Einführung in die mechanische Prüfung von Faserverbund-werkstoffen

Dr. Hannes Körber
Branchenmanager Composites

Zwick Roell

Agenda

1. Einführung und Motivation
2. Zug-, Druck-, Schub-, Biege- und ILSS Versuch
3. Statische Prüfmaschinen
4. Dehnungs- und Wegmesssysteme

Zwick Roell

Durch ausgezeichnete gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften, sehr gutes Ermüdungsverhalten und Designflexibilität werden Verbundwerkstoffe in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt.

Aerospace

Windenergie

Automotive

Weitere Anwendungsgebiete:

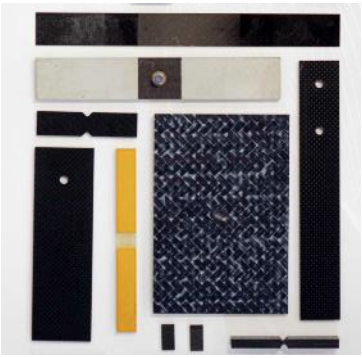
- Bauwesen
- Medizintechnik und Orthopädie
- Elektronik
- Öl und Gas

Sport und Freizeit

Yacht und Schiffsbau

Prüfbedarf und flankierende Entwicklung:

Materialhersteller



Prüfdienstleister

Forschung

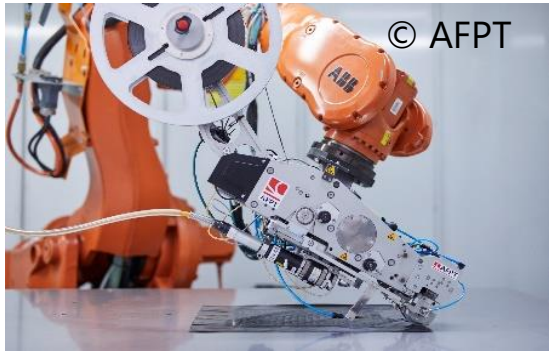
Zwick Roell

Neben Faser- und Matrixtyp sowie Faserarchitektur wird das Materialverhalten von Verbundwerkstoffen maßgeblich vom Herstellungsverfahren beeinflusst.

Materialien

- Verschiedene Fasertypen
- Verschiedene Harzsysteme
- Verschiedene Faserarchitekturen

Herstellungsverfahren



- Konsolidierung und Aushärtung duroplastischer Prepreg-Composites im Autoclave
- Resin Transfer Molding (RTM) bei niedrigem oder hohem Druck
- Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)
- Automated Fiber Placement (AFP)
- Automated Tape Laying (ATL)
- Wickeln
- Pultrusion
- Nasspressen
- Pressformen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen
- …

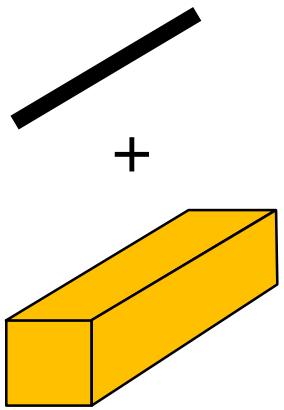
Zwick Roell

Testpyramide oder Building Block Approach

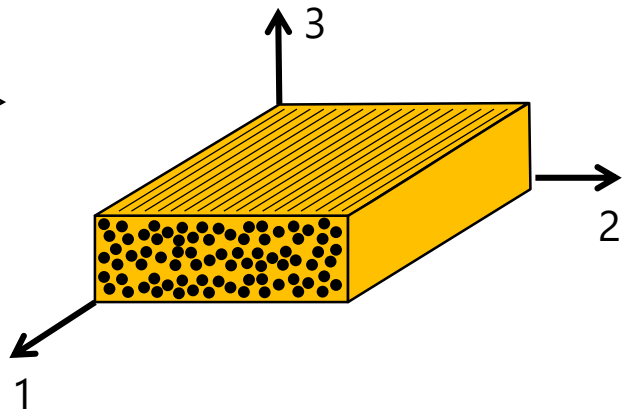
Zwick Roell

Verbundwerkstoffe sind orthotrope Materialien, bei denen Normal- und Schubeigenschaften entkoppelt sind.

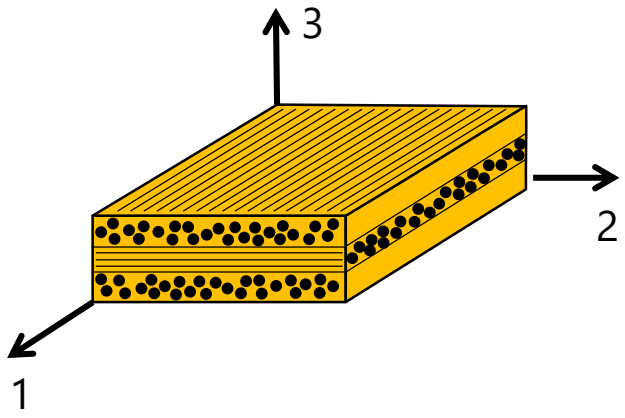
Faser + Matrix



Unidirektionale Einzelschicht



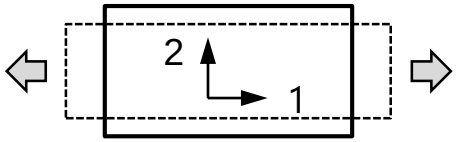
Multidirektionaler Mehrschichtverbund (Laminat)



Statische Grundkennwerte in der Lagenebene

Elastisch	E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}
Festigkeit	F_1^{tu} , F_2^{tu} , F_1^{cu} , F_2^{cu} , F_{12}

Querkontraktionszahl



$$\nu_{12} = -\frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1}$$

Zwick Roell

Die mechanischen Kennwerte von UD-Verbundwerkstoffen in Faser- und Matrixrichtung sind sehr unterschiedlich.

