

IWO 1

fischal

Version: January 5, 2026

Kleben (DIN 2304)

Kleben: Verbinden gleicher/verschiedener Materialien mit Klebstoffschicht

Kleber: Klebstoff (Substrate durch Adhäsion/Kohäsion verbinden), ausführende Person

Leim: Wasserbasierter Nassklebstoff

Adhäsion: Flächenhaftung, Oberfläche-Klebstoff, Grenzschicht, Dipol/VdW Kräfte

Kohäsion: Festigkeit des Klebstoffes, innere Festigkeit

Klebung: Durch Klebstoff verklebte Fügeile (Substrate)

Klebfuge: Zwischenraum zwischen Klebflächen: 0.1-0.3mm, elastisch bis zu 20mm

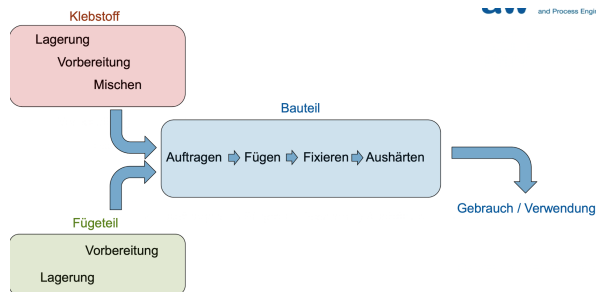
Beispiele:

- Cyanoacrylate (Sekundenklebstoff): Wundversorgung, reagiert mit OH^-

Einsatz Klebetechnik:

- Verschiedene Werkstoffpaarungen
- Dünnwandige Teile
- Teile m. weiten Form-/Masstoleranzen
- Kleine Teile
- Unterschiedliche Steifigkeit/thermische Ausdehnung
- Schlecht zugängliche Verbindungs-fugen
- Flächenhafte Lastübertragung
- Funktionsintegration (Dichten, Dämpfen, Isolieren)
- Vibrationschutz
- Lokale Versteifungen an Substraten
- Grosse Flächen/hohe Stückzahlen

Prozessablauf:

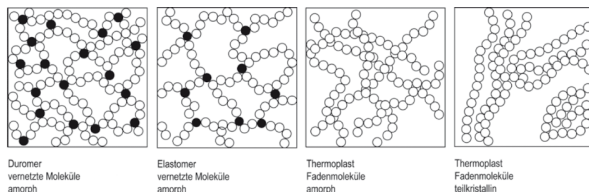


Bindungskräfte in Klebungen

Gesamtfestigkeit = f(Festigkeit Substrate/Grenzschicht/Klebschicht)

Kohäsion:

- Bevorzuger Bruch (kein Substratbruch/Adhäsiver Bruch)
- Abhängig der atomaren Wechselwirkungen
- Temperaturabhängig



Adhäsion:

- Mechanische Adhäsion:
 - Formschlüssige Verankerung in porösen Substrat (Holz, Papier, Beton)
 - Formschluss druch Hinterschnitte/Poren/Kapillaren
 - Ungeeignet für dickflüssige Kleber
 - Ungeeignet bei glatten Oberflächen
 - Mechanische Vorbehandlung erhöht Anzahl Kavitäten
 - Transport von Feuchtigkeit durch porosität massiv erleichtert → Angriff auf gesamte Klebeschicht
- Spezifische Adhäsion:
 - Haftung durch VdW, Dipol Kräfte, H-Brücken (Abstand 0.3-0.5nm)
 - Chemische Adhäsion (200-300 kJ/mol)
 - Physikalische WW (50kJ/mol)
 - Diffusionshaftung (Durchdringung/Verwebung von Substrat & Kleber, durch anlösung des Substrats mit Lösungsmittel)
 - Elektrostatische Haftung (Anziehung Substrat-Klebstoff, schwächste WW)

Haftungsmechanismen

Oberflächenspannung:

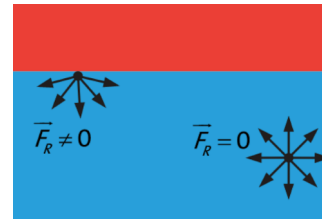
- Atome im Inneren: Kräfte Gleichgewicht
- Atome an Grenzfläche: Res. Kraft nach innen

$$\sigma = \frac{\Delta W_{\text{Oberfläche}}}{\Delta A} \quad \left[\frac{J}{m^2} = \frac{N}{m} \right]$$
$$\Delta W = F \cdot \Delta s = \sigma \cdot 2 \cdot b \cdot \Delta s$$

s = Tiefe

b = Breite

Achtung, auf Grenzflächen achten (mehrere Breiten)



Kontaktwinkel:

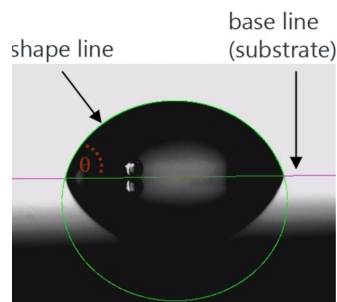
- Mass für Benetzbarkeit
- Wichtig für Intensität des Phasenkontakts
- $\Theta = 0$: vollständige Spreitung
- $\Theta = 180$: vollständige Entnetzung

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cos \Theta$$
$$\sigma_{sg} > 35 - 50 mN/m = \text{klebgeeignet}$$

Messmethoden:

Kontaktwinkel:

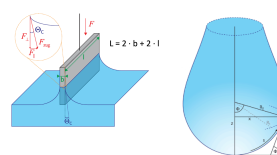
- Messung des Winkels mit Kamera



Oberflächenspannung:

- Hängender Tropfen: Numerisches Verfahren durch Bildanalyse (Young-Laplace-Fit)
- Wilhelmy-Platten Methode: Hochpräzise Waage mit Platte aus Platin-Iridium

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{2 \cdot l \cos \Theta}$$



Oberflächenenergien:

- Je höher die Oberflächenenergie, desto besser wird sie von Flüssigkeiten (mit niedriger Oberflächenspannung) benetzt
- Ohne Benetzung keine Adhäsionskräfte
- Messung durch Testflüssigkeiten unterschiedlicher σ_{sg}
- Testflüssigkeiten nur begingt aussagekräftig:
 - Keine Unterscheidung zw. dispersiven/polaren Anteilen
 - Ist nur eine binäre Aussage: Ist energiearmer/-reicher als Oberfläche
- $\sigma_i = \sigma_i^d + \sigma_i^p$
- Disperse WW: Treten IMMER auf (VdW → schwach)
 - Bsp: PE, PP, PTFE, PS, Benzin
- Polare WW: Treten bei Dipolen auf (H-Brücken, Dipol WW → stark)
 - Bsp: Polyamid, PET, Epoxi, Wasser, Alkohole, Aceton, PVC, PU
- Adhäsionsarbeit $[J/m^2 (N/m)]$: Aufzuwendende Energie, um 2 Phasen zu trennen. Umkehrung: Die Energie, welche beim benetzen frei wird.

$$\Delta W = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} + \sigma_{lg} = \sigma_{lg} (1 + \cos \Theta)$$

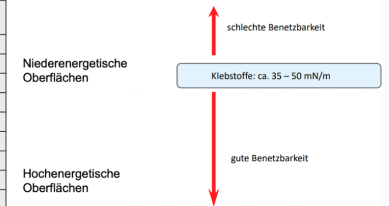
Vollständige Benetzung (Spreitung):

$$\Theta = 0 \rightarrow \Delta W = 2 \sigma_{lg}$$

Vollständige Entnetzung:

$$\Theta = 180 \rightarrow \Delta W = 0$$

Material	Oberflächenenergie 20 °C (mJ/m² = mN/m)
PTFE	18.5
Silikone	20 - 22
PE, PP	ca. 30
Epoxide	ca. 50
H ₂ O	72.8
Pyrex Glas	ca. 170
Hg (Quecksilber)	476
Aluminium	1200
Eisen	2550



Viskosität:

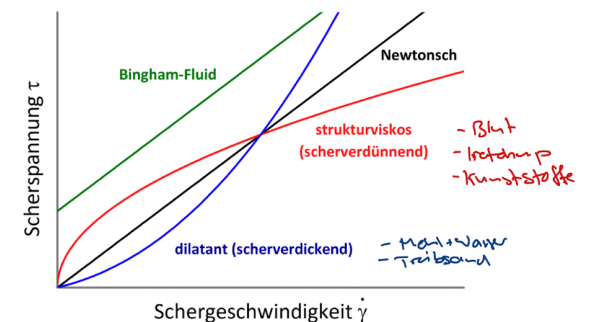
- Strömungswiderstand setzt sich der Benetzungskraft entgegen
 - f(Rauigkeit und Viskosität)
- Raue Oberflächen werden von hochviskosen Klebstoffen schlecht benetzt
- Rheologie: Lehre vom Fliessen, Zusammenhänge zwischen Spannung, Dehnung, Zeit
- η konstant für Newtonsche Flüssigkeiten

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad \tau = \frac{F}{A}$$

τ = Schubspannung [Pa]

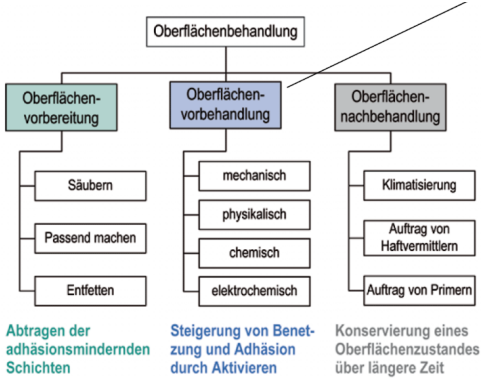
η = dyn. Viskosität [Pa s]

$\frac{dv}{dx}$ = Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ [m/s]



Vorbehandlungsmethoden

- Grenzfläche anforderungen:
 - reproduzierbar, definiert, aktiviert, Klebstoffabhängig
- Oberflächenbehandlung Ziel:
 - Verbesserung der Benetzung
 - Verbesserung der Adhäsion
 - Verbesserung der reproduzierbarkeit der Oberfläche
 - Verbesserung der Langzeitbeständigkeit der Klebung
 - Für die Klebung eine optimale Oberfläche schaffen
- Arten von Oberflächenbehandlungen:
 - Reinigen, Entfetten
 - Schleifen, Strahlen, Beizen, Primern, Plasma, Beflammen



Klebstoffe & Klebstoffauswahl

Entscheidungsprozess:

- Zweifel an Klebungen:
 - Mangelnde Erfahrung
 - Fehlende Kenntnis über mech. Eigenschaften der Klebstoffe
 - Reproduzierbarkeit
 - Zuverlässigkeit des Klebprozesses
- Vorteile einer Klebung:
 - Gestaltung so dass kaum sichtbar
 - Dient als Dichtung gegen Staub/Flüssigkeiten
 - Dämpft Vibrationen, verringert Schallemission
 - Toleranzausgleich durch Spaktmass
 - Fügen unterschiedlicher Materialien
 - Vermeidung Kontaktkorrosion (Elektrochemisch)
 - Ausgleich Temperaturausdehnungen
 - Keine Störung des Kraftflusses (linien/Flächenförmige Anbindung)

Einteilung der Klebstoffe

Einteilung nach Abbinde-mechanismus:

Physikalisch abbindend:

- Lösemittelklebstoffe → Verdampfung von Lösemittel
- Plastisole (PVC) → dispergierte Polymerpartikel im Lösemittel
- Dispersionsklebstoffe → Verdampfung von Wasser
- Schmelzklebstoffe → Abkühlen = haften
- Haftklebstoffe

Chemisch reagierend:

- Polymerisation → UV-härtend, Cyanoacrylate, Luft aushärtend, Acrylate
- Polyaddition → 1K/2K Epoxid/Polyurethane 2K-Silikone
- Polykondensation (Abspaltung) → 1K/2K Silikone, Phenolharze

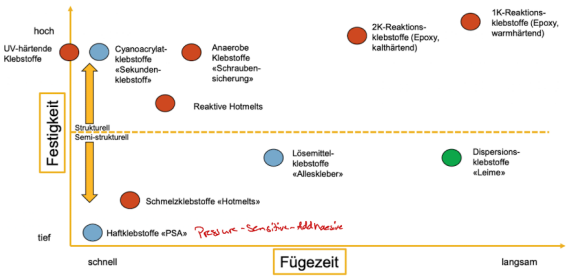
Einteilung nach Mechanik:

Strukturklebstoffe (Dünnschicht):

- Festigkeit: - 50 MPa
- Duroplastisch
- Dehnungen 1-3%
- <1mm Klebschichtdicke
- Epoxide/Acrylate

Elastische Klebstoffe (Dickschicht):

- Toleranzausgleichen & Viskoelastisch
- Festigkeit: 3-10 MPa
- >3mm Klebschichtdicke
- Dehnungen 100-1000 %
- Oft auch Dichtmasse: Festigkeit <3 MPa



Lösemittelhaltige Klebstoffe:

Alleskleber/Kraftkleber/Kontaktkleber

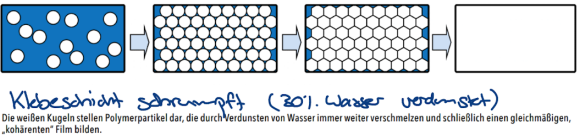
- Verdunstung des Lösungsmittel = Verfestigung
- 1K, Thermoplast in organischem Lösungsmittel oder Wasser
- Sofortige Handfestigkeit nach dem Fügen, sofort belastbar
- Mittelfeste Verbindung
- Dauereinsatztemperatur bis ca. 100°C
- Relativ hohe Flexibilität

Festkörper (10-40%)
- Bindemittel (klebrige Harze, Kautschuk)
- Füllstoffe
- Pigmente
- Hilfsmittel

Lösungsmittel (60-90%)
- Organ. schnellflüchtige LM
- Halten Bindemittel gelöst
- Flüssig / verarbeitbar
- Lösen teilweise Substrate an

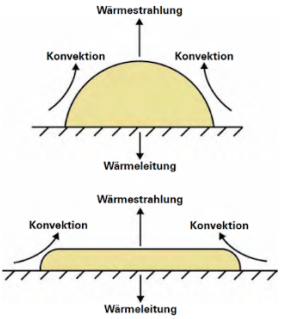
Dispersionsklebstoffe:

