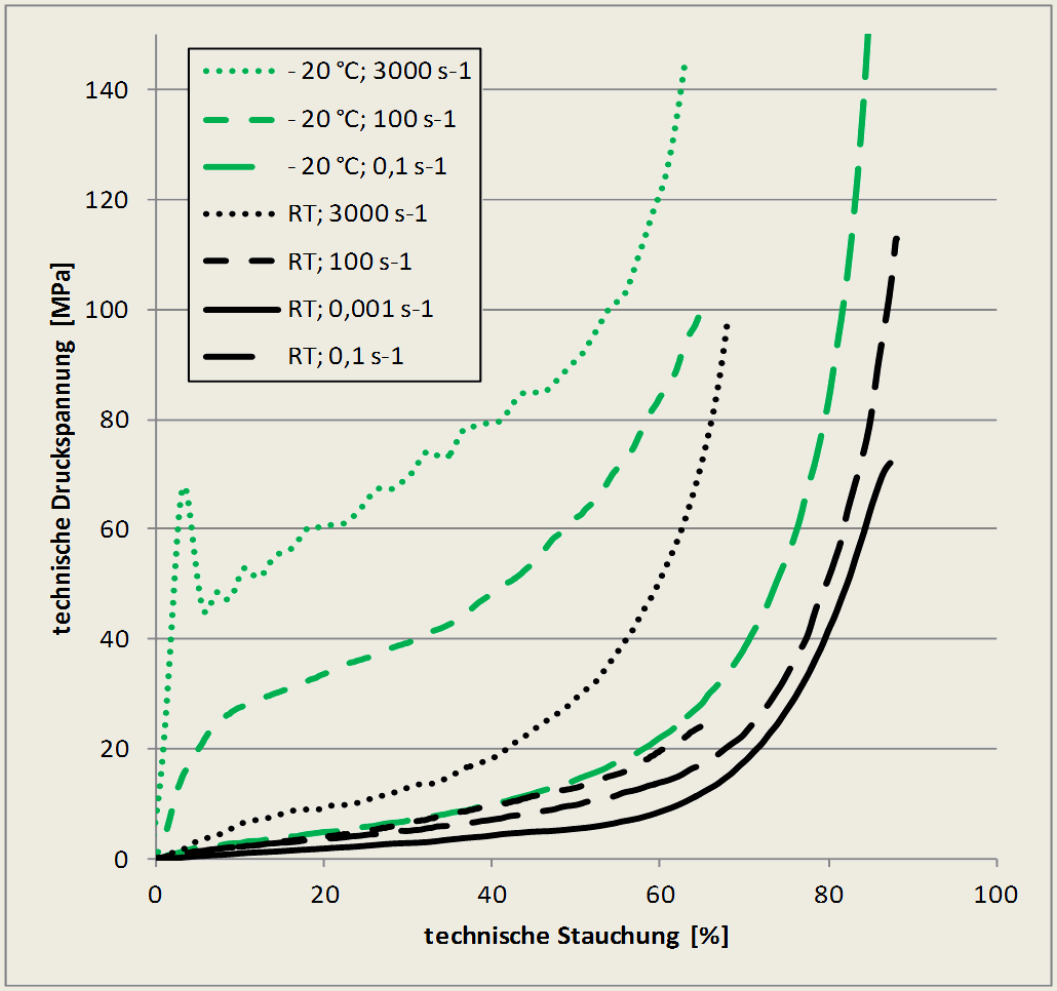


Vulkollan D15 (Fa. Quadriga)

- dynamisch hoch belastbar
- hohe Stoßelastizität
- hoher Verschleißwiderstand
- hervorragende Dämpfung
- Einsatzbereiche u.a.
  - massive schnelllaufende Räder und Rollen
  - Radbeläge auf Metall
  - Zahnräder
  - Zahnriemen

