

# Methodik zur Auswahl von Füge- technologien in Multimaterialsystemen

Hauke Prüß, Carsten Stechert, Thomas Vietor  
*Institut für Konstruktionstechnik;*  
*Technische Universität Braunschweig*

## 1 Einleitung

Im Zuge der Diskussion um den Klimawandel sind alle Industriezweige angehalten, die CO<sub>2</sub>-Bilanz ihrer Produkte zu optimieren. Insbesondere die Automobilbranche, als Anbieter allgegenwärtiger klimabelastender Produkte, steht häufig im Fokus dieser Diskussion. Zur Reduktion schädlicher Emissionen von Fahrzeugen bieten sich mehrere Herangehensweisen an. Zum Einen kann die Effizienz der Antriebssysteme gesteigert werden, indem konventionelle Antriebe weiter optimiert werden. Zum Anderen wird eine Reduktion der Fahrwiderstände angestrebt. Das Fahrzeuggewicht stellt hier einen sehr wichtigen Faktor dar, da er drei der vier Hauptfahrwiderstände beeinflusst: Beschleunigungswiderstand, Steigungswiderstand und Rollwiderstand. Deshalb kann der konstruktive Leichtbau einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung von Fahrzeugen leisten und somit zur Reduktion der Emissionen beitragen.

Konventionelle Leichtbaustrategien wie Geometrieoptimierung und Materialsubstitution werden beim heutigen Stand der Technik bereits in einem hohen Maße ausgereizt, sodass großer Bedarf an neuen Methoden zur Gewichtseinsparung besteht. Eine mögliche Strategie, dessen Potential noch nicht ausgereizt wird, sind Multimaterialsysteme. Diese zeichnen sich durch belastungs- und funktionsgerechtes Zusammenwirken verschiedener Materialien innerhalb eines Bauteils aus.

---

Eine besondere Herausforderung bei Multimaterialsystemen stellt die Füge­technologie zwischen den unterschiedlichen Materialien dar. Die Auswahl eines geeigneten Fügeverfahrens basiert bisher im Wesentlichen auf den Kenntnissen und Erfahrungen des Konstrukteurs. Es fehlt ein methodisches Vorgehen, um den Konstrukteur bei der systematischen Auswahl von für eine konkrete Anwendung sinnvollen Füge­technologie und der damit verbundenen Gestaltung der Füge­stelle zu unterstützen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Katalogsysteme

Ein etabliertes Mittel zur Übersicht und Bewertung konstruktiver Lösungen stellen Konstruktionskataloge dar. Dabei werden die einzelnen Lösungen in tabellarischer Form strukturiert aufgelistet. Die ersten Spalten dienen der Gliederung. Durch die Wahl geeigneter Gliederungsmerkmale kann das Lösungsfeld nahezu vollständig berücksichtigt werden. Der sogenannte Hauptteil enthält Beschreibungen sowie gegebenenfalls Abbildungen der einzelnen Lösungen. Im Zugriffsteil schließlich werden, ebenfalls gegliedert, Merkmale der Lösungen gesammelt, um diese bewerten und vergleichen zu können.

Wesentliche Arbeiten zu Konstruktionskatalogen entstanden bereits in den 1970er Jahren in Braunschweig [1]. Seitdem wird diese Methode dort gelehrt und kontinuierlich weiterentwickelt. Im Zuge des zunehmenden Rechneinsatzes im Konstruktionsprozess wurde die Grundidee der Konstruktionskataloge für den Aufbau dynamischer (Wissens-)Datenbanken umgesetzt [2]. Heutige rechnergestützte Katalogsysteme ermöglichen durch Anwendung neuer Internettechnologien [3] den gemeinsamen, verteilten [4] und anwenderspezifischen [5] Zugriff.

### 2.2 Füge­technologie

Als Untergruppe der Fertigungsverfahren dienen Füge­technologien dem Herstellen eines festen Zusammenhalts mehrerer Bauteile. Insbesondere Multimaterialsysteme stellen durch ihr Zusammenwirken verschiedenster Materialien hohe Anforderungen an die Füge­technologie. Viele Materialkombinationen schließen bestimmte Fügeverfahren aus. Desweiteren müssen durch die Materialkombination zusätzlich hervorgerufene Problemstellungen, wie unterschiedliche Wärmedehnung, Kontakt- und Spaltkorrosion beherrscht werden.

