

Prozess- und Konstruktionsrichtlinien für die kosteneffiziente Fertigung

3D gekrümmte, lasttragende Sandwichstrukturen

Am Beispiel einer Versuchsgeometrie konnte gezeigt werden, dass Sandwichstrukturen mit einem hohen Leichtbaupotenzial auch in grossen Stückzahlen gefertigt werden können. Entscheidend für gute mechanische Eigenschaften sind die geeignete Materialkombination sowie eine optimale Prozessführung.

Prof. Dr. Markus Henne,
Hochschule für Technik
Rapperswil HSR,
mhenne@hsr.ch
Prof. Dr. Michael Niedermeier,
Hochschule Ravensburg-Weingarten,
niedermeier@hs-weingarten.de

Schalenförmige strukturell belastete Bauteile mit hohen Leichtbauanforderungen werden vorzugsweise in Sandwichbauweise gefertigt. Sandwichaufbauten zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit, hohes Energieabsorptionspotenzial und gleichzeitig tiefes Gewicht aus. Dreidimensional gekrümmte Sandwichbauteile werden heute in relativ aufwändigen Herstellungsverfahren gefertigt, welche viel Handarbeit

in Maschinenbau und in der Automobilindustrie.

Prozess- und Materialwahl

Als Fertigungsverfahren wird ein Pressprozess vorgeschlagen. Dabei wird ein leichter und schubsteifer Schaumkern in einem Arbeitsschritt mit festen und steifen Deckschichten umgeformt und verpresst. Gemäss Abbildung 2 erfolgt die Fertigung in 4 Schritten:

ein schalenförmiges Bauteil gewählt, welches typische Geometrielemente aus technischen Anwendungen enthält (Abb. 3). Diese sind eine rechteckige Tasche mit unterschiedlich geneigten Flanken (15°, 30°, 45°, 60°), ein sphärischer Bereich (Kugelkalotte), sowie ein Hutprofil (Sandwichträger), welches quer durch die Sandwichplatte verläuft.

Als Kernmaterial kommen Strukturschäume der Firma Alcan Airex zur Anwendung. Die Schäume sind thermoformbar und für strukturelle Bauteile geeignet. Folgende Schäume werden eingesetzt:

- PVC-Schaum Airex C70.75 mit einem Raumgewicht von 80 kg/m³
- PVC-Schaum Airex C70.55 mit einem Raumgewicht von 55 kg/m³
- PET-Schaum Airex T91.150 mit einem Raumgewicht von 150 kg/m³
- PET-Schaum Airex T90.320 mit einem Raumgewicht von 320 kg/m³.

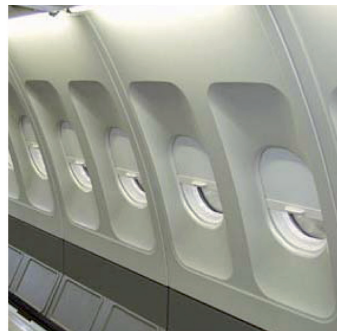


Abb. 1: Bilder von typischen Sandwichbauteilen. Links: Führerstand von einem Hochgeschwindigkeitszug [1]. Mitte: Innenverkleidung eines Flugzeuges [2]. Rechts: Unterelement aus dem Automobilbau [3].

beinhalten, zeit- und kostenintensiv sind und somit vorwiegend für kleine und mittlere Stückzahlen geeignet sind. Aus diesen Gründen hat sich die Sandwichbauweise bisher vorwiegend für mittlere Stückzahlen durchgesetzt. Beispiele dafür sind Bauteile aus dem Flugzeug- und Bootsbau, Rotorblätter von Windkraftanlagen und Artikel aus dem Sportbereich (Abb. 1).

Ziel dieses Beitrags ist es, einen Fertigungsprozess für dreidimensional gekrümmte Sandwichstrukturen aufzuzeigen, der ein hohes Automatisierungspotenzial und kurze Prozesszeiten aufweist und somit kosteneffizient ist. Ein Prozess dieser Art macht die Sandwichtechnologie für ein viel breiteres Anwendungsgebiet attraktiv. Mögliche Anwendungen finden sich beispielsweise im klassi-

1. Vorwärmen von Schaum, Deckschichten und Werkzeug
2. Umformung auf die gewünschte Geometrie und Konsolidierung
3. Halten – Chemische Vernetzung/ Abkühlen
4. Entformung des fertigen Bauteils.