Mechanisches Verhalten eines Kunststoffes in Abhängigkeit der Dehnrate

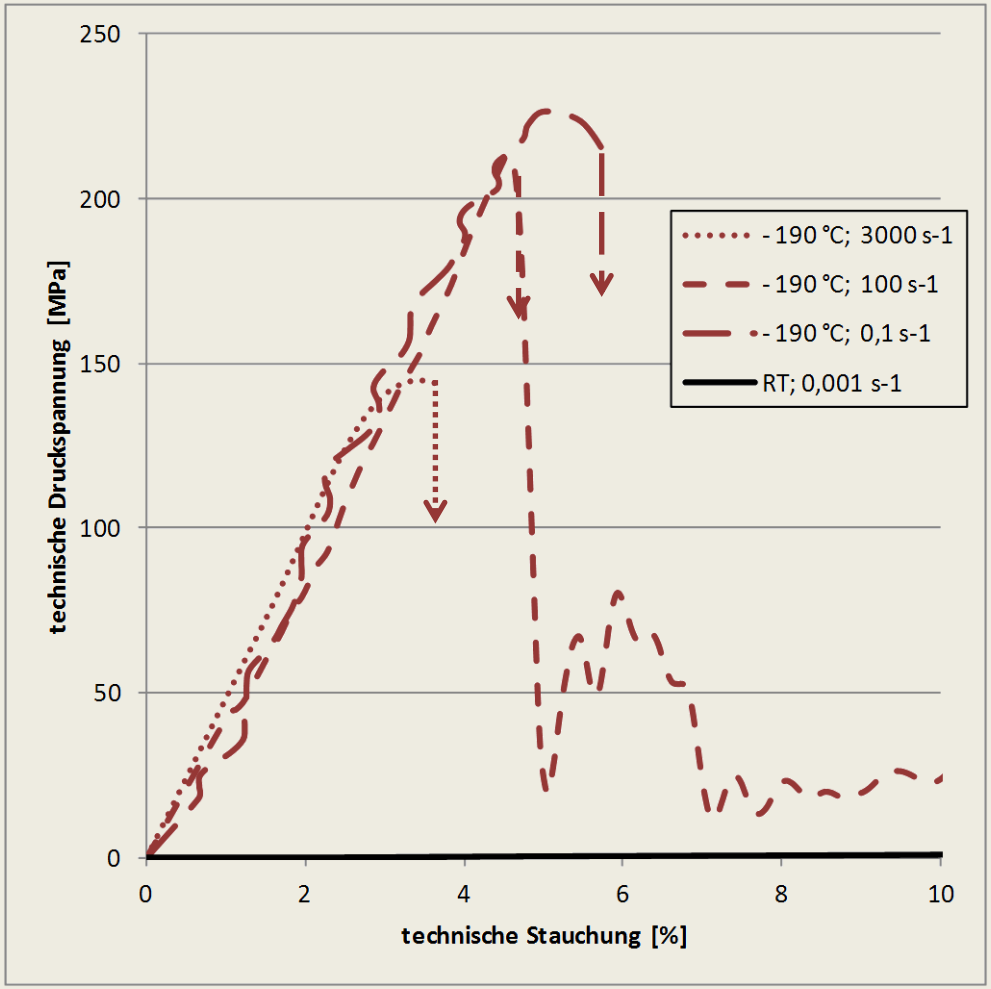
Vulkollan D15 bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Temperaturen



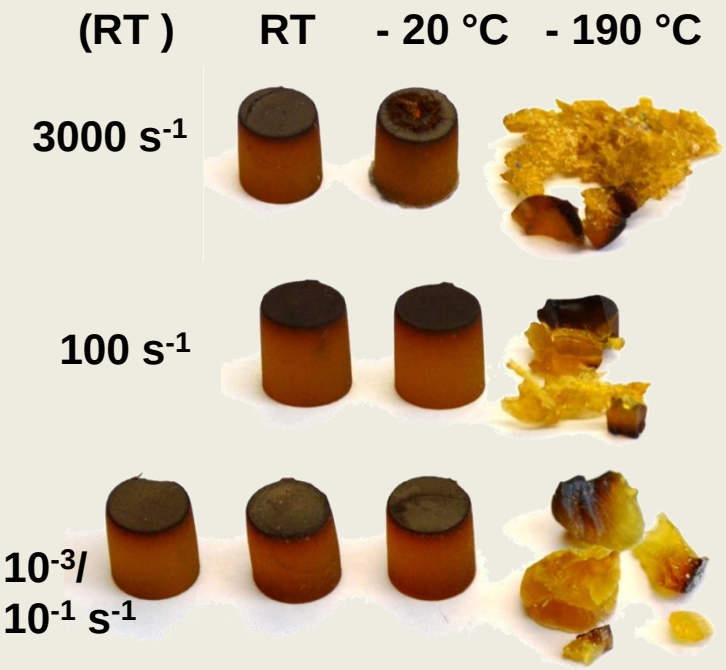
Dehnrate [s-1]	Temperatur [°C]	E-Modul [MPa]	Fließspannung [MPa]
0,001	+ 20 °C	10	n.a.
0,1	+ 20 °C	25	n.a.
0,1	- 20 °C	40	2
0,1	- 190 °C	4700	226
100	+ 20 °C	30	1
100	- 20 °C	440	17
100	- 190 °C	4900	214
3000	+ 20 °C	60	8
3000	- 20 °C	2400	67
3000	- 190 °C	5100	145

