

UNTERSUCHUNG VON KRITISCHEN PROZESSPARAMETERN BEI DER HERSTELLUNG VON TRAGENDEN CFK-FLUGZEUGSTRUKTUREN MIT DEM ZIEL DER PROZESSSTABILISIERUNG

N. Hoch, Fachhochschule Aachen, Luft- und Raumfahrttechnik, 52064 Aachen, Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Prozessstabilisierung des *Vacuum Assisted Process* (VAP®), einem vakuumgestützten Harzinfusionsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen im Flugzeugbau. Ziel ist die Untersuchung der Sensibilität der VAP-Technologie auf Schwankungen in der in die Faserlagen infiltrierten Harzmenge.

Durch experimentelle Messung des hydrostatischen Matrixdrucks während der Harzinfiltration sollen Erkenntnisse über die Matrixdruckentwicklung im VAP-Prozessablauf gewonnen werden. Dazu wird ein Versuchsaufbau erzeugt, in dem an mehreren Punkten über der Fließlänge der hydrostatische Matrixdruck mit kostengünstigen Drucksensoren gemessen werden kann.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass eine Beobachtung des Infiltrationsprozesses mittels Matrixdruckmessung möglich ist. Zum einen lassen sich Aussagen über die Position der Fließfront zu jedem Zeitpunkt der Infiltration treffen, zum anderen kann bestimmt werden, wann die Preform vollständig mit Harz benetzt ist und wann sich eine homogene Matrixverteilung eingestellt hat. Des Weiteren können während des Herstellungsprozesses Aussagen über die Qualität des Endbauteils hinsichtlich Schwankungen in der Laminatdicke getätigt werden. Eine Variation der infiltrierten Harzmasse wirkt sich direkt auf das Verhältnis zwischen den Lastanteilen aus, die nach der Infiltration von der Matrix bzw. von der Faser aufgenommen werden. Vor allem im Bereich hoher Faservolumenanteile führen geringe Mengenabweichungen des Infiltrationsmediums zu großen Änderungen in der Lastaufnahme. Dieses tiefere Prozessverständnis bietet Möglichkeiten zur Stabilisierung des *Vacuum Assisted Process* im Hinblick auf eine konstant hohe Bauteilqualität.

1. EINLEITUNG

Der von EADS entwickelte und patentierte Vacuum Assisted Process wird heute von der *Premium AEROTEC GmbH (PAG)* in Augsburg zur Serienherstellung zahlreicher tragender CFK Flugzeugbauteile verwendet. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses und Stabilisierung des Serienprozesses soll der Einfluss von Schwankungen in der infiltrierten Harzmasse experimentell untersucht werden.

1.1. Vacuum Assisted Process (VAP)

Der Herstellungsprozess beruht auf der Infiltration von Matrixmaterial durch Aufbringung von Unterdruck auf das Zweikammersystem.

Die innere Kammer beinhaltet das trockene Fasergerüst – die Preform. Diese ist zur späteren Entformbarkeit mit Abreißgewebe (9) und Trennfolie (10) bedeckt. Um die Matrix vom Angussprofil (2)

zur Preform zu leiten wird eine mediendurchlässige Fließhilfe (6) eingesetzt. Abgedichtet wird die innere Kammer durch eine semipermeable Membran (11), die mit Vakuumdichtband (1) auf dem Werkzeug (4) befestigt wird. Diese semipermeable Membran ist gasdurchlässig, jedoch Matrixmaterial undurchlässig.

Die äußere Kammer wird durch eine flexible Vakuumfolie (7) begrenzt. Sie ist gasundurchlässig und um den Umfang der Membran herum mit Vakuumdichtband auf dem Werkzeug abgedichtet. Die Fließhilfe (6) in der äußeren Kammer dient als Lüftungsgewebe. Sie hat die Funktion die durch die Membran aus dem Innenraum abgesaugten Gase entlang der Membranoberfläche zur Absaugung (5) durch eine Vakuumpumpe zu leiten.

Befindet sich die für einen gewünschten Faservolumenanteil (FVA) definierte Harzmasse in der Membrankammer, startet nach einer definierten Zeit der Aushärtprozess.

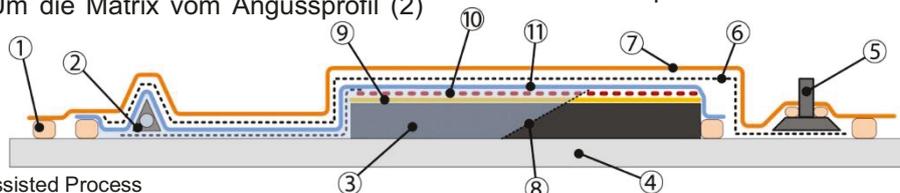


BILD 1. Vacuum Assisted Process

1-Vakuumdichtband, 2-Angussprofil, 3-Preform, 4-Werkzeug, 5-Vakuumpumpe, 6-Fließhilfe, 7-Vakuumfolie, 8-Fließfront, 9-Abreißgewebe, 10-Trennfolie, 11-VAP Membran

1.2. Matrixdruckverlauf in Infusionsverfahren

Eine Möglichkeit den VAP-Prozess während der Harzinfiltration zu überwachen bietet die Messung des hydrostatischen Matrixdrucks. Der unter der Vakuumfolie angelegte Vakuumdruck erzeugt in Kombination mit dem außerhalb herrschenden Umgebungsdruck eine Druckdifferenz, welche stets von der Faser-Matrix-Paarung aufgenommen wird.

Füllt also die Matrix so eben die evakuierten Räume zwischen den Fasern, wird dennoch die gesamte Druckdifferenz von der Faser aufgenommen. Bei zu viel infiltrierter Matrixmenge schwimmen die Fasern in der Matrix, die Matrix übernimmt nun die gesamte auf den Aufbau wirkende Druckdifferenz. Der Druckanteil der Faser wird im Folgenden als Kompaktierungsdruck (p_{Komp}), der der Matrix als Matrixdruck (p_M) bezeichnet.