Als Versuchsgeometrie wird ein plat-

Alle Schaumplatten weisen eine Ausgangsdicke von 12 mm auf. Weitere Informationen und die Datenblätter finden sich auf der Homepage von Alcan Airex [4].

Für die Deckschichten werden glasfaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt. Aufgrund der Zielsetzung

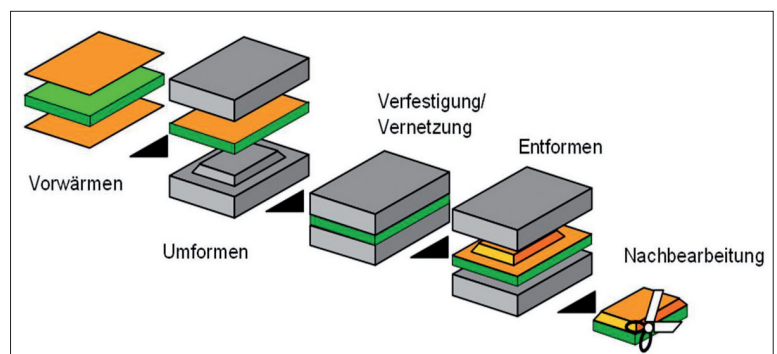


Abb. 2: Schema Fertigungsprozess.

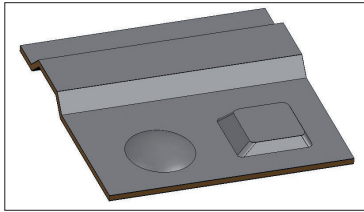


Abb. 3: Versuchsgeometrie.

von hohen Stückzahlen und tiefen Kosten bieten sich folgende Materialien an:

■ GMT: Glasmattenverstärkter Thermoplast. Typischerweise werden Glasfasern mit einer Polypropylenmatrix kombiniert. Für mechanisch belastete Strukturen kommt das höherwertige GMTex mit gerichteten Langfasern zum Einsatz.

■ SMC: Sheet Moulding Compound. Typischerweise Glasfasermatten, welche mit einer hochgefüllten reaktiven Polyestermatrix getränkt sind.

■ Nasspressen: In diesem Falle werden geschnittene Glasfasermatten mit einem niedrigviskosen, aber hochreaktiven Harzsystem im Pressvorgang imprägniert. Beispiele von Harzsystemen sind Polyurethan-, Epoxid- und Polyesterharze.

Anstelle von Glasfasern könnten auch Naturfasern als Verstärkung eingesetzt werden. Kohle- oder Aramidfasern bieten sich aus Kostengründen weniger an. In der Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Deckschichtmaterialien zusammengefasst.

Alternativ könnten duroplastische Prepregmaterialien oder unverstärkte thermoplastische Materialien verarbeitet werden. Prepregmaterialien wurden aufgrund der hohen Kosten, unverstärkte Thermoplaste wegen den verhältnismässig tiefen mechanischen Eigenschaften nicht berücksichtigt.

In den Prozessversuchen werden die unterschiedlichen Struktur-schäume mit den Deckschichtmaterialien kombiniert. Die Schichtmaterialien werden dabei vorgewärmt und unter Temperatur und Druck unter einer Presse konsolidiert. Untersucht wird neben der Materialkombination der Einfluss der Temperatur (Vorwärmtemperatur Schaum, Vorwärmtemperatur Deckschicht, Werkzeugtemperatur), des Press-

druckes und der Haltezeit beim Pressen. Aufgezeichnet werden die Kompression des Verbundes im Pressprozess sowie die Dicke nach der Rückverformung.

Im Anschluss an die Probenherstellung werden die Bauteile hinsichtlich der Oberflächenqualität optisch bewertet. Zudem werden den Versuchsplatten streifenförmige Prüfkörper entnommen und in

materialien empfohlen werden. Bei den dichteren Schäumen ist die Oberflächengüte leicht besser, aber dennoch ausschliesslich für Bauteile im Nichtsichtbereich geeignet.