Ein UD Carbon-Epoxy Prepreg Materialsystem für Luft- und Raumfahrt-Anwendungen

Elastische Kennwerte (in der Lagenebene)						Festigkeiten (in der Lagenebene)					
		SI		Imperial				SI		Imperial	
Zug-Modul in Faser-Richtung	E_1^t	165	GPa	23.9	msi	Zugfestigkeit Faserrichtung	F_1^{tu}	2700	MPa	391.6	ksi
Zug-Modul in Matrix-Richtung	E_2^t	12	GPa	1.7	msi	Zugfestigkeit Matrixrichtung	F_2^{tu}	60	MPa	8.7	ksi
Druck-Modul in Faser-Richtung	E_1^c	165	GPa	23.9	msi	Druckfestigkeit Faserrichtung	F_1^{cu}	1500	MPa	217.6	ksi
Druck-Modul in Matrix-Richtung	E_2^c	12	GPa	1.7	msi	Druckfestigkeit Matrixrichtung	F_2^{cu}	250	MPa	36.3	ksi
Schub-Modul in der Lagenebene	G_{12}	5.5	GPa	0.8	msi	Schubfestigkeit in Lagenebene	F_{12}	100	MPa	14.5	ksi
Querkontraktionszahl	ν_{12}	0.3	-	0.3	-						

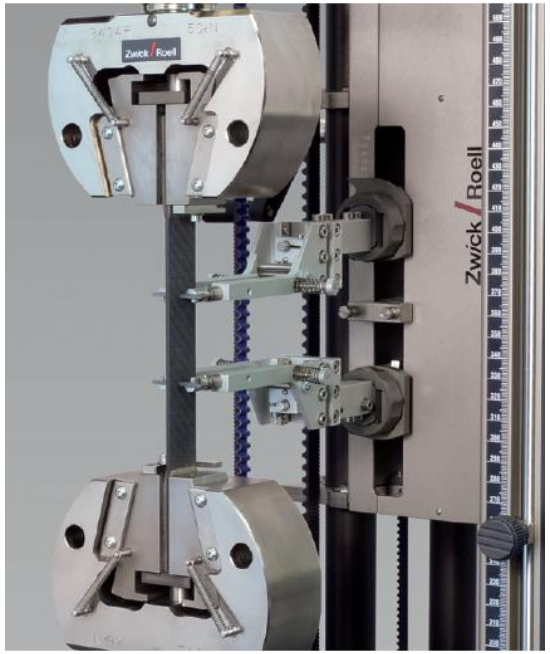
Zug

Druck

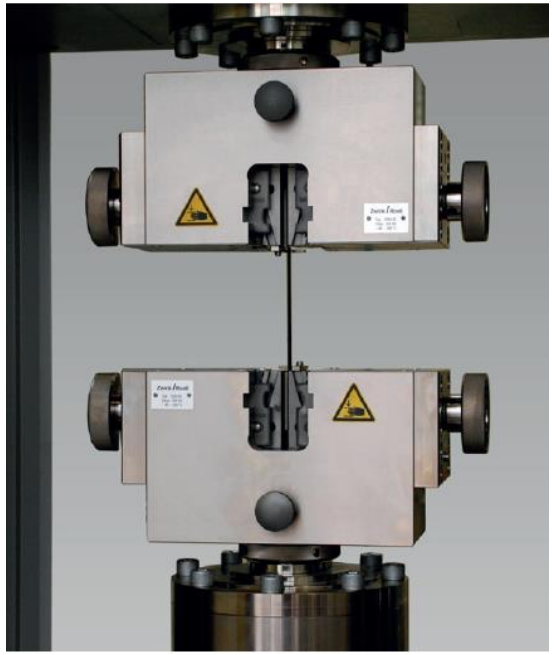
Schub

Zwick Roell

ZwickRoell bietet unterschiedliche Zug-Probenhalter für unterschiedliche Kundenbedürfnisse.

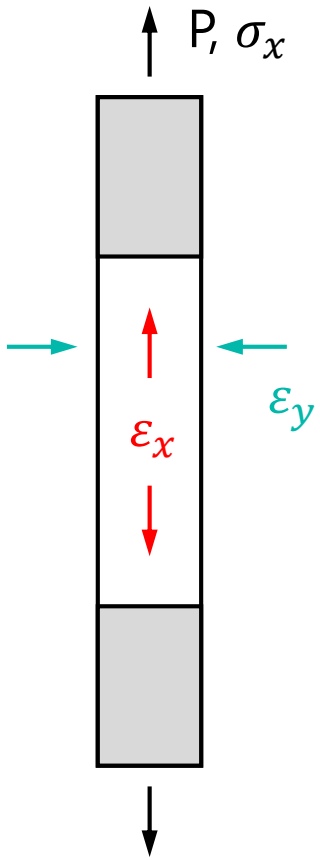


Mechanischer Körper-über-Keil Probenhalter



Keilschraub-Probenhalter

Hydraulischer Körper-über-Keil Probenhalter

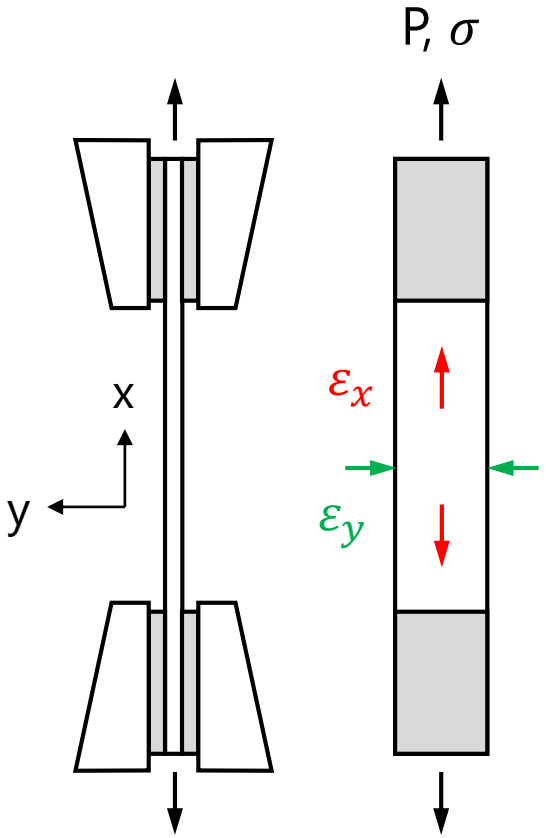


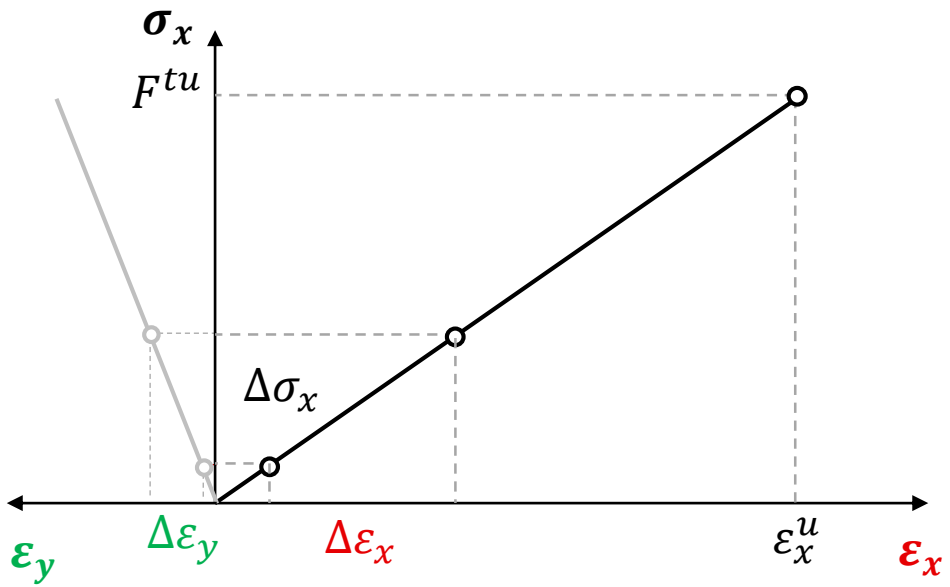
Hauptsächlich verwendete Prüfnormen zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

