



Fraunhofer Einrichtung
Polymermaterialien
und Composite

Schlussbericht zu Verbundprojekt KATO

Neue Werkstoffe für Sandwich- und Klebstoff-Anwendungen

FKZ: 20K0302T

Laufzeit: 01.07.2003 – 30.06.2007

Bearbeiter:

C. Uhlig, P. Friede, R. Wurzel, B. Schöbe, T. Mühlenberg, I. Geike

Verfasser:

C. Uhlig, P. Friede, R. Wurzel

Leitung:

Prof. Dr. M. Bauer
Fraunhofer PYCO
Kantstr. 55 - 14513 Teltow, Germany

Teltow, den 28. Januar 2008

I. Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf, Stand der Technik und des Wissens, Zusammenarbeit mit Dritten	2
II. Eingehende Darstellung	3
II. 1. Erzielte Ergebnisse	3
II. 1.1. Entwicklung neuer Prepregharze	3
II. 1.1.1. Zielstellung des Projektteils Prepregharze, Vorarbeiten sowie Projektablauf	3
II. 1.1.2. Untersuchungen an Reinharzen	5
Cone-Calorimeter-Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit bzw. Vorauswahl der Harze	5
Vergleichende Voruntersuchungen zum Brandverhalten verschiedener Harze für die Einengung der Materialauswahl	7
II. 1.1.3. Stuktur-Eigenschafts-Untersuchungen sowie Entwicklung eines Prepregharzes und Herstellung von Prepregs für Innenaustattungsteile (Honeycomb-Sandwich)	10
II. 1.2. Entwicklung neuartiger Kernwerkstoffe – Die Noppenwabe	10
II. 1.2.1. Zielstellung	10
II. 1.2.2. Übersicht zu Kernwerkstoffen	11
Honeycomb	11
Schäume	11
Hohlprofilsegmente	13
Balsaholz	13
Abstandsgewebe	13
Faltwabe	14
Thermoplastische Kernstrukturen	14
Kontinuierlich hergestellte Kernstrukturen der Katholieke Universiteit Leuven	14
Noppenwabe	15
II. 1.2.3. Mögliche Technologien zur Herstellung der Noppenwabe	15
II. 1.2.4. Aufarbeitung des Standes der Technik	16
II. 1.2.5. Technologische Voraussetzungen am IZM und bei Partnern	16
II. 1.2.6. Entwicklung der Noppenwabe nach Methode 1	17
Mechanische Untersuchungen und Brandtests an zwei Varianten der Methode 1	18
II. 1.2.7. Entwicklung der Noppenwabe nach Methode 2	19
Pressen / Spritzpressen	20
II. 1.2.8. Lieferungen an Airbus im Rahmen des Unterauftrages:	21
II. 2. Voraussichtlicher Nutzen	22
II. 3. Während der Durchführung des Vorhabens bekanntgewordener Fortschritt bei Dritten	22
II. 4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	22
Anhang 1: Herstellung der Noppenwabe	23
Anhang 2: Tiefziehuntersuchungen	25
Anhang 3: Vergleich von Parametern des Brandverhaltens von Noppenkernmaterialien	27
Anhang 4: Schälfestigkeit von Noppenkernsandwiches	29
Anhang 5: Biegeuntersuchung an Noppenwabensandwiches	32

I. Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf, Stand der Technik und des Wissens, Zusammenarbeit mit Dritten

