

Einführung in die mechanische Prüfung von Faserverbund- werkstoffen

Dr. Hannes Körber
Branchenmanager Composites

Agenda

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

Anwendungen von Verbundwerkstoffen

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



Andere Anwendungsgebiete:

- Bauwesen
- Sport und Freizeit
- Elektronik
- Öl und Gas



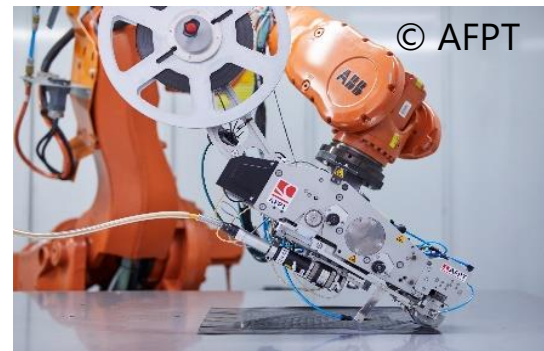
Neben Faser- und Matrixtyp sowie Faserarchitektur wird das Materialverhalten von Verbundwerkstoffen maßgeblich vom Herstellungsverfahren beeinflusst.

Materialien



- Verschiedene Fasertypen
- Verschiedene Harzsysteme
- Verschiedene Faserarchitekturen

Herstellungsverfahren



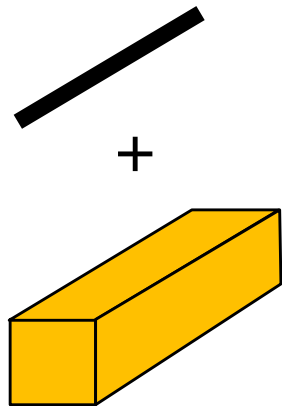
- Autoclave curing of thermoset prepreg composites
- Resin Transfer Molding (RTM) bei niedrigem oder hohem Druck
- Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)
- Automated Fiber Placement (AFP)
- Automated Tape Laying (ATL)
- Wickeln
- Pultrusion
- Nasspressen
- Pressformen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen
- ...

Testpyramide oder Building Block Approach

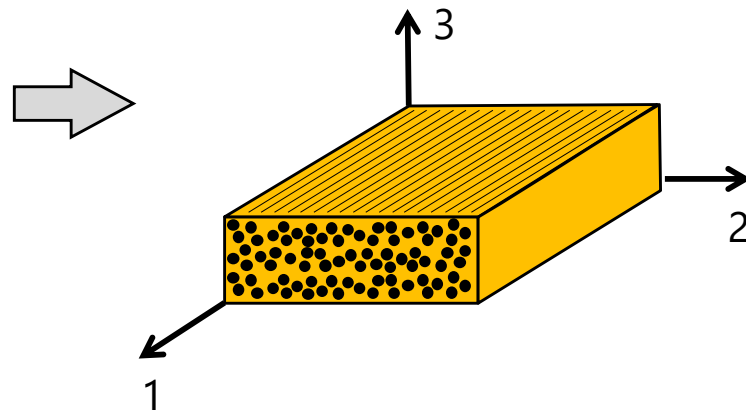


Verbundwerkstoffe sind orthotrope Materialien, bei denen Normal- und Schubeigenschaften entkoppelt sind.

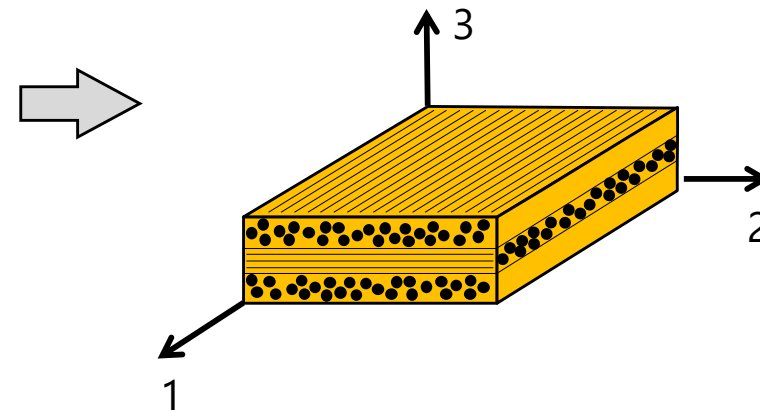
Faser + Matrix



Unidirektionale Einzelschicht



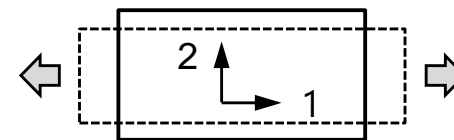
Multidirektionaler Mehrschichtverbund (Laminat)



Statische Grundkennwerte in der Lagenebene

Elastisch $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$
Festigkeit $F_1^{tu}, F_2^{tu}, F_1^{cu}, F_2^{cu}, F_{12}$

Querkontraktionszahl



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

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

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

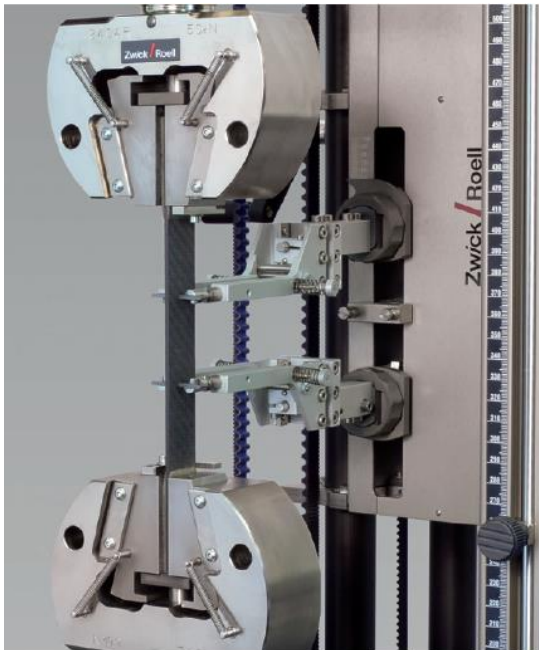
	Elastische Kennwerte (in der Lagenebene)					Festigkeiten (in der Lagenebene)					
		SI		Imperial			SI		Imperial		
Zug-Modul in Faser-Richtung	E_1^t	165	GPa	23.9	msi	Zugfestigkeit Faserrichtung	F_1^{tu}	2700	MPa	391.6	ksi
Zug-Modul in Matrix-Richtung	E_2^t	12	GPa	1.7	msi	Zugfestigkeit Matrixrichtung	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

