

Tepex[®]

**HINWEISE FÜR
DEN VERARBEITER**

Envalior
Imagine the Future

INHALTSVERZEICHNIS

1. Über Tepex®

05	1.1.	Matrixsysteme
06	1.2.	Verstärkungsfasern
06	1.2.1.	Glasfasern
06	1.2.2.	Kohlenstofffasern
07	1.2.3.	Weitere Fasertypen
07	1.3.	Faser–Matrix Haftung und Aufgabenteilung zwischen Faser und Matrix
08	1.4.	Textile Halbzeuge
09	1.5.	Aufbauten von Tepex®–Laminaten
09	1.6.	Tepex®–Familie
09	1.6.1.	Tepex® dynalite
09	1.6.2.	Tepex® flowcore
10	1.6.4.	Tepex® anti–ballistic
10	1.6.5.	Tepex® UDea®
10	1.7.	Nomenklatur
11	1.8.	Tepex®–Eigenschaften
11	1.8.1.	Flammschutz mit Tepex®

2. Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Tepex®

12	2.1.	Aufheizen
13	2.2.	Umformverhalten
13	2.2.1.	Umformen mit Silikon– oder Gummistempeln
14	2.2.2.	Umformen mit Metallwerkzeugen
14	2.2.3.	Fließpressen von Tepex® flowcore

15	2.3.	Kombinationstechnologien
15		2.2.4. Wickeln von Tepex® UDea®
16		2.3.1. Insert-Molding (Kombination mit Spritzgießen)
17		2.3.2. Hybrid-Molding (Kombination mit Spritzgießen)
17		2.3.3. Compression-Molding (Kombination mit LFT-Fließpressen)
18		2.3.4. Patchen (Kombination mit UDea® Tape)

18	2.4.	Variotherme Prozessführung
----	------	----------------------------

3. Auslegung von Werkzeugen und Handlingsystemen

19	3.1.	Drapieren von Tepex®
20	3.2.	Auslegungshinweise bezüglich des speziellen Umformverhaltens von Tepex®
20	3.3.	Gestaltung der Werkzeugkavität
21	3.4.	Integration von Löchern
22	3.5.	Auslegungshinweise zum Überspritzen von Tepex®
22		3.5.1. Rippengestaltung
22		3.5.2. Gestaltung der Randbereiche
22		3.5.3. Patchen bzw. Überlappen von Tepex®
23	3.6.	Allgemeine Auslegungshinweise zum Handling von Tepex®

4. Verbindungstechniken für Tepex®

23	4.1.	Kleben
24	4.2.	Fügen durch Spritzgießen
24	4.3.	Mechanische Fügeverfahren
24	4.4.	Schweißen

5. Nachhaltigkeit

25 5.1. Recycling von Tepex®

26 5.2. CO₂-Fußabdruck von Tepex®

6. Konstruktion und Berechnung von Bauteilen aus Tepex®

28 6.1. FEM-Berechnungen: Voraussetzungen und Besonderheiten

28 6.2. Drapiersimulation

7. Engineering Service entlang der gesamten Entwicklungskette

29 6.3. Materialdaten und Materialmodelle für die eigene Bauteilauslegung

8. Danksagung

1. ÜBER TEPEX®

Diese Broschüre gibt einen Überblick über den Aufbau von Tepex®, seine Eigenschaften und seine Verarbeitungsmöglichkeiten. Außerdem lernen Sie unsere CAE-Serviceleistungen kennen, mit denen wir Sie bei allen Schritten der Entwicklung und Fertigung von Bauteilen aus Tepex® unterstützen. Unser thermoplastischer Hochleistungsverbundkunststoff Tepex® hat sich als großserientauglicher Leichtbauwerkstoff für die verschiedensten Anwendungen etabliert. Seine gleichbleibende Qualität und die thermoplastische Matrix machen ihn zu einem idealen Werkstoff für vollautomatisierbare und reproduzierbare Fertigungs- bzw. Verarbeitungsprozesse. Tepex® wird im Automobilbau, der Sportindustrie, der Unterhaltungselektronik und in diversen anderen Branchen eingesetzt.

Tepex® steht für eine Werkstoffgruppe vollständig imprägnierter und konsolidierter, plattenförmiger Verbundhalbzeuge aus hochfesten Endlosfasern (bzw. Langfasern im Falle von Tepex® flowcore) und einer thermoplastischen Matrix. Diese sogenannten Organobleche lassen sich durch Erwärmung und anschließender Umformung in kurzen Zykluszeiten zu komplexen Bauteilen verarbeiten. Als Endlosfasern dienen hauptsächlich Glas- und/oder Carbonfasern in Form von Geweben oder anderen textilen Halbzeugen. Matrixmaterialien sind Thermoplaste wie Polypropylen, Polyamid, Polycarbonat, thermoplastisches Polyurethan oder biobasierte Thermoplaste.

Die Stärken von Tepex® lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

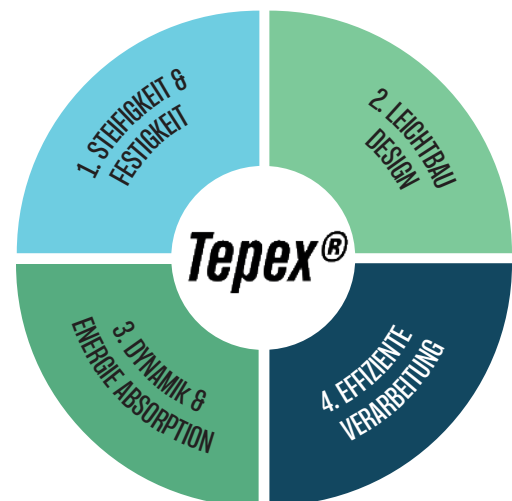
- hohe Steifigkeit
- hohe Festigkeit
- großes Leichtbaupotenzial durch geringe Dichte
- kurze Zykluszeiten bei der Bauteilfertigung
- thermoplastische Matrix ermöglicht das Umspritzen und Schweißen
- hohe Formgebungsfreiheit
- Lösungsmittelfreiheit
- werkstofflich rezyklierbar
- hohes Energieabsorptionsverhalten
- niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient
- gute Form-, Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit

1.1. Matrixsysteme

Für Tepex® werden ausschließlich thermoplastische Kunststoffe als Matrixwerkstoff genutzt. Ihre Eigenschaften wirken sich insbesondere bei der Verarbeitung günstig aus. So lassen sich mit thermoplastischen Matrices sehr kurze Zykluszeiten realisieren, die Arbeitshygiene ist unkritisch und Bauteile sind einfach rezyklierbar. Darüber hinaus bieten thermoplastisch basierte Faser-Kunststoff-Verbunde die Möglichkeit, sie mit anderen thermoplastischen Kunststoffen gleicher bzw. kompatibler Matrix und deren Verarbeitungsverfahren zu kombinieren. Damit lässt sich die konstruktive Freiheit bei der Bauteilgestaltung deutlich erhöhen. Der Matrixwerkstoff dient dabei nicht nur als „Klebstoff“ für die Verstärkungsfasern, sondern übernimmt im Verbund viele essentielle Aufgaben.

Dem Matrixsystem kommen wesentliche Aufgaben zu:

- Kräfte in die Faser einleiten
- Kräfte von Faser zu Faser überleiten
- Fasern vor Umgebungseinflüssen schützen
- Fixierung der Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung
- Übernahme von mechanischen Lasten insbesondere bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung und bei Schubbelastung



Das Tepex®-Portfolio umfasst u. a. die folgenden Thermoplaste:

- Diverse Polyamide (z. B. PA 6, PA 6.6, PA 4.6)
- Polypropylen (PP)
- Thermoplastisches Polyurethan (TPU)
- Polycarbonat (PC)
- Biobasierte Thermoplaste (z. B. PLA, PA 4.10, PA 10.10)
- Hochtemperaturthermoplaste (z. B. PPS, PEI)

1.2. Verstärkungsfasern

Wie bei anderen Faser-Kunststoff-Verbunden auch haben die Fasern bei Tepex® die Aufgabe, die am Bauteil anliegenden Lasten zu übernehmen. Hierzu müssen diese eine hohe Steifigkeit und Festigkeit sowie eine möglichst geringe Dichte mitbringen. Die Erfahrung zeigt, dass die meisten Werkstoffe in Faserform vielfach höhere mechanische Eigenschaften aufweisen als in ihrer kompakten Form. Aufgrund der geringen Fehlstellendichte in ihrer Faserform haben sich Glas- und Kohlenstofffasern inzwischen zu gängigen Konstruktionswerkstoffen entwickelt.

1.2.1. Glasfasern

Die Glasfaser ist eine anorganische Faser, deren hohe Festigkeit auf der starken kovalenten Bindung (Atombindung) zwischen Silizium und Sauerstoff basiert (SiO_2 = Quarz). Glasfasern entstehen aus einer Schmelze, die schnell abgekühlt wird, um die Kristallisation zu verhindern und ein dreidimensionales Netzwerk mit amorpher Struktur entstehen zu lassen.

Daher besitzt die Glasfaser isotrope Eigenschaften.

Zusammenfassung der Eigenschaften von Glasfasern:

- gute Wirtschaftlichkeit bei hohen mechanischen Kennwerten
- sehr hohe Zug- und Druckfestigkeit
- ausgezeichnete thermische und elektrische Isolationsfähigkeit
- vollkommene Unbrennbarkeit
- keine Feuchtigkeitsaufnahme
- Resistent gegen Verderb

Je nach chemischer Zusammensetzung unterscheidet man unterschiedliche Fasertypen, wobei das E-Glas der mit Abstand gebräuchlichste Typ ist und meist auch für Tepex® eingesetzt wird. Glasfasern haben einen Durchmesser zwischen 9 und 24 μm . Die Feinheit eines Glasfasergarns oder -rovings (Bündel aus parallelen Endlosfasern), Titer genannt, wird in der Einheit tex (1 tex = 1 g/1000 m) angegeben.

Diese Größe ist ein Maß für den Durchmesser und die Anzahl der einzelnen Filamente in einem Glasfaserstrang (Garn oder Roving). Feine Typen mit einem Titer < 300 tex werden i.d.R. als Filamentgarne bezeichnet, während Typen mit einem Titer > 300 tex zu den Rovinggarnen zählen. Die jeweiligen Garnfeinheiten können den entsprechenden Tepex®-Datenblättern entnommen werden.

1.2.2. Kohlenstofffasern

Als Kohlenstofffasern bezeichnet man solche technischen Fasern, welche in einem Temperaturbereich von 1300 bis 3000 °C aus einem Precursor (meist PAN-Fasern) hergestellt werden und deren Kohlenstoff-Gehalt zwischen 92 und 99,9 Gew.-% liegt. Kohlenstofffasern sind aus einzelnen Schichten aufgebaut (Graphitstruktur), wobei die hohe Festigkeit und der hohe E-Modul auf der starken kovalenten Bindung (Atombindung) zwischen den einzelnen Kohlenstoffatomen innerhalb dieser Schichten basieren. Zwischen den einzelnen Schichten herrschen dagegen nur schwache Bindungen, sodass sich quer zur Faserrichtung vergleichsweise geringe Eigenschaften einstellen. Die Kohlenstofffaser ist aufgrund ihres extremen Eigenschaftsprofils die Herausragende unter allen Verstärkungsfasern.

Zusammenfassung der Eigenschaften von C-Fasern:

- sehr geringe Dichte
- extrem hohe Festigkeiten und sehr hohe E-Module
- nahezu linear-elastisches Verhalten
- ausgeprägte Anisotropie
- sehr geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, in Faserrichtung sogar negativ
- Beständigkeit gegen die meisten Säuren und Alkalien, Verträglichkeit im menschlichen Körper
- gute elektrische Leitfähigkeit (elektrische Abschirmwirkung)

Auch Kohlenstofffasern werden in verschiedene Typen unterteilt, die sich in ihren mechanischen Eigenschaften teilweise erheblich unterscheiden. Die wirtschaftlich attraktivste und für Tepex® meist genutzte Faser ist die HT-Faser (HT = high tenacity), die eine sehr hohe Festigkeit und gute Steifigkeiten aufweist. C-Fasern haben einen Durchmesser zwischen 5 und 10 μm . Die übliche Lieferform von C-Fasern ist ähnlich wie bei Glasfasern ein endloses, auf eine Spule aufgewickelter Tow bzw. Roving. Diese Tows bestehen aus mehreren Einzelfilamenten, wobei die Anzahl dieser Filamente in einem Tow mit der K-Zahl (1 K = 1000 Filamente/Tow) angegeben wird. Kohlenstofffasern mit einer K-Zahl größer 24 bezeichnet man als sogenannte „Heavy-Tows“.

1.2.3. Weitere Fasertypen

Neben Glas- und Kohlenstofffasern existieren viele weitere Faserwerkstoffe, die ebenfalls für den Einsatz in Tepex® geeignet sind, in der Regel aber nur für spezielle Anforderungsprofile benötigt werden:

Aramidfasern verfügen über eine extrem hohe Zähigkeit und eignen sich besonders gut für Anwendungen, in denen die Energieaufnahme im Vordergrund steht. Aramid eignet sich z.B. für stich- oder schlagsichere Anwendungen oder auch für Schutzausrüstung. Die hohe Zähigkeit der Aramidfaser z.B. gegenüber der Kohlenstofffaser geht allerdings auch mit einer niedrigeren Steifigkeit einher.

Naturfasern, wie beispielsweise Flachs oder auch Mineralfasern wie Basalt sind ebenfalls mögliche Varianten,

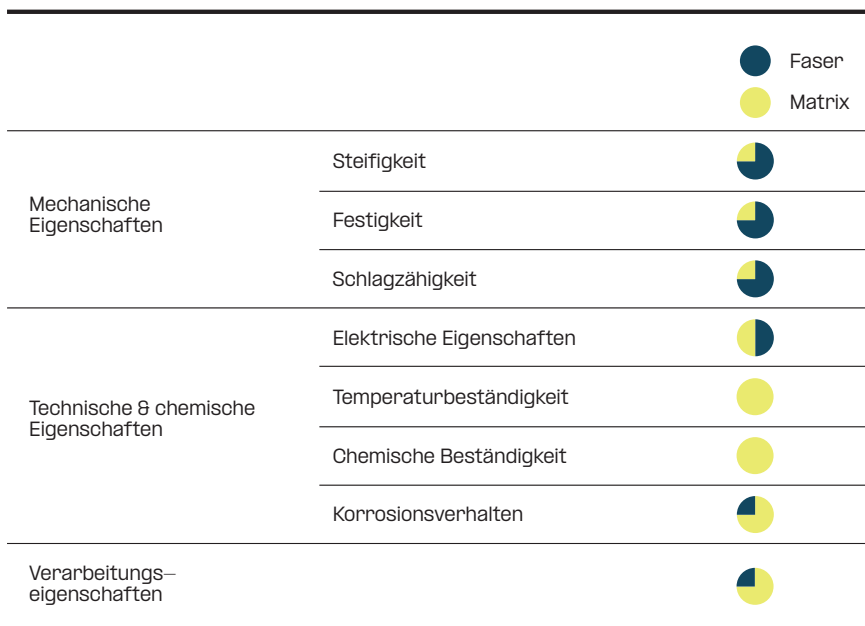
die als Tepex®-Verstärkungsfaser eingesetzt werden. Sie stellen nachhaltige Alternativen dar, die mit weniger Energie oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können und so einen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten. Trotz vergleichbar geringeren mechanischen Eigenschaften können Naturfasern dabei z.B. Vorteile bei der akustischen Dämmung oder bei der Vibrationsdämpfung haben, die für diesen Fasertyp auch aus technischer Sicht spezifische Anwendungspotentiale eröffnet.

Der Tepex®-Herstellprozess ermöglicht eine einfache Kombination verschiedener Fasertypen in einem Verbundaufbau. So können die Vorteile verschiedener Fasertypen leicht miteinander kombiniert und die jeweiligen Nachteile gegenseitig kompensiert werden.