ISO 527-4	***EN 2561***	***DIN 65378***	***ASTM D 3039***	***Airbus AITM 1.0007***
ISO 527-5	***EN 2597***	***DIN 65469***	***prEN 6035***	***Boeing BSS 7320***

Zwick / Roell

Genaue Längs- und Querdehnungsmessung an der Probe ist die Voraussetzung zur Bestimmung von verlässlichen Kennwerten.





$$E_t^{chord} = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\varepsilon_x}$$

$$F^{tu} = \frac{P^{max}}{A}$$

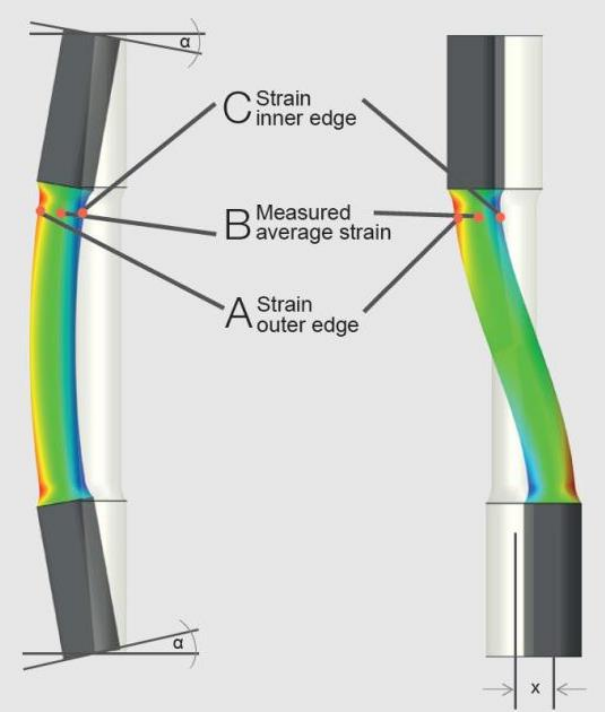
$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_y}{\Delta\varepsilon_x}$$

where:

E_t^{chord}	tensile chord modulus of elasticity
F^{tu}	ultimate tensile strength
P^{max}	maximum measured force
A	cross-sectional area of specimen
$\Delta\varepsilon_x$	difference between axial strain points (1000 to 3000 $\mu\varepsilon$)
$\Delta\sigma_x$	difference between applied stress between defined strain points
ε_x^u	strain at failure
$\Delta\varepsilon_y$	difference between transverse strain points (at 1000 to 3000 $\mu\varepsilon$ axial strain)

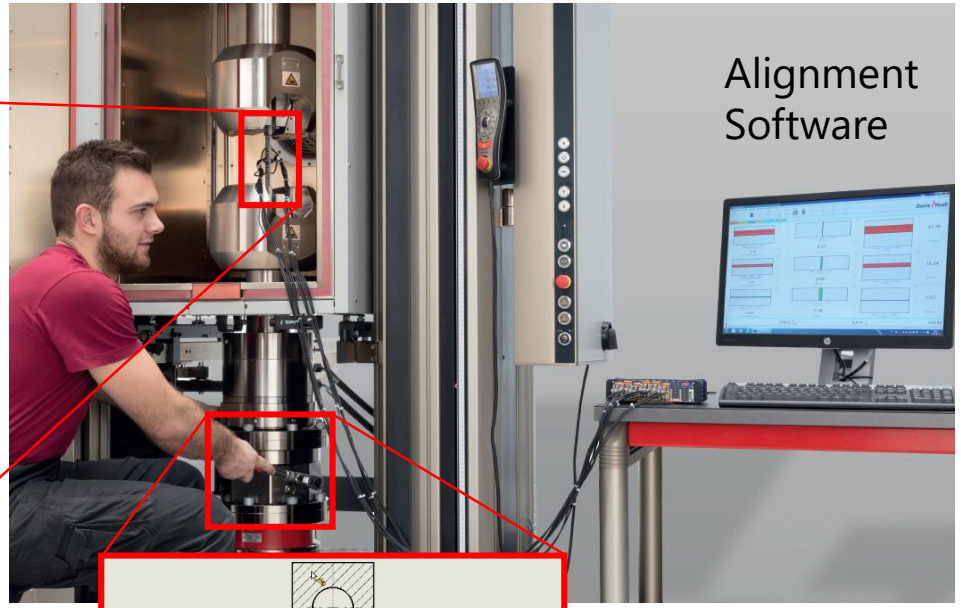
Zwick Roell

Ausrichtungsfehler haben einen starken Einfluss auf Versuche mit spröden Materialien. Wir bieten ein komplettes Portfolio für die Ausrichtung der Probenhalter.

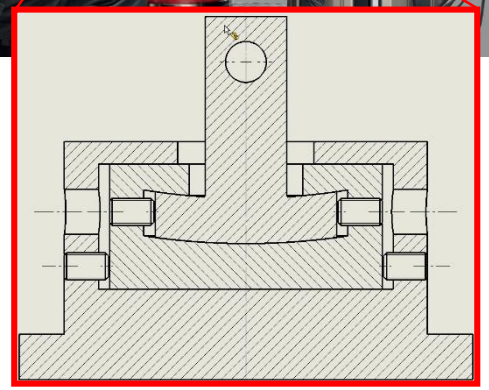


ISO 23788	***ASTM E 1012***	***Nadcap Audit criteria 7122***

Messnormal



Alignment Software

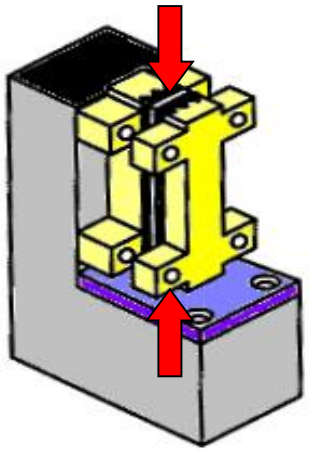


Mechanische Ausricht-Einheit

Zwick Roell

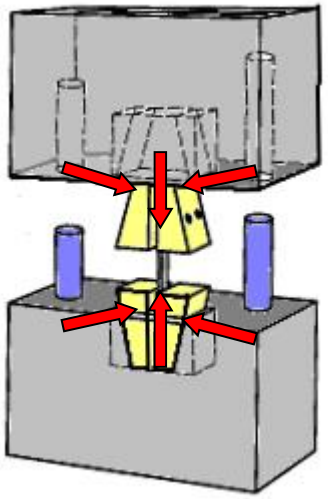
Es gibt verschiedene Druckversuchsmethoden, die sich durch die Art der Krafteinleitung unterscheiden.