Dieses Projekt bestand aus zwei Teilen mit zwei weitgehend voneinander getrennten Abgabenstellungen. Im ersten Teil waren neue Prepregharze für den Kabinenbereich (Honeycomb-Sandwich-Bauteile) auf Basis der Cyanatester-Chemie zu entwickeln mit verbesserten Oberflächen, mechanischen Eigenschaften, Verarbeitbarkeit und Flammwidrigkeit. Im zweiten Teil waren neuartige Kernwerkstoffe auf Basis alter Vorarbeiten der Firma Höchst (Noppenwabe) zu entwickeln. Die Voraussetzungen waren für beide Projektteile sehr unterschiedlich. Am IZM-Teltow befasst man sich schon seit Jahrzehnten mit der Chemie und Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Cyanatester-Systemen. Zudem bestehen umfangreiche Erfahrungen und die entsprechende Ausstattung (Prepregturm) zur Entwicklung und Pilotfertigung von Prepregharzen bzw. Prepregs daraus. Weitgehend Neuland wurde in diesem Projekt allerdings bezüglich der Brandeigenschaften beschritten. Ebenso wurden die hier untersuchten Formulierungen in vorausgegangenen Projekten noch nicht im Detail betrachtet.

Ungleich weniger Erfahrung bestand auf dem Gebiet der Noppenwabe zu Projektbeginn. Hier gab es bereits vor Projektbeginn und auch während des Projektes umfangreiche Zusammenarbeiten mit Dritten, namentlich Herstellern von Gestrieken bzw. Gewirken (ebenso wie Maschinenherstellern hierfür) sowie mit Faser- und Garnherstellern von Polyester- und Aramidfasern bzw. -garnen.

Erst deren umfangreiche Kooperation hat ein gutes Vorankommen auf diesem Gebiet ermöglicht. Schwierig gestaltete sich dabei die unterschiedlichen Vorstellungen von Zeitrahmen potentieller Anwendungen, während von Seiten der oft mittelständigen Kooperationsfirmen eine möglichst schnelle Anwendung der Ergebnisse gewünscht war, benötigen Evaluierungen und Qualifizierungen in der zivilen Luftfahrtindustrie einen längeren Zeitraum. Hilfreich ist hier aber, dass auch außerhalb von Airbus Interesse an der Anwendung dieses Teils der Projektergebnisse besteht.

In die Entwicklung der Noppenwabe konnte vor allem die IZM-Expertise zu Prepregharzen und Prepregs, welche bei den externen Partnern nicht vorlag, erfolgreich eingebracht werden.

Zur Noppenwabe gab es bereits eine Reihe von Patenten, die teilweise zu Projektbeginn bereits abgelaufen waren. In diesen Patenten wurden auch noch Lücken gesehen, so dass die Entwicklungsarbeiten des Projektes darauf zielten, diese Lücken zu schließen. Günstig war dabei auch, dass nach der Zerschlagung von Höchst die Entwicklungsarbeiten zur Noppenwabe kaum noch weitergeführt worden sind.

Zu Prepregharzen auf Basis der Cyanatharzchemie lag zu Projektbeginn bereits eine Reihe von Patenten vor. Auf Grund der Formulierungserfahrung am IZM-Teltow waren auch hier Lücken zu erkennen, dass heißt noch nicht geschützte Bereiche, die zudem eine vielversprechende Kombination von Eigenschaften aufwiesen.

Auf Grund der beiden separaten Aufgabenstellungen besteht der Bericht zu den Ergebnissen aus zwei getrennten Teilen. Der Stand der Technik und des Wissens wird für eine bessere Übersichtlichkeit jeweils in diesen Berichtsteilen abgehandelt.

Der Projektteil Noppenwabe musste sich in seiner Planung und Durchführung auch nach den externen Partnern richten. Auf Grund guter Kooperationsbeziehungen stellte das jedoch kein Problem dar.

Der Teil Prepregharze teilte sich in systematische Struktur-Eigenschafts-Beziehungen an Reinharzen für eine Vorauswahl der Formulierung sowie die Entwicklung, Herstellung und Testung von Prepregharzen. Beide Teile überlappten sich dabei zeitlich, wobei dennoch Erkenntnisse vom ersten Teil (Untersuchungen an Reinharzen) auch bereits in einer frühen Phase bei der Prepregentwicklung berücksichtigt wurden.

