

„Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“
Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium 2003 des SFB 396
Hrsg.: M. Geiger, G. W. Ehrenstein
Meisenbach Bamberg 2003

Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile

**Prof. G. W. Ehrenstein¹, S. Amesöder², L. Fernández Díaz³,
Prof. H. Niemann⁴, R. Deventer⁵**

Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl für Kunststofftechnik und Lehrstuhl für Mustererkennung

Zusammenfassung

Leichtbaustrukturen mit tragender Eigenschaft und integrierten Funktionselementen können in Hybridbauweise rationell in einem robusten Fertigungsprozess hergestellt werden. Unterschiedliche Werkstoffe werden derart integriert gefertigt, dass eine strukturierte Kunststoffverrippung ein einfach umgeformtes, flächiges Einlegeteil versteift und stabilisiert, sowie um Funktionselemente erweitert. Neue Werkstoffkombinationen und angepasste Fertigungsbedingungen ermöglichen ein verbessertes Eigenschaftsprofil der Bauteile und eine weitere Verbesserung des Leichtbaupotentials.

¹ Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein:
Ordinarius des Lehrstuhls für Kunststofftechnik (LKT), Am Weichselgarten 9, 91058 Erlangen
Email: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de, URL: <http://www.lkt.uni-erlangen.de>

² Dipl.-Ing. Simon Amesöder:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am LKT im Bereich Mehrkomponentenspritzgießen
Email: amesoeder@lkt.uni-erlangen.de, URL: <http://www.lkt.uni-erlangen.de>

³ Dipl.-Ing. Luis Fernández-Díaz :
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am LKT im Bereich Hybridtechnik
Email: fernandez@lkt.uni-erlangen.de, URL: <http://www.lkt.uni-erlangen.de>

⁴ Prof. Dr.-Ing. H. Niemann:
Ordinarius des Lehrstuhls für Mustererkennung (LME), Martensstr. 3, 91058 Erlangen
Email: niemann@informatik.uni-erlangen.de, URL: <http://www5.informatik.uni-erlangen.de>

⁵ Dipl.-Inform. Rainer Deventer:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am LME
Email: deventer@informatik.uni-erlangen.de, URL: <http://www5.informatik.uni-erlangen.de>

Schlagworte: Mehrkomponententechnik, Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, Funktionserweiterung, Faserverbundwerkstoffe, Funktionsintegration, Prozessoptimierung, Bayesnetze, Regelung.

1 Einleitung und Motivation

Das breite Eigenschaftsprofil polymerer Werkstoffe lässt sich durch die Kombination unterschiedlicher Kunststoffe miteinander sowie in Kombination mit anderen Werkstoffen zusätzlich erweitern. Zum einen ist die Herstellung von Verbundbauteilen mit zusätzlichen, lokal integrierten Eigenschaften wie beispielsweise von Dichtungselementen in Gehäuseteilen oder unterschiedlich eingefärbter Bereiche im Mehrkomponentenspritzgießen als rationelles Herstellungsverfahren bewährt. Auf der anderen Seite können in Verbunden gezielt Synergien zweier Werkstoffe zur Verbesserung der Gesamteigenschaften genutzt werden. So resultieren in Kunststoff-Metall-Hybriden gerade durch die gegenseitige mechanische Unterstützung beider Komponenten die spezifischen Eigenschaften als tragende Leichtbaustruktur. Die Funktionsintegration, die mechanischen Synergieeffekte und die resultierende Einsparung von Montageschritten führen zu einer verkürzten, robusten Fertigungskette und sind ausschlaggebender Anreiz für die Anwendung in der Serienfertigung, z.B. von Front-End-Strukturen in Automobilen, **Bild 1** [1-3].



Bild 1: Anwendungsfeld der Hybridtechnik als PKW Front-End-Modul am Beispiel des Audi A4 (Quelle: Audi AG)

Die sehr unterschiedlichen Eigenschaften von Kunststoff und Stahl führen jedoch auch zu Problemen wie ungenügende Anbindung zwischen den Verbundpartnern

und werkstoffbedingten, z.B. thermischen Spannungen, die die mechanische Belastbarkeit von Hybridträgern beeinträchtigen. Ziel aktueller Forschungsarbeiten ist die rationelle Herstellung von Hybridstrukturen aus kompatiblen, leichteren Werkstoffen mit angepassten Verformungs- und Wärmeausdehnungseigenschaften, um das Leichtbaupotential zu erhöhen und bei gleichen oder besseren mechanischen Eigenschaften die Prozesskette weiter zu verkürzen.

Relevante Werkstoffsysteme sind vor diesem Hintergrund Materialien wie Aluminiumlegierungen und gewebeverstärkte Thermo- und Duroplaste sowie glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) und glasfaserverstärkte Duroplaste (SMC) als Einlegeteil und verstärkte Thermoplaste für die Verstärkungsrippen.

Im Rahmen dieses Beitrages sollen erste Ergebnisse für das Verbesserungspotential von Hybridbauteilen aus neuartigen Werkstoffverbunden gegenüber bisherigen Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen sowie Ansätze zur Verbesserung der Prozessführung aufgezeigt werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Herstellung tragender Hybridbauteile

Durch die vorteilhafte Kombination verschiedener Werkstoffe können Bauteile mit deutlich erhöhtem Leistungsvermögen kostengünstig hergestellt werden, die mit nur einem Werkstoff bei gleichem Gewicht nicht realisierbar sind. Hybridstrukturen als tragende Metall-Kunststoff-Verbunde werden bereits in verschiedenen Bereichen erfolgreich eingesetzt [2-5].

Wichtige Verfahren zur Herstellung von Hybridstrukturen sind Fügeprozesse wie Kleben, Schweißen, Nieten, mechanisches Fügen oder urformende Verfahren wie Gießen und Umspritzen [5-7]. Die Umspritztechnik ist im Vergleich zu den anderen Verfahren ein rationelles Verfahren, da sie in einem Arbeitsgang und in einer kurzen Zeit die Integration zahlreicher Funktionselemente in einem Bauteil ermöglicht [7]. Bei der Hybridtechnologie, wie sie zur Frontendfertigung in der Automobilindustrie eingesetzt wird, werden das Metall-Tiefziehen und das Spritzgießen kombiniert. Dünnwandige, umgeformte und gelochte Bleche werden im ersten Schritt kostengünstig umgeformt und im Allgemeinen über ein Handlingsystem automatisch in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und umspritzt. Neben der Anspritzung der Kunststoffrippen zur Versteifung des Trägers lassen sich einfach Funktionselemente wie Schnappverbindungen oder Haken formen, so dass montagefertige Bauteile direkt aus dem Spritzgießwerkzeug entnommen werden können.

Standardverbunde in Serienanwendungen sind bisher Kombinationen aus (behandeltem) Stahl als Blechteile und kurzfaserverstärkten Thermoplasten als Rippenstruktur. Die Kunststoffkomponente übernimmt zudem die Fixierung / Positionierung der meist mehreren Einzelbleche im Front-End-Modul [9,10].

2.2 Eigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen

Die Bauteileigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybriden resultieren aus sich komplex überlagernden werkstofflichen und fertigungstechnischen Einflussfaktoren. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl die Biege- als auch die Torsionsbelastbarkeit von der Blechstärke, der Gestaltung beider Komponenten, den Werkstoffen und den Prozessparametern bei der Herstellung abhängt [8,10]. Hybridstrukturen besitzen eine deutlich höhere Belastbarkeit als die reinen vergleichbaren Metallprofile. Mit wachsender Steifigkeit des Kunststoffes nimmt auch die Steifigkeit der Hybridstruktur zu, Bild 2 [8].

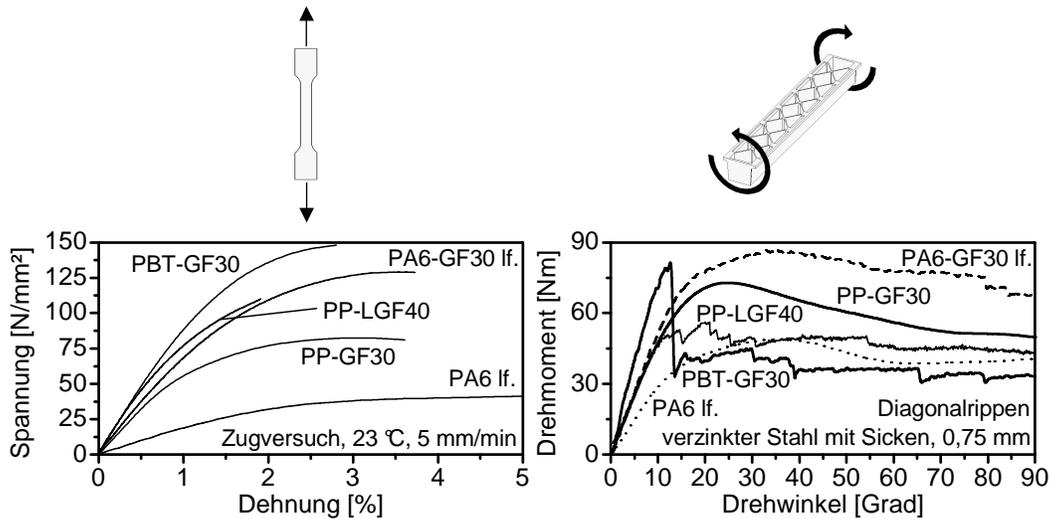


Bild 2: *Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Kunststoffart [8]
links: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Campus-Zugstäbe
rechts: Drehmoment-Drehwinkel-Diagramme der Hybridstrukturen
„Erlanger Träger“*

Die aus den Spannungs-Dehnungs-Verläufen im Zugversuch erkennbare Steifigkeit korreliert mit den Torsionsmessungen an einem Hybridprobekörper aus einem U-Stahlblechprofil mit angespritzter Diagonalverrippung [8].

Die Festigkeit der Hybridstruktur hängt dabei nicht nur von der Festigkeit des Kunststoffes ab, sondern auch von seiner Dehnfähigkeit. Besonders hinsichtlich einer hohen Energieaufnahme sind eine geringere Bruchspannung und eine hohe Kerbempfindlichkeit von Nachteil. Bemerkenswerterweise besitzt die Hybridstruktur aus den weniger festen Werkstoffen PA6-GF30 und PP-GF30 eine höhere Torsionsbelastbarkeit und Energieaufnahme als die aus den festeren Werkstoffen PBT-GF30 und PP-LGF40, da sie lokalen Deformationen aufgrund einer höheren Streckdehnung besser folgt.