End Loading



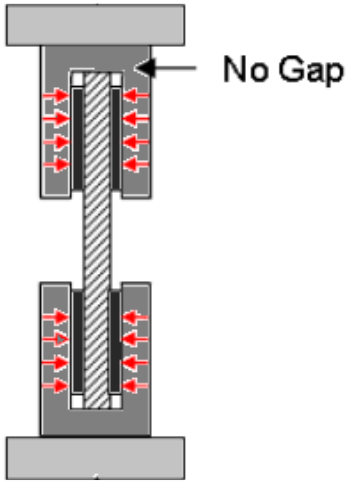
ASTM D 695
Boeing BSS 7260 type III & IV
DIN EN 2850 type B

Shear Loading



ISO 14126 Methode 1
ASTM D 3410
Airbus AITM 1.0008
DIN EN 2850 type A

Combined Loading

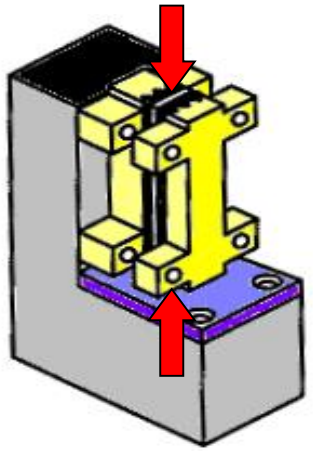


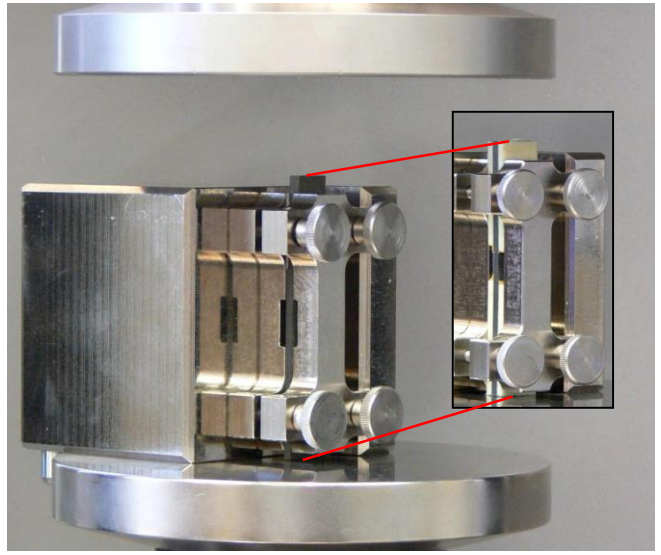
ISO 14126 Methode 2
ASTM D 6641
Airbus AITM 1.0008

Zwick Roell

End Loading Druckversuchsvorrichtungen sind Varianten der ASTM D 695 Vorrichtung, welche ursprünglich für Druckversuche an Kunstoffen entwickelt wurde.

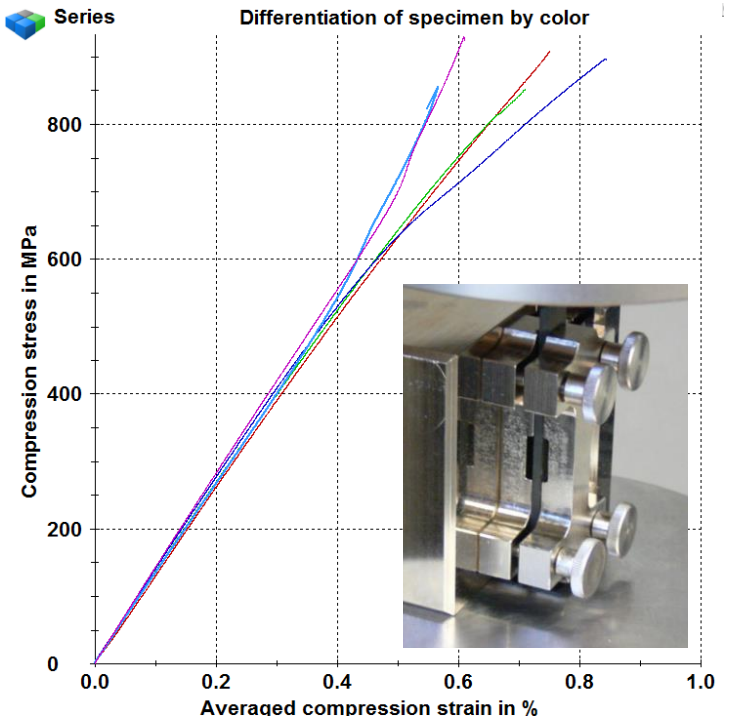
End Loading





- ZwickRoell's End Loading Prüfvorrichtung enthält Stütz-Elemente für Modul-Bestimmung (Mitte) und für Festigkeitsversuche (rechts).
- Es ist stets auf die Lastachse der Prüfmaschine zentriert.

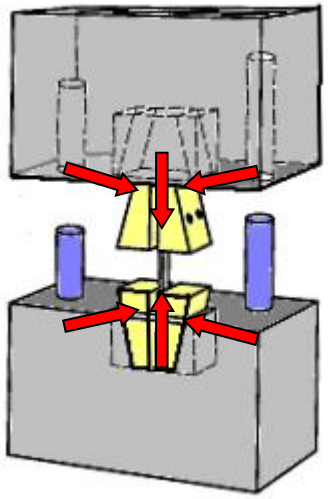
Proben ohne Aufleimer, verwendet zur Modulbestimmung, führen stets zu vorzeitigem Versagen an den Endflächen.



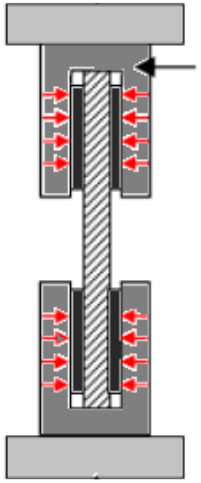
Zwick Roell

Die HCCF deckt die Normen für Shear Loading und Combined Loading ab, ist einfach zu bedienen und liefert zuverlässige Prüfergebnisse.