Das Verhältnis der Komponenten lässt sich nach *Correia et al.* [1] wie folgt ausdrücken.

$$(1) p_{Komp} + p_M = p_{Atm} - p_{Vac} \quad (p_{Vac} \ll p_{Atm})$$

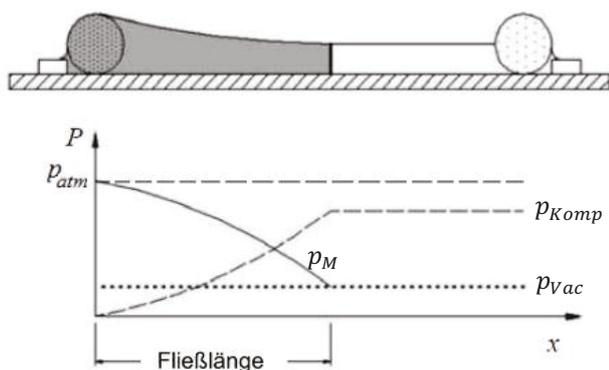


BILD 2. Entwicklung p_{Komp} und p_M im Vakuuminfusionsprozess nach *Correia et al.* [1]

Misst man den hydrostatischen Matrixdruck an verschiedenen Positionen über der Fließlänge der Probe, können zum einen Aussagen über die aktuelle Fließfrontposition während der Infiltration getroffen werden. Zum anderen lässt sich an der Verteilung der Druckkomponenten p_{Komp} und p_M erkennen, inwieweit eine homogene Matrixverteilung vor dem Aushärtprozess vorliegt. Anhand von Versuchen wird die Korrelation zwischen der Laminatdicke der ausgehärteten Platte und dem vor dem Aushärtvorgang gemessenen Matrixdruck hergestellt. Des Weiteren wird die Sensibilität des Prozesses auf Schwankungen in der infiltrierten Matrixmasse untersucht.

2. EXPERIMENTELLE MATRIXDRUCKMESSUNG

Um Schwankungen in der infiltrierten Matrixmasse zu untersuchen, werden drei Versuche unter ansonsten konstanten Rahmenbedingungen durchgeführt. Als Probenkörper dient stets eine

ebene Platte, die nach den Fertigungsvorschriften der PAG-Serienfertigung hergestellt wird.

2.1. Faser-Matrix-System

Bei dem für die Probe verwendeten Fasermaterial handelt es sich um ein $\pm 45^\circ$ Multiaxialgelege der Firma *Saertex GmbH & Co. KG* mit der Bezeichnung „X-C-272g/m²-1400mm SAERTow®“ [2].

Als Matrixmaterial kommt das Epoxidharz *HexFlow® RTM6* des Herstellers *Hercel* zum Einsatz. Dieses einkomponentige Harz ist bereits vorentgast und speziell für Harzinfusionsverfahren in der Luftfahrtindustrie entwickelt. Das isotherme Viskositätsverhalten von RTM6 wird in nachfolgender Abbildung gezeigt. Eine deutliche Viskositätszunahme über der Zeit kann ab einer Temperatur von 140°C vermerkt werden.

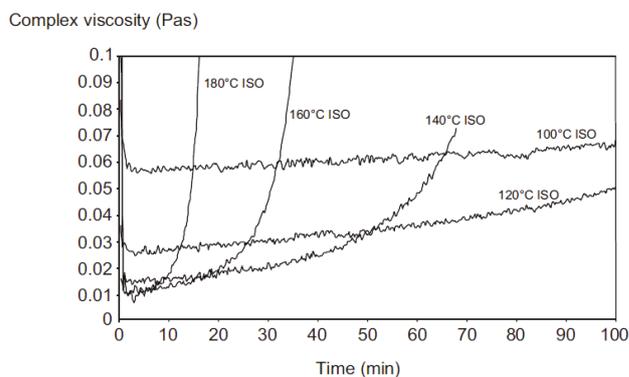


BILD 3. HexFlow® RTM6 Isotherme dynamische Viskosität [3]

Da der spätere Herstellungsprozess jedoch nicht isotherm abläuft, gibt TAB 1 einen genaueren Überblick, welche dynamische Viskosität während der Infiltration vorliegt.

	dyn. Viskosität 120°C [mPa*s]	dyn. Viskosität 2h bei 120°C [mPa*s]
T ₀	33	59
T ₀ + 2h30min 80°C	32	59
T ₀ + 5h00min 80°C	33	63

TAB 1. Viskositätsentwicklung über Lagerzeit bei 80°C [3] (T₀: Zeit zum Erreichen der 80°C)

Eine Lagerzeit des RTM6 bei 80°C von fünf Stunden wirkt sich demnach kaum auf die dynamische Viskosität im Infiltrationsprozess aus. Diese langsame Harzreaktion ermöglicht in der späteren Versuchsdurchführung große Prozesszeitfenster.

2.2. Messverfahren

Zur Messwerterfassung werden piezoresistive Sensoren *MPX2100AP* des Herstellers *Freescale Semiconductor* in Kombination mit dem Universalmessgerät *Ahlborn ALMEMO® 5690-2M* verwendet. Der praktisch ermittelte prozentuale Messfehler der Sensoren liegt bei einer Betriebstemperatur von 120°C bei $\pm 1,7\%$ v.E.

Um den hydrostatischen Matrixdruck in der Preform bestimmen zu können, muss die Matrix von lokalen Positionen im Aufbau zu Drucksensoren transportiert werden. Eine Herausforderung ist dabei, dass sich die Matrix in der inneren Kammer des VAP-Aufbaus befindet, während die Druckaufnehmer unter Umgebungsdruck außerhalb des Aufbaus arbeiten müssen.

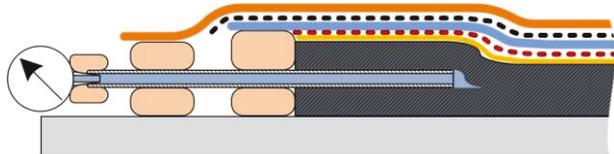


BILD 4. Integration der Transferrohre in die Preform

Voruntersuchungen mit verschiedenen Transferrohr-Geometrien ergeben, dass sich Rohre mit einem Innendurchmesser von 4mm zur Druckmessung solch hochviskoser Fluide eignen. Eine Beeinflussung der sich ausbreitenden Fließfront durch die eingebrachten Rohre konnte ebenfalls in Vorversuchen mit Zuckerwasser optisch untersucht werden. Zwar bilden sich um die Rohre lokal Fließkanäle, an denen das Fluid vorschießt, diese Einflüsse werden jedoch über eine geringe Laufstrecke der Fließfront wieder ausgeglichen.