II. Eingehende Darstellung

II. 1. Erzielte Ergebnisse

II. 1.1. Entwicklung neuer Prepregharze

II. 1.1.1. Zielstellung des Projektteils Prepregharze, Vorarbeiten sowie Projektablauf

Die Projektarbeiten ebenso wie die Zielstellung des Projektes leiteten sich aus den aktuellen Anforderungen der deutschen zivilen Luftfahrt ebenso wie aus Ergebnissen vieler Vorarbeiten am IZM-Teltow ab.

Hier sind grundlegende Arbeiten zur Chemie und Kinetik der Härtung von Cyanatharzen sowie modifizierten Cyanatharzen, welche am IZM-Teltow bereits seit Jahrzehnten in Eigenforschung sowie in verschiedensten Projekten erfolgten, zu nennen, ebenso wie Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen an Cyanaten und modifizierten Cyanaten, welche in den 90er Jahren vorrangig in zwei großen EU-Projekten mit Partnern der europäischen Luftfahrtindustrie (EADS, Aerospatiale und British Aerospace) geleistet worden sind.

In diesen Projekten wurde bereits festgestellt, dass Cyanate intrinsisch flammwidrig sind, und gleichzeitig mechanische Eigenschaften wie Epoxidharze aufweisen. Damit verbinden sie die Vorteile von Epoxidharzen (bruchzäh) mit denen von Phenolharzen (flammwidrig), und überwinden gleichzeitig deren Nachteile (Epoxidharze sind leicht brennbar und Phenolharze sind sehr spröde).

Diese grundsätzlichen Vorzüge sind bereits in vorangegangenen Projekten (sowie in der Literatur) herausgearbeitet worden, es konnten in diesen Projekten aber noch nicht detaillierte Struktur-Eigenschafts-Beziehungen untersucht werden, die eine optimierte Formulierung von Prepregharzen auf Basis der Cyanatester-Chemie ermöglicht hätten. Zudem erfolgten die Cone-Untersuchungen damals am EADS an einem Gerätetyp, der sich nicht durchgesetzt hat, die Ergebnisse waren also noch einmal an dem am IZM-Teltow vorhandenen Cone-Calorimeter zu bestätigen, sowie Aussagekraft der Messungen durch umfangreiche Vor- und Neben-Untersuchungen zu bewerten. Außerdem wurden in diesen vorangegangenen Projekten nur wenige Formulierungen untersucht.

Auf Grund der guten mechanischen Eigenschaften der Cyanatharze sind diese auch als Strukturharze für die Luftfahrt denkbar, d.h. als Ersatz der dort bisher eingesetzten Epoxidharze. Obwohl der Fokus dieses Projektes Prepregharze für die Innenausstattung war, wurden die Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen breiter angelegt, um auch grundsätzlich die Eignung für Strukturbauteile mitzubewerten. Dies geschah mit der Motivation, dass durch den immer höheren Anteil von CFK-Strukturbauteilen im Flugzeug nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch Struktur-Bauteile härteren Brandanforderungen als bisher unterzogen werden. Sollte diese Prognose eintreten, wären Cyanate sofort deutlich gegenüber den heute eingesetzten Epoxidharzmaterialien im Vorzug. Zudem werden auch in der Innenausstattung CFK-Bauweisen zunehmen, und damit auch zunehmend Struktur-Anforderungen für Innenteile gelten. Ebenso werden mit dem CFK-Rumpf Innenausstattung und Struktur stärker als bisher ineinander übergehen.

Nicht zuletzt sind die Cyanate deshalb eine interessante Stoffklasse, weil sie auf Grund der Kombination von Struktureigenschaften und Flammwidrigkeit sowohl für Kabinenbauteile als auch für Strukturbauteile geeignet sind. Damit könnte eine deutliche Reduzierung der heute eingesetzten Harzformulierungen (und Harzklassen) im Flugzeug erfolgen, Kosten könnten durch geringeren Zertifizierungsaufwand, geringen Materialprüfungs- und -beschaffungsaufwand ebenso wie eine verbesserte Verhandlungsbasis gegenüber Herstellern (auf Grund größerer Abnahmemengen) gespart werden.