Die Kraftübertragung und –einleitung im Übergangsbereich Metall-Kunststoff kann in Hybridstrukturen über stoff- und formschlüssige Anbindung beider Werkstoffe erreicht werden. Eine gute Anbindung zwischen aufgespritzten Kunststoff und Metallblech kann durch Vorwärmen des Bleches erreicht werden, **Bild 3**. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Bleches ist ein zügiges Einlegen und Anspritzen, wichtig. Bei unzureichender Haftung zwischen Metall und Kunststoff wird der Formschluss über Aussparungen im Blech wie Sicken, Hinterschnitte bzw. Durchbrüche eingebracht. Bei formschlüssigen Verbindungen ist die Verbundfestigkeit wie beim Nieten erwartungsgemäß eine lineare Funktion der Anzahl der Aussparungen und hängt unterproportional vom Flächeninhalt des Verbindungsquerschnittes ab. Die Anbindegeometrie kann bei der Verbundfestigkeit ebenfalls eine entscheidende Rolle spielen [8]. Sprunghafte Geometrie- und/oder Steifigkeitsänderungen führen in der Hybridstruktur zu lokalen Spannungsüberhöhungen [8,11].

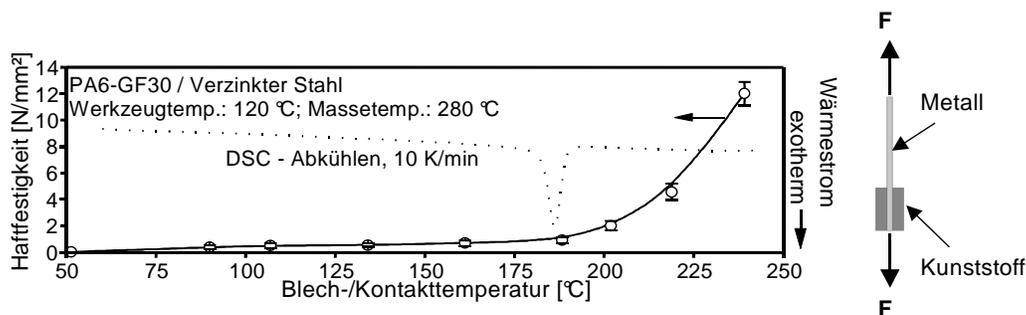


Bild 3: *Haftung bei Schubbelastung in Abhängigkeit von der Blechtemperatur eines Polyamid 6 mit 30 Gew.-% Glasfasern angespritzt an ein 1 mm dickes Blech [8]*

Die Schwindung des Kunststoffs sowie die Unterschiede im thermischen Ausdehnungsverhalten von Kunststoffen und Metallen führen, insbesondere bei unsymmetrisch aufgebauten Teilen, zu inneren Spannungen im Bauteil (Eigen- und Wärmespannungen) und äußern sich in einem Bauteilverzug sowie einer herabgesetzten Belastbarkeit von Hybridstrukturen [8].

Die Charakterisierung der Eigenschaften von Hybridbauteilen wird zunehmend durch die Beschreibung des Bauteilverhaltens bei dynamischer Belastung (Crash) erweitert. Im praktischen Falltest mit umfangreicher Messsensorik werden Kraft-Weg-Verläufe gemessen und die Schädigung online aufgezeichnet. Parallele Simulationsrechnungen werden mit den Messdaten verglichen und korreliert. Basierend auf vorhandenen Erfahrungen aus der Crashsimulation von Instrumententafeln, Türverkleidungen und Stoßfängerverkleidungen ergeben sich für einfache Hybridstrukturen wie den „Erlanger Träger“ bereits Ansätze für eine zuverlässige Aussage. Um allerdings komplexe Bauteile wie gesamte Front-End-Module rechnerische sicher auslegen zu können sind sehr genaue Materialmodelle aus praxisnahen Werkstoffuntersuchungen abzuleiten [11].

2.3 Werkstoffliches und fertigungstechnisches Potential für tragende Hybridbauteile

Aus den bisherigen Erfahrungen zu Kunststoff-Metall-Hybridverbunden erscheinen insbesondere ein niedriges Eigenspannungsniveau, geringe Kerbspannungen im Übergangsbereich und eine gute Haftung vielversprechende Optimierungsansätze für Hybridstrukturen zu sein. Zudem ist die weitere Gewichts- und Kostenreduzierung durch Verwendung leichter Werkstoffe mit hohen spezifischen Steifigkeits- und Festigkeitswerten und einem hohen Integrationspotential ein Ziel. Für die praktische Umsetzung ergeben sich folgende Ansätze:

- Einsatz angepasster Werkstoffkombinationen hinsichtlich Steifigkeit, Verformungs- und Wärmeausdehnungsverhalten.
- Verbesserung der Anbindung zwischen Trägerkomponente und Rippen durch Nutzung des Haftungspotentials von Kunststoff-Kunststoff-Verbunden bzw. gezielten Vorbehandlungsmethoden, insbesondere bei Metall-Kunststoff-Kombinationen.
- Steigerung bauteilbezogener mechanischer Kennwerte durch eine beanspruchungsgerechte Bauteilauslegung, v.a. bei mechanisch anisotropen Bauteileigenschaften der flächigen, umgeformten Trägerkomponente.
- Nutzung von Trägerwerkstoffen mit weiteren Gewichtsvorteilen und einem hohen Integrationspotential in der Prozesskette.
- Integrierte mechanische FE-Analyse mit Strukturkennwerten aus der Spritzgießsimulation.

Die Werkstoffanpassung soll die Herstellung von Hybridstrukturen ermöglichen, bei denen sowohl die thermischen Eigenspannungen als auch die Spannungsüberhöhungen an den Verbindungsstellen reduziert sind. Als flächige Trägerkomponente können daher Aluminium, gewebeverstärkte Thermo- und Duroplaste, sowie glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) und glasfaserverstärkte Duroplaste (SMC) in Frage kommen. Insbesondere Faserverbundwerkstoffe weisen aufgrund ihrer hohen gewichtsbezogenen Steifigkeit und Festigkeit ein hohes Leichtbaupotential auf. Deren Eigenschaftsprofil sind in einer Reihe der für tragende Hybridstrukturen wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise dem E-Modul und teilweise auch der thermischen Ausdehnung den Werten von verstärkten Thermoplasten besser angepasst als Stahlbleche, Bild 4.

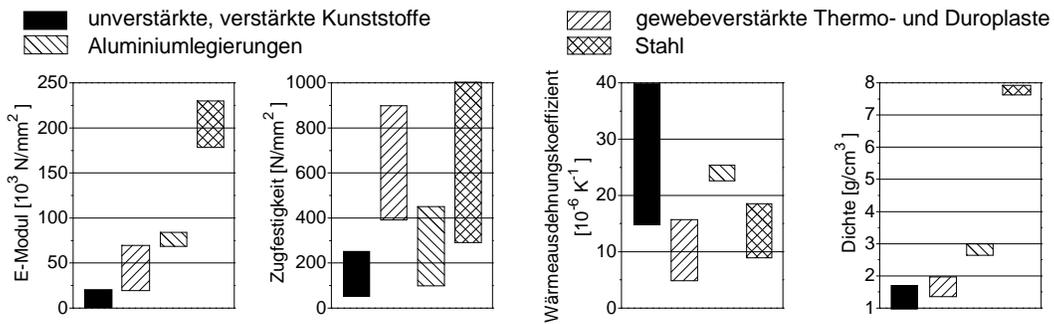


Bild 4: Vergleich wichtiger Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe als Komponente der Hybridstrukturen

Zur Verbesserung der Anbindung zwischen Trägerkomponente und Rippenstruktur sind die Vorbehandlung der Metallbleche sowie das prozessoptimierte An- bzw. Umspritzen polymerer Einlegeteile alternative Strategien. Die Funktionserweiterung, insbesondere die Krafteinleitung in einen gewebeverstärkten Thermoplast, wurde in Voruntersuchungen beim Anspritzen mit glasfaserverstärktem Polyamid 66 bereits erfolgreich durchgeführt, Bild 5.

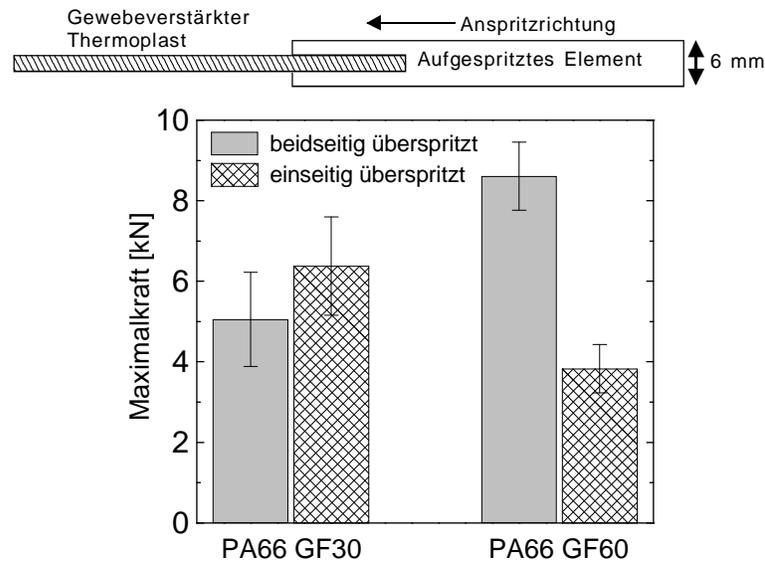


Bild 5: Abhängigkeit der Maximalkraft im Zugscherversuch überspritzter Einlegeteile aus gewebeverstärktem Polyamid 6 vom Glasfasergehalt der Spritzgießmasse

PA6-Gewebe: Tepex 101-FG290(8)/46; d.h. 46 Gew.-% Glasgewebe (Fa. Bond Laminates)

PA66-GF30: Zytel 70G30 HSL NC 10 (Fa. DuPont)

PA66-GF60: Zytel 70G30 HSL BK 359 (Fa. DuPont)

Halbzeugtemperatur: ca. 175°C, Überlapplänge und -breite: 20 mm

Untersuchungen aus der vorigen Phase zeigen, dass deutlich höhere Maximalkräfte im Zugscherversuch bei einer Halbzeugtemperatur von 180-200 °C erreicht werden können als bei Temperaturen des umspritzten Einlegeteils von 160 °C und niedriger.

Bei den faserverstärkten Kunststoff-Einlegeteilen als Trägerkomponente ist das Einlegen der noch warmen Bauteile unmittelbar nach dem Umformprozess oder nach dem Aushärten ins Spritzgießwerkzeug verfahrenstechnisch möglich, so dass aus der Sicht des Energiebedarfs das aufwendige Aufwärmen vor dem Anspritzen entfallen könnte, Bild 6. Da bei faserverstärkten Thermoplasten bei erhöhten Temperaturen mit einer merklich verminderten Formstabilität zu rechnen ist, muss auf eine optimale Einspannung der Bauteile ein besonderes Augenmerk gerichtet werden. Bei faserverstärkten Thermoplasten sind eine geringere Wärmeleitfähigkeit sowie eine Schmelztemperatur im Bereich des angespritzten Kunststoffes möglich. Es ist damit ein oberflächliches Anschmelzen des Einlegeteils durch den Kontakt mit der Spritzgießmasse denkbar, was zur Erzielung einer guten Haftung beitragen soll.

Mehrlagige Faserverbunde ermöglichen die Anpassung der Gewebeausrichtung bzw. -struktur der Trägerkomponente an die Anforderungen des jeweils zu erwartenden Belastungsfalls.