1.3. Faser-Matrix Haftung und Aufgabenteilung zwischen Faser und Matrix

Ein Verbundwerkstoff besitzt nur dann optimale Eigenschaften, wenn die auftretenden Kräfte in die Fasern eingeleitet und von Faser zu Faser übertragen werden können. Voraussetzung dafür ist eine gute Haftung zwischen Faser und Matrix. Durch die gezielte Auswahl einer für jeden Kunststoff angepassten Schlichte, die nach der Faserherstellung auf die Faser aufgebracht wird, sowie einer gegebenenfalls notwendigen Additivierung des Thermoplasten mit einem Haftvermittler wird für Tepex® immer eine optimale Kopplung der Faser an die Matrix sichergestellt.

Bild 1: Die Aufgabenteilung zwischen Faser und Matrix lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:



Hervorzuheben ist die Tatsache, dass die Verarbeitungseigenschaften fast ausschließlich durch den Matrixwerkstoff bestimmt werden. Hierauf wird in den folgenden Kapiteln dieser Broschüre näher eingegangen.

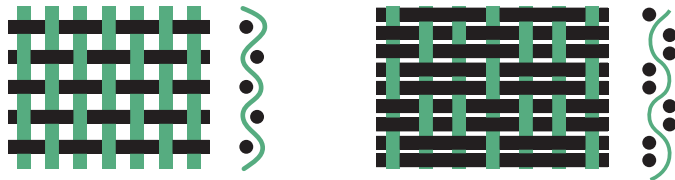
1.4. Textile Halbzeuge

Um Faserverbundmaterialien hinsichtlich der notwendigen Faserorientierung aber auch im Sinne einer effizienten und reproduzierbaren Bauteilfertigung optimal zu gestalten, werden spezielle textile Halbzeuge zu deren Herstellung eingesetzt. Für Tepex® werden vornehmlich vier verschiedene Arten von textilen Halbzeugen herangezogen:

- Textile mit $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung: bidirektionale Gewebe
- Textile mit (quasi-)unidirektionaler Faserorientierung: unbalancierte bzw. unidirektionale Gewebe
- Textile mit quasiisotropen Eigenschaften: Wirrfasermatten (Non-Wovens) oder Schnitffasern
- Unidirektional gespreizte Fasern

Gewebe sind Flächengebilde aus rechtwinklig kreuzenden Kett- und Schußfäden, woraus sich die bidirektionale Verstärkungswirkung in 0° und 90° ergibt. Man unterscheidet bei Geweben unterschiedliche Bindungsarten, wobei für Tepex® meist die Leinwand- und die Körperbindung eingesetzt wird (Bild 2). Die Körperbindung stellt einen guten Kompromiss zwischen erzielbaren mechanischen Eigenschaften, Umformbarkeit und Handhabung dar, daher hat sich diese Bindungsart in der Faserverbundtechnik weitgehend durchgesetzt. Für viele Anwendungen werden aufgrund seiner einfachen Handhabung aber auch Leinwandgewebe eingesetzt

Bild 2: Schematische Darstellung einer Leinwandbindung (links) und einer Körperbindung (rechts)



Haben Gewebe einen sehr hohen Anteil an Kett- oder Schußfäden spricht man von (quasi-)unidirektionalen Geweben, die eine Verstärkungswirkung hauptsächlich in 0° oder 90° aufweisen.

Als multiaxiale Gewebe werden Flächengebilde bezeichnet, die fast ausschließlich aus parallel verlaufenden, gestreckten Fäden bestehen. Die Verstärkungsrichtung kann mit diesem textilen Halbzeug innerhalb gewisser Grenzen nahezu beliebig eingestellt werden.

Unidirektional gespreizte Fasern bilden die Grundlage für die thermoplastischen Tapes der UDea™-Familie. Diese vollständig imprägnierten Faserbänder können ihrerseits in weiteren Verarbeitungsschritten zu Halbzeugen mit textilen Eigenschaften verarbeitet werden, z.B. zu biaxialen Tape-Geweben oder multiaxialen Gelegen (Non-crimped fabrics, NCF)

Die verschiedenen Textilformen finden sich auch im Tepex®-Code wieder:

- C: Carbongewebe
- RG: Rovingglasgewebe
- FG: Filamentglasgewebe
- CUD: Carbongewebe (quasi-)unidirektional
- RGUD: Rovingglasgewebe (quasi-)unidirektional
- RGUDm: Rovingglasgelege unidirektional, geeignet für multiaxiale Aufbauten
- CNW: Carbon Non-Woven
- A: Aramidgewebe
- F: Flachsgewebe

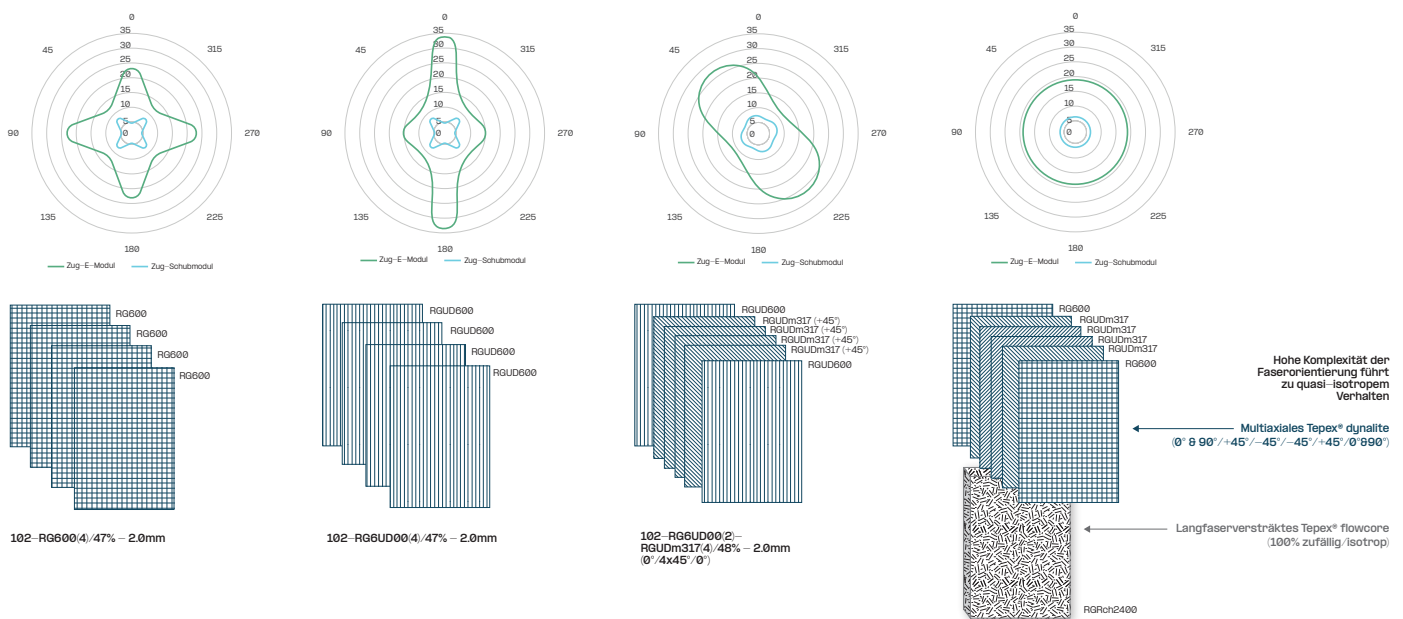
1.5. Aufbauten von Tepex®-Laminaten

In den seltensten Fällen werden Faserverbund-Konstruktionen ausschließlich einachsig belastet, so dass nur eine Faserrichtung ausreichend wäre. Die oft mehrachsige Belastung des Werkstoffes erfordert daher zumeist mehrere Faserorientierungen, woraus sich unterschiedliche Laminataufbauten (Mehrschichtverbunde) ergeben.

Grundsätzlich können für Tepex® alle oben genannten textilen Halbzeuge miteinander kombiniert werden. Damit wird dem Konstrukteur die Chance eröffnet, das Laminat belastungsgerecht auszulegen. Neben den klassischen gewebeverstärkten Laminaten lassen sich somit

auch multiaxiale Aufbauten bis hin zu quasiisotropen Eigenschaften realisieren, wie dies in Bild 3 beispielhaft dargestellt ist. Bei mehrachsiger Belastung ist ein klassisches bidirektionales Gewebe häufig bereits die beste Lösung. Die äußeren Kräfte werden auf die Faserhauptrichtungen aufgeteilt und der Verbund erzielt deutlich höhere Festigkeiten und Steifigkeiten als bei einem quasi-isotropen, multidirektionalen Aufbau, dessen Eigenschaften sich häufig kaum noch von dem einer zufällig orientierten Fasermatte unterscheiden.

Bild 3: Beispielhafte Laminataufbauten mit Tepex®, (Festigkeit eines glasfaserverstärkten PA6 als Funktion des Winkels, Darstellung als Polardiagramm inkl. der jeweiligen Laminataufbauten)



1.6. Tepex®-Familie

1.6.1. Tepex® dynalite

Die Tepex® dynalite Materialien bestehen aus einer oder mehreren Lagen textiler Halbzeuge mit kontinuierlichen Fasern, die in einer Matrix aus technischen Thermoplasten eingebettet sind. Dieser Typ ist vollständig imprägniert und konsolidiert, alle Fasern sind also mit Kunststoff ummantelt und es befinden sich keine Luft-einschlüsse im Material. Somit liefert Tepex® dynalite maximale Festigkeit und Steifigkeit bei sehr geringer Dichte.

1.6.2. Tepex® flowcore

Die in Tepex® flowcore enthaltenen Fasern haben eine endliche Länge, daher eignet sich dieser Materialtyp für das Fließpressen und gestattet einen erhöhten Spielraum bei der Formgebung. Auch hier sind die Fasern vollständig imprägniert und konsolidiert. Zur flowcore-Familie zählen auch Aufbauten, die aus einer Kombination aus Endlos- (Tepex® dynalite) und Langfasern (Tepex® flowcore) bestehen. Beispielsweise werden dabei die Endlosfasern auf die Außenseite des Laminats, die Langfasern in die Mitte des Laminats gelegt. Somit entsteht ein Faserverbundwerkstoff mit maximaler Biegesteifigkeit, der gleichzeitig durch die Fließfähigkeit des flowcore-Kerns die Ausformung komplexer Bauteile gestattet.

1.6.4. Tepex® anti-ballistic

Hergestellt aus Aramidgeweben sind Tepex® anti-ballistic Materialien speziell für die optimale Aufnahme einwirkender Energie und deren Ableitung konzipiert. Ziel ist der Schutz von Mensch und Hardware. Wie auch bei den anderen Tepex® Familien zeigt Tepex® anti-ballistic ein vorteilhaftes Gewichts-Leistungs-Verhältnis, was sich sowohl im Fahrzeugbau aber vor allem bei Tragekomfort von ballistischem Körperschutz positiv auswirkt.

1.6.5. Tepex® UDea®

Materialien der UDea®-Familie sind vollständig imprägnierte thermoplastische Tapes. Die Verstärkungsfasern liegen hier zu 100% in Produktionsrichtung der Tapes vor, womit eine ideal gerichtete Kraftübertragung möglich ist. UDea® Tapes verfügen über sehr hohe Festigkeiten in Faserrichtung und eignen sich insbesondere für Wickelverfahren oder die lokale Verstärkung von Bauteilen („Patches“).

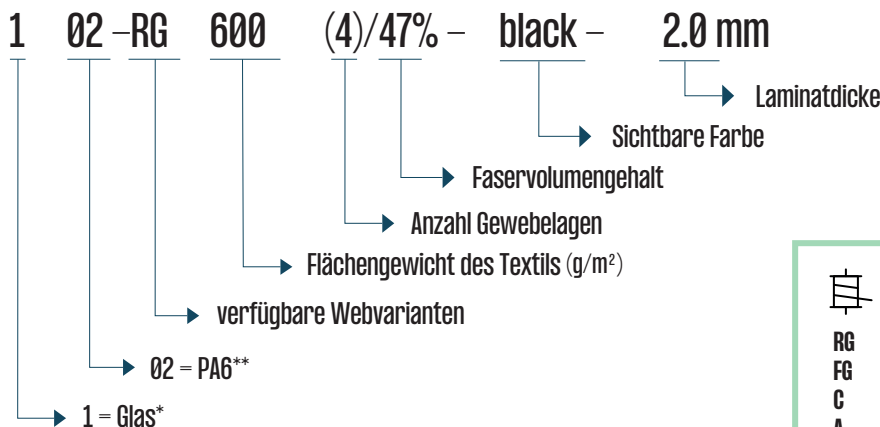
1.7. Nomenklatur

Ein Faserverbundwerkstoff wird durch die Angabe folgender Informationen eindeutig beschrieben:

- Faserart (Glas, Carbon ...)
- Art und Flächengewicht des textilen Halbzeugs (Gewebe, Gelege ...)
- Kunststoff (PP, PA6 ...)
- Anzahl Lagen des Laminats
- Faseranteil
- Richtung der Faseranordnung

Da Tepex® dynalite vollständig imprägniert und konsolidiert ist, lassen sich hieraus alle anderen Werte wie z. B. Laminatdicke und Fasergewichtsanteil berechnen. Aus dem Materialcode von Tepex® lassen sich alle relevanten Informationen ablesen.

Bild 4: Aufschlüsselung des Tepex® Materialcodes



	Garntype
RG	Roving Glas
FG	Filament Glas
C	Carbon
A	Aramid
F	Flachs
B	Basalt
+	
	Gewebetyp
(-)	balanciert
UD	unbalanciert
R	Wirrfaser
NW	Non-Woven
B	geflochten

* verfügbare Faserverstärkungen

- 1** Roving Glas (RG)
Filament Glas (FG)
- 2** Carbon (C)
- 3** Aramid (A)
- 8** Flachs (F)

** verfügbare Polymere

- Polyamide** PA66 (01), PA6 (02), PA12 (06), PA46 (09), PA1010 (12), PA410 (16)
- Polyolefine** PP (04), HDPE (11)
- Andere** PC (10), PPS (07), PEI (15), TPU (08), TPC (17), PLA (13), PGL (14)

1.8. Tepex®–Eigenschaften

Faserkunststoffverbunde zeichnen sich insbesondere durch ihre hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig sehr geringer Dichte aus. Dies sind die Eigenschaften eines idealen Leichtbauwerkstoffes. Die folgende Tabelle enthält die wesentlichen Kennwerte einiger typischer Tepex®–Typen. Da Tepex® dynamite vollständig imprägniert und konsolidiert ist, lassen sich hieraus alle anderen Werte wie z. B. Laminatdicke und Fasergewichtsanteil berechnen. Aus dem Materialcode von Tepex® lassen sich alle relevanten Informationen ablesen.

