

Iris Kruppke
ITM, TU Dresden

Modul: Grundlagen des Verarbeitungs-maschinen- und Textilmaschinenbaus (5 LP)

Lehrveranstaltung: Funktionalisierung und Grenzschichtdesign (2/2/1)

Teilnehmer: MwDMB5-VTM, MwDMB-3-AVT, DA-Wing

Lehrveranstaltung 2: Fasermaterialien

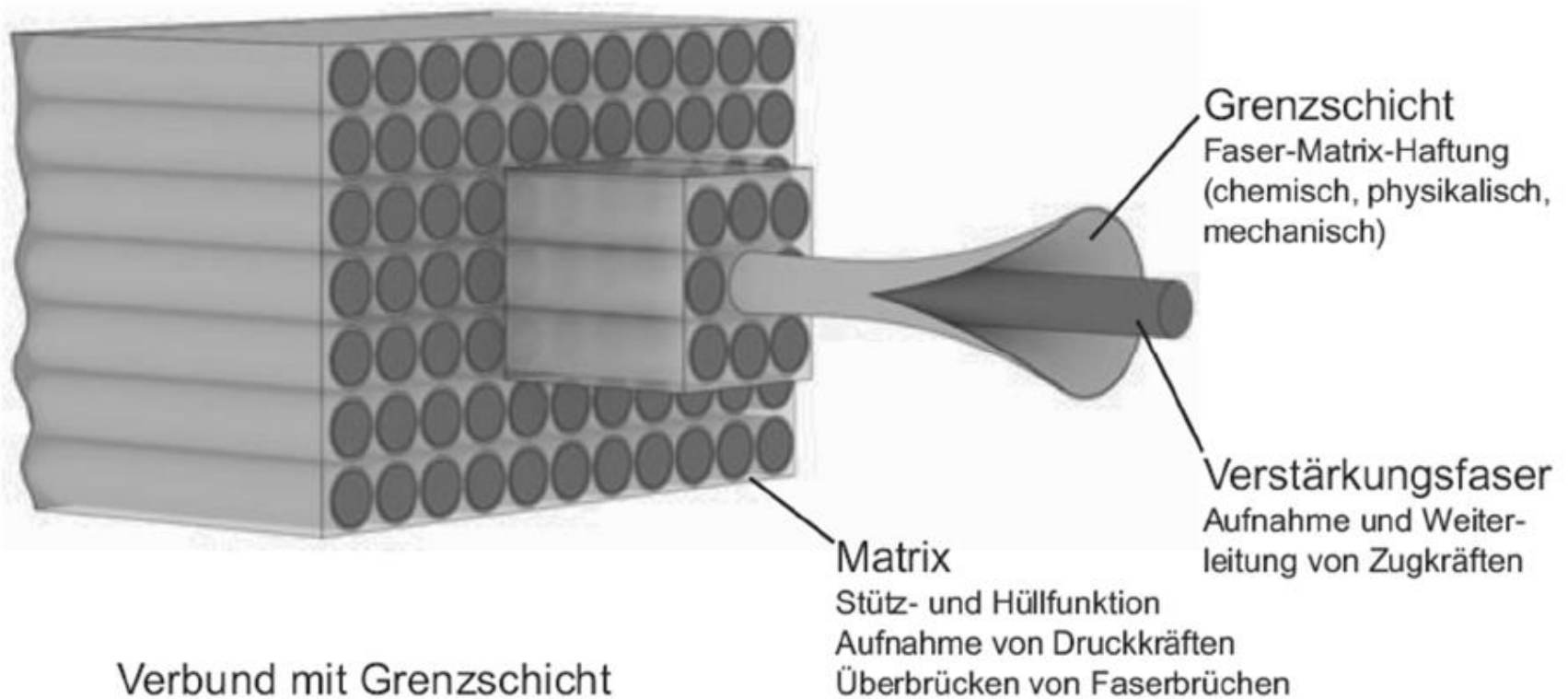
Inhalte

Einleitung

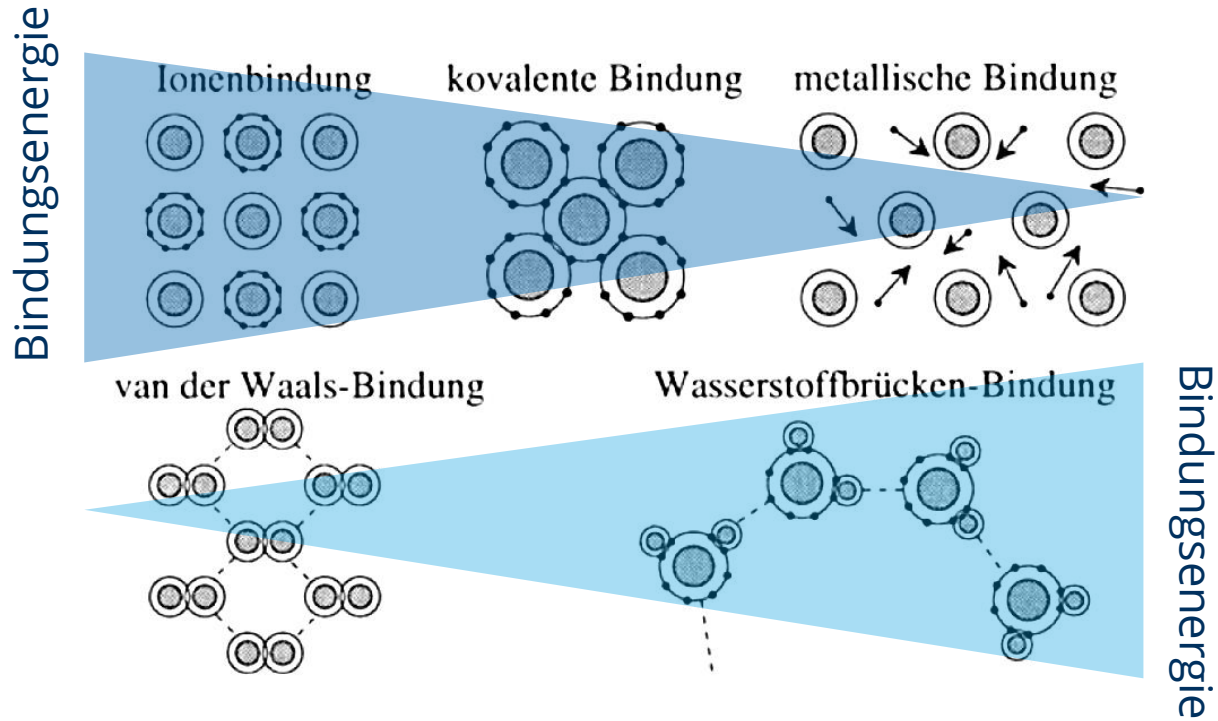
Faser vs Werkstoff


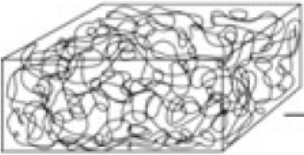

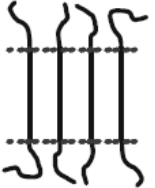

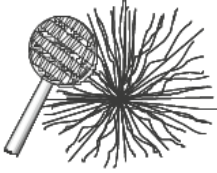
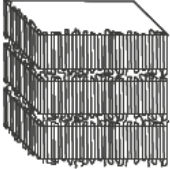

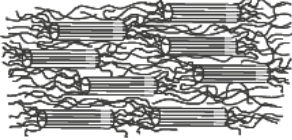
Fasertypen und deren Oberflächen

Zusammenfassung / Lernerfolgsfragen



Werkstoffe



Konfiguration (z.B. Konstitution)	Konformation	Übermolekulare Strukturen	Gefüge
<div data-bbox="40 311 253 368" style="border: 1px solid blue; padding: 2px; display: inline-block;">Polyethylen</div> <div style="margin-top: 10px;"> <div data-bbox="208 315 581 529" style="border: 1px solid blue; padding: 5px; display: inline-block;"> $\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ </div> <div data-bbox="208 529 581 753" style="border: 1px solid blue; padding: 5px; display: inline-block; margin-top: 10px;"> $\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 \\ \text{H} & & \text{H} & \end{array}$ </div> <div style="margin-top: 10px;"> $\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & =\text{C} & -\text{C} & =\text{C}\cdots \end{array}$ </div> <div style="margin-top: 10px;"> $\begin{array}{cccc} \text{F} & \text{H} & \text{F} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & & & \\ \text{F} & \text{H} & \text{F} & \text{H} \end{array}$ </div> </div>	<div style="margin-bottom: 10px;"> $\begin{array}{cccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & \diagdown & / & \diagdown & / & \diagdown \\ & \text{C} & & \text{C} & & \text{C} \\ & / & \diagdown & / & \diagdown & / \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> $\begin{array}{ccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{C} & -\text{C} & -\text{C} \\ & & \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$ </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> $\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{F} & \text{H} & \text{F} \\ & & & \\ \text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} \\ & & & \\ \text{F} & \text{H} & \text{H} & \text{F} \end{array}$ </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> $\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} \\ & & & \\ \text{F} & \text{F} & \text{F} & \text{F} \end{array}$ </div>	<div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Knäuel</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Faltkristall</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Mizellenkristall</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Nadelkristall</p> </div>	<div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Sphärolith</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Fasergefüge</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Mizellares Gefüge</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p style="text-align: center;">Nadelgefüge</p> </div>

Abhängigkeit der mittleren Bindungsenergie von der Bindungslänge^[2]

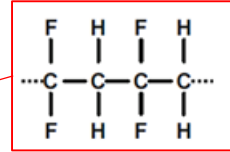
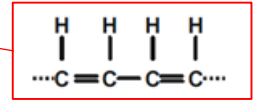
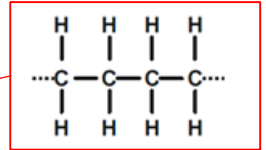
Bindungslänge d in pm, Bindungsenthalpie ΔH in kJ pro mol

Halogene untereinander			mit Wasserstoff			mit Kohlenstoff			mit Sauerstoff			gleiches Element		
Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d
F-F	159	142	H-H	436	74	C-C	348	154	N=O	607		H-H	436	74
Cl-Cl	242	199	H-C	413	108	C=C	614	134	O-N	201	136	N-N	163	146
Br-Br	193	228	H-O	463	97	C≡C	839	120	O-P	335	154	N=N	418	125
I-I	151	267	H-N	391	101	C-H	413	108	O-F	193	142	N≡N	945	110
Br-Cl	219	214	H-P	322	142	C-O	358	143	O-Cl	208	170	O-O	146	148
Br-F	249	176	H-S	367	134	C=O	745	122	O-Br	234		O=O	498	121
Br-I	178		H-F	567	92	C-N	305	147	O-I	234	1	P-P	172	221
Cl-F	253	163	H-Cl	431	128	C=N	615	130				S-S	255	205
Cl-I	211	232	H-Br	366	141	C≡N	891	116						
			H-I	298	160	C-P	264	184						
						C-S	272	182						
						C=S	536	189						
						C-F	489	138						
						C-Cl	339	177						
						C-Br	285	194						
						C-I	218	214						

Abhängigkeit der mittleren Bindungsenergie von der Bindungslänge^[2]

Bindungslänge d in pm, Bindungsenthalpie ΔH in kJ pro mol

Halogene untereinander			mit Wasserstoff			mit Kohlenstoff			mit Sauerstoff			gleiches Element		
Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d	Bindung	ΔH	d
F-F	159	142	H-H	436	74	C-C	348	154	N=O	607		H-H	436	74
Cl-Cl	242	199	H-C	413	108	C=C	614	134	O-N	201	136	N-N	163	146
Br-Br	193	228	H-O	463	97	C≡C	839	120	O-P	335	154	N=N	418	125
I-I	151	267	H-N	391	101	C-H	413	108	O-F	193	142	N≡N	945	110
Br-Cl	219	214	H-P	322	142	C-O	358	143	O-Cl	208	170	O-O	146	148
Br-F	249	176	H-S	367	134	C=O	745	122	O-Br	234		O=O	498	121
Br-I	178		H-F	567	92	C-N	305	147	O-I	234	1	P-P	172	221
Cl-F	253	163	H-Cl	431	128	C=N	615	130				S-S	255	205
Cl-I	211	232	H-Br	366	141	C≡N	891	116						
			H-I	298	160	C-P	264	184						
						C-S	272	182						
						C=S	536	189						
						C-F	489	138						
						C-Cl	339	177						
						C-Br	285	194						
						C-I	218	214						



Faserstoffe

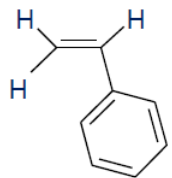
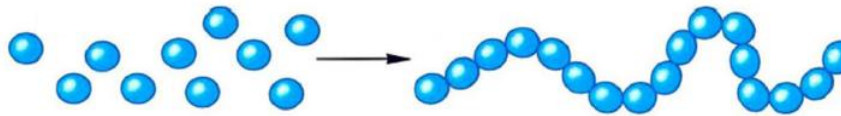
Ordnungszustände von Polymeren in Fasern: Wechselwirkungskräfte

Kräfte	Nebervalenzbindungskräfte			H ₂ -Brückenbindungen	Hauptvalenzbindungskräfte		
	permanente Dipole	induzierte Dipole	Dispersionskräfte		kovalente	ionische	
Reichweite	0,3-0,5 nm			0,3-0,5 nm	0,1-0,2 nm		
Bindungsenergie (KJ/mol)	≤ 20 (Keesom-Energie)	≤ 2 (Debye-Energie)	0,1-40 (London-Energie)	≤ 50	60-700		600-1000
theoretisch berechnete Adhäsionskräfte (MPa)	200-1750	35-300	60-360	500	17500	5000	30
experimentell gemessene Verbundfestigkeiten (MPa)	—————			15 - 25	—————		

Faserstoffe

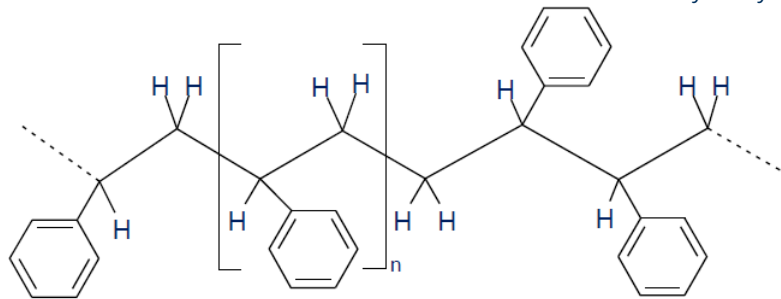
Vom Monomer zum Polymer

... kovalent aus vielen Atomen aufgebaut



Monomer

- ... mit einer oder mehreren polymerisationsfähigen Gruppen
- ... ungesättigte Bindung
- ... reaktionsfähige Endgruppe



Polymer

- ... n-Mere eines Monomers, kovalent miteinander verknüpft
- ... Zahl der Monomere bei gleichartigen Grundbausteinen bzw. der Strukturelemente bei ungleichartigen Grundbausteinen

Polymerisation

- Polymeraufbau unter Aufspaltung einer Doppelbindung, meist unter Einsatz von Katalysatoren ohne Entstehung von Nebenprodukten

Polyaddition

- Polymeraufbau unter Entstehung von stabilen Zwischenprodukten ohne Abspaltung von niedermolekularen Verbindungen

Polykondensation

- Polymeraufbau unter freierwerden von niedermolekularen Verbindungen

Polystyren, Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polyacrylnitril, Polymethylmethacrylat