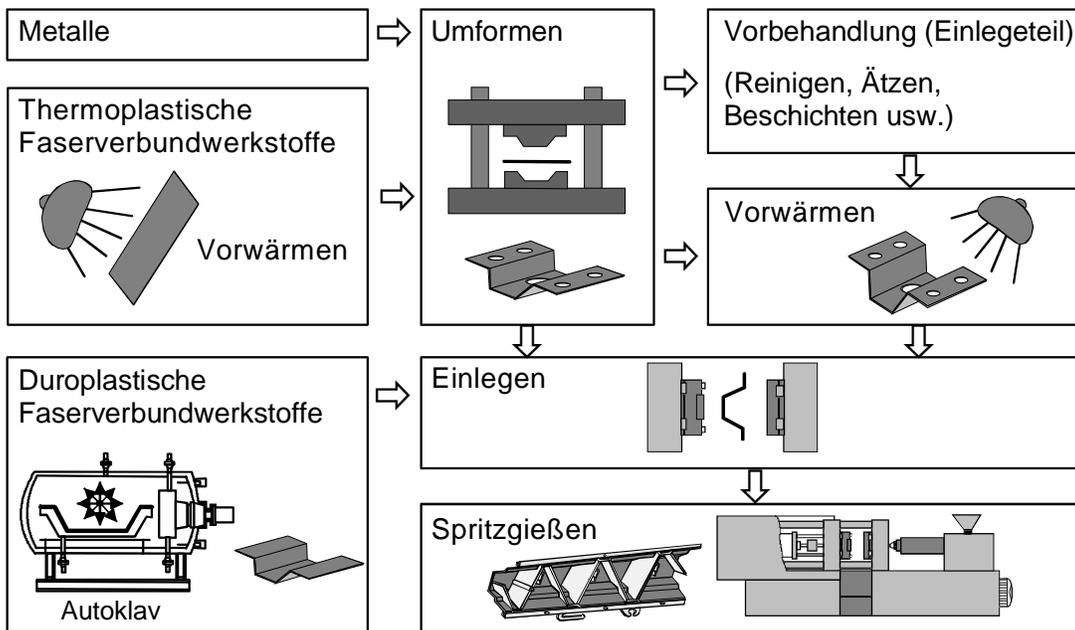


Bild 6: Prozesskette bei der Herstellung von Hybridstrukturen

2.4 Prozessdatenanalyse- und regelung mit Bayes-Netzen

Die steigenden Anforderungen an die Formteilqualität bedürfen heute nicht nur allein einer genauen Kenntnis der Werkstoffeigenschaften und der Erfahrung bei der Auslegung / Konstruktion, sondern erfordern zusätzliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Verarbeitung.

Ziel ist die Erarbeitung eines umfangreichen Prozesswissens um Art und Größe von Störeinflüssen wie z.B. Prozess- oder Materialschwankungen auf relevante Qualitätsmerkmale zu erfassen, auszuwerten und in einen Regelalgorithmus zu integrieren. Dazu werden in der Praxis verschiedene Strategien angewandt. In statistischen Versuchsplänen werden vor Prozessbeginn die wichtigsten Prozessparameter systematisch variiert und hinsichtlich der Störimpfindlichkeit ausgewertet. Eine Möglichkeit zur Auswertung von Versuchsdaten ist die statistische Analyse, z.B. die Varianzanalyse.

Eine weitere Methode sind Bayesnetze, die sich besonders durch ihre Lernfähigkeit auch mit unvollständigen Datensätzen auszeichnen. Die Fähigkeit trotz des Ausfalls einer Messung weiterarbeiten können, steigert die Robustheit bedeutend. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei Bayesnetzen prinzipiell kein Unterschied zwischen Eingabe- und Ausgabevariablen besteht, da das Bayesnetz nichts anderes repräsentiert als eine Verbundverteilung der, als Zufallsvariable aufgefassten, Sensordaten. Dies ermöglicht auch den direkten Einsatz als Regler. Um das Bayesnetz in diesem Fall als Regler zu betreiben, wird angenommen, dass der Sollwert gemessen wurde. Er wird daher als Beobachtung in die Ausgangsknoten eingetragen. Das Bayesnetz wird dann dazu verwendet unter Berücksichtigung des Sollwertes auf eine Eingabe zu schließen, die zu dem gewünschten Sollwert führt.

Formal gesehen wird jedes Bayesnetz durch einen azyklischen, gerichteten Graphen beschrieben, **Bild 7**. Jedem Knoten ist dabei eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet. Die Gesamtverteilung ergibt sich mit der sogenannten chain rule zu

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | V(X_i)). \quad (1)$$

In Gleichung (1) bezeichnet $V(X_i)$ die Väter von X_i , also alle Knoten X_j mit einer Kante $X_j \rightarrow X_i$ zu X_i . Die Väter der Kraft F_d in **Bild 7** sind also gleich der Menge $\{T_v, T_m\}$. In den ersten Artikeln zu Bayesnetzen wurde davon ausgegangen, dass alle Knoten des Bayesnetzes eine diskrete Zufallsvariable repräsentieren, d. h. nur eine endliche Anzahl von Werten annehmen können. Die Diskretisierung von kontinuierlichen Werten ist aber immer mit einem zusätzlichen Aufwand und einem Informationsverlust verbunden. Es bietet sich daher an, mit hybriden Bayesnetzen zu arbeiten, die es erlauben mit diskreten und kontinuierlichen Zufallsvariablen gleichzeitig zu arbeiten. Um Verteilungen

neu berechnen zu können, wird angenommen, dass alle kontinuierlichen Zufallsvariablen normalverteilt sind und dass im Bayesnetz keine diskrete Knoten als Nachfolger von kontinuierlichen Knoten auftreten. Informationen zu dem Thema diskrete Nachfolger von kontinuierlichen Knoten finden sich unter anderem in [12,13].

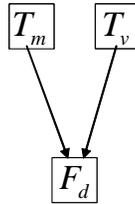


Bild 7: Struktur eines Bayesnetzes mit zwei Eingangsvariablen T_m und T_v und der Ausgangsvariablen F_d

T_m : Massetemperatur

T_v : Vorwärmtemperatur des Bleches

F_d : Abzugskraft

Die Verteilung p einer kontinuierlichen Zufallsvariablen Y an der Stelle y ist

$$p(y | \mathbf{x}, \mathbf{z}) = N(\mu[\mathbf{x}] + \mathbf{w}[\mathbf{x}]\mathbf{z}, \Sigma[\mathbf{x}]), \quad (2)$$

wobei \mathbf{x} und \mathbf{z} die Belegung der diskreten bzw. der kontinuierlichen Väter bezeichnet. Der Mittelwert der Normalverteilung N ergibt sich aus der Summe eines Offsets $\mu[x]$ und des Produktes aus dem Gewichtsvektor $\mathbf{w}[\mathbf{x}]$ und \mathbf{z} . Die Parameter der Normalverteilung, d.h. der Offset $\mu[x]$, der Gewichtsvektor $\mathbf{w}[\mathbf{x}]$ und die Varianz $\Sigma[\mathbf{x}]$ hängen dabei von der Belegung \mathbf{x} der diskreten Väter ab. Insgesamt ergibt sich dabei eine Gaußsche Mischverteilung, wobei sich das Gewicht der Mischverteilung aus der Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x})$ ergibt.

Inferenzalgorithmen, wie sie z. B. in [14,15] vorgestellt werden, sind in der Lage die Marginalverteilung

$$P(\mathbf{x}_r) = \sum_{\mathbf{x}_s \in \mathbf{X}_s} P(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s) \quad (3)$$

einer Verteilung $P(\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_s)$ von diskreten Zufallszahlen \mathbf{X}_s und \mathbf{X}_r zu berechnen. Analog hierzu kann auch die Marginalverteilung von kontinuierlichen Zufallsvariablen berechnet werden, in diesem Fall wird die Summation über alle Belegungen durch eine Integration über alle möglichen Belegungen ersetzt.

Eine zweite Aufgabe eines Inferenzalgorithmus besteht darin, die Verteilung $P(X|e)$ zu berechnen, so dass neue Beobachtungen e , Evidenzen genannt, berücksichtigt werden können. Um ein Bayesnetz als Regler einzusetzen, wird der gewünschte Sollwert, z.B. eine möglichst große Kraft, als Evidenz für die Ausgabevariable eingegeben. Die Eingabevariablen werden dann durch Marginalisierung berechnet.

Falls der Verlauf eines Parameters, z.B. einer Temperatur, von Interesse ist, müssen dynamische Bayesnetze, wie sie z.B. in [16,17] vorgestellt werden, verwendet werden. Die Hauptidee ist hierbei, dass für jeden Zeitpunkt ein eigenes Bayesnetz erstellt wird. Diese Bayesnetze werden anschließend durch temporäre Kanten verbunden. Regelungen für lineare, dynamische Systeme werden in [18,19] vorgestellt. Nichtlineare Systeme werden momentan untersucht, für eine exakte Auswertung steigt jedoch die Zeitkomplexität exponentiell mit der Anzahl der Zeitpunkte, die modelliert werden müssen. Die Auswertung in Echtzeit ist daher problematisch und Gegenstand der aktuellen Forschung.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Auswahl und Eigenschaften neuer Träger-/Profil-Werkstoffe

Für die Untersuchungen der Eigenschaften von Hybridstrukturen aus neuen Werkstoffverbunden wurden verschiedene Halbzeuge aus Leichtmetallen und faser- bzw. gewebeverstärkten Thermoplasten gemäß **Tabelle 1** ausgewählt. Die Charakterisierung erfolgte mit thermoanalytischen, physikalischen und mechanischen Methoden.

Die Werkstoffkennwerte der verwendeten Metall- und Kunststoff-Einlegeteile sind hinsichtlich der für Hybridbauteile relevanten Eigenschaften deutlich unterschiedlich, **Tabelle 2**. Die Eigenschaften des Aluminium und der gewebeverstärkten Thermoplaste liegen prinzipiell zwischen denjenigen von Stahl und Thermoplast. Im Vergleich zu den hohen mechanischen Werten des Stahls liegt die Steifigkeit der faserverstärkten Kunststoffe nur bei etwa bei 10-20 %. Die Unterschiede in der Festigkeit sind weniger deutlich ausgeprägt. Hier besitzt das glasgewebeverstärkte Polyamid 6 einen hohen Festigkeitskennwert.

| Kürzel | Bezeichnung | Matrix | Füllstoff | | Lieferant / Hersteller |
|----------------|----------------------------|--------|------------|--------|---|
| | | | Art | Gew.-% | |
| Stahl verzinkt | Stahl 12.03 verzinkt | --- | --- | --- | HSM GmbH, Georgensgmünd |
| Stahl | Stahl 12.03 | --- | --- | --- | HSM GmbH, Georgensgmünd |
| Edelstahl | Edelstahl 1.4301 | --- | --- | --- | Volkswagen AG, Wolfsburg |
| Aluminium | Aluminium-Legierung AlMg3 | --- | --- | --- | HSM GmbH, Georgensgmünd |
| SMC | SMC 0400, Rezeptur 532/01A | UP | Glasfasern | 30 | Menzolit Fibron GmbH, Kraichtal-Gochsheim |
| GMT | GMT D100 F30 | PP | Glasmatten | 30 | Quadrant Plastics AG, Worms |
| PA6-Gewebe | TEPEX 101/RG600 (4) | PA | Glasgewebe | 47 | Bond Laminates GmbH, Brilon |

Tabelle 1: *Untersuchte Werkstoffe als Trägerkomponente bzw. Profil-Werkstoffe bei Hybridstrukturen*

Der Wärmeausdehnungskoeffizient zeigt für die Paarung Aluminium / PA6-GF30 die geringsten Unterschiede, im Gegensatz zu den Varianten mit Stahl, SMC und gewebeverstärkter Thermoplast mit PA6-GF30. Die ähnlich hohe thermische Ausdehnung von Aluminium wie die des eingespritzten Kunststoffes kann sich schwindungsbedingt beim Abkühlen des Kunststoffes und des vorgewärmten Bleches günstig auswirken. Unter Berücksichtigung der niedrigeren Steifigkeitswerte für die Einlegteile aus Kunststoff gegenüber Stahl sind die Bedingungen bei den Kunststoff-Kunststoff-Varianten hinsichtlich niedriger Wärmespannungen günstiger.