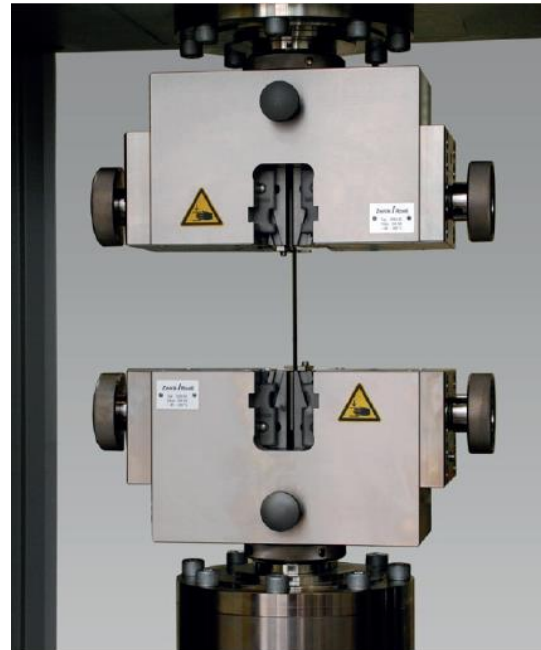
Druck

Schub

ZwickRoell bietet unterschiedliche Zug-Probenhalter für unterschiedliche Kundenbedürfnisse.



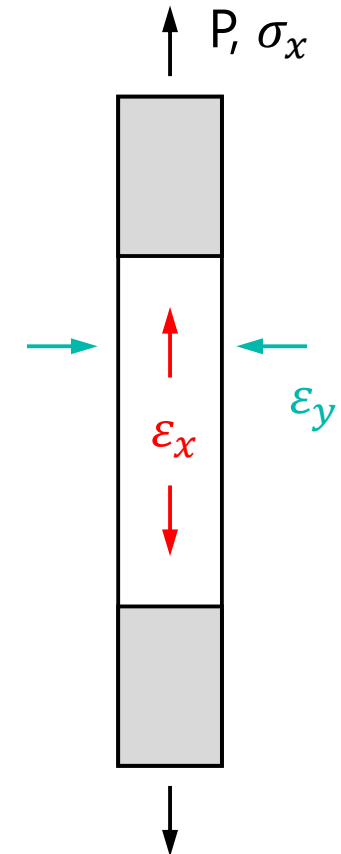
Mechanischer Körper-über-Keil Probenhalter



Keilschraub-Probenhalter



Hydraulischer Körper-über-Keil Probenhalter

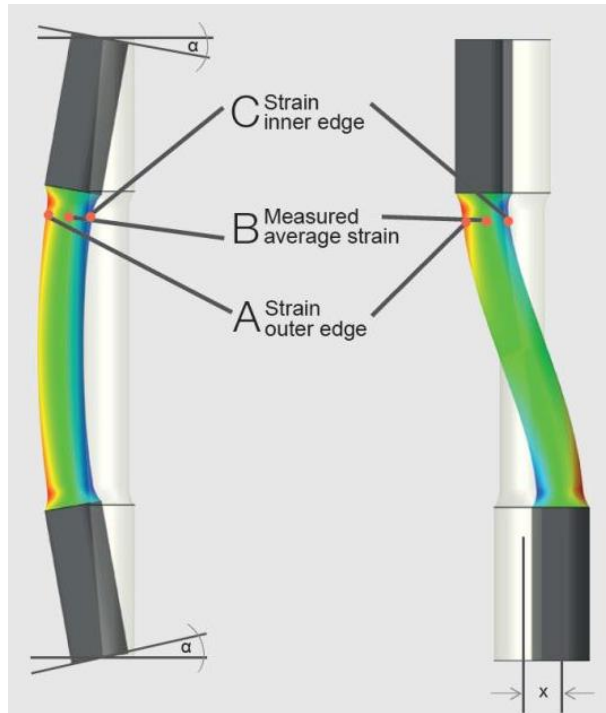


Hauptsächlich verwendete Prüfnormen zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

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

Alignment

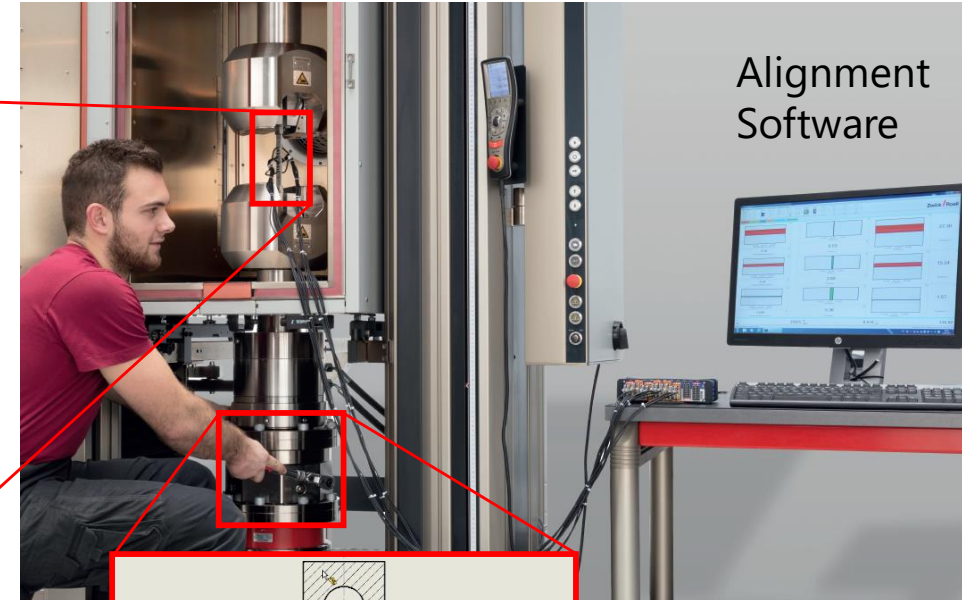
Ausrichtungsfehler haben einen starken Einfluss auf Versuche mit spröden Materialien. Wir bieten ein komplettes Portfolio für die Ausrichtung der Probenhalter.