Shear Loading

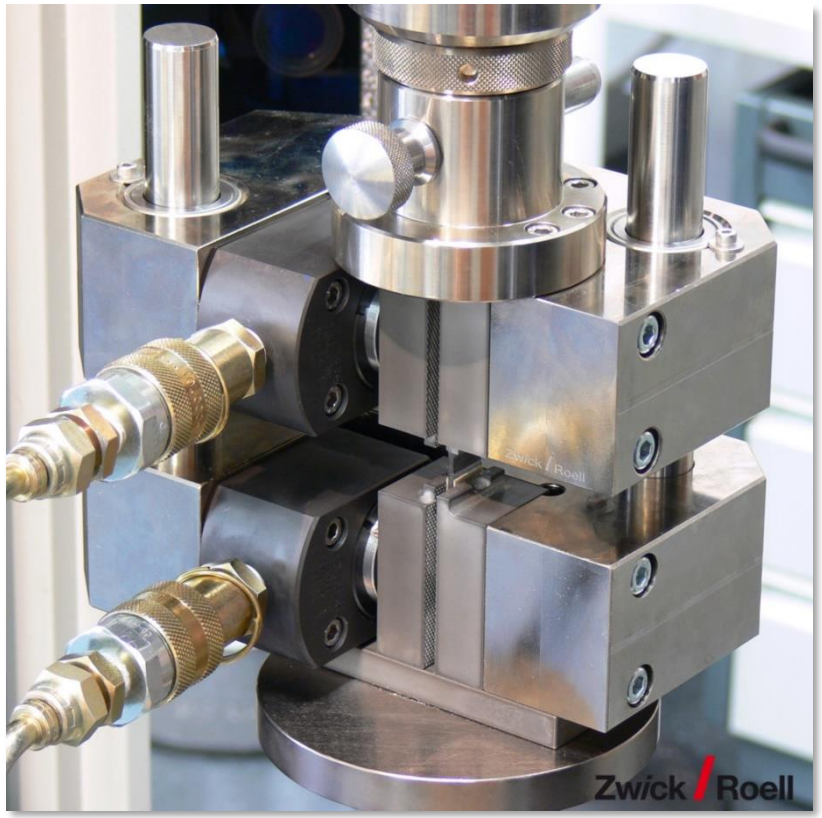


Combined Loading



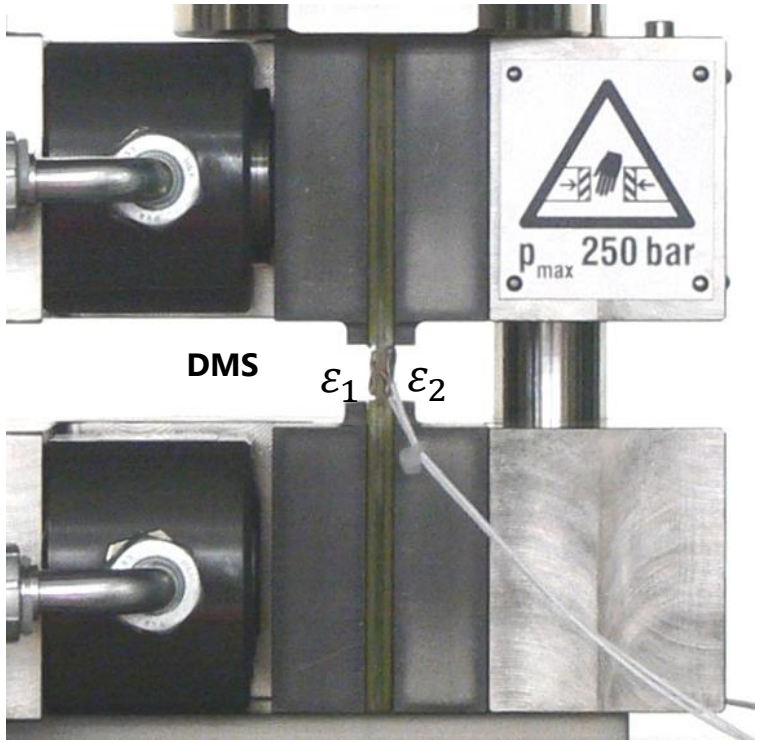
Merkmale der HCCF

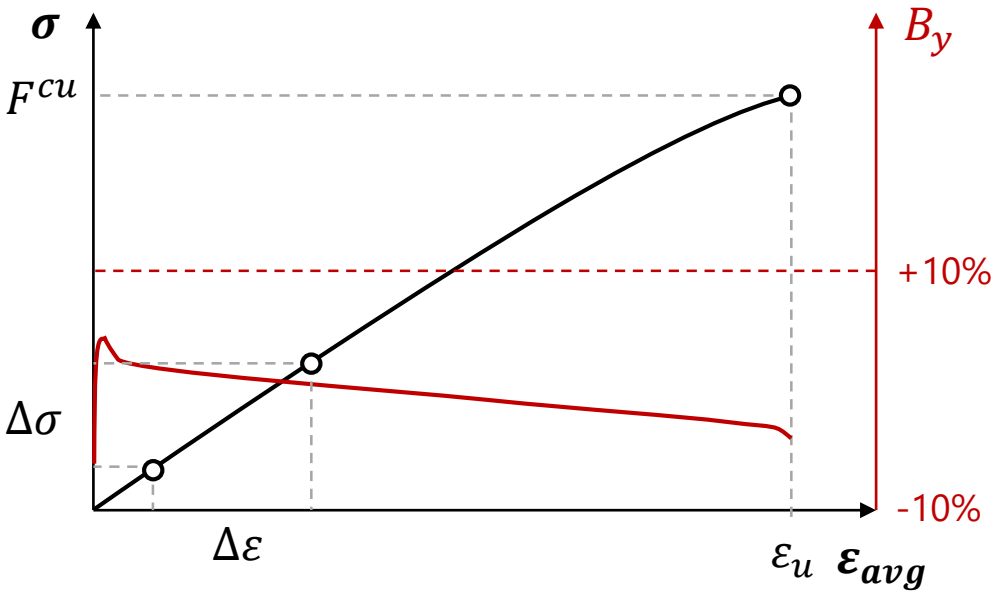
- Hydraulisches Parallelspannprinzip
- Shear Loading bis 40 kN
- Combined Loading bis 200 kN
- Probenbreite bis 35 mm
- Spannbacken können sich nicht zueinander verschieben
- Exakte Ausrichtung der Spannbacken
- Dickenunterschiede in den Aufleimern können bei der Einspannung erkannt und korrigiert werden
- Die HCCF verbleibt in der Prüfmaschine und erhöht somit den Probendurchsatz
- Einstellbare Probenanschläge
- Freier Zugang und einfache Reinigung



HCCF – Hydraulic Composites Compression Fixture

Beidseitig applizierte DMS werden benötigt, um die Gültigkeit der Prüfung zu verifizieren.