Die an Reinharzen in diesem Projekt durchgeführten Struktur-Eigenschaftsbeziehungen waren sehr zeitaufwendig und zogen sich daher über die gesamte Projektlaufzeit hin. Daher konnte mit der Formulierung von Prepregharzen, welche bereits zu einem relativ frühen Zeitraum des Projektes zu erfolgen hatte, nicht bis zum Vorliegen des Endergebnisses zu Struktur-Eigenschafts-Beziehungen an Reinharzen gewartet werden. Der Zwischenstand der Untersuchungen ebenso wie Untersuchungen vorangegangener Projekte (z.B. zu Katalysatoren) ist jedoch in die Formulierung der in diesem Projekt entwickelten Prepregharze eingeflossen.

Von Vorteil war für den Projektablauf, dass aus früheren Projekten bereits umfangreiche gehärtete Reinharzproben vorlagen. Deren Brandeigenschaften wurden in einem Screening mit dem Cone-Calorimeter untersucht. (Glücklicherweise waren aus einem anderen Projekt auch eine größere Menge identischer gehärteter Cyanatharz-Proben übrig, welche zu Projektbeginn Untersuchungen zu Messfehlern und Reproduzierbarkeit des Cone-Calorimeters ermöglichten, eine wichtige Voraussetzung für die richtige Einordnung der detaillierten Cone-Calorimeter-Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Strukturparameter.)

Es war zu Projektbeginn bereits grundsätzlich bekannt, dass von Novolaken abgeleitete Cyanatharze besonders flammhemmend sind. Allerdings weisen diese im ausgehärteten Zustand sehr hohe Glastemperaturen auf. Dies bedeutet, dass zu deren Erreichen auch sehr hohe Härtungstemperaturen erforderlich wären. Härtung bei derartig hohen Temperaturen ist jedoch weder wirtschaftlich noch erforderlich, da so hohe Glastemperaturen im Kabinenbereich nicht erforderlich sind. Daher war eine wesentliche zu untersuchende Frage, inwiefern unvollständige Härtung bei niedrigeren Härtungstemperaturen mechanische und Brandeigenschaften solcher Harze beeinflusst, der Umsatz an OCN-Gruppen (bzw. Parameter, die diesen widerspiegeln) war also eine der wichtigsten in diesem Projekt untersuchten Strukturvariablen.

In diesem Zusammenhang war ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt die nähere Untersuchung des sogenannten Spröd-Duktil-Überganges. Dieser Begriff stammt eigentlich aus der Thermoplast-Polymerphysik, ein ähnliches Phänomen wurde jedoch bei Untersuchungen in früheren Projekten auch für Cyanatharze gefunden (und existiert möglicherweise für alle Hoch- T_g -Harze). Allerdings ist bei Harzen die kritische Variable für diesen Übergang nicht die Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur, sondern der Umsatz an funktionellen Gruppen, unterhalb eines bestimmten kritischen Umsatzes an OCN-Gruppen liegen extrem spröde Festkörper vor, die bei geringsten Spannungen in Stücke zerspringen. Bei unvollständigen Aushärtungen scheint es also auf jeden Fall notwendig zu sein, sicher über diesen Spröd-Duktil-Übergang hinauszugelangen, also im duktilen Zustand zu enden. Die genaue Lage des Spröd-Duktil-Übergangs für verschiedene Cyanatharze zu bestimmen, war daher eines der Ziele der detaillierten Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen. Ebenso war es dabei ein Ziel, den Sprödzustand auch quantitativ zu charakterisieren. Auch diese Untersuchungen wurden durch Branduntersuchungen mit dem Cone-Calorimeter begleitet, Ziel war es hier, den Einfluss der Sprödigkeit auf das Brandverhalten zu ermitteln. Es gab z.B. einige unverständliche Unterschiede im Brandverhalten zwischen verschiedenen PT-Harzen (vom Novolak abgeleiteten Cyanatharzen), eine Erklärungsmöglichkeit bestand in deren unterschiedlicher Bruchzähigkeit. Dies näher aufzuklären, war auch Ziel der Cone-Calorimeter Untersuchungen.