2.3. Vakuuminfiltrationsaufbau

Der für die Versuche zu generierende Lagenaufbau ist zur Mittelebene symmetrisch und wird aus biaxialen Gelegeschichten hergestellt. Ein symmetrischer Lagenaufbau begünstigt zum einen eine symmetrische Fließfrontausbreitung in Dickenrichtung. Zum anderen ist bei Verwendung von ausschließlich ±45°-Biaxialgelegen eine identische Permeabilität in Fließrichtung wie auch quer zur Fließrichtung zu erwarten.

Folgende Materialien werden für die Preformherstellung verwendet.

Hersteller	Bezeichnung	Konstruktion	Flächengewicht [g/m ²]
[-]	[-]	[-]	[-]
Saertex	X-C-272g/m ² -1400mm	-45°/+45°	272
Saertex	X-C-272g/m ² -1400mm	+45°/-45°	272
Spunfab	Copolyamid Klebevlies	Vlies	6

TAB 2. verwendete Preform-Materialien

Die Preform wird insgesamt aus 18 Lagen Biaxialgelege hergestellt, die jeweils mit einer Lage Klebevlies aufeinander fixiert werden. Während einem Kompaktierzyklus erweicht das thermoplastische Klebevlies und verbindet die einzelnen Gelelagen beim Abkühlen zu einer formstabilen Preform.

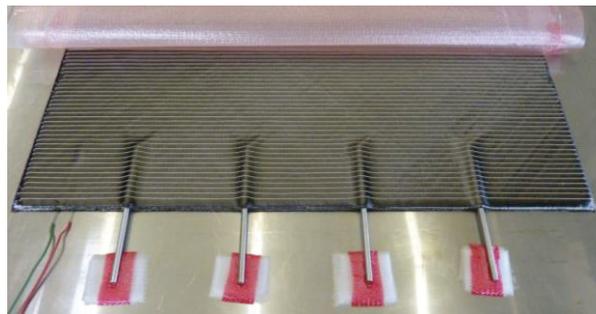


BILD 5. Preform mit eingebrachten Transferrohren

Der Infiltrationsaufbau wird wie in der Produktion von ebenen Serienbauteilen gestaltet. Neben den vier Transferrohren, die bereits in die Preform eingearbeitet sind, soll ein weiteres Rohr direkt vor der Preform in der sogenannten Anlaufstrecke platziert werden. So kann der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem das Harz beginnt in die Preform zu fließen.

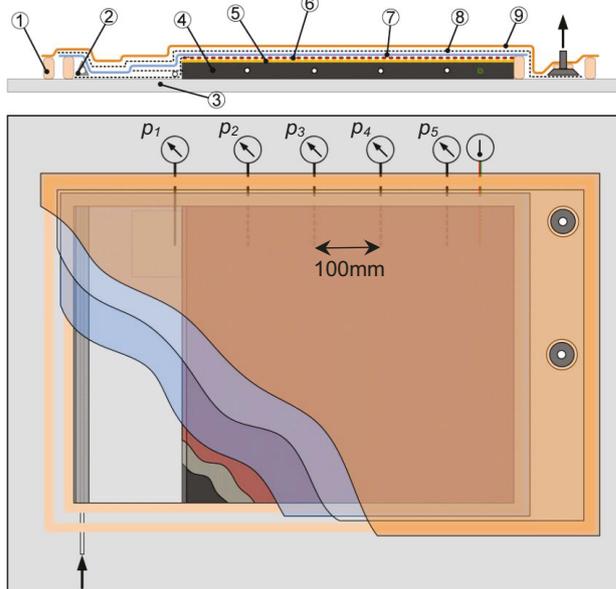


BILD 6. Versuchsaufbau in Seitenansicht und Draufsicht

Beim Versuchsaufbau ist darauf zu achten, dass das Vakuumdichtband nah an der sauber abgeschnittenen Preform entlang verläuft, um sogenanntes *Race-Tracking*, die Bildung von Fließkanälen am Rand der Preform, zu unterbinden.

2.4. Versuchsdurchführung

Die für den gewünschten Faservolumenanteil von 60% in den Aufbau zu infiltrierende Harzmasse wird in einem separaten Ofen auf 80°C erwärmt. Die Gesamtmasse setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen:

$$(2) m_{H_{ges}} = m_{H_{Bauteil}} + m_{H_{Hilfsstoff}}$$

$$(3) m_{H_{Hilfsstoff}} = m_{H_{Rohre}} + m_{H_{Schlauch}} + m_{H_{Fließhilfe}} + m_{H_{Abreißgew.}}$$

Um die Sensibilität des Gesamtsystems auf die eingebrachte Matrixmasse zu untersuchen, sollen

