

**Leichtbaugerechtes Fügen für die Multimaterialbauweise**

# Einordnung des Leichtbaugrades von Fügeverfahren

T. Götz, M. Schneider

Im Automobilbau bietet der Einsatz der Multimaterialbauweise ein signifikantes Potenzial zur Gewichtsreduktion. Zugleich erfordert diese Bauweise eine große Anzahl von Fügeverfahren für die Verbindung der unterschiedlichen Werkstoffe und Werkstoffklassen. Dabei muss eine Vielzahl an konstruktiven und materialseitigen Anforderungen berücksichtigt werden. Um in diesem Auswahlprozess den Aspekt des Leichtbaus beim Fügeverfahren selbst systematisch zu integrieren, wurde eine Methodik entwickelt, welche die Fügeverfahren im Hinblick auf ihr jeweiliges Leichtbaupotenzial bewertet.

**STICHWÖRTER**

Fügetechnik, Leichtbau, Konstruktion

**Classification of the degree of lightweightness of joining processes – Lightweight joining of multi-material composites**

In automotive engineering, the use of multi-material construction offers significant potential for weight reduction. At the same time, this construction method requires a large number of joining methods for connecting different materials and material classes. Also, a multitude of design and material requirements must be taken into account. To integrate the aspect of lightweight characteristic of the joining method systematically into this selection process, a methodology was developed evaluating the joining processes with regard to their respective potential for lightweight construction.

## 1 Motivation und Problemstellung

Aufgrund des von der europäischen Kommission verabschiedeten Klimaschutzpaketes „Fit For 55“ sehen sich alle Industriezweige vor die Herausforderung gestellt, die CO<sub>2</sub>-Bilanz ihrer Produkte zu verbessern. Dies betrifft auch die Automobilindustrie, um die im EU-Klimaschutzpaket festgeschriebenen Flottengrenzwerte erreichen zu können [1]. Das ambitionierte Ziel der Klimaneutralität bis 2050 erfordert vornehmlich die Einführung emissionsarmer Verkehrsträger [2]. Von der neuen Gesetzeslage geht somit ein klares Signal zum weiteren Ausbau der E-Mobilität aus [3].

Die Elektrifizierung der Antriebsstränge ist mit ökonomischen und technologischen Herausforderungen verbunden. So weisen vollelektrische Fahrzeuge gegenüber vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein signifikant höheres Gewicht auf, woran das Batteriemodul einen beträchtlichen Anteil hat [4]. Das höhere Gewicht des Batteriesystems erfordert wiederum eine Verstärkung der umliegenden Karosseriestrukturen. Durch diese sekundären Gewichtszunahmen wird eine Gewichtsspirale in Gang gesetzt, die sich negativ auf die verfügbare Reichweite auswirkt [5].

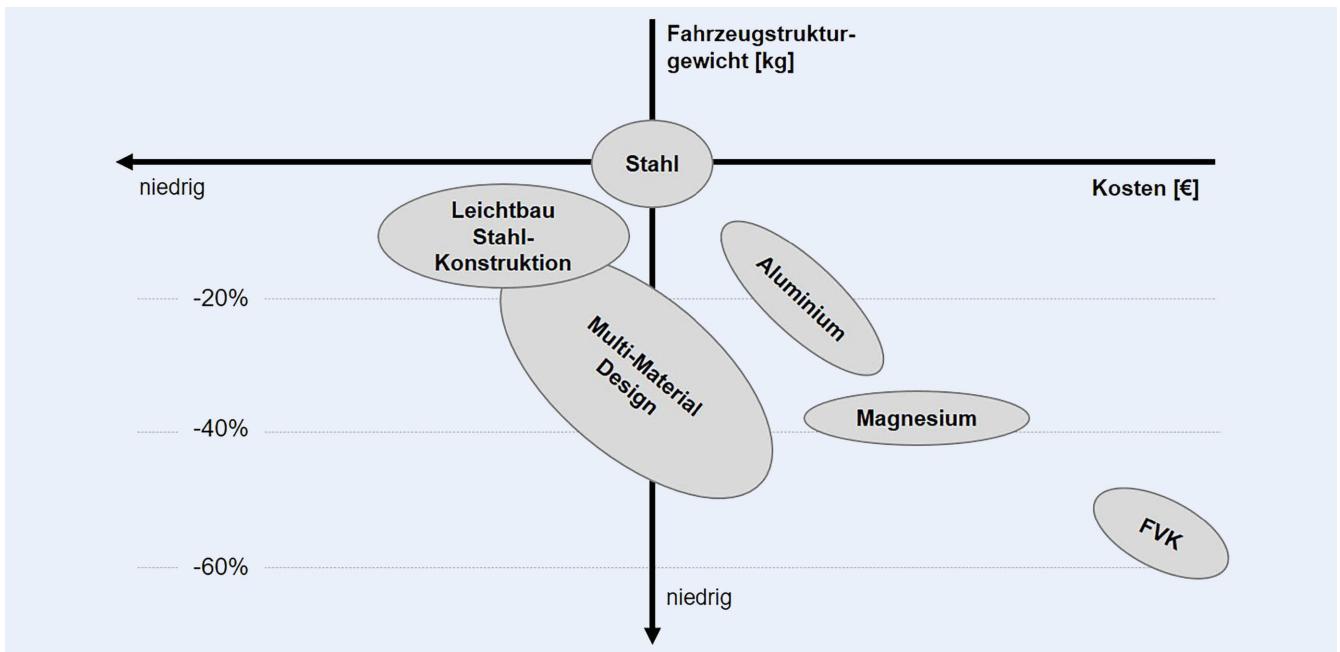
Für den zukünftigen Erfolg elektrisch betriebener Fahrzeuge und deren zunehmender Marktdurchdringung ist es nötig, durch signifikante Gewichtsreduktionen zu einer Reichweitenerhöhung zu gelangen. Dabei sind die akzeptierten Leichtbau-Mehrkosten im Automobilbau im Gegensatz zu anderen Branchen gering [6]. Für die notwendige Gewichtsreduktion bietet sich der Einsatz innovativer Werkstoffe und der Multimaterialbauweisen (Verbund

aus mindestens zwei verschiedenen Werkstoffen wie etwa faser-verstärkte Kunststoffe und Metalle) an.