- Leime, Weissleime
- Natürliche Leime: Gelatine, Casein für Zigaretten/Holz
- 1K-System
- Fügen im nassen Zustand des Klebstofffilms
- Wasser muss aus der Klebfuge entweichen können (in das Fügeteil)
- Geringe Anfangsfestigkeit
- Mittelfeste Verbindung
- Mittlere bis hohe Flexibilität
- Feuchtigkeitsempfindlich durch eingelagerte Emulgatoren



Schmelzklebstoffe:

- 1K, thermoplastische Schmelzklebstoffe
- Auftrag als Schmelze und Aushärtung durch Abkühlen
- Sehr schneller Kohäsionsaufbau
- Vorsicht bei kalten bzw. wärmeleitfähigen Fügeteilen (schlechte Benetzung)
- Mittelfeste bis hochfeste Verbindungen
- Geringe bis hohe Verformbarkeit
- Durch Wärme lösbar und reparierbar
- Dauereinsatztemperatur bis ca. 180°C
- Nutzen in Verpackung/Möbel/Holz Industrie



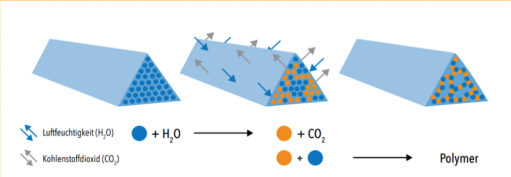
Druckaktivierbare Klebstoffe:

- 1K ohne Härter, hochviskose Systeme
- Benetzung abhängig von Rauheit und Anpressdruck
- Sofortige Adhäsion und Kohäsion
- Wiederablösbare Systeme: hohe Anfangshaftung, geringe Endfestigkeit
- Nicht wiederablösbare Systeme: geringe Anfangshaftung, hohe Endfestigkeit
- Hohe Schälfestigkeit ⇒ geringe Scherfestigkeit
- Hohe Scherfestigkeit ⇒ geringe Schälfestigkeit
- Festigkeit stark temperaturabhängig
- Bsp: Post-It, Klebeband, Etiketten, Wundpflaster

Polyurethane:

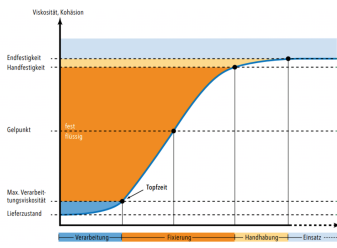
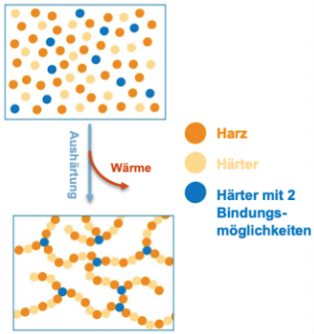
- 1K, feuchtigkeitshärtend, bildet Elastomer
- Härtung von außen nach innen (anisotrop)
- Härtebedingungen: 5°C - 40°C, 40-70% rel. F.
- Beschleuniger ermöglichen isotrope Härtung
- Gummielastische, flexible Klebschicht
- Niedrig- bis mittelfeste Verbindungen, sehr hohe Dehnung
- Dauereinsatztemperatur ca. -40 bis +100 °C
- Schnellere Aushärtung durch Beimischen von feuchtigkeitsehaltendem Gel. Härtung erfolgt dann auch von Innen

Härtung der Klebstoffraupe unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit



Epoxidharzklebstoffe:

- 2K, Polyadditionsreaktion, härtet zu Duromer
- Raumtemperaturhärtend, Aushärtung Stunden bis Tage
- Härtung beschleunigbar durch Erwärmen
- Empfindlich gegenüber Mischungsfehlern
- Sehr hohe Festigkeiten erreichbar (heisshärtende Systeme)
- Geringe Flexibilität
- Dauereinsatztemperatur ca. 100-220°C
- Geringe Kriechneigung
- Einsatz: Konstruktionsklebstoffe (Fz, Flugzeug, Windkraft usw.)



Topfzeit: (Verarbeitungszeit)

- Fügeprozess abgeschlossen
- Pro 10°C → 1/2 Topfzeit

Gelpunkt:

- Wechsel Aggregatzustand l → s

Handfestigkeit

- Weiterverarbeitung möglich, nicht vollständig ausgehärtet

Polysiloxane (Silikone):

- 1K, feuchtigkeitshärtend, Abspaltung von Essigsäure oder Alkohol
- Reaktion zu Elastomer
- Härtebedingungen: 5°C-40°C, 5-95% rel. F.
- Durchhärtung wenige mm pro 24 h
- Niedrige Festigkeit (um 1MPa), sehr hohe Flexibilität
- Dauereinsatztemperatur –100 bis +200 °C (kurzzeitig bis 300 °C)
- Nicht überlackierbar oder beschichtbar
- Sehr gute Chemikalien-, UV- und Ozonbeständigkeit

Cyanoacrylate:

- 1K, polymerisieren zu Thermoplast
- Härtung durch Feuchtigkeit (OH⁻)
- Härter: Spontan: >70% rel. F., Optimal: 40-80% rel. F.
- Sehr schnelle Reaktion, abhängig vom Untergrund-pH
 - Basisch (> pH 7): Aushärtungssteigerung
 - Sauer (< pH 7): Verzögernd
- Dünne Klebschichten (max. 0.2mm), geringe Spaltüberbrückung (ca. 0.05mm)
- Mittel- bis hochfeste Verbindungen
- Geringe Flexibilität
- Eingeschränkte Wärme- (80°C) und Feuchtebeständigkeit

Anaerobe härtende Klebstoffe:

- 1K, polymerisationshärtend zu Duromer
- Härtung unter Luftabschluss und Metallkontakt
- Einsatz z.B. bei Gewinden, Welle-Nabe-Verbindungen

- Maximale Klebschicht ca. 0,3 mm
- Sehr geringe Flexibilität, spröde
- Dauereinsatztemperatur bis ca. 150°C
- Beständig gegen Öle, Lösungsmittel und Feuchtigkeit

Strahlenhärtende Klebstoffe:

- 1K, Härtung durch Licht bestimmter Wellenlänge zu Thermoplast
- Sehr kurze Aushärtezeiten (Sekunden bis Minuten)
- Fügeteil muss strahlungsdurchlässig sein
- Sehr hohe Festigkeiten möglich
- Flexibilität über Rohstoffwahl einstellbar
- Dauereinsatztemperatur bis ca. 120°C

Verarbeitung des Klebstoffes

Vorbereiten:

Klebstoffe	Vorbereitende Massnahmen
Füllstoffhaltig	Rühren zwecks homogener Füllstoffverteilung
Lösemittelhaltig	Viskositätseinstellung (Verdickungsmittel oder Lösemittel)
Thermoplastische Hotmelts	Aufschmelzen durch Aufheizen
1K-Reaktionsklebstoffe	Anklimatisieren auf Verarbeitungstemperaturen nach Lagerung bei Gefriertemperaturen
Haftklebstoffe	Konfektionieren durch Zuschneiden

Mischen:

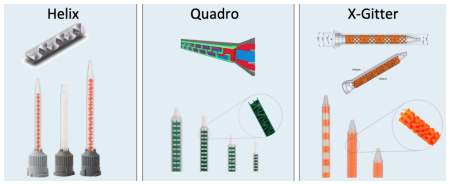
Homogenes mischen in möglichst kurzer Zeit

Statische Verfahren:

- Mischenergie aus Strömung
- Niedriger Viskositätsunterschied, 1:1 Mischung
- Einwegmischer
- Niedrige Kosten
- Für lange Topfzeiten

Dynamische Verfahren

- Bewegung durch Mischwerkzeug
- Grosse Viskositätsunterschiede
- Grosse Mischverhältnisse
- Kurze Topfzeiten
- Reinigung nach Gebrauch nötig



Förderund und Dosierung:

- Zahnradpumpen, Kolbenpumpen, Membranpumpen, Schlauchpumpen, Extruder
- Manuell, Halb- und Vollautomatisch



Lagern:

- Beutel, Kartuschen, Dosen, Fässer, Kanister, Flaschen, Tuben
- Achten auf Vorschriften: Temperatur, Feuchtigkeit
 - Dispersionsklebstoffe vor Gefriertemperaturen schützen

Prüftechnik

Festigkeitsberechnung

- Bestimmung reiner Festigkeitswerte nicht möglich
- Exentrische Kraft führt zu Biegung und Zug
- Überlappungsenden führen zu Rissbildung
- Vergrösserung der Länge führt nicht zur Vergrösserung der zu übertragenden Kraft
- Einfluss auf Festigkeit während der Anwendungszeit:
 - Korrosionsbeständigkeit
 - Alterungsbeständigkeit
 - Wärmestandfestigkeit

$$\sigma = \frac{F}{b}$$
$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot l_u}$$

τ = Zugscherfestigkeit [N/mm^2][MPa]

σ = Schälfestigkeit [N/mm]

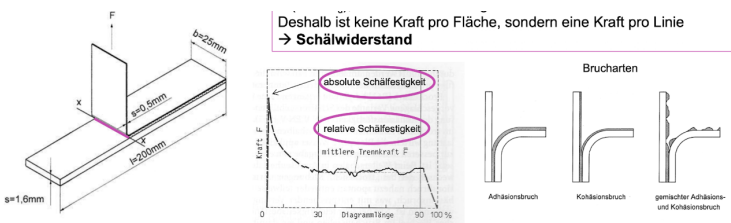
b = Probenbreite [mm]

l_u = Überlappungslänge [mm]

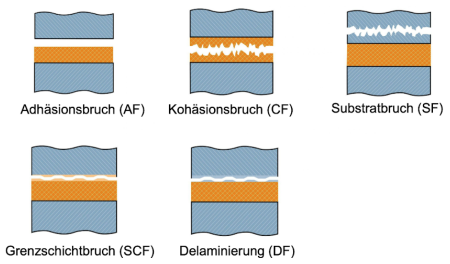
$l_u \approx 10 \cdot s$ für metallische Werkstoffe

Schälversuch:

- Kraft pro Linie



Bruchbilder:



Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Adaption der Metall-Verfahren auf Klebstoffe.

- Sichtprüfung, Klopftest
- Ultraschallprüfung
- Röntgen-Durchstrahlung
- CT, Thermographie

Defekte:

- Klebschicht:
 - zu dick/zu dünn, Porosität, Lunker
 - Risse, Fremdkörper, Verkohlung
- Adhäsionszone:
 - Delaminierung (ablösung des Klebstoffes)
- Fügeteile:
 - Risse, Bohrlöcher
 - Dellen, Kratzer, Korrosion

Ermittlung der Tragfähigkeit:

- Zugscherversuch
- Blockscherversuch
- Stirnzugversuch
- Torsionsscherversuch
- Drehfestigkeitsprüfung
- T-Schälversuch
- Biegeschälversuch

Verarbeitung und Haftung

- Topfzeit
- Fliess- und Applikationsverhalten
- Benetzbarkeit
- Raupenschälprüfung
- Dreipunktbiegeversuch

Werkstoffmechanische Kennwerte:

- Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten
- Zugscherversuch
- Bruchzähigkeit

Langzeitbeständigkeit:

- Zeitstandversuch
- Dauerschwingversuch
- Labor-Alterungsbedingungen
- Keilspaltversuch
- Immersionsversuch
- Klimaständigkeitsversuch
- Kondenswasserprüfung
- Klimawechseltest

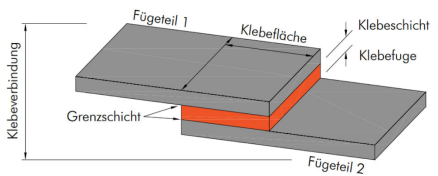
Auslegung & mechanische Belastungen

Gestaltung:

- Einfach, Eindeutig, Sicher
- Keine scharfen Umlenkungen
- Vermeidung von Spannungsspitzen
- Grosse Verformungsänderungen auf kleinem Raum vermeiden
- Schroffe Querschnittumlenkungen vermeiden
- Scher-, Schub-, Druckbeanspruchung anstreben
- Schälbeanspruchung vermeiden
- Klebefläche ausreichend dimensionieren
- Klebschichtdicke geeignet wählen
- Eingeschlossene Hohlräume vermeiden

Beanspruchung:

- Mechanische Belastung:
 - Ein/Mehrachsig
 - Statisch: Scher, Schub, Z/D, Torsion
 - Dynamisch: Schwing, Stoss, Schlag, Impact
- Medianbelastung:
 - Chemikalien, Reinigungsmittel, Feuchtigkeit
 - Einwirkdauer, -temp, Konzentration
- Strahlung:
 - UV
- Temperatur (Alterung/Festigkeit)



- Globale Betrachtung (Nenn-Spannungen):
 - Einfach, auf die Klebefläche bezogen
 - Einachsiger Spannungszustand
 - Ohne Berücksichtigung von Spannungsspitzen
- Lokale Betrachtung:
 - Analytische, linearelastische Lösungen
 - Numerisch Verfahren (FEM)
 - Anwendung in Luftfahrt und Fz-Bau

Dünne, strukturelle Klebschichten:

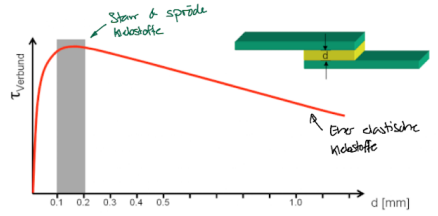
- Reine Zugbelastung, Stirnseitig verklebt, zentrische Krafteinleitung: $\sigma_{zul} = \frac{\sigma_s}{S}$
- Einseitig überlappte Verbindung:
 - Volkersen-Ansatz

$$\tau_B = \tau_{B,max} \sqrt{\frac{2d}{G}} \sqrt{E} \frac{\sqrt{s}}{l_u} = K \cdot M_B \cdot f$$

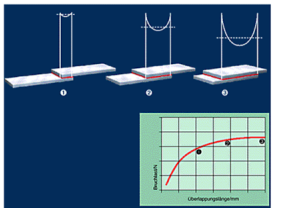
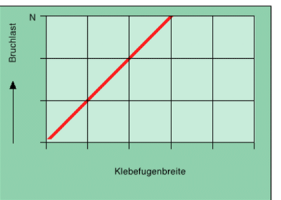
τ_B = Klebefestigkeit [MPa]
 $\tau_{B,max}$ = max. Bruchscherspannung [MPa]
 G = Schubmodul [MPa]
 d = Klebschichtdicke [mm]
 K = Klebstofffaktor

E = E-Modul des Fügeteils [MPa]
 M = Metallfaktor

s = Fügeteildicke [mm]
 l_u = Überlappungslänge [mm]
 f = Gestaltfaktor



- Bruchlast erhöht sich proportional mit der Vergrößerung der Klebefugenbreite.
- Die Überlappungslänge führt zu einer nicht linearen Erhöhung der Bruchlast. Es entstehen Spannungsspitzen.