Mechanisches Verhalten eines Kunststoffes in Abhängigkeit der Dehnrate und Temperatur

Vulkollan D15 bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Temperaturen



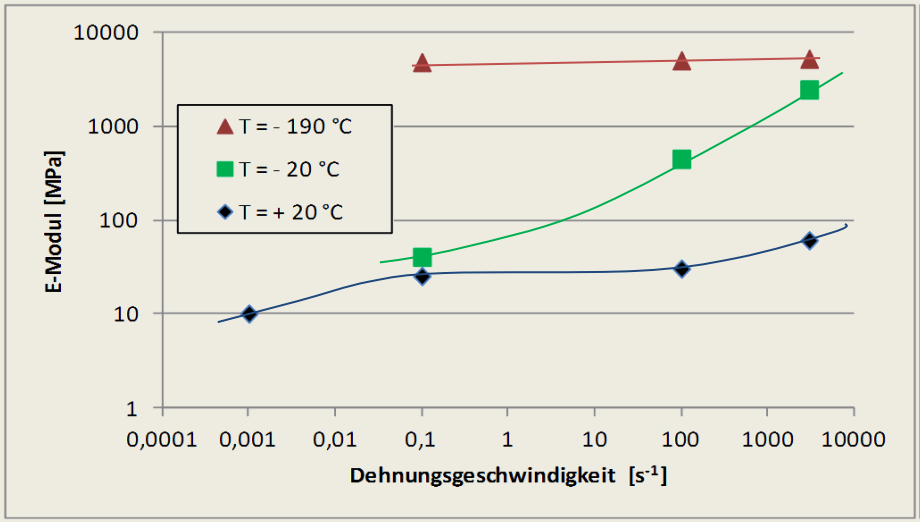
Proben nach der Versuchsdurchführung

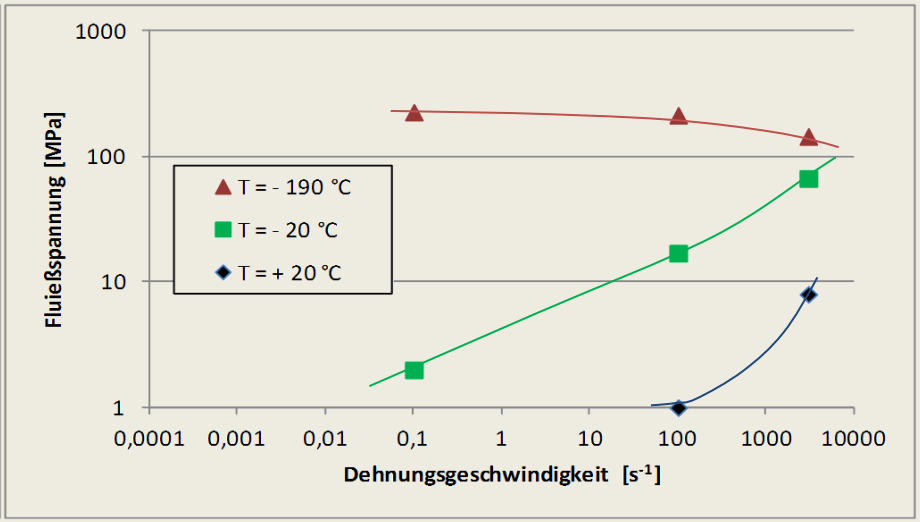


Mechanisches Verhalten eines Kunststoffes in bei tiefsten Temperaturen von -190°C

