

Bernd-Arno Behrens, Sven Hübner, Hendrik Vogt, Christian Stein, Martin Keunecke

Einflüsse auf die Oberflächenqualität von Organoblechbauteilen im Thermoformprozess



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2022

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2022

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2022

eISBN 978-3-7369-6532-4



Einflüsse auf die Oberflächenqualität von Organoblechbauteilen im Thermoformprozess

Bernd-Arno Behrens¹, Sven Hübner¹, Hendrik Vogt^{1a}, Christian Stein², Martin Keunecke²

¹Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

²Fraunhofer-Institut für Schicht und Oberflächentechnik, Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

^avogt@ifum.uni-hannover.de

Einleitung

Um den CO₂-Ausstoß von PKW durch Leichtbaustrategien merklich zu verringern, muss der Leichtbaugedanke vermehrt Einzug in die Großserie halten. Die Organoblech-Technologie zeichnet sich durch ein hohes Leichtbaupotenzial und vor allem effiziente Verarbeitungsverfahren aus. In den letzten Jahren wurden erhebliche Anstrengungen sowohl in der Wissenschaft, aber auch der Wirtschaft unternommen, die Umformung dieser Halbzeuge zu beherrschen. Inzwischen wird der Prozess gut beherrscht und verstanden [Lan12, Obe10, Wac12], so dass eine verbreitete Umsetzung in die Serienfertigung zu erwarten ist. Allerdings treten mit steigender Bauteilkomplexität auch zunehmend unzureichend konsolidierte (\approx verdichtete) Bauteile bzw. Bauteilbereiche auf, die unter anderem das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen. Die unzureichend konsolidierten Bereiche sind auf eine schnelle Auskühlung der Organobleche während der Umformung zurückzuführen und erschweren somit den Einsatz. Trotz optisch ansprechender Ästhetik des Materials bei guter Konsolidierung wird somit ein Einsatz im Sichtbereich verhindert.

In diesem Zusammenhang wird am Beispiel eines Thermoformprozesses aufgezeigt, welchen Einfluss die verschiedenen Prozessparameter auf die Konsolidierungsqualität haben. Dabei werden für signifikante Parameter Haupteffekte und Wechselwirkungen bestimmt. Zudem wird ein Ausblick gegeben, wie die Konsolidierungsqualität weiter gesteigert werden kann.

Thermoformprozess und Versuchsaufbau

Faserverstärkte Thermoplaste bieten aufgrund ihrer Wiederaufschmelzbarkeit die Möglichkeit auf konventionellen Umformpressen umgeformt zu werden, indem sie über ihre Schmelztemperatur erwärmt, geformt und wieder abgekühlt werden [Beh14]. In den letzten Jahren haben sich vor allem bereits imprägnierte und konsolidierte Platten mit Glasgewebeerstärkung und einer Polyamid-6-Matrix (PA6-Matrix) durchsetzen können. Diese Halbzeuge werden häufig als Organoblech bezeichnet. Als organisch wird dabei die polymere Matrix bezeichnet. Der Begriff Blech bezieht sich dabei sowohl auf die Form des Halbzeugs als ebene Platte als auch auf die Verarbeitungsverfahren, die denen der Blechverarbeitung sehr ähneln [Obe10]. Bei der Herstellung von Organoblechen werden zu Beginn ebene Halbzeuge aus mehreren Lagen Glasgewebe und PA6-Folie oder -Masse entweder in einem Plattenwerkzeug oder für die Großserienfertigung in einer Bandpresse verpresst. Dabei wird das PA6 aufgeschmolzen und unter Druck das Glasfasergewebe imprägniert. Anschließend wird der Verbund abgekühlt, während der Konsolidierungsdruck noch wirkt, so dass ein verdichtetes Halbzeug, ohne Leerstellen und hoher Oberflächengüte entsteht [Nei14, Obe10].

Die Formgebung dieser Halbzeuge erfolgt, indem sie in einem Ofen über die Schmelztemperatur (ca. 40-60 °C oberhalb T_S ; ca. 260 °C für PA6) erwärmt und anschließend in einem Umformwerkzeug mit einer Temperatur weit unterhalb der Schmelztemperatur ($T_{WZ} = 80$ bis 120 °C) umgeformt werden. Überschreitet der Kunststoff im Ofen die Schmelztemperatur, ‚loftet‘ das Organoblech, d.h. die verwebten, in der Kunststoffmatrix eingeschlossenen Fasern federn teilweise in ihre ursprüngliche gerade Form zurück. Dieses erwärmte Organoblech wird dann in das Umformwerkzeug transferiert und dort umgeformt. Schließt das Werkzeug im UT (unterer Totpunkt) wird allseitig Druck auf das Organoblech ausgeübt und so das geloftete Material komprimiert. In diesem umgeformten und komprimierten Zustand erstarrt die Kunststoffmatrix und das Organoblech wird rekonsolidiert. Der Ablauf des Verarbeitungsvorgangs ist in Bild 1 dargestellt. Um eine Rekonsolidierung mit hoher Qualität zu erreichen muss die Kunststoffmatrix bis zum Erreichen des UT über der Schmelztemperatur bleiben, da nur dann die Rekonsolidierung des gelofteten Materials unter Druck erfolgen kann [Wak99, Nei14].