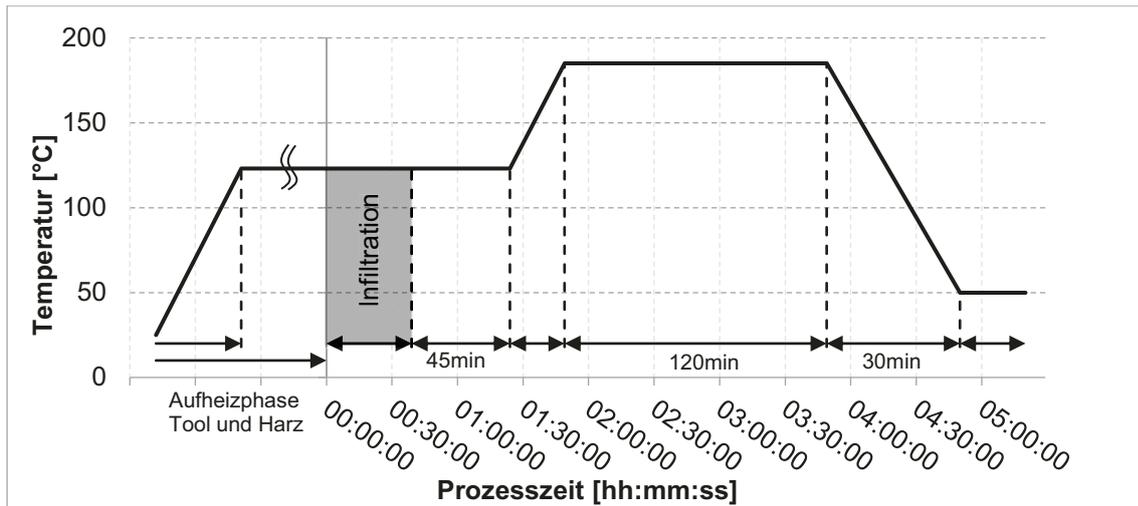


BILD 7. Prozessablauf anhand der Soll-Temperatur des Bauteilofens

folgende Harzmassen in die nahezu identischen Vakuumaufbauten infiltriert werden.

Versuch-Nr. Preform-Nr.	Soll-Harzmasse [g]
1 (± 0%)	$m_{H_{ges}} = m_{H_{Hilfsstoff}} + 1,0 * m_{H_{Bauteil}} = 717,23g$
2 (+10%)	$m_{H_{ges}} = m_{H_{Hilfsstoff}} + 1,1 * m_{H_{Bauteil}} = 763,34g$
3 (-10%)	$m_{H_{ges}} = m_{H_{Hilfsstoff}} + 0,9 * m_{H_{Bauteil}} = 667,41g$

TAB 3. Zusammensetzung der zu infiltrierenden Harzmasse

Sowohl der Infiltrationsaufbau als auch die Schlauchheizung, die das Harzreservoir mit dem Aufbau verbindet, werden auf 123°C erhitzt. Sind alle Startparameter erreicht, wird mit der Infiltration begonnen. Beendet wird diese, nachdem das gesamte Epoxidharz vom Reservoir in den Aufbau geflossen ist. Zwischen Beendigung der Infiltration und Übergang zur Aushärtung wird die Temperatur für 45min konstant auf 123°C gehalten. Dies ermöglicht ein weiteres Fließen und Umverteilen des Harzes. Die Aushärtung des RTM6 Epoxidharzes findet anschließend für 120min bei 185°C statt (BILD 7).

3. VERSUCHSERGEBNISSE

Versuch 1 gilt in der Untersuchung als Referenzversuch. Der Vakuumaufbau soll demnach exakt mit der Harzmasse versehen werden, die zum Erreichen eines Faservolumenanteils von 60% laut Harzmassenberechnung benötigt wird. Diese in das Bauteil einzubringende Soll-Harzmasse beträgt für den Referenzversuch $m_{H_{Bauteil}} = 475,21g$ (TAB 3). Eine Bildung der Massendifferenz zwischen ausgehärtetem Bauteil, Fasergewicht und der eingebrachten Transferrohre, ermöglicht die Ermittlung der tatsächlich in das Bauteil geflossenen Harzmasse. Diese beträgt für diesen Versuch Nr. 1

$$(4) m_H = m_{Bauteil} - m_{Faser} - m_{Rohre} - m_{H_{Rohre}} = 483,9g.$$

Die eingebrachte Zusatzmasse beträgt demnach 8,69g oder

$$(5) \frac{m_H - m_{H_{Bauteil}}}{m_{H_{Bauteil}}} = 1,83\%.$$

3.1. Druckverlauf über Prozesszeit

BILD 8 zeigt die während und nach der Infiltration mitgeschriebenen Messwerte der fünf Drucksensoren, sowie die Umgebungsbedingungen über der Prozesszeit.

Im Allgemeinen lässt sich der Herstellungsprozess in drei Bereiche gliedern. Nach dem Öffnen der Harzzufuhr startet die Infiltration der Matrix. Ist die berechnete Masse an Harz in den Vakuumaufbau geflossen, wird die Zufuhr durch Abklemmen des Angusschlauchs wieder geschlossen. Auch wenn sich die vollständige Harzmasse bereits im Vakuumaufbau befindet, muss die Fließfront nicht zwangsläufig die komplette Preform durchtränkt haben. Die Fließfront bewegt sich also nach dem Schließen der Harzzufuhr weiter durch das Gelege. Dieser zweite Bereich ist ebenfalls in nachfolgender Abbildung dargestellt. Zu Beginn des dritten Bereichs ist die Fließfront am Ende der Preform angekommen, es findet jedoch noch ein Druckausgleich statt. Im Folgenden soll auf diese drei Bereiche vertieft eingegangen werden.

Bereich 1, Infiltration:

Bevor die Zufuhr zur Prozesszeit 00:00:00 geöffnet wird, ist der komplette Vakuumaufbau evakuiert. Die Drucksensoren messen also den anliegenden Vakuumdruck. Wird nun die Infiltration gestartet, wird das Harz aufgrund des Druckunterschiedes zwischen herrschendem Druck im Vakuumaufbau bzw. auf die Harzoberfläche im Topf in den Vakuumaufbau gesaugt. Gelangt das Harz am ersten Transferrohr an, füllt es dieses. Der dort messende Drucksensor p_1 misst nun nicht mehr den im Aufbau herrschenden Vakuumdruck, sondern den hydrostatischen Harzdruck. Erreicht das Harz also die Sensormembran, steigt der gemessene Druck an.