Während des Forschungsprojekts "Mischbauweise" an der Universität Paderborn wurden diese Problemstellungen näher untersucht [6]. Dabei wurden mechanische Fügeverfahren, Klebetechniken sowie Hybridverfahren, als deren Kombination, auf Werkstoffkombinationen aus Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff angewandt. Die so erzeugten Muster wurden Belastungs- und Korrosionstests unterzogen. Im Folgeprojekt "FügeKunSt" [7] wurde speziell auf die Materialpaarung Metall - CFK eingegangen. Die Ergebnisse beider Projekte stellen wertvolle Vorarbeiten für diesen Beitrag dar.

### 3 Methodik zur Auswahl von Füge Technologien

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik ist ein erster Ansatz zur Systematisierung des Auswahlprozesses für Füge Technologien in Multi-materialsystemen. Grundvoraussetzung hierfür ist die Kenntnis möglichst vieler derselben. Deshalb wird in einem ersten Schritt ein allgemeiner Katalog aller bekannten Fügeverfahren herangezogen, der dem Konstrukteur zunächst einen Überblick erlaubt. Im nächsten Schritt findet eine Eingrenzung der Fügeverfahren statt, indem prinzipbedingt ungeeignete Fügeverfahren ausgeschlossen werden, um den späteren Bewertungsprozess zu vereinfachen. Im dritten Schritt werden die konkreten Anforderungen der zu gestaltenden Fügestelle ermittelt. Diese werden vorrangig durch die verwendeten Materialien bestimmt. Darüber hinaus wirken sich geometrische Randbedingungen auf die Anforderungen aus. Anschließend werden funktionale und geometrische Anforderungen der Fügestelle durch logische und quantitative Beziehungen mit den bereits bewerteten Eigenschaften der Fügeverfahren verknüpft. So kann mit Hilfe eines Punktesystems eine automatisierte Bewertung der Eignung verschiedener Fügeverfahren für einen konkreten Anwendungsfall durchgeführt werden. Der beschriebene Ablauf wird in Bild 1 zusammenfassend veranschaulicht.

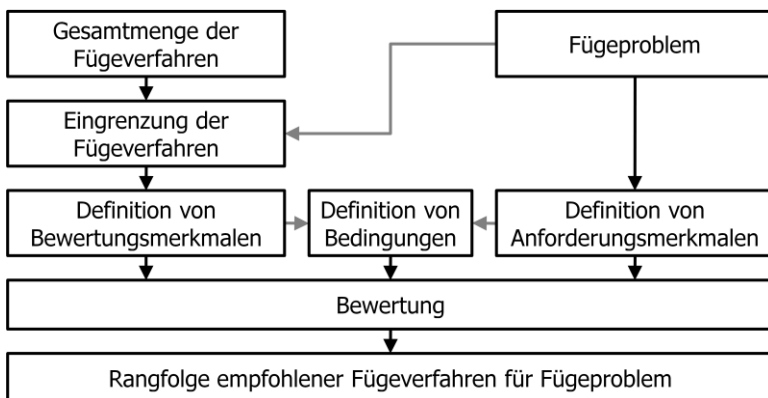


Bild 1: Ablaufplan der Methodik

### 3.1 Aufbau eines Konstruktionskataloges der Fügeverfahren

Ein Katalog zur Übersicht der Fügeverfahren wurde nach entsprechender Recherche im Rahmen eines Industrieprojektes erstellt. Dieser genügt dem Anspruch auch über das Projekt hinaus universell zur Auswahl von Füge-techniken verwendet werden zu können.

Um die Gesamtheit aller Fügeverfahren zu erfassen, wurde als Ausgangspunkt die Gliederung der Norm DIN 8593 „Fertigungsverfahren Fügen“ [8] aufgegriffen. Diese gliedert die Fügeverfahren in acht Gruppen, denen weitere Untergruppen zugeordnet werden, siehe Bild 2. Für die neunte Gruppe "Textiles Fügen" existiert derzeit keine Norm. Auf Grund der Relevanz für Faserverbundwerkstoffe in Multimaterialsystemen wurde diese Gruppe dennoch in den Katalog aufgenommen.