Bild 5: Aufschlüsselung des Tepex® Materialcodes

Tepex® Materialtyp	Faser	Polymer	Faservolumengehalt (Standard)	Dichte [g/cm ³]	Steifigkeit (ISO 527)	Festigkeit (ISO 527)	Energieabsorption (ISO 6603)	Glasübergangstemperatur (amorph) / Kristallit-Schmelzpunkt (teilkristallin)
Tepex® dynamite								
101	Glas	PA6.6	47 %	1,81	++	++	++	260 °C
102	Glas	PA6	47 %	1,81	++	++	+++	220 °C
104	Glas	PP	47 %	1,68	+	++	+++	165 °C
108	Glas	TPU	45 %	1,84	++	++	++	190 °C
110	Glas	PC	47 %	1,84	++	++	+++	145 °C
201	Carbon	PA6.6	45 %	1,42	+++	+++	°	260 °C
202	Carbon	PA6	45 %	1,42	+++	+++	°	220 °C
208	Carbon	TPU	45 %	1,46	+++	+++	+	190 °C
813	Flachs	PLA	41 %	1,33	+	°	++	170 °C
Tepex® flowcore								
102	Glas	PA6	47 %	1,81	+	+	++	220 °C
104	Glas	PP	47 %	1,68	+	+	++	165 °C
UDea® Tapes								
K20HG60	Glas	PA6	40 %	1,70	+++	+++	++	220 °C
Q20HC60	Carbon	PA410	50 %	1,45	++++	++++	++	250 °C
++++ Hochleistung (> 100 GPa / > 150 MPa / n.a.)								
+++ herausragend (> 40 GPa / > 600 MPa / > 40 J)								
++ sehr gut (> 20 GPa / > 300 MPa / > 30 J)								
+ gut (> 10 GPa / > 150 MPa / > 20 J)								
° gering (< 10 GPa / < 150 MPa / < 20 J)								

1.8.1. Flammenschutz mit Tepex®

Der hohe Fasergehalt und der Einsatz nicht brennbarer Faserwerkstoffe wie Glas führen dazu, dass die meisten Tepex®–Typen eine sehr gute Flammwidrigkeit aufweisen. Insbesondere bei einer flächigen Beflammung, d.h. das Feuer trifft auf die Ebene einer Tepex®–Platte, zeigt sich ein wesentlicher Effekt fast unabhängig vom eingesetzten Matrixwerkstoff: Das der Flamme zugewandte Polymer an der Oberfläche schmilzt zunächst auf, kann aber aufgrund der guten Faser–Matrix–Haftung, der vollständigen Imprägnierung der Fasern und dem hohen Fasergehalt nicht abtropfen. Stattdessen zersetzt sich der Kunststoff. Die i.d.R. nicht brennbaren Zersetzungsprodukte bleiben an den Fasern haften und bilden einen Wärmeschild. Dies geschieht solange, bis die Flamme kein brennbares Polymer mehr erreicht. So kann Tepex® auch für mehrere Minuten offenes Feuer bei Flammtemperaturen > 1000 °C aushalten.

Greift die Flamme hingegen eine offene Kante an, wirken die Verstärkungsfasern wie ein Docht. Die Flamme wandert sehr langsam entlang der Fasern, verlöscht aber

nicht von alleine. Im Anwendungsfall wird daher immer ein Versiegeln der offenen Kanten empfohlen, z.B. durch Umspritzen des Tepex®–Einlegers oder entsprechende Montageelemente. Ist ein Selbstlöschen der Flamme an einer offenen Kante dennoch erforderlich, können bestimmte Tepex®–Typen mit einem geeigneten halogenfreien Flammenschutzmittel ausgestattet werden.



2. VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON BAUTEILEN AUS TEPEX®

Der Prozessablauf zur Herstellung von Bauteilen aus Tepex® enthält folgende Schritte:

1. Aufheizen des Organoblechzuschnitts oberhalb der Schmelztemperatur* des thermoplastischen Kunststoffes
2. Transport des erwärmten Zuschnitts zum Werkzeug
3. Aufnahme und Positionierung des erwärmten Zuschnitts im Werkzeug
4. Umformung mittels geeigneter Werkzeugtechnik
5. Gegebenenfalls Anspritzen oder Anpressen einer weiteren thermoplastischen Komponente (Kombinationstechnologien)
6. Abkühlung und Entnahme aus dem Werkzeug

Aufgrund dieses Verfahrensablaufs wird die Umformung von Tepex® auch als Thermoformen bezeichnet. Hierbei ist aber zu beachten:

- dass Organobleche nicht wie beim klassischen Thermoformen im kautschukelastischen Temperaturbereich umgeformt werden, sondern oberhalb der Schmelztemperatur.
- dass mittels geeigneter Werkzeugtechnik und Prozessführung während der Umformung und des Abkühlens ein allseitiger und gleichförmiger Druck am Tepex®-Halbzeug anliegt.
- dass aufgrund der hochsteifen und hochfesten Endlosfasern auch im Umformtemperaturbereich der Polymermatrix keine Querschnittsänderung oder Elongation, d.h. kein klassisches „Tiefziehen“ stattfindet, sondern lediglich eine Umlagerung der Fasern (Drapierung).

Im Folgenden werden das Aufheizen sowie die einzelnen Umformverfahren bzw. -techniken kurz vorgestellt, nähere Informationen bezüglich der Umformmechanismen von Organoblechen und der hieraus resultierenden Werkzeugauslegung können Kapitel 3 entnommen werden.

2.1. Aufheizen

Durch das Aufheizen von Tepex® wird die Viskosität des thermoplastischen Kunststoffes so weit herabgesetzt, dass die einzelnen Fasern während des Umformvorgangs ausreichend Bewegungsfreiheit erhalten. Nur so lassen sich die in Kapitel 3 erläuterten Drapiermechanismen realisieren sowie Faltenbildung und Risse im Material vermeiden.

Folgende Randbedingungen sind dabei einzuhalten:

- Temperaturbereich oberhalb des Kristallitschmelztemperatur bei teilkristallinen Kunststoffen bzw. oberhalb der Glasübergangstemperatur bei amorphen Kunststoffen. Der Verarbeitungstemperaturbereich muss jedoch deutlich unter den jeweiligen Schädigungstemperaturen liegen
- die Aufheiztemperatur ist ausreichend hoch zu wählen, so dass die Fasern auch nach dem Transport in das Werkzeug im Moment der Schließbewegung noch ausreichend Bewegungsfreiheit haben (Transportzeit bzw. -weg möglichst kurz halten)
- die Aufheiztemperatur und -zeit ist so zu wählen, dass oxidative Schädigungen vermieden werden
- der Aufheizprozess ist so zu gestalten, dass sich eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung über der gesamten Tepex®-Fläche einstellt

- die Temperaturregelung ist derartig zu konzipieren, dass Temperaturüberhöhungen bzw. -spitzen vermieden werden
- das Aufheizen sollte im Sinne einer effizienten Prozessführung nicht zur zykluszeitbestimmenden Größe werden

Dazu stehen prinzipiell folgende Methoden zur Verfügung:

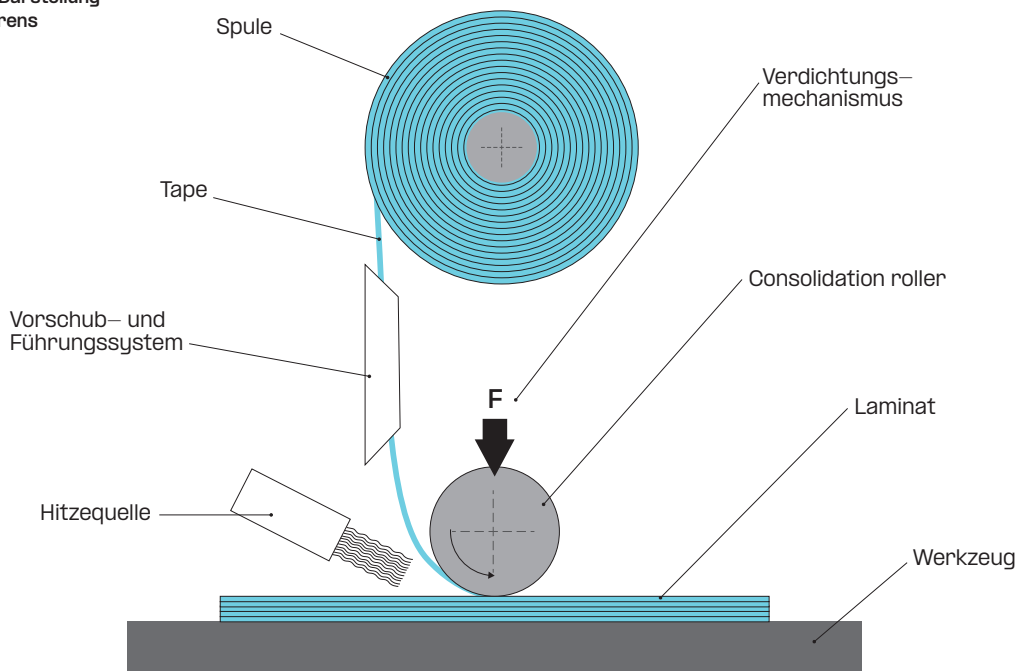
- Aufheizen durch Strahlung (Infrarot)
- Aufheizen durch Konvektion (Luftströmung)
- Aufheizen durch Induktion (nicht für jedes Design möglich!)
- Kontakterwärmung (für automatisierten Serienprozess nicht empfohlen!)

Bei der Infrarot-Strahlung handelt es sich um elektromagnetische Wellen im Spektralbereich zwischen sichtbarem Licht und Mikrowellenstrahlung. Die Halbzeugzuschnitte absorbieren die IR-Strahlung und heizen sich dadurch auf. Über Wärmeleitung erhitzt sich auch das Innere des Verbundes. Da Thermoplaste und Fasern im IR-Bereich ein hohes Absorptionsvermögen besitzen, ist die Wärmeübertragung sehr wirkungsvoll.

Ein ebenfalls stark verbreitetes Aufheizverfahren in der Kunststofftechnik ist Umlufttechnik. Umluftöfen mit Materialzuführung nach dem Paternoster-Prinzip gibt es für eine Vielzahl von Anwendungsfällen.

Direkte Kontaktheizung, z.B. in einem induktiv beheizten Werkzeug ist ebenfalls möglich, wird aber aufgrund der relativ langen Aufheizzyklen aufgrund unzureichender Kontaktierung zu Beginn der Aufheizphase oft zur zykluszeitbestimmenden Größe.

Bild 6: Schematische Darstellung des Stacking-Verfahrens



Bei den meisten Umformverfahren wird vorausgesetzt, dass Tepex® als konsolidierte Platte vorliegt. Insbesondere beim Einsatz von Tepex® UDea® ist dazu vorab aus dem unidirektionalen Tape ein (multiaxiales) konsolidiertes Laminat, ein sog. Stack oder Cross-Ply herzustellen. Dies ist z.B. mittels automatisierter Legetechnik und anschließender Konsolidierung möglich.

2.2. Umformverhalten

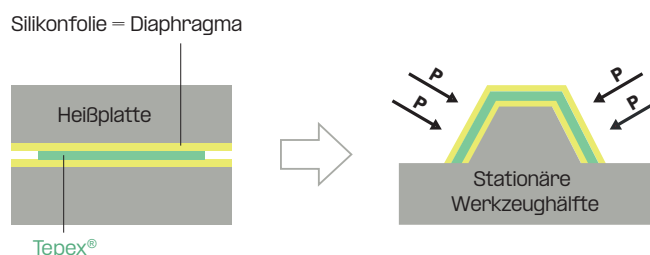
Für die Umformung von Tepex® existieren eine Vielzahl verschiedener Umformverfahren. Deren Auswahl richtet sich im Wesentlichen nach der Bauteilkomplexität und der herzustellenden Stückzahl. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren kurz beschrieben.

2.2.1. Umformen mit Silikon- oder Gummistempeln

Beim sog. Diaphragmaformen, dem ältesten Fertigungsverfahren zur Herstellung dünnwandiger Bauteile aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten, wird das Halbzeug zwischen zwei hochelastischen Folien platziert, der gesamte Aufbau mittels Strahlung oder Konduktion über Schmelztemperatur der Matrix erwärmt und anschließend in die Umformstation transportiert. Die Druckglocke wird geschlossen, wobei die Diaphragmen als Dichtungen wirken. Das so aufgewärmte Laminatpaket wird auf dem formgebenden Werkzeug (Positivform) platziert und anschließend mit Druckluft beaufschlagt.

Zur Unterstützung des Umformprozesses kann am Werkzeug ein zusätzliches Vakuum angelegt werden. Die Ausbildung glatter bzw. definierter Oberflächen ist beim Diaphragmaformen im Vergleich aufgrund der im Vergleich zu anderen Verfahren niedrigen wirkenden Drücke nicht möglich.

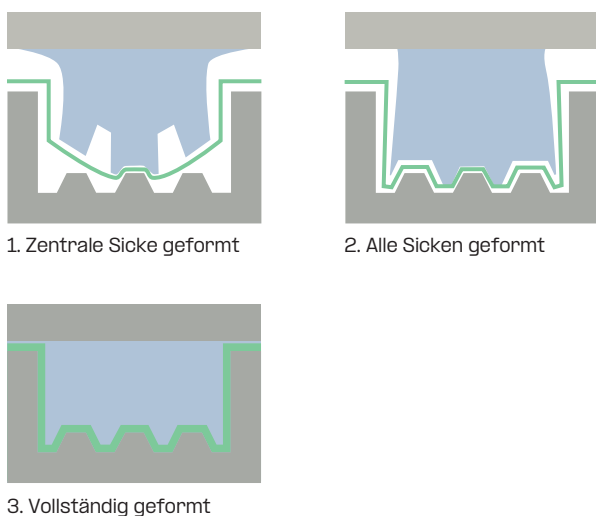
Bild 7: Schematische Darstellung der Diaphragmaformung von Tepex®



Vorteile dieses Verfahrens sind die geringen Investitionskosten und die Möglichkeit, unterschiedliche Materialdicken mit einem Werkzeug umformen zu können. Das Verfahren benötigt relativ lange Zykluszeiten und eignet sich eher für einfache Bauteilgeometrien, auch wenn leichte Hinterschneidungen möglich sind.

Alternativ kann das Werkzeug auch als Negativform ausgeführt werden. Dann ist die Umformung nach ähnlichen Prinzip z.B. mit Hilfe eines Gummistempels realisierbar. Bei diesem Pressverfahren besteht der gesamte Werkzeugaufbau aus einem festen Unterwerkzeug (Negativform), und einem Oberwerkzeug, das aus Silikon oder Gummi besteht. Durch Schließen des Werkzeugs bei geringen Drücken wird Tepex® zu einem Bauteil umgeformt.

Bild 8: Schematische Darstellung der Verformung von Tepex® mittels Gummistempel



Der Silikon- bzw. Gummistempel ermöglicht durch seine hohe Elastizität ein sequentielles Umformen, wodurch die notwendige, gleichmäßige Druckverteilung während der Umformung gewährleistet werden kann (siehe hierzu auch Kapitel 3). Es ist auf eine entsprechende Entlüftung zu achten. Das Umformen mit Silikon- bzw. Gummistempeln eignet sich aufgrund der geringen Investitionskosten und der einfachen Optimierung des Stempels für Prototypen und kleinere Serien. Das Verfahren hat aber auch bei einfacheren Geometrien seine Großserientauglichkeit bewiesen.

Die Oberflächenqualität wird bei beiden Verfahrensvarianten jeweils durch die feste Werkzeughälfte definiert, auf der das Tepex® abgeformt wird.

2.2.2. Umformen mit Metallwerkzeugen

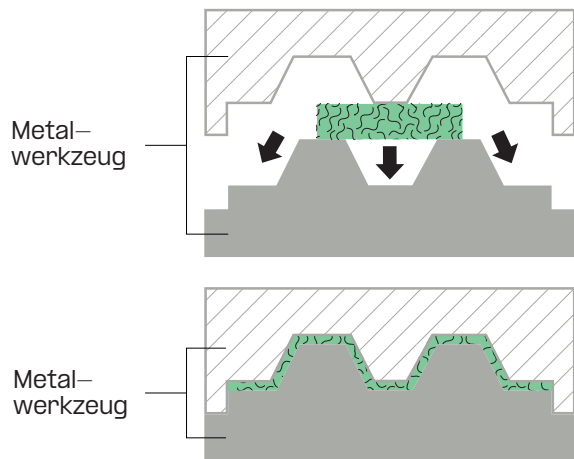
In den meisten Fällen wird Tepex® mittels Metallwerkzeugen umgeformt. Dabei bestehen beide Werkzeughälften aus Metall bzw. Stahl und werden polymerabhängig temperiert. (engl.: Matched Metal-Molding). Bei der Auslegung des Werkzeugs ist besonderes Augenmerk auf die Kavität zu legen. Aufgrund des speziellen Umformmechanismus von Organoblechen sind hierbei grundlegende Aspekte zu beachten, hierzu wird an dieser Stelle auf Kapitel 3 verwiesen.