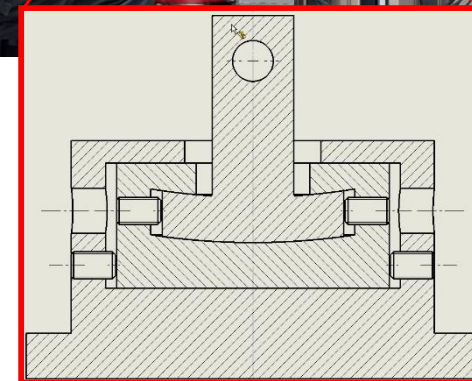
ISO 23788	ASTM E 1012	Nadcap Audit criteria 7122
-----------	-------------	----------------------------



Messnormal



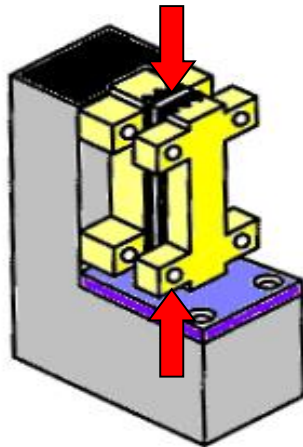
Alignment Software



Mechanische Ausricht-Einheit

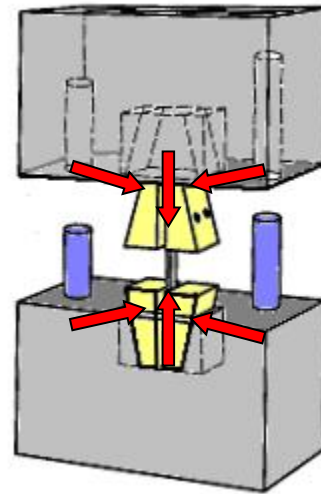
Es gibt verschiedene Druckversuchsmethoden, die sich durch die Art der Krafteinleitung unterscheiden.

End Loading



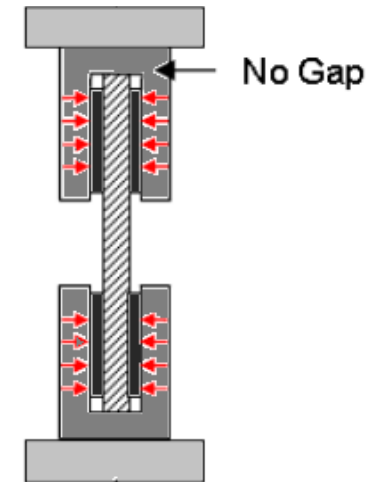
<i>ISO 14126 method 2</i>
<i>ASTM D 695</i>
<i>Boeing BSS 7260 type III & IV</i>
<i>DIN EN 2850 type B</i>

Shear Loading



<i>ISO 14126 method 1</i>
<i>ASTM D 3410</i>
<i>Airbus AITM 1.0008</i>
<i>DIN EN 2850 type A</i>

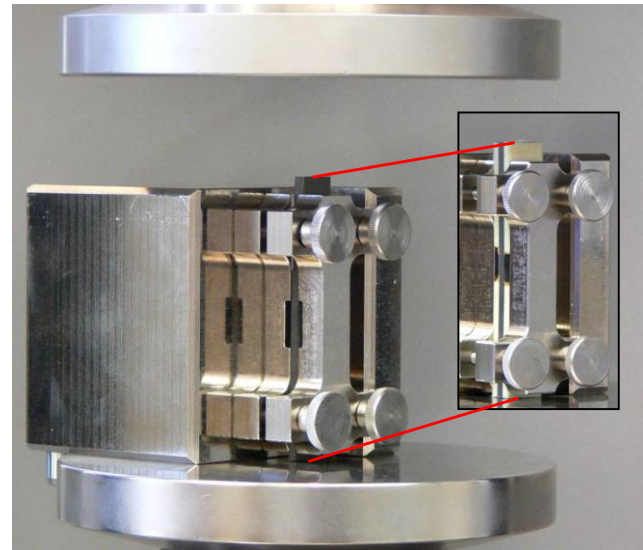
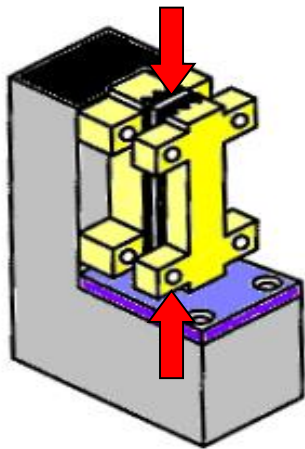
Combined Loading



<i>ISO 14126 method 2</i>
<i>ASTM D 6641</i>
<i>Airbus AITM 1.0008</i>

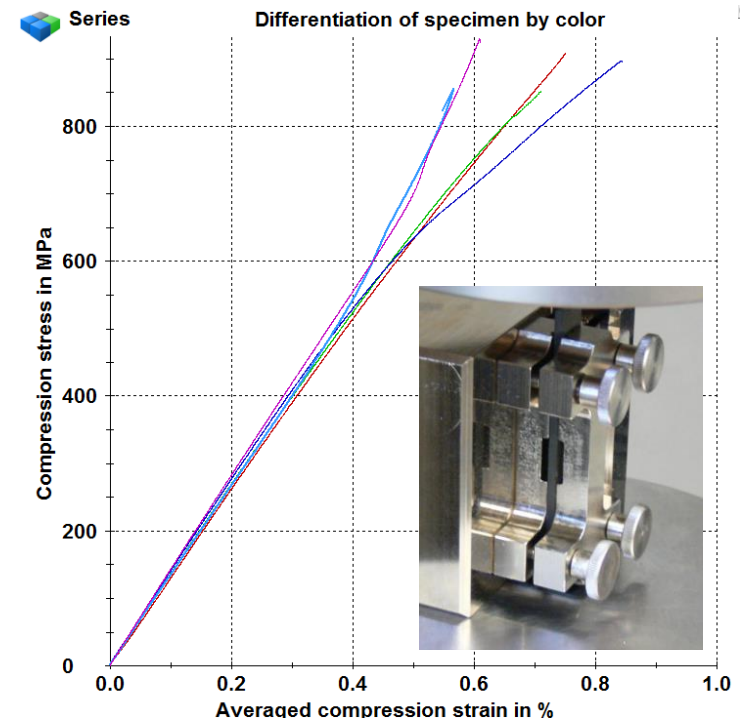
End Loading Druckversuchsvorrichtungen sind Varianten der ASTM D 695 Vorrichtung, welche ursprünglich für Druckversuche an Kunststoffen entwickelt wurde.

End Loading



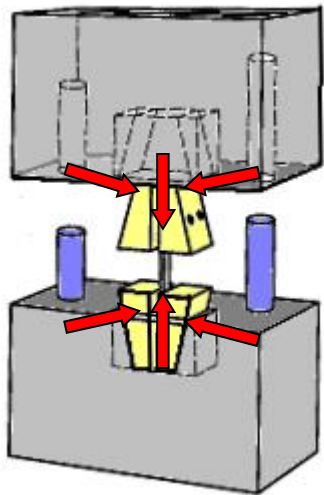
- ZwickRoell's End Loading Prüfvorrichtung enthält Stütz-Elemente für Modul-Bestimmung (Mitte) und für Festigkeitsversuche (rechts).
- Es ist stets auf die Lastachse der Prüfmaschine zentriert.