Das hohe Wärmeleitvermögen von Aluminium (ca. 200 W/mK gegenüber bei Stahl ca. 40 W/mK) ermöglicht einen raschen Temperaturengleich zwischen Werkzeug und vorgewärmten Blech, so dass einerseits ein Vorwärmen nicht sinnvoll erscheint. Dagegen könnte andererseits gerade das Vorwärmen bei Aluminium aufgrund dessen hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu einem Ausgleich der Schwindung beitragen und, wie oben beschrieben, zu einer Reduzierung von Wärmespannungen bzw. Verformungen beitragen.

Klare Gewichtsvorteile gegenüber Stahl resultieren aus der niedrigen Dichte des Aluminiums und v.a. der Kunststoff-Profile, so dass im Hinblick auf das Leichtbaupotential die gewichtsbezogenen Kennwerte wichtig erscheinen.

| | | flächige Tragstrukturen | | | | | | Rippenwerkstoff | | |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|------------|
| | | Stahl, 12.03 | Edelstahl 1.4301 X5CrNi18 10 | AlMg3 | SMC 0400* | GMT D100F30 | TEPEX 101/RG600(4) | PA6-GF30 | PBT-GF30 | PP-LGF40 |
| E-Modul | [kN/mm ²] | 190 | 193 | 82 | 12,6 | 4,5 | 23,4 ₂₎ | 5,7 ²⁾ | 10 | 8,8 |
| Zugfestigkeit | [kN/mm ²] | 260 ³⁾ | 220 | 140 ³⁾ | 98 | 70 | 472 ₂₎ | 110 ²⁾ | 150 | 115 |
| Wärmeausdehnung | [10 ⁻⁶ K ⁻¹] | 11 | 10 | 24 | 10 | 58/ 39 ¹⁾ | 13/13 ₁₎ | 20-25 | 30/ 90 ¹⁾ | 40/ --- |
| Dichte | [g/cm ³] | 7,9 | 7,7 | 2,7 | 1,80 | 1,13 | 1,8 | 1,36 | 1,55 | --- |
| Glasfasergehalt | [Gew.-%] | --- | --- | --- | 30 | 30 | 47 | 30 | 30 | 40 |

Tabelle 2: *Eigenschaften von Stahl gegenüber neuen Leichtbauwerkstoffen für die Hybridtechnik*
 Angabe der Werte für 23°C
¹⁾ längs/quer; ²⁾ luftfeucht; ³⁾ bei 0,2 % Dehnung

3.2 Untersuchungen zur Verbesserung des Haftungspotentials

Um die Möglichkeiten einer stoffschlüssigen Anbindung zwischen Kunststoff-Metall bzw. Kunststoff-Kunststoff im Übergang der angespritzten Rippenstruktur und der Trägerkomponenten abschätzen zu können, wurden planare Metallbleche aus Stahl, Edelstahl und Aluminium sowie entsprechende Bleche aus Faserverbundkunststoffen flächig von der Stirnseite aus über einen Filmanguss auf beiden Seiten mit PA6-GF30 gleichmäßig umspritzt, **Bild 8**. Die vorgefertigten und mit Aceton gereinigten Bleche (50 x 50 x 2 mm) wurden dazu in die Kavität eines einfachen Plattenwerkzeuges (Platte 50 x 50 x 6 mm) eingelegt und über 4 modifizierte Auswerferstifte in den Ecken fixiert. Die Verbundfestigkeit wurde anschließend an präparierten Proben (Verbundfläche mit $\varnothing = 20$ mm) im Druck-Scherversuch ermittelt. Die verwendete Maschineneinstellung ist in **Tabelle 3** dargestellt.

Zur Verbesserung der Anbindung zwischen Einlegeteil und aufgespritztem Kunststoff wurden zum einen die Metallbleche mit einer Polymer-Schicht (Ultramid[®] 1C) versehen und zum anderen die Kunststoff-Einlegeile aus SMC, GMT und gewebeverstärktem Thermoplasten sowie das Stahlblech mit einer Plasmavorbehandlung aktiviert. Die Plasmavorbehandlung ist unter Umgebungsbedingungen, d.h. Normaldruck und Umgebungstemperatur, möglich und kann

aufgrund der kompakten Bauweise der Plasmaquelle direkt in den Fertigungsprozess integriert werden. Die pistolenförmige Plasmadüse ermöglicht eine gerichtete und lokale Vorbehandlung der Einlegeteile, auch im Werkzeug.

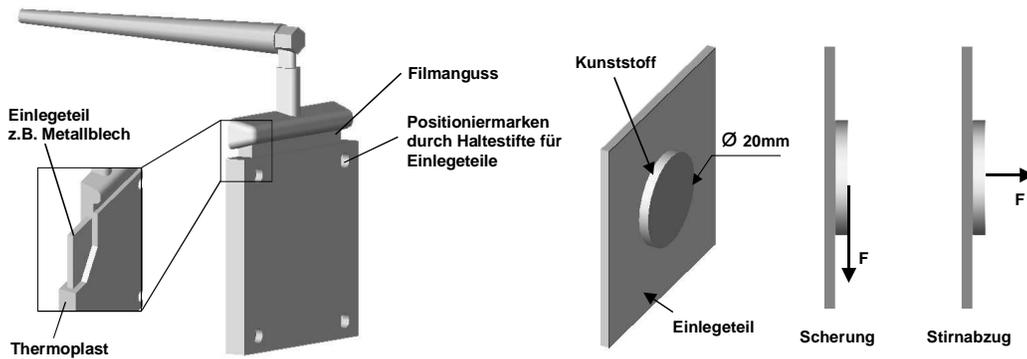


Bild 8: Probekörperplatten aus umspritzten Metallblechen bzw. Faserverbundkunststoffen
 links: Aufbau der Proben (Größe 50 x 50 x 6 mm)
 rechts: Prüfanordnung zur Ermittlung der Haftkraft im Scher- und Stirn-Abzugsversuch (schematisch)

| Maschinenparameter | Bez. | Einheit | Werte |
|--|----------|---------|---------|
| Massetemperatur der Kunststoffschmelze | T_M | [°C] | 270 |
| Kontakttemperatur der Metallbleche *) | T_V | [°C] | ca. 220 |
| Werkzeugtemperatur | T_{WZ} | [°C] | 80 |
| Einspritzgeschwindigkeit | v_E | [mm/s] | 50 |
| Nachdruckhöhe | p_N | [bar] | 300 |
| Nachdruckzeit | t_N | [s] | 10 |

Tabelle 3: Grundeinstellung beim Umspritzen der Metallbleche und des PA6-Gewebes mit PA6-GF30
 *) nur für Metallbleche; PA6-Gewebe wurde nicht vorgewärmt

Die Ergebnisse der Kunststoff-Metall-Verbunde zeigen, dass die erreichbare Druck-Scherfestigkeit sowohl von der Art des Metallbleches als auch der Vorbehandlung abhängt. Eine Zunahme der Verbundfestigkeit ergibt sich in der Reihenfolge Aluminium, Stahl und Edelstahl. Dies korreliert mit den Wärmeleitfähigkeiten der Werkstoffe und belegt die Messungen in [8], dass die Kontakttemperatur bei der Benetzung der Kunststoffschmelze auf der Metalloberfläche eine entscheidende Rolle für die Ausprägung der Anbindung besitzt. Eine Beschichtung der Proben mit dem löslichen Mischpolyamid (Ultramid® 1C)

bewirkt eine deutliche Verbesserung der Verbundfestigkeit bei allen drei Metallwerkstoffen.

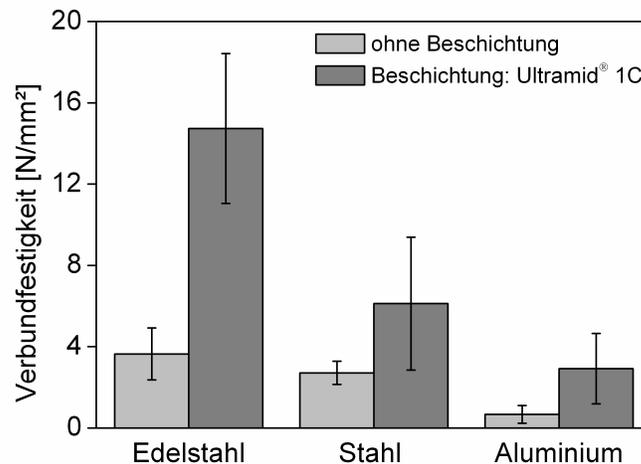


Bild 9: Verbundfestigkeiten zwischen glasfaserverstärktem Polyamid (PA6-GF30) und unbeschichteten bzw. beschichteten Metallen
Rauheit von Edelstahl: 2,3 μm ; Stahl: 3,6 μm ; Aluminium: 0,8 μm
Prüfung im Druck-Scher-Versuch

Die Untersuchungen der Verbunde aus dem gewebeverstärkten Polyamid 6-Gewebe (Glasfaseranteil 47 Gew.-%) mit angespritzten PA6-GF30 zeigt eine geringe Haftung der unbehandelten, nicht vorgewärmten Einlegteile von ca. 2 N/mm². Diese niedrige Haftung kann durch eine gezielte Plasmavorbehandlung der Einlegteile gesteigert werden. Die Plasmabehandlung wurde mit dem Openair[®]-Verfahren unter Atmosphärenbedingungen durchgeführt. Dieses Verfahren ermöglicht aufgrund der kompakten Bauweise des Plasmakopfes eine gezielt lokale Reinigung bzw. Aktivierung von Werkstückoberfläche im Fertigungsprozess mit einer Relativgeschwindigkeit zur Werkstoffoberfläche von bis zu 900 m/min.