Mit dieser Umformtechnik lassen sich in Verbindung mit einer geeigneten Automatisierung sehr kurze Zykluszeiten sowie ein sehr reproduzierbarer Prozess realisieren. Darüber hinaus zeigen die so hergestellten Bauteile eine nur geringe Verzugsneigung. Dem gegenüber stehen höhere Investitionen und ein höherer Aufwand bei der Auslegung. Das Verfahren eignet sich damit besonders für die Großserie.

2.2.3. Fließpressen von Tepex® flowcore

Wie bereits einleitend beschrieben, ist Tepex® flowcore aufgrund seiner Verstärkung mit endlichen Faserlängen bis zu 50 mm für das Fließpressen geeignet. Somit lassen sich auch komplexere Bauteilgeometrien realisieren. Auch die Ausformung von Rippen und Funktionselementen wird möglich. Das Fließpressen ist in der Kunststofftechnik ein weit verbreitetes Verfahren, das sich durch seine hohe Reproduzierbarkeit und geringen Taktzeiten auszeichnet.

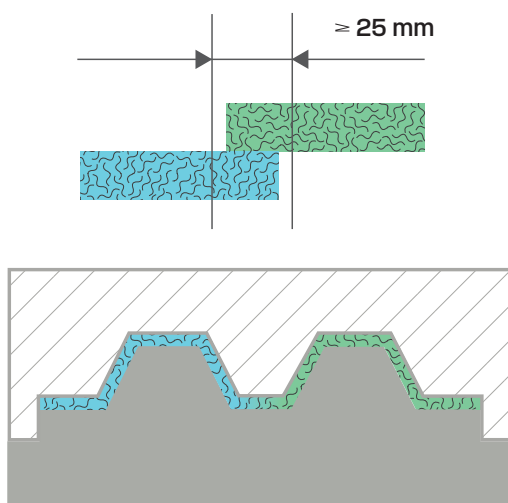
Bild 9: Fließpressen von Tepex® flowcore



Ähnlich wie bei den bekannten thermoplastischen Fließpressmassen GMT oder LFT wird ein genau definiertes Volumen Tepex® flowcore zunächst aufgeheizt und danach an geeigneter Stelle im Werkzeug platziert. Die Formteilbildung bzw. die Füllung des Werkzeugs wird durch den Schließvorgang des Werkzeugs hervorgerufen, welcher eine Fließbewegung des Plastifikats induziert. Üblicherweise werden hierzu Tauchkantenwerkzeuge eingesetzt.

Das Fließverhalten von Tepex® flowcore ermöglicht die Kombination mehrerer Einleger zu einem Bauteil mit deutlich größeren Außenmaßen. Dabei ist im Werkzeug eine Überlappung der flowcore-Einleger zu gewährleisten, die mindestens die Hälfte der Faserlänge entspricht. Da die maximale Faserlänge bei Tepex® flowcore 50 mm beträgt, ist diese Randbedingung bei einer Überlappung von 25mm somit in jeder Materialvariante erfüllt.

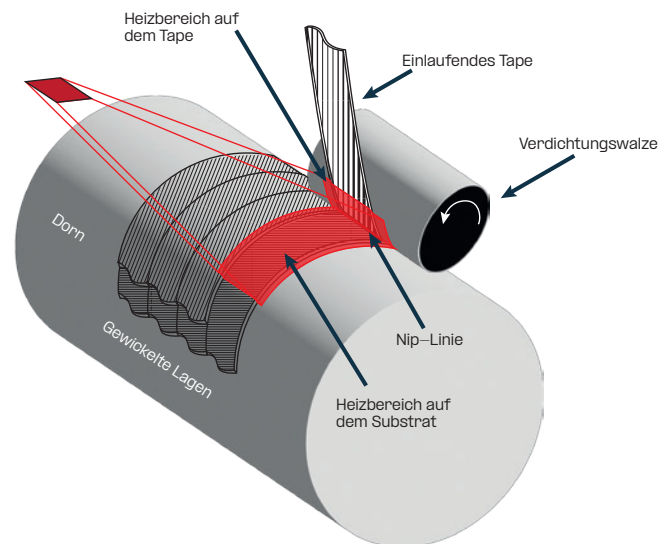
Bild 10: Überlappungszonen beim Fließpressen



2.2.4. Wickeln von Tepex® UDea®

Beim Wickeln wird das thermoplastische Tape über einen automatischen, CNC-gesteuerten Wickelkopf an einen Wickelkern bzw. ein Wickelwerkzeug herangeführt. Bei der Positionierung wird das Tape über einen Laser lokal erwärmt, sodass die thermoplastische Matrix aufschmilzt. Der formbare thermoplastische Prepreg wird dann auf dem Wickelkern abgelegt und gemäß der Bauteilkonstruktion in den vorgegebenen Winkeln um den Kern herumgeführt. Die automatisierte Prozesssteuerung ermöglicht dabei eine genaue Einstellung und Kontrolle der qualitätsbestimmenden Parameter wie Prozess-temperatur, Anpressdruck und Tape-Vorspannung. Auf diese Art kann die Bauteilkonsolidierung direkt im Wickelverfahren eingestellt werden, sodass eine Nachbehandlung bzw. Nachkonsolidierung des gewickelten Bauteils (z.B. in einem Autoklaven, wie bei duroplastischen Wickelbauteilen) entfällt – nach Abschluss des Wickelprozesses ist das Bauteil direkt einsatzbereit.

Bild 11: Schematische Darstellung des Tape Wickel-Verfahrens



2.3. Kombinationstechnologien

Die Kombination von Tepex® mit kurz- oder langfaserverstärkten Kunststoffen mit demselben bzw. einem kompatiblen Matrixsystem und deren Verarbeitungsprozessen Spritzgießen und Fließpressen bietet darüber hinaus die hervorragende Möglichkeit, neben dem werkstofflichen auch konstruktiven Leichtbau z. B. durch Anspritzen von

- versteifenden und stabilisierenden Rippen
- Krafteinleitungselementen
- Funktionselementen
- Konturen im Randbereich des Bauteils zu betreiben.

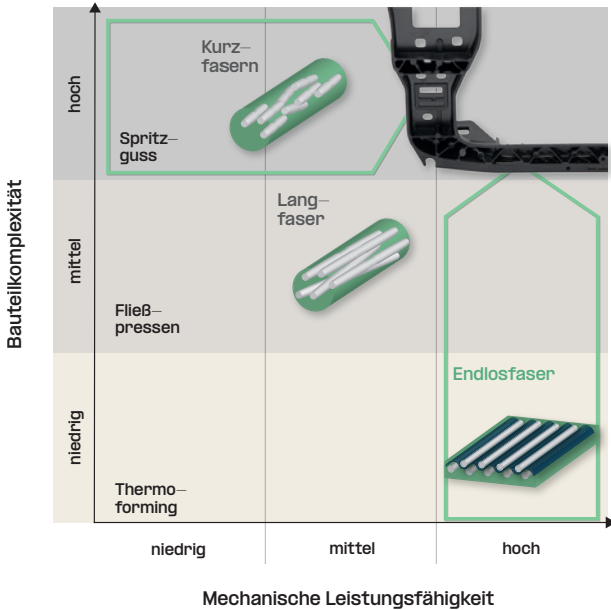
Bei geeigneter Materialauswahl und Prozessführung erhält man ein Bauteil mit einer stoffschlüssigen Verbindung der beiden Komponenten (siehe Abbildung 9).

Diese im Folgenden vorgestellte Verfahrensinnovation geht zurück auf das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Spriform“, welches mit Mitteln des Bundesministeri-

ums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Diese Technik hat sich seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Der Maschinenhersteller Krauss-Maffei vermarktet diese Kombinationstechnologie unter dem Namen „FiberForm“, der Maschinenhersteller Engel unter dem Namen „Organomelt“. Grundsätzlich wird zwischen einem zweistufigen (in dieser Broschüre Insert-Molding genannt) und einem einstufigen Prozess (in dieser Broschüre Hybrid-Molding genannt) unterschieden. Beide Verfahren vereinen folgende Vorteile:

- größere Formgebungsfreiheit
- Möglichkeit der Integration von weiteren Funktionen und damit Reduktion von Folgeschritten
- Kombination von werkstofflichem und konstruktivem Leichtbau
- kurze Zykluszeiten
- reproduzierbare und voll automatisierbare Prozesse
- verfügbare und beherrschbare Anlagentechnik

Bild 12: Darstellung der Kombinationsmöglichkeiten von Tepex® mit Compounds



Unabhängig von der gewählten Technologie muss eine gute Verbundfestigkeit zwischen den beiden Komponenten durch Verschweißen gewährleistet sein. Diese Verbundhaftung hängt im Wesentlichen von der Temperatur des Composites (Organoblech oder Tape), der

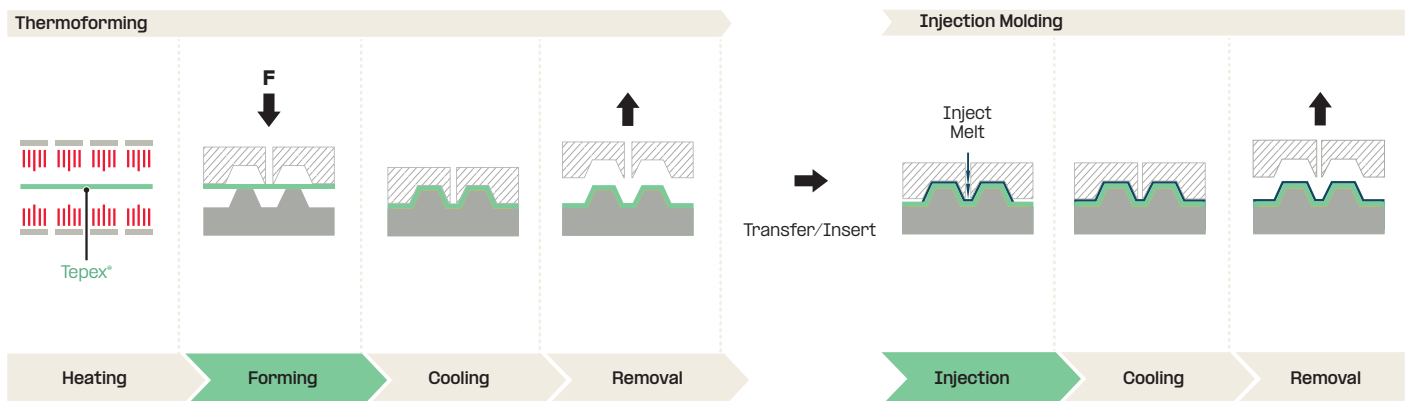
Temperatur der Schmelze im Moment des Anspritzens und dem an der entsprechenden Position vorliegenden Einspritzdruck ab. Daraus ergeben sich folgende verfahrenstechnische Schlussfolgerungen, die durch entsprechende Untersuchungen bestätigt werden können:

1. Umso höher die Temperatur des Composites und je höher die Temperatur der angespritzten Schmelze, umso besser die Verbundhaftung. Da mit relativ hohen Schmelztemperaturen angespritzt wird und sich eine Kontakttemperatur an der Verbindungsstelle ergibt, können meist auch Composite-Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur ausreichen.
2. Die Transferzeit zwischen Aufheizen des Composites und der Umformung sollte so kurz wie möglich sein, um ein Abkühlen zu vermeiden (gilt generell).
3. Die Einspritzgeschwindigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Verbundhaftung. Je höher diese gewählt wird, umso mehr Scherung wird in die Schmelze eingebracht und umso geringer sind die Abkühlereffekte, was sich positiv auf die Verschweißung auswirkt. Insbesondere in angussfernen Bereichen kommt dieser Effekt zum Tragen.
4. Ein hoher Nachdruck wirkt sich ebenfalls positiv auf die Verbundfestigkeit aus.

2.3.1. Insert-Molding (Kombination mit Spritzgießen)

Beim Insert-Molding-Verfahren findet das Umformen des Composites und das Über- bzw. Anspritzen mit dem kurz- oder langfaserverstärktem Kunststoff in jeweils getrennten Werkzeugen und Maschinen statt. Um eine stoffschlüssige Verbindung bzw. Verschweißung mit der angespritzten Kunststoffmasse zu erzielen, empfiehlt es sich, das zunächst vorgeformte Bauteil (Insert) noch einmal zu erwärmen, bevor es in der Spritzgießform positioniert wird. Nur so wird die bestmögliche Verschweißung der beiden Komponenten erreicht.

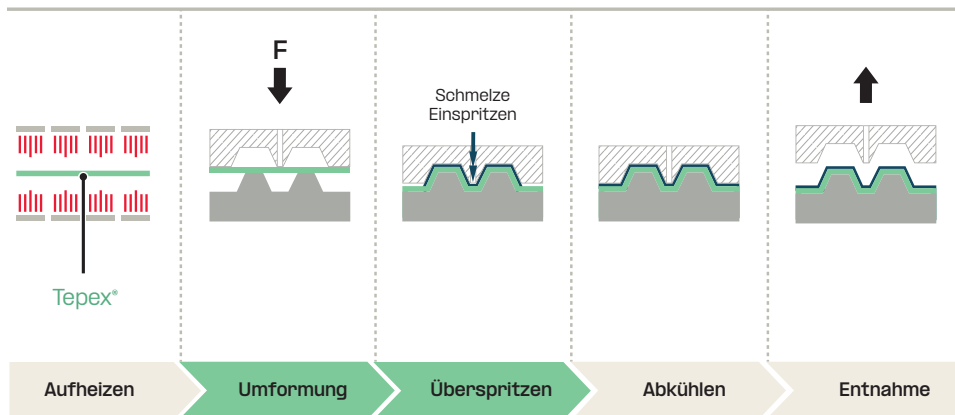
Bild 13: Insert-Molding mit Tepex®



2.3.2. Hybrid-Molding (Kombination mit Spritzgießen)

Beim Hybrid-Molding hingegen erfolgen die Umformung des Composites und das Anspritzen gemeinsam im Spritzgießwerkzeug. Die Schließeinheit der Spritzgießmaschine dient dabei als Umformpresse. Das Werkzeug, welches somit diverse Aufgaben zu übernehmen hat, muss für diesen Prozess speziell ausgelegt werden. Hinweise zur Auslegung finden sich in Kapitel 3. Um werkzeugfallende Teile ohne Nachbearbeitung herzustellen, werden die Halbzeuge als endkonturnahe Zuschnitte zur Verfügung gestellt. Diese Zuschnitte stellen eine drapiergerechte Abwicklung des herzustellenden Bauteils dar, die sich mittels der Drapieranalyse berechnen lässt (siehe hierzu auch Kapitel 6: „Konstruktion und Berechnung von Bauteilen“).

Bild 14: Hybrid-Molding mit Tepex®



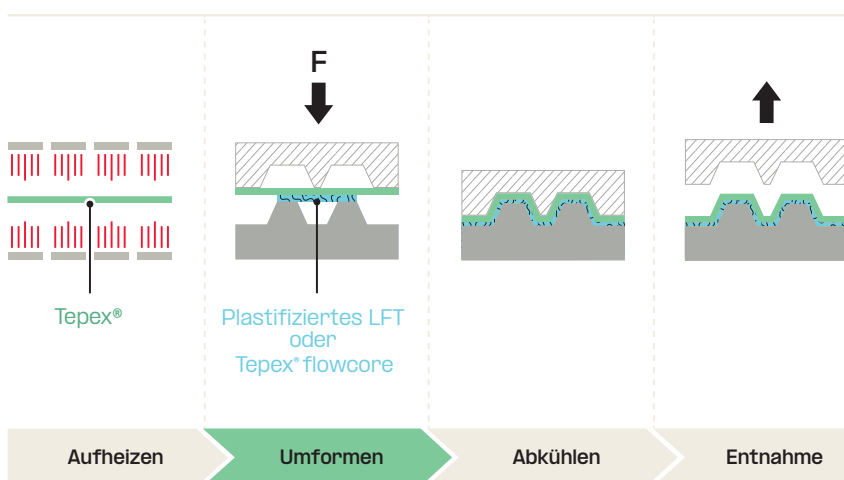
2.3.3. Compression-Molding (Kombination mit LFT-Fließpressen)

LFT steht für Langfaserthermoplaste, deren Verstärkungsfasern eine Länge von mindestens 4 mm aufweisen. Bei dem zumeist angewendeten Direktverfahren wird unmittelbar vor der Presse die Formmasse bestehend aus Fasern, Matrix und gegebenenfalls Additiven mittels Extrusionstechnik hergestellt. Die so gefertigte Masse wird anschließend durch Fließpressen mit Tauchkantenwerkzeugen verarbeitet. Das notwendige Fließen der Schmelze wird dabei durch den Schließdruck der entsprechend ausgelegten Presse aufgebracht.