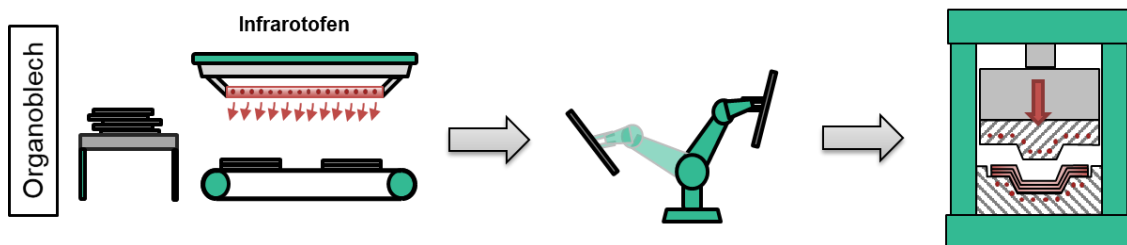


Bild 1: Prozessroute zur Umformung von Organoblechen

Um den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Rekonsolidierung von Organoblechen im Thermoformprozess zu untersuchen, wurde das in Bild 2 dargestellte Versuchswerkzeug konstruiert und gefertigt. Das Werkzeug wurde dabei so ausgelegt, dass mittels der Werkzeugeinsätze unterschiedliche Radien und Flankenwinkel eingesetzt werden können. In den hier dargestellten Untersuchungen hatten die äußeren Werkzeugeinsätze der Matrize einen Radius von 10 mm. Der korrespondierende Radius am Stempel betrug 12 mm. Die Radien des mittleren Werkzeugeinsatzes betragen 5 mm und die gegenüberliegenden Radien am Stempel dementsprechend 7 mm. Die äußeren Flankenwinkel des Werkzeuges betragen 20° und die inneren 15°. Die Flankenwinkel sowie Radien des Versuchswerkzeuges wurden nach Konstruktionsvorgaben des Halbzeugherstellers umgesetzt und verringern somit den Einfluss von konstruktionsbedingten Störfaktoren auf die Rekonsolidierung. Zusätzlich wurde das Werkzeug mit insgesamt 16 Bohrungen für Heizpatronen versehen, um eine homogene Erwärmung der Aktivelemente gewährleisten zu können.

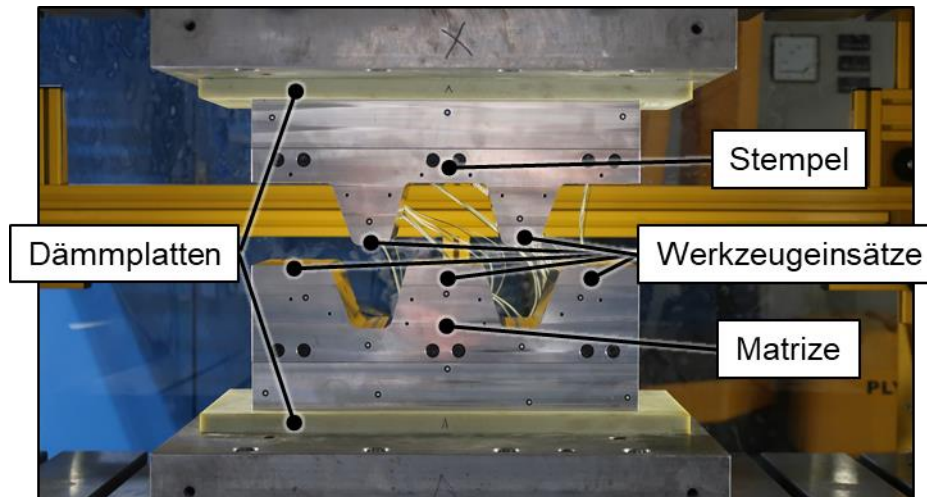


Bild 2: Versuchswerkzeug zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Prozessparameter auf die Rekonsolidierung von Organoblechen

Die eingesetzten Heizpatronen haben jeweils ein eigenes Thermoelement, so dass die Temperatur des Werkzeuges homogen eingestellt werden konnte. Die Zieltemperaturen die für den Thermoformprozess von Organoblechen mit PA6-Matrix eingestellt wurden, betragen 80 °C, 100 °C und 120 °C. Um zu vermeiden, dass lokal variierende Temperaturen des Werkzeuges einen Einfluss auf die Rekonsolidierung haben, wurde die Oberflächentemperatur des Werkzeuges bei den unterschiedlichen eingestellten Zieltemperaturen untersucht. Mit Hilfe einer Thermografiekamera des Typs VarioCAM HD der Firma Infratec GmbH wurde die Temperatur an den Aktivelementen aufgenommen. Wie in Bild 3 dargestellt, haben die Werkzeuge an den Aktivflächen eine homogene Temperatur.

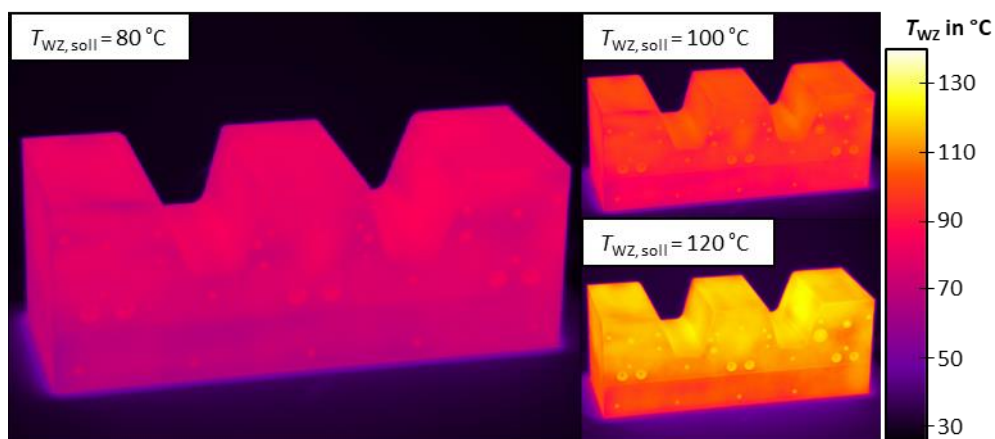


Bild 3: Ermittelte Temperaturverteilung der erwärmten Werkzeugelemente

Neben einer homogenen Erwärmung des Versuchswerkzeuges war ebenfalls ein reproduzierbarer Transport des Organoblechs vom Ofen in die Umformpresse notwendig. Da die Organobleche bei der Erwärmung über Schmelztemperatur nicht mehr stabil und formbeständig sind, wurde ein Spannrahmen zur Fixierung der Halbzeuge angefertigt. Dieser ist in Bild 4 dargestellt. Mit Hilfe der Rückhaltefedern wurde das Organoblech während des Erwärmungsvorgangs auf Spannung gehalten. Zudem konnte der Spannrahmen in die im Pressenraum aufgebaute Halterung gelegt werden, sodass die Organbleche stets positionsgetreu platziert wurden. Die Erwärmung der Organobleche wurde in einem Infrarot-

Ofen der Firma IBT.InfraBioTech GmbH durchgeführt. Die Umformung fand in einer hydraulischen Doppelständerpresse des Typs HD 250 der Firma Dunkes GmbH statt. Das Halbzeugmaterial wurde von der Firma Bond-Laminates GmbH bereitgestellt. Es handelt sich um den Typ dynalite 102-RG600(x)/47%. Die Fasern sind als Rovings aus Endlosfasern mittels Körperbindung miteinander verwoben. Der Faseranteil beträgt 47 %. Die Blechdicke betrug $s_0 = 2 \text{ mm}$.