$$E_c^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

$$F^{cu} = \frac{P^{max}}{A}$$

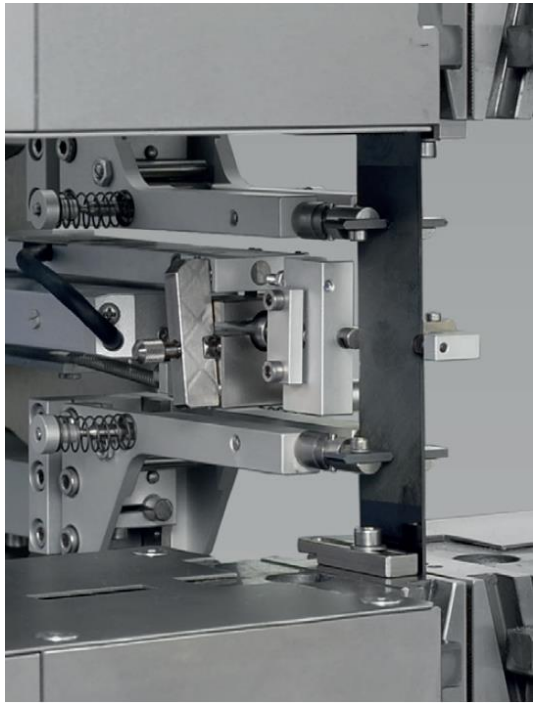
$$B_y = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100$$

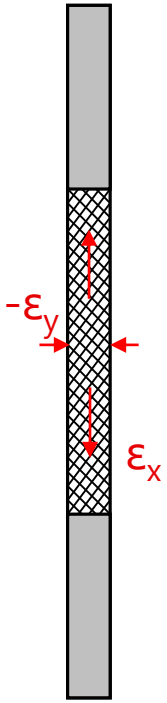
E_c^{chord}	Druckmodul
F^{cu}	Druckfestigkeit
P^{max}	Maximalkraft
A	Probenquerschnitt
$\Delta\varepsilon$	Differenz zwischen den Dehnungspunkten der gemittelten axialen Druckdehnung
$\Delta\sigma$	Spannungsdifferenz bei den definierten Dehnungspunkten zur Modul-Bestimmung
ε_u	Versagensdehnung
ε_1	Axiale Druckdehnung von DMS 1
ε_2	Axiale Druckdehnung von DMS 2
B_y	Percent Bending Criteria

Zwick Roell

Der Zugversuch mit ±45° Laminat ist ein einfacher In-Plane Schubversuch. Mit V-gekerbten Proben können sowohl In-Plane als auch Out-of-Plane Schubkennwerte bestimmt werden.

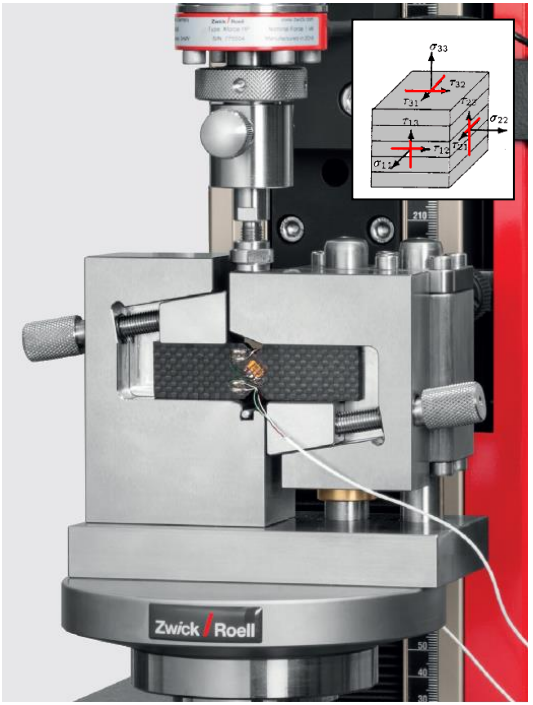
Zugversuch mit ±45° Laminat





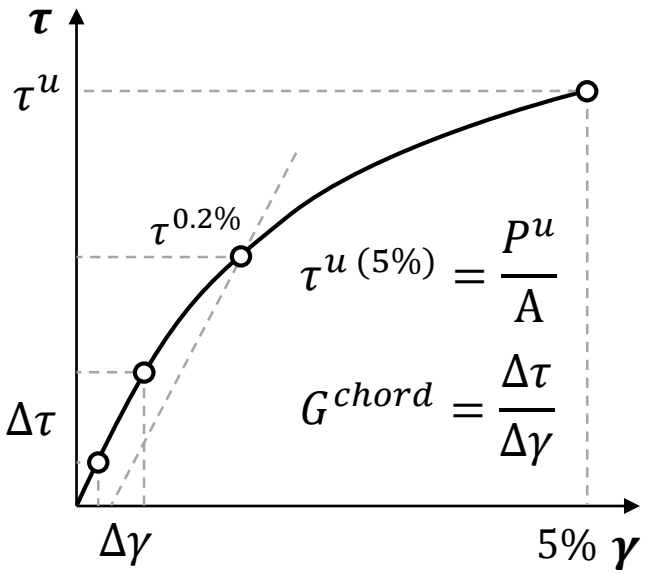
ASTM D 3518	ISO 14129

Schubversuch mit V-gekerbten Proben



V-notched Beam (Iosipescu) | ASTM D 5379

V-notched Rail Shear | ASTM D 7078



$$\tau^{u\,(5\%)} = \frac{P^u}{A}$$

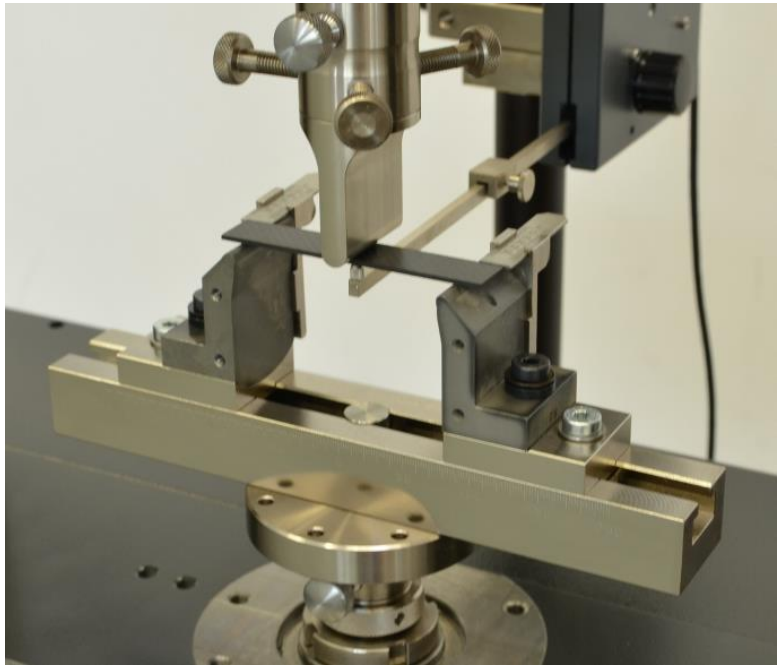
$$G^{chord} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