Kombiniert man dieses Verfahren mit vorgeheizten Organoblechen, lassen sich auf einfache Weise großflächige, hochbelastbare und verzugsfreie Bauteile in sehr kurzen Zykluszeiten herstellen. Herausragendes Merkmal ist die extrem hohe Schlagzähigkeit derartig hergestellter Bauteile.

Statt einer LFT-Masse kann auch Tepex® flowcore auf diese Weise verarbeitet werden. Dazu können auch kombinierte Halbzeuge aus Tepex® dynalite und flowcore für die Weiterverarbeitung im Compression-Molding verwendet werden.

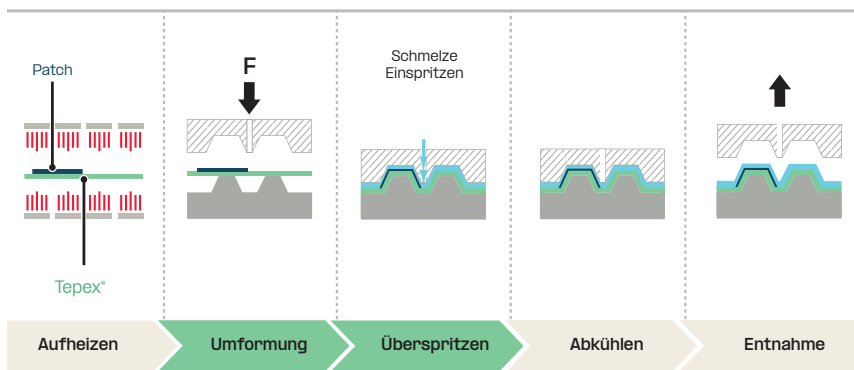
Bild 15: Tepex® Hybrid-Molding in Kombination mit LFT oder Tepex® flowcore



2.3.4. Patchen (Kombination mit UDea® Tape)

Als "Patchen" wird die lokale Verstärkung großflächiger Formteile bezeichnet. So ist z.B. bei einem Bauteil wie einem Unterbodenschutz im Bereich der Befestigung eine höhere Festigkeit erforderlich, um das Ausreißen von Schrauben oder Nieten zu verhindern, oder in einem definierten lokalen Bereich des Bauteils kommt es zu einer Lastspitze, die eine zusätzliche Verstärkung erfordert. In diesem Fall kann sowohl ein kleinerer Einleger aus Tepex® dynamite oder ein entsprechend konfektionierter Zuschnitt aus UDea zusätzlich (oder nachträglich) im Werkzeug positioniert werden. Wird in der Werkzeugkavität eine entsprechende Aussparung vorgesehen, kann durch ein automatisiertes Handlingsystem eine exakte Positionierung gewährleistet werden, sodass der Grundkörper und der Patch gleichzeitig aufgeheizt, im Werkzeug positioniert, umgeformt und ggf. umspritzt werden können.

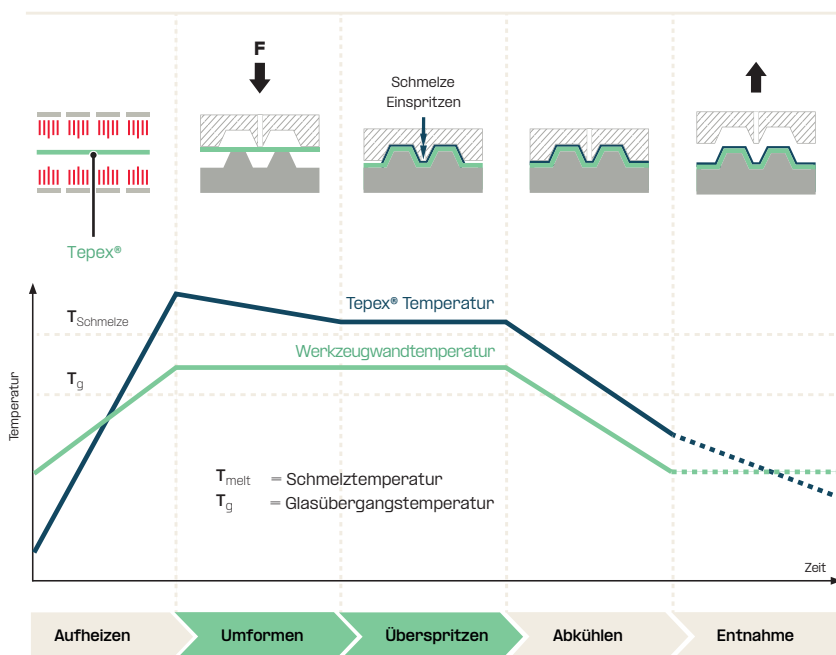
Bild 16: Patchen von Tepex® UDea®



2.4. Variotherme Prozessführung

Falls notwendig, lässt sich die Oberflächenqualität von Tepex®-Bauteilen mit Hilfe einer variothermen Prozessführung weiter erhöhen. Bei der variothermen Werkzeugtemperierung werden die Werkzeugwände vorübergehend auf eine Temperatur zwischen Glasübergangs- und Schmelztemperatur* des verwendeten Kunststoffes aufgeheizt; erst nach Abschluss der Formteilbildung wird das Werkzeug wieder abgekühlt. Diese Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur verzögert die Erstarrung der Schmelze, sodass sich die Oberfläche hiermit hergestellter Bauteile gut ausbilden kann. Bild 17 stellt den Prozessverlauf inkl. der Temperaturzyklen für das Tepex® und die Werkzeugwand für das Hybrid-Molding dar.

Bild 17: Variotherme Prozessführung beim Hybrid-Molding



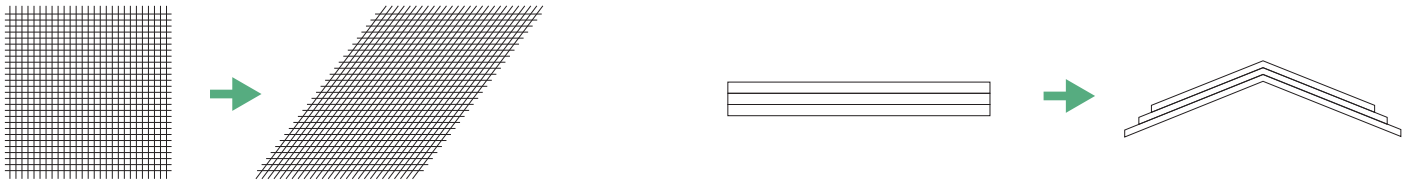
3. AUSLEGUNG VON WERKZEUGEN UND HANDLINGSYSTEMEN

Inzwischen existiert ein großer Erfahrungsschatz, wie Werkzeuge zur Verarbeitung von Tepex® am besten aufgebaut werden und wie die Konstruktion der Handlings-Komponenten darauf abzustimmen ist. Envalior unterstützt Kunden im Rahmen von Projekten bei allen Fragen zur Werkzeugauslegung mit seinem Engineering-Kundenservice. Außerdem bieten mittlerweile zahlreiche Maschinenhersteller und Werkzeugmacher maßgeschneiderte Lösungen für die Verarbeitung thermoplastischer Composites an. Entscheidend für die Auslegung und Handhabung von Tepex® ist ein grundlegendes Verständnis für die Umformmechanismen von endlosfaserverstärkten Kunststoffen.

3.1. Drapieren von Tepex®

Großen Einfluss auf die Werkzeugauslegung hat das spezielle Umformverhalten von Tepex®. Die Umformung, auch Drapierung genannt, verläuft nur im geringen Maße durch Fließvorgänge wie bei klassischen Kunststoffverarbeitungsverfahren, sondern basiert im Wesentlichen auf der Verformung des textilen Halbzeugs (Drapieren).

Bild 18: Umformmechanismen von Tepex®; links: Trellis-Effekt; rechts: Verschieben der EinzellagenMolding

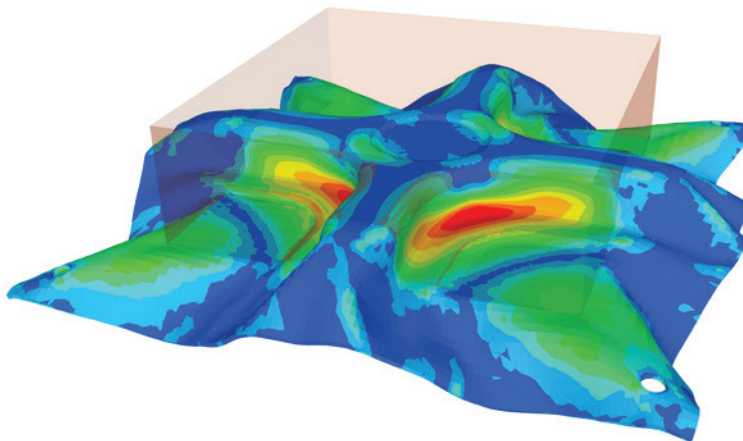


Man unterscheidet im Wesentlichen zwei verschiedene Drapier- bzw. Umformmechanismen, die im Bild 14 dargestellt sind (Faserdehnung, Faserstreckung und Faserschlupf werden hier vernachlässigt):

- Winkeländerungen bzw. Gewebescherung des textilen Halbzeugs, auch Trellis-Effekt genannt
- Verschiebungen einzelner Lagen untereinander, auch Interply shear genannt (bei mehrlagigem Aufbau des Laminats)

Diese beiden Mechanismen gestatten einzeln oder in Kombination sehr hohe Umformgrade. In Bereichen des Bauteils mit starker dreidimensionaler Verformung findet demnach eine mehr oder weniger starke Änderung der Faserorientierung gegenüber dem Ausgangszustand statt. Die Folge ist zunächst eine nicht zu vermeidende Aufdickung des Materials, welche bei der Werkzeugauslegung zu berücksichtigen ist (siehe Kapitel 3.3. „Gestaltung der Werkzeugkavität“). Bei einer weiteren Steigerung der Drapierung kann es zu einem Blockieren des Textils kommen, die Folge ist dann eine unerwünschte Faltenbildung. Eine Drapiersimulation ergibt Aufschlüsse über solche kritischen Umformgrade, sodass geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

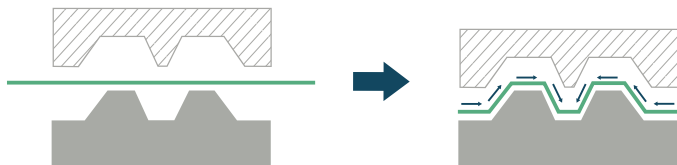
Bild 19: Ergebnis einer Drapiersimulation (Shear angle als Maß für die Gewebescherung)



3.2. Auslegungshinweise bezüglich des speziellen Umformverhaltens von Tepex®

Neben den oben beschriebenen Umformmechanismen ist die Kenntnis über die besondere Kinematik der Umformung von Tepex® für die Werkzeugauslegung und Konstruktion von besonderer Bedeutung. Um eine reproduzierbare, gleichmäßige Ausformung des Bauteils zu gewährleisten, muss der aufgeheizte Verbundwerkstoff während des Umformvorgangs ungehindert von außen zur Werkzeugmitte hin nachgleiten können.

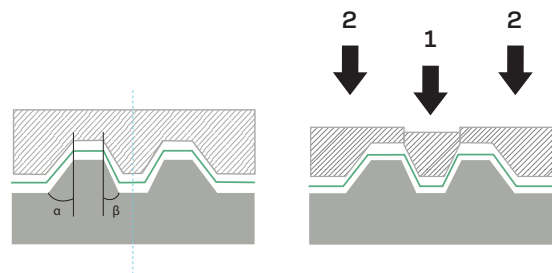
Bild 20: Nachgleiten von Tepex® während der Schließbewegung des Werkzeuges



Bei komplexeren Geometrien kann es bei einer unvorteilhaften Auslegung des Werkzeuges zu Spannungen zwischen benachbarten Bereichen des Bauteils kommen, welches ein Einklemmen und sogar Zerreißen des Materials zur Folge haben kann.

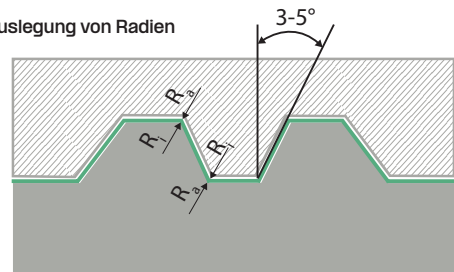
Auch hier deckt eine Drapieranalyse, welche in Envaliors CAE-Service enthalten ist, derartige Bereiche auf und liefert wertvolle Informationen für die Gestaltung des Werkzeuges. Zur konstruktiven Lösung dieser Problematik existieren mehrere Lösungsansätze. So sollten die Winkel der Flanken von der Kavitätsmitte zum Werkzeugrand hin größer werden, wie dies in Bild 21 zu erkennen ist. Darüber hinaus können Schieber oder vorlaufende Stempel zum Einsatz kommen, die dafür sorgen, dass das Material zeitversetzt in den Eingriff des Werkzeuges gelangt und somit nacheinander ausgeformt wird (Sequentielles Umformen). Gegebenenfalls ist zu prüfen, ob Bauteilbereiche mit sehr geringen Winkeln durch aktive Elemente wie z.B. Seitenschieber auszuformen sind.

Bild 21: Lösungsansätze zur Vermeidung von Spannungen während der Umformung (links: Anpassung der Winkel, rechts: Integration eines Voreilers)



Damit Bauteile aus Tepex® im oben aufgezeigten Sinn gut ausgeformt, aber auch sicher und schnell entformt werden können, empfehlen sich – unabhängig von der Materialdicke – für vertikale Bereiche des Werkzeuges Öffnungswinkel bzw. Entformungsschrägen von $\geq 5^\circ$. Eingeschränkt sind auch Konturen mit Entformungsschrägen von $\geq 2^\circ$ umsetzbar.

Bild 22: Auslegung von Radien



Die Innen- und Außenradien eckiger Konturen sollten möglichst nach folgenden Regeln konstruiert werden, auch damit beim Umformen keine Schädigung der Fasern durch zu scharfe Werkzeugkanten auftreten

- Innenradius $R_i \geq$ Wanddicke Tepex®, aber mindestens R_1 (1 mm)
- Außenradius $R_a \geq$ Innenradius R_i + Wanddicke Tepex®

3.3. Gestaltung der Werkzeugkavität

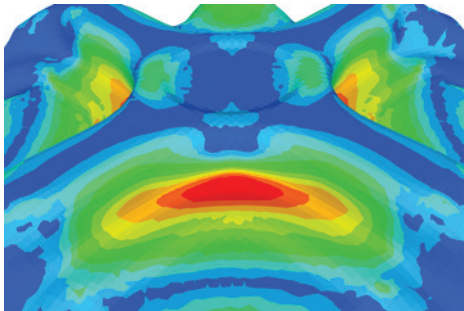
Tepex® wird vollständig imprägniert und konsolidiert ausgeliefert. Die einzelnen Fasern des textilen Halbzeugs sind also von der thermoplastischen Matrix umschlossen und das Laminat enthält nahezu keine Lufteinschlüsse. Beim Erwärmen über die Schmelztemperatur* der thermoplastischen Matrix erhöht sich die Dicke von Tepex® um bis zu 20 Prozent – das Material „loftet“. Der Vorgang des Loftens erklärt sich im Wesentlichen mit der Erhöhung des Volumens des Kunststoffes und mit dem Lösen von Eigenspannungen des textilen Halbzeugs durch die Erwärmung. Beim Umformen muss das Halbzeug daher wieder auf die nominelle Wanddicke zurückgepresst werden, damit eine kompakte, glatte Oberfläche ohne Fehlstellen entsteht und optimale Eigenschaften im Bauteil erreicht werden. Die Imprägnierung der einzelnen Fasern geht beim Lofting nicht verloren, der Prozess

des Zurückpressens wird daher auch „Rekonsolidierung“ genannt, da der konsolidierte Zustand des Halbzeugs wiederhergestellt wird. Die Temperaturen und Drücke, die bei der Umformung herrschen sind dabei üblicherweise mehr als ausreichend.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, den Bereich der Werkzeugkavität, in dem Tepex® umgeformt wird, entsprechend dem Sollmaß der Wanddicke des Bauteils auszuführen, da Schwindungseffekte bei Tepex® generell vernachlässigbar sind. Um eine homogene Druckübertragung beim Umformen zu gewährleisten, sollte die Werkzeugkavität zusätzlich etwa 50 – 100 µm dünner als die mittlere Tepex®-Dicke im Auslieferungszustand ausgelegt werden.