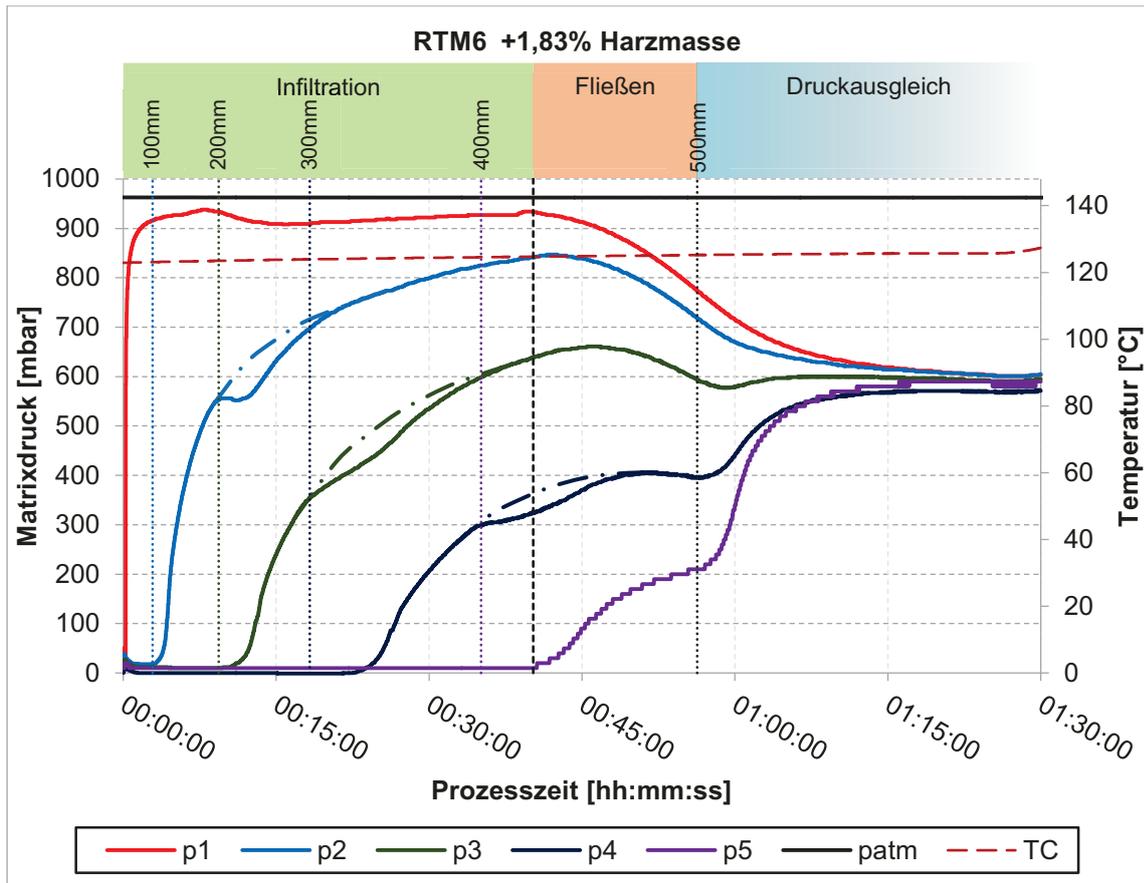


BILD 8. Druck- und Temperaturverlauf sowie Fließweg über die Prozesszeit

Im Falle des Sensors p_1 stellt sich im Folgenden ein hydrostatischer Matrixdruck ein, der circa dem Umgebungsdruck p_{Atm} entspricht.

Die Fließfront breitet sich daraufhin in der Preform aus und die Sensoren p_2 bis p_5 reagieren sobald das Harz die Sensormembran erreicht. Eine Reaktion eines Sensors bedeutet jedoch nicht, dass die Fließfront sich exakt auf Höhe des jeweiligen Transferrohres befindet. Die in BILD 8 zu erkennenden Unstetigkeiten in den einzelnen Sensorkurven lassen vermuten, dass die Fließfront bereits am nächsten Transferrohr angelangt ist, wenn der Druck am davorliegenden Sensor leicht abfällt. Während das Transferrohr gefüllt wird, wird Matrix aus dem Bereich des vorherigen Sensors abgezogen, sodass dort ein Druckabfall gemessen wird.

Bereich 2, Weiterlaufen der Fließfront:

Wie zuvor beschrieben, bedeutet eine vollständige Infiltration der Harzmasse nicht, dass die Preform bereits vollständig mit Harz durchtränkt ist. Wie in BILD 8 zu erkennen, befindet sich die Fließfront nach obiger Annahme beim Schließen der Zufuhr im Bereich zwischen 400mm und 500mm.

Es liegt also im bereits durchtränkten Bereich ein Überschuss an Matrixmaterial vor. Ein Weiterlaufen der Fließfront bei geschlossener Harzzufuhr führt dazu, dass dieses überschüssige Harz im vorderen Bereich der Preform abgezogen wird. Der gemessene hydrostatische Matrixdruck sinkt dort.

Bereich 3, Druckausgleich:

Im dritten Bereich findet der Druckausgleich statt. Zu Beginn dieses Bereichs liegt im Gelege noch eine ungleichmäßige Matrixverteilung vor. Auf den Faser-Matrix-Verbund wirkt jedoch eine konstante Flächenlast. Diese bewirkt, dass sich das Harz gleichmäßig im Gelege verteilt. Eine gleichmäßige Matrixverteilung resultiert schließlich in einem Druckausgleich.

In diesem Referenzversuch liegt nach dem Druckausgleich ein Matrixdruck zwischen $570\text{mbar} < p_M < 600\text{mbar}$ vor. Diese Abweichung kann zum einen an der Messgenauigkeit der Sensoren in Betracht auf hohe Temperaturen und eine lange Messdauer liegen. Zum anderen weist die Differenz auf eine nicht vollkommen homogene Matrixverteilung hin. Der gemittelte hydrostatische Matrixdruck von $p_M = 588,4\text{mbar}$ lässt darauf schließen, dass die Fasern einen Lastanteil von $p_{Komp} = p_{Atm} - p_M = 373,9\text{mbar}$ übernehmen.

3.2. Druckverlauf über Fließweg

Zu jedem Zeitpunkt, an dem die Fließfront ein Transferrohr erreicht, wird der Verlauf des Druckgefälles zwischen Anguss und Fließfront ermittelt. Wie bereits von *Correia et al.* [1] gezeigt, verläuft der Matrixdruck zwischen Anfang der Preform und Fließfront nicht linear.