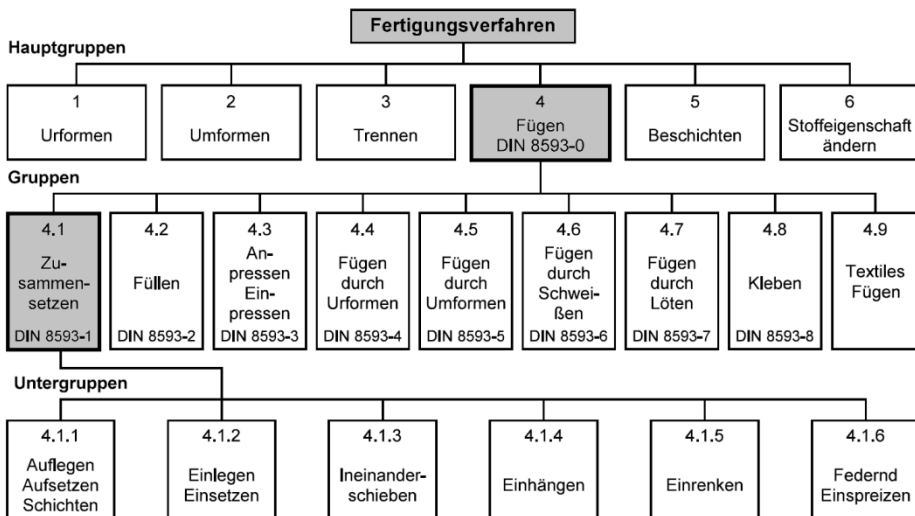


Bild 2: Gliederung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580, 8593-0, 8593-1

Bei der Suche nach konstruktionsrelevanten Merkmalen der Fügeverfahren im Zugriffsteil des Kataloges wurde eine Hauptmerkmalliste [9] zu Hilfe genommen. Zunächst werden geometrische Eigenschaften der Fügeverfahren, wie Schluss- und Verbindungsart in den Zugriffsteil aufgenommen. Hinzu kommen Kraftgrößen, die das Kraftübertragungsvermögen in verschiedenen Raumrichtungen sowie das Zusatzgewicht der Füge-technik an-

geben. Zur Beurteilung wurden die Fachliteratur, Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten [6], [7] und Diskussionen in Expertenworkshops mit Industriepartnern herangezogen. Da das Kraftübertragungsvermögen stark von der jeweiligen Dimensionierung des Fügeverfahrens abhängt, wurde diese Beurteilung in nur drei Stufen vorgenommen, um lediglich Größenordnungen aufzuzeigen, die einen Vergleich der Fügeverfahren zulassen. Weitere Merkmale im Zugriffsteil betreffen die Fertigung sowie den Gebrauch. Zu den Fertigungsmerkmalen zählt zum Beispiel die Möglichkeit des einseitigen Fügens. Dieses Merkmal hat sich im weiteren Verlauf der Auswahlmethodik als wichtiges Bewertungskriterium herausgestellt. Tabelle 1 zeigt einen Überblick aller in den Zugriffsteil aufgenommenen Merkmale sowie deren Dimension.

Tabelle 1: Zugriffsteil des Konstruktionskataloges Fügeverfahren

Gliederung		Merkmal	Dimension
Geometrie	Schlussart	Formschluss	Ja / Nein
		Kraftschluss	Ja / Nein
		Stoffschluss	Ja / Nein
	Verbindungsa rt	Punkt	Ja / Nein
		Linie	Ja / Nein
		Fläche	Ja / Nein
		Raumbedarf	3 Bewertungsstufen
Kräfte	Kraft- größen	Zugkraft	3 Bewertungsstufen
		Druckkraft	3 Bewertungsstufen
		Scherkraft	3 Bewertungsstufen
		Steifigkeit	3 Bewertungsstufen
		Gewicht	3 Bewertungsstufen
Stoff		Hilfsstoff erforderlich	Ja / Nein
		Oberfläche kritisch	Ja / Nein
Fertigung		Prozessaufwand	3 Bewertungsstufen
		Einseitiges Fügen	Ja / Nein
		Temperatureintrag	Ja / Nein
		Toleranzausgleich	3 Bewertungsstufen
Gebrauch		Alterungsbeständigkeit	3 Bewertungsstufen
		Relativbewegung möglich	3 Bewertungsstufen
		Optische Qualität	3 Bewertungsstufen