Besondere Aufmerksamkeit ist den Bereichen mit einem hohen Drapiertgrad (hohe Scherwinkel) zu widmen. Wie in den vorangegangenen Kapiteln kurz erläutert, kommt es hier zu einer Aufdickung aufgrund von Materialanhäufung. Diese können oftmals, trotz höherer Presskräfte, nicht auf das Sollmaß zurückgepresst werden, was zur Folge hat, dass aufgrund des Blockierens des Werkzeugs angrenzende Bereiche nicht voll mit Druck beaufschlagt werden können und damit nicht einwandfrei ausgeformt werden (siehe Bild 23). Die Kavität ist dann in diesen Bereichen entsprechend dicker auszulegen, damit eine gleichmäßige Druckverteilung über das gesamte Bauteil gewährleistet ist.

Bild 23: Auf ein reales Bauteil projizierte Scherwinkelverteilung; roter Bereich deutet auf eine lokale Aufdickung hin



Grundsätzlich kann eine einheitliche und glatt ausgeformte Oberfläche des hergestellten Bauteils als Gradmesser für eine gute Werkzeugauslegung angesehen werden, da dies ein Zeichen für eine gleichmäßige Druckübertragung vom Werkzeug auf die Bauteiloberfläche ist. Neben einem gut ausgelegten Werkzeug beeinflusst aber auch die Prozessführung die Oberflächenqualität maßgeblich:

- Temperatur des Tepex®-Einlegers
- Oberflächentemperatur des Werkzeugs (siehe auch Kapitel 2.4 „Variotherme Prozessführung“)
- Pressdruck
- Oberflächenqualität bzw. –beschaffenheit des Werkzeugs

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Präzision des Kavitätsspalts von entscheidender Bedeutung für die Bauteilformung ist.

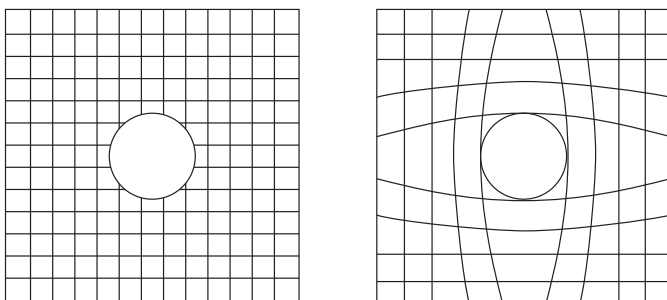
3.4. Integration von Löchern

Die Integration von Löchern und Durchbrüchen kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen:

1. Löcher werden bereits bei Fertigung des Tepex®-Einlegers durch Schneiden oder Bohren eingebracht
2. Erstellen der Löcher während der Umformung durch Verdrängung der Fasern mittels eines Dorns

Insbesondere bei hohen Lochleibungen erscheint die zweite Variante vorteilhaft, da so der Kraftfluss um die Löcher herumgelenkt werden kann. Bild 24 stellt diesen Sachverhalt schematisch dar.

Bild 24: Einbringung von Löchern: links durch Schneiden oder Bohren, rechts durch Umformung und Verdrängung der Fasern im Werkzeug



3.5. Auslegungshinweise zum Überspritzen von Tepex®

Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, lässt sich durch das Anspritzen eines kurz- oder langfaserverstärkten Kunststoffes mit gleicher bzw. kompatibler Matrix wie die von Tepex® eine stoffschlüssige Verbindung erzielen. Somit können komplexe Bauteile mit hoher Festigkeit und Steifigkeit gestaltet werden. Bild 25 stellt einen Ausschnitt eines solchen Bauteils dar. Erkennbar ist eine typische Rippenkonstruktion, die das Bauteil konstruktiv zusätzlich versteift und stabilisiert. Darüber hinaus ist eine typische Randumspritzung (Kantenversiegelung) zu sehen.

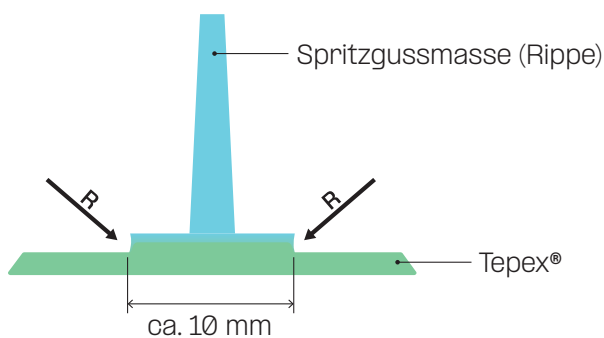
Bild 25: Beispiel für Rippenkonstruktion und Randumspritzung



3.5.1. Rippengestaltung

Bei der Konstruktion von Rippen zur Überspritzung von Tepex® sind grundsätzlich zwei Aspekte zu beachten. Zum einen sollte eine großflächige Gestaltung des Rippenfußes gemäß unten stehender Abbildung vorgenommen werden. Gute Erfahrungen sind mit einer Breite von ca. 10 mm gesammelt worden, womit, eine optimale Prozessführung vorausgesetzt (siehe Kapitel 2.3), eine sehr gute Anbindung zwischen Rippe und Organoblech erzielt wird.

Bild 26: Schematische Darstellung der Rippengestaltung

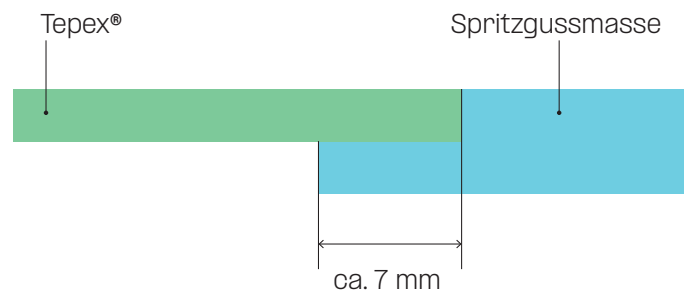


Darüber hinaus sind scharfe Kanten im Bereich des Aufsetzens des Rippenfußes auf das Organoblech zu vermeiden. Abgerundete Ecken vermeiden eine Beschädigung der Fasern im Moment des Aufsetzens des Werkzeugs.

3.5.2. Gestaltung der Randbereiche

Bei der Konstruktion von Kraffteinleitungs- und Funktionselementen aber auch bei Gestaltung der Randbereiche eines Bauteils wird eine Kombination aus stirnseitiger und überlappender Anspritzung empfohlen, wie dies in der nachfolgenden Skizze dargestellt ist. Ein rein stirnseitiges Anspritzen ist möglichst zu vermeiden, da es hierbei zu einem ungewünschten Umklappen des Tepex®-Einlegers kommen kann.

Bild 27: Schematische Darstellung der Gestaltung der Randbereiche



In Kombination mit einer geeigneten Prozessführung kann auf diese Weise ein optimaler Verbund hergestellt werden.

3.5.3. Patchen bzw. Überlappen von Tepex®

In Anlehnung an die „Tailored Blank“-Technologie besteht auch bei Organoblechen die Möglichkeit, verschiedene Organobleche zu kombinieren um das Bauteil so mittels unterschiedlicher Blechdicken an lokale Bauteilbelastungen anpassen zu können. Vorzugsweise werden die Organobleche zunächst separat aufgeheizt und erst danach im oder vor dem Werkzeug zusammengeführt und umgeformt. Die artgleiche Matrix führt zur stoffschlüssigen Verbindung. Siehe dazu auch Abschnitt 2.3.4 Patchen.

3.6. Allgemeine Auslegungshinweise zum Handling von Tepex®

Eine wichtige Rolle für eine hohe Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses und der Bauteileigenschaften spielt das Handling des Einlegers aus Tepex®. Er verlässt die Aufheizstation im heißen Zustand und ist plastifiziert, also biegeschlaff. Dies muss sowohl beim Transport zum Werkzeug, beim Schließen des Werkzeugs und beim eigentlichen Umformen als auch beim Über- oder Hinterspritzen berücksichtigt werden. Folgende Aufgaben hat das Handlingsystem zu übernehmen:

- Sicheres Greifen während bzw. nach der Aufheizung
- Vermeidung einer lokalen Abkühlung durch Greifer
- Schneller Transport auf kürzestem Weg zum Werkzeug
- Reproduzierbare und positionsgenaue Übergabe an das Werkzeug

Anschließend muss im Werkzeug sichergestellt werden, dass

- der Zuschnitt ohne Wärmeverlust positionsgenau aufgenommen, und
- der Zuschnitt während der Schließbewegung des Werkzeuges für die Umformung freigegeben wird.

Für den Transport zwischen Aufheizstation und Werkzeug empfehlen sich folgende Greifertechniken für das Handling:

- Nadelgreifer inkl. Abstreiferhülse (werden in Organoblechzuschnitt gestochen)
- Klemmstifte, Punktgreifer (beidseitige Klemmung)
- Vakuum-Sauger
- Airflow-/Bernoulli-Greifer (Unterdruck durch Luftzug)
- Pins (nehmen den Organoblechzuschnitt in vorher eingebrachte Löcher auf)

Für die Aufnahme im Werkzeug kann folgendes eingesetzt werden

- Nadeln zum Aufstecken des Zuschnittes
- schwenkbare Haltefinger
- Klemmstifte in beiden Werkzeughälften, mit denen der Zuschnitt mittig zwischen beiden Werkzeughälften übernommen wird
- Vakuum-Sauger

Um eine Abkühlung von Tepex® im Werkzeug zu verhindern, ist bei der Auslegung des Übernahmesystems auf die Vermeidung eines frühzeitigen Kontakts mit den relativ kalten Werkzeugwänden zu achten. Darüber hinaus müssen diese Aufnahmen so gestaltet sein, dass beim Schließen des Werkzeugs das Tepex® während der Umformung reproduzierbar und positionsgenau gehalten wird, ohne die Drapierung zu beeinträchtigen.

4. VERBINDUNGSTECHNIKEN FÜR TEPEX®

Komponenten aus Tepex® sind oft Teil komplexer Baugruppen, die sich im Extremfall aus unterschiedlichen Materialien wie etwa Stahl, Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium, kurz- oder langglasfaserverstärkten Kunststoffen oder Carbonfaser-Verbundwerkstoffen zusammensetzen. Um solche Baugruppen in hoher Qualität und Geschwindigkeit bei niedrigen Kosten automatisiert zu fertigen, kann es erforderlich sein, Tepex® mit sich selbst oder mit anderen Werkstoffen zu verbinden. Dazu können Verfahren eingesetzt werden, die seit Langem für thermoplastische Bauteile in der industriellen Serienfertigung etabliert sind.

Man unterscheidet die unterschiedlichen Fügeverfahren nach dem physikalischen Wirkprinzip zwischen

- Stoffschlüssigen Verbindungen (Schweißen, Kleben)
- Kraftschlüssigen Verfahren (Schrauben, Pressen, Nieten)
- Formschlüssigen Verfahren (Schnappen, Rasten, Bügeln)

Weiterhin wird zwischen lösbaren (Schrauben, Stifte, Keile) und unlösbaren Verbindungen (Kleben, Schweißen, Nieten) differenziert. Während das Schweißen nur für thermoplastische Halbzeuge einsetzbar ist, ist es mit Hilfe des Klebens und mechanischen Fügens möglich, verschiedene Materialpaarungen, sogar Kunststoffe mit völlig andersartigen Werkstoffen wie z.B. Metallen zu verbinden.

Eine konkrete Auslegung eines Fügeprozesses sollte stets individuell bauteil- und anwendungsspezifisch erfolgen. Dazu sei an dieser Stelle auf Klebstoffhersteller, Hersteller von Verbindungselementen (Schrauben, Nieten usw.), Maschinenhersteller (Schweißen) und Ingenieurdienstleister verwiesen, die derartige Prozesse mit Fachwissen und Erfahrung sicher einschätzen und auslegen können.

4.1. Kleben

Das Kleben von Bauteilen ist eine etablierte stoffschlüssige Füge-technik, die es ermöglicht, auch inkompatible Materialien miteinander zu verbinden. Es existiert eine

Vielzahl von Klebstoffsystemen am Markt, die zum Teil auf spezifische Werkstoffpaarungen zugeschnitten sind.

Für die Auswahl eines geeigneten Klebstoffsystems für Tepex® kann der Anwender auf etablierte Systeme zurückgreifen. Dabei genügt in der Regel die Kenntnis der Composite-Matrix sowie des Fügepartners; speziell auf Tepex® zugeschnittene Klebstoffsysteme werden nicht zwingend benötigt.

Als lösemittelfreie, schrumpfarne Klebstoffe sind Systeme aus 2-K-Epoxid-Klebstoffen, 2-K-Acrylat-Klebstoffen und 2-K-Polyurethan-Klebstoffen bereits serienreife.

Die Bauteile müssen klebgerecht konstruiert sein. Folgende Belastungsarten der Klebverbindung können auftreten:

- Zugscherbeanspruchung: Überlappte Klebverbindungen ermöglichen die Ausbildung größerer Fügeflächen und damit die Übertragung größerer Kräfte unter relativ niedriger Schubspannung in der Klebefuge. Dies ist die anzustrebende Belastungsart.
- Zugbeanspruchung: Sollte vermieden werden, da die Zugfestigkeit der Klebstoffe oft niedriger ist als die Festigkeiten der Fügebauteile.
- Schälens: Schälkräfte rufen Spannungen senkrecht zur Klebefuge hervor. Unübersichtliche Spannungsverhältnisse, Abschätzung der Sicherheit gegen Zerstören kaum möglich. Sind Schälbeanspruchungen nicht vermeidbar, so sollten sie durch geeignete Maßnahmen vermindert werden.
- Biege- und Spaltbeanspruchungen: Ebenfalls zu vermeiden, da sie zu hohen Spannungsspitzen führen können.

Ein Reinigen, Aufrauen der Oberflächen und/oder Aktivieren oder der Einsatz spezieller Primer steigert die Haftfestigkeit.

Tepex® kann auch mit kommerziellen Strukturklebstoffen gefügt werden, die bei den Temperaturen der kathodischen Tauchlackierung (KTL) aushärten. Dies erhöht die Einsatzmöglichkeiten des Verbundwerkstoffs im Leichtbau von Karosseriekomponenten, da im Anwendungsfall keine zusätzliche Energie für das Erwärmen und Aushärten des Klebstoffes notwendig ist.

4.2. Fügen durch Spritzgießen

Wie in Kapitel 2.3 bereits beschrieben, ist das Fügen durch Spritzgießen ein effizientes, vielseitiges und serienreife Fügeverfahren für Thermoplast-Composites wie Tepex®. Wenn Spritzgussmaterial und Composite-Matrix polymerchemisch verträglich sind, resultiert eine stoffschlüssige Verbindung mit exzellenter Haftung. Auch mehrere Tepex®-Zuschnitte können auf diese Weise sogar mit Metallbauteilen in einem Prozessschritt zu komplexen Baugruppen gefügt werden. Während die Verbindung zwischen thermoplastischem Composite und der Spritzgussmasse in der Regel stoffschlüssiger Natur ist, erfolgt die Verbindung mit inkompatiblen Fügepartnern wie Metallen entweder durch einen Formschluss (Durchspritzen von Durchbrüchen oder Verkrallung des

Polymers an Oberflächenmerkmalen) oder wird über Verarbeitungshilfsmittel erzeugt. So können Metallbleche mit einem geeigneten Haftvermittler beaufschlagt werden, der einen sekundären Stoffschluss zwischen Tepex® und Metall ermöglicht.