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

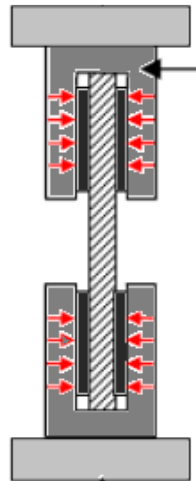


Die HCCF deckt die Normen für Shear Loading und Combined Loading ab, ist einfach zu bedienen und liefert zuverlässige Prüfergebnisse.

Shear Loading

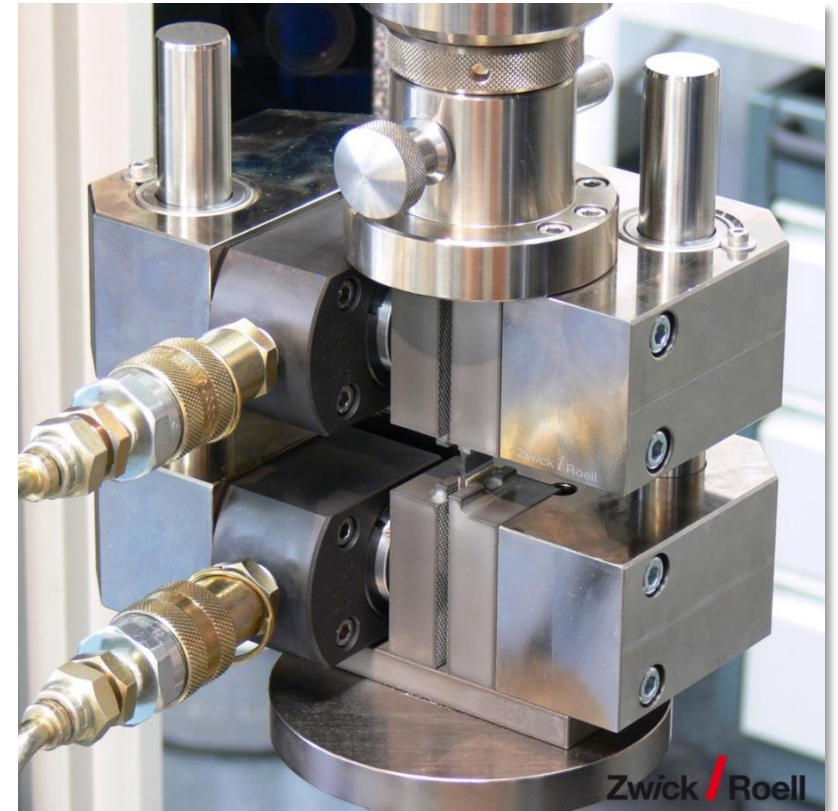


Combined Loading



Merkmale der HCCF

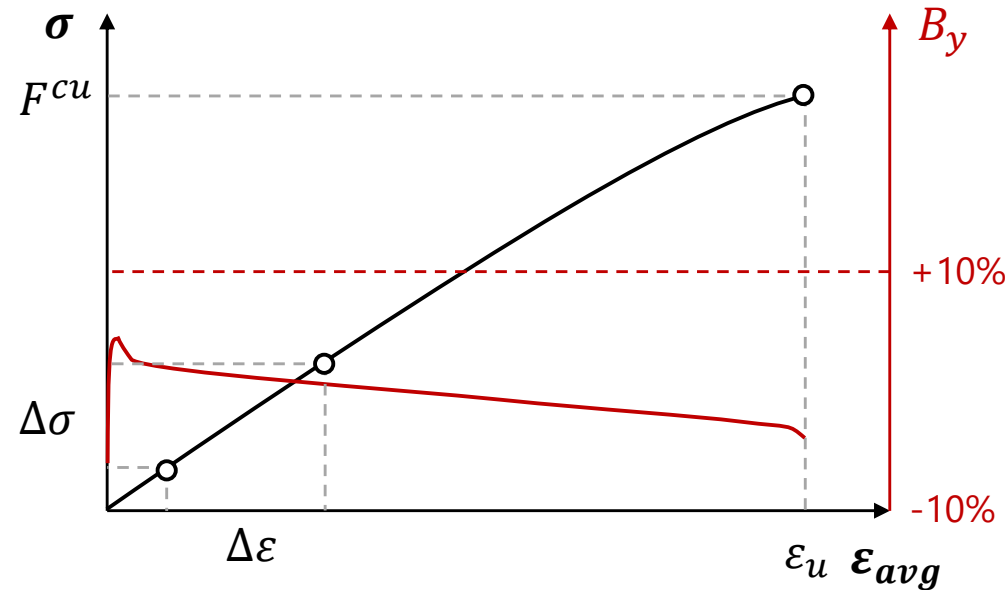
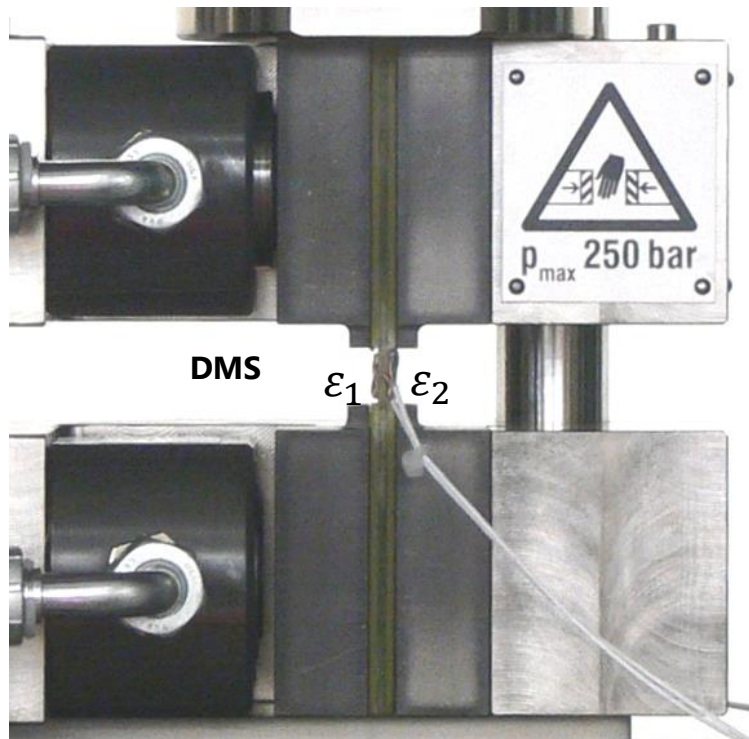
- Hydraulisches Parallelspannprinzip
- Shear Loading bis 40 kN
- Combined Loading bis 200 kN
- Probenbreite bis 35 mm
- Spannbacken können sich nicht zueinander verschieben
- Exakte Ausrichtung der Spannbacken
- Dickenunterschiede in den Aufleimern können bei der Einspannung erkannt und korrigiert werden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