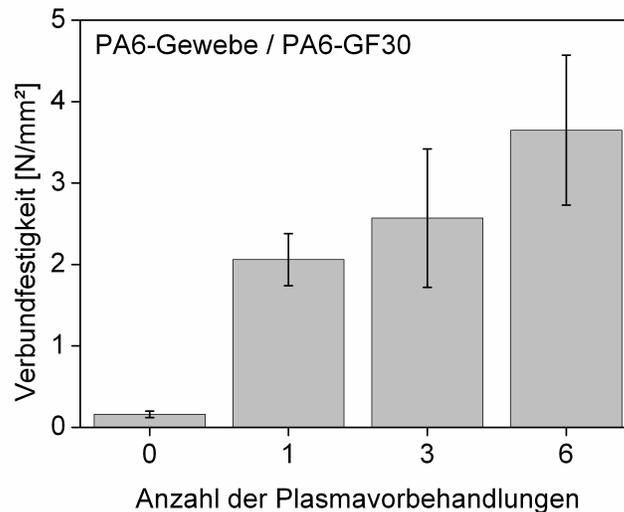


Bild 10: Verbundfestigkeiten zwischen glasfaserverstärktem Polyamid (PA6-GF30) und nur gereinigtem sowie plasmavorbehandelten gewebeverstärkten Thermoplasten (Tepex 101/RG600(4)) Prüfung umspritzter Einlegeteile im Stirnabzug-Versuch

3.3 Eigenschaften von Kunststoff-Stahl-Hybriden

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kraft-Weg-Verläufe der bisherigen Untersuchungen wurden sowohl bei Biege- und Torsionsprüfungen am Probekörper U-Träger („Erlanger Träger“) das Verformungs- und Deformationsverhalten im quasistatischen Belastungsfall erfasst. Dazu wurden U-förmige Profile aus Stahlblech mit Durchbrüchen im Profilboden mit glasfaserverstärktem Polyamid 6 (PA6-GF30), glasfaserverstärktem Polybutylenterephthalat (PBT-GF30) und langglasfaserverstärktem Polypropylen (PP-LGF40) angespritzt, **Bild 11**. Sowohl bei der Diagonal- als auch der Längs/Quer-Verrippung wurden über kleine Bohrungen im Profilboden Nietköpfe aus Kunststoff ausgebildet, die eine formschlüssige Verbindung gewährleisten. Zusätzlich sind in einem Teil der U-Träger im Bereich des Kragens Sicken als Formschluss eingebracht. Die Wanddicke der Rippe beträgt 1,5 mm, die Entformungsschräge 0,5 ° auf jeder Seite. Der Winkel zwischen den Rippen liegt bei 100°.

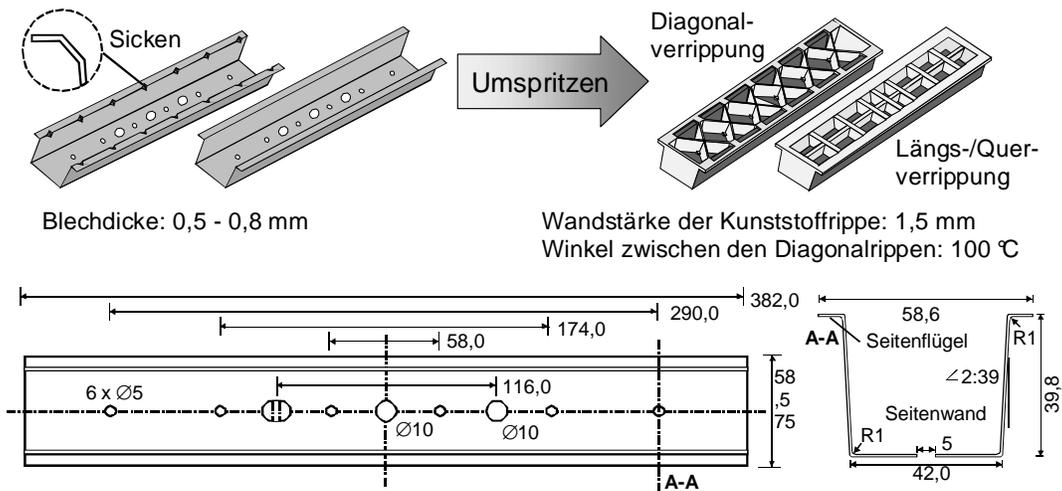


Bild 11: Geometrie des Einlegeteils und des untersuchten Hybrides „Erlanger Träger“

Die Prüfung im 3-Punkt-Biegeversuche wurde mit einer Einspannlänge von 340 mm durchgeführt, **Bild 12**. Der Prüfstempel trifft auf die offene Seite des U-Profils. Der Stempeldurchmesser betrug 35 mm und die Prüfgeschwindigkeit 10 mm/min.

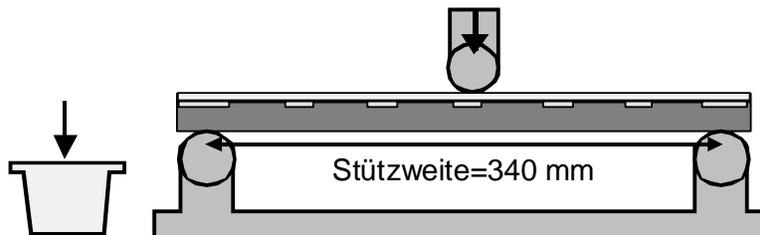


Bild 12: Versuchsaufbau bei 3-Punkt-Biegung

Die Torsionsversuche wurden mit einer eigengefertigten Spann-/Stützvorrichtung durchgeführt, **Bild 13**. Die Einspannlänge betrug hier 350 mm. Die Drehgeschwindigkeit betrug 1,5%/s.

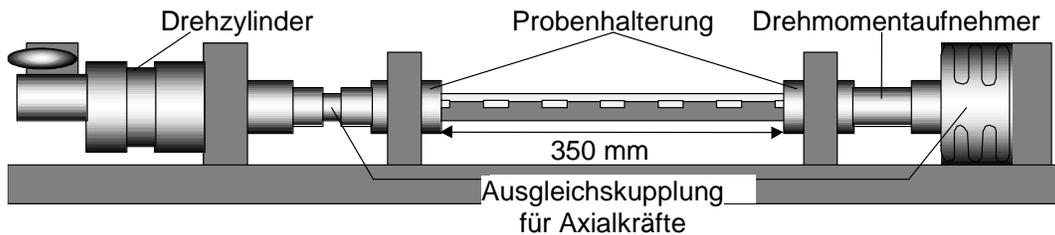


Bild 13: Versuchsaufbau bei Torsion

Bei der 3-Punkt-Biegung tritt in den meisten Fällen als erstes Versagensbild das Ausbeulen der Blechwände gegenüber dem Prüfstempel auf, **Bild 14**. Bei dünneren Blechen oder druckweichen Werkstoffen treten unmittelbar danach noch das Stauchen und das Knicken auf.

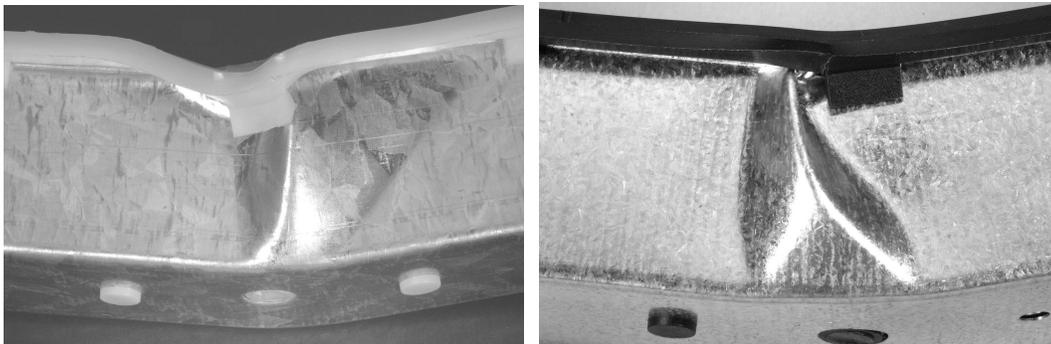


Bild 14: Beulverhalten als das erste Versagen bei 3-Punkt-Biegung
links: Stahlblech 0,75mm / PA6-GF30
rechts: Stahlblech 0,5mm / PP-LGF40

Der Vergleich von Hybridträgern aus Stahlblech und unterschiedlichen Rippenwerkstoffen zeigt, dass ein erstes Versagen durch den Rippenwerkstoff und die Verrippungsart unwesentlich verändert wird, **Bild 15****Bild 1**. Bei der biegesteifen längs/quer-Rippenstruktur beeinflusst der Rippenwerkstoff jedoch die gemessene Biegekraft zum Zeitpunkt des Ausbeulens. Das duktilere PA6-GF30 gegenüber dem PBT-GF30 begünstigt bei der Diagonalverrippung die höheren Biegekräfte nach dem ersten Ausbeulen.

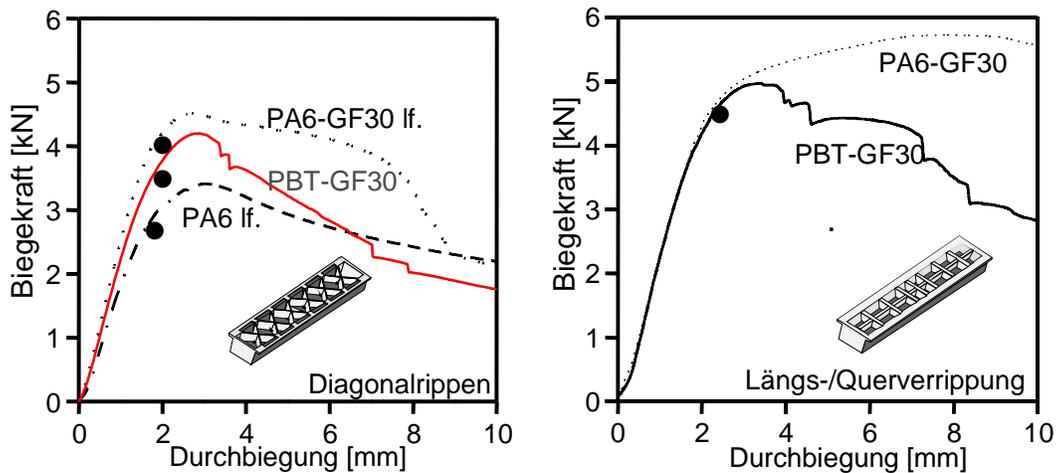


Bild 15: Einfluss des Kunststoffs und der Verrippung auf die Biegebelastbarkeit der Hybridträger aus Stahlblech 0,75 mm mit Sicken an den Blechkanten
 •: Beginn des Beulens der Blechwände; lf.: luftfeucht
 links: Diagonalrippen
 rechts: Längs-/Querrippung

Durch die Sicken an den Blechkanten wird das Beulen erwartungsgemäß erleichtert und es tritt bereits bei einer geringeren Durchbiegung bzw. einer wesentlich kleineren Biegekraft ein Ausbeulen auf.