Ein Teil dieser Aspekte wurde in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Verbundprojekt „Hochintegratives Hinterwagen-Konzept – HigHKo“ betrachtet. Dort wurde ein hochintegrativer Hinterwagen eines batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugs prototypisch entwickelt. Durch die frühzeitige konzeptionelle Abstimmung der Anforderungen der Hauptkomponenten sowie dem Einsatz neuer Werkstoff-, Prozess- und Fügetechnologien konnte im Bereich des Hinterwagens eine signifikante Gewichtsreduktion um 24 % gegenüber dem Referenzhinterwagen („e-generation“) erzielt werden. Wesentlicher Treiber zur Erreichung der Gewichtsreduktion war die Multimaterialbauweise, mit der eine erhebliche Funktionsintegration bei gleichzeitigem Einsatz leichtbaugerechter Werkstoffe gelang.

Ein erhebliches Problem, mit dem sich die Konstrukteure im Automobilbau konfrontiert sahen, war die geeignete Auswahl von Verbindungstechniken für die teilweise artfremden Werkstoffe. Bei der Beachtung konstruktiver Anforderungen nach der Kraftübertragung, dem Dehnungs- und Temperaturverhalten, der Medienbeständigkeit und der zugehörigen Fertigungstechnik bleibt der Aspekt des Leichtbaugrades der Fügeverbindung selbst meist unbeachtet. Eine Analyse der Literatur sowie eine Befragung der Projektpartner hat aufgezeigt, dass eine methodische Betrachtung und Bewertung des Leichtbaugrades von Fügeverbindungen für Leichtbauwerkstoffe und vor allem für die Multimaterialbauweise nicht verfügbar sind.

Dieser Beitrag beschreibt, wie durch eine mehrstufige Analyse und systematische Charakterisierung bestehender Fügeverfahren



**Bild 1.** Multimaterial-Design als Schlüssel zu bezahlbarem Leichtbau. *Grafik: [8]*

schrittweise die Klassifizierungseigenschaften des Leichtbaugrades und ein Bewertungssystem in Form einer Matrix erstellt wurden. Basis ist die systematische Betrachtung und Analyse bestehender Verfahren aus Publikationen wie Lehrbüchern, Normen und Forschungsberichten. Dabei wurde vor allem die Multimaterialbauweise berücksichtigt, da diese aus Sicht der Fertigungskosten und dem Strukturgewicht ein Optimum darstellt, was im folgenden Kapitel beschrieben wird. Ebenso wird gezeigt, dass besonders viele Anforderungen an die Fügetechnik in der Multimaterialbauweise gestellt werden, jedoch der Aspekt des Leichtbaugrades der Fügeverbindung bisher vernachlässigt wird.

## 2 Multimaterialbauweise und Fügeverfahren

Im Automobilbau haben sich mit dem Formleichtbau, dem Fertigungsleichtbau, dem Konzeptleichtbau sowie dem Werkstoffleichtbau vier Säulen des Leichtbaus etabliert [7].

Während im Formleichtbau durch eine optimale Kraftverteilung sowie Gestalt- und Topologieoptimierung eine Gewichtsminimierung angestrebt wird, erfolgt beim Konzeptleichtbau eine systematische Auswahl von Einzelkomponenten, die optimal an das Gesamtsystem angepasst sind. Eine Gewichtsreduktion wird durch das Weglassen verzichtbarer Komponenten, wie etwa dem Reserverad oder einfacher tragender Strukturen ermöglicht. Daneben kommt der Fertigungsleichtbau zur Anwendung, bei dem Gewicht einsparungspotenziale durch Herstellungs-, Fertigungs- und Montageprozesse erzielt werden, wie etwa dickenoptimierte Bleche und Profile. [8]

Als weiteren Ansatz bietet der Werkstoffleichtbau große Potenziale zur Gewichtsreduktion durch die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium oder Faserverbundkunststoffe wie CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) [9]. Allerdings sind Bauweisen aus diesen Werkstoffen mit hohen Kosten verbunden.

Eine Alternative bietet der Einsatz von Multimaterialbauweisen (**Bild 1**), welche das belastungs- und funktionsgerechte Zusammenwirken unterschiedlicher Materialien innerhalb eines hybriden Bauteils ermöglichen [10, 11].

Dabei werden diejenigen Werkstoffe ausgewählt und kombiniert, welche unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und produktionstechnischer Erfordernisse die an das jeweilige Bauteil gestellten Anforderungen bei minimalem Gewicht bestmöglich erfüllen [11]. Dabei ist die reine Massenreduktion bei der Umsetzung der Mischbauweise nicht der einzige Vorteil. So kann durch die Kombination verschiedener Werkstoffe auch ein Höchstmaß an Funktionsintegration realisiert werden [12]. Die Funktionsintegration ermöglicht die Erschließung sekundärer Gewichtseinsparungspotenziale, da sowohl die Anzahl der Bauteile in einer Baugruppe als auch der Bauraum selbst reduziert werden können [13].