Bild 4: Spannrahmen zum Transport der Organobleche vom Ofen in die Presse

Die hergestellten Bauteile wurden anschließend optisch untersucht. Dazu wurde das 3D-Profilometer des Typs VR-3200 der Firma Keyence verwendet. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die maximale Höhe der Oberflächentextur S_z als Oberflächenkennwert am geeignetsten ist, um den Einfluss auf die Rekonsolidierung zu prüfen. Der Untersuchungsbereich betrug jeweils $18 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$.

Einflüsse auf die Konsolidierungsqualität

Um den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Konsolidierungsqualität nach dem Thermoformen zu untersuchen, wurde mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung ein zusammengesetzter Wirkflächenversuchsplan erstellt. Dadurch können quadratische Zusammenhänge zwischen den betrachteten Parametern sowie Haupteinflussfaktoren und Wechselwirkungen ermittelt werden. In Voruntersuchungen wurde ermittelt, dass die Werkzeugtemperatur T_{WZ} und die Stößelgeschwindigkeit v_{St} mit der das Versuchswerkzeug geschlossen wird den signifikantesten Einfluss auf die Konsolidierungsqualität haben. Die ebenfalls untersuchte Stößelkraft F_{St} hat dagegen lediglich einen geringen Einfluss. Daher wurde der Wirkflächenversuchsplan wie in Bild 5 links dargestellt für die beiden Parameter v_{St} und T_{WZ} aufgestellt. Die Versuche mit den Parametern der Sternpunkte sowie der Würfelpunkte wurden jeweils dreimal wiederholt. Zur statistischen Absicherung wurden mit den Parametern des Zentralpunkts insgesamt fünf Wiederholungen durchgeführt. Die mit den Parametern hergestellten Bauteile wurden in den in Bild 5 rechts markierten Bereichen untersucht. Der Bauteilbereich R hatte während der Umformung zunächst Kontakt mit der Matrize. Der Bauteilbereich S hingegen war zuerst mit dem Stempel in Kontakt.

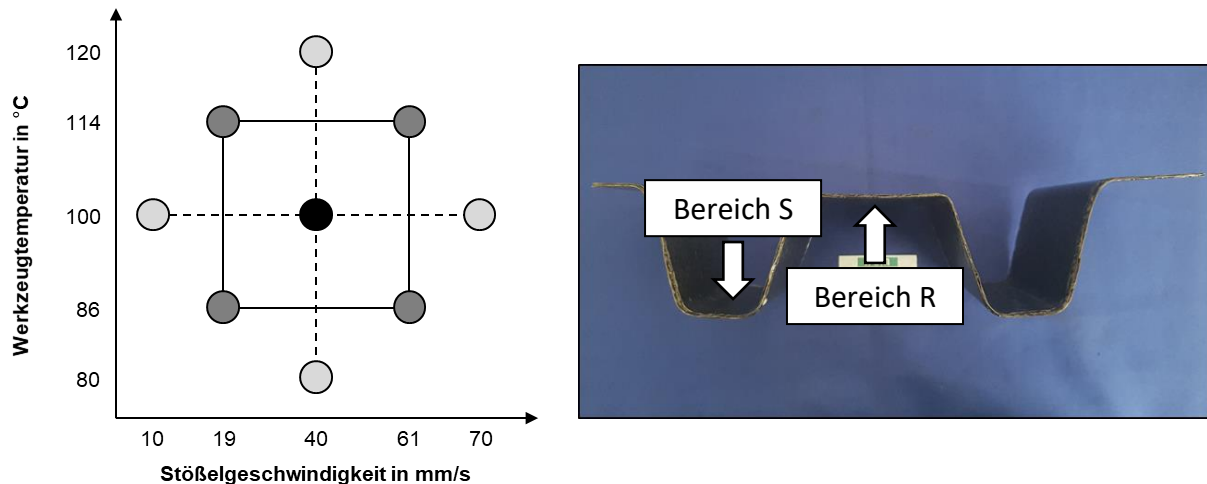


Bild 5: Zusammengesetzter Wirkflächenversuchsplan (links) und Beispielbauteil mit Untersuchungsbereichen (rechts)

In Bild 6 sind die aufgenommenen Oberflächen im Bauteilbereich R für den Zentralpunkt sowie die Sternpunkte dargestellt. In den Aufnahmen ist bereits zu erkennen, dass eine hohe Stößelgeschwindigkeit und eine hohe Werkzeugtemperatur sich positiv auf die Konsolidierungsqualität auswirken. Bei $T_{WZ} = 80\text{ °C}$ sind eine Vielzahl von Oberflächendefekten sichtbar. Bei einer Steigerung der Werkzeugtemperatur auf 100 °C nimmt die Anzahl der Defekte ab wobei mit steigender Stößelgeschwindigkeit ebenfalls weniger Oberflächenfehler auftreten. Die geringste Anzahl an Defekten tritt bei $T_{WZ} = 120\text{ °C}$ und $v_{st} = 40\text{ mm/s}$ auf.