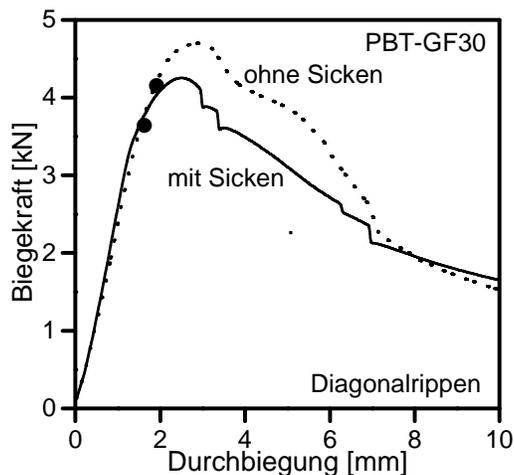


Bild 16: Einfluss von Sicken auf die Biegebelastbarkeit der Hybridträger aus Stahlblech 0,75 mm und PBT-GF30
 •: Beginn des Beulens der Blechwände

Um das Beulen zu verhindern bzw. Richtung einer größeren Durchbiegung zu verschieben sind grundsätzlich zwei Arten von Maßnahmen möglich:

- Stabilisieren der Blechwände durch
 - Erhöhung der Blechdicke und
 - Optimierung der Gestaltung des Blechprofils
- Verbesserung der Kraftverteilung durch
 - Optimierung der Rippenstruktur (Längsrippen bevorzugt) und
 - Verbesserung der Anbindung zwischen den Rippen- und Blechstruktur z.B. durch Haftung

Entscheidend für die Torsionsbelastbarkeit sind vor allem die Rippenstruktur, die Kunststoffeigenschaften, die Torsionssteifigkeit des Einlegeteils und die Anbindung zwischen Rippen- und Blechstrukturen.

Bei Torsion wird ein Teil der Kunststoffrippen zugbeansprucht, während die anderen einer Druckspannung unterliegen. Diese Druckspannungen führen zum Ausknicken der Rippen. So nimmt die Steifigkeit der Hybridstruktur mit steigender Steifigkeit des Kunststoffs zu.

Das erste Versagen ist je nach Werkstoffkombination sehr unterschiedlich. **Bild 17** zeigt eine eindeutige Abhängigkeit der Torsionsbelastbarkeit der Hybridstrukturen vom Kunststoff.

Ohne Haftung oder ausreichenden Formschluss ist eine relative Bewegung zwischen Rippen- und Blechstruktur bei Torsion möglich. Bei duktilen Kunststoffen ist das Ausbeulen der Kunststoffrippen für das Verformungsverhalten entscheidend. Durch das Ausknicken der Rippen verlässt die Drehmoment-Drehwinkel-Kurve den anfänglichen linearen Anstieg.

Die Hybridstrukturen aus den festeren Werkstoffen PBT-GF30 und PP-LGF40 wiesen eine niedrigere Torsionsfestigkeit und eine geringere Energieaufnahme auf, als die aus den weniger festen Werkstoffen PA6-GF30, da das PA6-GF30 lokalen Deformationen besser folgen kann. Infolge der kleinen Bruchdehnung und höheren Kerbempfindlichkeit brechen beim PBT-GF30 die Verbindungsstellen der Kunststoffrippen mit dem U-Profil schlagartig, bevor die Rippen mit dem Ausbeulen anfangen können. Bei PP-LGF40 findet der Bruch der Rippenknoten aber vor dem Ausbeulen statt. Die Ursache scheint eine unzureichende Bindenahtfestigkeit an Rippenknoten bei PP-LGF40, da eine hohe Schubbelastung bei dem Träger genau in der Ebene der Bindenähte der Knoten während der Torsion auftritt.

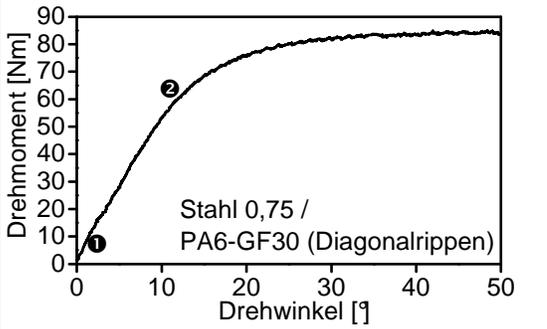
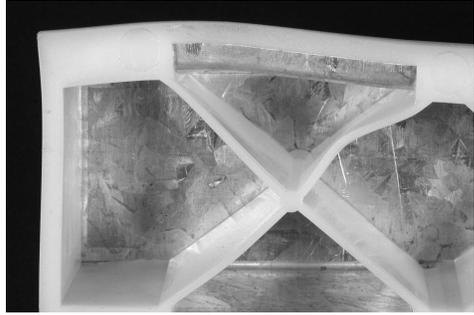
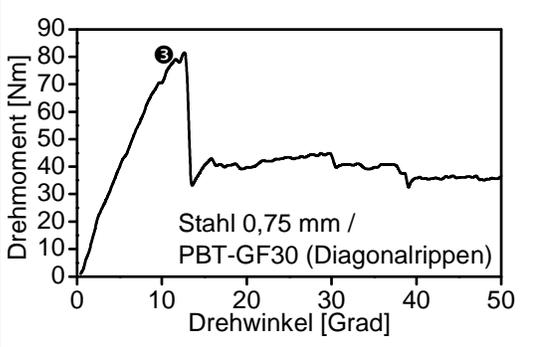
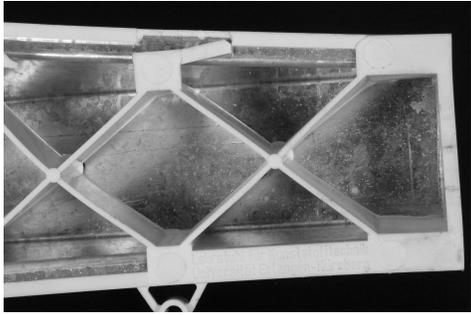
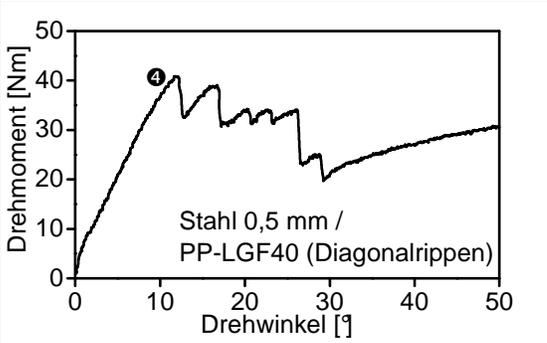
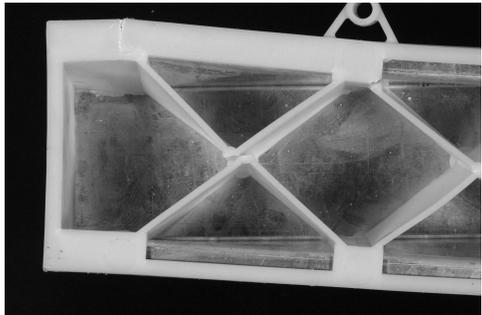
| Drehwinkel-Drehmoment-Diagramm | Versagensart |
|---|--|
| <p>❶ Beginn einer relativen Bewegung zwischen Rippen- und Blechstrukturen, falls ohne Haftung oder ausreichenden Formschluss</p> <p>❷ Beulen der Rippen bei relativ duktilerem Kunststoff</p> | |
|  <p>Drehmoment [Nm]</p> <p>Stahl 0,75 / PA6-GF30 (Diagonalrippen)</p> <p>Drehwinkel [°]</p> |  |
| <p>❸ Bruch der Anbindung zur Seitenwände bei sprödem, kerbeempfindlichem Kunststoff</p> | |
|  <p>Drehmoment [Nm]</p> <p>Stahl 0,75 mm / PBT-GF30 (Diagonalrippen)</p> <p>Drehwinkel [Grad]</p> |  |
| <p>❹ Bruch in der Kunststoffrippenverknüpfung bei einer niedrigen Bindnahtfestigkeit</p> | |
|  <p>Drehmoment [Nm]</p> <p>Stahl 0,5 mm / PP-LGF40 (Diagonalrippen)</p> <p>Drehwinkel [°]</p> |  |

Bild 17: Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf unterschiedlicher Stahl-Kunststoff-Verbunde und Angabe des Versagensverhaltens

Zur Verbesserung der Torsionsbelastbarkeit sind daher vor allem folgende Maßnahmen bevorzugt:

- Erhöhung der Rippendicke (Diagonalrippen bevorzugt)
- Verbesserung der Anbindung zwischen Rippen- und Blechstrukturen
- Vermeidung scharfer geometrischer Übersprünge
- Verbesserung der Bindahtfestigkeit oder Verlagerung der Bindahtposition

3.4 Eigenschaften von Hybridstrukturen aus optimierter Fertigung und mit neuen Werkstoff-Kombinationen

Einige Ansätze zur Verbesserung der Bauteileigenschaften von Hybridstrukturen sollen in diesem Kapitel exemplarisch dargestellt werden.

Wie die Videoanalyse des Versagensverhaltens von Stahl-Kunststoffhybriden zeigt, tritt das Versagen bedingt durch ein Reißen oder Abknicken der Kunststoffverrippung, ein Beulen des Einlegeteils oder durch eine Relativbewegung (Verschiebung) zwischen den Trägern und den Kunststoffrippen ein. Letzteres lässt sich durch eine Optimierung der Anbindung zwischen Träger und Rippen verbessern. Diese Optimierung kann durch verschiedene Vorbehandlungsmethoden erreicht werden. Bei Stahl-Kunststoff-Hybriden aus einem Blech der Dicke 0,75 mm und Rippen aus PA6-GF30 wird so eine Verbesserung der Gesamtsteifigkeit und des max. Drehmomentes (Torsionsversuch) bzw. der maximalen Biegekraft (Biegeversuch) erzielt, **Bild 18**.

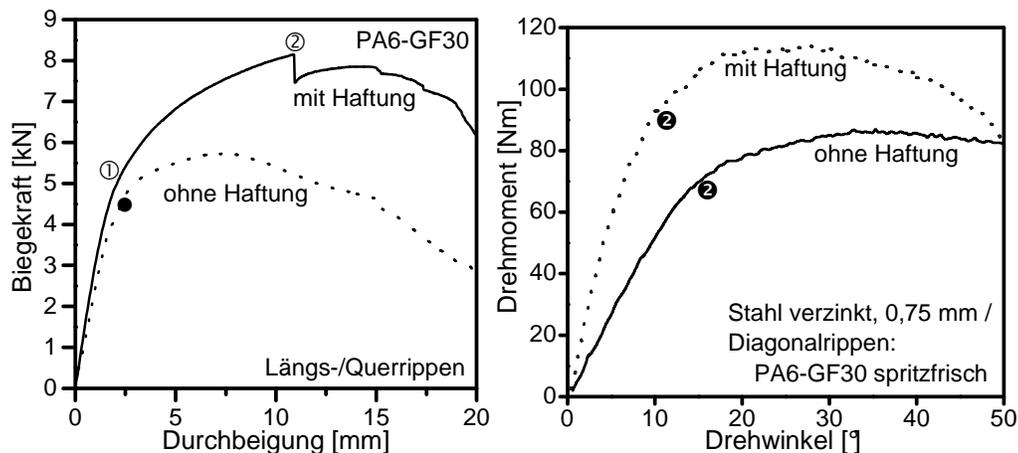


Bild 18: Einfluss der Haftung auf die Biegebelastbarkeit der Hybridträger aus Stahlblech 0,75 mm
 links: Biegeversuch
 rechts: Torsionsbelastung
 •: Beginn des Beulens der Blechwände; lf.: luftfeucht
 ①: Beginn der plastischen Verformung des Bleches
 ②: Bruch des Profilbodens
 ●: Beulen der Rippen

Die Blechwände verformen sich bei der Biegebelastung plastisch und ein Versagen tritt im Profilboden gegenüber dem Prüfstempel in Form einer Rissbildung auf, **Bild 19**.