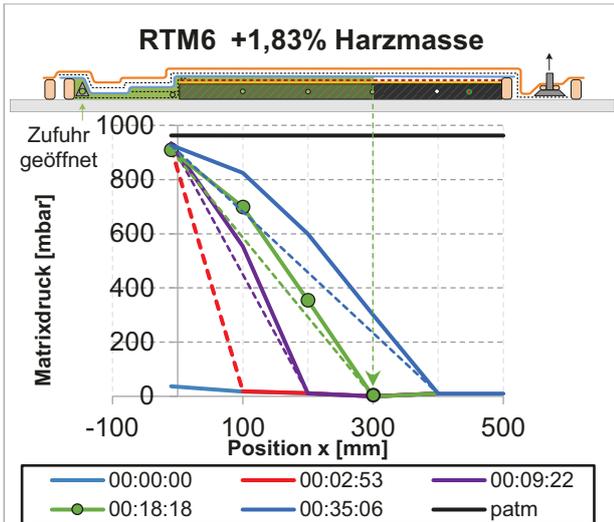


BILD 9. Matrixdruckverlauf über der Plattenlänge zu verschiedenen Zeitpunkten während der Infiltration

Laut *Correia* liegt dies in der steigenden Kompaktierung der Fasern zwischen dem Anfang der Preform und der Fließfront. *George, A.* [4] und *Y. Bréard et al.* [5] sehen die Gründe für den nichtlinearen Verlauf zusätzlich in der hohen Scherkraft zwischen der Matrix und den nicht benetzten Fasern an der Fließfront. Versuche haben gezeigt, dass ein Fluss mit sich ausbreitender Fließfront einen nichtlinearen Druckverlauf zufolge hat. Ein Matrixfluss durch bereits gesättigtes poröses Material hingegen liefert einen linearen Verlauf.

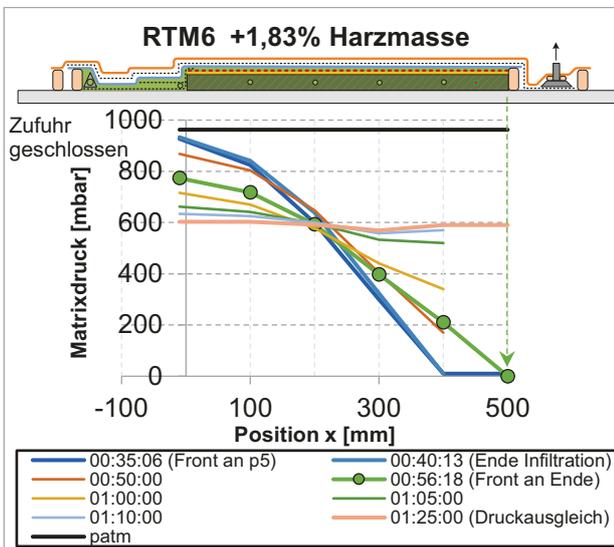


BILD 10. Matrixdruckverlauf über der Plattenlänge zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Infiltration

Ist die Infiltration zur Prozesszeit 00:40:13 beendet, sinkt der Matrixdruck an den vorderen beiden Sensoren, da dort Matrixmaterial abgezogen wird um die Fließfront weiter zu speisen. Somit übernehmen die Fasern in diesem Bereich einen größeren Druckanteil. Währenddessen bewegt sich die Fließfront ca. 100mm weiter durch die Preform, bis diese

vollständig mit Harz benetzt ist (Prozesszeit 00:56:18). Aufgrund des vorliegenden Ungleichgewichtes im Matrixdruck findet eine weitere Umverteilung von Material aus dem vorderen in den hinteren Bereich statt, bis sich schließlich ein Gleichgewicht einstellt. Ein vollständiger Druckausgleich wird dabei in endlicher Zeit nicht erreicht, da das Druckgefälle abnimmt, während die Harzvernetzung mit fortschreitender Prozesszeit zunimmt.

4. DISKUSSION

4.1. Einfluss der infiltrierten Matrixmasse

Wie sich dieses Verhältnis zwischen Matrix- und Kompaktierungsdruck mit Variation der infiltrierten Harzmasse entwickelt, ist in zwei weiteren Versuchen zu untersuchen.

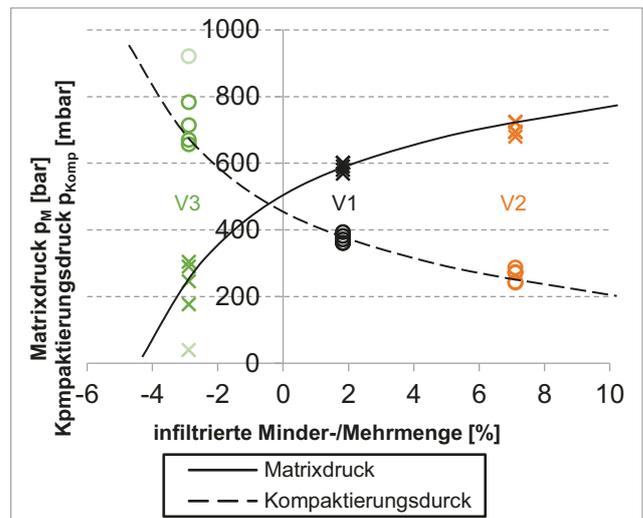


BILD 11. Verhältnis zwischen Matrix- und Kompaktierungsdruck

Der gemessene Matrixdruckverlauf der drei durchgeführten Versuche ist während der Infiltration nahezu identisch, da bei allen Versuchen gleiche Randbedingungen herrschen (BILD 12, durchgehende Linien). Abweichungen ergeben sich lediglich aufgrund von kleinen Differenzen in der Harzviskosität. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Versuche über der Zeit normiert. Der normierte Zeitpunkt ‚1‘ soll vorliegen, wenn die Fließfront das vierte Transferrohr ($x = 300\text{mm}$) erreicht, da in allen Versuchen die Harzzufuhr zu diesem Zeitpunkt noch geöffnet war. Nach dem Schließen der Harzzufuhr (gestrichelte Linien) stellt sich ein von der infiltrierten Matrixmasse abhängiger Matrixdruck im Laminat ein. Ein vollständiger Druckausgleich findet dabei in keinem Versuch statt. In Versuch 3 (-2,89% Harzmasse) erreicht die Fließfront das Ende der Preform nicht, sodass sich auch keine homogene Matrixverteilung einstellt.