Multimaterialsysteme stellen jedoch große Herausforderungen an die Fügetechnologie, da eine praxistaugliche Ableitung von Vorgehensweisen für die Verbindung unterschiedlicher Materialkombinationen im Automobilbau aussteht [8]. Nicht nur die Verbindung zwischen Leichtbaumaterialien oder Leichtbaumaterial und Metallen wie Stahl, sondern auch Weiterentwicklungen bei den Stahlwerkstoffen zu neuen höher- und höchstfesten Legierungen machen die Entwicklung werkstoffadäquater Fügeverfahren erforderlich, um die spezifischen Materialeigenschaften optimal auszunutzen und deren Langzeittauglichkeit sicherstellen zu können [9, 10]. Als kritisch erweisen sich die Krafteinleitungs punkte und -übergangsbereiche, an denen unterschiedliche Werkstoffe unmittelbar aufeinandertreffen. Hier gilt es, die aufgrund der divergierenden Materialeigenschaften hervorgerufenen Problemstellungen wie unterschiedliche Wärmeausdehnung, Kontakt- und Spaltkorrosion zu berücksichtigen [10]. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die Vorteile des Mischbaus nicht durch ungünstige Folgeerscheinungen inadäquater Fügeverfahren wie ein erhöhtes Gewicht, eine geringe Steifigkeit oder eine verminderte Festigkeit im Fügebereich nivelliert werden [8].

**Tabelle.** Auswahl geeigneter Verfahren für das Fügen von artfremden Werkstoffen der nach DIN 8593 definierten Fügeverfahren.

Gruppe	Untergruppe	Unterteilung
Anpressen / Einpressen	Schrauben	-
	Fügen durch Pressverbindung	Fügen durch Einpressen
		Fügen durch Schrumpfen
		Fügen durch Dehnen
	Nageln / Einschlagen	-
Fügen durch Urformen	Ausgießen	-
	Einbetten	Umspritzen
		Eingießen / Umgießen
		Einvulkanisieren
	Vergießen	-
	Eingalvanisieren	-
	Ummanteln	-
Fügen durch Umformen	Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr- und Profilteilen	Gemeinsam Fließpressen
		Gemeinsam Ziehen, Ummanteln
		Fügen durch Weiten
		· Rohreinwalzen
		· Fügen durch Weiten
		Fügen durch Engen
		· Fügen durch Rundkneten
		· Fügen durch Einhalten
		· Fügen durch Sicken
		Fügen durch Bördeln
		Fügen durch Falzen
		Wickeln, Umdrehen, Bewickeln
		Verlappen
		Umformendes Einspreizen
		Durchsetzfügen
	Fügen durch Nietverfahren	Verpressen
		Quetschen
		Nieten
		Hohlnieten
		Zapfennieten
		Hohlzapfennieten
		Zwischenzapfennieten
		Stanznieten

Fügen durch Schweißen	Pressschweißen	Pressschweißen durch festen Körper
		Pressschweißen durch Flüssigkeit
		Pressschweißen durch Gas
		Pressschweißen durch Strahlung
		Pressschweißen durch Bewegung von Massen
Schmelzschweißen	Schmelzschweißen	Schmelzschweißen durch Flüssigkeit
		Schmelzschweißen durch Gas
		Schmelzschweißen durch Strahlung
Kleben	Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen	Nasskleben
		Kontaktkleben
		Aktivierkleben
		Haftkleben

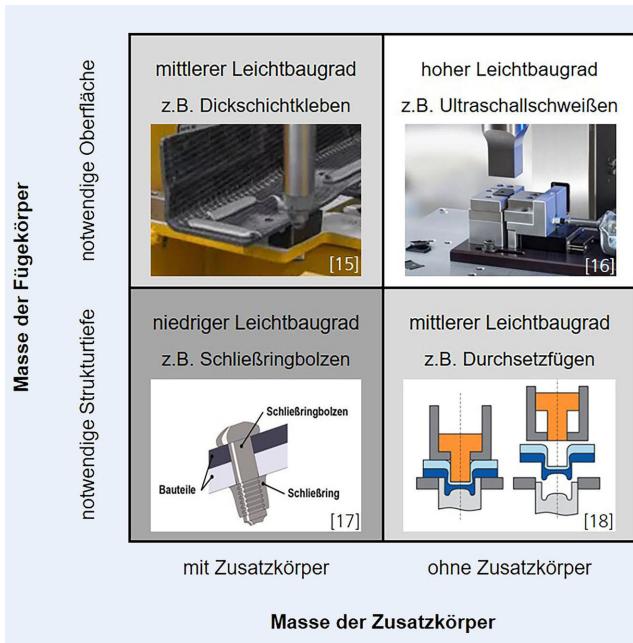
### 3 Methodik zur Bewertung der Leichtbaugüte von Fügeverfahren

Wie in Kapitel 2 verdeutlicht, besteht die besondere Herausforderung für die Fertigungstechnik in der Findung geeigneter Lösungspfade für die Multimaterialbauweise. Eine Analyse zum Stand der Fertigungstechnik sowie praxisbezogene Problemstellungen der Konsortialpartner im Forschungsprojekt „HigHKo“ belegen, dass die Fügeverbindungen dieser Multimaterialverbunde von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde daher die softwarebasierte Wissensdatenbank „JoinIT“ [14] geschaffen, die unter Einbeziehung der verschiedenen Ebenen eines morphologischen Fertigungssystems eine Methodik zur Auswahl geeigneter Fügetechnologien für den Fahrzeugbau bereitstellt. Der webbasierten Anwendung JoinIT liegt eine Datenbank zugrunde, die als Basis alle Fügeverfahren gemäß DIN 8593 einbezieht. In einem iterativen Auswahlprozess lassen sich durch die Definition der für die Fügeaufgabe relevanten Einflussgrößen Fügepartner, Geometrie der Fügestelle sowie weiterer technischer, ökonomischer und ökologischer Anforderungen geeignete Lösungspfade unter Abgleich der jeweiligen Charakteristika der in der Datenbank hinterlegten Fügeverfahren ableiten.