Neben der Untersuchung des Einflusses des Umsatzes an OCN-Gruppen auf Brand- und thermisch-mechanische Eigenschaften war ein weiteres wesentliches Ziel die Untersuchung der Modifizierung von Cyanaten mit Co-Monomeren. Aus vorangegangenen grundlegenden Untersuchungen am IZM-Teltow zum Einfluss bestimmter Co-Monomere auf Reaktionsmechanismus, Struktur und Reaktionskinetik von Cyanatnetzwerken (mittels analytischen Untersuchungen an monofunktionellen Modellverbindungen und mathematischen Modellierungen der Netzwerkbildung ebenso wie analytischen Untersuchungen an Netzwerken) war bekannt, dass durch die Modifizierung mit diesen eine ähnliche Netzwerktopologie erhalten wird wie durch unvollständigen Umsatz an Cyanatgruppen. Diese Befunde aus Modellreaktionen, Analytik und Simulationen wurden jedoch bisher nur unvollständig durch systematische Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen belegt. Zudem war bisher nur der netzwerktopologische Einfluss dieser Co-Monomere dargelegt worden, darüber hinaus sollte es

jedoch auch einen physikalischen Einfluss dieser Co-Monomere im Polycyanuratnetzwerk geben, welcher anders als der von OCN-Gruppen ist, auch diesem Ziel dienen die Untersuchungen. Vor allem aber ist diese Modifizierungsrichtung von ausgesprochenem praktischen Interesse, da hierdurch möglicherweise ein höherer Umsatz an OCN-Gruppen bei gleicher Härtung erreicht werden kann, sowie die Hypothese zu überprüfen war, dass man durch Modifizierung mit bestimmten Co-Monomeren bereits mit niedrigeren Härtungstemperaturen den Spröd-Duktil-Übergang überschreiten kann.

II. 1.1.2. Untersuchungen an Reinharzen

Cone-Calorimeter-Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit bzw. Vorauswahl der Harze

An identisch gehärteten Platten von B10 (bis 280°C gehärtet, d.h. nahezu vollständig ausgehärtet) wurden Cone-Calorimeter-Messungen durchgeführt. Die Total Heat Release Rate Kurven (THR – Integral der Heat Release Rate bis zum Zeitpunkt t als Funktion von t) ebenso wie die Heat Release Rate Kurven sind in Abb. 1 und 2 dargestellt. Diese Kurven stellen also den „Fehlerschlauch“ dar, um die weiter unten gezeigten systematischen Brand-Untersuchungen bewerten zu können. Es zeigt sich, dass die Abweichungen von Messung zu Messung in den späteren Phasen des Brandes größer werden. Im Anfangsbereich schwankt die Entzündungszeit stärker als die Peakhöhe der Heat Release Rate (HRR).