Flexible, Gummiartige Klebschichten:

- Festigkeiten & Steifigkeiten geringer
- Homogene Spannungsverteilung
- Linearität zwischen Überlappungslänge und Festigkeit
- Spannungsspitzen = Verhältnis G/E, je kleiner, desto geringer
- Oft: Klebschichtdicke d = gesamte Verschiebung Δu

Hinreichende Dimensionierung:

$$A_{min} = b \cdot l_u = \frac{F}{\sigma}$$

Relativverschiebung durch Temperatur:

$$\Delta u = L - 0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)$$

α = Ausdehnungskoeffizient
 T = Temperatur [K]

Minimal erf. Klebschichtdicke bei max Scherung:

$$d_{min} = \frac{(\Delta u / 2)}{\tan \gamma_{zul}}$$

Zulässige Spannung:

$$\sigma_{zul} = \sigma_s \cdot \sum \frac{f_i}{S}$$

f_i = Abminderungsfaktoren:

- Temperatureinfluss
- Medieneinfluss
- Geometrischer Einfluss
- Statische Dauerbelastung

Beispiel:

Fügeteilwerkstoff (Chrom-Nickelstahl)	X5CrNi18 9 ($R_m=185$ N/mm ²)
Fügeteildicke	1.5mm
Überlappungsbreite	60mm
Zu übertragende Dauerlast bei einer Schwingpielfrequenz von 25min ⁻¹	8000 N
Betriebstemperatur	60°C
Umgebung	75%rH
Klebstoff	2K Epoxy
Klebefestigkeit	24 N/mm ²

Wie gross ist die einzusetzende Überlappungslänge?

Abminderungsfaktoren:

Dauerfestigkeit → Wohlerkurve bei 10⁷ Lastwechsel = 15 N/mm² → 62.5%
Temperatureinfluss → 20 N/mm² → 83.3%
Feuchtigkeitseinfluss → künstliche Alterung → 30%

Gesamtanminderungsfaktor = 0.625 * 0.833 * 0.3 = 0.156

Reale Klebefestigkeit = 3.74 N/mm²

$$\tau_{real} = F / (l_u \cdot b) \rightarrow l_u = F / (\tau_{real} \cdot b) = 8000 / (3.74 \cdot 60) = 35.7mm$$

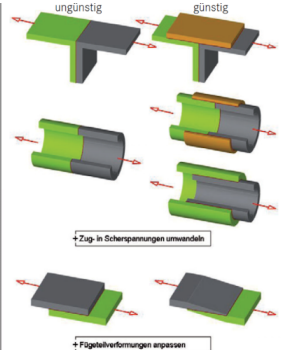
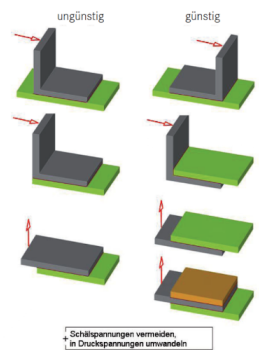
Normen und Arbeitsschutz

Gefährdungen:

Aufnahme durch	Wirkung und Folgen
Kontakt (Berührung mit der Haut)	reizend, toxisch, Dermatosen, allergische Ekzeme
Inhalation (Lunge, Aufnahme über Atmung)	reizend, toxisch, allergisches Asthma
Resorption (innere Organe, Nervensystem, Aufnahme über Verdauungstrakt)	reversible Funktionsstörungen, irreversible Funktionsstörungen, Entstehung von Tumoren

Schutzmassnahmen:

Klebstoffe	Klebtechnologie	Mensch
Geringer Lösungsmittelgehalt nutzen	Geschlossene Systeme für Bereitstellung, Transport und Mischung	Arbeitsmedizinische Untersuchungen
Flüssige durch feste Klebstoffe ersetzen	Automatisierter Einsatz / Dosierung	Schutzkleidung
Vermeidung von Reaktionsprodukten	Geringe Verschmutzung	Atenschutzmaßnahmen
Lösungsmittel durch wässrige Systeme ersetzen		



DIN 2304

- Ziel: Transparenter/reproduzierbaren auf den Klebstoff abgestimmten Prozess
- Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit
- Auf Klebstoff abgestimmter Prozess = individuelle Lösung

Grundlagen

- Kleben ist gemäss DIN 9001 ein **spezieller Prozess**
- Ergebnis kann nicht vollständig durch Prüfung verifiziert werden => **Fehler müssen von Anfang an verhindert werden**
- Rund 90 % aller Klebfehler sind Anwendungsfehler
- DIN 2304-1 definiert Anforderungen an Klebprozesse und sichert die Qualität klebtechnischer Arbeiten

Charakter der Norm

- **Anwendernorm** (richtet sich an Verarbeiter, nicht an Klebstoffhersteller).
- Keine Vorgaben für Herstellung/Prüfung von Klebstoffen.
- Keine Zertifikate für klebstoffbezogene Eignung.
- Die Anwendung ist freiwillig (Normen sind keine Gesetze).
- Fokus auf **tragende/strukturelle Klebverbindungen**.

Geltungsbereich – gilt nicht für

- Nicht-strukturelle Klebungen (ohne mechanische Last).
- Klebungen, deren Herstellung bereits durch andere Normen oder Zulassungen geregelt ist.

Anforderungen und Inhalte

- Betrachtung des **gesamten Klebprozesses** (Entwicklung – Fertigung – Instandsetzung).
- Gilt für alle:
 - Klebstoffklassen
 - Werkstoffkombinationen
 - Branchen und Anwendungen
- **Klassifizierung von Klebverbindungen nach Sicherheitsklassen** inkl. Folgenabschätzung bei Versagen.
- **Festlegung von Verantwortlichkeiten** und Qualifikationsanforderungen für das klebtechnische Personal.
- **Nachweisführung:** reale Beanspruchung muss kleiner sein als die maximal zulässige Beanspruchung.
- Einbindung in ein Qualitätsmanagementsystem (z. B. ISO 9001).

Zielsetzung

- Aufbau eines **transparenten, reproduzierbaren und dokumentierten Klebprozesses**.
- Sicherstellung von **Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit**.
- **Prozess muss auf den Klebstoff abgestimmt** sein (individuelle Lösung).

Klassifizierung

S1 – Hohe Sicherheitsanforderung

- Führt Mittel- oder unmittelbar zu **unabwendbaren Gefahr für Leib und Leben**
- Ausfall der Funktionalität, dessen Auswirkungen **höchst wahrscheinlich** zu einer **unabwendbaren Gefahr für Leib und Leben** führen

S2 – Mittlere Sicherheitsanforderung

- **kann** zu Gefahr für Leib und Leben führen
- Ausfall der Funktionalität, dessen Auswirkungen **wahrscheinlich** mit **Personenschäden oder großen Umweltschäden** verbunden sind.

S3 – Geringe Sicherheitsanforderung

- führt zu Funktionsausfall, dessen Auswirkungen **wahrscheinlich nicht** mit Personenschäden oder grossen Umweltschäden verbunden sind
- führt zu Funktionsausfall, dessen Auswirkungen **maximal Komfort- oder Leistungseinbußen** verursachen

S4 – Keine Sicherheitsanforderung

- führt zu Funktionsausfall, dessen Auswirkungen **nicht** mit Schäden gegenüber Personen oder Umwelt verbunden sind
- führt zu Funktionsausfall, dessen Auswirkungen **ausschließlich Komfort- oder Leistungseinbußen** verursachen.

	Klasse der Klebverbindungen		
	S1	S2	S3
Klebaufsichtspersonal (KAP)	Expertenwissen, wie z. B. EAE (a)	erweiterte Kenntnis-se, wie z. B. EAS (a)	Grundkenntnisse, wie z. B. EAB
ausführendes Personal	Grundkenntnisse wie z. B. EAB	Grundkenntnisse, wie z. B. EAB	Grundkenntnisse, wie z. B. EAB oder ohne Qualifikation (b)
a	KAP darf in dieser Funktion nicht gleichzeitig Ausführender sein.		
b	Entscheidung mit Begründung durch KAP. Beschränkung auf einzelne Klebungen, Einweisung erforderlich.		

Advanced Metals

Veränderungen bei hohen Temperaturen:

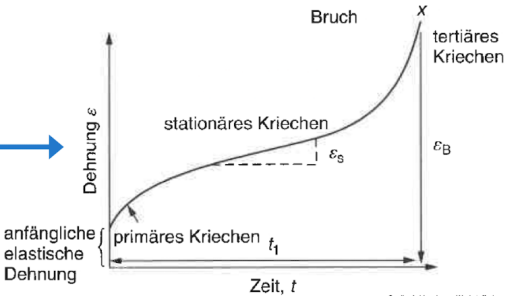
- Stabilität der Phasen (Gefügezusammensetzung)
- Thermisch aktivierte Prozesse (bsp. **Diffusion**)
- Änderung der Randbedingungen:
 - Angenommene, max. Einsatztemp: $T \leq \frac{1}{3} T_{\text{Schmelz}}$
 - Höhere Temp. = Veränderung der Struktur, Kriechen
 - $\epsilon = f(t) \neq \text{const}$

Unterschiede mechanische Eigenschaften & Verfestigungsmechanismen:

$T < 0,4 T_s$	$T > 0,4 T_s$
Festigkeitswerte sind zeitunabhängig.	Festigkeitswerte sind zeitabhängig
Versetzungsstrukturen sind bei $\sigma = \text{konst.}$ „eingefroren“.	Versetzungen sind ständig in Bewegung (Kletten von Versetzungen)
Plastische Verformung erfolgt nur oberhalb der Streckgrenze.	Plastische Verformung erfolgt praktisch bei allen Spannungen (Kriechen).
Der Verformungszustand stellt sich nahezu zeitunabhängig ein.	Der Verformungszustand ist zeitabhängig.
Die Korngrenzen bewegen sich nicht gegeneinander; Diffusion trägt nicht zur Verformung bei.	Körner können entlang von Korngrenzen aneinander abgleiten. Diffusionsvorgänge können einen Verformungsbeitrag liefern.

Mechanismus	Kaltverfestigung	Feinkornhärtung	Mischkristallhärtung	Ausscheidungs-härtung
$T < 0,4 T_s$	++	+	+	+
$T > 0,4 T_s$	0 oder -- (Rekristallisation)	-- Korngrenzen-gleiten!	+	++

Kriechkurve/Kriechschädigung:



- Stationäres Kriechen = konstante Dehnrate im mittleren Bereich
- Lebensprognose wird in diesem Teil der Kurve gemacht
- Kriechschädigung: Bildung von Poren (im teriträren Bereich)
- Hohlräume bilden sich an Korngrenzen aus
- Nachweis durch Röntgen/Ultrasschall/CT-Scan

$\epsilon_{SS} = B \sigma^n$

Nickelliegierungen

Eigenschaften:

- 0.02% in äusserer Silikatkruste, aufwendige Trennung aus Erzen
- $T_s = 1453$, kfz, E-Modul = 197-225 GPa
- $R_m = 320 MPa$, Bruchdehnung 28%, ferromagnetisch

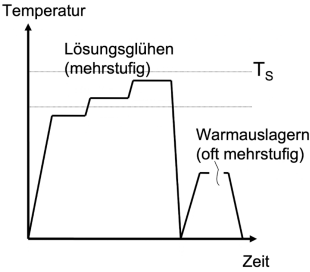
Produktion und Einsatz:

- 90% = Herstellung austenitischer Stähle
- 10% = Nickelbasislegierungen → Korrosionsbeständigkeit
 - Hohe Löslichkeit von Cr in Ni
 - Cr steigert passivierung des Ni
- Nickelbasis-Superlegierungen
 - Hohe Warmfestigkeit bis 1100°C
 - Gute Duktilität trotz hoher Festigkeit
 - Teuer

Nickelbasis Superlegierungen:

Komplexe Geometrien durch Guss. Bis zu 16 Legierungselemente.