HCCF – Hydraulic Composites Compression Fixture

Druckversuch

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



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

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

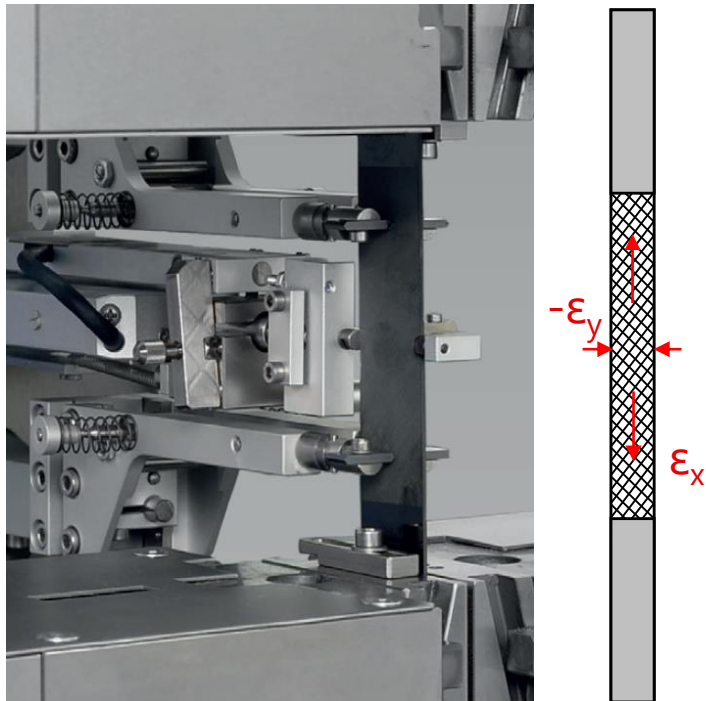
$$B_y = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100$$

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

Schubversuch

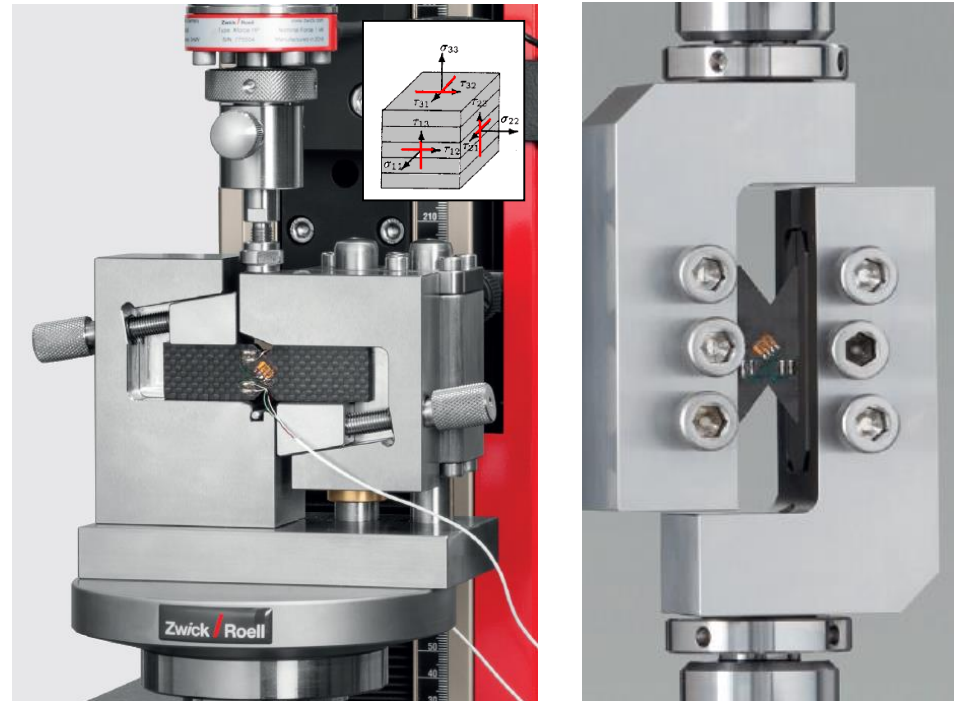
Der Zugversuch mit $\pm 45^\circ$ Laminat ist ein einfacher In-Plane Schubversuch. Mit V-gekerbten Proben können sowohl In-Plane als auch Out-of-Plane Schubkennwerte bestimmt werden.