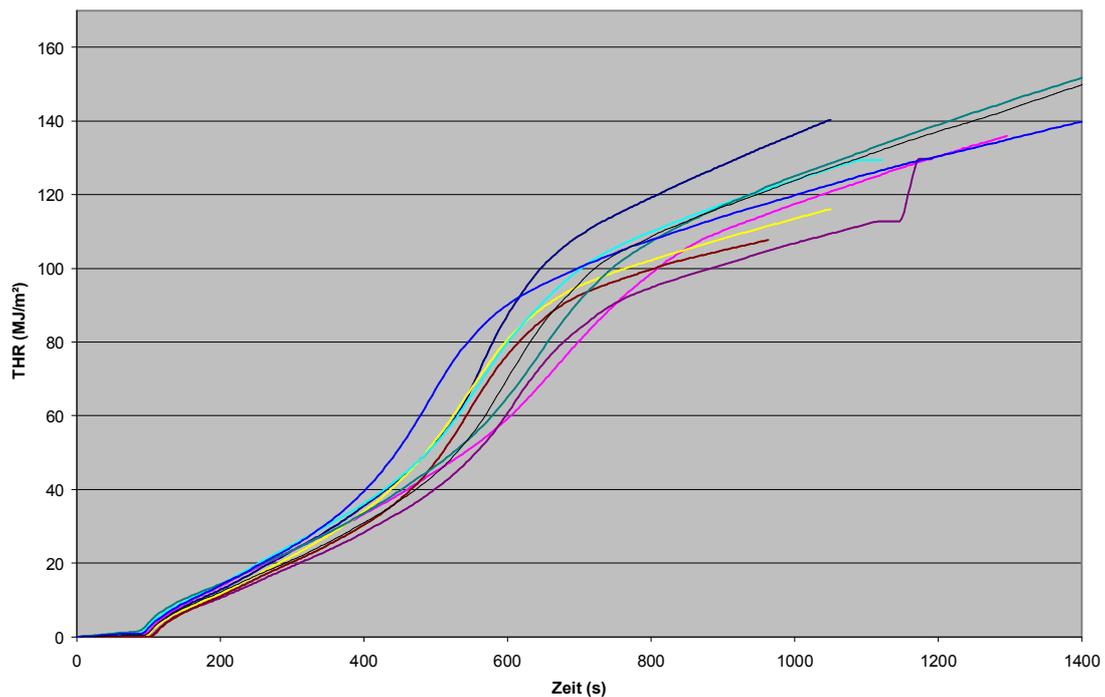


Abb. 1.: Reproduzierbarkeit der THR-Kurve (Cone-Calorimeter) am Beispiel von bis 280°C gehärtetem B10