Die Versuche mit GMTex und mit dem Nasspressverfahren zeigten vielversprechende Resultate. Überraschend war insbesondere, dass die Oberflächenqualität der GMTex Deckschichten, welche mit gerichte-

Typ	Produkt	Lieferant	Dicke
GMT	Slimtec 1.5mm	Quadrant	1.5 mm
GMTex	X140 B118-C1	Quadrant	1.8 mm
SMC	HUP 13/28 RN-7035/PJ(30926)	Polynt	ca. 2.5 mm
Nasspressen	Fasermatte 502.0450 Polyesterharz 18536.0000 Härter 145.1303	SwissComposite	ca. 2 mm

Tabelle: Übersicht über die verwendeten Deckschichtmaterialien.

einem 4-Punkt-Biegeversuch mechanisch geprüft.

Experimentelle Ergebnisse

Die Oberflächenqualität ist abhängig von der Materialkombination und variiert stark. Deckschichten aus SMC und GMT führten zu einer mangelhaften Oberflächenqualität. Die Oberfläche wies Poren, raue Stellen und Unregelmässigkeiten auf. Die Ursache liegt bei den tiefen Prozessdrücken während des Pressvorgangs, welche deutlich unter den 200 bis 300 bar liegen, wie sie optimal für das Fließpressen dieser Ma-

ten Glasfasern verstärkt sind, äusserst gute Resultate zeigt (Abb. 4). Kritisch sind scharfkantige Übergänge bei der rechteckigen Tasche. Die Kanten werden nicht mit dem Deckschichtmaterial aufgefüllt.

Der Einsatz einer Veredlungsfolie auf der Deckschicht oder das Auftragen von Oberflächenschichten im Werkzeug (in-mould coating) führte zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengüte. Die Oberflächenqualität kann zudem nachträglich durch eine mehrschichtige Lackierung inklusive Füller verbessert werden, was jedoch weitere Prozessschritte und somit Mehrkosten mit sich zieht.

Die mechanische Prüfung erfolgt in einem 4-Punkt Biegeversuch nach ISO 53293. Bei Sandwichelementen treten verschiedene Versagensformen auf, welche in [5] übersichtlich dargestellt sind. Zusammengefasst beeinflussen die Zug-, Druck- und Schubfestigkeiten der Werkstoffe selber, sowie die Qualität der Anbindung der einzelnen Schichten untereinander die Festigkeit. Zusätzlich können Instabilitäten in druckbelasteten Deckschichten zum Versagen des Bauteils führen. Die Anbindung der Deckschichten erwies sich bei geeigneter Prozessführung (siehe Kapitel «Modellbildung») als unkritisch. In keinem Fall ist eine Ablösung der Deckschicht vom Kern aufgetreten.

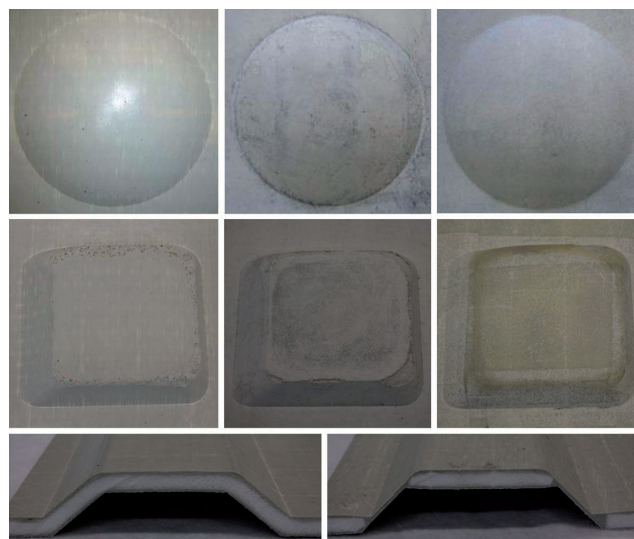


Abb. 4: Obere und mittlere Reihe: Oberflächengüte der Deckschichten aus GMTex (links), SMC (Mitte) und Nasspressen (rechts). Unten: Varianten eines Randabschlusses.