Zugversuch mit $\pm 45^\circ$ Laminat



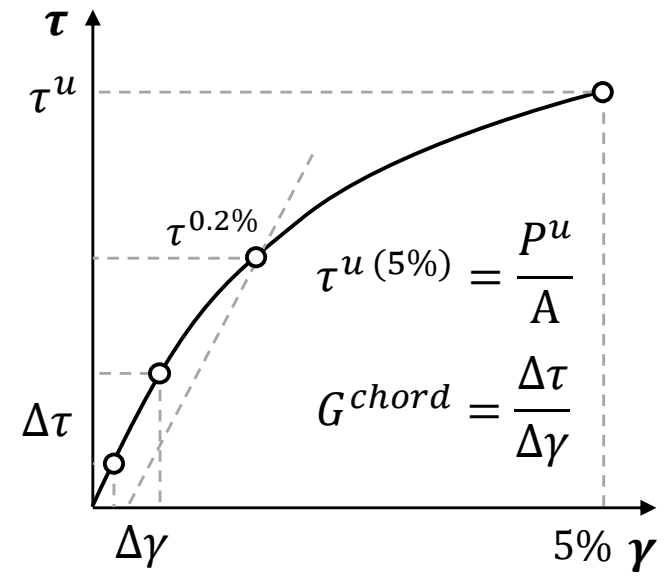
ASTM D 3518 **ISO 14129**

Schubversuch mit V-gekerbten Proben



V-notched Beam (Iosipescu) **ASTM D 5379**

V-notched Rail Shear **ASTM D 7078**

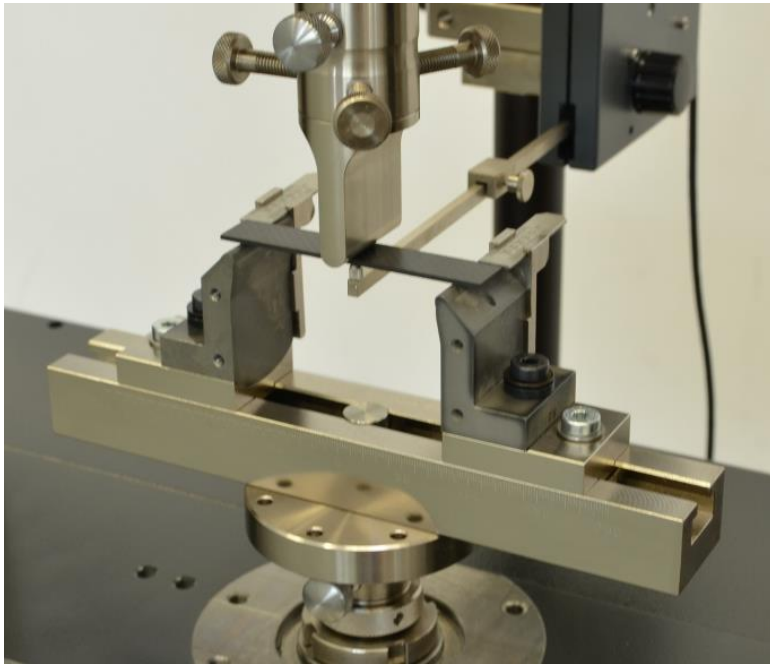


$$\tau = \frac{P}{A} \quad \begin{matrix} \text{(ASTM D5379)} \\ \text{(ASTM D7078)} \end{matrix}$$

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

Biegeversuch

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



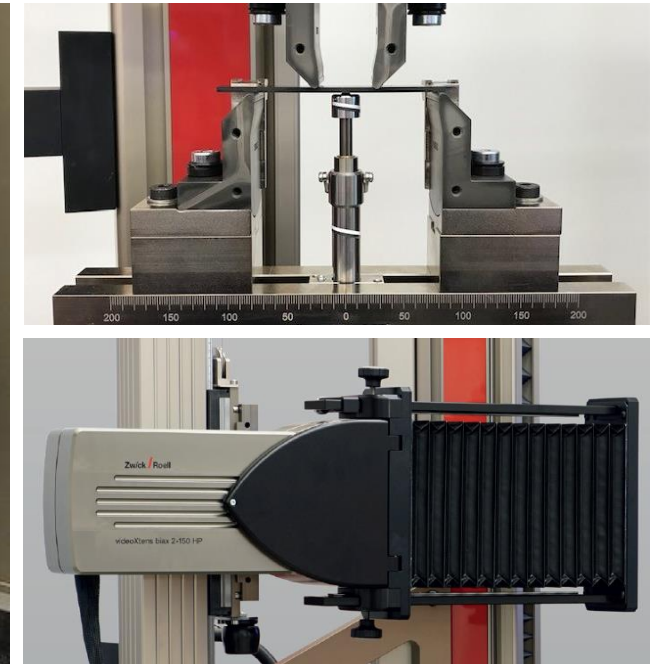
3-Punkt-Biegung

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



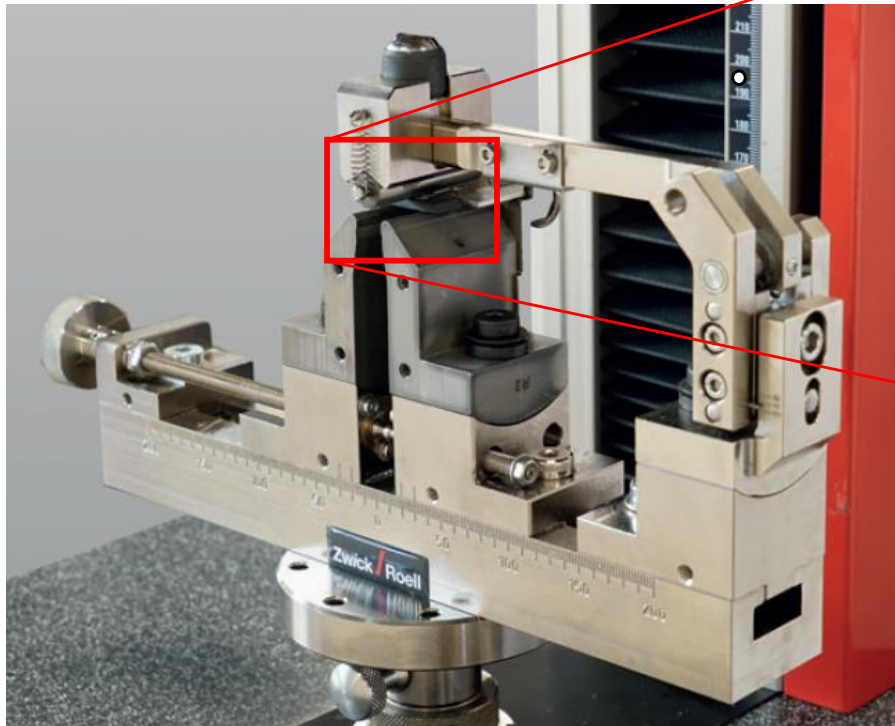
4-Punkt-Biegung

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

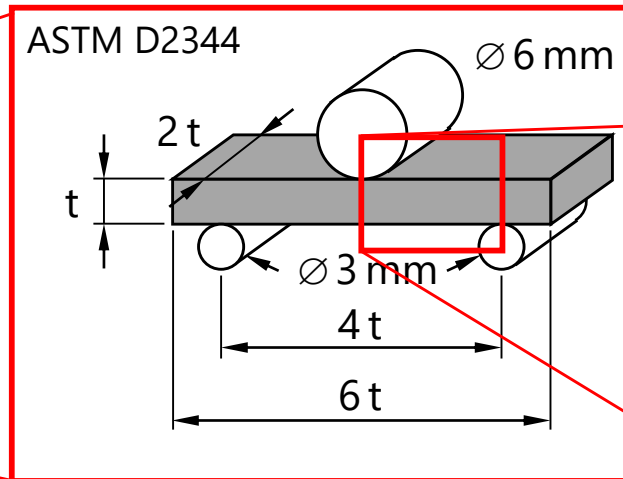


Interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)