---

### 3.2 Eingrenzung der Fügeverfahren

Bei der Anwendung der Methodik auf eine konkrete Problemstellung empfiehlt sich vor dem Bewertungsprozess eine Eingrenzung der 51 im Katalog aufgeführten Fügeverfahren auf plausible Lösungen durchzuführen. Dadurch soll der Aufwand bei der Bewertung reduziert und somit der Auswahlprozess beschleunigt werden. Die folgende Liste führt verschiedene Eigenschaften der Fügeverfahren auf, die bei konkreten Anwendungsfällen zum Ausschluss bestimmter Fügeverfahren führen können.

- Aggregatzustand und Form der Füge­teile
- Freiheitsgrade / Lösbarkeit
- Verfahrensbedingte Elastizität
- Umformbarkeit der Füge­teile
- Temperatureintrag durch Fügeprozess
- Prozessaufwand

Dieser Schritt der Methodik wurde im Rahmen des Industrieprojektes manuell durchgeführt und erfordert zumindest grundlegendes Wissen über die jeweiligen Fügeverfahren. Durch ein geeignetes Wissensmanagement ließen sich in Zukunft die oben genannten sowie weitere Eigenschaften als Regeln für den Eingrenzungsprozess festhalten.

### 3.3 Anforderungen der Fügestellen

Nachdem die Eigenschaften der verschiedenen Fügeverfahren im Katalog zur Verfügung stehen und die Menge der Verfahren für den konkreten Anwendungsfall eingegrenzt wurde, können nun die zu fügenden Bauteile, die das Umfeld der Fügestelle bestimmen, näher betrachtet werden. Wie in Kapitel 3.1 wird auch hier zunächst eine Hauptmerkmalliste zur Klärung der Anforderungen zu Hilfe genommen. Für eine Weiterentwicklung der Methodik ist zukünftig eine aufwändigere Anforderungsmodellierung und genaue Erfassung von Beziehungen zwischen Anforderungen und Merkmalen der Fügeverfahren, ähnlich der in [10] vorgestellten methodischen Modellierung, denkbar. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht möglicher konstruktionsrelevanter Merkmale, die hier zur Bewertung und Auswahl von Fügeverfahren herangezogen werden.



Tabelle 2: Merkmale der Fügestelle zur Anforderungsklärung

Hauptmerkmal	Merkmal
Geometrie	Raumangebot; Punkt-, Linien-, Flächenkontakt
Kräfte	Kraftgrößen, -richtung, -häufigkeit; Leichtbauanforderung; Steifigkeit der Füge­teile
Stoff	Oberflächenbeschaffenheit, -beschichtung; Hilfsstoffe; chemische Kompatibilität; Temperaturbeständigkeit
Sicherheit	Überlast-, Crash-Verhalten
Fertigung	Fertigungsmittel; Toleranzausgleich; (einseitige) Zugänglichkeit der Fügestelle
Gebrauch	Alterungsbeständigkeit; Spaltkorrosion → Fugendichtung; Kontaktkorrosion → elektrische Isolation; (Wärme-) Dehnungsausgleich; Optische Qualität
Recycling	Lösbarkeit; Weiterverwertung; Entsorgung
Kosten	Zul. Herstellkosten; Investition und Amortisation

Vorrausschauend auf den anschließenden Bewertungsprozess sind im Idealfall die Anforderungskriterien der Fügestelle auf die Bewertungskriterien der Fügeverfahren in Umfang und Dimension abzustimmen. Dies stellt bei binären Merkmalen, das heißt bei Merkmalen, die nur zwei mögliche Zustände einnehmen können, kein Problem dar. Bei kontinuierlichen Merkmalen muss hingegen auf eine vergleichbare Stufung der Bewertungsskala geachtet oder die Werte in eine normierte Form überführt werden.

### 3.4 Bewertungsprozess

Zur Bewertung der Eignung eines Fügeverfahrens für ein konkretes Fügeproblem müssen die im Katalog gesammelten Eigenschaften der Fügeverfahren mit den im vorigen Kapitel definierten Anforderungen der Fügestelle in Beziehung gesetzt werden. Hierzu werden Merkmalpaare, wie zum Beispiel Raumangebot und Raumbedarf, durch quantitative oder logische Bedingungen miteinander verknüpft. Tabelle 3 zeigt eine Auswahl möglicher Bedingungen sowie zugehörige Beispiele, die im Industrieprojekt Anwendung fanden.