Jedoch fehlt nach dem Stand der Technik eine Bewertungsebene, um Fügeverfahren auf ihre „Leichtbaufähigkeit“ beziehungsweise ihren „Leichtbaugrad“ zu beurteilen. Unter dem Begriff Leichtbaugrad soll die Analyse und Bewertung der Fügeverbindung selbst in Bezug auf die notwendige Bauteilmasse erfolgen, die für die Funktionserfüllung „Fügen“ notwendig ist.

Um zu prüfen, ob eine Charakterisierung von Fügeverfahren hinsichtlich ihres Leichtbaugrades möglich ist und die Fügeverbindung prinzipiell für die Multimaterialbauweise in Frage kommt (was aus Kosten-Nutzen-Sicht von besonderer Relevanz ist, siehe Kapitel 2), wurden alle nach DIN 8593 aufgeführten Gruppen der Fügeverfahren auf ihre Relevanz im Zusammen-



**Bild 2.** 4-Felder-Matrix zur Einordnung des Leichtbaugrads von Fügeverfahren mit Beispielen [15–18]. *Grafik: Fraunhofer IPA*

wirken mit unterschiedlichen Werkstoffklassen geprüft. Der Begriff Relevanz wurde verwendet, um zum einen die Eignung für eine Mischbauweise zu erfassen und zum anderen zu prüfen, ob Umsetzungsbeispiele im jeweiligen Verfahren bekannt sind. In einer ähnlich analytischen Vorgehensweise wurden die nächsten beiden Untergliederungsgruppen der Fügeverfahren in DIN 8593, also die Untergruppen und gegebenenfalls deren jeweilige Unterteilung, betrachtet. Die für Leichtbauanwendungen im Zusammenwirken mit hybriden Werkstoffen geeigneten Verbindungen sind in der **Tabelle** zusammengestellt.

Eine weitergehende Analyse der aufgeführten Fügeverfahren mit Blick auf ihre Eignung für Leichtbauanwendungen führt zur Einführung von zwei neuen Klassifizierungsmerkmalen der Fügeverbindungen, nämlich „oberflächenbasierte“ und „strukturtiefenbasierte“ Fügeverbindungen.

Oberflächenbasierte Fügeverfahren nutzen die Oberflächen der beiden Fügepartner aus, um eine Verbindung herzustellen. Typische Beispiele sind das Kleben, teilweise das Schweißen (etwa spaltloses Schweißen wie Punktschweißen oder Reibschweißen), Umgießen oder Umspritzen. Einige dieser Verfahren sind mit ebenen Oberflächen umsetzbar (zum Beispiel Kleben), andere Verfahren sind zwar oberflächenbasiert, nutzen aber die 3D-Formung der Oberflächen aus (zum Beispiel Umspritzen).

Strukturtiefenbasierte Fügeverfahren nutzen nicht die Oberfläche, sondern die geometrische Tiefendimension der Fügepartner. Typische Beispiele sind Anpress- und Einpressverfahren, klassische Schraubverbindungen oder Nageln, aber auch bestimmte Schweißverfahren (zum Beispiel spalthafte Schweißverfahren wie klassische V-Nähte).

Die weitere Analyse und Systematisierung der Fügeverfahren nach DIN 8593 zeigt einen dritten Aspekt im Sinne der Bemessung des Leichtbaugrads, nämlich die notwendige Integration von Zusatzkörpern oder erforderlichen Fügehilfsmitteln. Darunter fallen etwa Schrauben, Nieten, Nägel, Schweißzusatzstoffe und Klebstoffe. Diese Zusatzkörper müssen in ihrer Gewichtsrelevanz

bewertet werden. Einige dieser Zusatzkörper sind in Bezug auf eine Gewichtszunahme irrelevant, zum Beispiel beim Dünnfilmkleben oder Löten. Andere Zusatzkörper gehen jedoch mit einer signifikanten Zunahme des Strukturgewichts einher. Beispiele hierfür sind Schrauben, Nieten, Kehlnähte oder dickschichtige Kleverbindingen. **Bild 2** [15–18] zeigt eine aus den obigen Erkenntnissen entwickelte 4-Felder-Matrix zur Einordnung des Leichtbaugrads der Fügeverfahren nach DIN 8593. Dabei wird der Leichtbaugrad qualitativ den Kategorien „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ zugeordnet. Diese Zuordnung ergibt sich aus der Kombination der Bewertungsebenen „Strukturtiefe“ versus „Oberfläche“ als Maß für die Masse der notwendigen Fügekörper und „mit Zusatzkörper“ versus „ohne Zusatzkörper“ als Maß für die Masse der Zusatzkörper.