BILD 11 zeigt das Verhältnis von Matrix- und Kompaktierungsdruck über der infiltrierten Matrixmasse.

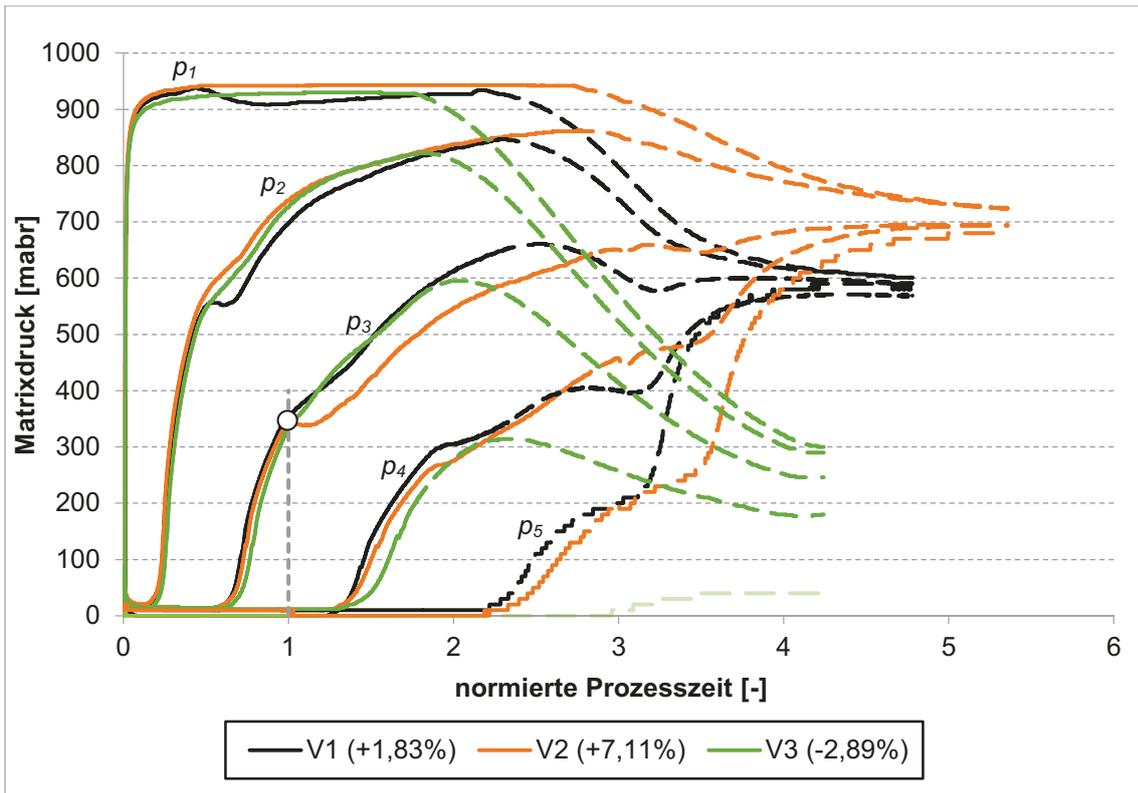


BILD 12. Vergleich des Matrixdrucks der drei Versuche (durchgehende Linie: Harzzufuhr geöffnet)

Bereits eine kleine Abweichung in der infiltrierten Matrixmasse wirkt sich stark auf den Matrix- bzw. Kompaktierungsdruck aus. Die infiltrierte Menge von 7,11% (33,67g) in Versuch 3 entspricht etwa einem Volumen von 3cl und führt dazu, dass der Kompaktierungsdruck um 100mbar in Bezug auf den Referenzversuch abfällt. Wird weniger Matrixmaterial infiltriert bzw. ein Faservolumenanteil über 60% angestrebt, reagiert das Gesamtsystem sensibler. Das liegt an der steigenden Preformsteifigkeit bei höheren FVA. In Versuch 3 führt so ein minimales Voranschreiten der Fließfront – sprich ein kleiner Abzug von Matrixmaterial aus dem benetzten Bereich – zu einem starken Anstieg des Kompaktierungsdrucks bzw. zu einem starken Abfall des Matrixdrucks. Zwischen der Last, die während der Infiltration vom Gelege bzw. von der Matrix aufgenommen wird und der infiltrierten Matrixmasse besteht ein direkter Zusammenhang.

Unter hoher Temperatur und niedrigem Druck besteht die Gefahr, dass die Matrix zu sieden beginnt. Das verwendete RTM6 Epoxidharz ist zwar bei 120°C vorentgast, bei der Aushärtung unter 180°C verändert sich jedoch der Dampfdruck und begünstigt das Sieden bei bereits größerem Matrixdruck. Dieser physikalische Effekt wird in dieser Arbeit nicht tiefer untersucht, kann aber vermutlich zu einer Porenbildung im Bauteil führen.

4.2. Korrelation zwischen Laminatdicke und Matrixdruckverlauf

Zwischen dem gemessenen Matrixdruck vor Beginn der Bauteilaushärtung und der Laminatdicke des fertigen Bauteils besteht in allen Versuchen ein Zusammenhang. Im Referenzversuch wurde ein gemittelter FVA von 59,56% bei folgender Dickenverteilung erzielt.