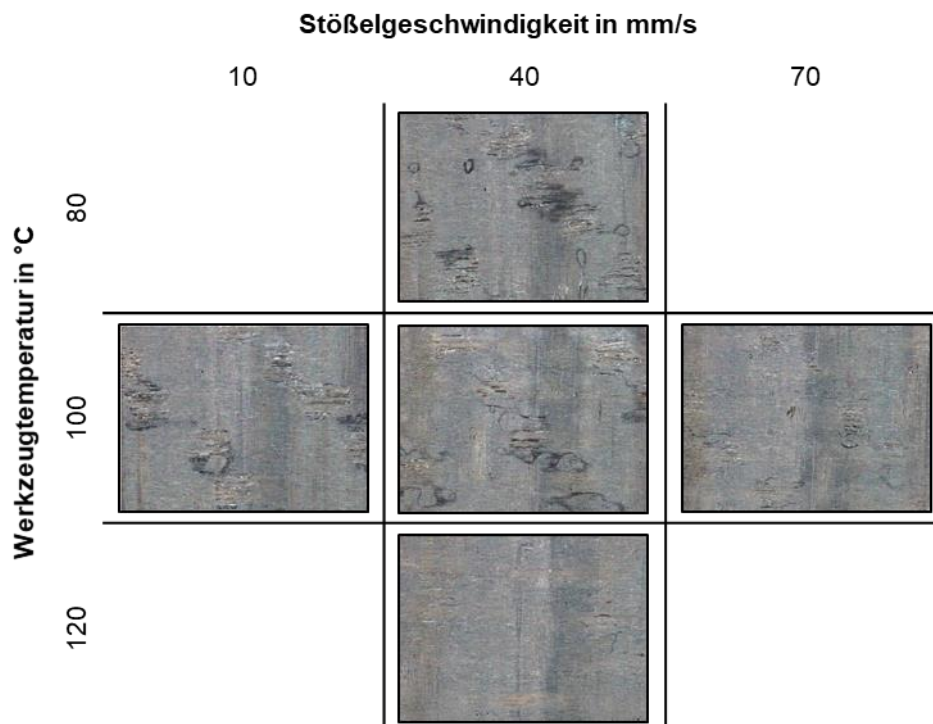


Bild 6: Oberflächenaufnahmen des untersuchten Bauteilbereichs R in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur und Stößelgeschwindigkeit

Mit Hilfe der in Bild 7 dargestellten Haupteinflussdiagramme für den Bauteilbereich R (links) und den Bauteilbereich S (rechts), ist es möglich den Einfluss der beiden Untersuchungsparameter T_{WZ} und v_{st} genauer zu betrachten. Wie bereits aus den

Oberflächenaufnahmen in Bild 6 entnommen, hat die Werkzeugtemperatur im Bauteilbereich einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenqualität. Mit steigender Werkzeugtemperatur sinkt die ermittelte maximale Höhe der Oberflächentextur S_z . Die Stößelgeschwindigkeit hat dagegen keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenqualität im Bauteilbereich R. Für den Bereich S ist die Signifikanz der Stößelgeschwindigkeit dagegen höher. Mit steigender Geschwindigkeit v_{st} sinkt der Kennwert S_z wodurch von einer besseren Rekonsolidierung ausgegangen werden kann. In diesem Bauteilbereich hat die Werkzeugtemperatur keinen kennzeichnenden Einfluss.

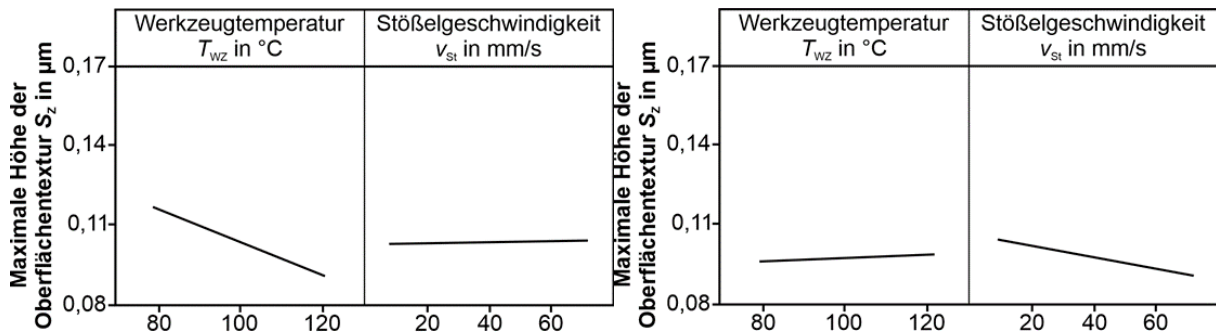


Bild 7: Haupteinflussdiagramme der Parameter Werkzeugtemperatur und Stößelgeschwindigkeit für die maximale Höhe der Oberflächentextur S_z in den Bauteilbereichen R (links) und S (rechts)

Die Erkenntnisse konnten durch die Auswertung der Pareto-Diagramme für die beiden Bereiche bestätigt werden. Diese sind in Bild 8 dargestellt. Mit Hilfe von Pareto-Diagrammen wird die statistische Signifikanz für die verschiedenen Prozessparameter ermittelt. Liegt ein Parameter über dem Signifikanzwert, in diesem Fall 2,035, hat dieser einen bedeutsamen Einfluss auf das Ergebnis. Für den Bauteilbereich R wird der Signifikanzwert lediglich von der Werkzeugtemperatur überschritten. Die Stößelgeschwindigkeit und die Wechselwirkung aus den beiden Parametern haben dagegen keinen charakteristischen Einfluss. Für den Bauteilbereich S liegt lediglich die Stößelgeschwindigkeit über dem Signifikanzniveau. Allerdings mit einem deutlich geringeren Wert als die Werkzeugtemperatur in Bereich R. Die Geschwindigkeit des Stößels hat somit einen weniger ausgeprägten Einfluss auf die Konsolidierungsqualität in Bereich S als die Werkzeugtemperatur in Bereich R.