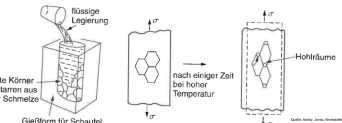
- Al, Ti, Ta: Ausscheidungshärtung durch γ Ausscheidungen
- Mo, Co, Ta, W, Cr, Re: Mischkristallhärtung
- B, C, Zr, Hf: Korngrenzenstabilisierung
- Al, Cr: Korrosionsschutz/ Hochtemp-korrosionsschutz



Unterschiede Konventioneller Guss vs. Gerichtete Erstarrung

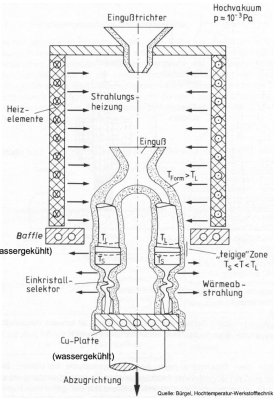
Konventionell:

- Entstehung von feinem Korn führt zu Porenbildung an Korngrenzen
- Schnellere Abkühlung = kl. Körner
- Erste Poren: an Korngrenzen senkrecht zur Belastung



Gerichtet:

- Hochvakuum 10^{-8} bar
- Wärmeentzug in eine Richtung: beeinflussung des Kornwachstums
- Dendriten wachsen entlang der Temperaturgradienten
- Abzugsgeschwindigkeit = Erstarrungsgeschwindigkeit
- Drehung um Längsachse verhindert Wachstum benachbarter Körner → Einkristall



Smart Materials (Formgedächtnislegierungen)

- Legierungen müssen martensitische Umwandlung zeigen
- Mischkristalle von Elementen mit allotroper (mehrere Strukturen in einem Aggregatzustand) Umwandlung: Ti, Mn, Fe, Co, Sn
 - NiTi-Austenit: kubisch primitives Gitter
 - NiTi Martensit: monoklines Gitter
- Verschiebung von Zwillingsgrenzen ermöglicht grosse Deformation
- Ni: Grosser Einfluss auf A_f
- Hohe Arbeit pro Aktorvolumen (10x mehr als Hydraulik)

1-Weg Effekt:

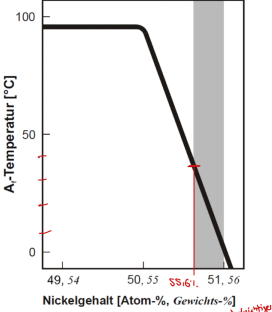
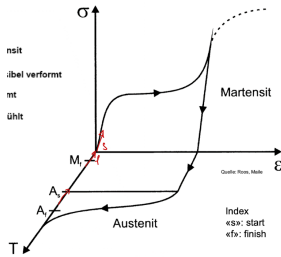
1. Belastung bei Raumtemperatur → Verformung
2. Verformung bleibt
3. Wärmebehandlung: $T > A_f$
4. Einnahme der ursprünglichen Form

2-Weg Effekt:

1. Erwärmen = Verformung
2. Abkühlung = Ursprüngliche Gestalt

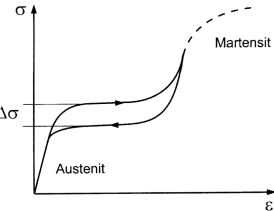
Pseudoelastizität:

1. Belasten bei Raumtemperatur = Verformung
2. Entlastung = Ursprüngliche Gestalt



Pseudoelastizität

- Martensitstruktur mit Vorzugsrichtung in Spannungsrichtung
- Hohe reversible Verformung
- Hohe Verformung mit geringer Spannungsänderung
- Rückumwandlung auf einem tieferen Spannungsniveau

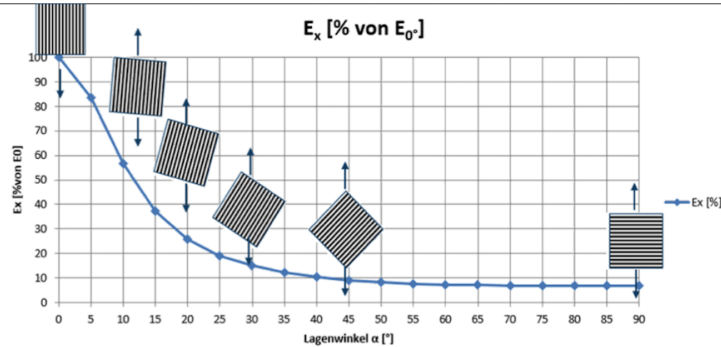


Faserverbundwerkstoffe

$$1tex = \frac{1kg}{km} \quad 1den = \frac{9g}{km} \quad G = \frac{E}{2(1+v)}$$

Werkstoff	E-Modul MPa		Zugfestigkeit in MPa	
	experimentell		experimentell	
	Faser	Kompakt	Faser	Kompakt
Polyethylen	100'000	1'000	1'500+	30
Polypropylen	20'000	1'600	1'300	38
Polyamid	5'000	2'000	1'700	50
Glas	80'000	70'000	4'000	55
Stahl	210'000	210'000	4'000	1400
Aluminium	72'000	72'000	800	600

GFK	E-Glasfaser	Epoxidharz	UD-Laminat	Gewebe-Laminat
Dichte g/cm³	2.53	1.15	1.98	1.98
Zugfestigkeit N/mm²	2400	72	1070	400
E-Modul N/mm²	73000	3300	48000	22000
Bruchdehnung	2.2 %	4.7	---	---
Kevlar 49 (HM)	Aramidfaser	Epoxidharz	UD-Laminat	Gewebe-Laminat
Dichte g/cm³	1.45	1.15	1.35	1.35
Zugfestigkeit N/mm²	3600	72	1400	560
E-Modul N/mm²	127000	3300	76000	30000
Bruchdehnung	2.2 %	4.7	---	---
CFK	Kohlefaser HT	Epoxidharz	UD-Laminat	Gewebe
Dichte g/cm³	1.78	1.15	1.56	1.56
Zugfestigkeit N/mm²	3500	72	1450	620
E-Modul N/mm²	235000	3300	131000	54000
Bruchdehnung	1.4 %	4.7	---	---



Textile Fasern & Fasergarne

Textile Fasern

- Grosses Längen/Durchmesserverhältnis
- Hohe spezifische Festigkeit/Steifigkeit
- Natürliche Fasern (z. B. Flachs, Hanf, Sisal)
- Synthetische Fasern (z. B. Glas-, Kohlenstoff-, Aramidfasern)
- Hohe spezifische mechanische Kennwerte
- Gute Risshemmung und schadenstolerantes Versagen
- Ermöglichen anisotropes, lastgerechtes Materialdesign

Fasergarne

- Bestehen aus Einzelfilamenten
- Filamentgarne (kontinuierliche Fasern)
- Rovings (ungezwirnte Filamentbündel)
- Tapes und UD-Bänder mit hoher Faserausrichtung
- Beeinflussen Verarbeitbarkeit & mechanische Eigenschaften der Halbzeuge

Textile Verstärkungsstrukturen und Anwendungsbereiche

- Gewebe
- Gelege (unidirektional, multiaxial)
- Geflechte
- Matten und Wirrfaserhalbzeuge

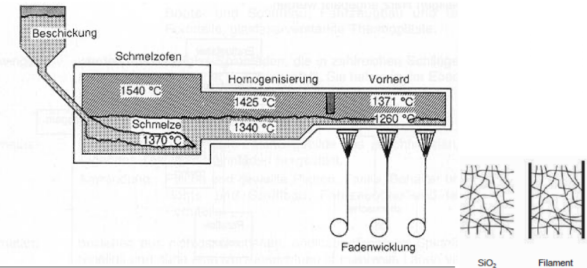
Typische Anwendungsbereiche:

- Luft- und Raumfahrt
- Automobil- und Fahrzeugbau
- Bauwesen und Infrastruktur
- Sport- und Freizeitindustrie
- Energie- und Druckbehältertechnik

Steckbriefe Hochleistungsfasern

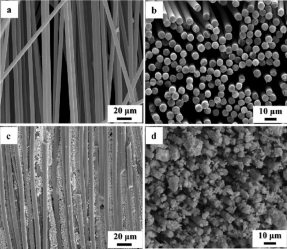
Glasfaser

- Dichte: ca. 2.5 g/cm³
- Elastizitätsmodul: ca. 70–80 GPa
- Bruchdehnung: 3.3-4.8%
- Hohe Zugfestigkeit bei moderaten Kosten
- Gute chemische Beständigkeit
- Elektrisch isolierend
- Anwendung in Kostensensitiven Bereichen
- Windenergie/Bootsbau



Kohlenstofffaser

- Dichte: ca. 1.7–1.8 g/cm³
- Festigkeit: ca. 1500 MPa -7000 MPa
- Elastizitätsmodul: ca. 220–500 GPa
- Sehr hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit
- Negative Wärmeausdehnung in Faser-richtung
- Elektrisch und thermisch leitfähig
- Sprödes Bruchverhalten
- Korrosionsbeständig
- Fast dauerschwingfest
- Anwendung: hochbelastete Leichtbaustrukturen (Luftfahrt, Druckbehälter)



Aramidfaser

- Dichte: ca. 1.45 g/cm³
- Sehr hohe Zugfestigkeit (stark anisotrop) ca. 1800 MPa
- Steifigkeit ca. 80 GPa
- Gute Energieabsorption bei Schlag- und Stossbelastung
- Schwache Druckeigenschaften (ca. 230 MPa)
- Feuchtigkeitsaufnahme und UV-Empfindlichkeit
- Schwierige Bearbeitbarkeit
- Chemisch nicht sehr beständig
- Anwendung: Schutz und Sicherheitsstrukturen

Textile Verstärkungsstrukturen

Grundlegende Aufgaben textiler Verstärkungsstrukturen

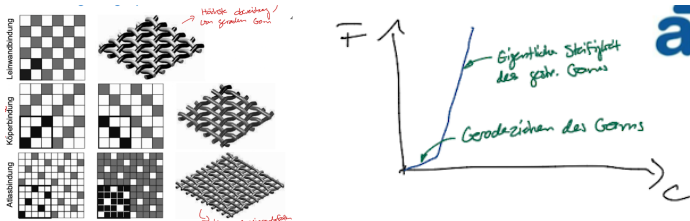
- Lastaufnahme und Lastübertragung im Verbund
- Einstellung der anisotropen mechanischen Eigenschaften
- Gewährleistung der Verarbeitbarkeit und Drapierfähigkeit
- Anpassung an komplexe Bauteilgeometrien

Gewebe

Gewebe bestehen aus zwei sich kreuzenden Fadensystemen (Kette und Schuss), die rechtwinklig zueinander angeordnet sind.

- Gute Formstabilität
- Relativ hohe Schubsteifigkeit
- Geringere Faserausnutzung durch Fadenkrümmung
- Gute Handhabbarkeit und Drapierbarkeit
- Günstig & gute Handhabung
- Anwendung: Verkleidungen, Sportgeräte, Bootsrümpfe (Klein & Mittelserie)
- Bauteile mit moderater Belastung

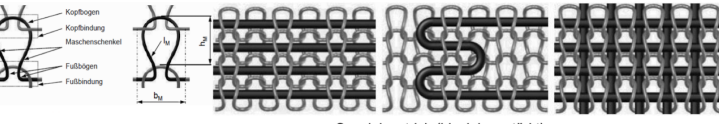
Gewebe werden häufig für flächige Bauteile mit moderaten mechanischen Anforderungen eingesetzt.



Gestricke

Wenig technisch relevant (im Composit Bereich).

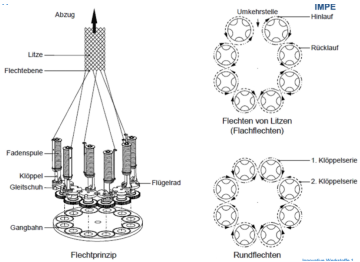
- Oft für KLeider genutzt
- Eher langsame und Aufwändige Produktion
- Hohe Designfreiheit
- Bessere elastizität, Biegefestigkeit, Lebensdauer als Gewebe



Geflechte

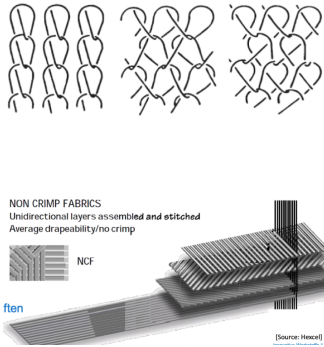
Geflechte entstehen durch das diagonale Verflechten von Fasergarnen um eine Achse oder einen Kern.

- Gute Anpassung an rotationssymmetrische Geometrien
- Hohe Schadenstoleranz
- Geeignet für Druck- und Torsionsbelastung
- Produktion von Seilen, Antennen, el. Leitungen, Schnürsenkel
- Heute: Rohre, Hohlprofile, Druckbehälter und andere Verkleidungen



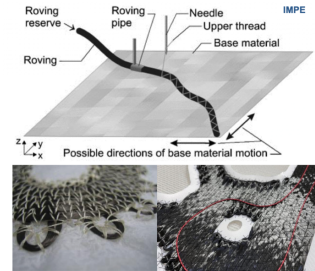
Gelege/Gewirke
Gelege bestehen aus mehreren Lagen unidirektionaler Fasern, die in definierten Orientierungen abgelegt und durch Näh- oder Binfäden fixiert werden.

- Sehr hohe Faserausrichtung
- Optimale Lastpfadanpassung
- Hohe mechanische Effizienz
- Geringe Faserkrümmung (Keine gestreckten Fasern)
- Schädigung der Struktur durch Verwirken der Lagen
- Ausrichtung entscheidet über Festigkeit
- Sehr grosse Anlagen zum Vorlegen der Fäden in bestimmten Ausrichtungen
- Kombination mehrerer Materialien möglich



Gesticke

- Grundlage: Stickprozess
- Variable Führung eines Verstärkungsrowings wird an ein Trägergewebe gestickt
- Komplexe Vertärkungsgeometrien
- Lastangepasste Preform



Matten und Wirrfaserstrukturen Bei Matten sind die Fasern kurz und statistisch orientiert.

- Nahezu isotropes Verhalten
- Geringe mechanische Kennwerte
- Gute Formfüllung
- Kostengünstige Herstellung
- Wenig hochbelastet, einfache Geometrien

Textile Preforms
Textile Preforms sind dreidimensional vorgeformte Verstärkungsstrukturen, die bereits vor der Imprägnierung die Bauteilgeometrie abbilden.

- Reduktion von Verschnitt
- Gute Reproduzierbarkeit
- Eignung für automatisierte Fertigungsprozesse

Faserverbunde

Kombination positiver Eigenschaften. Unterteilung nach Verstärkung. Anforderungen an chem. + phys. Verträglichkeit.

Vorteile	Nachteile:
• Niedriges spez. Gewicht • Hohe Festigkeit • Geringe Wärmeausdehnung • Ausnutzung Anisotropie • Gutes Dämpfungsvermögen • Chermisch beständig (+ Matrix)	• Niedrigere Wärmeformbeständigkeit (als Metalle) • Auslegung anspruchsvoll • Kriechneigung • Nicht recyclebar

Hochleistungsanwendung:	Standardanwendungen:
• Luft & Raumfahrt • Hochleitungssport • Fz-Bau (Federn, Drucktanks) • Elektrotechnik (Antennen, Isolatoren)	• Fz-Technik (Karosserie, Innenverkleidung) • Bautechnik (Silos, Wasserbecken) • Elektrotechnik (Schränke/Gehäuse)

Maxtrixmaterialien

Die Matrix erfüllt im Faserverbund mehrere zentrale Funktionen:

- Kraftübertragung zwischen den Fasern
- Schutz der Fasern vor Umwelteinflüssen und mechanischer Schädigung
- Formgebung und Stabilisierung der textilen Verstärkungsstruktur
- Aufnahme von Quer- und Schubspannungen

Anforderungen:

- Formgebendes Element
- Mechanische/thermische Festigkeit
- El. Leitfähig / isolierend
- Geringe Wasseraufnahme
- Niedrige Viskosität

Duroplaste:

- Für Hochleistungsanwendung
- Irreversible Aushärtung
- Hohe Temp & Kriechbeständigkeit
- Gute Mech Eigenschaften
- Polyesterharze (UP), Epoxi usw.