Tabelle 3: Bedingungen zur Verknüpfung der Merkmale

Bedingung		Beispiel		
Zeichen	Bezeichnung	Anforderung der Fügestelle	Bed.	Eigenschaft des Fügeverfahrens
<	ist kleiner	Auftretende Scherkräfte	<	Scherkraftübertragungsvermögen
>	ist größer	Raumangebot	>	Raumbedarf
=	entspricht, ist erfüllt	Zugänglichkeit	=	Einseitiges Fügen
≈	entspricht im Rahmen einer zul. Abweichung	Steifigkeit	≈	Steifigkeit
...			...	

Mittels einer in Excel teilautomatisierten Punktbewertung (z.B. [11]) der erfüllten Bedingungen werden die verschiedenen Fügeverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den konkreten Anwendungsfall beurteilt. Dabei werden Festanforderungen durch die Definition von Ausschlussmerkmalen  $a$  berücksichtigt. Da Ausschlussmerkmale immer binäre Merkmalsausprägungen aufweisen, werden diese als Faktor der Punktzahl vorangestellt, sodass das Nichterfüllen einer Festanforderung zur Löschung der Gesamtpunktzahl führt. Damit ergibt sich die Gesamtpunktzahl  $P$  nach folgendem Ausdruck.

$$P = \left( \prod_{i=1}^n a_i \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^m w_j \cdot b_j \right)$$

- $P$ : Gesamtpunktzahl
- $a$ : Punktzahl des Ausschlussmerkmals
- $i$ : Index der Ausschlussmerkmale
- $n$ : Anzahl der Ausschlussmerkmale
- $b$ : Punktzahl des Bewertungsmerkmals
- $j$ : Index der Bewertungsmerkmale
- $m$ : Anzahl der Bewertungsmerkmale
- $w$ : Gewichtung des Bewertungsmerkmals

Anhand der so für jedes Fügeverfahren berechneten Punktzahl kann eine Rangfolge der für einen konkreten Anwendungsfall geeigneten Fügetechnik ermittelt werden. Als Ziel der vorgestellten Methodik dient diese Rangfolge dem Konstrukteur zur Entscheidungsfindung im Gestaltungsprozess.

### 3.5 Indirekte Fügeverfahren

Da bestimmte Materialpaarungen den Einsatz einiger Fügeverfahren ausschließen (z.B. Schweißen bei Metall - Kunststoff), werden neben den unmittelbaren Fügeverfahren auch mittelbare, das heißt unter Verwendung eines Zwischenteils, betrachtet. Um auch hier ein möglichst großes Lösungsfeld zu überblicken, werden verschiedene Ausprägungen der Merkmale Fügereihenfolge und Zwischenteilwerkstoff kombiniert, siehe Bild 3. Die erste Zeile zeigt die Anordnung des Zwischenteils an/in einem der Fügeteile. Hierdurch wird auch die Fügereihenfolge bestimmt, siehe Nummerierung. Im zweiten Schritt wird der Werkstoff des Zwischenteils gewählt. Da ein dritter Werkstoff die Auswahl an Fügeverfahren unnötig einschränken würde, werden für das Zwischenteil nur Werkstoffe gewählt, die zu einem der Fügeteile kompatibel sind, siehe Schattierung. Während die Varianten 1 und 4 die Problematik der direkten Fügeverfahren lediglich verlagern, bieten die Varianten 2 und 3 neue Möglichkeiten, Fügeverfahren zu kombinieren.

Anordnung d. Zwischenteils → Fügereihenfolge	1. 2.			2. 1.				
	Werkstoff A	Zwischenteil	Werkstoff B	Werkstoff A	Zwischenteil	Werkstoff B		
Variante	1		2		3		4	
Werkstoff des Zwischenteils	1.	2.	1.	2.	2.	1.	2.	1.