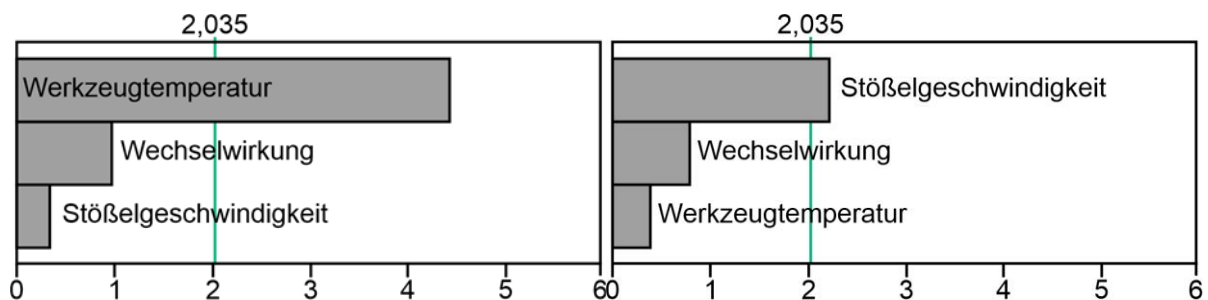


Bild 8: Pareto-Diagramme der untersuchten Prozessparameter für die Bauteilbereiche R (links) und S (rechts)

Aus den Voruntersuchungen und den Erkenntnissen aus dem statistischen Versuchsprogramm lässt sich somit festhalten, dass die Werkzeugtemperatur und die Stößelgeschwindigkeit den relevantesten Einfluss auf die Rekonsolidierung der Oberfläche von Organoblechen im Thermoformprozess haben. Allerdings ist die Höhe des Einflusses der verschiedenen Parameter abhängig von dem Bauteilbereich. In Bereichen die frühzeitig einen Kontakt mit dem Umformwerkzeug haben, so wie Bauteilbereich R, ist die



Werkzeugtemperatur der entscheidende Faktor. Dies beruht darauf, dass durch den schnellen Kontakt frühzeitig ein Wärmefluss zwischen Halbzeug und Werkzeug entsteht. Hohe Temperaturen des Werkzeuges verhindern dabei eine zu schnelle Auskühlung des Organoblechs. In Bereichen die dagegen erst später im Umformprozess Kontakt mit dem Werkzeug haben, ist die Stößelgeschwindigkeit entscheidend. Je höher die Stößelgeschwindigkeit, umso höher ist die Temperatur des Organoblechs bei Kontakt mit dem Werkzeug. Dies verhindert ein vorzeitiges Erstarren der PA6-Matrix wodurch der Kunststoff bei Erreichen von UT die Fasern ausreichend rekonsolidieren kann.

Wärmedämmende Werkzeugbeschichtungen

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist ein geringer Wärmestrom von Organoblech zum Werkzeug positiv für die Rekonsolidierung und somit die Oberflächenqualität der Bauteile. Ein Ansatz den Wärmestrom von Organoblechen in das Umformwerkzeug zu verringern, ist der Einsatz von wärmedämmenden Werkzeugbeschichtungen. Mit Hilfe dieser soll die Rekonsolidierung während des Thermoformens verbessert werden. Als wärmedämmende Schichten kommen verschiedene Schichtsysteme in Betracht. Zum einen können Werkzeugbeschichtungen auf Basis von Hartstoffen oder amorphem Kohlenstoff (a-C:H, auch als DLC für Diamond Like Carbon bezeichnet) eingesetzt werden. Die Mikrostruktur, die Zusammensetzung und der Aufbau von typischen PVD- und CVD-Hartstoffschichten kann durch den Beschichtungsprozess über weite Bereiche variiert und gezielt eingestellt werden. Insbesondere können mit geeigneten Schichtwerkstoffen vergleichsweise kleine Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden, die deutlich unter den Werten der konventionellen Werkstoffe liegen [Böt13]. Für amorphe Beschichtungen wie DLC wurden besonders geringere Wärmeleitfähigkeiten berichtet [Sha06, Bul00]. Die Wärmedämmwirkung von DLC- und Hartstoffschichten ist aber durch die typischen Schichtdicken im Bereich von einigen Mikrometern limitiert. Eine Möglichkeit zur Realisierung größerer Schichtdicken sind keramische Wärmedämmschichten. Zum Beispiel mittels thermischen Spritzens oder auch mittels Gasflusssputtern [Rös15] können poröse Aluminium- oder Zirkonoxid-Schichten mit Schichtdicken über 200 μm auf Stahlwerkzeuge aufgetragen werden. Um die wärmedämmende Wirkung von verschiedenen Schichten zu vergleichen, wurde die in Bild 9 links dargestellte Messapparatur verwendet. Das Messprinzip ist vergleichbar mit der menschlichen Erfahrung beim Berühren eines Gegenstands auf Raumtemperatur mit der wärmeren Hand. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Materials fühlt sich der Gegenstand entsprechend wärmer oder kälter an. Mittels einer Heizung und einem Regler wird die Messapparatur auf einer konstanten Temperatur gehalten. Anschließend wird die Messspitze mit einer definierten Kraft auf die Probe gedrückt. Aufgrund des Wärmeaustauschs zwischen Apparatur und Probe ändert sich die an der Messspitze aufgenommene Temperatur. Bei einer unbeschichteten Probe wird der in Bild 9 rechts blau dargestellte schematische Temperaturverlauf erreicht. Wird eine Probe mit einer wärmedämmenden Beschichtung verwendet, so reduziert sich der Wärmestrom von der Messspitze in die Probe. Die an der Messspitze gemessene Temperatur ist dementsprechend höher. Ein beispielhafter Verlauf hierfür ist in Bild 9 rechts in Rot dargestellt. Die Temperaturdifferenz hängt insbesondere von der Wärmedämmwirkung der Beschichtung ab. Als Messgröße wurde die Differenz der Thermospannung an der Messspitze verwendet. Diese berechnet sich wie folgt:

$$\Delta U_{th} [V] = U_{th,A} - U_{th,B} [V] \text{ bzw. } \varepsilon_{th} [] = \Delta U_{th} / U_{th,A} []$$