4.3. Mechanische Fügeverfahren

Für das Verschrauben von Tepex®-Bauteilen sollten gewindeformende Schrauben eingesetzt werden, deren Gewindeflanken einen Winkel von 20° bzw. 30° aufweisen. Aufgrund dessen, dass durch das Einbringen von Fügeelementen i.d.R. die Faserstrukturen durchbrochen werden müssen, sollten die Fügeelemente entweder nicht in die primären Lastpfade des Bauteils eingebracht werden, oder alternativ können die Fasern im plastifizierten Halbzeug verdrängt werden, so dass sie um die Bohrung, in die später das Fügeelement eingebracht wird, herum verlaufen, ohne zerstört zu werden (siehe Kap. 3.4 Integration von Löchern). Alternativ können bei der Bauteilherstellung lasteinleitende Geometrien wie z. B. Schraubendome angeformt werden.

Generell sollte die Krafteinleitung weniger über die Lochleibung erfolgen, sondern in geeigneter Weise in die Halbzeug- oder Bauteilebene eingebracht werden. Dies kann durch die Verwendung von großflächigen Fügeelementköpfen und eine entsprechende Vorspannkraft erfolgen.

4.4. Schweißen

Da Tepex® auf einer thermoplastischen Matrix basiert, bieten sich hierfür auch entsprechende Schweißverfahren an. Beim Schweißen werden vor allem physikalische Adhäsionsmechanismen genutzt, um eine Verbindung zwischen zwei oder mehreren Fügepartnern zueinander zu generieren. Dazu werden die Fügepartner zumindest lokal in einen schmelzeförmigen Zustand versetzt und dann unter Druck miteinander in Kontakt gebracht und unter dem wirkenden Fügedruck wieder abgekühlt. Während der Fügephase werden die Adhäsionsvorgänge aktiviert und bleiben im erkalteten Zustand in der Regel reversibel bestehen.

Zur Verfügung steht eine Vielzahl von Verfahren, die bereits seit Langem in der konventionellen thermoplastischen Kunststoffverarbeitung angewendet werden. Die Verfahren sind serientauglich und bei thermoplastischen Bauteilen vielfach erprobt. Sie unterscheiden sich u. a. hinsichtlich Schweißnahtfestigkeit, Zykluszeiten und Anwendbarkeit bei kleinen oder großen Stückzahlen.

Die Schweißverfahren lassen sich anhand der Wärmebringung klassifizieren. Man unterscheidet in:

- Erwärmung durch Wärmeleitung
- Erwärmung durch Strahlung
- Erwärmung durch Bewegung
- Erwärmung durch Konvektion

Ein sehr guter Überblick über die einzelnen Schweißverfahren und deren Eignung für thermoplastische Faserverbunde wird im „Handbuch Verbundwerkstoffe“ (Hanser Verlag) von Neitzel, Mitschang und Breuer gegeben.

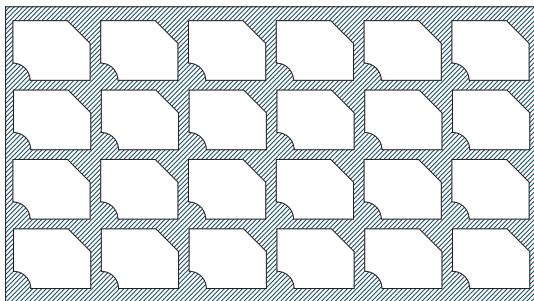
5. NACHHALTIGKEIT

Leichtbaumaterialien, zu denen auch alle Tepex®-Produkte gehören, tragen grundsätzlich zu einer nachhaltigen, klimaschonenden und ressourceneffizienten Industrie bei. Der Einsatz hybrider Fertigungstechnologien und das Design hybrider Bauteile reduziert Verarbeitungsschritte. Mit leichtbauspezifischem Design, das den optimalen Kraftfluss über die Lang- bzw. Endlosfasern im Tepex® nutzt, lassen sich in unkritischen Bereichen Material und Rohstoffe einsparen. Zudem ermöglicht der Einsatz thermoplastischer Kunststoffe die Realisierung ganzheitlicher Recyclingkreisläufe.

5.1. Recycling von Tepex®

Beim Ausschneiden der anwendungsspezifischen Zuschnitte entsteht in einem gewissen Umfang Verschnitt, wie dies beispielhaft in Bild 28 zu erkennen ist. Um diesen Verschnitt zu minimieren, werden die entsprechenden Geometrien unter Berücksichtigung der notwendigen Faserorientierung so in dem Tepex®-Halbzeug „verschachtelt“ (auch Nesting genannt), dass man eine optimale Ausbeute erhält. Bereits während der Entwicklungsphase von Tepex®-Bauteilen sollte ein großes Augenmerk auf die Optimierung der Zuschnittsgeometrie hinsichtlich Reduzierung von Materialverlust gelegt werden. Bereits kleinste Anpassungen können die Ausbeute erheblich erhöhen.

Bild 28: Beispiel für Verschnitt nach dem Zuschnitt der Bauteilgeometrie



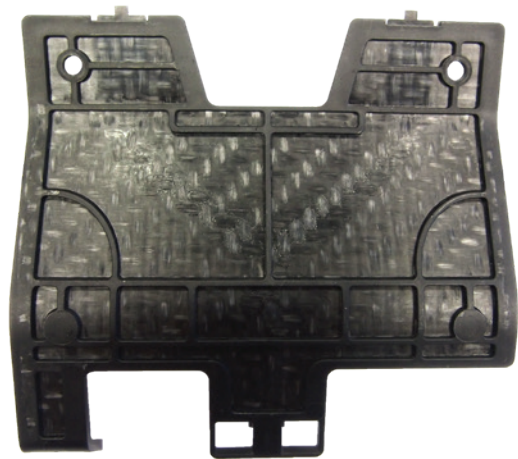
Bei stark gekrümmten Geometrien, die sich nur sehr ungünstig verschachteln lassen, ist zu prüfen, ob sich das Bauteil auch aus mehreren Tepex®-Zuschnitten gestalten lässt, die anschließend im Werkzeug vereint werden. Oftmals ist so eine deutlich bessere Materialausnutzung möglich.

Der nicht zu vermeidende Verschnitt kann einem Recyclingprozess zugeführt werden. Da es sich bei Tepex® um einen faserverstärkten, thermoplastischen Kunststoff handelt, können folgende Recyclingkonzepte herangezogen werden:

- die werkstoffliche Verwertung durch mechanische Aufarbeitung
- die rohstoffliche bzw. chemische Verwertung, d.h. Aufspaltung in Einzelkomponenten durch Hydrierung, Hydrolyse und Pyrolyse oder Solvolyse
- die energetische Verwertung zur Rückgewinnung der im Kunststoff enthaltenen Energie

Die effizienteste und nachhaltigste Verwertungsma-thode ist das werkstoffliche Recycling. Dabei wird der Tepex®-Verschnitt zunächst mit Hilfe von Schneidmüh-len, Einwellen- oder Mehrwellenzerkleinerern zu einer definierten Partikelgröße vermahlen. Das Mahlgut, das bei der Zerkleinerung entsteht, kann direkt einem kunst-stofftypischen Verarbeitungsprozess zugeführt wer-den. Aufgrund der niedrigen Schüttdichte des Mahlguts sollte bei hohen Mahlgutanteilen eine Zwangsdosierung verwendet werden, um Brückenbildung im Trichter zu verhindern. Wird das Mahlgut allerdings vor der Dosie-rung mit granulartförmiger Neuware vermischt, ist bis zu einem Mahlgutanteil von 20% eine Dosierung in unmodi-fizierten Standardtrichtern problemlos möglich.

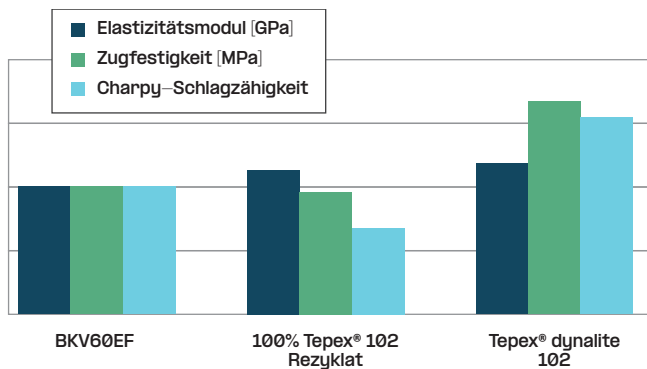
Bild 29: Demonstratorbauteil: Umgeformtes Tepex® dynalite 104-RG600 umpritzt mit Mahlgut aus artgleichen Verschnittresten



Durch Beimischen unverstärkter Neuware lässt sich der Faseranteil des Rezyklats gezielt einstellen und hieraus Regranulat herstellen. Bei PP-basiertem Tepex® ist eine Verdünnung des Mahlguts auf einen Fasermassengehalt von maximal 30 – 40% empfehlenswert, da so eine bessere Kombination mit handelsüblichen Kurzfaserverstärkungen möglich ist. Grundsätzlich kann Tepex® auch unverdünnt regranuliert werden. Die mechanischen

Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Zähigkeit) des Rezyklats sind vergleichbar mit handelsüblichen kurzfaserverstärkten Kunststoffen mit entsprechenden Fasergehalten.

Bild 30: Vergleich kurzfaserverstärktes Compound Durethan® BKV60EF (PA6 mit 60 mass.-% Glasfaseranteil) mit Tepex® dynalite 102 (PA6 + Glasfasern) und seinem Rezyklat (jeweils ca. 65 mass.-% Glasfaseranteil), normierte Werte



5.2. CO₂-Fußabdruck von Tepex®

Um den Einfluss von Tepex®-Produkten auf die Umwelt zu quantifizieren, wird der Herstellungsprozess kontinuierlich im Rahmen des Energie- und Umweltmanagements analysiert und bewertet. Eine wichtige Kennzahl in diesem Zusammenhang ist der CO₂-Fußabdruck für Produkte.

Die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks für die Tepex®-Produkte erfolgt nach den Prinzipien der ISO 14040/44 und wird als kg CO₂ eq/kg Tepex®-Produkt angegeben. Dazu werden alle Stoffströme der eingesetzten Rohstoffe entlang des Lebenswegs bis zum Verkauf des Tepex®-Produktes an unserem Werk („cradle-to-gate“) in dem Bilanzrahmen berücksichtigt. Da der Tepex®-Herstellprozess für alle Produkte des Portfolios nahezu identisch ist, können die Input- und Outputströme gleichmäßig auf alle Tepex®-Produkte bilanziert werden. Die bei der Bauteilfertigung anfallenden Verbleibstoffe werden als Sekundär-Produkte durch eine ökonomische Allokation in der Bilanz berücksichtigt. Für die eingesetzten Rohstoffe werden die von den jeweiligen Lieferanten kommunizierten CO₂-Fußabdrücke verwendet, welche basierend auf den Einkaufsvolumina gewichtet gemittelt werden. Sollten keine Primärinformationen durch die Lieferanten zur Verfügung gestellt werden können, wird auf die Informationen der EcoIn-

Die Solvolyse trennt mittels eines geeigneten Lösemittels die Fasern vom Matrixwerkstoff und ist somit ebenfalls ein geeignetes Verfahren für das Rezyklieren von Tepex®. Die wiedergewonnenen Rohstoffe (Fasern und Matrixpolymer) liegen nach der Solvolyse getrennt voneinander vor und können nach geeigneter Aufbereitung wieder dem Tepex®-Herstellprozess zugeführt werden. Der Solvolyse-Prozess ermöglicht damit eine Verwertung aller Ausgangsstoffe und somit einen Rohstoffkreislauf, der im Idealfall keine Verringerung der Werkstoffeigenschaften (z.B. Reduktion von Lang- zu Kurzfasern) zu Folge hat. Im Gegensatz zur Solvolyse wird bei der Pyrolyse der Matrixwerkstoff durch einen thermischen Prozess von den Verstärkungsfasern entfernt und in ein Pyrolyseöl umgewandelt. Das Pyrolyseöl kann seinerseits zur Energiegewinnung oder zur Herstellung neuer Kunststoffe verwendet werden.

Werden in der Verarbeitung zu Bauteilen artgleiche Polymere für die Tepex®-Matrix und das Anspritzmaterial verwendet, lassen sich die oben beschriebenen Verfahren ohne Weiteres auch auf End-of-Life-Abfälle, d.h. die Verwertung dieser Bauteile am Ende ihrer Lebenszeit übertragen.

vent Datenbank oder Literaturbasierte-Abschätzungen zurück gegriffen.

Bei der Betrachtung eines spezifischen Tepex®-Typs haben die eingesetzten Rohstoffe den größten Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck von Tepex®. So kann z.B. durch den Einsatz biobasierter Rohstoffe wie Flachsfasern oder PLA der CO₂-Fußabdruck eines Tepex®-Halbzeugs gegenüber einer Variante aus Glasfasern und PP um über 50% gesenkt werden.

Der CO₂-Fußabdruck vieler Tepex®-Typen kann über den Envalior Plasticsfinder (www.plasticsfinder.ivalor.com) angefragt und eingesehen werden. Mit zunehmender Datenverfügbarkeit und -qualität können bauteilspezifische CO₂-Fußabdrücke bereitgestellt werden, die nachhaltiges Bauteil- und Prozessdesign schon in der Auslegungsphase ermöglichen.

Bild 31: Vergleich CO₂-Fußabdruck verschiedener Tepex®-Typen

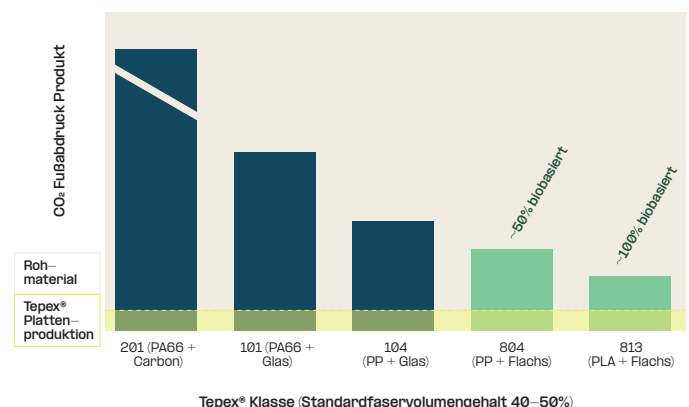


Bild 32: Verteilung der Prozessemissionen, der CO₂ eq der Rohstoffe, der Entsorgung der Abfälle sowie sonstiger Betriebs- und Verpackungsmittel.