Bild 3: Kombinatorik der indirekten Fügeverfahren

Insbesondere bei Verbundwerkstoffen können solche indirekten Fügeverfahren umgesetzt werden, indem die Zwischenteile (z.B. Inserts) schon während des Bauteilherstellprozesses eingefügt werden. Ein Beispiel hierfür sind Metallinserts in Faserverbundbauteilen, die im zweiten Fügeschritt mit anderen Metallbauteilen verschweißt werden. Andererseits können Kunststoffinserts in Metallbauteile gegossen werden, die im zweiten Schritt mit der thermoplastischen Matrix von Faserverbundbauteilen verschweißt werden.

Für die oben gezeigten Varianten 2 und 3 sowie die Materialpaarung Stahl - CFK wurde im Rahmen des Industrieprojektes eine Bewertungsmatrix für indirekte Fügeverfahren erstellt, die je zwei der im Übersichtskatalog aufgeführten direkten Fügeverfahren kombiniert.

## 4 Anwendungsbeispiel

Die vorgestellte Methodik wurde während der Bearbeitung eines Industrieprojektes am Institut für Konstruktionstechnik in Braunschweig entwickelt und angewandt. Dabei sollten für eine leichtbauende Multimaterialkarosserie Fügetechniken vornehmlich für die Materialpaarung Stahl - CFK ermittelt werden. Verteilt auf die gesamte Karosserie wurden insgesamt 15 Fügestellen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen betrachtet. Die bereits eingegrenzte Menge der Fügeverfahren wurde in einer Matrix den Fügestellen gegenübergestellt, siehe Bild 4, und entsprechend des beschriebenen Vorgehens bewertet. Als Bedingungen wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Beispiele angewandt. Ausschlussmerkmal war dabei die einseitige Fügbarkeit, die von einem Großteil der Fügestellen gefordert wurde.

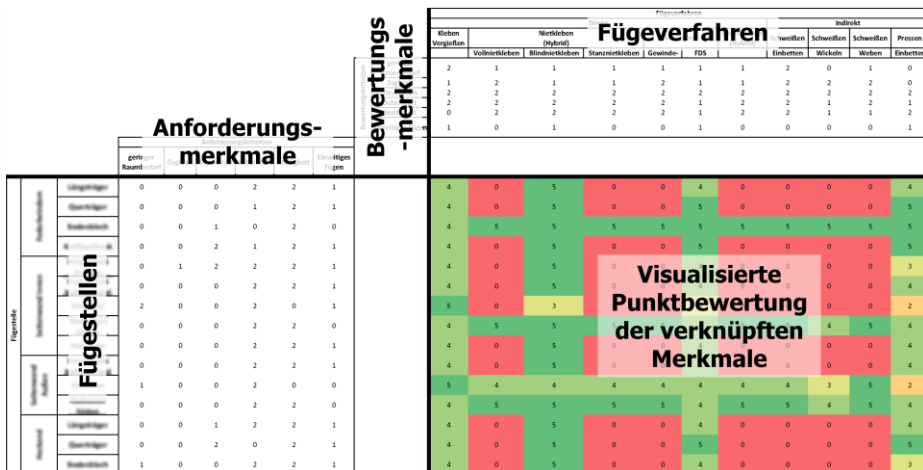


Bild 4: Bewertungsmatrix aus dem Anwendungsbeispiel

Als Beispiel für eine konkrete Fügestelle sei hier der Schwellerbereich einer Stahlkarosserie genannt, an den eine mehrschalige Seitenwand aus CFK gefügt werden soll. Bild 5 zeigt eine vereinfachte Schnittansicht des Schwellers. Auf die Fügestellen wirken zum einen Torsionslasten bei Verwindung der Karosserie. Diese bewirken Scherkräfte in den Fugen. Zum Anderen muss der Crash-Fall berücksichtigt werden. Ein Seitencrash würde vorwiegend zu Druckkräften in den Fugen führen, ein Frontalcrash zu Scherkräften. Anhand vom Industriepartner gegebener Lastfälle wurden so die Kraftanforderungen bewertet. Weitere Anforderungen sind die einseitige Fügbarkeit von Fügestelle 1 sowie die Umwelanforderungen von Fügestelle 2.

Dank der Methodik wurde die Möglichkeit verschiedener Blindnietverfahren für nur einseitig zugängliche Fügestellen aufgezeigt. Für Fügestelle 1 wurde ein Blindbolzen ausgewählt, dessen Schließkopfseite auch für Faserverbundwerkstoffe geeignet ist, siehe Bild 6.