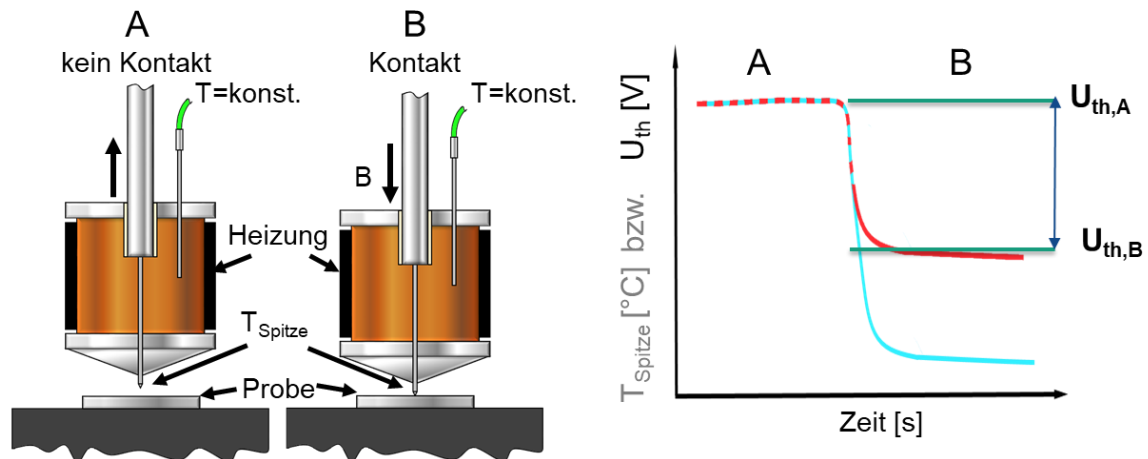


Bild 9: Messaufbau zum Vergleich der Wärmedämmwirkung von verschiedenen Beschichtungen und zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit (links) und schematischer Zeit-Temperatur-Verlauf an der Messspitze (rechts). Messgrößen: $\Delta U_{th} [V] = U_{th,A} - U_{th,B} [V]$ (Differenz der Thermospannungen an der Messspitze) bzw. $\varepsilon_{th} [] = \Delta U_{th} / U_{th,A} []$.

In Bild 10 ist die auf eine unbeschichtete Probe normierte Messgröße für verschiedene Beschichtungen dargestellt. Die unbeschichtete Probe besteht aus dem Stahl 100Cr6. Die Beschichtungen wurden ebenfalls jeweils auf eine Probe aus 100Cr6 aufgetragen. Somit wurde eine Beeinflussung durch unterschiedliche Grundwerkstoffe vermieden. Untersucht wurden thermisch gespritzte Aluminium- und Zirkonoxidschichten mit einer Schichtdicke von 200 µm, 400 µm und 800 µm. Es wurde ebenfalls eine mit Silizium und Sauerstoff modifizierte DLC-Beschichtung (a-C:H:Si:O) untersucht. Diese sogenannte SICON®-Schicht hatte eine Schichtdicke von 3 µm und zeichnet sich neben einer hohen Härte und Verschleißbeständigkeit durch ihre antiadhäsiven Eigenschaften, insbesondere auch im Kontakt mit Polymeren [Ste17], aus. Zudem wurde eine Chromnitrid-Schicht (CrN) mit einer Schichtdicke von ebenfalls 3 µm untersucht. Den höchsten Effekt auf das Messsignal zeigen die Zirkonoxidschichten. Bei diesen betrug die gemessene Temperaturdifferenz lediglich 30 % der initialen Differenz mit einem Prüfkörper ohne Beschichtung. Einen ähnlichen Effekt haben die Aluminiumoxidschichten mit einer Reduzierung der Temperaturdifferenz auf 45 % bis 50 %. Die thermisch gespritzten Schichten, unabhängig ob Aluminiumoxid oder Zirkonoxid, zeigen weiterhin lediglich eine geringe Abhängigkeit des Messsignals von der Schichtdicke. Das liegt in der Beschaffenheit der Messapparatur begründet. Eine Erhöhung der Schichtdicke führt bei dem gleichen Schichtwerkstoff zu einem entsprechend reduzierten Wärmedurchgangskoeffizienten und folglich zu einer besseren Wärmedämmwirkung, die sich bei der gewählten Messanordnung und bei dicken Schichten nicht im Messsignal abbildet. Die im Vergleich dazu dünnen SICON- und CrN-Schichten zeigen in den Messungen ebenfalls eine wärmedämmende Wirkung und eine klare Abhängigkeit von der Schichtdicke (siehe Bild 11). Die Differenz liegt in Abhängigkeit von der Beschichtung zwischen 70 % und 90 % im Vergleich zur Referenz mit einer unbeschichteten Probe.

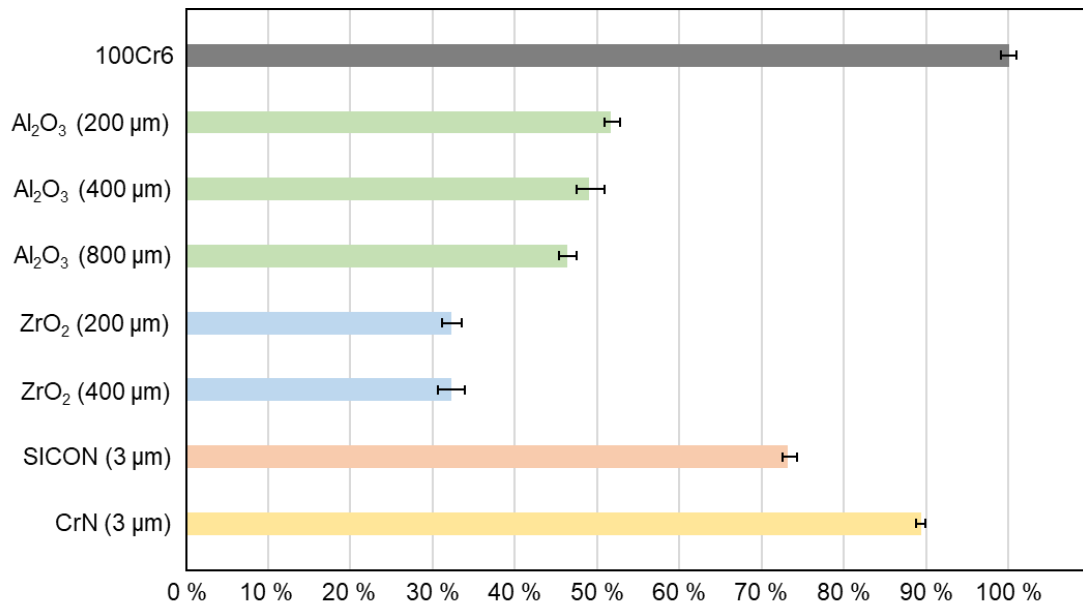


Bild 10: Normierte Messgröße $\Delta U_{th} [V] / \Delta U_{th} [V](100Cr6)$ für verschiedene Werkzeugbeschichtungen