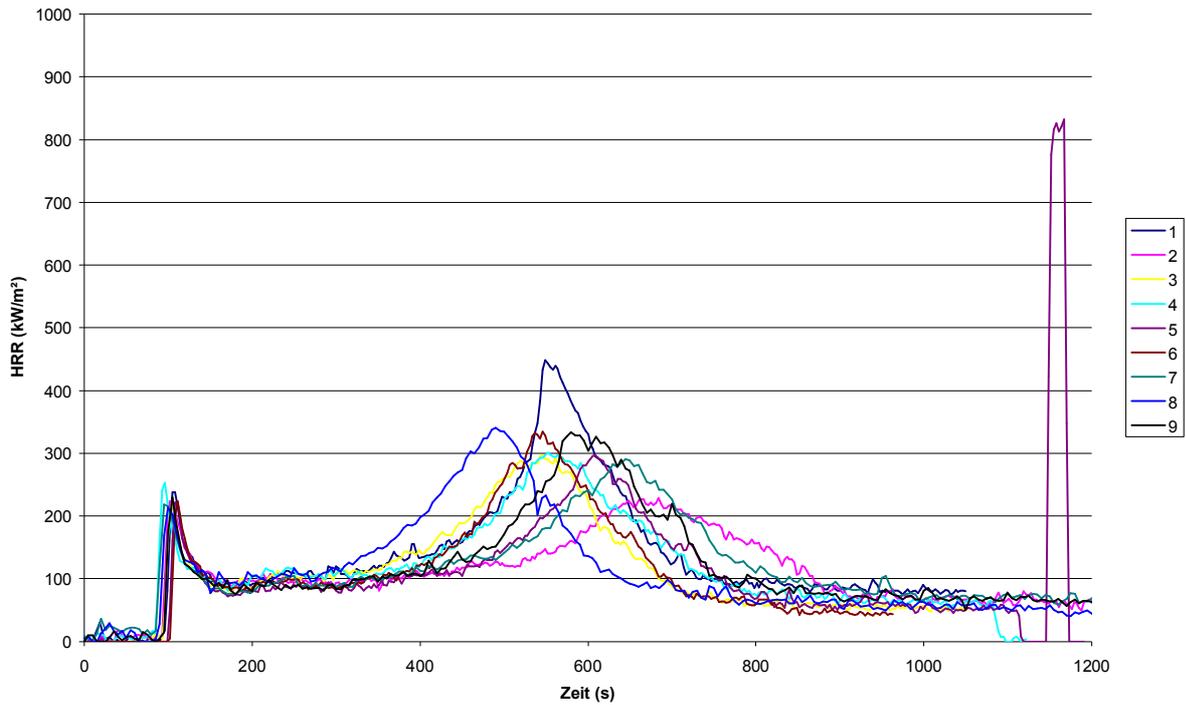


Abb. 2a.: Reproduzierbarkeit der HRR-Messung (Cone-Calorimeter) am Beispiel von bis 280°C gehärtetem B10

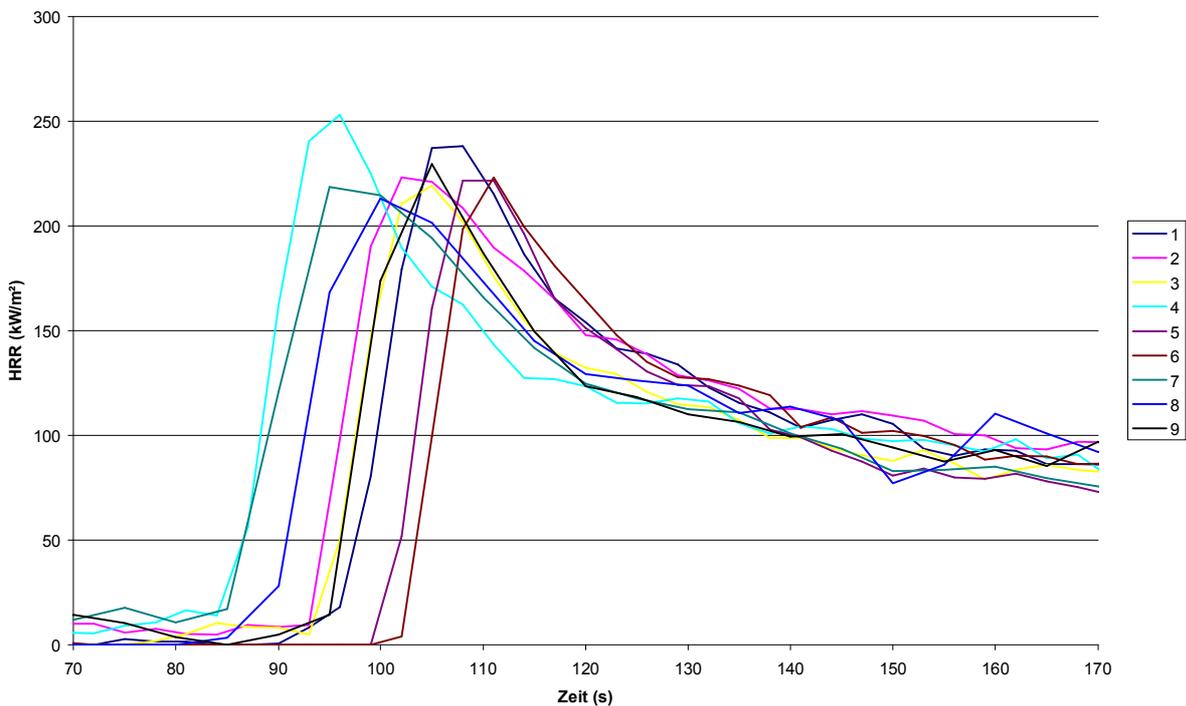


Abb. 2b: Wie Abb. 2a, nur höhere Auflösung des Anfangsbereichs der Kurven

Einige Fehlerursachen konnten im Rahmen dieser Untersuchungen identifiziert werden, bzw. auch ausgeschlossen werden. So wurde z.B. untersucht, ob das Zusammenstückeln der Probe aus verschiedenen Segmenten (welches teilweise notwendig ist, da nicht von allen Materialien ein 10*10cm bzw. 6*6cm zusammenhängendes Stück vorlag) einen starken Fehlereinfluss hat. Glücklicherweise ist dies nicht der Fall. Ebenso wurden Messungen von 10*10cm (Cone-