Polyurethan, Epoxidharze

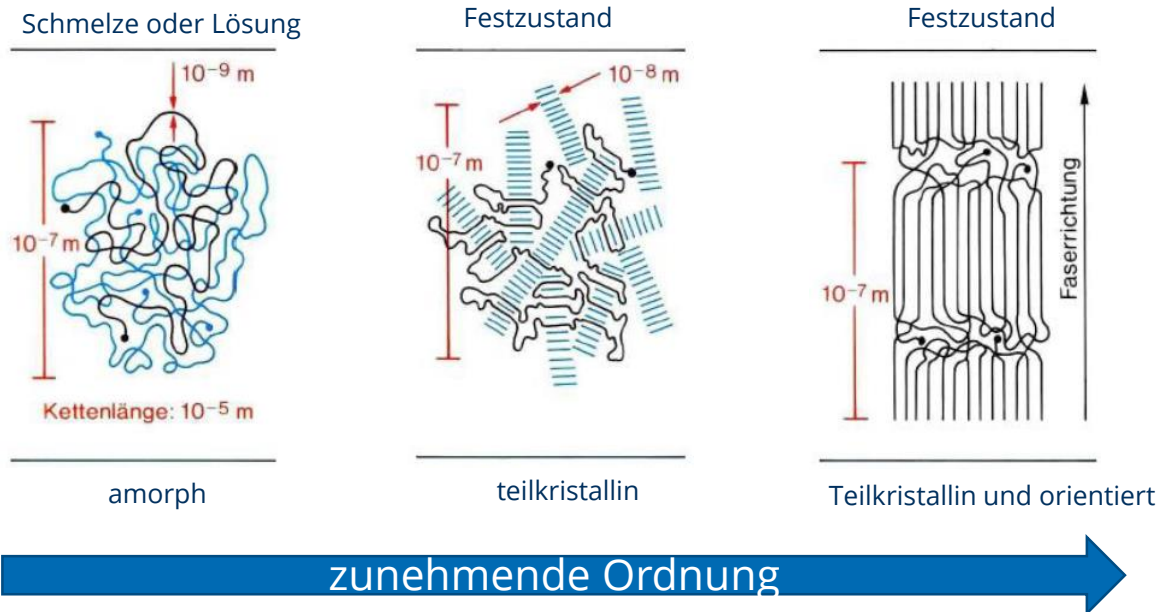
Polyester, Polyamide, Polycarbonat

Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

Je nach Stärke der Wechselwirkungskräfte im Polymer definiert sich:

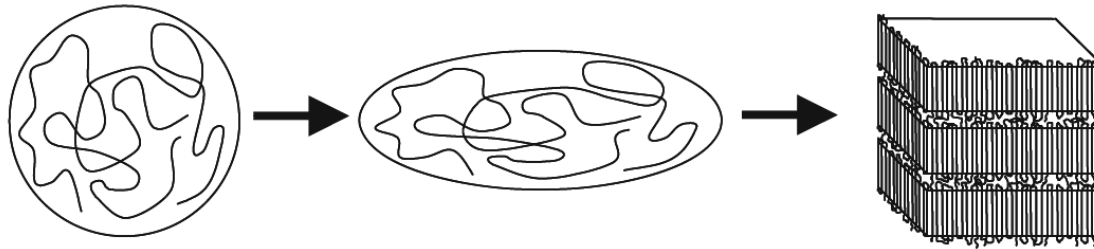
- Amorph und kristallin
- Verarbeitung (Streckung), Kettenformation, -konstitution, -konfiguration



Faserstoffe

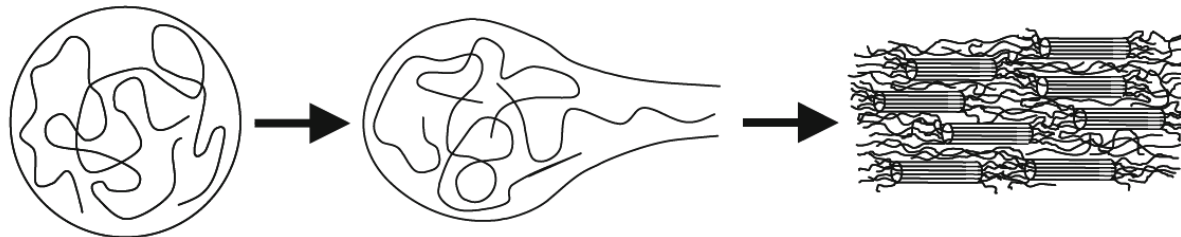
Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

Homogene Dehnung



Faserstruktur mit Lamellenkristallen

Dehnung mit log. Fließgradienten



Nadelkristalle

Dehnung und Orientierung | © Bonnet: Werkstofftechnik Grundlagen, Springer, 2009

- Bildung von Nadelkristallen (Shish-Kristallen) beim Verstrecken, sodass keine Lamellenkristalle entstehen
- Ausbildung der Kristalle = $f(\text{Fließgradient})$

Kleinere Düsenquerschnitte → höhere Fließgeschwindigkeit → bessere Ausrichtung

Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

Kristall

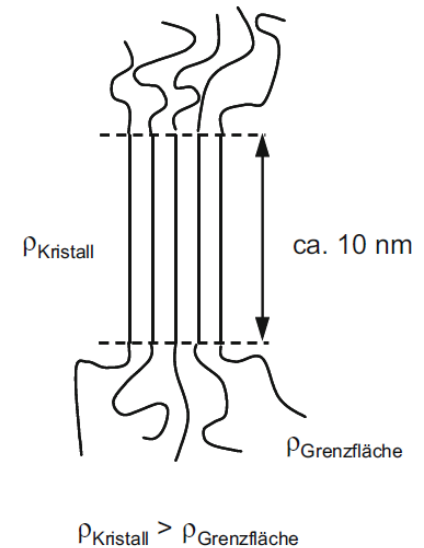
Dreidimensionale periodische Struktur

Kristalline Bereiche

- Kunststoffe sind aus vielen kleine Polymeren, kristallinen Bereichen aufgebaut
- Sorgen bei Überschreiten der Glas temperatur auch für hohe Steifig- und Festigkeit
- Nach überschreiten der Schmelztemperatur ... kein Einfluss mehr deutlich
- Fasern besitzen in der Regel geordnete (kristallin) und ungeordnete Bereiche (amorph)

Festigkeit,
Wärmebeständigkeit,
Widerstand gg. Quellen

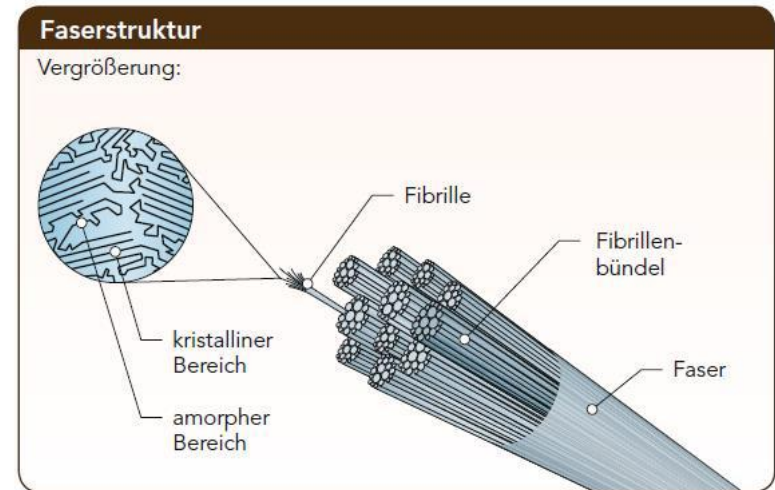
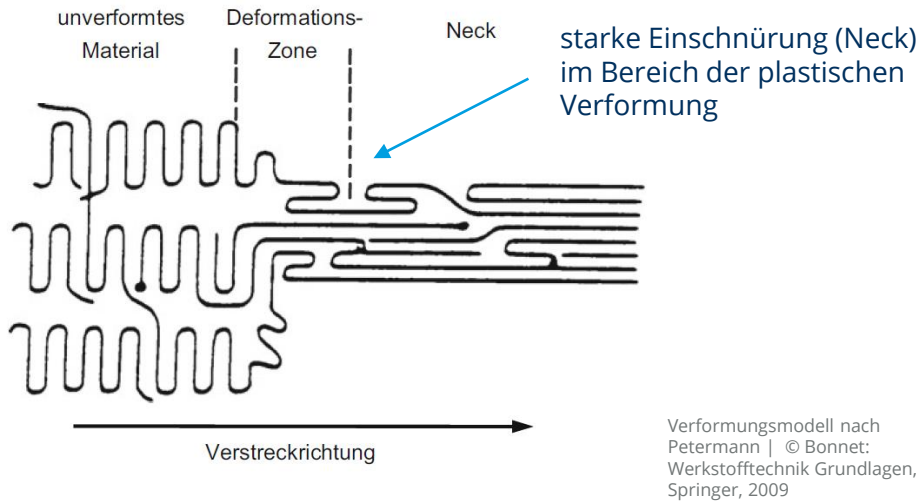
Weichheit,
Schmiegsamkeit,
rückstellbare Dehnung



Fransenmizelle | © Bonnet: Werkstofftechnik Grundlagen, Springer, 2009

Faserstoffe

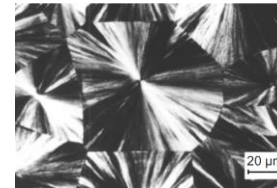
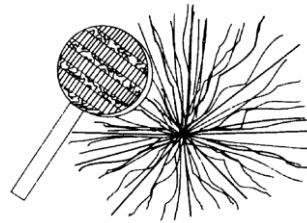
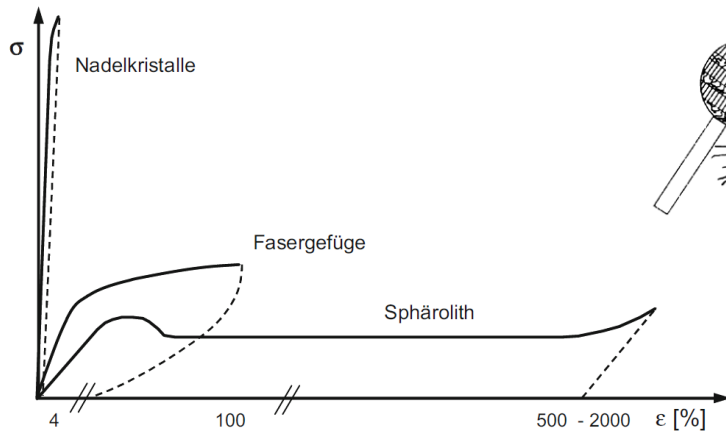
Ordnungszustände von Polymeren in Fasern



- „Abspulen“ von gefalteten Ketten bei einer plastischen Verformung von teilkristallinen Polymeren
- Kristallisation im longitudinalen Fließgradienten

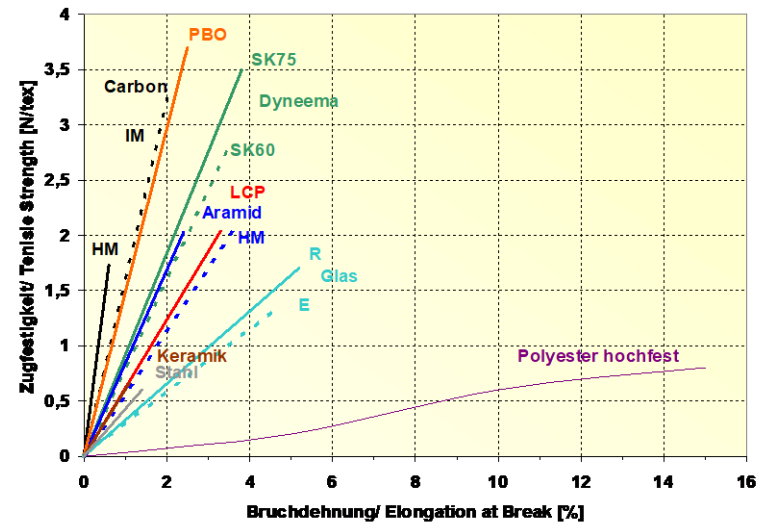
Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern



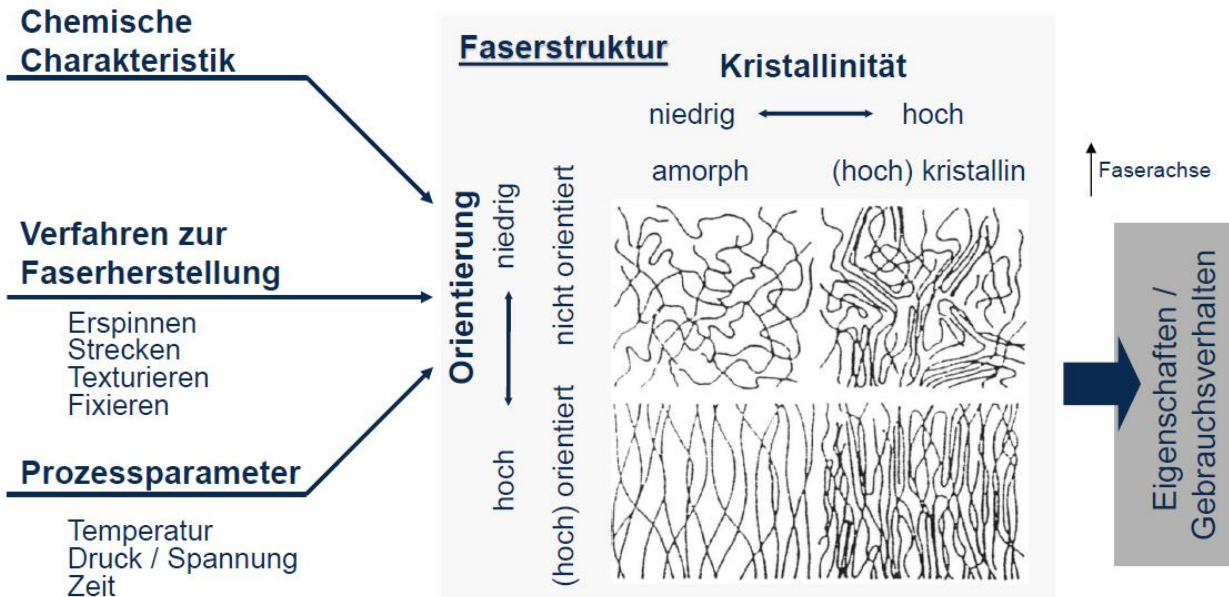
Syndiotaktisches PP

Polyethylen	E in GPa	Bruchspannung in GPa	Bruchdehnung in %
Nadel	200	2-5	ca. 4
Faser	1	0,1	ca. 100
Sphärolith	0,5	0,05	ca. 1000



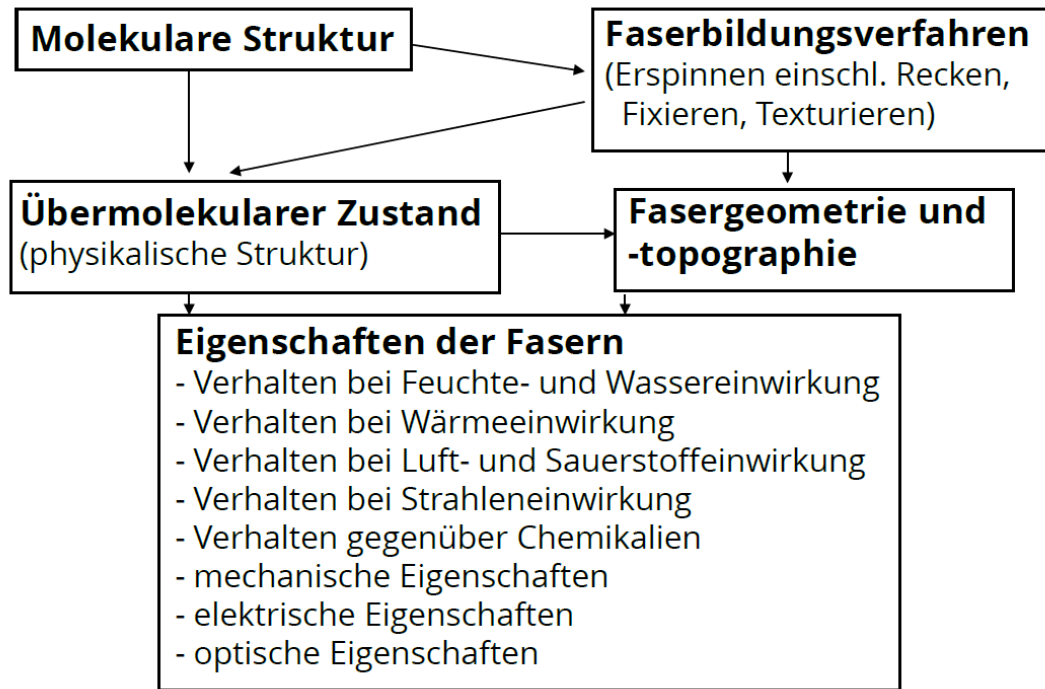
Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern



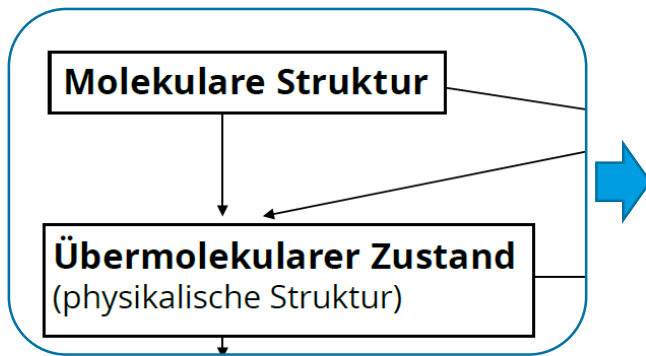
Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern



Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern



Konfiguration (z.B. Konstitution)	Konformation	Übermolekulare Strukturen	Gefüge
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$		<p>Knäuel</p>	<p>Sphärolith</p>
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & & & \\ \text{CH}_3 & \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} \end{array}$		<p>Faltkristall</p>	<p>Fasergefüge</p>
$\begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & =\text{C} & -\text{C} & =\text{C}\cdots \end{array}$		<p>Mizellenkristall</p>	<p>Mizellares Gefüge</p>
$\begin{array}{cccc} \text{F} & \text{H} & \text{F} & \text{H} \\ & & & \\ \cdots\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}\cdots \\ & & & \\ \text{F} & \text{H} & \text{F} & \text{H} \end{array}$		<p>Nadelkristall</p>	<p>Nadelgefüge</p>

Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

<u>Faserstoff</u>	<u>Wechselwirkung</u>	<u>beteiligte Atome bzw. Molekülgruppen</u>
Cellulose	Wasserstoffbrücken	Hydroxylgruppen
PE, PP	Dispersionskräfte	Methylen-, Methylgruppen
PET	π - Elektronen- Ww.	Phenylengruppen
PA (aliphatisch)	Wasserstoffbrücken	Carbonyl- u. Iminogruppen der Kette
PA (aromatisch)	Wasserstoffbrücken π - Elektronen- Ww.	Carbonyl- u. Iminogruppen der Kette Phenylengruppen
PAN	Dipol- Ww.	Nitrilgruppen
PUR	Wasserstoffbrücken	Carbonyl- u. Iminogruppen der Kette

Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

Faserstoff

Wechselwirkung

Cellulose

Wasserstoffbrücken

PE, PP

Dispersionskräfte

PET

π - Elektronen- Ww.