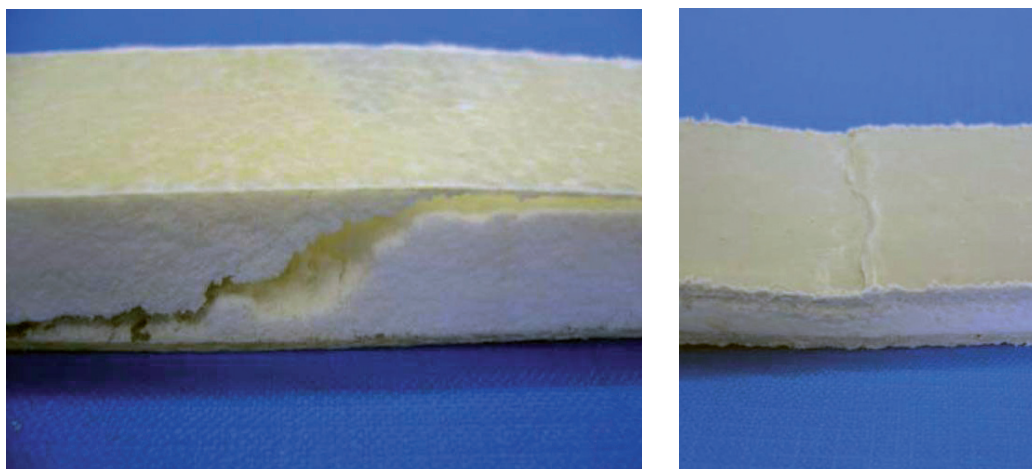


Abb 5: Biegeversuch nach ISO 53293.

Das Versagen ist entweder durch einen Schubbruch im Kernmaterial oder durch das Druckversagen der Deckschicht erfolgt (Abb. 5).

Es hat sich gezeigt, dass die Verformbarkeit des Schaums unabhängig von den hier vorgeschlagenen Deckschichtmaterialien einen deutlichen Einfluss auf die Schadenstoleranz des Bauteils hat. Bei spröden Kernmaterialien tritt das Versagen schlagartig auf, bei zäheren Kernmaterialien konnte nach einer ersten Schädigung von Deckschicht oder Kern eine sehr hohe Restfestigkeit des Sandwichs nachgewiesen werden. Das Energieabsorptionspotenzial (Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve in Abbildung 6), welches bei crash-relevanten Strukturen eine Rolle spielt, ist im Falle eines verformungsfähigen Kernmaterials erwartungsgemäss deutlich höher.

Modellbildung

Abbildung 7 zeigt das typische Kompressionsverhalten von Struktur-schäumen [6]. Anhand des mechanischen Verhaltens können der Einfluss der Vorwärmtemperatur und des Prozessdruckes abgeleitet werden.

Phase 1: Der Schaum zeigt ein annähernd linear-elastisches Verhalten. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Schaum in diesem Bereich nicht geschädigt wird.

Phase 2: Die Luft wird aus den Zellen gepresst, wobei die Zellwände instabil werden und kollabieren. In diesem Bereich erfährt der Schaum eine grosse Verformung bei geringem Druckanstieg. Es ist zu erwarten,

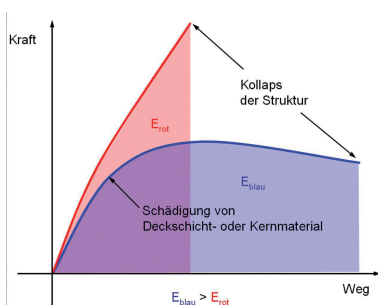


Abb 6: Kraft-Weg-Diagramm bei sprödem (rot) und verformungsfähigem Kernmaterial (blau). Die Fläche E unter der Kurve entspricht der Verformungsarbeit der Struktur.

dass erste Schädigungen in der Schaumstruktur auftreten, welche dazu führen, dass sich der Schaum nach der Entlastung nicht komplett rückverformt.