$$\tau = \frac{P}{A}$$

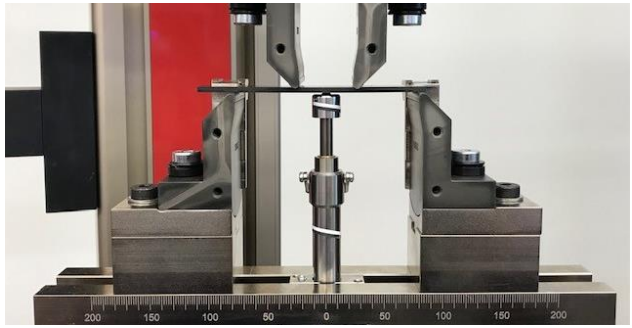
$$\gamma = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|$$

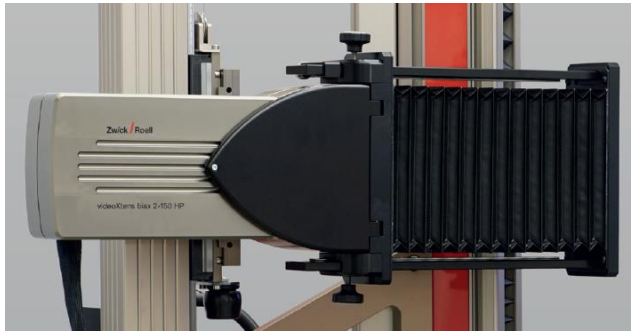
Zwick Roell

Für 3- und 4-Punkt-Biegeversuche bei Raumtemperatur sowie für Prüfungen in der Temperierkammer stehen hochwertige Prüfvorrichtungen und Wegaufnehmer zur Verfügung.



3-Punkt-Biegung





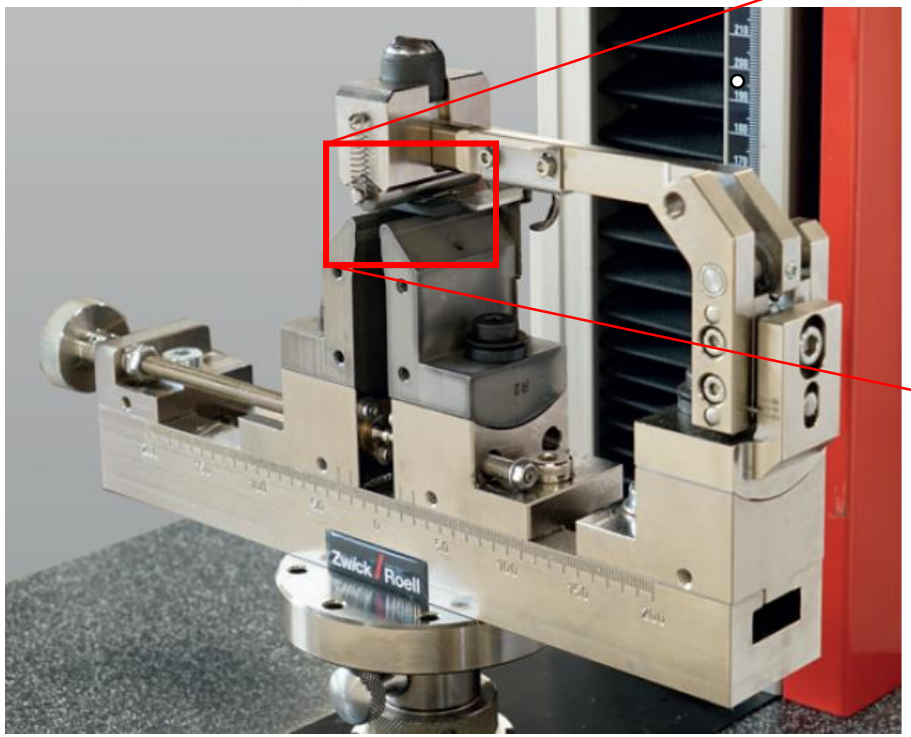
4-Punkt-Biegung

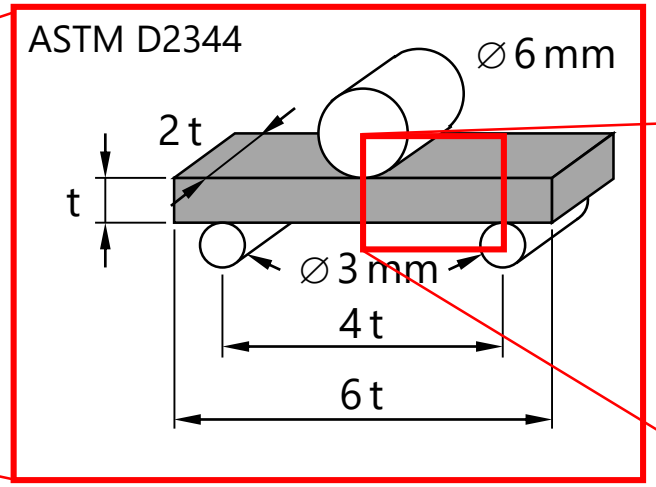
Mitte: Wegmessung mit Biegetaster T25
rechts: Wegmessung mit videoXtens und markiertem Taster

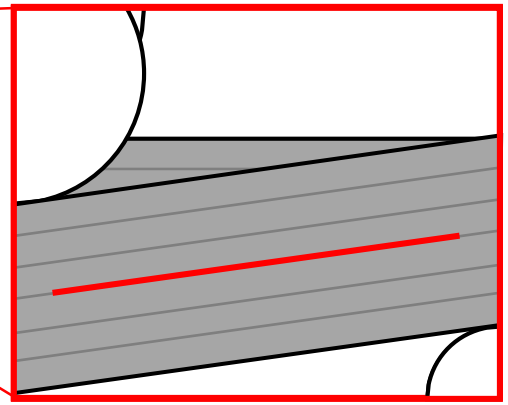
ISO 14125	***EN 2562***	***EN 2746***	***ASTM D 7264***
ASTM D 790	***ASTM D 4476***	***ASTM D 6272***	

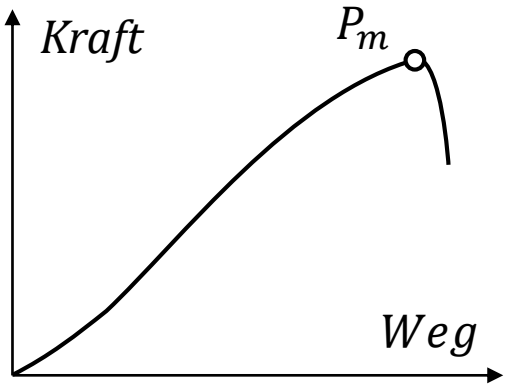
Zwick Roell

Die ZwickRoell ILSS Vorrichtung mit einfach einzustellenden Auflagern ist ideal für die Prüfung von Laminaten mit unterschiedlicher Dicke.