PA (aliphatisch)

Wasserstoffbrücken

PA (aromatisch)

Wasserstoffbrücken

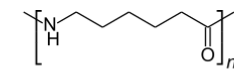
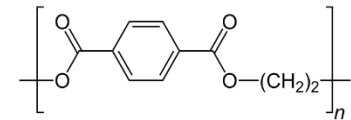
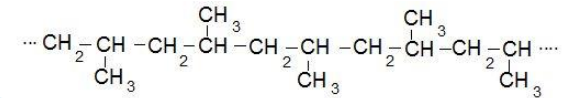
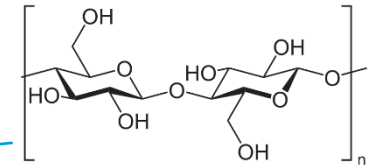
π - Elektronen- Ww.

PAN

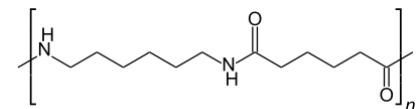
Dipol- Ww.

PUR

Wasserstoffbrücken



Polyamid 6



Polyamid 6.6

Faserstoffe

Ordnungszustände von Polymeren in Fasern

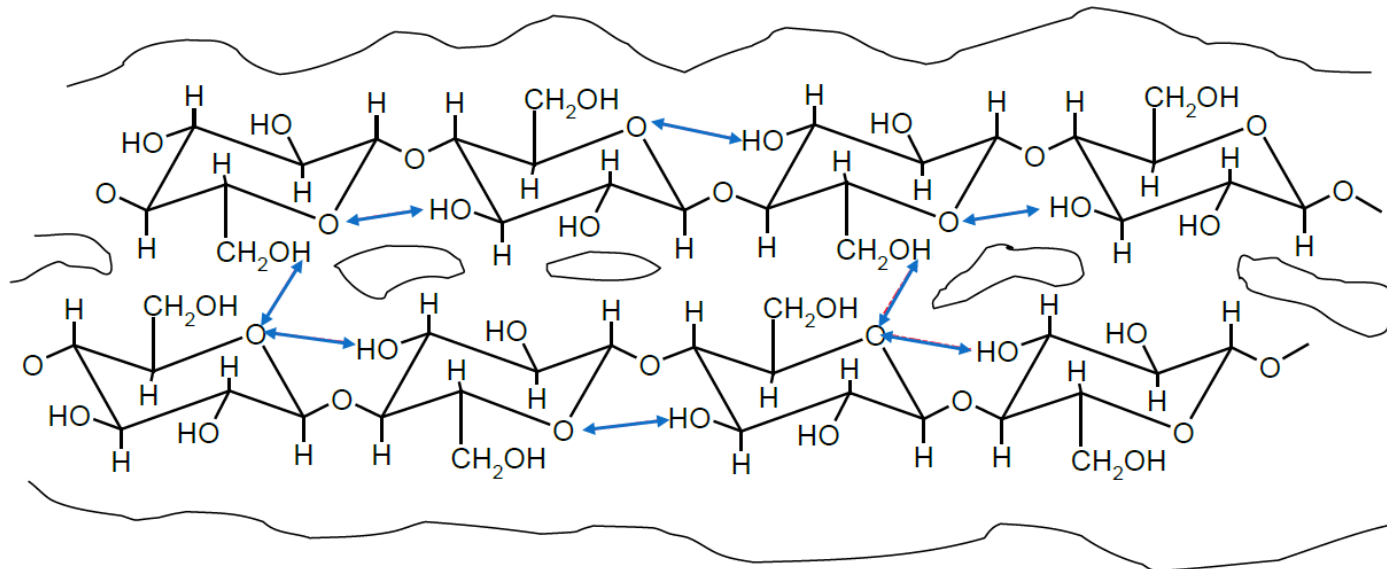
Zur Faserbildung sind prinzipiell kettenförmige, stereoreguläre Polymere mit folgenden Merkmalen geeignet:

- Optimale (in der Regel hohe) Molmassen
- lineare Form der Makromoleküle (keine Verzweigungen)
- zwei Bindungsarten unterschiedlicher Energie
- * homöopolare Bindung in Kettenrichtung (Hauptvalenzbindung, 200-500 kJ/mol)
- * intermolekulare Wechselwirkungen zwischen den Makromolekülen (Nebenvaleanzbindungen 4-40 kJ/mol)
- „amorph-kristalline“ Struktur (alle Übergangszustände zwischen den Grenzzuständen „ungeordnet“ und „höchstmöglich geordnet“ sind möglich.)
- Bildung konzentrierter Lösungen oder beständiger Schmelzen als Grundlage für den Fadenbildungsprozess
- Färbbarkeit

Faserstoffe

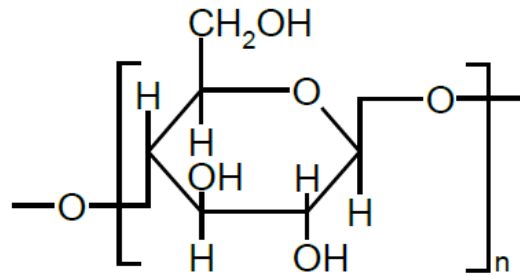
Cellulose, Baumwolle

Intra- und intermolekulare Wasserstoffbrücken,
Porenstruktur

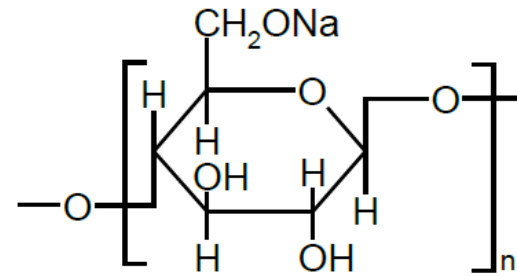
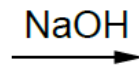


Faserstoffe

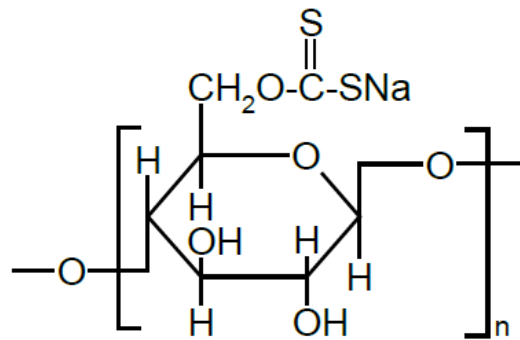
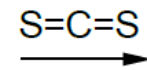
Cellulose: Viskoseprozess



Roh-Cellulose

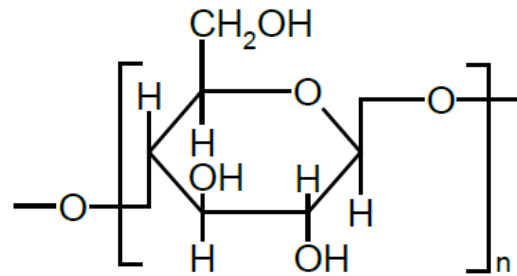


Natriumcellulosat



Cellulosexanthogenat

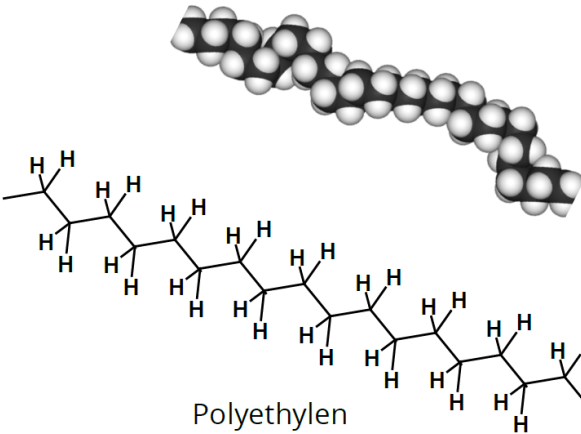
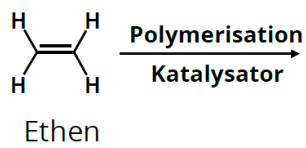
lösen
in NaOH
→
Düsen-
spinnen,
Fällen
in H₂SO₄



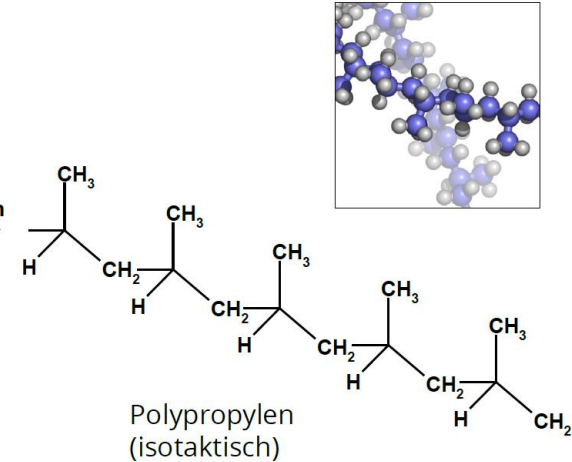
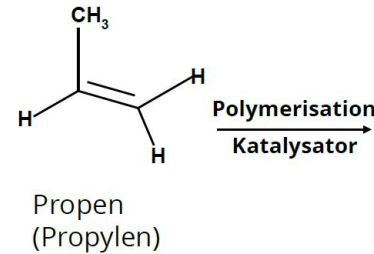
Viskose (n=200 - 600)

Faserstoffe

PE und PP



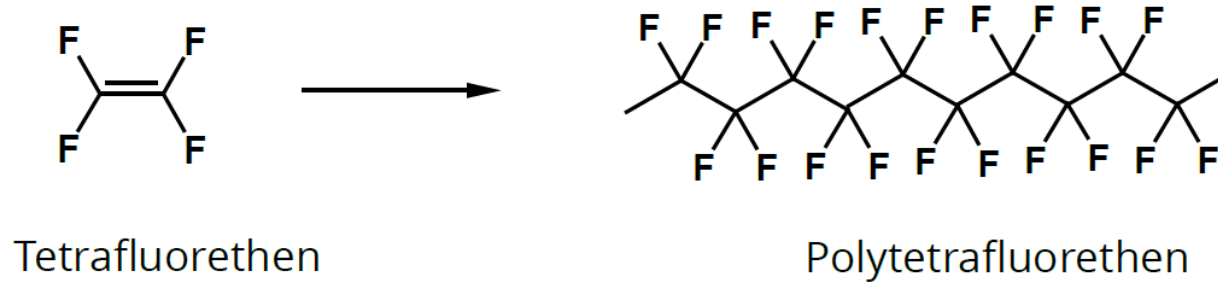
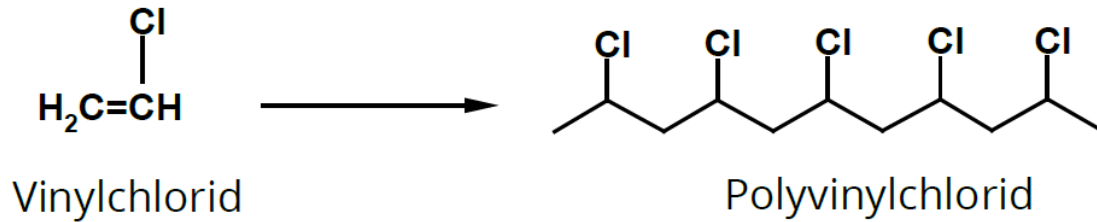
Dichte: 0,95 - 0,96
T_g : -10 bis +10 °C
Smp : 125 - 135 °C



Dichte: 0,87 - 0,94
T_g : -90 °C
Smp : 160 - 170 °C

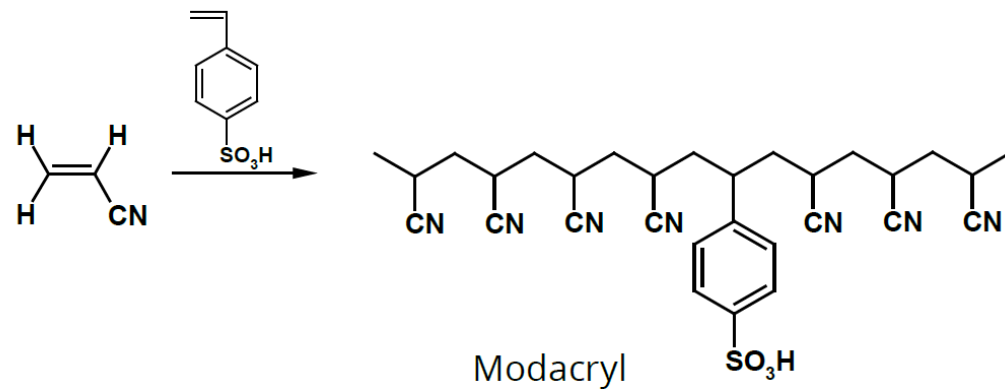
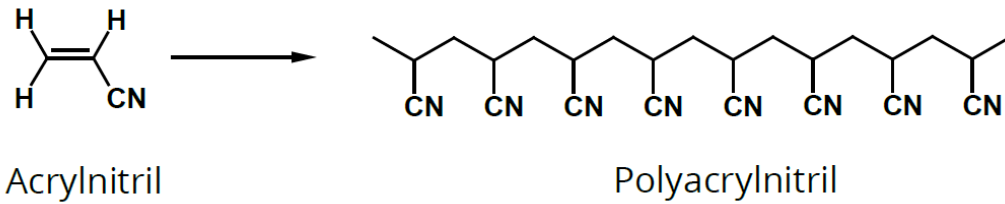
Faserstoffe