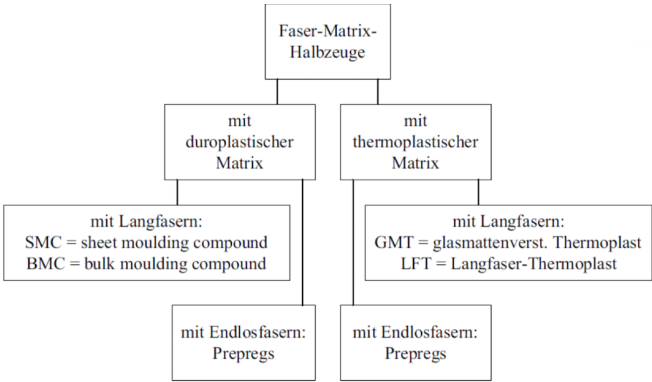
Anforderungen:

- Gutes Benetzungsvermögen an Fasern
- Niedrige Dichte
- ϵ Matrix > ϵ Faser
- Günstiger Preis

Thermoplaste:

- Schnelle Verbundbildung
- Schmelzbar und Reparierbar
- Gute Schlagzähigkeit
- Besser recycelbar
- PEEK, PA, PP, PES

Vorkonfektionierte Halbzeuge



Vorimprägnierte Faser-Matrix Halbzeuge:

- Härtbare Formmassen (BMC [6-25mm], SMC [20-50mm]) 20-30% Faser und Fenolharz gelöst
- Heisspressverfahren, Spritzpressverfahren
- Spritzgussverfahren (sehr kleine Fasern benötigt)
- Strangpressverfahren
- BMC: Kriechen weil keine Enlofasern
- SMC: Platte-FlieSS Verbund, niedrige Kosten, bsp: Tablar in Medianbelastung
- Prepreg: flächige Matten, mit EP-Harz ausgerüstet, Teuer

Laminattheorie

- Polymere, Metalle, Keramik = Isotrop und homogen
- Holz, armierter Beton, Faserverbund = anisotrop
- **Orthotropie:** Richtungsabhängigkeit der mech. Eigenschaften, 3 orthogonale Richtungen
 - 9 unabhängige Materialkennwerte: $E(1-3)$, $G(12,23,31)$, $\nu(12,23,31)$
 - Herausfinden durch Zug-, Biege-, Schubversuchen
- **Transversale Isotropie** (UD-Laminat)
 - Hauptachse in Faserrichtung
 - Werkstoffverhalten senkrecht dazu ist überall gleich
 - Geringe Festigkeit quer zur Faser
 - 6 unabhängige Materialkennwerte: $E(1,2)$, $G(12,23)$, $\nu(12,23)$

Grundregeln Laminataufbau:

- Symmetrisch bezüglich der Ebene zur Vermeidung von Verzug
- Nie mehr als 3 Lagen der gleichen Orientierung aufeinander (Eigenspannungen)
- Quasiisotroper Aufbau möglichst in gleichmässigen Sequenzen
- Oberste Lage in Lastrichtung, nie mehr als 45° zur Lastrichtung
- Nicht mehrere 90° Lagen (quer zur Lastrichtung) aufeinander. um Schubkräfte zu verhindern
- (Äusserte Lagen 45°/-45° bevorzugen → Damage Tolerance Gründe)
- Mindestens 10% der Lagen: 90°/45°/-45°/0° → Matrixbelastung reduzieren
- Bereich von Befestigungselemente (Nieten): Quasi-Isotroper Aufbau

Rechenregeln UD-Schicht:

$$E_{\text{Verbund}} = \sum_i E_i \frac{A_i}{A_{\text{ges}}} = \frac{1}{A_{\text{ges}}} (E_M A_M + E_F A_F) \approx \frac{E_F A_F}{A_{\text{ges}}}$$

$$E_{\text{Verbund}} = E_F \varphi + (1 - \varphi) E_M \approx E_F \varphi$$

$$\text{Faservolumenanteil: } \varphi = \frac{A_F}{A_{\text{ges}}}$$

$$\text{Matrixvolumenanteil: } 1 - \varphi = \frac{A_M}{A_{\text{ges}}}$$

$$E_{\text{Verbund}} = E_F \varphi \cdot \gamma$$

E_{Verbund} = Steifigkeit Faserverbund
 E_F, E_M = Steifigkeit der Faser/Matrix
 A_F, A_M = Flächen/Volumenanteile der Faser/Matrix
 γ = Wirksamkeitsfaktor der Faser

	γ			
	0°	45°	90°	
Unidirectional	1	0,25	0	Roving / Tape
Bidirectional	0,5	0,25	0,5	Gewebe
Multidirectional	0,375	0,375	0,375	Matte (Wirr)
Kurzfaser	0,2	0,2	0,2	BMC

Technisch realisierbare Volumengehalte:

- UD: $\varphi = 0.5-0.75$, BD: $\varphi = 0.3-0.5$
- MD: $\varphi = 0.2-0.4$, KF: $\varphi = 0.2-0.5$

Faservolumenanteil:

$$\varphi = \frac{V_F}{V_{Verbund}} = \frac{A_F}{A_{Verbund}}$$

Fasermassenanteil:

$$\psi = \frac{m_F}{m_{Verbund}}$$

$$\psi_F = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varphi_F}{\varphi_F} \frac{\rho_M}{\rho_F}}$$

$$\varphi_F = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi_F}{\psi_F} \frac{\rho_F}{\rho_M}}$$

Belastung in Faserrichtung:

$$\sigma_{Verbund} A_{ges} = E_{||} \varepsilon_{||} \quad A_{ges} = (E_F A_F + E_M A_M) \varepsilon_{||}$$

$$E_{||} = E_F \frac{A_F}{A_{ges}} + E_M \frac{A_M}{A_{ges}}$$

$$E_{||} = E_F \varphi + E_M (1 - \varphi)$$

Belastung quer zur Faserrichtung:

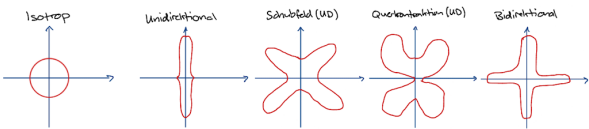
$$E_{\perp} = E_M \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{E_M}{E_{F\perp}} \varphi}$$

Ideale Schubbelastungen:

$$G_{12} = G_M \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{G_M}{G_{F12}} \varphi}$$

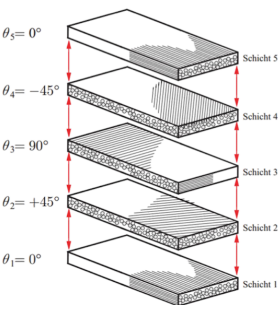
$$G_{23} = G_M \frac{E_{\perp}}{2(1 - \nu_{\perp||})}$$

- Bruchdehnung der Matrix > Faser
- Quer zur Faser = nur Matrix
- Haftfestigkeit Matrix-Faser > Matrixfestigkeit
- Druckfestigkeit bestimmt durch Matrix

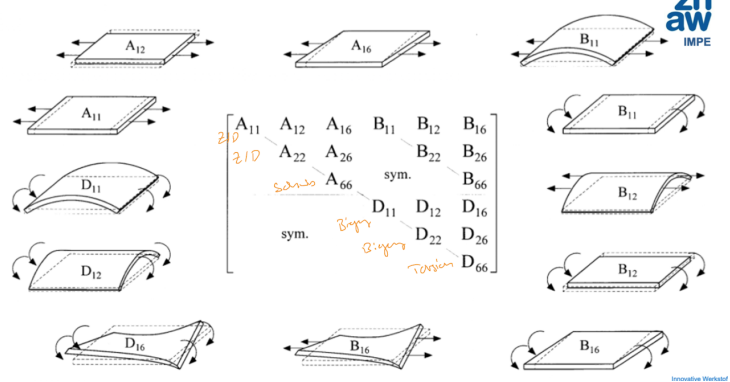


Mehrschichtverbund

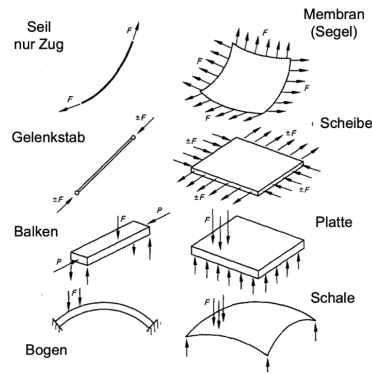
- Eigenschaften entstehen durch Lagenkombination
- 0° Lagen: Zug/Druck
- +/- 45° Lagen: Schub
- 90° Lagen: Querstabilität
- Sym. Aufbau verhindert Biege-Dehn-Koppelung und Verzug
- Lasten und Spannungen müssen Lageweise betrachtet werden
- Versagen durch: Faserbruch, Delamination, Matrixrissebildung, Faser-Matrix entkoppelung



Koppelphänomene bei Mehrschichtverbunden



Leichtbauelemente

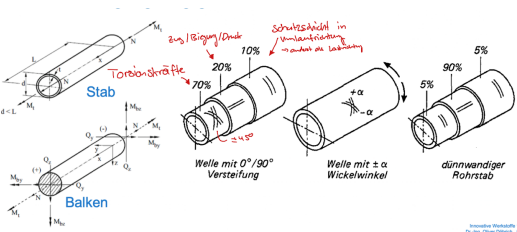


Stäbe:

- Übertragen überwiegend Zug- und Druckkräfte
- Fasern werden vorzugsweise in Stabrichtung (0°) ausgerichtet
- Bei Druckstäben ist die Knickstabilität auslegungsbestimmend
- Typische Anwendungen sind Zugstäbe, Streben und Fachwerke

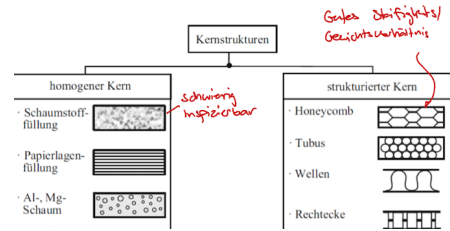
Flächenelemente (Platten und Schalen)

- Tragen Zug-, Druck-, Biege- und Schubbelastungen
- Lastaufnahme erfolgt über Membran- und Biegeanteile
- Der Laminataufbau bestimmt Steifigkeit, Stabilität und Versagen
- Schalen sind besonders effizient bei Flächenlasten



Sandwichstrukturen

- Bestehen aus zwei steifen Decklagen und einem leichten Kern
- Decklagen tragen Zug- und Druckspannungen
- Der Kern überträgt Schubspannungen und stabilisiert gegen Beulen
- Sehr hohe Biegesteifigkeit bei geringem Gewicht
- Typische Kerne sind Schäume oder Waben
- Schwierig inspizierbar
- Aufwändige Reparaturen
- Aluminium Wabe: bestes Schubsteifigkeits-Dichte Verhältnis



Leichtbauweisen

Differentialbauweise:

- Hohe Flexibilität
- reparatur möglich
- Austausch schwerer Werkstoffe durch leichtere Alternativen
- Bestehende Konstruktionen bleiben weitgehend erhalten
- Geringer Entwicklungsaufwand
- Begrenztes Leichtbaupotenzial
- Hoher Montageaufwand

Integralbauweise:

- Niedriges Gewicht, niedrige Montagekosten
- Hohe Anforderungen an Fertigung komplexer Bauteile
- Höhere Werkzeugkosten, geringe Flexibilität
- Reduktion von Bauteilen, Fügestellen und Verbindungselementen
- Hohe strukturelle Effizienz
- Hoher Entwicklungs- und Konstruktionsaufwand

Faserverbundwerkstoffe eignen sich besonders für den Integralleichtbau, da der Laminataufbau gezielt an den Lastpfad angepasst werden kann.

Integrierende Bauweise:

- Sinnvolle Begrenzung der Integration
- Ermöglicht Reparatur
- Einfache Elemente

Konstruktion mit Faserverbundwerkstoffen

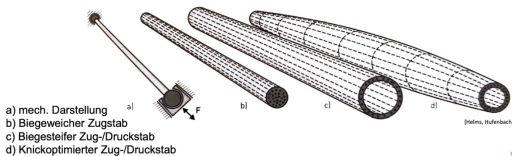
Vorteile und Anforderungen

- Schalenstrukturen:
 - Grosse und doppeltgekrümmte Schalen sind besonders vorteilhaft in Faserverbundbauweise realisierbar
 - Reduktion von Fügestellen gegenüber metallischen Strukturen
 - Einsparungen bei komplexen Werkzeugen durch integrale Bauweise
- Leichtbau:
 - Sehr hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit von Hochleistungsverbundwerkstoffen
 - Ermöglicht Struktur- und Materialeleichtbau
 - Metallischen Werkstoffen in vielen Anwendungen überlegen
- Funktionsintegration:

- Schichtweiser Aufbau und hohe Formfreiheit
- Hoher Integrationsgrad von Strukturelementen und Funktionselementen
- Integration von Sensoren und Aktoren direkt in die Struktur möglich
- Einstellbare Steifigkeit/Dämpfung:
 - Hohe Nachgiebigkeit kann bei hochbelasteten Strukturen funktional erwünscht sein
 - Faserverbunde ermöglichen grosse elastische Deformationen
 - Mechanische Eigenschaften sind gezielt einstellbar
- Hohe Dauerfestigkeit:
 - Hohe dynamische Festigkeit von Faserverbundwerkstoffen
 - Dauerfestigkeit liegt häufig nur knapp unterhalb der statischen Festigkeit
- Elektrische / Thermische Isolierer:
 - Gezielte Nutzung als elektrischer oder thermischer Isolator
 - Vorteil gegenüber Metallen durch einfache Integration elektrischer Komponenten

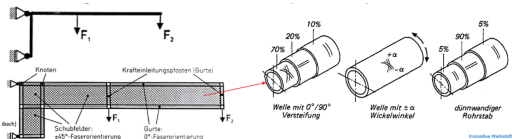
Stabtragwerke:

- Verwendung: Stützen/Abspannungen
- Fachtragwerke: Reine Zug-/Druckspannung
- Uniaxiale Belastung: Aufnahme durch Axiale Fasern



Schubfeldträger und Rahmentragwerke:

- Im Biegebalken: Schub/Zug/Druckbelastung wird zusammengefasst
- Auslegung: Trennung von Schubfelder und Gurte
- Nutzung von Hohlprofilen



Schalentragwerke:

- Geeignet für Flächenlasten (Statische/Dynamische Fluidrücke)
- Vielfältige Formgebungsmöglichkeiten
- Eigerung lokaler Biegesteifigkeit:

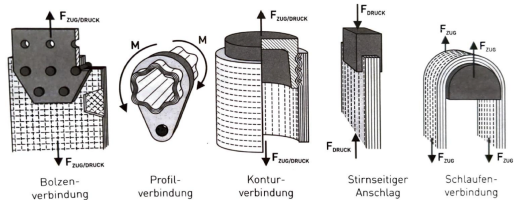


Vordimensionierung:

- Stabilitätsbetrachtungen (Knicken, Beuleb, Knittern)
- Betrachtung von Werkstoff und Fertigungsaspekten

- Voraussetzung: Korrekte Lastannahmen
- Entwurf:**
- Beanspruchungsgerechtes Gestalten
 - Viel Fläche = Übertragung der Scherkräfte
 - Gekrümmte Schalen = Vermeidung Spannungsrisse
 - Fertigungsgerechtes Gestalten
 - Ecken und Kanten = Ausreichende Radien
 - Neigungen

Krafteinleitung:



Herstellung und Fügen

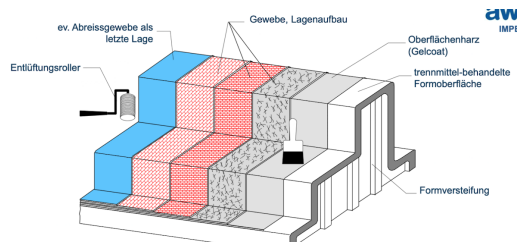
Entscheidung:

- Unterschiedliche Bauteil: Komplexität, Faserpositionierung, Qualität
- Wirtschaftlichkeit: Stückzahl, Investitionskosten
- Verfahrensparameter: Maschiell/von Hand, Druckerzeugung, Wärmeerzeugung

Duroplaste

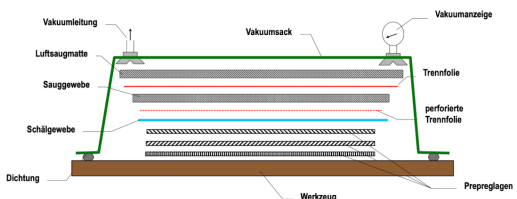
Handlaminierverfahren:

- Für Duroplaste
- Bauteil härtet ohne Druck bei Raumtemperatur
- Kleinserien; Bootsbau, Segelflugzeuge, Modellbau



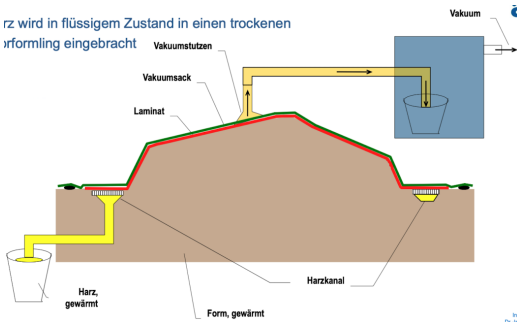
Vakuumsackverfahren:

- Anpressen durch Atmosphärendruck
- Raum unter Folie wird evakuiert
- Max Druck: 1bar
- Kleinserien; Motorsport, Strukturbauteile



Vakuuminjektionsverfahren:

- Harz wird in trockenen Faserformling eingebracht
- Grossflächige Bauteile
- Mittelserien
- hohe Qualitätsanforderungen, ohne Autoklav



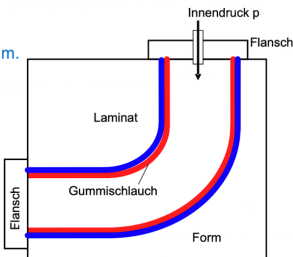
Autoklavverfahren mit Prepreg:

- Höchste Laminatqualität
- Standard in Luftfahrt
- Einstellbare Temperatur: 100-400°C
- Einstellbarer Überdruck 1.5-25 bar
- Hohebetriebskosten, nicht automatisierbar



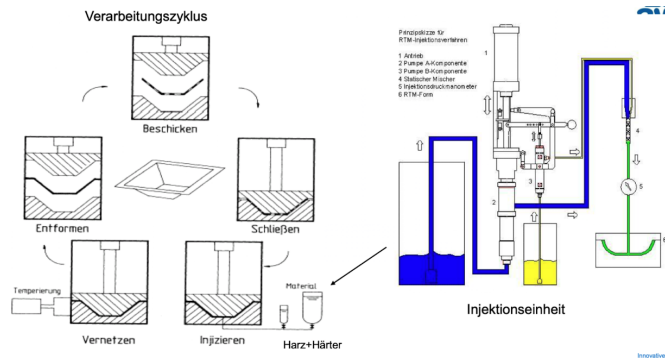
Innendruck-Schlauchverfahren:

- Mehr als 1 bar Druck gegen stabile Aussenform
- Für hohle Körper

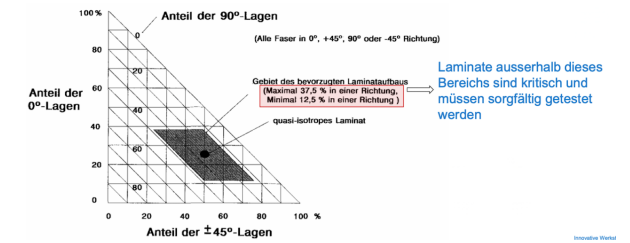
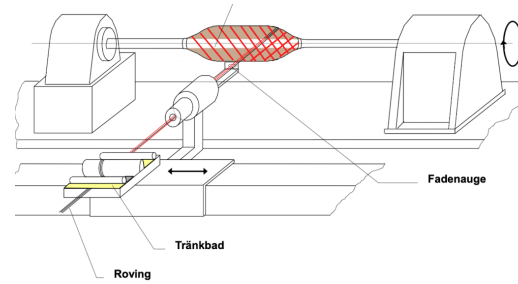


RTM (Resin tranfer molding):

- Sehr schnell
- Hohe Werkzeugkosten
- Nicht möglich für Bauteile mit Hinterschnitt
- Gefahr wegschwemmung von Fasern



- Sehr grosse, rotationssymmetrische Figuren



Berechnung:
Nietbruch:

$$F = R_s \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot i$$

R_s = Scher-Flie遡grenze
 d = Nietdurchmesser
 i = Anzahl Schnitte (Nieten · Reihen)

- Nietwerkstoff tauschen
- Nietdurchmesser erhöhen
- Anzahl Nieten anpassen

Lochleibungsfestigkeit:

$$F = R_L dt$$

R_L = Lochleibungsfestigkeit Laminat
 d = Nietdurchmesser
 t = Laminatdicke

- Lokale Verstärkung
- Mehr +/- 45° Lagen
- Nietdurchmesser erhöhen
- Anzahl Nieten anpassen

Flankenbruch:

$$F = R_m \cdot (w - d)t$$

R_m = Zugfestigkeit gebohrtes Laminat (x-Richtung)
 d = Nietdurchmesser
 t = Laminatdicke
 w = Breite des Laminats

- Randabstand erhöhen
- Bauteilbreite erhöhen
- Lokale Verstärkung in Lastrichtung (0° Lagen)
- Anzahl Nieten anpassen

Scherbruch:

$$F = R_{xy} \cdot 2 \cdot e \cdot t$$

R_{xy} = Schubfestigkeit des schwächeren Laminats (xy-Ebene)
 e = Randabstand in Lastrichtung
 t = Laminatdicke

- Laminatdicke erhöhen (Global/lokal)
- Mehr +/-45° Lagen
- Mehr/dickere Nieten

Spaltbruch:

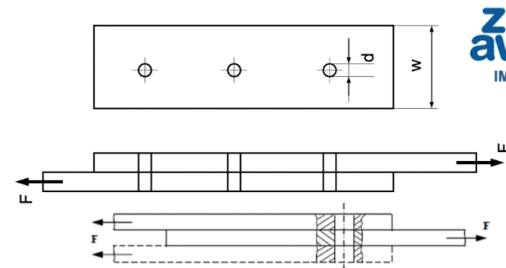
$$F = R_y \cdot (e - \frac{d}{2})t$$

R_y = Zugfestigkeit des gebohrten Laminats (y-Richtung)
 d = Nietdurchmesser
 t = Laminatdicke
 e = Randabstand in Lastrichtung

- Randabstand erhöhen
- Mehr 90° Lagen quer zur Lastrichtung
- Grössere Kopfauflage

Nieten

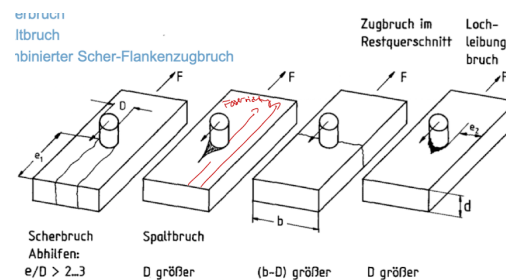
- Standard in Luft/Raumfahrt
- lösbar, nicht fasergerecht
- Medienangriff in Loch
- Ungeeignet bei Kevlar-Verbund
- Regel: $d/w \approx 0.3$



Versagensformen:

- Nietbruch
- Lochleibungsverfahren (gewünscht)
- Flankenbruch
- Scherbruch
- Spaltbruch

Alle Brucharten ausser Lochleibung → Ausfall der Verbindung.



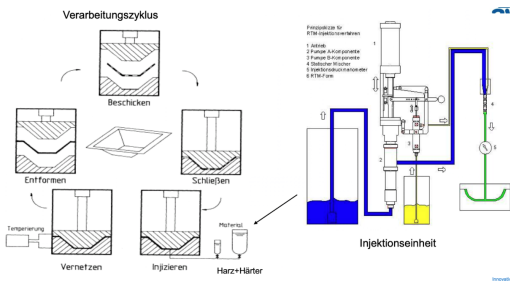
Thermoplaste

- Probleme bei der Benetzung
- Flüssige Thermoplaste schwierig durch Glasfaser durchdrücken
- Kein Harz, Keine Aushärtezeiten
- Zykluszeit = Abhängig der Temperatur

Hybridgarne:

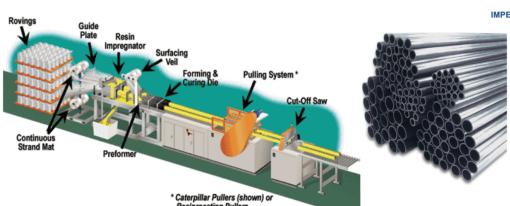
- Gesponnen
- Gefacht
- Luftextrudiert
- Gezwirnt
- Ummantelt

Heisspressen:



Strangziehverfahren:

- Vorteil: Endlosfasern, ausgerichtet, hoher Faseranteil
- Nachteil: Nur einfache Formen, alle Fasern parallel

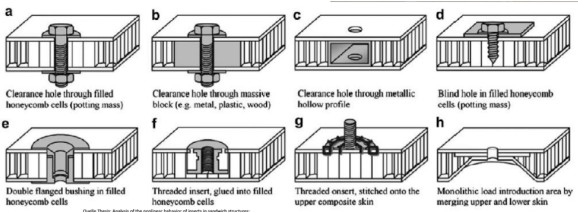


Wickeln:

- Um einen Kern möglich
- Um eine Struktur, welche nicht herausgenommen wird

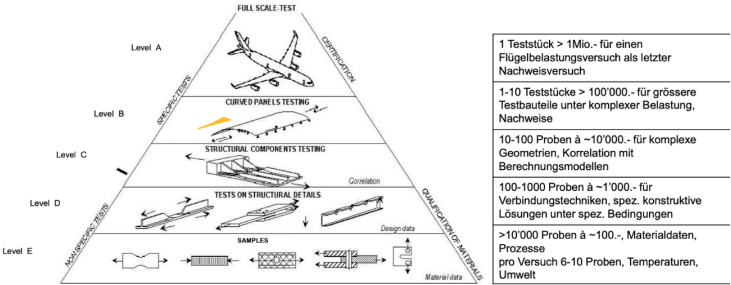
Sandwichverbindungen

- Hoher Abstand zum Schwerpunkt = hohe Biegesteifigkeit
- Steife Decklagen und leichter Kern
- Decklagen: Zug/Druck
- Kern: Schubkräfte, Verhinderung Beulen



Werkstoffprüfung

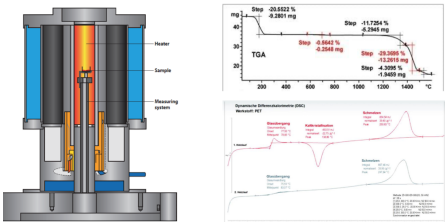
Begleitung durch Numerische Simulation.