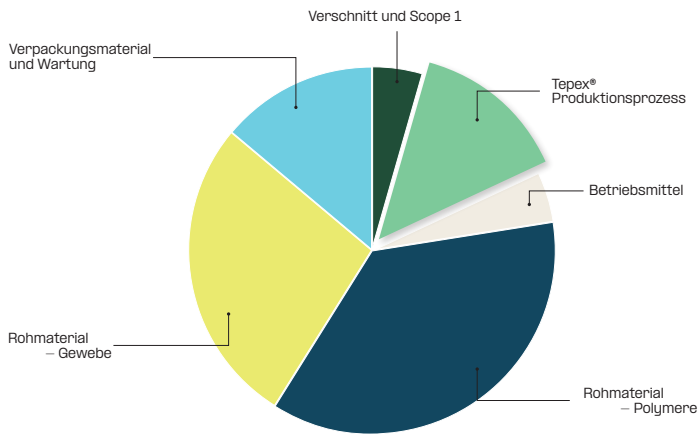


Bild 33: Wertschöpfungskette: Tepex® → Mahlgut → Regranulat → Bauteil aus Rezyklat



6. KONSTRUKTION UND BERECHNUNG VON BAUTEILEN AUS TEPEX®

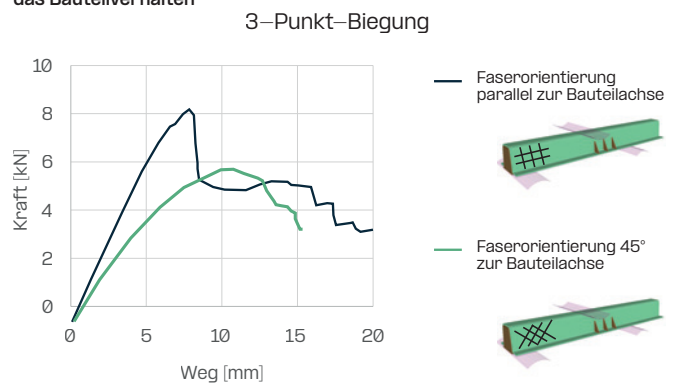
Tepex® bietet dem Konstrukteur große Freiheiten in der lastgerechten Auslegung von hoch beanspruchbaren Leichtbauteilen. Deren Eigenschaften hängen vom Thermoplasten für die Matrix, von der Art der Endlosfasern (Glas, Carbon, u.a.) und von der Art der verwendeten Verstärkung (unidirektional, bidirektional, multiaxial) ab.

Mit am wichtigsten für die rechnerische Auslegung ist die aus der Verstärkung durch Endlosfasern resultierende Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der mechanischen Eigenschaften. In eine thermoplastische Matrix eingebettete unidirektionale Endlosfasern zeigen in Faserrichtung (1-Richtung) die Eigenschaften des Fasermaterials und senkrecht zu den Fasern (2- und 3-Richtung) eher die Eigenschaften der Matrix.

Bei Bauteilen aus Tepex® dynalite, semipreg oder UDea entspricht die Faser- der Bauteillänge. Der Konstrukteur sollte daher die Fasern möglichst in Richtung der angreifenden Lasten orientieren, damit der Kraftfluss zwischen Kräfteinleitungspunkten über die Endlosfasern erfolgt. Ein komplexerer Spannungszustand im Bauteil (z. B. kombinierte Schub- und Zug- bzw. Druckspannung im gebogenen Profil) kann aber auch eine Kombination von verschiedenen Faserorientierungen erfordern.

Ein symmetrischer Lagenaufbau ist von Vorteil, um das Bauteil verzugsarm auszulegen. Außerdem sollten die Kräfte möglichst großflächig aufgenommen werden, um Spannungsüberhöhungen und Kerbeffekte zu vermeiden und immer mehrere Faserrovings zu belasten.

Bild 34: Das Bild zeigt den Einfluss der Faserorientierung auf das Bauteilverhalten



6.1. FEM-Berechnungen: Voraussetzungen und Besonderheiten

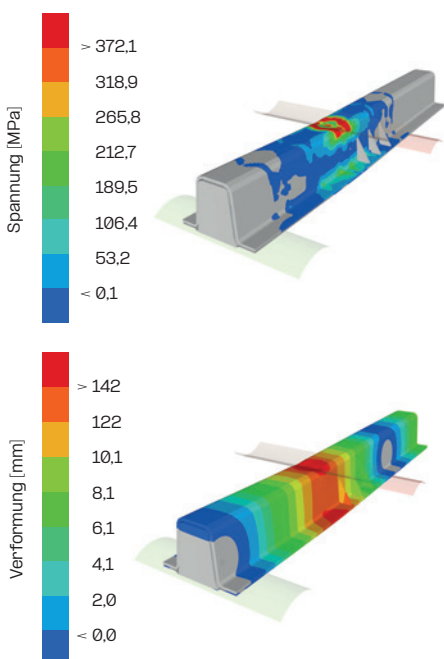
Die computergestützte rechnerische Auslegung (CAE) von Bauteilen aus Tepex® ist ein Muss, um zu kurzen Entwicklungszeiten, wirtschaftlichen Fertigungsprozessen und zu einer optimal auf die Lastfälle abgestimmten BauteilAuslegung zu kommen. Hierbei bezieht sich die Auslegung ausdrücklich sowohl auf den Fertigungsprozess, als auch auf das mechanische Verhalten des Bauteils und die Wechselwirkung zwischen Fertigung und Bauteileigenschaften.

Wie in der Einleitung beschrieben, ist die für die Auslegung wichtigste Eigenschaft des Halbzeugs die Anisotropie, d.h. Richtungsabhängigkeit. Aus der Morphologie der Verstärkungsgewebe resultiert dazu noch eine Abhängigkeit vom Ort in Dickenrichtung (Layer-Aufbau) und für den Herstellprozess die Drapierbarkeit. Aus den Matrixeigenschaften ergibt sich die Abhängigkeit von Temperatur und u.U. der Feuchtigkeitsgehalt. Aus dem Layer-Aufbau ergeben sich zusätzlich unter Umständen relativ große Unterschiede zwischen Zug- und Biegeigenschaften.

Sowohl der Herstellprozess als auch das Bauteilverhalten können mit gängigen FE-Methoden und üblichen Rechenprogrammen (Solvem) gut beschrieben werden, wobei die Genauigkeit und die Prognosegüte einmal vom verwendeten Modellansatz und dem Umfang der zugrundeliegenden Messdaten abhängt, aber auch von der Frage, welche Lastfälle betrachtet werden sollen.

Um den Herstellprozess, die resultierende Faserorientierung sowie die Bauteileigenschaften bis hin zum Bruchverhalten hinreichend prognostizieren zu können, hat Envalior auf dem FE-Solver ABAQUS basierende Tools und Materialmodelle entwickelt, welche die genannten Eigenschaften und Einflüsse beschreiben und die somit im Entwicklungsprozess für Tepex®-Bauteile direkt eingesetzt werden können.

Bild 35: Spannungsverteilung sowie die Verformung beim 3-Punktbiegeversuch mit einem Standard-Profilträger



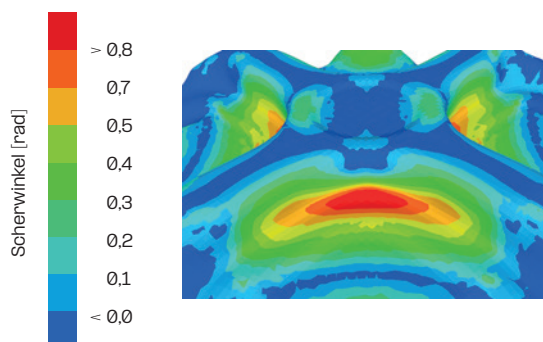
6.2. Drapiersimulation

Die Umform- oder auch Drapiersimulation dient zwei Zielen, die voneinander unabhängig sind:

- Bestimmung der Verteilung der lokalen Faserorientierungen und Scherwinkel im Gewebe. Diese werden wiederum in der mechanischen Berechnung benötigt, um das anisotrope Materialverhalten zu berücksichtigen. Diese Berechnung wird oft früh im Projekt, in der Konzeptphase benötigt, um hier verschiedene Konzeptvorschläge mechanisch zu bewerten. Die Simulation der Faserorientierungen muss daher schnell und einfach erfolgen und möglichst wenig Informationen über das Werkzeug erfordern, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stehen. Envalior verwendet hierzu ein FE-basiertes Rechenverfahren, welches recht schnell, d.h. während des Designprozesses für eine gegebene Tepex®-Geometrie den dazugehörigen Zuschnitt und die Verteilung der Orientierungen bestimmt. Das Verfahren ist nicht exakt, jedoch in aller Regel hinreichend genau (One-Step-Draping).
- Vollständige Darstellung des Drapierprozesses mit Berücksichtigung von Zuschnittgeometrie, Werkzeuggeometrie, Schiebern, Haltenadeln, Handlingsystem usw. Hierbei ist die Aufgabe, den Prozess darzustellen, mögliche Fehler frühzeitig aufzudecken, Verbesserungsvorschläge zu entwickeln und die Prozesssicherheit abzuschätzen. Die Berechnung der Faserorientierung liegt hier etwas im Hintergrund. Die vollständige Drapierstudie wird idealerweise durchgeführt, wenn die Bauteilgeometrie festliegt, es schon Schieberkonzept und Daten des Werkzeugs (zumindest der Formflächen) gibt, jedoch noch Freiheiten vorhanden sind.

Das von Envalior entwickelte Simulationsmodell für die Drapierung von Tepex®-Bauteilen basiert auf dem FE-Solver ABAQUS. Es berücksichtigt die Tatsache, dass sich thermoplastische gewebebasierte Composites nicht plastisch tiefziehen lassen, sondern vielmehr durch Gewebescherung aus der ebenen Form heraus in die dreidimensionale Geometrie des Bauteils gebracht werden (Trellis-Effekt). Ist die zur Umformung nötige Scherung so groß, dass die Fasern gegeneinander sperren („Locking“), weicht das Material in die Normalenrichtung aus und es entstehen Falten. Dieser Effekt lässt sich auch im Rechenmodell nachstellen.

Bild 36: Scherwinkelverteilung im „Schikane“-Bauteil



6.3. Materialdaten und Materialmodelle für die eigene Bauteil实现

Envalior setzt die Simulation der Bauteil- und der Prozesseigenschaften im Rahmen gemeinsamer Entwicklungsprojekte ein, um Kunden in der Bauteilentwicklung zu unterstützen. Darüber hinaus ist es jedoch auch wichtig, den Kunden Werkzeuge liefern zu können, mit denen sie neue Anwendungen in Tepex® im Rahmen ihres eigenen CAE-Workflows auslegen können.

Im Gegensatz zur Berechnung von Metallen ist die Materialmodellierung von thermoplastischen Composites wie Tepex®, bestehend aus dem Materialmodell, der Schnittstelle zur Glasfaserorientierung, sowie geeigneten Versagensmodellen noch kein allgemeiner Standard – hierin besteht auch der Grund, warum Lanxess sich schon frühzeitig um eigene Materialansätze bemüht hat.

Je nach Anwendung und Aufgabenstellung kann Lanxess jedoch für die Tepex®-Materialfamilie Materialkarten für die meistverwendeten CAE-Programme zur Verfügung stellen:

- Linear-orthotrope Materialkarten für lineare Steifigkeit, Schwingungsverhalten (NVH), statische Untersuchungen, z.B. in Abaqus, NASTRAN, Optistruct, LS-Dyna
- Nichtlinear-orthotrope Materialkarten für LS-Dyna und für Abaqus

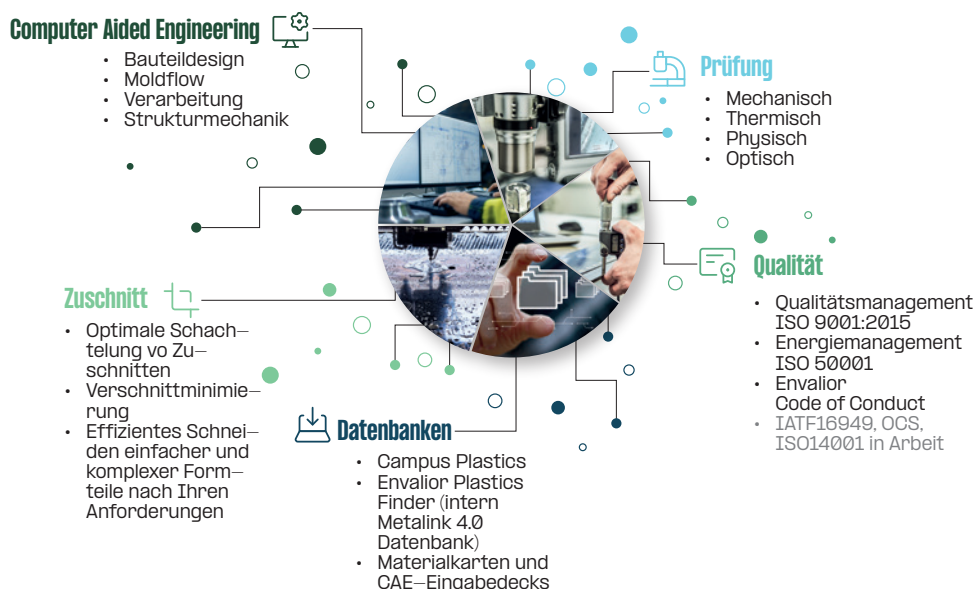
Zusätzlich zur Materialbeschreibung ist in allen Fällen eine saubere Beschreibung der Verteilung der Glasfaserorientierung notwendig. Diese lässt sich mit einschlägigen kommerziellen Ansätzen ermitteln, oder kann, auf Anfrage und auf Projektbasis, von Envalior für ein gegebenes Modell bestimmt werden (One-Step-Draping).

7. ENGINEERING SERVICE ENTLANG DER GESAMTEN ENTWICKLUNGSKETTE

Hinter Envaliors Engineering Service steht das gesamte Know-how zu Materialien, Composite-Technologien, Simulationen, Bauteilprüfung, Verarbeitung und Fertigung besitzt. Diese Expertise bringen wir in die Zusammenarbeit mit unseren Kunden ein.

Zu den Engineering-Serviceleistungen für Tepex® zählen u. a.:

- Hilfe bei der Materialwahl unter Berücksichtigung der Bauteilanforderungen
- Bereitstellung maßgeschneiderter Polymertypen für das Insert-Molding-, Hybrid-Molding- und Fließpress-Verfahren
- Werkstoffprüfungen zur Ermittlung von Materialkennwerten für die mechanische Strukturanalyse und Bauteil实现
- Simulation der Umformung (Drapierung) von Tepex®
- integrative Simulation zur lastgerechten Auslegung von Endlosfaserverbund-Bauteilen
- Nachstellen der Fertigungsprozesse von Kunden auf unseren vollautomatisierten, seriennahen Demonstratorzellen zur Ermittlung von Prozessparametern und zur Qualitätssicherung und -verbesserung
- Bauteilprüfungen wie mechanische Komponenten- oder Klimawechselfests
- Unterstützung vor Ort bei Werkzeugabmusterungen oder Prozessoptimierungen.



8. DANKSAGUNG

Folgende Unternehmen bzw. Hochschulen (in alphabetischer Reihenfolge) haben dankenswerterweise durch Bildmaterial und weitere Informationen die Erstellung dieser Broschüre unterstützt:

- ENGEL AUSTRIA GmbH, Ludwig–Engel–Straße, 14311 Schwertberg, Austria
- Hochschule Rosenheim (Prof. Schemme, Prof. Karlinger)
- Universität Paderborn (Prof. Moritzer, Prof. Schöppner, Prof. Obermann)
- Georg Kaufmann Formenbau AG, Rugghölzli, 5433 Remetschwil, Schweiz
- KraussMaffei Technologies GmbH, Krauss–Maffei–Straße 2, 80997 München, Deutschland

Envalior GmbH

Flughafenstrasse 101
40474 Düsseldorf
Germany
info@envalior.com

**Falls Sie weitere Informationen benötigen
oder etwas vermissen, wenden Sie sich bitte an:**

+49 2961 96628 0
oder
info.tepex@envalior.com

Weitere Informationen finden Sie auch in
unserem Internetauftritt:
www.tepex.com



[www.linkedin.com/company/envalior/
posts/?feedView=all](https://www.linkedin.com/company/envalior/posts/?feedView=all)

Bond-Laminates GmbH
Am Patbergschen Dorn 11
59929 Brilon

Die in diesen Dokumenten enthaltenen Informationen spiegeln den Wissensstand von Envalior zum Zeitpunkt der letzten Überarbeitung dieses Dokuments wider. Alle getätigten Aussagen sind nicht rechtsverbindlich und stellen keine Garantie oder Gewähr für eine bestimmte Verwendung dar. Es liegt in der Verantwortung unserer Kunden, die Eignung eines bestimmten Envalior-Produkts für die beabsichtigte Nutzung zu prüfen.
© Envalior 2025 – V250122