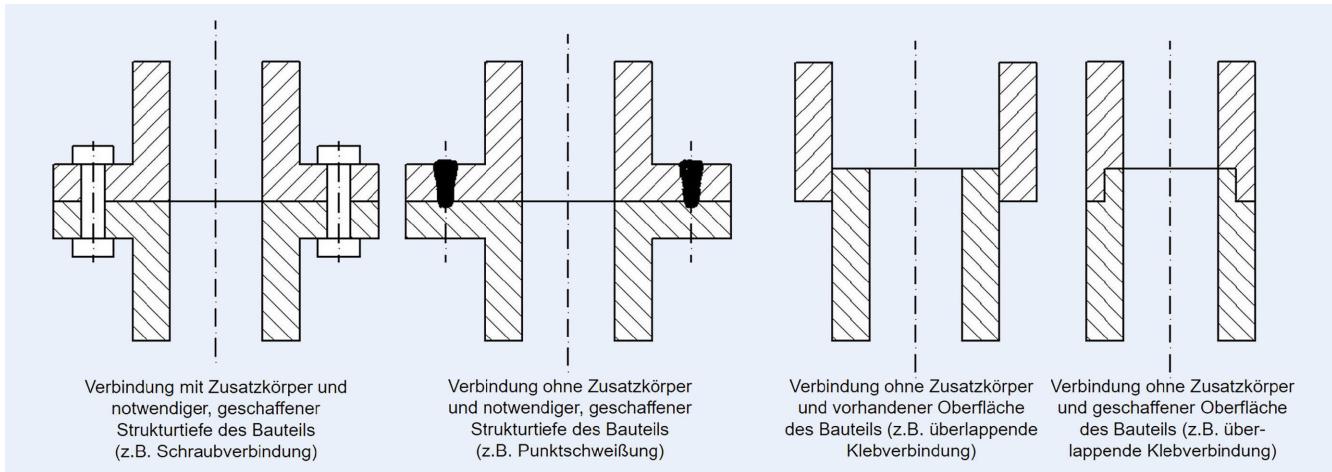
In Bild 2 sind beispielhafte Verfahren aufgeführt: So werden Karosseriebauteile des BMW i3 aus CFK mit einer relativ dicken aufgetragenen Klebstoffschicht gefügt, weshalb hier das Gewicht des Klebstoffs eine Rolle spielt. Zugleich nutzt dieses Verfahren die Oberflächen der Bauteile aus, weshalb eine Zuordnung zum oberen linken Quadranten der Matrix erfolgt. Oberflächenbasiert erfolgt auch das Ultraschallschweißen von Kunststoffen (Bild 2 oben rechts). Dabei ist kein Zusatzkörper notwendig, sodass ein Gewichtsminimum erreicht wird. In Bild 2 unten links ist das Setzen von Schließringbolzen als typisches Verfahren zum Fügen hybrider Werkstoffe aufgeführt, wie etwa in der Luftfahrtindustrie. Dabei ist eine gewisse Tiefe des Verbindungsbaufaus aus Bolzen und Schließring nötig, zugleich entsteht ein Gewichtszuwachs durch Bolzen und Schließring selbst. Dagegen kommt das Durchsetzfügen (Bild 2 unten rechts) ohne zusätzliche Bauteile aus, es muss aber eine gewisse zusätzliche Strukturtiefe der Partner erzeugt werden.

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen bereits eine einfache Zuordnung von Fügeverbindungen anhand der Klassifikationsmerkmale Strukturtiefe und Oberfläche als Maß für die Masse der Fügekörper sowie das Vorhandensein von Zusatzkörpern für die Fügeverbindung.

In einer anschließenden methodischen Analysephase wurde die oben abgebildete 4-Felder-Matrix anhand wissenschaftlicher Veröffentlichungen [19–21] und Forschungsberichte, zum Beispiel [22, 23] aus dem Umfeld der Leichtbau-Fügetechnik auf ihre Stimmigkeit untersucht. Neuentwickelte Fügeverfahren für Leichtbauwerkstoffe sind unter anderem das Fließformschrauben [19], der Hybriddruckguss [20] oder das Bolzenkleben [21]. Das Beispiel der Fließformschraubenverbindung verweist auf die Erfordernis, die oben entwickelte 4-Felder-Matrix zu erweitern, da das Verfahren eine gewisse Strukturtiefe für die Gewindeenge im Werkstoff benötigt. Diese Strukturtiefe wird aber „gewichtsneutral“ im Fertigungsprozess selbst aus dem vorhandenen Bauteil heraus durch Umformung erzeugt. Das Fügeverfahren lässt sich also nicht in die bestehende 4-Felder-Matrix einordnen. Deshalb ist eine weitergehende Analyse zur Erweiterung der Matrix notwendig.

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, bedürfen einige Fügeverfahren einer Strukturtiefe, was aus Leichtbaugesichtspunkten zu vermeiden ist. Andere Technologien nutzen hingegen die vorhandenen Oberflächen der Fügepartner aus. Diese Aspekte sind in **Bild 3** verdeutlicht.