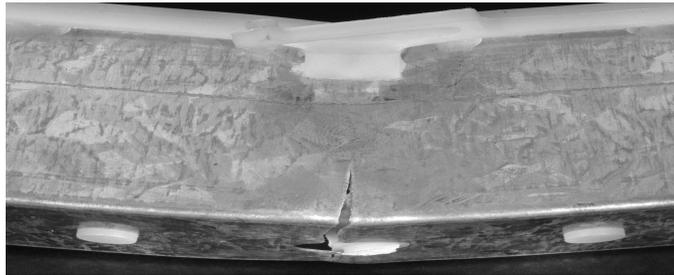


Bild 19: *Bruch des Profilbodens durch plastische Verformung durch Zugspannung bei PA6-GF30 / Stahl verzinkt, 0,75 mm, gute Haftung*

Die Eigenschaften von Hybridbauteilen mit Einlegeteilen aus Faserverbundkunststoffen soll hier exemplarisch mit Untersuchungen an gewebeverstärkten Thermoplasten auf PA6-Basis mit Diagonalverrippung aus PA6-GF30 vorgestellt werden. Im Hinblick auf eine beanspruchungsgerechte Auslegung wurden die längs/quer-orientierten Gewebe gemäß **Bild 20** einerseits parallel und andererseits diagonal ausgerichtet in die Hybridstruktur integriert und deren Potential bei Biegung und Torsion geprüft. Der Vergleich mit Eigenschaften der Kunststoff-Metall-Hybride wurde mit der Version längs/quer durchgeführt.

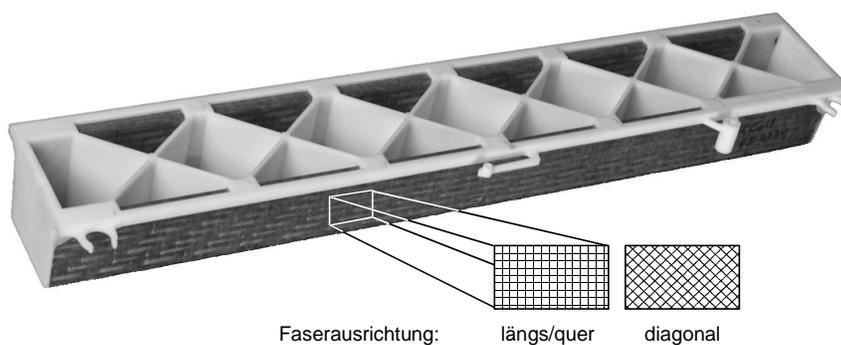


Bild 20: *Hybridträger mit gewebeverstärktem Einlegeteil
Orientierung des Glasfasergewebes längs/quer bzw. diagonal;
Polyamidmatrix mit 70 Gew.-% Glasfasergewebe (Fa. ACS)*

Der Vergleich zwischen den Hybriden mit unterschiedlich ausgerichteter Orientierung des Glasfasergewebes ist in **Bild 21** dargestellt und zeigt für die Biegebelastung eine höhere Steifigkeit für die längs-quer zur Belastungsrichtung ausgerichteten Fasern. Unabhängig von der Ausrichtung der Fasern ist dagegen die gemessene maximale Biegekraft. Im Gegensatz dazu besitzt die diagonale Ausrichtung bei der Torsionsbelastung Vorteile sowohl in der Steifigkeit und dem maximalen Drehmoment als auch der Energieaufnahme (Fläche unter der Kurve) bis hin zu hohen Verformungsgraden.

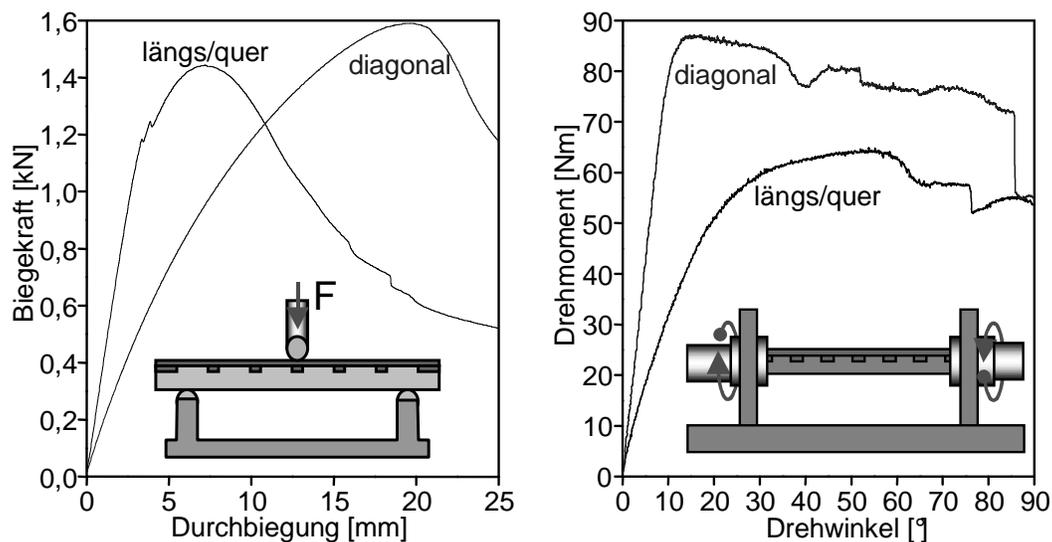


Bild 21: *Mechanisches Verhalten von Hybridstrukturen aus Faserverbund kunststoffen mit unterschiedlicher Orientierung des Gewebes Polyamidmatrix mit 70 Gew.-% Glasfasergewebe (Fa. ACS) und angespritzten Rippen aus PA6-GF30 (luftfeucht)*
links: Biegeprüfung
rechts: Torsionsprüfung

Hybride mit einem Einlegeteil aus Aluminium zeigen v. a. bei geringen Torsionsbelastungen noch nicht die gewünschten Gewichtsvorteile. Erst bei hohen Torsionsbelastungen ergeben sich geringe Vorteile. Einlegeteil aus Faserverbundwerkstoff zeigen dagegen bei geringen Torsionsbelastungen eine dem Stahl vergleichbare gewichtsbezogene Steifigkeit. Bei höheren Torsionsbelastungen haben sie auch gegenüber Stahl deutliche Vorteile im Bezug auf die gewichtsbezogene Festigkeit.

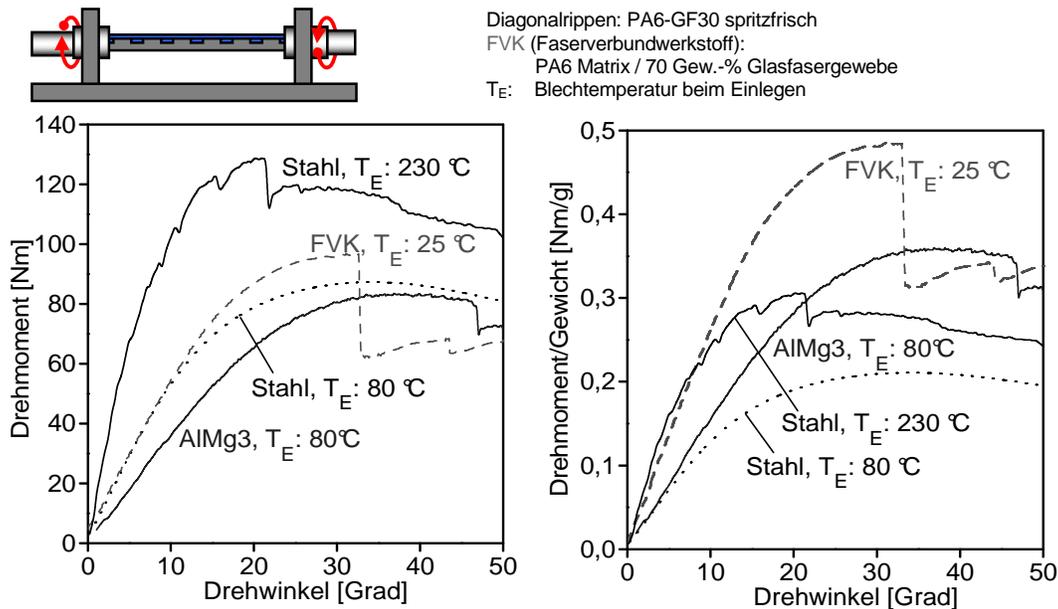


Bild 22: Vergleich der Torsionsbelastbarkeit von Hybridträgern mit Einlegeteilen aus Stahl, Aluminium und gewebeverstärktem Polyamid
 Diagonale Verstärkungsrippen aus PA6-GF30 (spritzfrisch)
 links: Verlauf Drehmoment-Drehwinkel absolut
 rechts: gewichtsbezogener Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf

Grundsätzlich kann das Verbesserungspotential von Hybridträgern mit angepassten Werkstoffen für die U-Profile sowie mit verbesserter Anbindung der Einlegeile zu den angespritzten Rippen aufgezeigt und Vorteile hinsichtlich des Leichtbaupotentials der mit Faserverbundkunststoffen hergestellten Träger dargestellt werden.

3.5 Ansätze zur Prozessregelung mittels Bayes-Netzen

Die Untersuchungen bezüglich der Modellierung des Spritzgießprozesses von Hybridstrukturen beschränken sich momentan auf „statische“ Bayesnetze. Insbesondere wurde hierbei die Verwendung von hybriden Bayesnetzen untersucht. Die Zielsetzung dieser Untersuchung war die Steigerung der Modellierungsgenauigkeit durch den gleichzeitigen Einsatz von diskreten und kontinuierlichen Knoten. Die kontinuierlichen Knoten erlauben es, nicht nur die diskreten Eingabewerte für die Vorhersage zu verwenden, sondern auch noch gemessene Istwerte.