PVC und PTFE



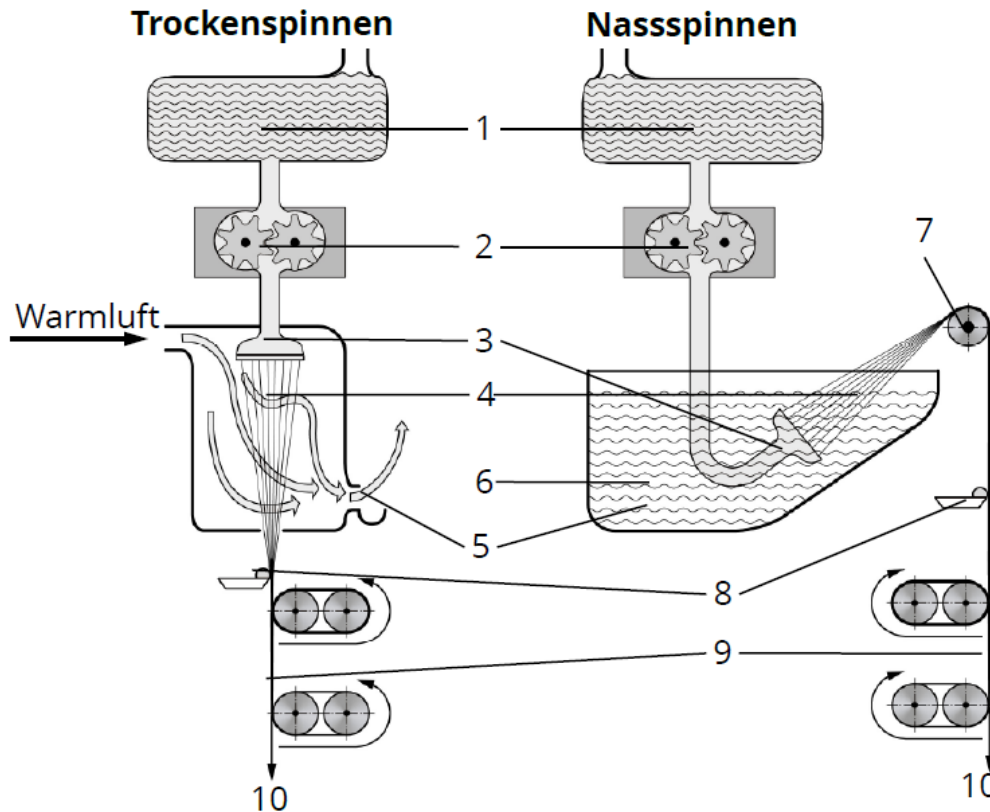
Faserstoffe

PAN und Modacryl



Faserstoffe

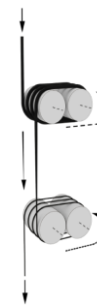
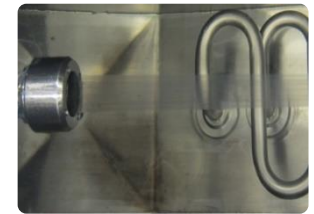
PAN-Spinnen



- 1 - Spinnlösung
- 2 - Spinnpumpe
- 3 - Spinndüse
- 4 - Filamente
- 5 - Lösemittelrückgewinnung
- 6 - Fäll- / Spinnbad
- 7 - Abzugsvorrichtung
- 8 - Spinnpräparation
- 9 - Verstrecken
- 10 - Nachbehandlung

Faserstoffe

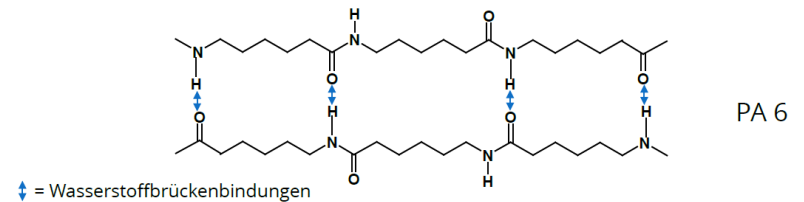
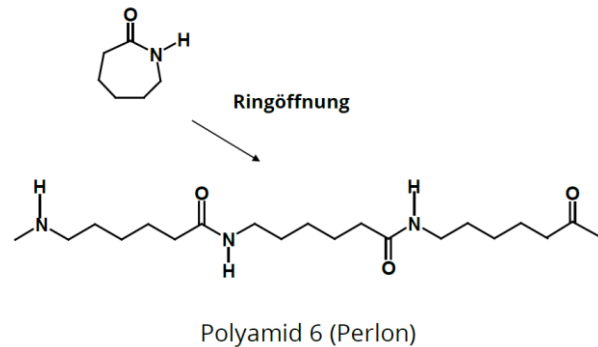
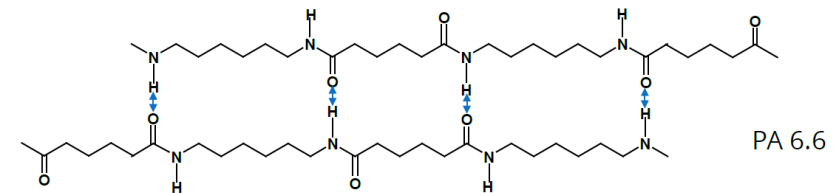
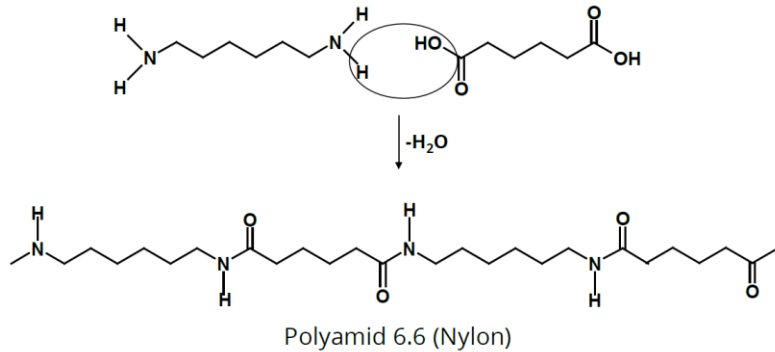
PAN-Spinnen



© ITM, Richter

Faserbildende Polymere

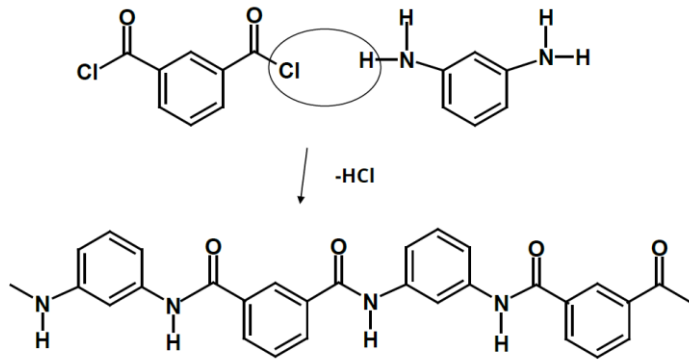
Polyamide: **aliphatisch** und aromatisch



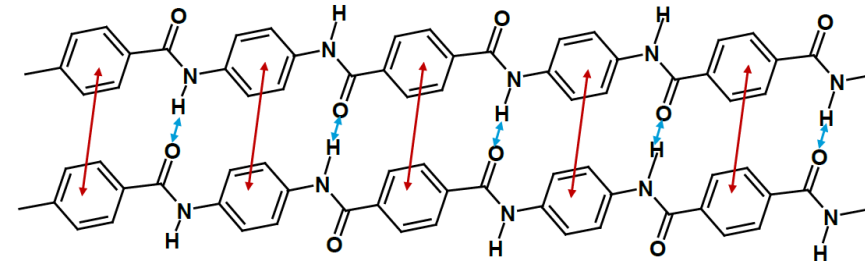
Intermolekulare Wechselwirkungen

Faserbildende Polymere

Polyamide: aliphatisch und **aromatisch**

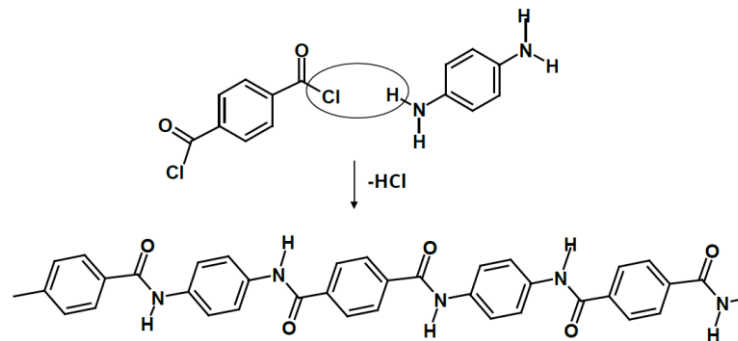


Metaphenylenisophthalsäurediamid (z.B. Nomex)



Wechselwirkungen in para-Aramiden

Wasserstoffbrücken \longleftrightarrow
 $\pi - \pi$ - Wechselwirkungen \longleftrightarrow



Polyparaphenylenterephthaldiamid (z.B. Kevlar)

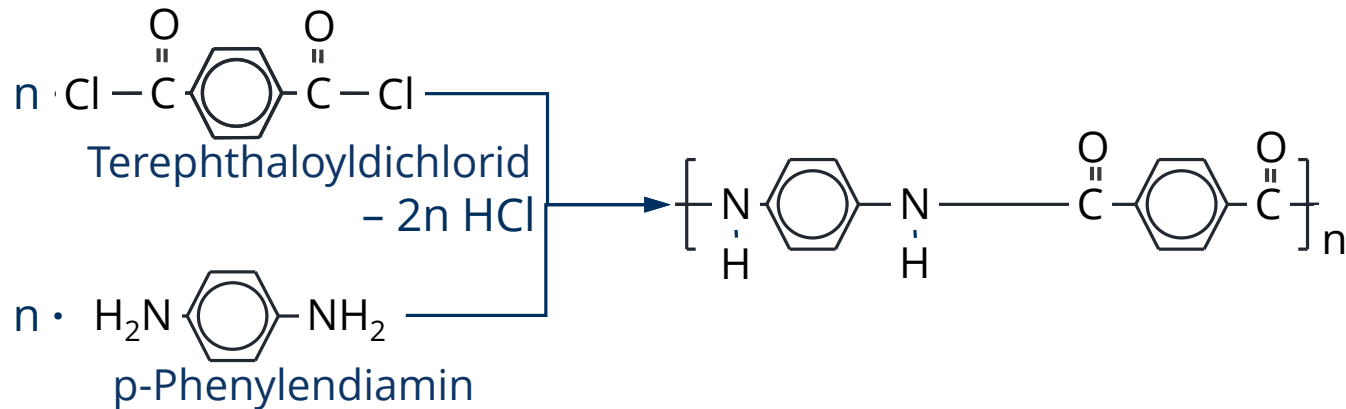
Aramidfasern

Herstellung von p-Aramid

Beispiel

Bildung von Poly-p-Phenylterephthalamid (PPTA)

Polykondensation



Aramidfasern

Herstellung

Spinnlösung

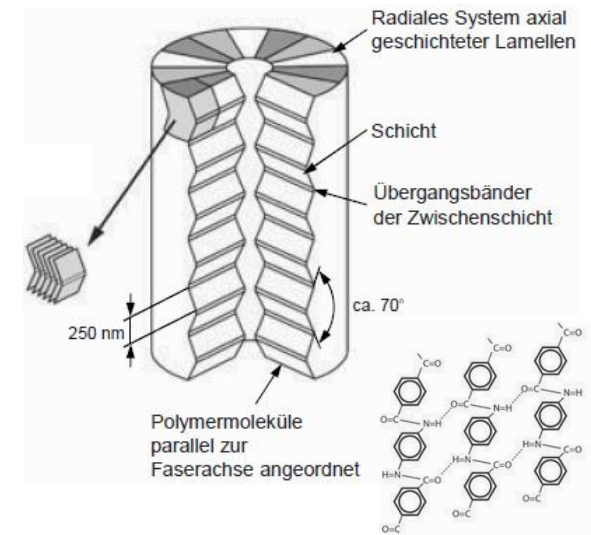
- Herstellung im Lösungspinnverfahren (H_2SO_4 bei PPTA): **Nassverfahren** / Trockenverfahren

Erspinnung

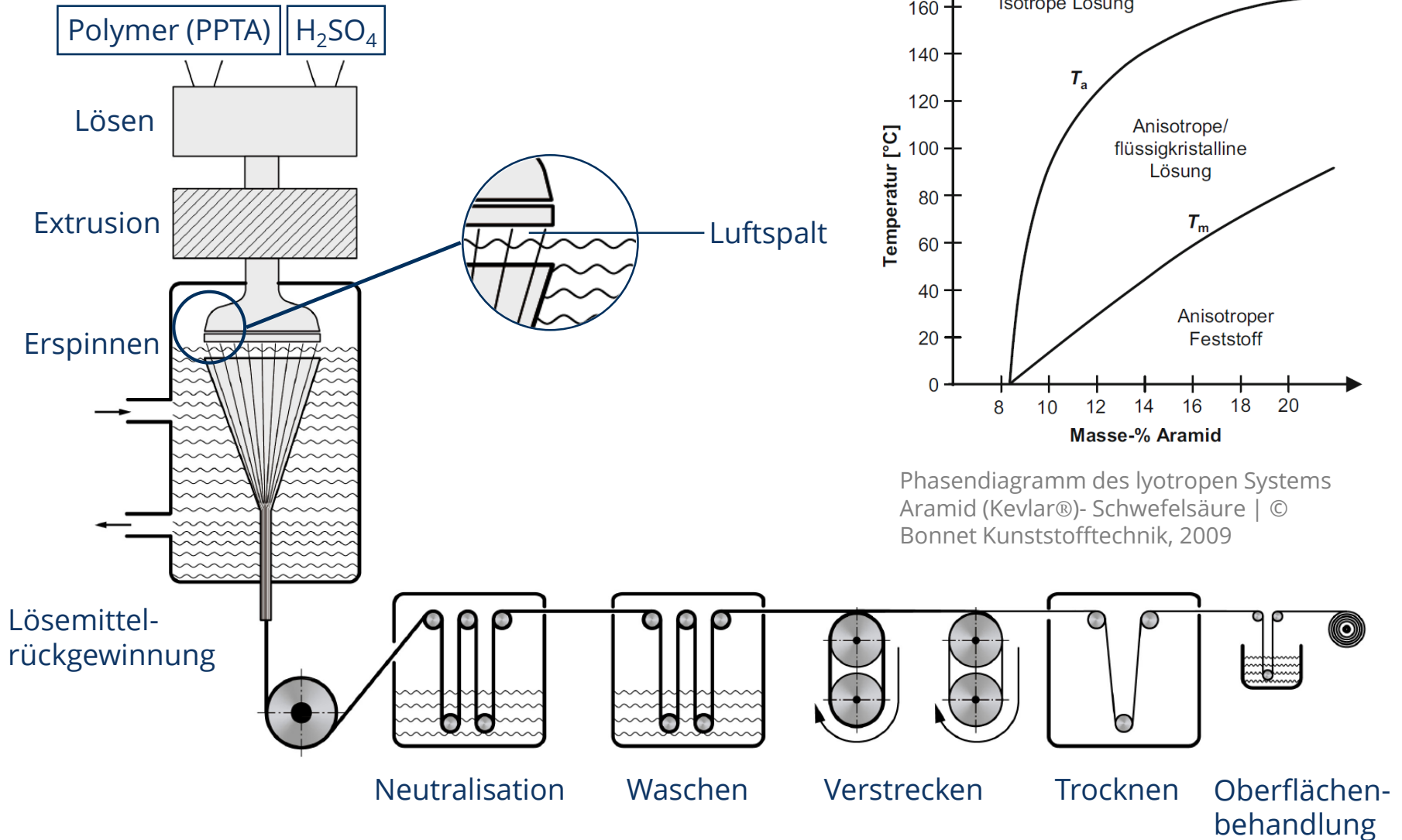
- Vororientierung und Koagulation
- Abzug der Fäden von der Mehrlochdüse mit Geschwindigkeiten bis zu 300 m/min
- (bei PPTA sogar 700 m/min)

Nachbehandlung

- Vorverstretchung
- Waschen / Trocknen
- therm. Ausrüstung und Verstreckung (p-AR)