Beispielhaft zeigt die typische Rohrverbindung in Bild 3 links je einen ausgebildeten Flansch als Komponente mit einer notwendigen geschaffenen Strukturtiefe des Bauteils. Die Skizze links



**Bild 3.** Beispiele zur Differenzierung zwischen Nutzung vorhandener oder Schaffung neuer Fügeflächen sowie der Unterscheidung, ob Zusatzkörper notwendig sind oder entfallen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

zeigt eine Variante mit Verschraubung, wobei das Gewicht der Zusatzkörper zusätzlich berücksichtigt werden muss. Die zweite Skizze zeigt eine Variante mit Flansch und einer Punktschweißung: Hier fallen keine Zusatzkörper an, wodurch diese Variante einen besseren Leichtbaugrad erreicht. Die beiden rechten Skizzzen in Bild 3 zeigen Varianten, die die Oberflächen der Bauteile nutzen, zum Beispiel mit einer Klebverbindung: Eine Strukturtiefe mit entsprechender Masse (Flansch) ist hier nicht notwendig, woraus eine Gewichtseinsparung resultiert. Die beiden rechten Skizzzen unterscheiden sich in der Art der Oberflächen: Wurde eine Oberfläche zusätzlich geschaffen oder kann eine Bauteiloberfläche direkt genutzt werden? Dabei muss weiter differenziert werden, ob die Nutzung oder Schaffung von Oberflächen gewichtsrelevant ist. So erzeugt eine Schäftung beim Kleben zwar eine neue Oberfläche, aber es entsteht kein Mehrgewicht.

Die Einordnung der in Bild 3 dargestellten Beispiele in die 4-Felder-Matrix führt zur Entwicklung einer 9-Felder-Matrix, in der alle bisher diskutierten leichtbaurelevanten Merkmale Berücksichtigung finden. In dieser erweiterten Bewertungsmethodik wird für den Einflussfaktor der notwendigen Masse der Fügekörper beziehungsweise Werkstoff am Bauteil zwischen den Ausprägungen „vorhandene Struktur/Fläche nutzen“, „notwendige Oberfläche schaffen“ und „notwendige Strukturtiefe schaffen“ differenziert. Diese drei Begriffe bilden eine Achse der Matrix (**Bild 4**, [15–18, 24–26]). Beispielsweise wird beim klassischen Löten von Rohren ein Partner aufgeweitet, sodass hier eine zusätzliche Tiefe geschaffen wird, während die Masse des Lotes irrelevant ist (Bild 4 unten).

Beim Masseneinfluss eines für das Fügen notwendigen Zusatzkörpers wird zwischen den Ausprägungen „kein Zusatzkörper“, „Zusatzkörper irrelevant“ sowie „Zusatzkörper relevant“ unterschieden. Diese Begriffe bilden die zweite Achse der Matrix. Beispielsweise ist beim Rohrstanzznieten die Masse des Zusatzkörpers irrelevant, da zuvor Masse bei den Fügepartnern durch das Einbringen der Bohrung entnommen wurde und der Niet selbst durch die Röhrenform ein Gewichtsminimum erzielt. Im Gegensatz dazu könnte das Bördelstanzznieten angeführt werden, bei dem die Röhrenform des Niets durch einen Deckel ergänzt wird, was zusätzliche Masse in den Zusatzkörper einbringt. Andere Fügeverfahren benötigen keinen Zusatzkörper, aber eine größere

Oberfläche zum Fügen, wie klassisches Fügen durch Bördeln. So mit kann dieses Verfahren in die Matrix eingetragen werden.

Die neun Felder der Matrix in Bild 4 spiegeln die Kombinationsmöglichkeiten der Merkmalsausprägungen der beiden Einflussfaktoren Oberfläche/Strukturtiefe (y-Achse) und Zusatzkörper (x-Achse) wider. Die neun Felder können dann bezüglich ihrer Leichtbaugrade in die drei Abstufungen „hoher Leichtbaugrad“, „mittlerer Leichtbaugrad“ und „niedriger Leichtbaugrad“ eingeteilt werden. Damit steht eine systematische Klassifizierung und somit eine Möglichkeit zur Orientierung zur Verfügung, welche Verfahren für eine Gewichtsreduktion der Fügeverbindung selbst qualitativ besonders zu empfehlen sind.

## 4 Fazit und Ausblick

In der Multimaterialbauweise stellt die Auswahl effizienter Fügeverfahren unter Beachtung konstruktiver und materialseitiger Anforderungen große Herausforderungen an den Entwicklungsprozess. Hier gilt es, eine Vielzahl sowohl technischer (wie etwa Beanspruchungsarten der Fügeverbindung, Anforderungen an die Medienbeständigkeit und Mediendichtheit), ökonomischer (wie Automatisierbarkeit der Fügetechnologie) als auch ökologischer Aspekte (wie Emissionsausstoß, Energieverbrauch) zu berücksichtigen.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik zur Einordnung des Leichtbaugrads von Fügeverfahren erlaubt es, den Leichtbauaspekt der Fügeverbindung selbst systematisch in den komplexen Prozess zur Auswahl geeigneter Fügeverfahren in der Multimaterialbauweise zu integrieren.

Auch wenn sich nicht alle Fügeverfahren gemäß der Methodik hinsichtlich ihres Leichtbaugrades einordnen lassen (so benötigt etwa eine Fließloch- oder gewindeformende Schraube auf Seiten des Gewindes zwar eine Strukturtiefe, die aber masseneutral aus dem vorhanden Bauteil selbst erzeugt wird), bietet die Methodik dennoch eine strukturierte Vorgehensweise. Sie erleichtert es dem Anwender, den Leichtbaugrad von Fügeverfahren grundsätzlich einzuordnen, zu bewerten und darauf basierend eine Auswahl leichtbaugerechter Fügeverfahren zu treffen.