Durch Kalibrierung der Messapparatur mit Standardproben kann die Wärmeleitfähigkeit von unbeschichteten Proben direkt bestimmt werden. Mit Hilfe eines Modells zur Eliminierung des Substrateinflusses kann mit einem geeigneten Probensatz ferner auch die Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung abgeleitet werden [LAM89]. Im Rahmen der Untersuchungen wurden SICON-Schichten mit gesteigerter Schichtdicke bis 18 µm hergestellt, die deutlich über die typische Schichtdicke im Bereich von 3 µm hinaus gehen. Die Erhöhung der Schichtdicke bewirkt eine Verkleinerung der Temperaturdifferenz bzw. der Messgröße ϵ_{th} , die mit der gesteigerten Wärmedämmwirkung einhergeht (Bild 11). Aus diesen Messungen wurde für SICON eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,78 W/mK bestimmt. Für die gespritzten ZrO₂-Schichten wurde mit einer modifizierten Auswertung eine Wärmeleitfähigkeit von 1,44 W/mK gemessen.

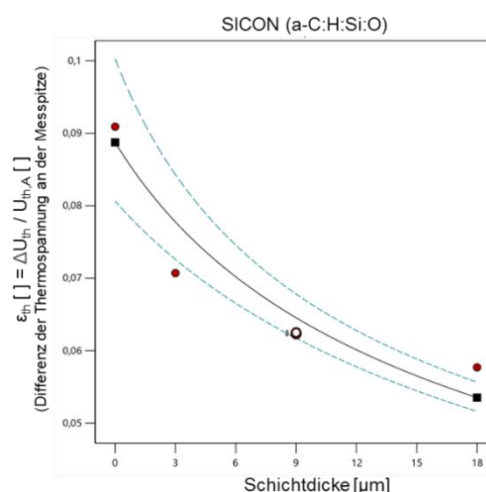


Bild 11: Differenz der Thermospannung an der Messspitze für SICON-Schichten verschiedener Dicke von 3 bis 18 µm auf Stahlsubstraten (100Cr6)

In Tabelle 1 sind die erwartbaren Wärmedurchgangskoeffizienten für einige der untersuchten Schichten aufgeführt.

Tabelle 1: Vergleich thermischer Eigenschaften der untersuchten ZrO₂ und SICON-Schichten.

Schichtsystem	Schichtdicke d_s [μm]	gemessene Wärmeleitfähigkeit λ_s [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]	Wärmedurchgangskoeffizient $k = \lambda_s/d_s$ [$\text{kW/m}^2\text{K}$]
SICON (a-C:H:Si:O)	3 (Standard)	0,78	260,0
	8 (gesteigert)		97,5
	18 (deutlich gesteigert)		43,4
ZrO ₂ (thermisch gespritzt)	200	1,44	7,2
	600		2,4

Keramische Wärmedämmschichten und modifizierte DLC-Schichten zeigen somit, dass Potenzial die Wärmedämmwirkung von Umformwerkzeugen zu steigern und somit den Thermoformprozess zu optimieren. Durch den Einsatz dieser Schichten ist es möglich die Rekonsolidierungsqualität zu steigern. Um dies zu verifizieren, wurden in folgenden Untersuchungen die Werkzeugeinsätze des in Bild 2 dargestellten Versuchswerkzeugs mit den ZrO₂-Beschichtungen versehen. Zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit und zur Reduktion von Werkstoffanhaftungen wurde zudem eine angepasste SICON-Deckschicht aufgetragen. Bild 12 zeigt das Kombinations-Schichtsystem auf einer Stahlprobe. Zur Demonstration der antiadhäsiven Eigenschaften wurde ein Wassertropfen aufgetragen, der einen hohen Kontaktwinkel von ca. 100° mit der Schichtoberfläche bildet.

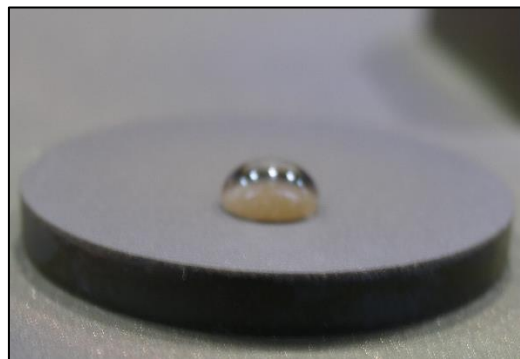


Bild 12: Kombinations-Schichtsystem: ZrO₂ (Wärmedämmung, 600 μm) + SICON-(antiadhäsiver Verschleißschutz, 3 μm) auf einer Stahlprobe (100Cr6). Wassertropfen zur Demonstration der geringen Benetzung der Oberfläche

In Thermoformversuchen wurden anschließend Bauteile hergestellt und die Konsolidierungsqualität bestimmt. Die Ergebnisse für den Bauteilbereich S sind in Bild 13 dargestellt. Durch den Einsatz der thermisch gespritzten ZrO₂-Schicht mit einer Schichtdicke von 600 μm sowie der SICON-Deckschicht mit 3 μm Dicke, wurde die Oberflächenqualität bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen verbessert. Insbesondere bei geringen Werkzeugtemperaturen wie Raumtemperatur und 80 °C zeigen diese Schichten einen positiven Effekt.