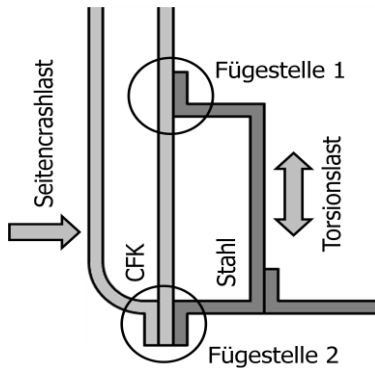


Bild 5: Schnittansicht des Schwellers

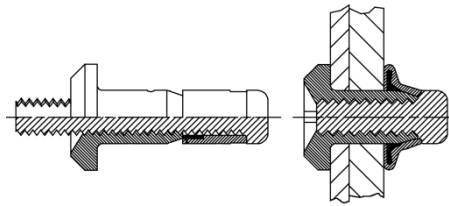


Bild 6: Blindbolzen [12]

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik stellt dem Konstrukteur ein Werkzeug zur Auswahl von Fügeverfahren im Konstruktionsprozess zur Verfügung. Auf Grund der systematischen Vorgehensweise können dabei innovative Lösungen aufgezeigt werden, die bei einer erfahrungsbasierten Konstruktionsauswahl unberücksichtigt bleiben. Insbesondere die indirekten Fügeverfahren bergen ein großes Potential für neue Lösungen. Dabei kann die Menge der über tausend möglichen Kombination nur durch eine geeignete Systematik überblickt und bewertet werden. Die hier beschriebene Methodik zeigt einen möglichen Weg auf.

Ausblickend auf die zukünftige Weiterentwicklung der Methodik, sollte der Konstruktionskatalog zunächst in ein dynamisches Datenbanksystem überführt werden, das schnell und flexibel an verschiedene Anwendungsfälle angepasst werden kann. Durch den Aufbau einer zusätzlichen Wissensdatenbank, die Expertenwissen zu den jeweiligen Fügeverfahren bereit stellt, ließe sich der Prozess der Eingrenzung beschleunigen. Schließlich könnte der beschriebene Arbeitsablauf in ein praxisnahes Softwarewerkzeug umgesetzt werden, um die Unterstützung im Konstruktionsprozess weiter zu verbessern.

---

## Literatur

- [1] Roth, K.; Franke, H.-J.; Simonek, R.: "Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen", *Feinwerktechnik* 75, 1971.
- [2] Franke, H.J., Brey, M., Jänicke, T.: "eKat – Rechnerunterstütztes Konstruktionskatalogsystem", *Manufacturing*, 2001.
- [3] Franke, H.-J.; Löffler, S.; Deimel, M.: "Increasing the efficiency of Design Catalogues by Using Modern Data Processing Technologies", *International Design Conference*, Dubrovnik, 2004.
- [4] Franke, H.J.; Vietor, T.; Ziebart, J. R.: "Schnellere Entwicklung innovativer Profile für den Fahrzeugsektor", *Konstruktion* 4, 2009.
- [5] Kirchner, K.; Drebing, U.; Franke, H.-J.: "Konstruktionskataloge für den effizienten Einsatz physischer Modelle im Produktentwicklungsprozess", *Konstruktion* 10, 2009.
- [6] Brüdgam, S.; Meschut, G.; Küting, J.; Hahn, O.: "Fügesystemoptimierung zur Herstellung von Mischbauweisen aus Kombinationen der Werkstoffe Stahl, Aluminium, Magnesium und Kunststoff", *Abschlussbericht zum BMBF-Projekt*, Paderborn, 2003.
- [7] Hahn, O.; Bye, C.; Draht, T.: "Fügen von faserverstärkten Kunststoffen im strukturellen Leichtbau", *Abschlussbericht zum BMBF-Projekt*, Paderborn, 2004.
- [8] "DIN 8593 Fertigungsverfahren Fügen", *Deutsche Norm*, 2003.
- [9] Pahl, G; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: "Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung", *Springer*, Berlin, 2006.
- [10] Stechert, C.: "Modellierung komplexer Anforderungen", *Dissertation*, Braunschweig, 2010.
- [11] Haberfellner, R. u.a.: "Systems Engineering: Methodik und Praxis", *Zürich*, 1994.
- [12] *Monogram Aerospace Fasteners: "MBF2010", Datenblatt*, 2002.