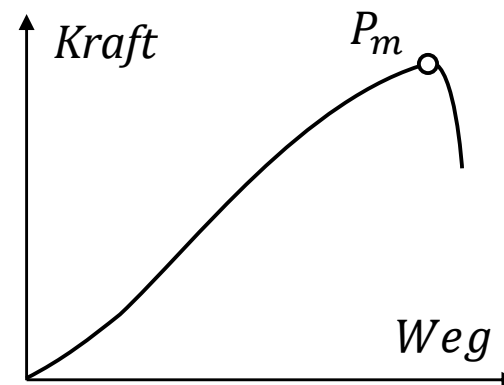
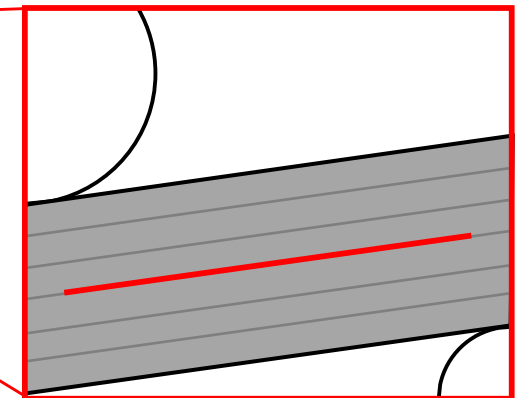
Die ZwickRoell ILSS Vorrichtung mit einfach einzustellenden Auflagern ist ideal für die Prüfung von Laminaten mit unterschiedlicher Dicke.



ISO 14130	EN 2377	EN 2563	ASTM D 2344
-----------	---------	---------	-------------



verformt mit interlaminarem Bruch



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

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

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

ZwickiLine

Einfach zu bedienende Einsäulen-Maschine für Kräfte bis 5 kN

ProLine

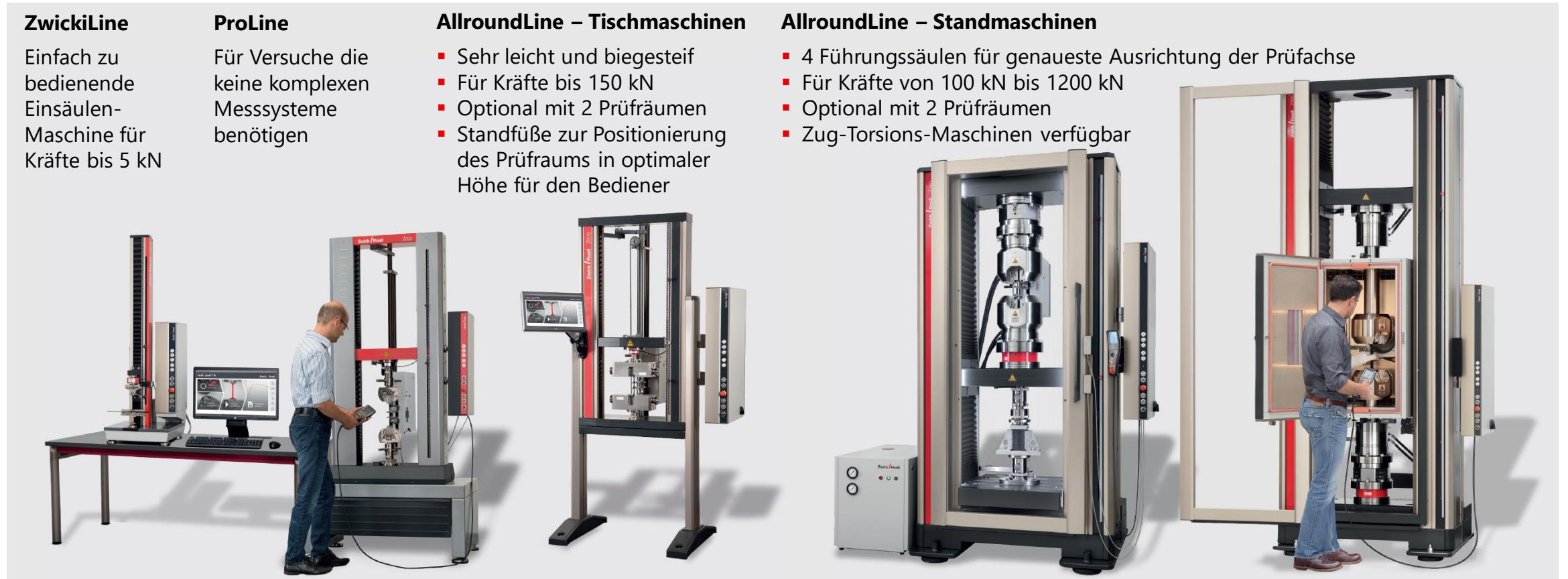
Für Versuche die keine komplexen Messsysteme benötigen

AllroundLine – Tischmaschinen

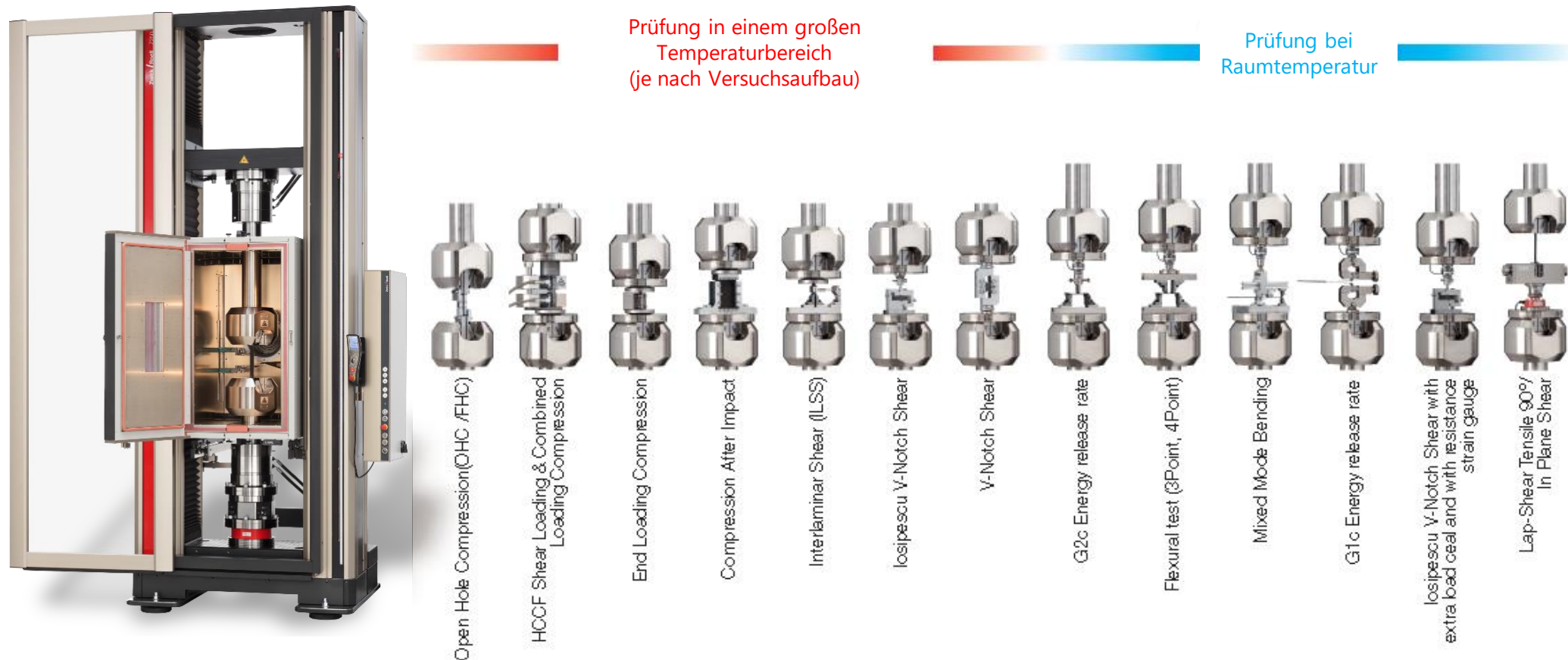
- Sehr leicht und biegesteif
- Für Kräfte bis 150 kN
- Optional mit 2 Prüfräumen
- Standfüße zur Positionierung des Prüfraums in optimaler Höhe für den Bediener