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

E-Modul und Fließspannung Vulkollan D15 in Abhängigkeit der Dehnrate

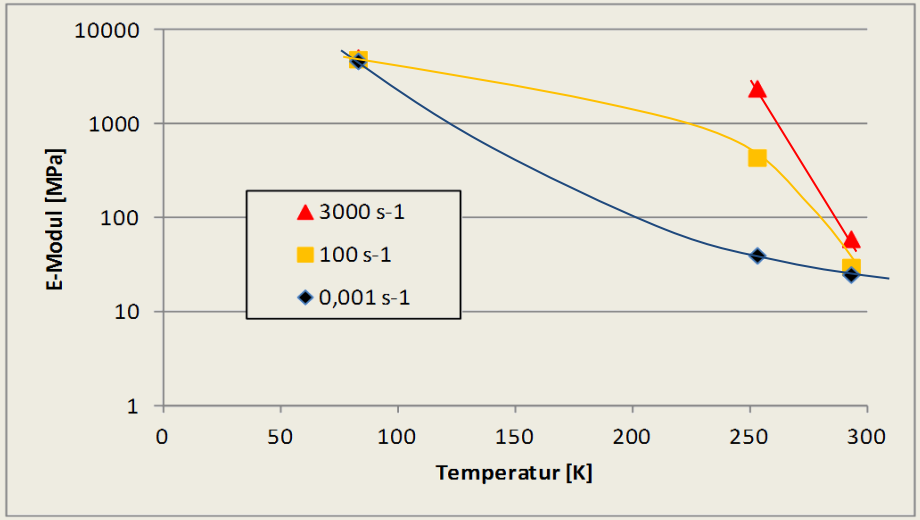


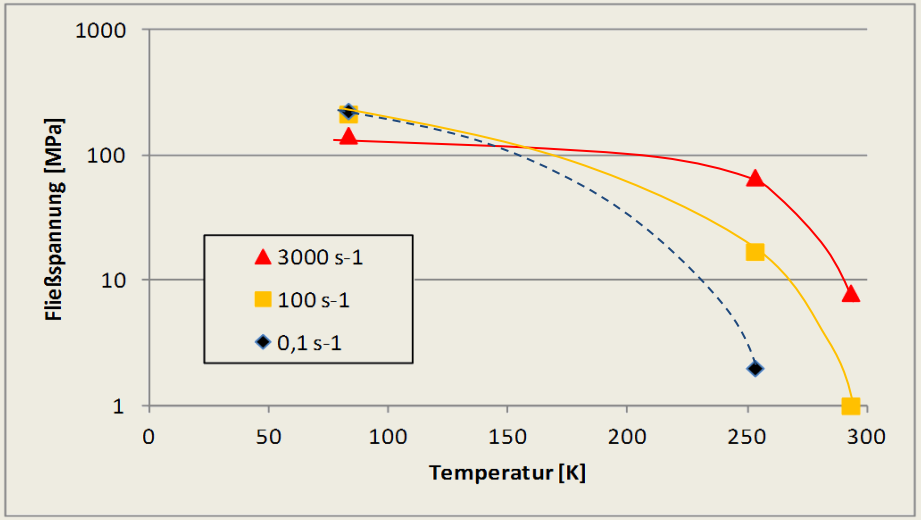


- In Abhängigkeit der Temperatur wird ein unterschiedliches Verhalten im E-Modul und der Fließspannung beobachtet
- großer Geschwindigkeitseinfluss bei RT und -20°C – logarithmische Abhängigkeit von E-Modul und Fließspannung von der Dehnrate
- Bei sehr tiefen Temperaturen bleiben E-Modul und Fließspannung (Bruchspannung) nahezu unbeeinflusst von der Dehnrate