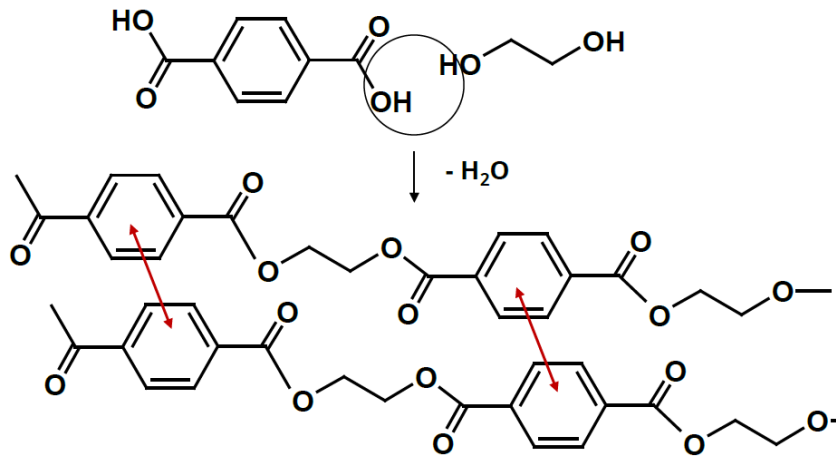


Herstellung von p-Aramid



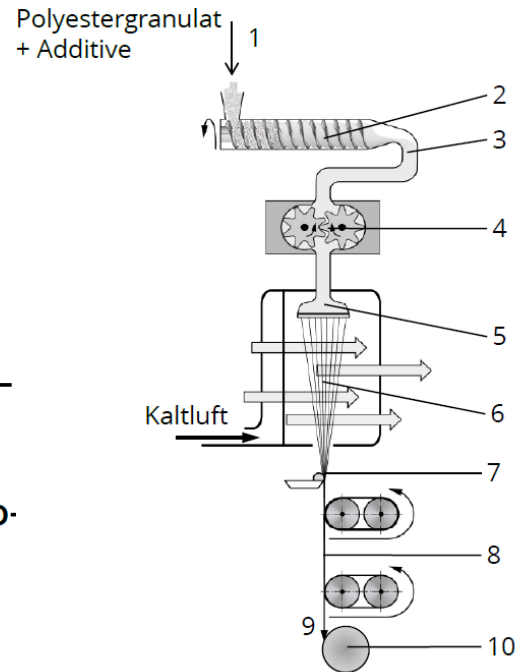
Faserbildende Polymere

Polyester



Polyethylenterephthalat (PET)

$\pi - \pi$ - Wechselwirkungen \longleftrightarrow

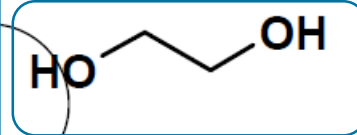
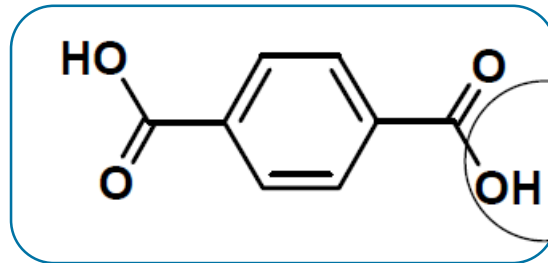


- 1 - Dosierung
- 2 - Spinnextruder
- 3 - Spinnschmelze
- 4 - Spinnpumpe
- 5 - Spinndüse
- 6 - Filamente
- 7 - Spinnpräparation
- 8 - Verstrecken
- 9 - Nachbehandlung
- 10 - Aufwicklung

Polyesterbasierte Fasern

Herstellung: Polymerisation

Therephthal-
säureester

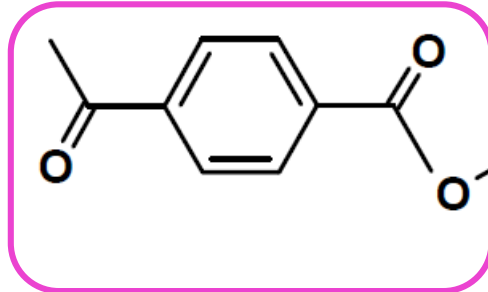


Ethylenglycol

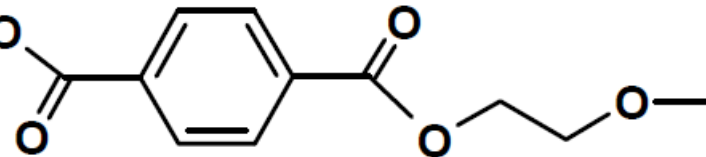
- H₂O

Polykondensation

„Terephthalat“



Ethylen

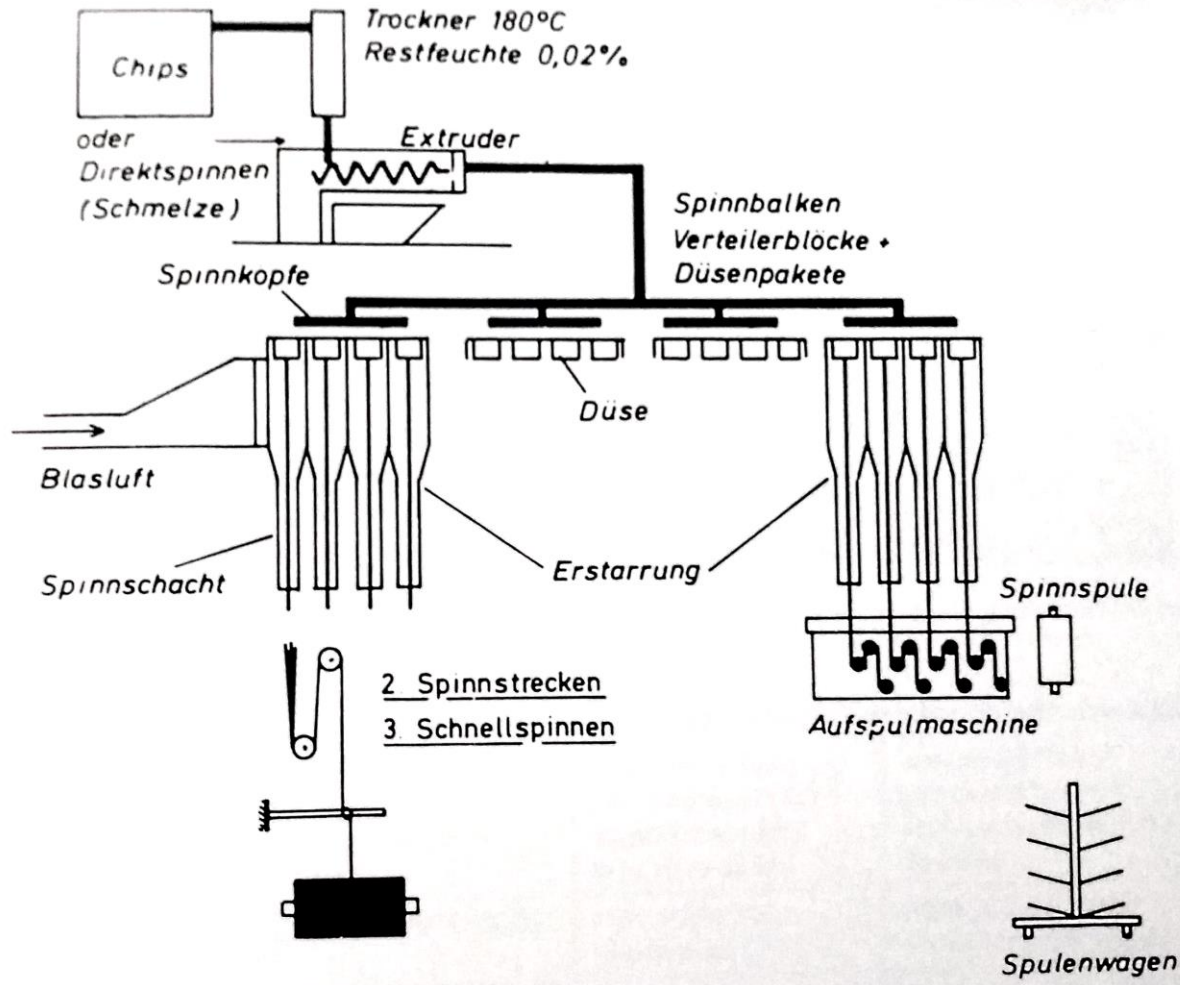


Polyethylenterephthalat (PET)

- Herstellung durch Reaktion von organischen Säuren (z.B. Terephthalsäure) mit Alkoholen (Ethylenglycol)

Polyesterbasierte Fasern

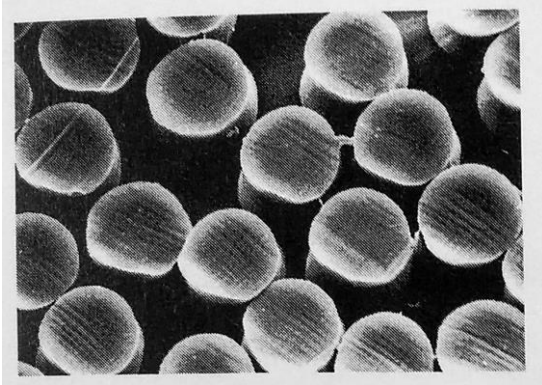
Herstellung: Polyester-Filamentgarn



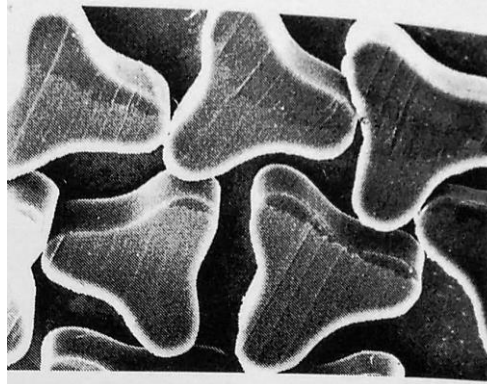
| © Chemiefaserlexikon, 1993

Polyesterbasierte Fasern

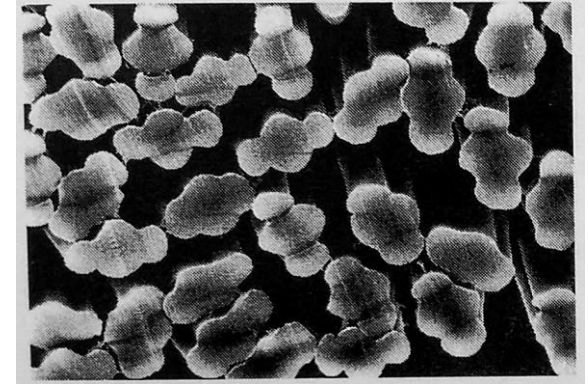
Herstellung: Querschnitte



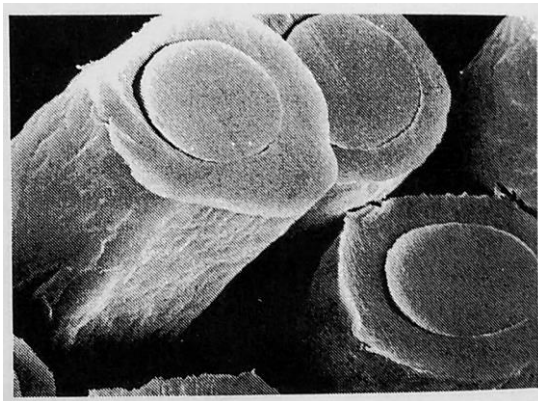
rund



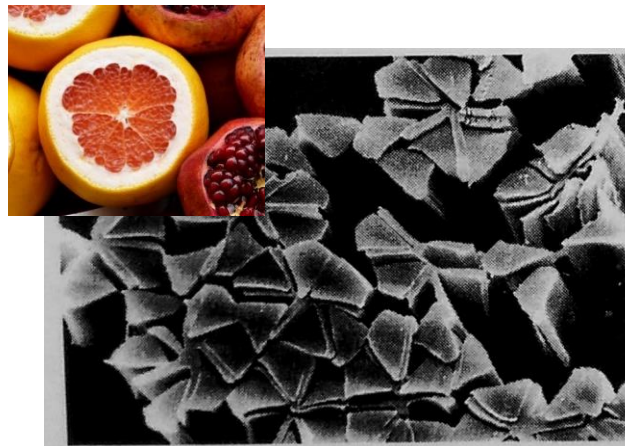
trilobal



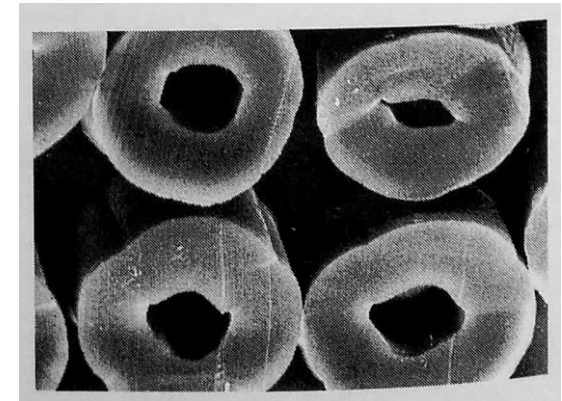
Spez. Querschnitt zur Erhöhung der Kapillarität



BiKo: Kern-Mantel



BiKo: Matrix-Fibrille



Hohlfaser

Flüssigkristallpolymerfasern (FKP-Fasern)

liquid crystal polymer (LCP) fibres

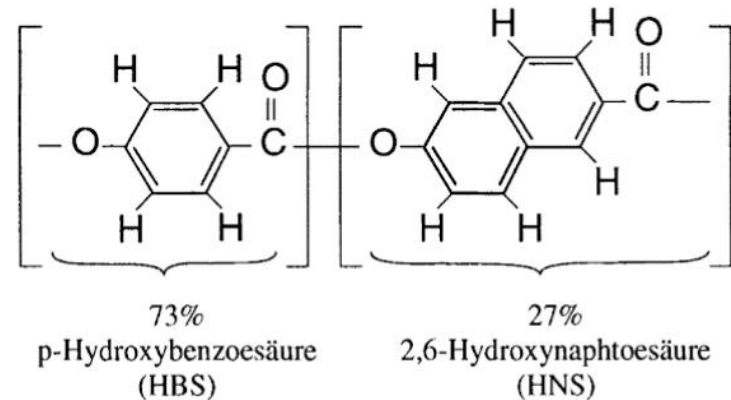
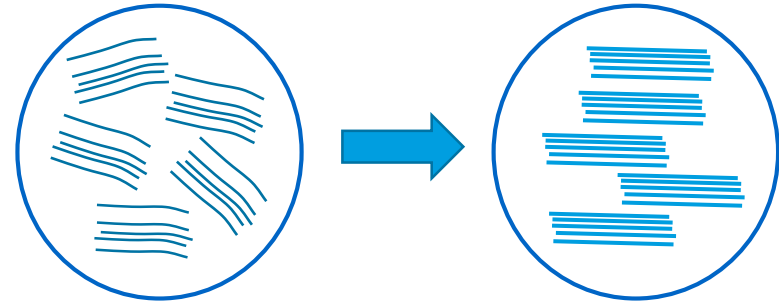
- Multifilamentgarn
- Legierungen möglich

Flüssigkristallines Polyamid:

- Kevlar[®], Twaron[®]
- Lösungsmittelspinnen

Flüssigkristallines Polyester:

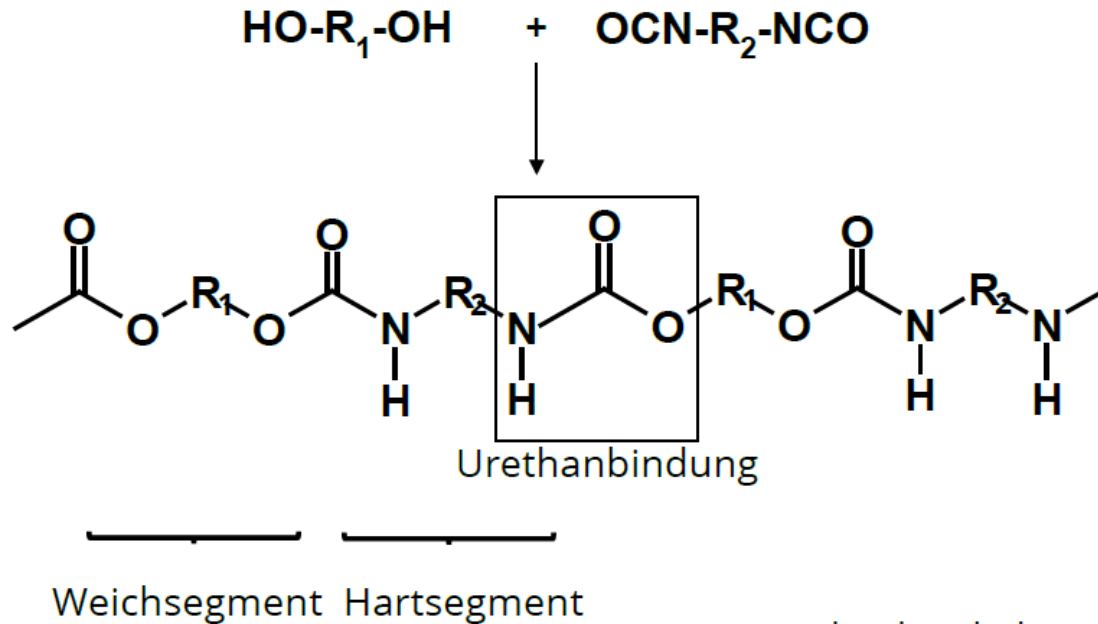
- Vectran[®], Faser von Kuraray (Japan)
- Herstellung mittels Schmelzspinnverfahren



[Flemming1995]

Faserstoffe

Polyurethan



Durch die Kombination von R1 und R2 lassen sich die Eigenschaften (z. B. Elastizität) von Fasern aus Polyurethan gezielt einstellen.