Zukünftig soll die vom Fraunhofer IPA entwickelte Wissensdatenbank „JoinIT“ um das qualitative Anforderungsmerkmal des

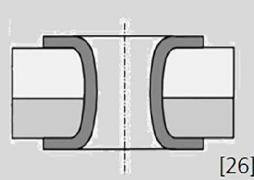
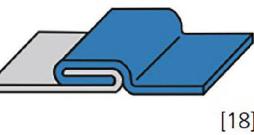
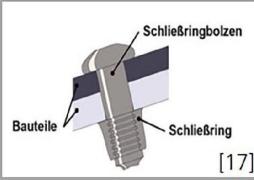
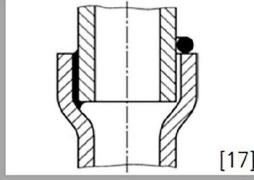
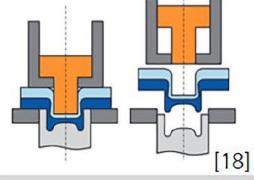
	mittlerer Leichtbaugrad z.B. Dickschichtkleben  [15]	hoher Leichtbaugrad z.B. Dünnschichtkleben  [24]	hoher Leichtbaugrad z.B. Ultraschallschweißen  [16]
notwendige Oberfläche schaffen	niedriger Leichtbaugrad z.B. Fließlochformen  [25]	mittlerer Leichtbaugrad z.B. Rohrstanzen  [26]	hoher Leichtbaugrad z.B. Fügen durch Falzen  [18]
notwendige Strukturtiefe schaffen	niedriger Leichtbaugrad z.B. Schließringbolzen  [17]	niedriger Leichtbaugrad z.B. Lotverbindung  [17]	mittlerer Leichtbaugrad z.B. Durchsetzfügen  [18]
Zusatzkörper relevant	Zusatzkörper irrelevant	Masse der Zusatzkörper	

Bild 4. Erweiterte 9-Felder-Matrix zur Einordnung des Leichtbaugrads von Fügeverfahren mit Beispielen [15–18, 24–26]. Grafik: Fraunhofer IPA

Leichtbaugrads ergänzt werden, indem die Einflussgröße „Leichtbaugrad“ in diese Datenbank eingebettet und die bestehende Datenbankstruktur um die Merkmalsausprägungen des Leichtbaugrads erweitert wird. Auch unabhängig von einer softwarebasierten Lösung ermöglicht die Einordnung der Fügeverfahren in eine klar nachvollziehbare Klassifizierung nach ihrem Leichtbaugrad dem Konstrukteur eine systematische Berücksichtigung dieser Eigenschaft im Auswahlprozess der passenden Fügeverbindungen im Multimaterialleichtbau.

## DANKSAGUNG

Das Verbundprojekt „Hochintegratives Hinterwagen-Konzept – HiGKo“ wurde im Rahmen des Förderprogramms „Effizienzsteigerung Fahrzeugantriebe“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und vom Projektträger Mobilität und Verkehrstechnologien (TÜV Rheinland) betreut. Die Autoren danken dem BMWK für die gewährte Förderung sowie dem Projektträger und allen beteiligten Konsortialpartnern für die Unterstützung.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Energie- und Umwelträte stellen die Weichen für eine klimaneutrale europäische Wirtschaft. Stand: 29.06.2022. Internet: [www.bmuv.de/pressemitteilung/energie-und-umwelträte-stellen-die-weichen-fuer-eine-klimaneutrale-europaeische-wirtschaft](http://www.bmuv.de/pressemitteilung/energie-und-umwelträte-stellen-die-weichen-fuer-eine-klimaneutrale-europaeische-wirtschaft). Zugriff am 13.10.2023
- [2] Die Bundesregierung: EU-Klimaschutzpaket: Fit For 55. Mehr Emissionshandel und erneuerbare Energie. Stand: 11.10.2023. Internet: [www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/fit-for-55-eu-1942402](http://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/fit-for-55-eu-1942402). Zugriff am 13.10.2023
- [3] Europäisches Parlament: EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das? Stand: 03.07.2023. Internet: [www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2022/11/story/20221019STO44572/20221019STO44572\\_de.pdf](http://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2022/11/story/20221019STO44572/20221019STO44572_de.pdf). Zugriff am 13.10.2023
- [4] Kellner, P.; Klaiber, D.; Biegerl, M. et al.: Funktionsintegrierter Leichtbau-Hinterwagen für sportliche Elektro-Pkw. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 123 (2021) 11, S. 66–70
- [5] Köth, C.-P.; Günnel, T.: Volkswagen: „Wir investieren in bezahlbaren Leichtbau statt in teure Batteriezellen“ Stand: 13.02.2020. Internet: [www.automobil-industrie.vogel.de/volkswagen-wir-investieren-in-bezahlbaren-leichtbaustatt-in-teure-batteriezellen-a-904626/](http://www.automobil-industrie.vogel.de/volkswagen-wir-investieren-in-bezahlbaren-leichtbaustatt-in-teure-batteriezellen-a-904626/). Zugriff am 13.10.2023
- [6] Gude, M.; Lieberwirth, H.; Meschut, G. et al. (Hrsg.): FOREL-Studie Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. Stand: 2015. Internet: <https://www.plattform-forel.de/wp-content/uploads/2015/05/FOREL-Studie.pdf>. Zugriff am 13.10.2023