Dehnrateneinfluss auf E-Modul und Fließspannung

E-Modul und Fließspannung Vulkollan D15 in Abhängigkeit der Temperatur



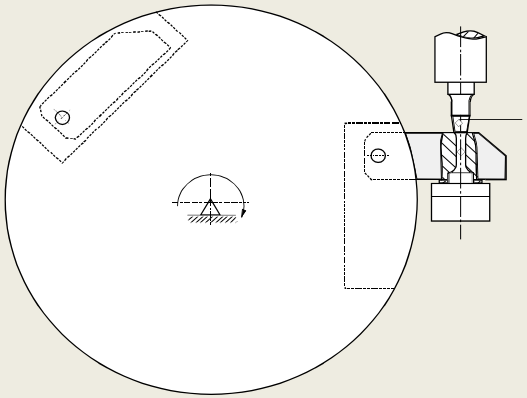


- Großer Einfluss der Temperatur auf E-Modul und Fließspannung bei Temperaturen bis -20°C
- Kaum Einfluss der Temperatur bei hochdynamischer Belastung des Kunststoff-materials $>10^3\ s^{-1}$
- Betrachtung der Änderungen der Werkstoffeigenschaften im logarithmischen Maßstab erforderlich

Temperatureinfluss auf E-Modul und Fließspannung

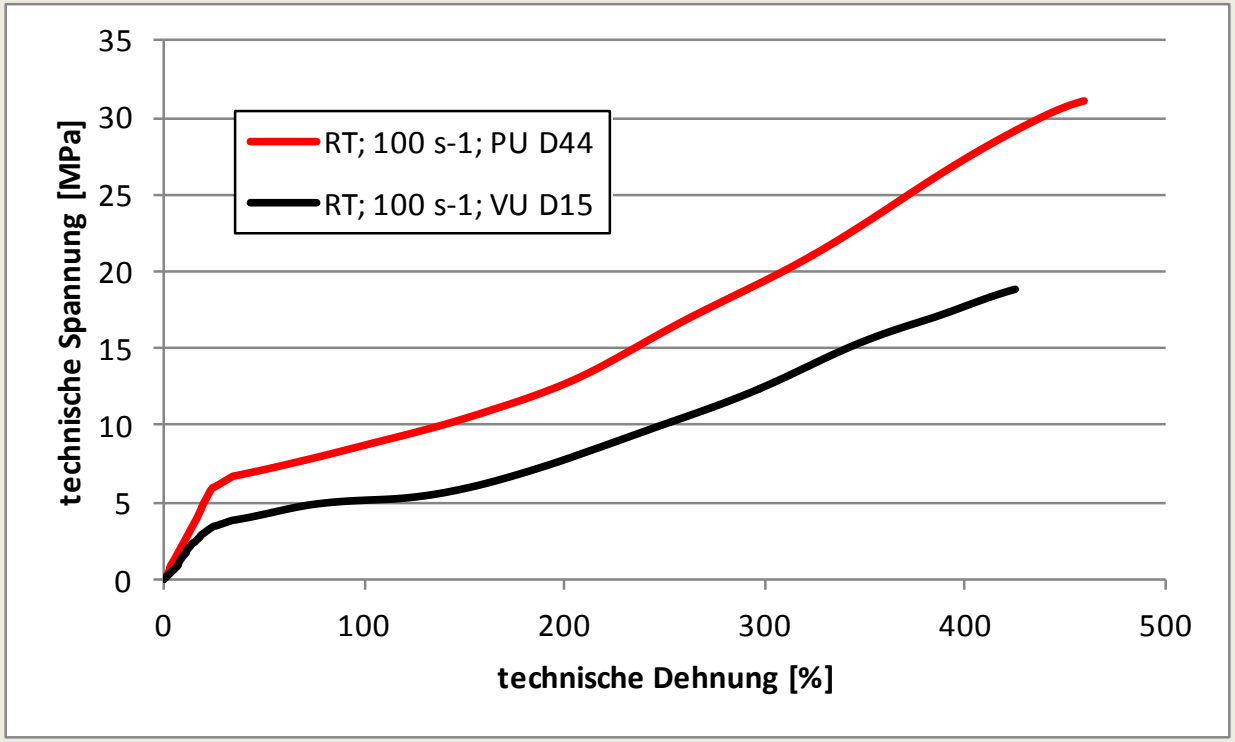
Rotationsschlagwerk

- Prüfgeschwindigkeiten 1 - ~40 m/s
- Dehnraten zwischen 10^2 und ~10^4 s^{-1}
- breites Temperaturspektrum prüfbar
- neue Einspannsysteme für höchst anisotrope Werkstoffe (z.B. unidirektionale FKV)
  - Bestimmung von Zugfestigkeiten von FKV **>2500 MPa** (z.B. CFK)
  - Messung von kleinsten Festigkeiten von Kunststoffen bei Hochtemperaturbelastung bis 10 m/s von **~1 MPa**