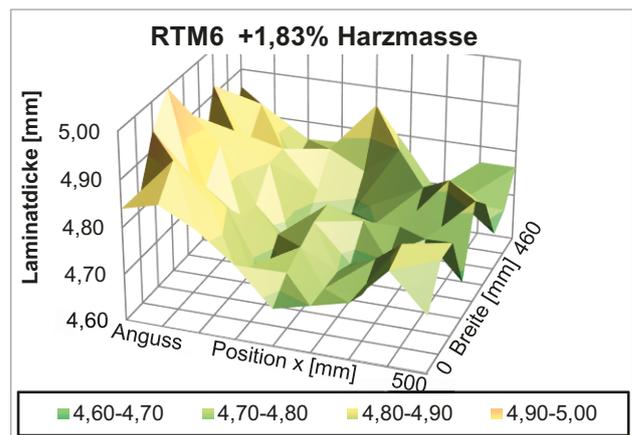


BILD 13. gemessene Dicke des Referenzbauteils

Die mittlere Dicke nimmt dabei im Bereich zwischen $x = 0\text{mm}$ und $x = 200\text{mm}$ um 0,15mm ab, verläuft anschließend jedoch recht konstant. Des Weiteren ist eine Dickenabnahme in Plattenmitte erkennbar, während sich am Bauteilrand grö-

ßere Dicken ergeben. Eine nichthomogene Dickenverteilung lässt auf eine ebenfalls nichthomogene Matrixverteilung schließen. Beide Parameter verhalten sich dabei proportional zueinander. In Bereichen größerer Dicke muss theoretisch ein höherer Matrixdruck herrschen.

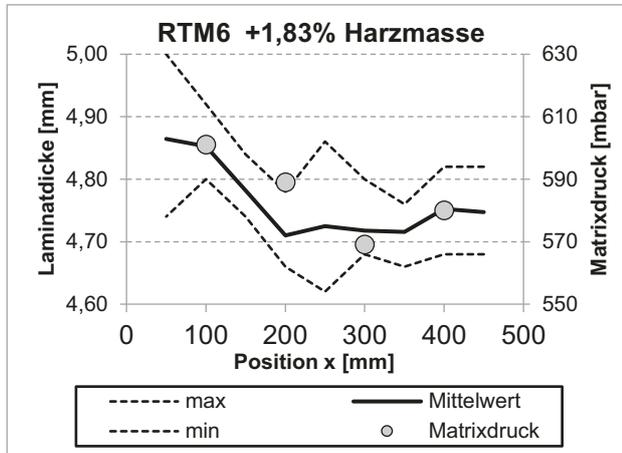


BILD 14. gemessene Dicke des Referenzbauteils und Matrixdruck nach Druckausgleich (Prozesszeit 01:25:00)

BILD 14 zeigt die Korrelation zwischen diesen Parametern im Referenzversuch. Es ist jedoch zu beachten, dass die Messgenauigkeit der Drucksensoren bei ± 17 mbar liegt. Ein tieferer Zusammenhang kann demnach bei solch geringen Dicken-schwankungen nicht hergestellt werden. Ein eindeutiger Trend ist aber in allen Versuchen stets vorhanden. Die Bauteilqualität lässt sich im Hinblick auf Dickenschwankungen also schon vor dem Aushärtvorgang abschätzen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Drucksensoren in der von der *Premium AEROTEC GmbH* angewandten VAP-Technologie liefert neue Erkenntnisse über den Infiltrations- und Fließvorgang und ermöglicht eine Überwachung der Bauteilinfiltration unter Umge-

7. REFERENZEN

- [1] N. Correia, F. Robitaille, A. Long, C. Rudd, P. Simáček und S. Adcani, „Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation,“ in *Composites: Part A* 36, Nottingham, Elsevier, 2005, p. 1645–1656.
- [2] S. G. & C. KG, „Datenblatt 30001147/30001148“.
- [3] HEXCEL, „HexPly® Prepreg Technology,“ 2013.
- [4] A. George, „Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies,“ Institute of Aircraft Design, TU Stuttgart, 2011.
- [5] Y. Bréard, Y. Henzel, F. Trochu und R. Gauvin, „Analysis of Dynamic Flows Through Porous Media. Part I: Comparison Between Saturated and Unsaturated Flows in Fibrous Reinforcements,“ in *Polymer Composites* 24(3), 2003, pp. 391-408.
- [6] Kistler Instrumente GmbH, „RTM Niederdruckmesskette Typ 4001A,“ 2015.
- [7] B. Yenilmez, M. Senan und M. E. Sozer, „Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process,“ *Composites Science and Technology* Vol. 69, pp. 1710-1719, 2009.
- [8] N. Hoch, „Untersuchung von kritischen Prozessparametern bei der Herstellung von tragenden CFK-Flugzeugstrukturen mit dem Ziel der Prozessstabilisierung,“ FH Aachen, 2016.

bedingungen im Ofen. Die Messung des hydrostatischen Matrixdrucks lässt Aussagen darüber treffen, wo sich die Fließfront in der Preform befindet, wann die Preform vollständig mit Harz benetzt und wann der Matrixwerkstoff homogen verteilt ist. Diese Informationen bieten Möglichkeiten zur Prozesssteuerung bzw. automatischen Regelung. Taktzeiten können optimiert werden, indem der Startzeitpunkt des Aushärtvorgangs an die Matrixverteilung im Bauteil angepasst wird. Außerdem lässt sich die Bauteilqualität in Bezug auf Schwankungen in der Laminatdicke bereits vor dem Aushärten abschätzen. Durch unterschiedlich eingebrachte Harzmengen in identische Bauteile wurde die Sensibilität des Gesamtsystems auf Schwankungen in der infiltrierten Menge untersucht. Zwischen der Last, die während der Infiltration vom Gelege bzw. von der Matrix aufgenommen wird und der infiltrierten Matrixmasse besteht ein direkter Zusammenhang. Dabei führen schon geringe Mengenabweichungen des Infiltrationsmediums zu großen Änderungen in der Lastaufnahme. Inwieweit bei sehr geringen Matrixdrücken eine Gefahr des Matrixsiedens - also der Porenbildung - besteht, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Speziell für Harzinfusionsverfahren neuentwickelte Sensoren mit frontbündig in das Aushärtwerkzeug einsetzbarer Sensormembran [6] sollen die Prozessüberwachung in Zukunft vereinfachen und serientauglich machen.

6. DANKSAGUNG

Mein Dank richtet sich vor allem an Herrn Dirk Montan und Frau Margarita Heyer sowie das gesamte Technologie Faserverbund Team der *Premium AEROTEC GmbH*, Augsburg, die mir diese Arbeit ermöglicht und mich im Verlauf meiner Bachelorarbeit sehr unterstützt haben. Mein weiterer Dank richtet sich an Prof. Dr.-Ing. Carsten Braun von der FH Aachen für die gute Betreuung während meiner Arbeit.