Phase 3: Die Zellwände verdichten sich, das heisst der Druck steigt bei kleinerer Verformung relativ stark an. Die Luft ist aus den Zellen entwichen und Zellwände werden auf Block gepresst. Die Zellwände werden stark geschädigt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine optimale Anbindung

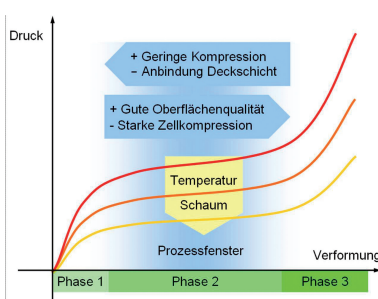


Abb. 7: Grafik mit Druckkurven von Schäumen und den optimalen Prozessfenstern.

der Deckschichten bei einem Prozessdruck in Phase 2 erreicht werden kann. In dieser Phase liegt ein genügend hoher Pressdruck vor, um einen Formschluss durch das Eindringen der Matrix aus der Deckschicht in die offenen Zellen des Schaums zu generieren, ohne dass der Schaum allzu stark geschädigt wird. In Abbildung 8 ist der Pressvorgang und die Anbindung der Deckschichten in Phase 1, 2 und 3 schematisch dargestellt.

Erkenntnisse

Aufgrund der experimentellen Ergebnisse und den Überlegungen bei der Modellbildung lassen sich folgende Prozess- und Konstruktionsrichtlinien für eine optimale Prozessführung ableiten:

Vorwärmtemperatur der Materialien:

- Bei thermoplastischen Deckschichten sollte die Vorwärmtemperatur möglichst hoch gewählt werden, um die Matrix zu verflüssigen. Limitierend ist hier die Schädigung von Matrix und Faser (insbesondere bei Naturfasern) durch den Temperatureinfluss und das Handling der teilweise verflüssigten Deckschichten.
- Bei duroplastischen Deckschichten ist die Vorwärmtemperatur weitgehend durch die chemische Reaktion der Vernetzung definiert.
- Beim Kernmaterial gilt es einen Kompromiss zu finden: Die Formbarkeit des Schaums nimmt mit höherer Temperatur zu, die Druckfestigkeit und somit die Widerstandskraft beim Konsolidieren nimmt ab. Bei zu tiefer Druckfestigkeit besteht die Gefahr, dass der Schaum kollabiert, ohne dass die Matrix in die offenen Zellen auf der Oberfläche des Schaums gepresst wird, was insbesondere bei den hochviskosen thermoplastischen oder hoch gefüllten duroplastischen Harzen auftreten kann.

Werkzeugtemperatur beim Pressvorgang:

- Die Werkzeugtemperatur spielt für den Umformvorgang eine untergeordnete Rolle, da die Deckschichten und der Schaumkern vorgängig temperiert werden.

■ Da die thermoplastischen Deckschichten (GMT, GMTex) nach dem Umformen durch einen Abkühlvorgang verfestigt werden, ist eine möglichst tiefe Werkzeugtemperatur anzustreben. Limitierend ist die Gefahr, dass die Deckschichten beim Kontakt mit dem Werkzeug zu schnell erstarren und der Umformvorgang nicht vollständig stattfinden kann.

■ Bei duroplastischen Deckschichten sollte die Werkzeugtemperatur so gewählt werden, dass die chemische Vernetzung optimal ablaufen kann.

Einfluss des Pressdrucks:

■ Grundsätzlich gilt die Regel, dass bei höherem Prozessdruck eine höhere Oberflächengüte erzielt wird.

■ Zu tiefer Pressdruck: Matrix wird nicht in die offenen Zellen an der Oberfläche des Schaums gepresst. Zellen werden nicht geschädigt.

■ Optimaler Pressdruck: Matrix des Deckschichtmaterials wird in die offenen Zellen an der Oberfläche des Schaums gepresst, was zu einer formschlüssigen Verbindung führt. Zellen der untersuchten Schäume werden kaum beschädigt (Abb. 9).

■ Zu hoher Pressdruck: Offene Zellen an der Oberfläche des Schaums werden stark komprimiert, das heisst es kann kein Formschluss durch das Eindringen der Matrix der Deckschichten in die Schaumporen entstehen. Zudem besteht die Gefahr der Zellschädigung im Schaumkern.