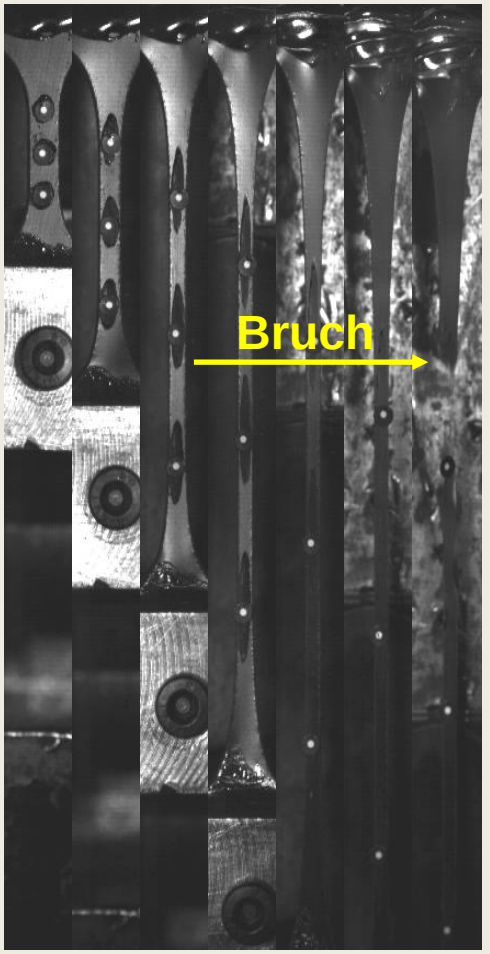


Hochdynamische Zugversuche - Rotationsschlagwerk

Werkstoffverhalten zweier Kunststoffe unter Zugbelastung bei Dehnungs-geschwindigkeiten von ~100 s^{-1}



dyn. ZV – VU D15



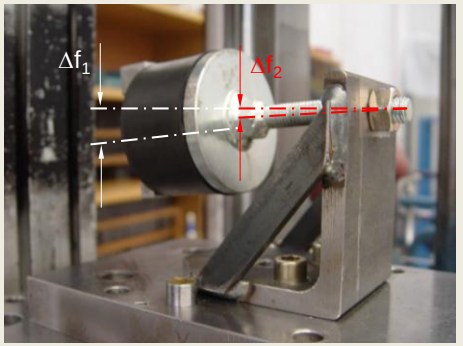
Hochdynamische Zugversuche - Rotationsschlagwerk

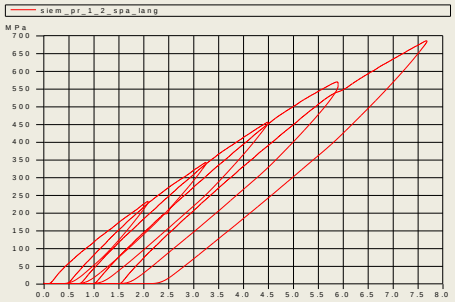
1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

Inhalt

Dämpfungselemente von Transportbändern

- Geschwindigkeit von Gepäcktransportbändern >1 m/s
- Abruptes Stoppen bei Störungen – Impactbelastung der Dämpfungselemente
  - ⇨ Dimensionierung ???
  - ⇨ Eigenschaften ???
- Lösungsansatz:
  - ⇨ Bauteiluntersuchungen unter statischer und dynamischer Belastung
  - ⇨ Last- und geschwindigkeitsabhängige Eigenschaftsbestimmung
- Umsetzung beim Kunden:
  - ⇨ Optimierung der Befestigung zur Minimierung plastischer Verformungen