$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b\ h}$$

F^{sbs}	Interlaminare Scherfestigkeit
P_m	Maximalkraft
b	Probenbreite
h	Probendicke

ISO 14130	EN 2377	EN 2563	ASTM D 2344

Zwick Roell

ZwickiLine and ProLine Maschinen bieten Qualität und Standard-funktionalität, die vielen Anwendungen gerecht wird. AllroundLine Machinen wurden für höchste Anforderungen entwickelt.

ZwickiLine

Einfach zu bedienende Einsäulen-Maschine für Kräfte bis 5 kN

ProLine

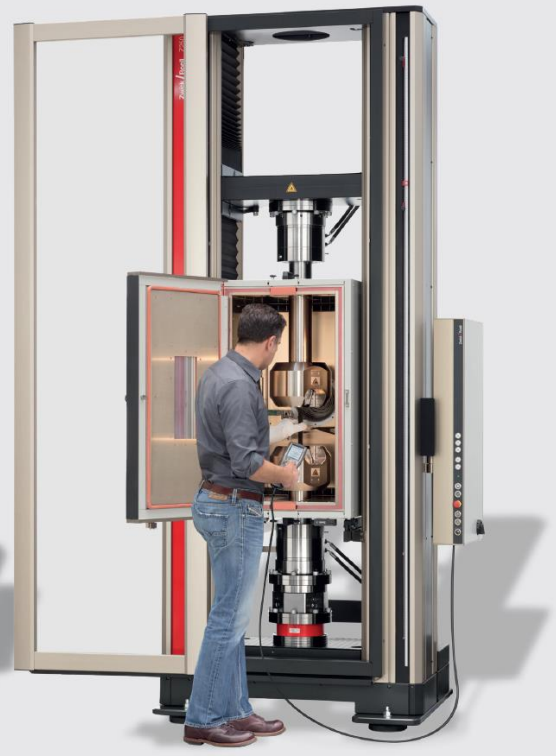
Für Versuche die keine komplexen Messsysteme benötigen

AllroundLine – Tischmaschinen

- Sehr leicht und biegesteif
- Für Kräfte bis 150 kN
- Optional mit 2 Prüfräumen
- Standfüße zur Positionierung des Prüfraums in optimaler Höhe für den Bediener

AllroundLine – Standmaschinen

- 4 Führungssäulen für genaueste Ausrichtung der Prüfachse
- Für Kräfte von 100 kN bis 1200 kN
- Optional mit 2 Prüfräumen
- Zug-Torsions-Maschinen verfügbar



Zwick Roell

Modulare statische Prüfmaschine für Versuche an Verbund-werkstoffen bei Raumtemperatur und mit Temperierkammer. 21 Prüfverfahren und 120 Prüfnormen.

Prüfung in einem großen Temperaturbereich (je nach Versuchsaufbau)

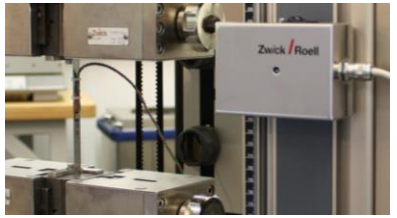
Prüfung bei Raumtemperatur

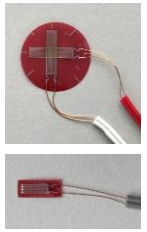
Zwick / Roell

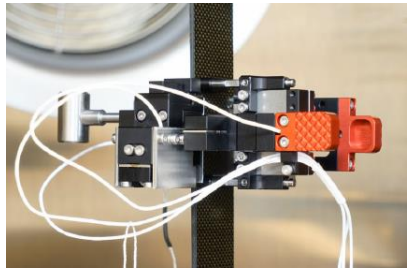
ZwickRoell bietet ein umfangreiches Portfolio für die Dehnungs- und Wegmessung von Verbundwerkstoffen.

Dehnungsmesssystem

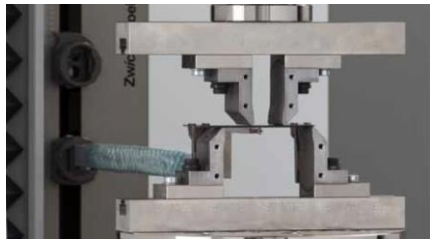
- berührend
  - fix
    - DMS
  - abnehmbar
    - Clip-on
    - Automatisch
- nicht-berührend
  - Optisch

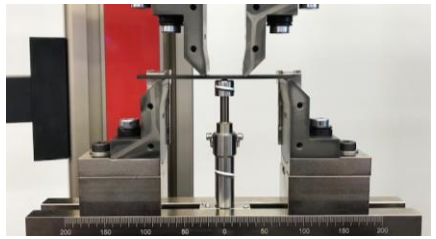






Wegmessung (Biegung)





Zwick Roell

Bei der Auswahl eines geeigneten Messsystems ist zu prüfen, ob eine biaxiale Dehnungsmessung, die Wegmessung im Biegeversuch und Prüfungen in der Temperierkammer erforderlich sind.

Dehnungs- oder Wegmesssystem	Raumtemperatur			Temperierkammer		
	ε_{axial}	$\varepsilon_{transversal}$	Biegung	ε_{axial}	$\varepsilon_{transversal}$	Biegung
DMS (DMS Boxen oder Universalmessversärker) *	x	x	-	x	x	-
axialer Clip-on Extensometer 5025-1 **	x	-	mit Taster	x	-	mit Taster
biaxialer Clip-on Extensometer biax 2501-1 **	x	x	-	x	x	-
makroXtens II automatischer Fühlerarm Extens.	x	x	x	x	-	X
videoXtens biax 2-150 HP	x	x	mit Taster	x	x	mit Taster
Wegaufnehmer T25	-	-	x	-	-	x

*
- einmalige Verwendung
- Zeitaufwändige Applikation
- versagt oft vor Erreichen der Probenfestigkeit
- oft problematisch bei Verwendung mit thermoplastischen Verbundwerkstoffen

** Bei Proben mit hochenergetischem Versagen (z.B. Zugversuch in Faserrichtung) muss der Aufnehmer vor dem Probenversagen abgenommen werden.

Zwick Roell

Zwick Roell

zwickroell.com