AllroundLine – Standmaschinen

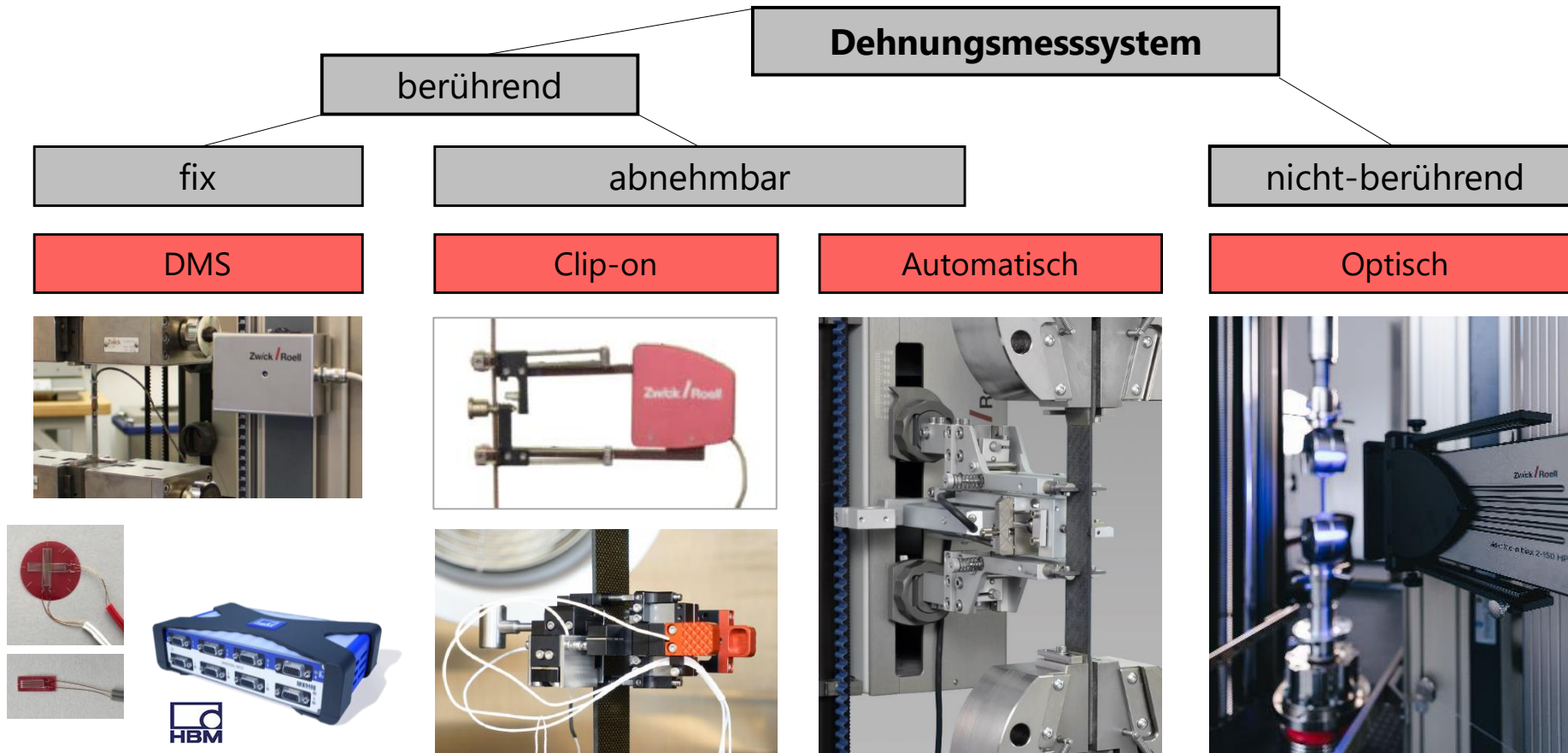
- 4 Führungssäulen für genaueste Ausrichtung der Prüfachse
- Für Kräfte von 100 kN bis 1200 kN
- Optional mit 2 Prüfräumen
- Zug-Torsions-Maschinen verfügbar



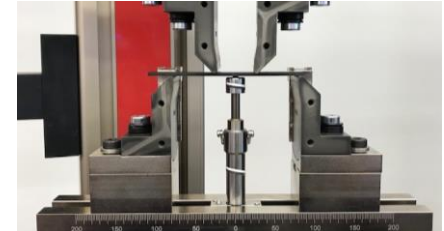
Modulare statische Prüfmaschine für Versuche an Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur und mit Temperierkammer. 21 Prüfverfahren und 120 Prüfnormen.



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



Wegmessung (Biegung)



Vergleich verschiedener Dehnungs- und Wegmesssysteme

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}	$\epsilon_{transversal}$	Biegung	ϵ_{axial}	$\epsilon_{transversal}$	Biegung
DMS (DMS Boxen oder Universalmessverstärker) *	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

zwickroell.com