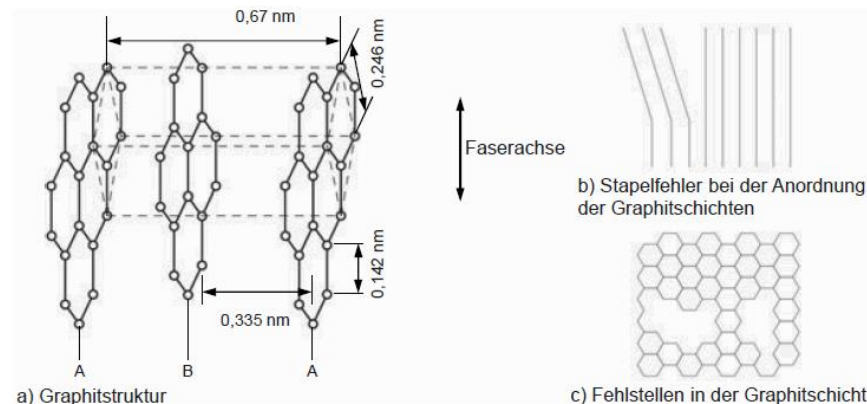
R₁: Polyetherdiole
Polyesterdiole
R₂: Methylendiphenylisocyanat (MDI)
Toluol-2,4-diisocyanat (TDI)
Hexamethylendiisocyanat (HDI)

Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Definition

Definition Kohlenstofffaser (engl.: carbon fibre, CF)

- CF besitzen einen Kohlenstoff (C)-anteil von mind. 92 und bis zu 100 Gew.-%
- Historisch gesehen werden Fasern aufgrund ihrer maximalen Umwandlungstemperaturen unterschieden in Kohlenstofffasern ($T_{\max} = 1000-1500 \text{ }^\circ\text{C}$) und Graphitfasern ($T_{\max} > 2000 \text{ }^\circ\text{C}$)
- CF sind polykristallin und bestehen aus, in Faserachse geordneten 2D-Schichten, planar-hexagonal geordneter C-Atome



Struktur des hexagonalen Graphits

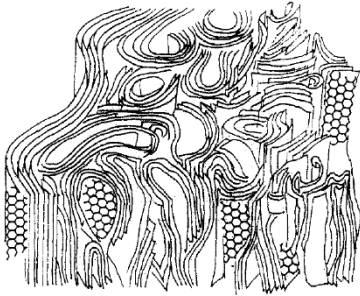
Graphit-Strukturfehler in CF

Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Definition

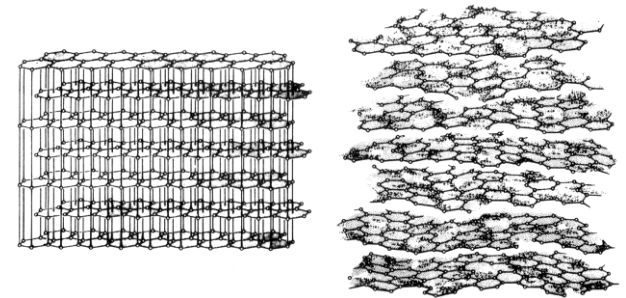
Definition Kohlenstofffaser (engl.: carbon fibre, CF)

- Kohlenstoffschichten in CF zum überwiegenden Teil turbostratisch (nicht graphitisch) angeordnet, enthalten Fremdatome und eine Vielzahl struktureller Fehlstellen

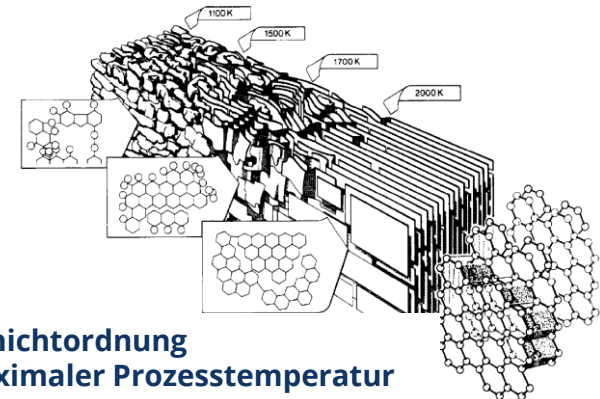


← turbostratischer Aufbau
PAN-basierter CF
Huges et al.1991

graphitisch orientierte
C-Lagen→
Claus 2008



- Mit steigender Umwandlungstemperatur:
 - Zunahme Graphitanteil
 - Abnahme an Fremdatomen
- in CF beträgt Graphitanteil <100 %
- bei (theoretisch) 100 % Graphit spricht man von Graphitfasern



Zunahme der C-Schichtordnung
mit steigender maximaler Prozessstemperatur

Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Eigenschaften und Klassifizierung von CF

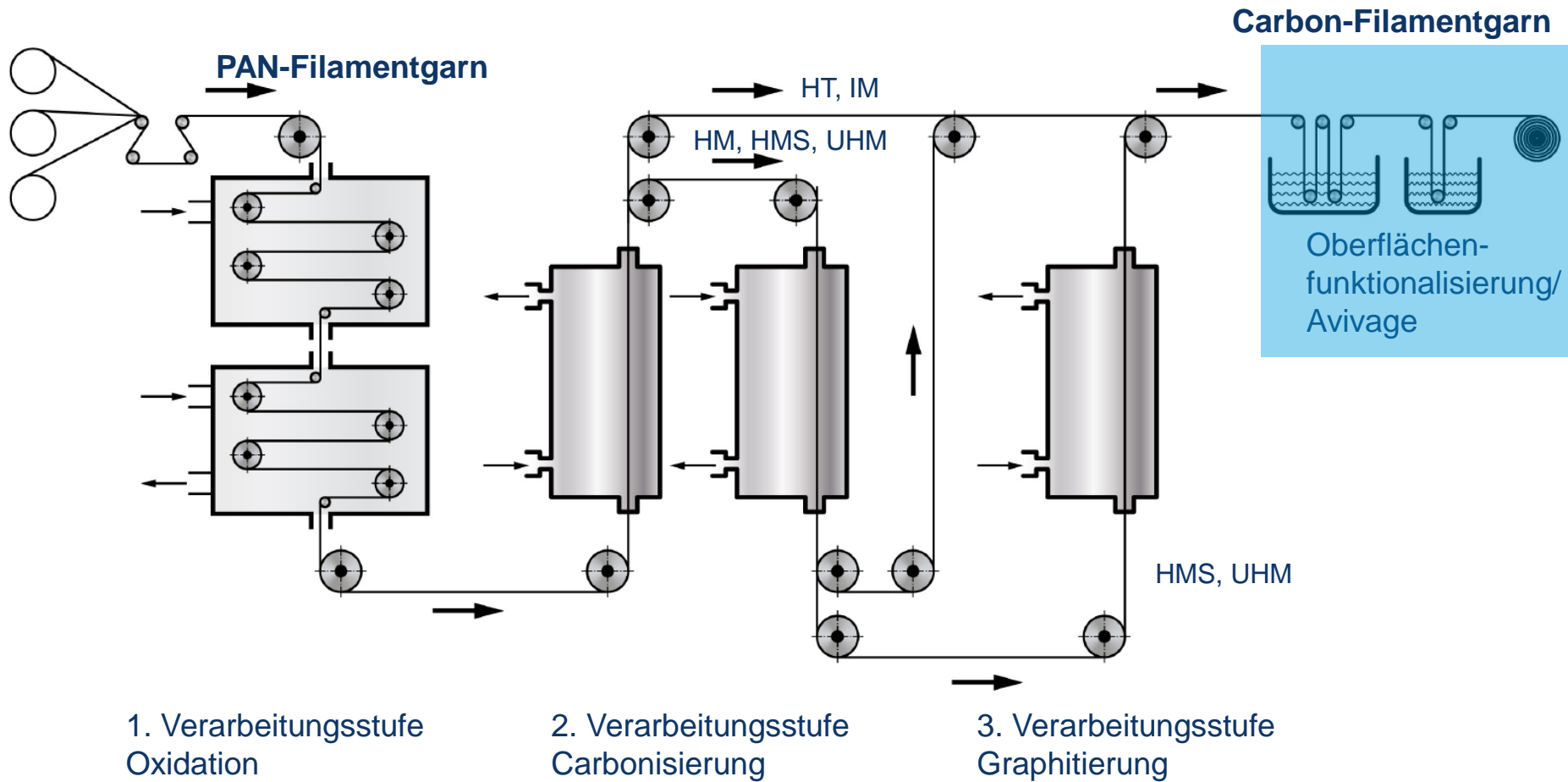
Klassifizierung

- auf der Grundlage der Faserstruktur und des Grades der Kristallitorientierung: Ultrahochmodule (UHM), Hochmodule (HM), Intermediärmodule (IM), hohe Zugfestigkeit (HT) und isotrope Kohlenstofffasern

CF-Typ	Carbonisierungstemperatur [°C]	Kristallordnung	Fernordnung	
I) hochmodulig	>2000	Größtenteils parallel zur Faserachse	Hoch	UHM HM IM
II) hochfest	ca. 1500	Teilweise parallel zur Faserachse	gering	HT
III) isotrop	<1000	zufällig	Sehr gering	Isotrop

Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

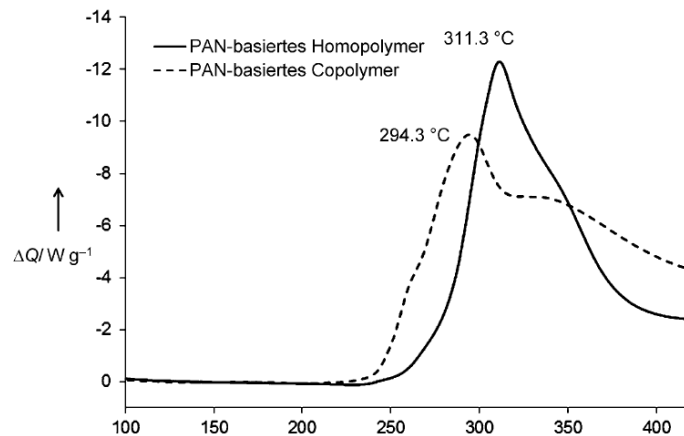
Eigenschaften und Klassifizierung von CF



Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Oxidation / Stabilisierung

- Oxidativer Prozessschritt bei 200 – 300 °C in luftbeheizten Mehrzonenöfen unter Spannung
- Oxidation von PAN nur schwer kontrollierbar (stark exotherm in engem Temperaturbereich) → Faserschädigung
- Comonomere verbreitern den Temperaturbereich und verschieben den Beginn zu niedrigeren Temperaturen



Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

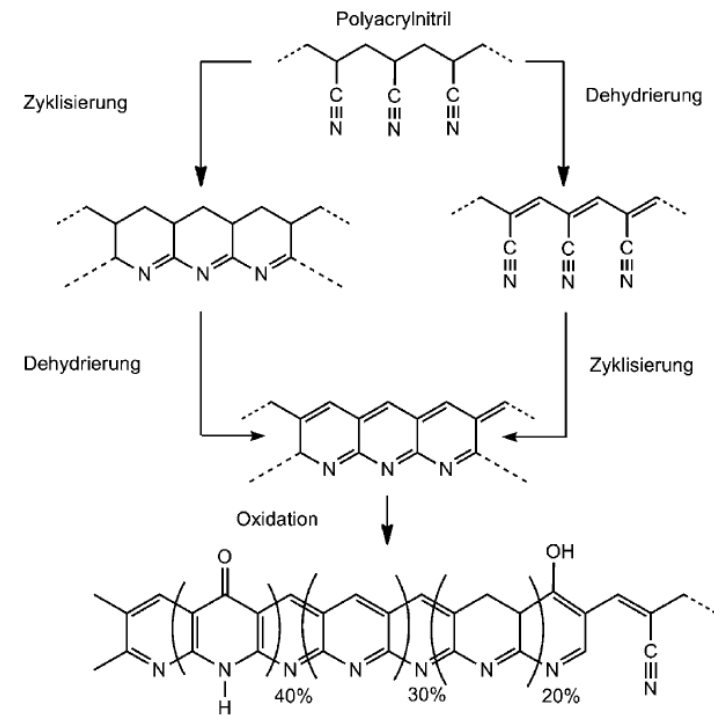
Oxidation / Stabilisierung

- Erhöhung der Dichte auf 1,36-1,38 g/cm³
- Polymerketten mittels Zyklisierung in heteroaromatische Struktur überführt
- Sauerstoffaufnahme von 8-10 Gew.-%
- Erhöhung der Dichte auf 1,36-1,38 g/cm³

→ **Unschmelzbare Faser wird erhalten**

Alternative Verfahren:

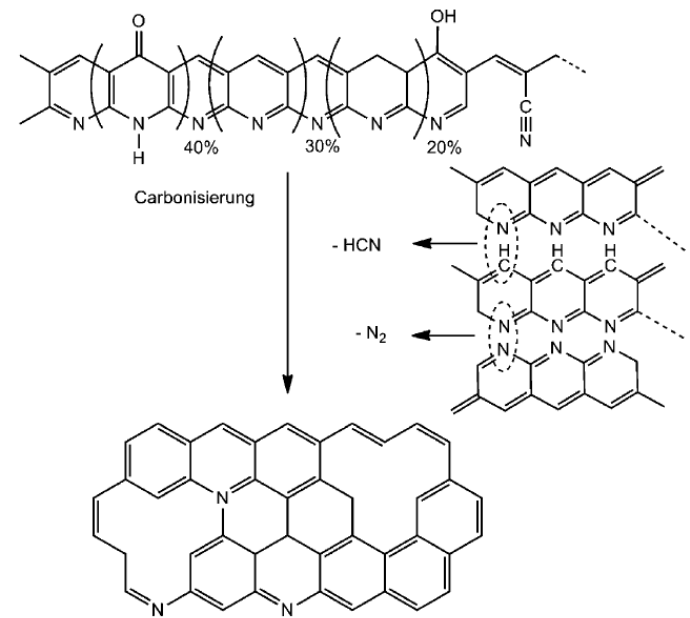
- Plasmabehandlung
- Elektronenstrahl
- Mikrowellen
- Unterdruckstabilisierung



Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Carbonisierung

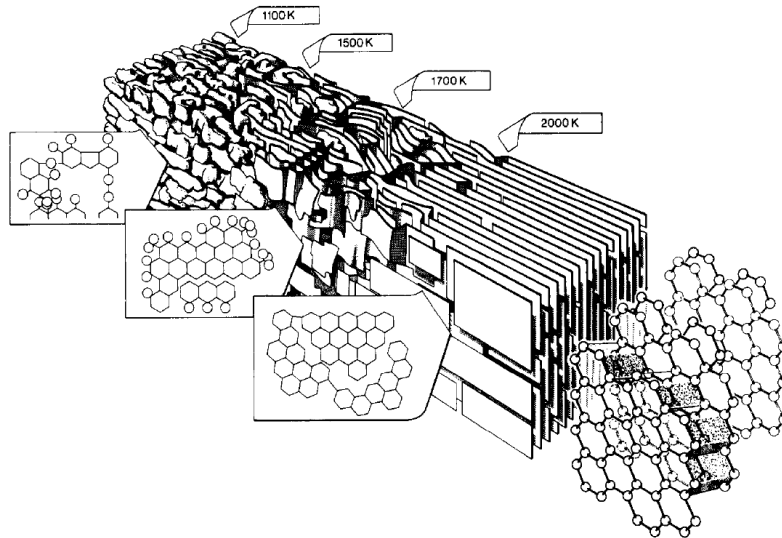
- Stabilisierte Fasern werden in inerten Gasatmosphäre pyrolysiert
- Heteroatome werden als flüchtige Verbindungen (HCN, H₂O, O₂, H₂, CO, NH₃, CH₄) entfernt
- Ca. 50-55 Gew.-% der ursprünglichen Präkursors
- Feinheit ca. 0,8 dtex, Dichte ca. 1,8 g/cm³
- Turbostratische Kohlenstoffphase entsteht (Kristalle in Faserrichtung orientiert, noch tetraedrische Kohlenstoffbindungen zwischen Graphitschichten)
- CF mit hohen Zugfestigkeiten



Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Graphitisierung

- Optionaler Prozessschritt bis 3000 °C zur Herstellung (HM- UHM Fasern)
- Orientierung der turbostratischen Kristalle unter Verzug
- Graphitfaser mit extrem hohen E-Modul unter Abnahme der Zugfestigkeit (ggü. CF)



Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Oberflächenbehandlung

Oberflächenbehandlung

Plasma

- Erhöhung der Oberflächenkonzentration an kovalent gebundenem Sauerstoff
- Bessere Eigenschaften im Komposit

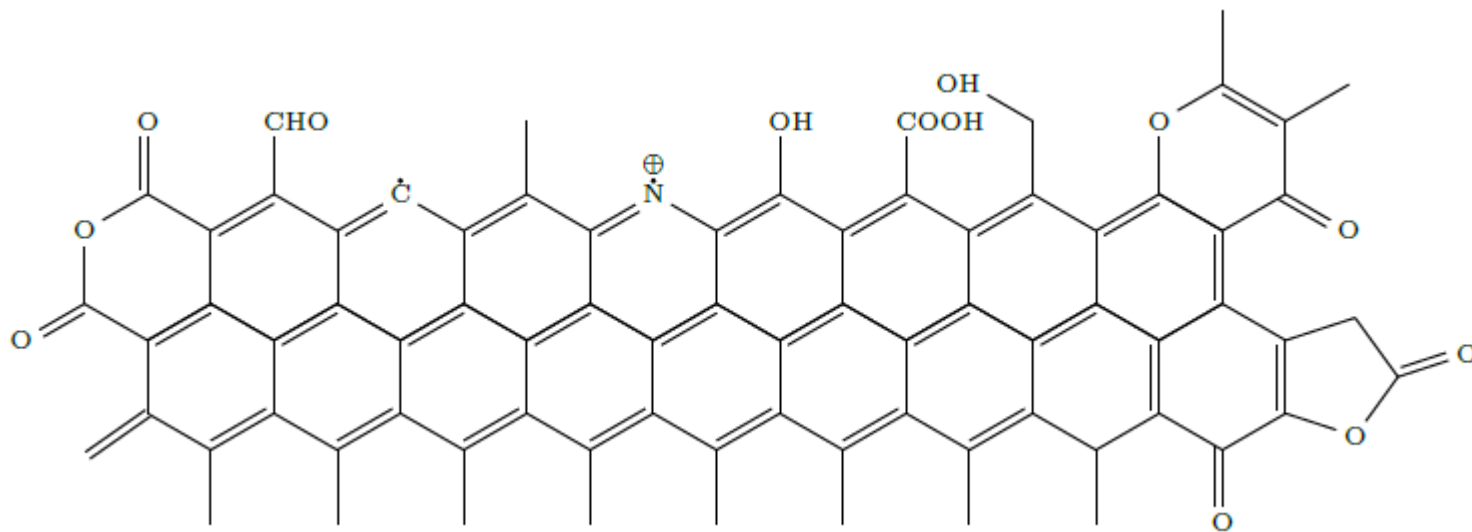
Beschichtungen (0.5 bis 5 Gew.-%)

- thermoplastische Harze, Duroplaste und wasserbasierte Beschichtungen
- Erhöhung der Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Faser und Matrixharz
- verbessert Verarbeitbarkeit der CF zu Geweben und Prepregs

Nass- oder Elektrochemisch

Kohlenstoff und Kohlenstofffaser

Oberflächenbehandlung



Funktionelle Gruppen an einer CF Oberfläche nach der Funktionalisierung | © I. Krupke

Glasfasern

Herstellung und Zusammensetzung

Bestandteile

Quarzmehl

Kalkstein

Colemantit

Kaolin

Oxide, z. B. Bor-,
Aluminium-,
Calcium- und
Magnesiumoxid



<https://www.schott.com/>

Glasfasern

Herstellung und Zusammensetzung

Trommelziehverfahren/
Düsenblasverfahren

- Indirektes Verfahren zur Erzeugung von Glasstapelfasern

Düsenziehverfahren

- Direktes Verfahren zur Erzeugung von Glasfilamenten

Stabziehverfahren

- Älteste Methode zur Erzeugung von Glasfasern

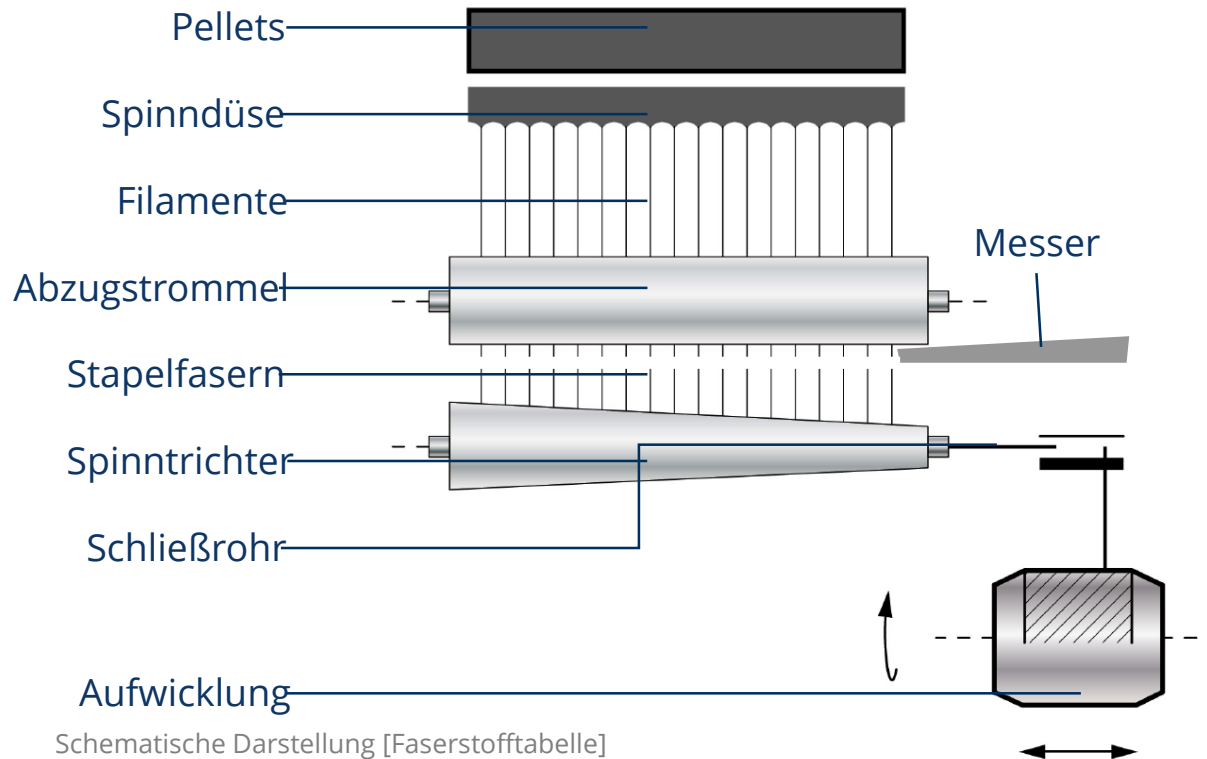
Herstellung



<http://www.oschatz-glas.com>

Glasfasern

Herstellung: Trommelziehverfahren

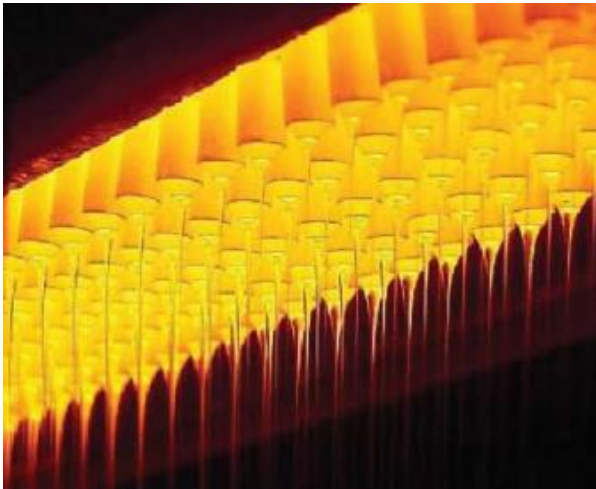


Tropfenbildung
an der Spinndüse
[Foto: Facharbeit Warenkunde - Die
Glasfaser, www.baumann-online.de]

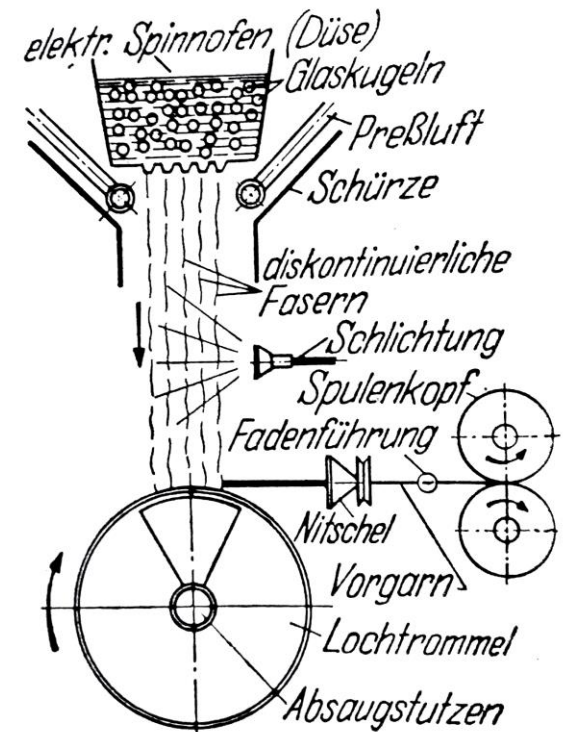
Glasfasern

Herstellung: Düsenblasverfahren

- Düsenblasverfahren oder OWENS-Verfahren
- Erzeugung von Glasfasern unterschiedlicher Länge
- Zusammenfassen der Fasern zu Lunten
(Glasstapelfaserlunte)



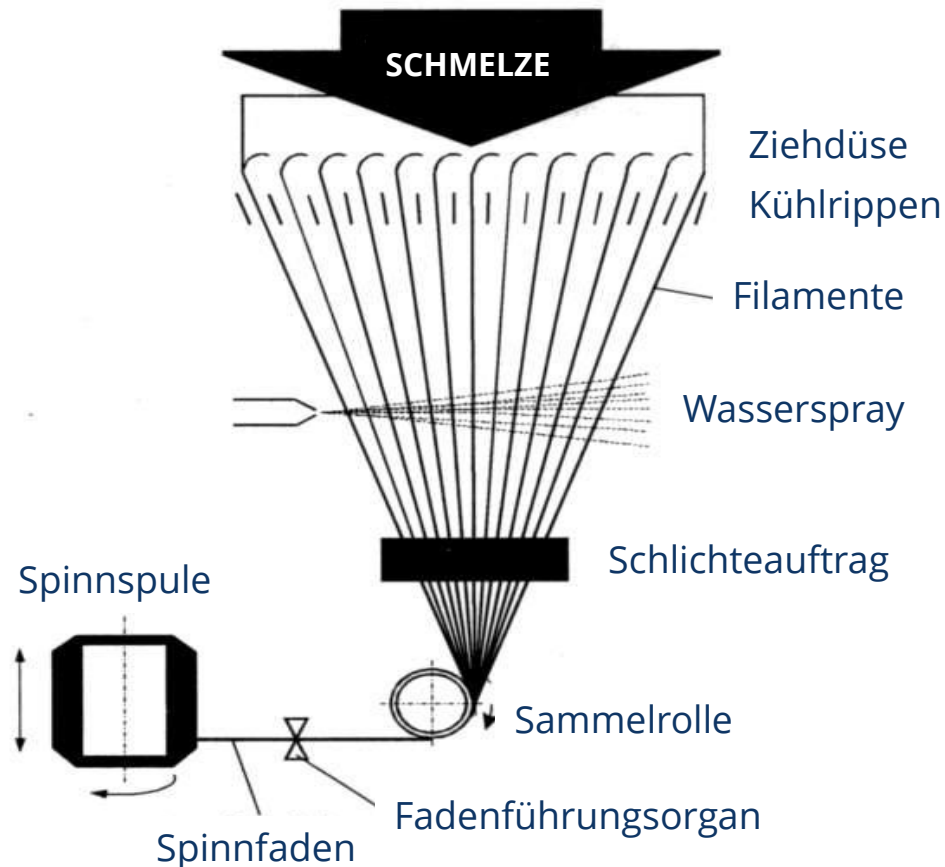
Chemgapedia.de



Schematische Darstellung der
Stapelfaserherstellung | ©
Glasfaserverstärkte Kunststoffe,
Herg. H. Hagen (1961)

Glasfasern

Herstellung: Düsenziehverfahren



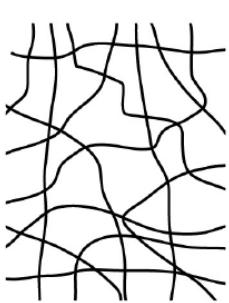
Glasfaser-spinnanlage | © IPF Dresden

Glasfasern

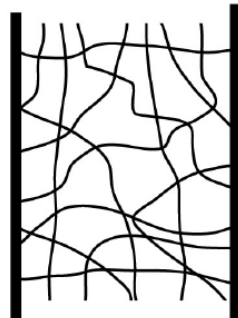
Struktur: Glas *Unterkühlte Schmelze*

- dreidimensionale, isotrope Strukturen
- Glas: fester, homogener nicht kristallisierter Körper, entstanden durch das Abkühlen einer Schmelze unterhalb des Einfrier-/Transformationsbereiches

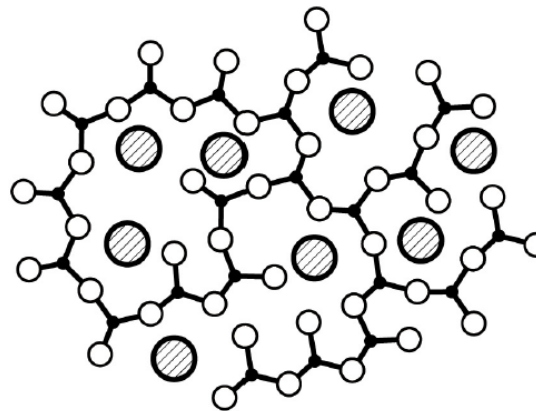
T_g



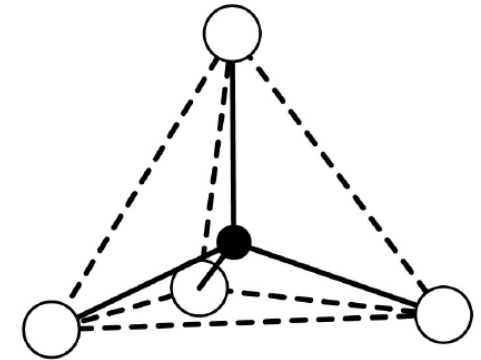
SiO₂



Filament



▲ Silicium ○ Sauerstoff ● Natrium



a) Isotrope Struktur

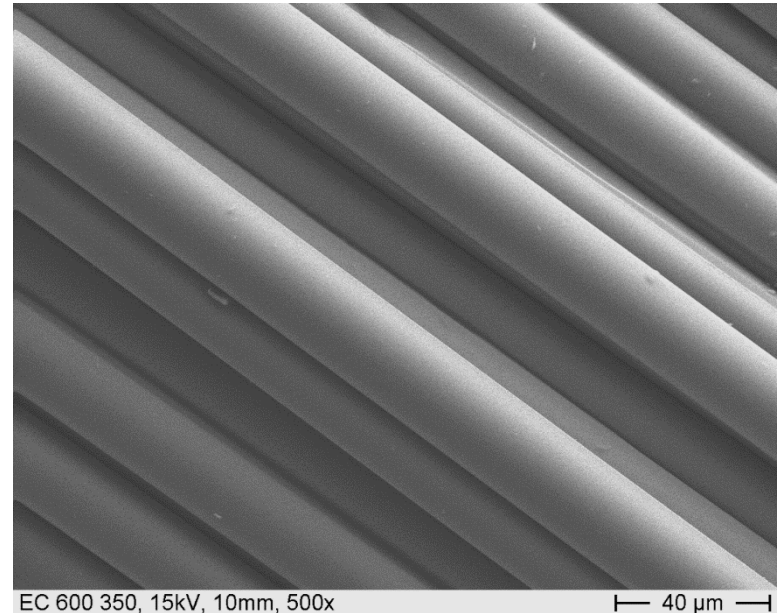
b) Zweidimensionales
Strukturmodell

c) Dreidimensionale
Darstellung des
SiO₄-Tetraeders

Glasfasern

Struktur: Glasfaser

- Vernetzte Struktur
- Glasfasern sind in Längs- und Querrichtung „polymerisiert“
- Dreidimensionale isotrope Struktur
- zusätzlich über Wasserstoffbrückenbindungen mehr oder weniger vernetzt
- Generell durch starke Quervernetzung: geringes Quellvermögen und wenig Dehnung bei Belastung