- [7] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2013
- [8] Beck, F. U.: Verbindungstechnik strukturell tragender CFK-AI-Mischverbindungen im Automobilbau. Göttingen: Cuvillier Verlag 2013
- [9] Klose, P.: Ein ganzheitlicher Ansatz. Lightweight Design 1 (2008) 4, S. 28–33
- [10] Prüß, H.; Stechert, C.; Vietor, T.: Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen. DFX 2010: Proceedings of the 21st Symposium on Design for X (2010), Buchholz/Hamburg, S. 131–142
- [11] Sahr, C.; Berger, L.; Lesemann, M. et al.: Systematische Werkstoffauswahl für die Karosserie des Superlight-Car. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 112 (2010) 5, S. 340–347
- [12] Hoßfeld, M.; Ackermann, C.: Leichtbau durch Funktionsintegration. Heidelberg: Springer-Verlag 2020
- [13] Büter, A.: Forum 6: Funktionsintegrierter Leichtbau. Vortrag Nationale Bildungskonferenz Elektromobilität 2011, Ulm. Internet: [www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/iui/proelek/Dokumente/vortraege/f06-bueter.pdf](http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui/proelek/Dokumente/vortraege/f06-bueter.pdf). Zugriff am 13.10.2023
- [14] Götz, T.; Schneider, M.: Geeignete Fügeverfahren für Multimaterialbauweisen ermitteln. Konstruktionspraxis: Stand: 27.03.2020. Internet: [www.konstruktionspraxis.vogel.de/geeignete-fuegeverfahren-fuer-multimaterialbauweisen-ermitteln-a-1c330393d243b7c7249fb00ef75365f/](http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/geeignete-fuegeverfahren-fuer-multimaterialbauweisen-ermitteln-a-1c330393d243b7c7249fb00ef75365f/). Zugriff am 13.10.2023
- [15] Nördinger, S.: So fügen sich Composites. Fügetechniken bei CFK. Stand: 23.02.2017. Internet: [www.produktion.de/technik/so-fuegen-sich-composites-121.html](http://www.produktion.de/technik/so-fuegen-sich-composites-121.html). Zugriff am 13.10.2023
- [16] Droege, M.: Ultraschall-Schweißen kleiner Kunststoffteile. Stand: 02.01.2019. Internet: [www.kunststoff-magazin.de/automatisierung/ultraschall-schweiessen-kleiner-kunststoffteile.htm](http://www.kunststoff-magazin.de/automatisierung/ultraschall-schweiessen-kleiner-kunststoffteile.htm). Zugriff am 13.10.2023
- [17] Fritz, A. H. (Hrsg.): Fertigungstechnik. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2018
- [18] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4. Umformen. Berlin: Springer Vieweg Verlag 2017
- [19] Szłosarek, R.; Karall, T.; Enzinger, N. et al.: Fließformschrauben von Aluminium & CFK – Charakterisierung einer Verbindungstechnik. Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis. Tagung Werkstoffprüfung 2013, Neu-Ulm 2013. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 2013, S. 274–252
- [20] Quitter, D.: CFK und Aluminium ohne Kontaktkorrosion fügen. Konstruktionspraxis. Stand: 16.01.2019. Internet: [www.konstruktionspraxis.vogel.de/cfk-und-aluminium-ohne-kontaktkorrosion-fuegen-a-790308/](http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/cfk-und-aluminium-ohne-kontaktkorrosion-fuegen-a-790308/). Zugriff am 13.10.2023
- [21] Reis Robotics: ACE: Bolzen auf CFK-Leichtbauteilen automatisch fixieren. Stand: 02.09.2014. Internet: [www.k-aktuell.de/produkte-im-einsatz/](http://www.k-aktuell.de/produkte-im-einsatz/)

ace-bolzen-auf-cfk-leichtbauteilen-automatisch-fixieren/. Zugriff am 13.10.2023

- [22] PROLEI: Prozesskette für das Fügen endlosfaserverstärkter Kunststoffe mit Metallen in Leichtbaustrukturen. Internet: [plattform-forel.de/prolei/](http://plattform-forel.de/prolei/). Zugriff am 13.10.2023
- [23] Wippo, V.: Fügen im Leichtbau: Laserschweißen von Faserverbundbauteilen. Internet: [phi-hannover.de/fuegen-im-leichtbau-laserschweißen-von-faserverbundbauteilen/](http://phi-hannover.de/fuegen-im-leichtbau-laserschweißen-von-faserverbundbauteilen/). Zugriff am 13.10.2023
- [24] Stroka, M.; Götz, T.; Gebhardt, A.: Adhesive bonding: Opportunities for cutting tool manufacturers. The journal of hp tooling 2 (2020) 3, pp. 24–27
- [25] Henning, F.: Fügeverfahren für den Leichtbau. Präsentation. Internet: [www.fast.kit.edu/download/DownloadsLeichtbautechnologie/5\\_F%C3%BCCgetechnik\\_WS18\\_19.pdf](http://www.fast.kit.edu/download/DownloadsLeichtbautechnologie/5_F%C3%BCCgetechnik_WS18_19.pdf). Zugriff am 13.10.2023
- [26] Stöger Automtion GmbH: Die fließlochformende Verschraubung – ein innovatives Fügeverfahren von Blechen. Internet: [www.stoege.com/de/schraubautomaten-fuer-fliesslochformende-schrauben.html](http://www.stoege.com/de/schraubautomaten-fuer-fliesslochformende-schrauben.html). Zugriff am 13.10.2023



**T h o m a s   G ö t z , M . S c .**

Foto: Autor

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 970-1572  
thomas.goetz@ipa.fraunhofer.de  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)



**Prof. Dr.-Ing. M a r c o   S c h n e i d e r**

Foto: Fraunhofer IPA

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg  
Badstr. 24, 77652 Offenburg  
Tel. +49 781 / 205-4940  
marco.schneider@hs-offenburg.de  
[www.hs-offenburg.de](http://www.hs-offenburg.de)