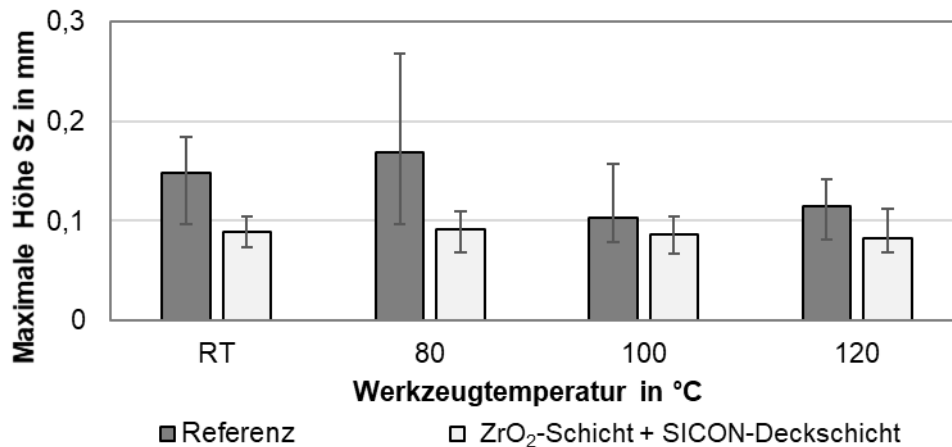


Bild 13: Vergleich der Oberflächenqualität im Bauteilbereich S nach der Umformung mit unbeschichteten (Referenz) und ZrO₂+SICON beschichteten Werkzeugeinsätzen (Thermisch gespritzt 600 µm + PACVD 3 µm)

Die Untersuchungen zeigen somit, dass wärmeisolierende Schichten zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität beitragen können. Ebenso bedeutet die Verbesserung bei geringen Werkzeugtemperaturen eine Steigerung der möglichen Taktzeit im Thermoformprozess. Durch eine reduzierte Werkzeugtemperatur kann die Haltezeit im Umformwerkzeug gesenkt und somit die Ausbringungsrates erhöht werden. In weiteren Untersuchungen muss noch ermittelt werden welche Verschleißbeständigkeit die ZrO₂-Schichten in Kombination mit der SICON-Deckschicht aufweisen und wie durch Nachbearbeitungsprozesse die Oberflächenqualität der beschichteten Werkzeugeinsätze verbessert werden kann.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20215N „Prozessstabilität bei der Organoblechumformung durch wärmeisolierende Werkzeugbeschichtungen“ der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (EFB) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programmes zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken der AiF und der EFB für die Förderung. Weiterer Dank gilt den Mitgliedsunternehmen des projektbegleitenden Ausschusses und ihren Vertretern für die Unterstützung des Projekts und die gute Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- [Beh14] B.-A. Behrens, S. Hübner, A. Neumann: Forming sheets of metal and fibre-reinforced plastics to hybrid parts in one deep drawing process. *Procedia Engineering* 81 (2014) 1608 – 1613
- [Böt13] P.H.M. Böttger, E. Lewin, J. Patscheider, V.Shklover, D.G. Cahill, R. Ghisleni, M. Sobiech: Thermal conductivity of hard oxynitride coatings, *Thin Solid Films*, Volume 549 (2013), Pages 232–238
- [Bul00] A. J. Bullen, K. E. O’Hara, D. G. Cahill, Thermal conductivity of amorphous carbon thin films, *Journal of Applied Physics* Volume 88 (2000), Page 6317
- [LAM89] Lambropoulos, J. C., Jolly, M. R., Amsden, C. A., Gilman, S. E., Sinicropi, M. J., Diakomihalis, D., and Jacobs, S. D. 1989. Thermal conductivity of dielectric thin films. *Journal of Applied Physics* 66, 9, 4230–4242.



- [Lan12] Lanxess: Kunststoff-Konstruktionen noch leichter auslegen - Airbaggehäuse in Organoblech-Hybridtechnik - Über 30 Prozent weniger Gewicht. 20.03.2012. URL: <https://lanxess.de/de/corporate/presse/presseinformationen/fachpresse/airbaggehaeuse-in-organoblech-hybridtechnik> (08.08.2017)
- [Nei14] M. Neitzel, et al.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [Obe10] C. Obermann: Komplexe Bauteile aus endlosfaserverstärkten Kunststoffen großserientauglich herstellen. MARTa Herford, 27.09.2010
- [Rös15] N. Rösemann, K. Ortner, J. Petersen, T. Schadow, M. Bäker, G. Bräuer, J. Rösler: Influence of bias voltage and oxygen flow rate on morphology and crystallographic properties of gas flow sputtered zirconia coatings, Surface and Coatings Technology, Volume 276 (2015) Pages 668-676
- [Sam15] M.K. Samani, X.Z. Ding, N. Khosravian, B. Amin-Ahmadi, Yang Yi, G. Chen, E.C. Neyts, A. Bogaerts, B.K. Tay: Thermal conductivity of titanium nitride/titanium aluminum nitride multilayer coatings deposited by lateral rotating cathode arc, Thin Solid Films, Volume 578 (2015) Pages 133-138
- [Sha06] M. Shamsa, W. L. Liu, A. A. Balandin, C. Casiraghi, W. I. Milne A. C. Ferrari: Thermal conductivity of diamond-like carbon films. Applied Physics Letters, Volume 89 (2006) Page 161921
- [Ste17] C. Stein, I. Bialuch, M. Weber, J. Zosel, J. Amberg, J. Wieser, K. Bewilogua, M. Keunecke, G. Bräuer: Tool coating systems and modified diamond-like carbon coatings (a-C:H:X) for polymer processing, SVC-TechCon, Conference Proceedings, 2017
- [Wac12] M. Wacker: Hochleistungsfaserverbunde in der Großserie: It works – let's do it. Fa. Oechsler. 17.10.2012
- [Wak99] M.D. Wakeman, T.A. Cain, C.D. Rudd, R. Brooks, A.C. Long: Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro-mechanical properties II. Glass-mat-reinforced thermoplastics, Composites Science and Technology 59 (1999) 709-726