■ Ein höherer Prozessdruck führt zudem zu einer grösseren Rückverformung nach dem Pressvorgang, was einerseits zu Verformungen und

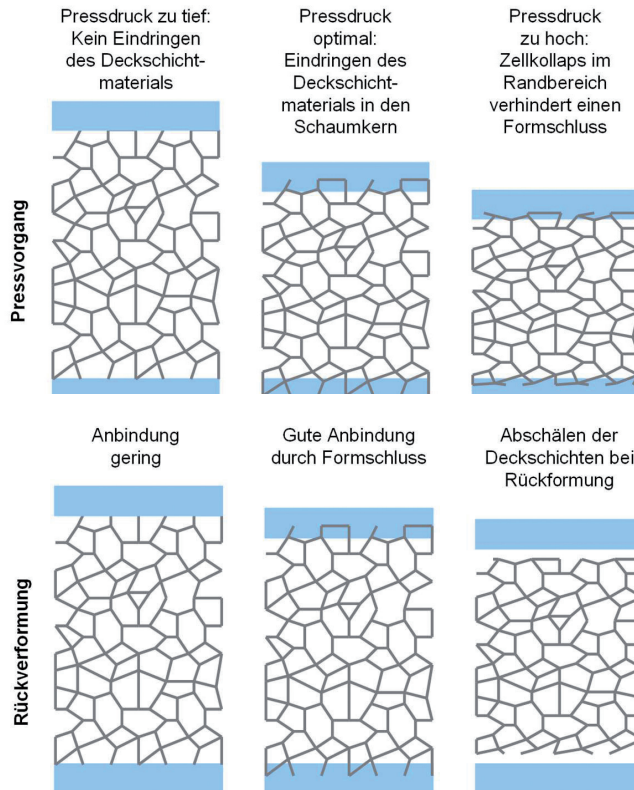


Abb. 8: Modell des Verhaltens der Deckschicht und der Zellstruktur im Pressvorgang.

Spannungen im Bauteil und andererseits zur Ablösung der Deckschichten führen kann.

Haltezeit nach dem Pressen:

■ Die Haltezeit ist bei thermoplastischen Materialien abhängig von der Wärmeabfuhr durch das Werkzeug und der damit zusammenhängenden Abkühlgeschwindigkeit und Verfestigung des Werkstoffs.

■ Bei duroplastischen Systemen muss genügend Zeit für die Vernetzung (chemische Reaktion) vorhanden sein.

Konstruktionsrichtlinien:

■ Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Schaumdicke über das gesamte Bauteil konstant bleibt. Dies hat zur Folge, dass beim Pressvorgang eine einigermaßen gleichmässige Kompression des Schaums auftritt. Somit wird auch die Rückverformung nach dem Pressen gleichmässig ausfallen, das heisst es werden weniger Verwerfungen und innere Spannungen entstehen, welche zu einem Bruch im Schaum oder zur Abschälung der Deckschichten führen können.

■ Es hat sich gezeigt, dass die Bauteilgeometrie möglichst weich gestaltet werden sollten. Scharfkantige geometrische Übergänge führen einerseits zu hohen Verformungen im Schaumkern und der Deckschicht, was auch zu einer Abminderung der Oberflächengüte in den betroffenen Bereichen führt.

■ Randabschlüsse bei Sandwichbauteilen werden üblicherweise durch ein Zusammenführen der Deckschichten realisiert. Mit dem vorgestellten Pressverfahren führt dies zu Problemen, da die Rückverformung des Schaums nach dem Pressvorgang im Randbereich nicht stattfinden kann. Hier müssen neue prozesstechnische Lösungen gefunden werden, um diese Schwierigkeit zu umgehen.

Ausblick

Die Versuche wurden im Rahmen von Studienarbeiten von den HSR Ingenieuren Ramon Hüppi, Lukas Alig und Bernhard Egger erarbeitet. In diesem Beitrag konnten die Grundlagen für die Prozessführung von gepressten Sandwichbauteilen dargestellt werden. Detailliertere Angaben betreffend konstruktiver Lösungen am Bauteil (Randabschlüsse, Integration von Krafteinleitungselementen) und der genauen Prozessführung müssen als weiterführende Arbeit an einem konkreten Bauteil erarbeitet werden.

Quellenverzeichnis

[1] www.alcancompositestructures.com
 [2] www.lufthansa-technik.de
 [3] www.rieter.com
 [4] www.alcanairex.com
 [5] Kopp G., Kuppinger J., Friedlich H. E., Henning F.: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau, Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 04/2009 Jahrgang 111
 [6] Ashby M. F., Jones D. R. H.: Engineering Materials 2 – An Introduction to Microstructures, Processing and Design, Butterworth-Heinemann, 2007.