Werkstoffprüfung Matrix

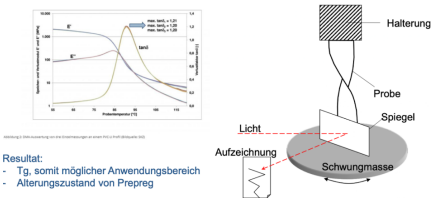
Thermogravimetrie:

- Bestimmung: Zersetzungs, Glasübergangstemperatur



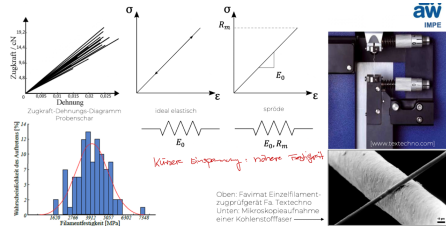
Torsionsschwingversuch:

- Ermittlung der G-T-Kurve
- Bestimmung $T_g \rightarrow$ Anwendungsbereiche
- Alterungszustand von Prepreg



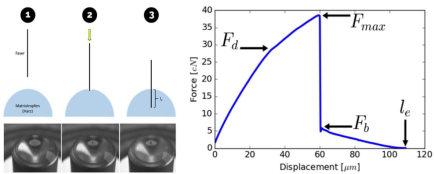
Werkstoffprüfung Verstärkungsmaterial

Filamentzugversuch:



Prüfen des Interfaceverhaltens:

- Einbetten des Einzelfilaments in Matrixmaterial
- Faserauszugversuch



Scherverhalten textiler Verstärkungsstrukturen:

- Haupt- & Deformationsmechanismus
- Geringe Umformkräfte
- Stark- nichtlineares Verhalten

Werkstoffprüfung am Faserverbund

Zugversuch:

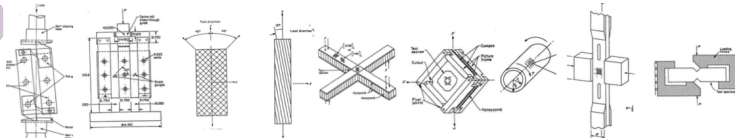
- Anzahl Versuche: Abhängig von Lagen
- Zugeigenschaften: E-Modul, Bruchdehnung, R_m
- Poisson-Zahl an flachen Probekörpern
- 90° 45° Richtungen brechen früh und delaminieren
- 0° Lagen tragen noch viel Last

Druckversuch:

- Druckmodul, Druckfestigkeit
- Druckstauchung, Versagensart
- Schwierigkeiten: Krafteinleitung, Probenbreite

Schubversuch:

- Kompromiss zwischen:
 - Probenaufwand
 - Messvorrichtungen, Testkomplexität
 - Kosten
- Punkte für Steifigkeits und Festigkeitswerte



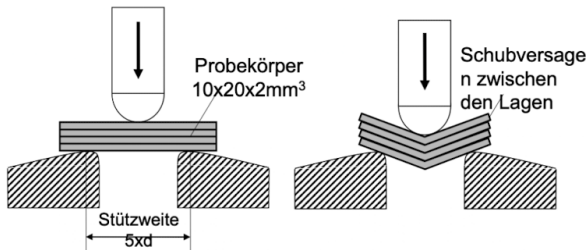
2-rail shear	3-rail shear	+/-45 off-axis	10° off-axis	Cross beam	Picture frame	Thin walled tube	Slotted tensile	losipescu
7	8	9	9	6	7	10	7	9
6.	4.	1.	3.	9.	7.	8.	5.	1.

3-Punkte-Biegung:

- Biegefestigkeit & Biegemodul
- Nur Vergleichswerte, keine Berechnungswerte
- Günstig und Einfach
- Versagensart: Druck oder Zug

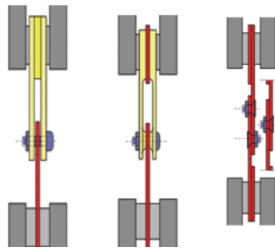
Interlaminare Scherfestigkeit:

- Aussagen über Härtung
- Versagen durch Druck unter dem Stempel möglich
- Versagen durch Scherung zwischen Laminatschichten möglich



Lochleibung

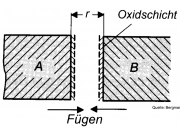
- Zug/Druck
- Charakterisierung Bolzen/Niet/Schraubver
- Beurteilung Verbindungsfestigkeit
- Schwierigkeit: Stützung auf grosser Einspannlänge: Verhinderung Ausbeulung



Schweissen

Fügeverfahren:
Schrauben → Kraftschluss, wenig Reibschluss
Nieten → Formschluss, Lochleibung = höhere Festsigkeit gegenüber Schrauben
Kleben → Stoffschluss, Adhäsion & Kohäsion
Löten → Stoffschluss, VdW Kräfte
Schweissen → Stoffschluss, Metallbindung

Grundvorgang Fügen:

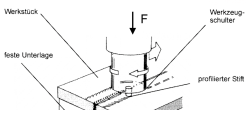


Verbindung durch Annäherung auf Atomarer Ebene. $r_{\text{Atom}} \approx 10^{-10} \text{ m}$
Verschlechterung durch Oxidschicht / Mikroprofil (Ra) der Oberfläche.

Gruppen von Schweissverfahren:

- **Kaltpressschweissen:** Druck + Verformung → Oxidschicht wird in Oberfläche eingebunden → schlechte Kraftübertragung
- **Warmpressschweissen:** Druck + Wärme
 - Explosion, Schmieden, Rührreisschweissen, Ultraschallschweissen
- **Schmelzschweissen:** Wärme, keine Verformung.
 - MAG, MIG, WIG, Elektrodenhandschweissen

Warmpressschweissen



- Dornwerkzeug → Drehend in Werkstoffgepresst (Reibung)
- Feste Verspannung der Bauteile
- Unterhalb der T_s , ca. $60\%T_s$
- Anwendung: Bauindustrie, Blech, Rohre

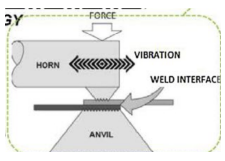
Vorteile:

- Unterhalb Schmelzpunkt
- Kein Schweisszusatz, keine Poren
- Kein Verzug/Schrumpfung

Nachteile:

- Geringe Schweissgeschwindigkeit
- Schwierig bei Freiformflächen
- Steife Unterlage notwendig

Ultraschallmetallschweissen (USM-Schweissen)



- Amboss (Anvil) = fest
- Sonotrode (horn) = Schwingungen 20-40kHz, 3-50 μm Amplitude
- Schweisszeit 0.1 - 1 s
- Anwendung: Fahrzeugbau Kabel, Kfz-Gittertypen

Vorteile:

- Unterhalb Schmelzpunkt
- Kein Schweisszusatz/Schutzgas
- Keine Poren
- Wenig Verzug/Schrumpfung

Nachteile:

- Geringe Schweissgeschwindigkeit als GSS
- 3D Schweissungen schwierig
- Vorwärmen nötig

Schweissen mit Widerstandserwärmung

Punktschweißen

- Werkstücke überlappt
- stiftförmige Elektroden
- linsenförmige Verbindung

Rollennahtschweißen

- Werkstücke meist überlappt
- rollenförmige, angetriebene Elektroden,
- Punktreihen (Dichtnähte, Rollpunkte)

Buckelschweißen

- Werkstückerhebungen (Stromkonzentration)
- Werkstück überlappt
- großflächige Elektroden
- mehrere Verbindungen in einem Arbeitsgang
- linsenförmige Verbindung

Vorteile:

- Ken Schweisszusatz/Schutzgas
- Wenig Verzug
- Wirtschaftlich (hohe Produktivität)

Nachteile:

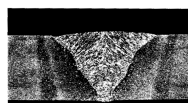
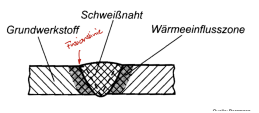
- Geringe statische/dynamische Festigkeit

$$Q = \int_0^t I^2 R_g dt$$

Q = Benötigte Wärmeenergie [J]
 I = Schweissstrom [A]
 R_g = Gesamtwiderstand [Ω]
 t = Schweisszeit [s]

Schmelzschweissen

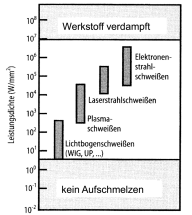
Aufbau einer Schweissnaht:



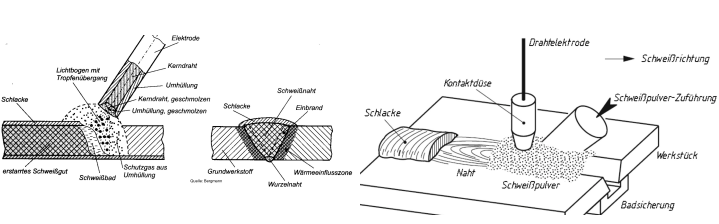
Wärmeeinflusszone (WEZ):

- Temperaturen zw. Raum und T_s
- Starke Kühlwirkung = ungewollte Wärmebehandlungen
- Kleine WEZ: Hohe Leistungsdichte/schnelle Wärmeabfuhr
- Grosse WEZ: Viel Wärmeverlust in das Bauteil

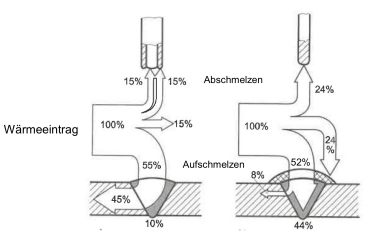
- Einfluss auf: Schweissgeschwindigkeit, grösser der WEZ, Verzug
- Porenbildung über Verdampfungslinie (eingeschlossener Dampf)
- **Hohe Leistungsdichte:** ohne Schweisszusatz, kl. WEZ, kl. aufgeheiztes Werkstoffvolumen, hoher Temp. Gradient



Lichtbogenhandschweissen/Unterpulverschweissen



- **Lichtbogenhandschweissen**
- Plasmaerzeugung durch Strom zwischen Anode/Kathode
- Umhüllung = Schutzgas/Schlacke, verzögerte Abkühlung
- **Unterpulverschweissen**
- Kontinuierliche Schweissung möglich (bis 800 mm/min)
- Hohe Produktivität
- Für grosse Schweissungen



Schutzgasschweissen

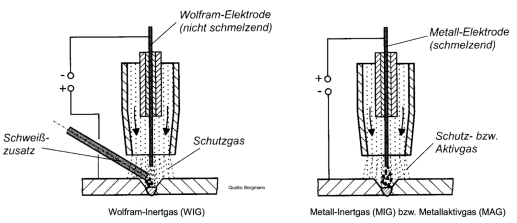
Schutzgas verhindert:

- Bildung von Eisenoxide/-nitride, Blaseneinschluss

MIG/MAG/WIG

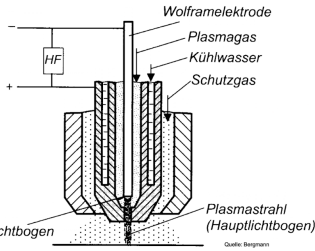
MIG: Abschmelzende Elektrode + Inertgas (Ar, He)
MAG: Abschmelzende Elektrode + Aktivgas (oxidierend, Ar+ O2, C02)
WIG: Nicht abschmelzende Wolfram Elektrode + Inertgas

- Keine Schlacke, hohe Schweissnahtqualität
- Argon: günstigstes Edelgas
- WIG: Bessere Schweissnahtqualität, kein veränderlicher Abstand der Elektrode, niedrige Schweissgeschwindigkeit



Plasmaschweißen

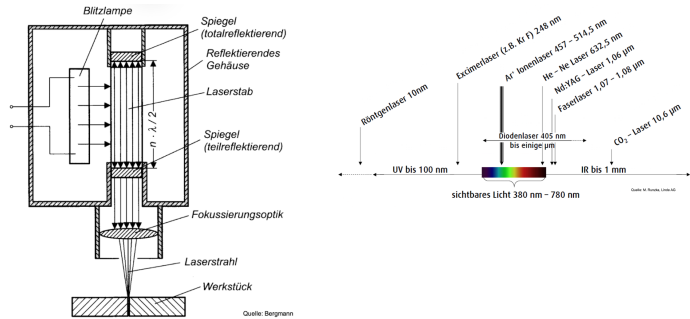
- Hohe Energiedichte $\rightarrow T_{\text{Plasma}} \geq 10000\text{ }^{\circ}\text{C}$, durch Linsensystem & Interferenz
- Strahlbündelung: Geringe Wärmemenge
 - Wenig Verzug, für Mikroschweißen geeignet
- Ar wird zu Plasma ionisiert
- Zündung des Lichtbogens durch HF Generator $\rightarrow$ Zündung ohne Berührung Schweissstück
- Zusatzwerkstoff als Draht/Pulver



Laserschweißen

Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- Xenon/Krypton Entladungslampe (anregende Energiequelle)
- Energieaufnahme = Einnehmen energiereicheren Zustand
- Fall in Energieärmeren Zustand: Emittierende λ
- Kohärentes Licht durch stehende Welle einer einzigen Frequenz
- Verstärkung durch Total-/Teilreflektierendem Spiegel
- Fokussierung des Photonenstroms = hohe Energiedichten
- Mit/Ohne Zusatzwerkstoff schweisbar
- Grosse Auswahl schweisbarer Werkstoffe

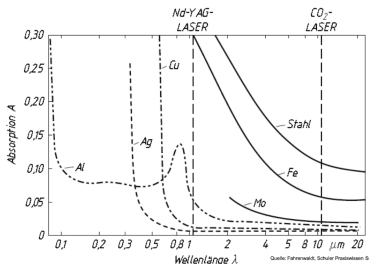


$1 = P_{\text{Laser}} = P_{\text{Reflektion}} + P_{\text{Absorption}} + P_{\text{Transmission}}$

Für Metalle:

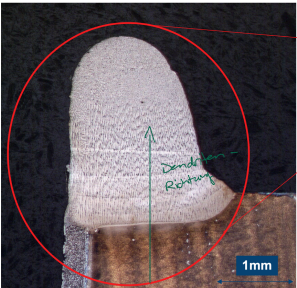
$1 = R + A + 0$

- Wellenlänge des Lasers ist gegeben durch Lasertyp
- Absorption abhängig von Metall und Oberfläche

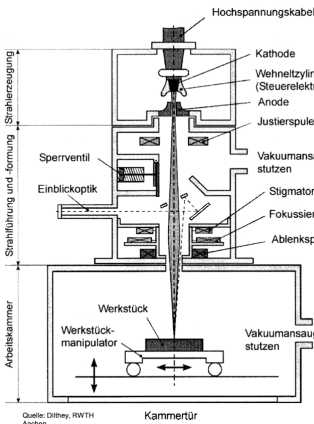


Anwendungsgebiete:

- Flugzeugrümpfe:
 - Schweißen statt nieten
 - Vorteile an Rumpf: Erhöhte Ermüdungsfestigkeit, höhere Korrosionsbeständigkeit, geringeres Gewicht
- Reparatur von Gasturbinenschaufeln:
 - Dendritenrichtung der Schweißnaht in Belastungsrichtung
 - Sehr dünnwandige Objekte
 - Gleichmässige Wärmeinbringung = gleichmässige WEZ



Elektronenstrahlschweißen



- $v = \frac{2}{3} v_{\text{Licht}}$
- $e_{\text{Kin}} \approx 150 \text{ keV}$
- Kinetische Energie wird in Wärme umgewandelt
- Abschirmung nötig! X-Rays
- Fokussierung des Strahls auf: 0.1 - 1.0 mm
 - Min. Wärmeeintrag
 - Schweißen endfertiger Werkstücke möglich
- Hohe Reproduzierbarkeit
- Vakuum notwendig: ca. 10^{-4} mbar (Kollisionen mit Luftmolekülen)
- Keine Schweißzusätze
- Nur für el. Leitfähige Werkstoffe
- Keine Oberflächenbehandlung nötig
- Tiefschweisseffekt

Anwendungsbereiche:

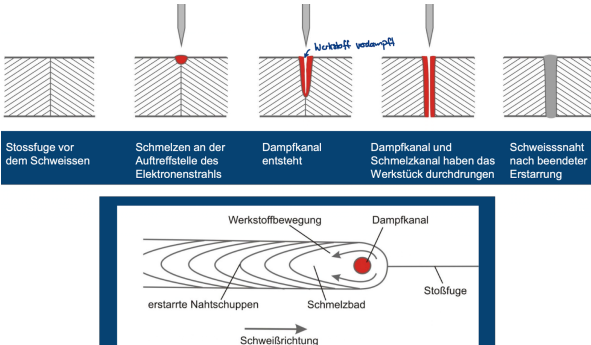
- Mikroschweißen: $< \frac{1}{10} \text{ mm}$
- Werkstoffe mit grosser Sauerstoffaffinität (Ti, Mg)
- Flugzeugbau (Ti-/Al-Legierungen)
- Mischverbindungen möglich
- Grosse Wandstärke der Vakuumanlagen



Grosskammeranlage mit 630 m³
bis 50 to Stückgewicht



Kammeranlage mit 0,01 m³
bis 1 kg Stückgewicht

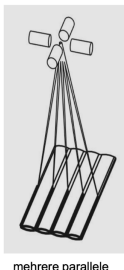
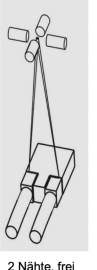
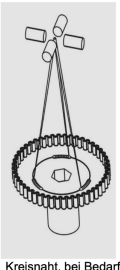
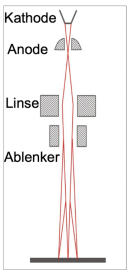


Tiefschweisseffekt:

- 150 mm Stahl
- 300 mm Aluminium
- Werkstoff verdampft im Zentrum des Brennflecks $\rightarrow$ Kapillare aus Dampf
- Schachtverhältnis: 50:1 (Tiefe/Breite)

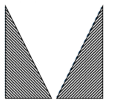
Mehrbadtechnik:

- bis zu 60 Nähte gleichzeitig: Mehrfache Ablenkung des Strahles
- Minimaler Verzug
- Verkürzte Schweißzeit bis zu 70 %
- Verzicht auf Spanntechnik/Heftschiessung



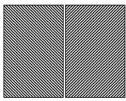
Nahtvorbereitung:

„konventionell“



- Bauteil mit kleiner Öffnung für optimale Wurzel Ausbildung
- „V“-Fugenvorbereitung
- mit Zusatzwerkstoff

„strahlgeeignet“



- Werkstück **ohne** Spalt (technischer „Null-Spalt“)
- parallele Fugenvorbereitung
- Schweißen in der Regel ohne Zusatzwerkstoff

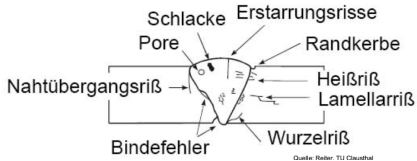
Selektives Elektronenstrahlschweißen

- Slicing a 3D model: 100µm
- Pulver wird als dünne Schicht aufgetragen (im Vakuum)
- Elektronenstrahl schmilzt Pulver lokal zusammen
- Abkühlung durch Helium
- Aufbaurrate mit bis zu 100 cm³/h

Beispiele:

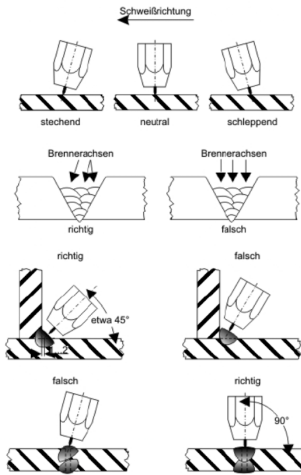
- Künstliche Bandscheibe
- Schichten und Streifen zueinander versetzt
- Anpassbare Porengröße/Form und Abmessungen
- ermöglicht einwachsen des Knochens

Schweißnahtfehler



- Schlackeneinschlüsse:
 - Bei Mehrschichtschweißungen → Schlackenanteile im Schmelzbad
 - Oberflächenschlacke wird nicht entfernt und überschweisst
- Poren:
 - Ungen. Abscheidung v. Gasen bei Erstarrung
 - Unzureichender Schutz gegenüber Atmosphäre (O, H, N)
 - Verunreinigungen (Öl, Fett, Farbe, Feuchtigkeit)
- Bindefehler:
 - Unvollständiges Aufschmelzen der Grenzfläche
 - Zu tiefe Leistungsdichte, zu schnelle BBrennerführung
 - Folge: Kerbwirkung

Einfluss der Brennerstellung:

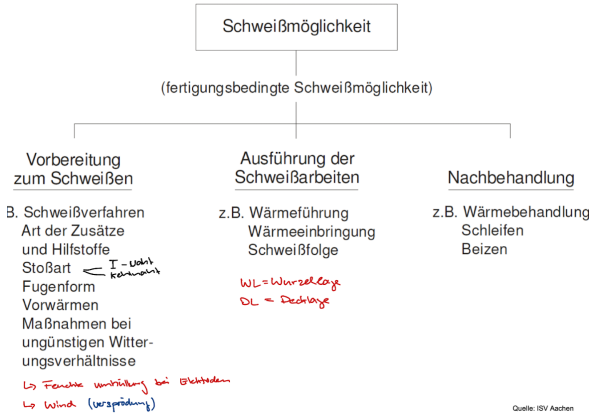


- Mehrlagenschweißen: Lage wichtig für sicheres Anschmelzen
- Kehlnaht: Anschmelzung der Flanken
- I-Stoss: Bindefehler infolge nicht durchgeschweisst

Qualitätssicherung

- Schweißkonstruktionen:
 - Keine Probeentnahme möglich
 - Zerstörungsfreie Methoden (Prüfen auf Fehlerfreiheit)
- Prüfung Werkstückoberfläche:
 - Magnetpulverprüfung
 - Farbeindringverfahren
 - Wirbelstromprüfung
- Prüfung Schweißnahtinneres:
 - Röntgenprüfung
 - Ultraschallprüfung (Achtung Ausrichtung/Größe von Rissen)

Schweisseignung



Quelle: ISV Aachen

Schweißsicherheit

(konstruktionsbedingte Schweißsicherheit)

konstruktive Gestaltung

- Kraftfluß im Bauteil
- Anordnung der Schweißnähte
- Werkstoffdicke
- Kerbwirkung
- Steifigkeitsunterschied

Beanspruchungszustand

- z.B. Art und Größe der Spannungen im Bauteil
- Räumlichkeitsgrad der Spannungen
- Beanspruchungsgeschwindigkeit
- Temperatur
- Korrosion

Schweißbeugung

chemische Zusammensetzung

- z.B. Härteneigung
- Alterungsneigung
- Spröbruchneigung
- Heißrißneigung
- Schmelzbadverhalten

metallurgische Eigenschaften

- z.B. Seigerungen
- Einschlüsse
- Korngröße
- Gefüge
- Anisotropie

physikalische Eigenschaften

- z.B. Ausdehnungsverhalten
- Wärmeleitfähigkeit
- Schmelzpunkt
- Festigkeit
- Zähigkeit

Einfluss der Wärme:

- Hohe Aufwärmgeschwindigkeiten: 400 - 1000 K/s
- Abkühlgeschwindigkeiten: einige 100 K/s

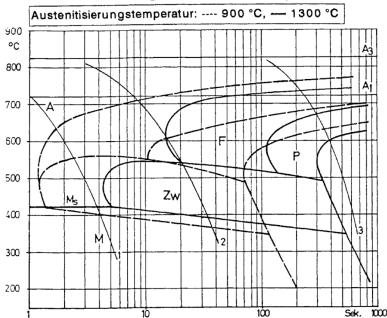
Schweißbarkeit:

Stähle $C \leq 0.2\%$:

- Unlegierte Stähle, Aufhärtung durch Abkühlrate
- Gefüge erst ferritisch/perlitisch, dann Martensitisch

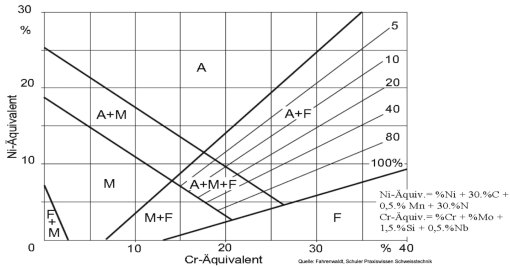
Stähle $C > 0.2 - 0.4\%$:

- Bedingt schweißbar
- Senkung der Abkühlgeschwindigkeit (Sand/Schlacke)
- Vorwärmen (200-300°C) unterhalb der Wärmebehandlungstemp



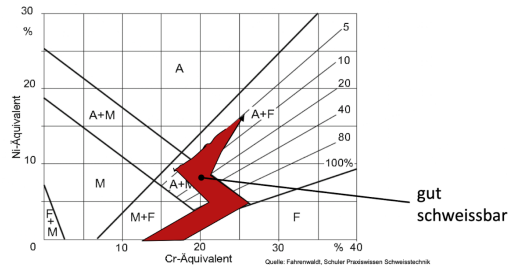
- 1. Abkühlungsverlauf für eine Decklage an einem 10 mm dicken Blech (Lichtbogenhandschweißen)
- 2. UP-Schweißung an einem 15 mm dicken Blech
- 3. Elektroschlackenschweißung an einem 40 mm dicken Blech

DeLong Diagram



Vorhersage des Schweissgefüges:

- Chromäquivalent: Mass für Stabilisierung des Ferrit
- Nickeläquivalent: Mass für stabilisierung des Austenits

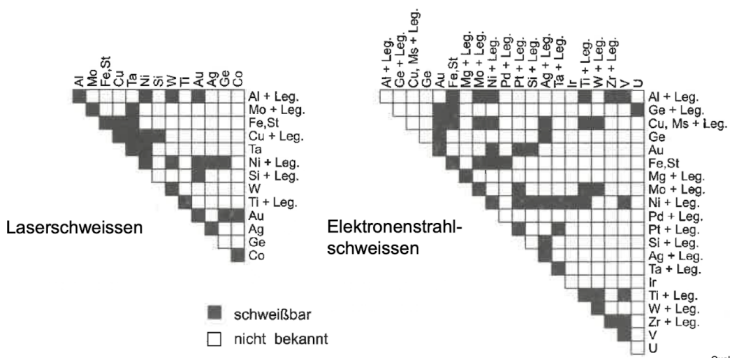


Abschätzung Eigenschaft hochlegierter Stähle:

- Martensitisch: Bildung von Härterissen
- Austenitisch: Warmrissanfällig
- Ferritisch: ungewolltes Kornwachstum
- Mischbereich: Versprödung durch Bildung von Sigma-Phasen

Schweiseseignung bei Strahlschweissverfahren

- Mischschweißungen sind möglich
- Abschätzung durch Schweißbarkeitsdreiecke

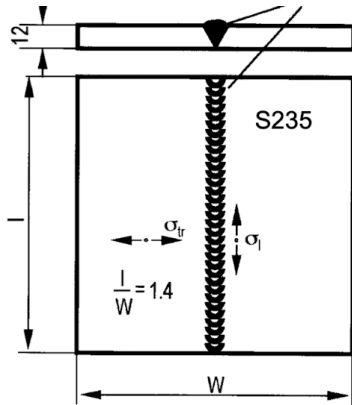


Folgen des Schweißens

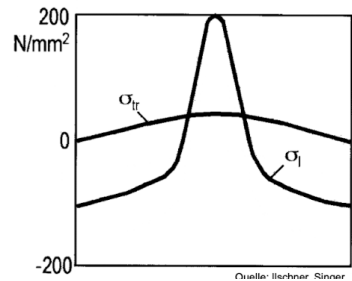
Mechanische Eigenschaften werden nicht erreicht wegen Gefügeänderungen:

- **Schmelzzone:**
 - Gussgefüge mit Dendriten, Porositäten, Seigerungen, Einschlüssen
- **WEZ:**
 - Kaltverfestigung wird abgebaut (Erholung/Rekristallisation) (gewalzte Bleche)
 - Ausscheidungshärtung durch Überalterung (Alu)
- **Einbringen von Eigenspannungen**

Eigenspannungen und Gestaltung



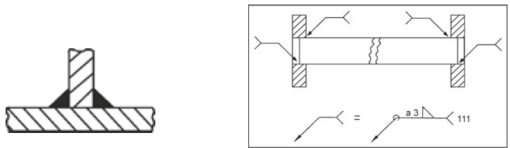
- Aufheizen: σ durch Inhomogenität der Temp-verteilung
- Schweißbad $= \sigma = 0$
- Nach Abkühlen in der Schweißnaht: Zugspannung in der Schweißnaht, Druckspannung im Rest des Bauteils
- Überlagerung mit äusserer Belastung: führt zu Versagen
 $R_e - Eigenspannung = 235MPa - 200MPa = 35MPa$
- Nachträglicher Abbau von Eigenspannungen: Spannungsarmglühen



Schweißfolge zur minimierung von Eigenspannungen

- Zuerst Stumpf- dann Kehlnähte
- Erst Querstösse, dann Längsnähte
- Erst Längs- dann Rundnähte
- Möglichst lange frei schrumpfen lassen

Zeichnerische Darstellung und Gestaltung§ von Schweißnähten



Bildliche Darstellung:

- Keine Angaben zur Naht
- Schweißer kann "selbst entscheiden"
- Unbrauchbar für Qualitätssicherung

Symbolische Darstellung:

- Enthält alle nötigen Abgaben
- Nummern sind Tabelliert
- Nahtdicke $a = 3mm$, Kehlnaht
- Bsp: 111 = Lichtbogenhandschweißen

Gestaltung:

- Homogene Spannungsverteilung anstreben (Einbrand)
- Nahtwurzeln wenn möglich **Druckbeanspruchen**
- Schweißnähte nicht in hoch beanspruchte Stellen legen
- Biegemomente isch Schweißbereich vermeiden
- Auf Zugänglichkeit achten
- Anzahl Schweißnähte reduzieren
- Spaltkorrosion vermeiden
- Nahtanhäufungen/Kreuzungen vermeiden (überlagerte WEZ)
- Einsatz optimaler Querschnittsformen
- möglichst kleine Nahtdicken
- Günstige Wahl des Lastangriffpunktes
- Schweißplan !!!