Zusätzlich zu den frei einstellbaren Parametern Vorwärmtemperatur T_v , Masse-temperatur T_m , Werkzeugtemperatur T_w und Nachdruck P_n wurden noch weitere Istwerte gemessen. Aufgrund der großen Anzahl der zusätzlich erhobenen Istwerte stellt sich als erstes die Frage nach einer geeigneten Merkmalsauswahl, da mit jedem zusätzlichen Parameter natürlich auch der Aufwand für die Auswertung des Bayesnetzes steigt. Daher wurden in einer Vorauswahl nur das Polster C , der Plastifizierweg s , die maximale Werkzeugtemperatur T_{\max} , die Einspritzarbeit W_e und der Nachdruck P_n berücksichtigt, die die stärkste Korrelation zu der Abzugskraft F aufweisen.

Alle diese Variablen wurden einzeln zu einem rein diskreten Modell hinzugefügt, **Bild 23**, um festzustellen, in wieweit die Genauigkeit durch die Hinzunahme weiterer Variabler ansteigt.

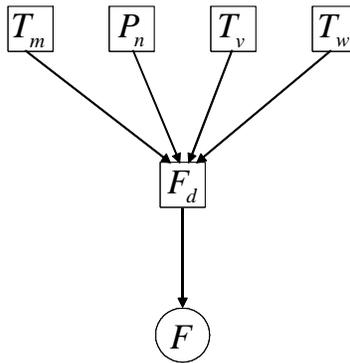


Bild 23: Basismodell für die Anwendung Spritzguß

Ein Vergleich aller Modelle, die hier aus Platzgründen nicht alle aufgeführt sind, zeigt, dass eine Hinzunahme der maximalen Werkzeugtemperatur T_{\max} eine Verbesserung der Genauigkeit mit sich bringt. Bei dem rein diskreten Modell kann die Abzugskraft mit einem relativen Fehler von 4,2% vorhergesagt werden. Wird die maximale Werkzeugtemperatur hinzugenommen, so sinkt der relative Fehler auf 4,0 %.

Die Vorhersagegenauigkeit für die anderen Variablen können **Tabelle 4** entnommen werden und sind als relativer Fehler dargestellt. Für die Ausgangsvariable wurden die jeweils anderen als Eingabevariablen definiert.

In dem Modell in **Bild 24** ist zu erkennen, dass die maximale Werkzeugtemperatur durch zwei Zufallsvariable repräsentiert wird. Diese Art der Modellierung erlaubt es den Einfluß der Einzugstemperatur durch mehrere Taylorreihen zu approximieren. Die diskrete Variable T_{\max}^d wählt dabei die geeignete Stützstelle aus. Eine genauere Beschreibung dieser Technik findet sich in [20].

| Masse-temperatur T_m | Nachdruck P_n | Vorwärm-temperatur T_v | max. Werk-zeugtemperatur T_{\max} | Abzugskraft F |
|---------------------------|--------------------|-----------------------------|--|--------------------|
| 0,87 % | 12,9 % | 17,1 % | 9,37 % | 4,0 % |

Tabelle 4: Relativer Fehler für ein Bayesnetz der Spritzgußmodellierung

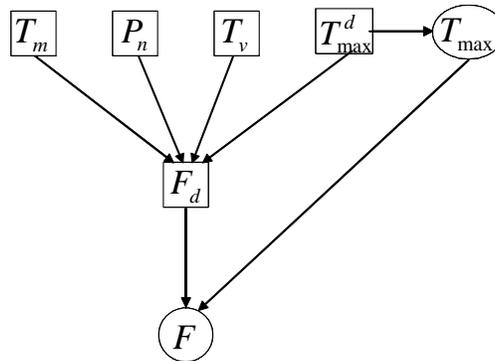


Bild 24: Maximale Werkzeugtemperatur berücksichtigt

Die erzielten Ergebnisse beziehen sich bisher nur auf die Trainingsmenge. Das erstellte Modell ist nicht in der Lage, zutreffende Vorhersagen für nicht beobachtete Eingabekombinationen zu machen. Der Grund liegt am Testplan, der für die Datenerfassung verwendet wurde. Dieser führt dazu, dass nur ca. 5% der möglichen Eingabekombinationen als Daten zur Verfügung standen. Betrachtet man das Modell in **Bild 24** genauer, so erkennt man, dass am Knoten F verschiedene Parameter $P(F | T_m, P_n, T_v, T_{\max}^d)$ an die Beobachtungen angepasst werden müssen. Für viele dieser Parameter liegen aufgrund des Testplans keine entsprechenden Beobachtungen vor. Dadurch ist eine Generalisierungsfähigkeit nicht zu erwarten. Ein genauere Diskussion des Zusammenhangs zwischen Testplänen und dem Erstellen von Bayesnetzen am Beispiel von Laserstrahlschweißen ist in [21] gegeben.

Zur Verbesserung der Aussage- und Vorhersagbarkeit und einer direkten Prozessoptimierung wird ein hybrides Bayesnetz in der aktuellen Phase für die Modellierung entwickelt, dessen Regelfunktion u.a. an der Prozesskette „Herstellung von flächigen Metall-Kunststoff-Hybridstrukturen“ untersucht werden soll.

Speziell auf die Bedürfnisse der Spritzgussmodellierung bzw. dem Training von Bayesnetzen wurde ein angepasster Versuchsplan entwickelt. Dieser Versuchsplan weist als Besonderheit die Tatsache auf, dass für jede 2-er Kombination, z.B. P_n, T_v ein vollfaktorieller Versuchsplan durchgeführt wird. Um die Kosten der Versuchsdurchführung zu senken, werden pro Eingabeparameter nur drei

Einstellmöglichkeiten ausgetestet. Eine Bewertung der Bauteileigenschaften anhand der Verzugs- und Maßhaltigkeit sowie der Verbundeigenschaften eines einfachen Probekörpers „T-Verbund“ kann allerdings erst offline erfolgen.

Basierend auf diesen Daten wird nun eine Regelung aufgebaut werden, die zeitnah in den Prozess eingreift. Ein erstes Bayesnetz dient dazu den Zusammenhang zwischen den Eingabegrößen und Istwerten zu modellieren. Hier kann eventuell auch der Einsatz eines dynamischen Bayesnetzes sinnvoll sein, da einige der erfassten Größen zeitabhängig sind. Als Alternative hierzu kann der Kurvenverlauf auch durch neu berechnete Parameter beschrieben werden, die z. B. die Steigung der Kurve repräsentieren.

Ein zweites Bayesnetz setzt die dynamischen Größen mit den gewünschten Sollwerten, wie z.B. eine möglichst große Zugkraft oder minimaler Verzug in Relation. Das zweistufige Verfahren ist notwendig, da die Sollwerte teilweise erst nach Ablauf von zwei Wochen gemessen werden. Sie kommen daher als Regelgrößen nicht in Betracht.

Zur Erfassung relevanter Prozessdaten wurde ein Datenerfassungssystem an der Spritzgießmaschine installiert, das es ermöglicht unmittelbar im Prozess die Daten auszulesen und zu verarbeiten. Bisher wurden Messdaten der umfangreichen statistischen Versuchspläne als Trainingsdaten für das hybride Bayesnetz aufgenommen und die Bauteileigenschaften quantifiziert. Auf dieser Basis werden das Training der Bayesnetze und die Qualifizierung hinsichtlich des Regelverhaltens möglich.

4 Literatur

- [1] Potente, H., Heim, H.-P., Ridder, H., Kaiser, E. Es kommt auf das Teil an – Sonderverfahren der Spritzgießtechnik im Automobilbau Kunststoffe 92 (1992) 3, S. 26 - 35
- [2] Janda, R. Kunststoffverbundsysteme VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- [3] Michaeli, W., Brock, C., Pohl, C. Endlosverstärkte Teile durch Umspritzen Plastverarbeiter 49 (1998) 1, S. 37-39
- [4] Koch, B., Knözinger, G., Pleschke, T., Wolf, H.-J. Hybrid-Frontend als Strukturbauteil Kunststoffe 89 (1999) 3, S. 82-85

- [5] Ehrenstein, G.W., Drummer, D., Jenninger, W., Zhao, G. Mehrkomponentenspritzgießen flächiger Kunststoffverbunde
Berichtskolloquium des SFB 396
„Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“, 2000
- [6] Haldenwanger, G., et. al. Leichtbau mit alternativen Werkstoffen und Verfahren
Teil 3: Systemgerechte Verbindungstechnik
Ingenieur-Werkstoffe 8 (1999) 2, S. 24-27
- [7] Ehrenstein, G.W. Konstruieren mit Kunststoffen - Eine Einführung
Carl Hanser Verlag, 1995
- [8] Zhao, G. Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen
Dissertation, LKT, Universität Erlangen-Nürnberg, 2002
- [9] N.N. Frontendfertigung in Hybridtechnologie
Plastverarbeiter 51 (2000) 12, S. 46
- [10] Zhao, G., Ehrenstein, G.W. Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Hybride im Vergleich
In: Workshop „Flächige Leichtbauteile aus Kunststoff“ Neue Materialien Fürth, 30.10.2002
- [11] Lutter, F., Münker, M., Wanders, M. Rechnen bis zum Versagen
Kunststoffe 92 (2003) 1, S. 62-65
- [12] Lerner, U., Segal, E., Koller, D. Exact Inference in Networks with Discrete Children of Continuous Parents.
In: Proceedings of the Seventeenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence 2001.
319 – 328
- [13] Murphy, K. P. A Variational Approximation for Bayesian Networks with Discrete and Continuous Latent Variables.
In: Laskey, K. B.; Prade, H. (Hrsg.): Proceedings of the Fifteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence 1999
- [14] Lauritzen, S. L. Propagation of Probabilities, Means, and Variances in Mixed Graphical Association Models.
In: Journal of the American Statistical Association (1992) Vol. 87, Number 420, 1098 – 1108

- [15] Lauritzen, S. L., Jensen, F.: Stable Local Computation with Conditional Gaussian Distributions. Technical report R-99-2014 Aalborg University, Department of Mathematical Sciences (1999)
- [16] Kjærulff, U. Aspects of Efficiency Improvement in Bayesian Networks. PhD-Thesis Aalborg University, Institute of Electronic Systems (1993)
- [17] Murphy, K. P. Dynamic Bayesian networks: Representation and Learning PhD-Thesis University of California, Berkeley (2002)
- [18] Deventer, R., Denzler, J., Niemann, H. Using Non-Markov models for the control of dynamic systems. In: Proceedings of Engineering of intelligent systems (2002).
- [19] Deventer, R., Denzler, J., Niemann, H. Bayesian controller versus traditional controller. In: M. Mohammadian (Hrsg.) 2003 International Conference on Computational Intelligence For Modelling, Control & Automation – CIMCA 2003. 866 – 877
- [20] Deventer, R., Denzler, J., Niemann, H.: Non-linear modeling of a production process by hybrid Bayesian networks. In: Horn, W.(Hrsg.), ECAI 2000, 14th European Conference on Artificial Intelligence 576 - 580
- [21] Deventer, R., Denzler, J., Niemann, H., Kreis, O.: Using Test Plans for Bayesian Modeling. In: Perner, P.; Azriel, R. (Hrsg.): Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition (2003) 307 - 316