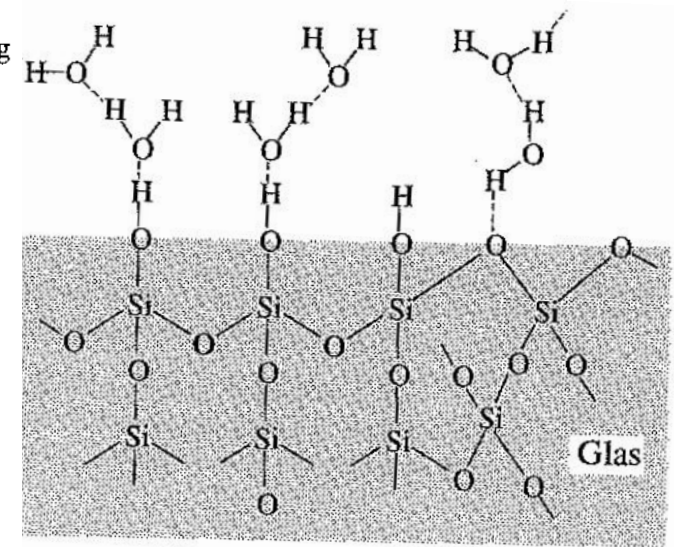
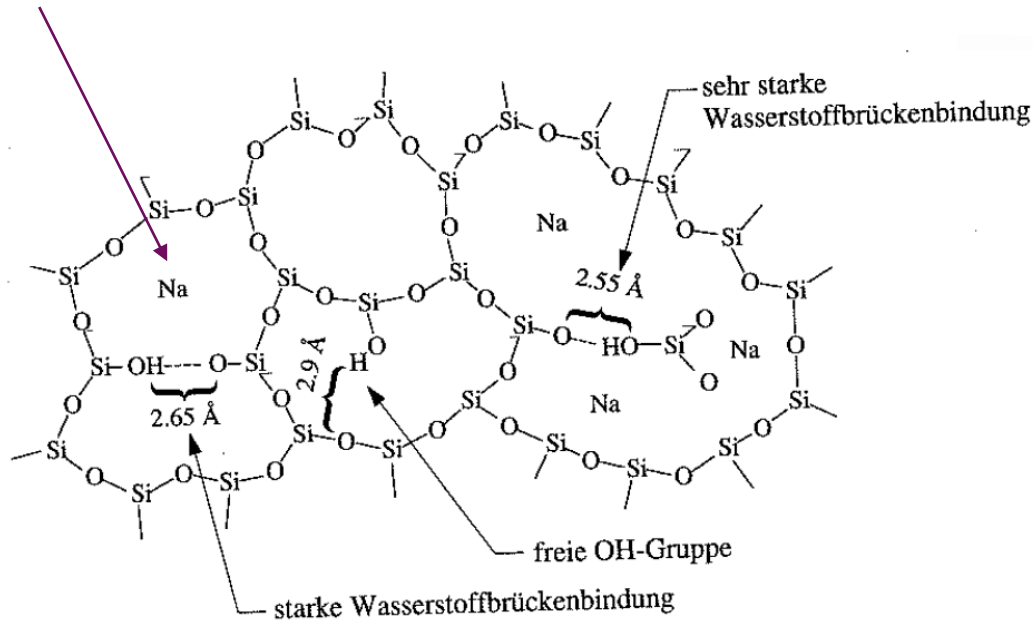


REM-Aufnahme von EC 600 350 von Glasseiden Oschatz |
© Iris Kruppke

Glasfasern

Struktur - Oberfläche

Netzwerkwanler



Adsorbierte Wassermoleküle an Glas | © Flemming, Faserverbundbauweisen, 1995

Glasfasern

Typen

E-Glas

- *Electric*, Standardfaser, ca. 90% des Marktes, wird in basischer und saurer Umgebung angegriffen
- GFK-Anwendungen, Elektroisolation

S-Glas, R-Glas

- *Strength, Resistant*
- Faser mit erhöhter Festigkeit

M-Glas

- *Modulus*
- Faser mit erhöhter Steifigkeit (E-Modul)

C-Glas

- *Chemical*
- Faser mit erhöhter Chemikalienbeständigkeit

ECR-Glas

- *Corrosion Resistant*
- Faser mit besonders hoher Korrosionsbeständigkeit

AR-Glas

- *Alkaline Resistant*
- für die Anwendung in Beton entwickelte Faser, die mit Zirconium(IV)-oxid angereichert ist

Glasfasern

Herstellung und Zusammensetzung

- Meist anorganische Silicate
- Viel-Komponentensysteme
- Aus mineralischen Oxiden

Al_2O_3 und B_2O_3 ... Netzwerkbildner

gg. Chemikalienbeständigkeit und Verminderung von Entglasen

Quarzglas,
technisches Ein-Komponenten-System

Bestandteile	Standardtypen						Sondertypen				
	Typ A	Typ C	Typ D	Typ E	Typ R	Typ S	alkali resistente Typen		Silica		
[Gew.-%]							Typ AR	Typ Z			
SiO ₂	70,0–72,0	60,0–66,0	72,0–75,0	50,0–56,0	60,0	62,0–65,0	65,0–70,0	62,0–75,0	60,9	71,0	99,9
Al ₂ O ₃	≤ 2,5	≤ 6,0	≤ 0,5	12,0–16,0	24,0–25,0	20,0–26,0	–	≤ 6,0	–	1,0	–
CaO	5,0–10,0	≤ 14,0	–	16,0–25,0	6,0–9,0	–	4,0–8,0	–	4,8	–	–
MgO	0,9–4,0	≤ 3,0	0,2	≤ 6,0	6,0–9,0	10,0–15,0	–	–	0,1	–	–
B ₂ O ₃	≤ 0,5	2,0–7,0	22,0–23,0	6,0–13,0	–	≤ 1,2	–	≤ 6,0	–	–	–
F	–	–	–	≤ 0,7	–	–	–	–	–	–	–
Na ₂ O	12,0–15,0	8,0–15,0	1,3	0,3–2,0	0,4	≤ 1,1	14,0–20,0	13,0–21,0	14,3	11,0	–
ZrO ₂	–	–	–	–	–	–	–	7,0–17,0	10,2	16,0	–
K ₂ O	≤ 1,5	1,0–8,0	≤ 1,5	0,2–0,5	0,1	–	≤ 3,0	–	2,7	–	–
Fe ₂ O ₃	≤ 0,5	≤ 0,3	0,2	0,3	0,3	–	–	≤ 5,0	–	≤ 2,7	–
TiO ₂	–	–	–	–	0,2	–	6,0–12,0	≤ 4,0	6,5	–	–
ZnO	–	–	–	–	–	–	–	1,0–10,0	–	–	–
CaF ₂	–	–	–	–	–	–	–	≤ 2,0	–	–	–
LiO ₂	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,0	–
SO ₃	0,7	–	–	–	–	–	–	–	0,2	–	–

Für Witterungsbeständigkeit

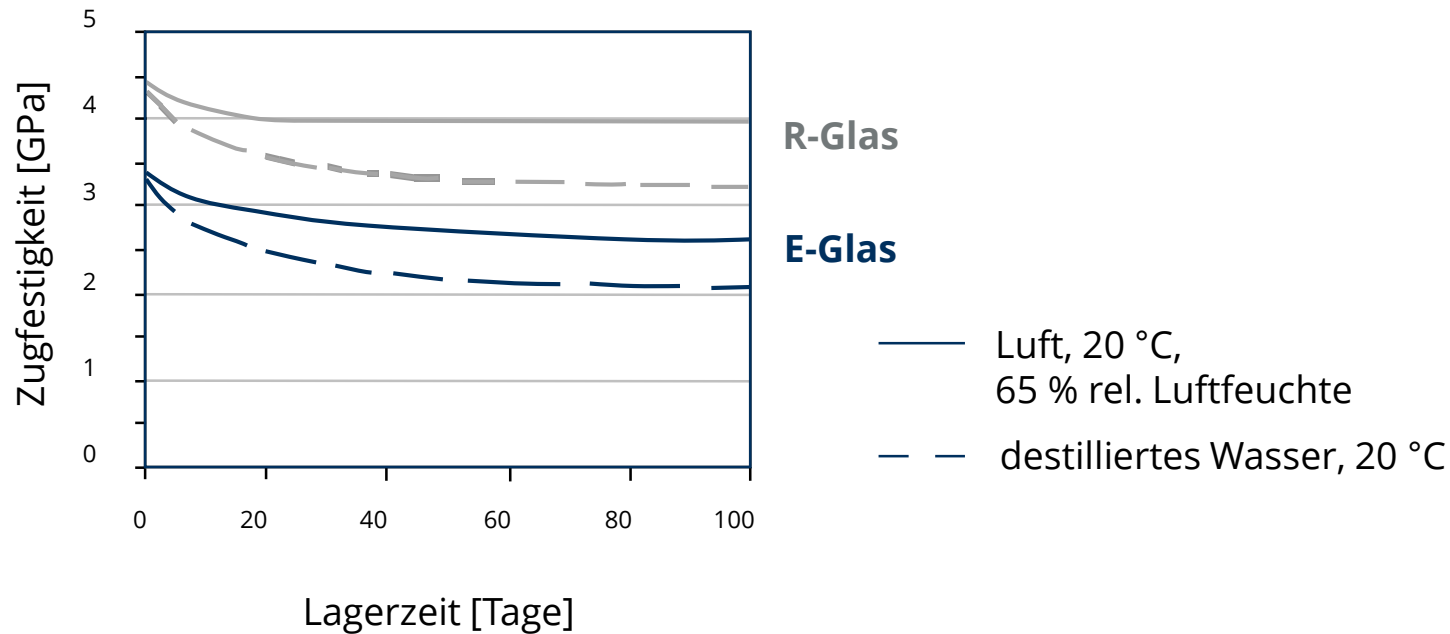
Wenig Alkali, bessere hydrolytische Eigenschaften

K⁺, Na⁺, Ca²⁺... Netzwerkwandler

[Faserstoffabelle P.-A. Koch]

Medienbeständigkeit von Glasfasern

Zugfestigkeit von Glasfilamenten bei Lagerung in feuchter Luft und Wasser



- Festigkeitsverlust in Abhängigkeit vom Glasfaser-Typ bis zu 30 % bei Einfluss von sauren und basischen Medien

Ausgewählte Eigenschaften von Glasfasern

- hohe Festigkeit
- geringe Dehnung
- idealelastisch
- gute radiale Druckfestigkeit (durch Isotropie)
- gute dielektrische Eigenschaften (isolierend)
- sprödes Verhalten (Filamentbrüche)

		Typ E	Typ AR	Typ R	Typ S	Silica	Typ M
Dichte	g/cm ³	2,52 – 2,60	2,7	2,50 – 2,53	2,45 – 2,55	2,00	2,89
E-Modul	GPa	72 – 77	76	83 – 87	75 – 88	56 – 66	87 – 115
Zugfestigkeit	GPa	3,4 – 3,7	2,0	4,4 – 4,75	4,3 – 4,9	0,8	4,75 – 4,9
Bruchdehnung	%	3,3 – 4,8	2,6	4,1 – 5,4	4,2 – 5,4	1,5	4

Empfehlungen für Glasfasern

Verarbeitungsempfehlungen bei Belastung auf Zug, Biegung und Reibung notwendig bezüglich

- Produktionsgeschwindigkeiten
- Umlenk- und Abzugswinkel
- Wahl von Fadenführungselementen

Vorbehandlung durch Schichten

- Textilschichten (Stärke,-Fette-Basis)
- Kunststoffschichten (Polyvinylacetat-Basis mit Silan-Haftvermittler)

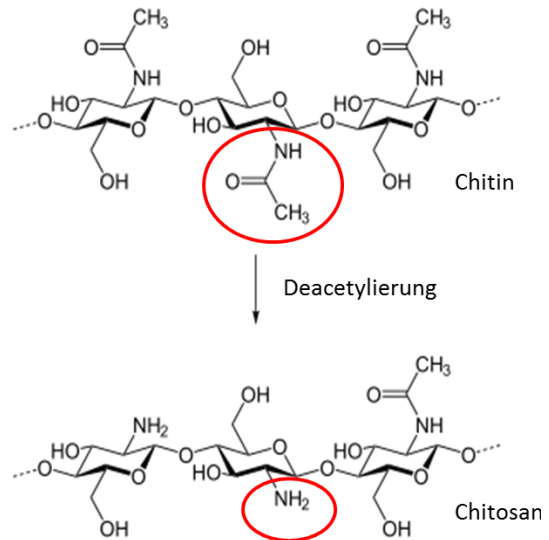
Bevorzugte Matrixsysteme

- Phenolharze, ungesättigte Polyesterharze
- Epoxidharze, Vinylesterharze
- Thermoplaste
- Zement, Gips
- Verstärkung von Spachtelmasse, Bitumen, Papier, Schaumkunststoff

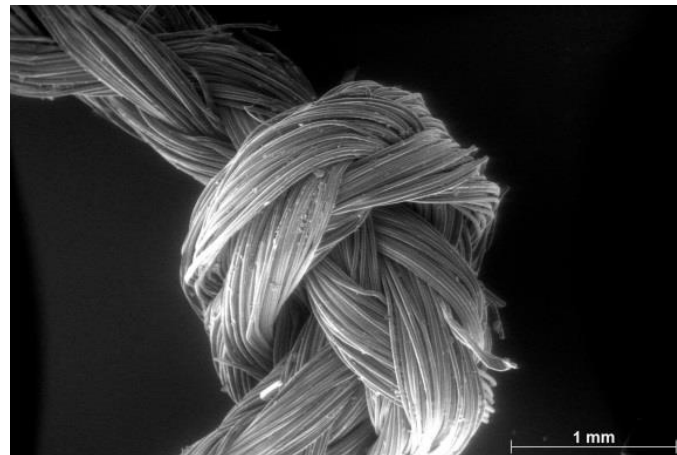


Fasertypen

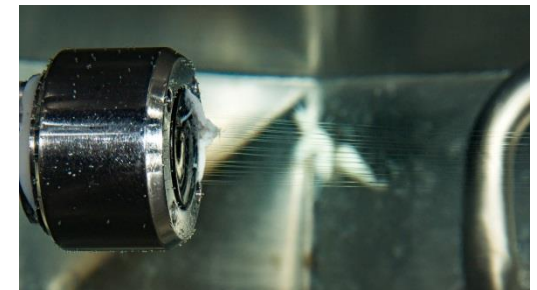
Chitosanfaser



Lösungsmittelnassspinnanlage am ITM, Dresden
Dobritz | © ITM Dresden



Knoten eines geflochtenen
Chitosanfilamentgarns | ©
Lukoschek, ITM Dresden



Spinnpaket im Koagulationsbad | © ITM Dresden

Matrixfasern

Polypropylen

Polyamid

Polyester

Polyphenylensulfid

Polyetherimid

Polyetheretherketon

Polyterafluorethylen



Hybridgarn rCF/PA | © Hasan, ITM

Zusammenfassung / Lernerfolgsfragen

Welche Oberflächenfunktionalitäten weisen die verschiedenen Fasermaterialien bedingt durch Aufbau und/oder Herstellung auf?

Danke.