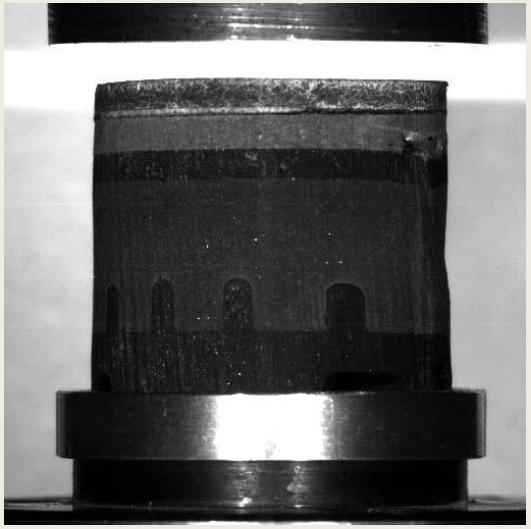


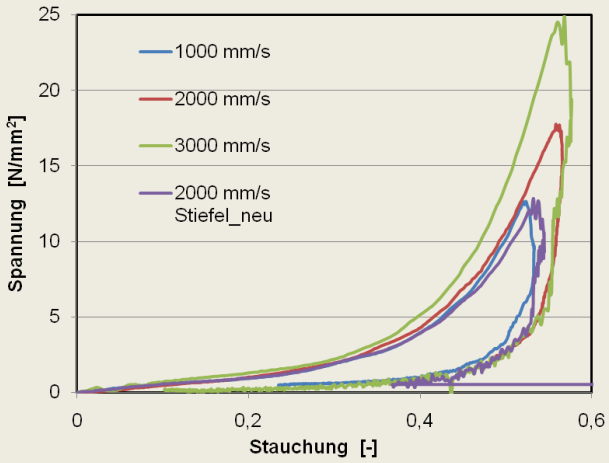
Dynamische Belastung von Dämpfungselementen

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Dynamische Materialkennwerte von Schuhen

- Schnittstelle zwischen Fahrzeugboden und Insasse bildet Schuh mit spezifischer Charakteristik
- Bisher unbekannte Eigenschaften und damit fehlender Input für numerische Simulationen
- Lösungsansatz:
  - ⇨ Untersuchung der Schuhcharakteristik unter vielfältigen Belastungsbedingungen
    - ⇨ last- und geschwindigkeitsabhängig
    - ⇨ Alterung und Ermüdung
    - ⇨ Temperatureinfluss
  - ⇨ Messung und Modellierung der Hysterese- und Steifigkeitsentwicklung





Schuhcharakteristik als Input für FE-Simulationen

Mehrachsige Belastung einer Verbundkonstruktion

- dynamische, biaxiale Zug-Zug-Belastung bei 3 m/s
- Messung von Kraft, Beulung und lokale Verformung bis zum Versagen
- Einsatz von zwei Hochgeschwindig-keitskameras in Verbindung mit ARAMIS-System
  - ⇨ Auswertung und Visualisierung der **3D**
    - ⇨ **Verschiebungen**
    - ⇨ **Verformungen**

5 t – Fallwerkaufbau
– biaxiale Zug-Zug-Belastung –

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

1. Kurzporträt der Fa. Nordmetall GmbH
2. Einleitung und Motivation
3. Dynamische Werkstoffprüfung von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen
4. Bauteilprüfung (Praxisbeispiele)
5. Zusammenfassung

Inhalt

Charakterisierungsmöglichkeiten

- dynamische *Werkstoffcharakterisierung* in einem weiten Bereich von
  - *Belastungsarten* (Zug, Druck, Biegung, mehrachsig etc.)
  - *Belastungsrichtungen* (0°|45°|90°)
  - *Geschwindigkeiten* (>10^3 s^{-1})
  - *Temperaturen* (-190°C – >100°C für Kunststoffe und FKV)
- dynamische *Bauteilprüfung* u.a. zur Verifizierung numerischer Simulationen

Experimentelle Voraussetzungen

- angepasste Einspannsystem
- dynamische Kraftmesstechnik für geringste bis große Kräfte
- hochauflösende, dynamisch messende elektro-optische Messtechnik zur lokalen Verformungsmessung

Zusammenfassung

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING

Dr.-Ing. Norman Herzig
Geschäftsführer

Tel: +49 371 503490 22
@: norman.herzig@nordmetall.net

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Lothar W. Meyer
Geschäftsführer

Tel.: +49 371 503490 21
@: lothar.meyer@nordmetall.net

Dr.-Ing. Michael Mayer
Projektleiter

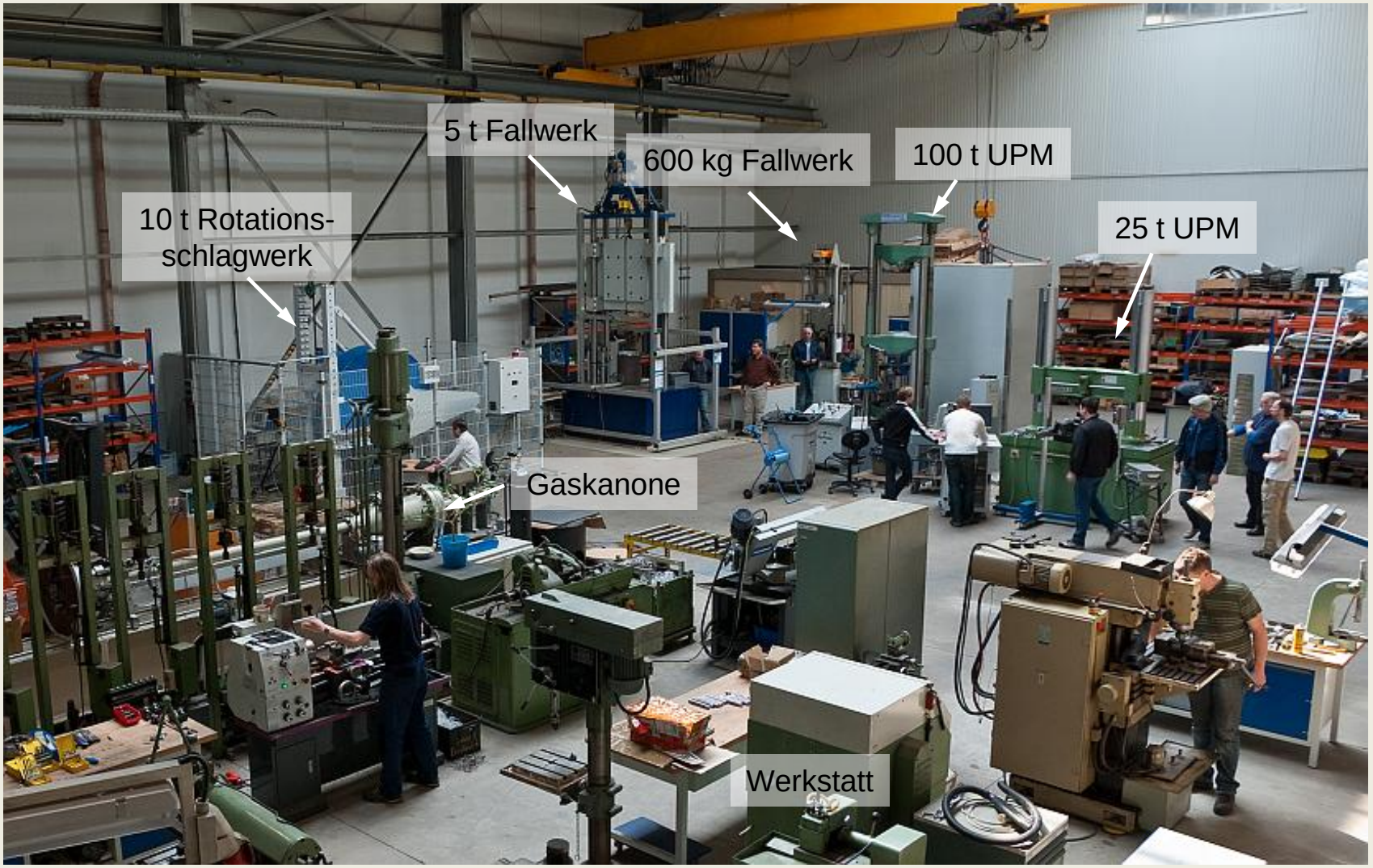
Tel.: +49 371 503490 26
@: michael.mayer@nordmetall.net

Nordmetall GmbH
Hauptstraße 16
D-09221 Adorf / Erzgebirge
Germany

Tel.: +49 371 503490 0
Fax: +49 371 503490 11
www: http://www.nordmetall.net
@: info@nordmetall.net

Kontakt

NORDMETALL
RESEARCH AND CONSULTING



Labor für Werkstoff- und Bauteilprüfung