Standard) und 6*6cm großen Probenstücken verglichen (für letzteres wurde eine Probenhalterung gebaut). Es zeigte sich, dass es auch möglich ist, mit einer verkleinerten Probenfläche zu arbeiten, es wurde kein Einfluss auf die zentrale Messgröße, die Heat Release Rate gefunden. Die verkleinerte Probenfläche von 6*6 cm wurde daher im Weiteren als Standard verwendet, wodurch der Aufwand zur Probenherstellung erheblich verringert werden konnte. Einen Einfluss hat die Probenfläche erwartungsgemäß auf Entzündungszeit und Smoke Density. Daher ist es wichtig, bei vergleichenden Untersuchungen immer die gleiche Fläche zu verwenden, im Falle der hier dargestellten Untersuchungen 6*6 cm.

Während also die vom Cone bestrahlte Fläche sowie die Stückelung keinen feststellbaren Einfluss auf das Messergebnis besitzen, hat die Probendicke einen erheblichen Einfluss. Dieser scheint auch abhängig von der Brennbarkeit des Materials zu sein, besonders gut brennbare Materialien dürfen nicht zu dünn sein. Als Grund hierfür wurde festgestellt, dass sich Proben, wenn sie zu dünn sind, auf Grund der Erwärmung beim Brand aufwölben. Damit trägt auch die Unterseite zum Brand bei, es ist dann keine Reproduzierbarkeit gegeben. Als sehr wesentlich wurde also identifiziert, dass während der Cone-Messung tatsächlich nur der Brand der Probenoberseite gemessen wird. Probendicken von ca. 6mm haben sich als ausreichend erwiesen, 3mm dicke Proben waren dagegen (besonders bei gut brennbaren Harzen) noch zu dünn.

Dieser starke Einfluss der Fläche, welche am Brand teilnimmt, kann auch als eine der Ursachen gelten, warum Sandwich-Bauteile weniger reproduzierbare Ergebnisse liefern. Hier löst sich (kaum reproduzierbar) die Deckschicht während des Brandes ab, womit sich abrupt (aber nicht reproduzierbar) die am Brand teilnehmende Probenoberfläche erhöht. Dicke Reinharzproben geben daher deutlich reproduzierbarere Ergebnisse, und eignen sich daher gut für systematische Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen und zur Vorauswahl von Harzen. Eine quantitative Relation zwischen Reinharz-Brandverhalten und Brandverhalten des entsprechenden Sandwich-Bauteils mit Decklagen, die das identische Harz enthalten, konnte bisher nicht aufgestellt werden. Dies bleibt das Ziel zukünftiger Untersuchungen.

Da bei glasfaserverstärkten Reinharzen Parameter wie Schlichte sowie Geometrie und (lokal schwankender) Anteil der Faserverstärkung einen erheblichen Einfluss darstellen, der kaum reproduzierbar gestaltet werden kann, hat die Cone-Calorimeter-Untersuchung von Reinharzen hinsichtlich Reproduzierbarkeit auch Vorteile gegenüber der Untersuchung massiver, d.h. mehrlagiger GFK-Platten. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass besonders bei experimentellen Formulierungen und Materialien die Herstellbarkeit von Reinharz-Proben deutlich effektiver ist als die von GFK-Proben.

Vergleichende Voruntersuchungen zum Brandverhalten verschiedener Harze für die Einengung der Materialauswahl

In den Abb.n 3 bis 5 sind die Entzündungszeiten, die HRR (Maximum, HRR nach 300s, THR nach 300s) sowie die Rauchgasdichte (total smoke release) für Cyanate und modifizierte Cyanate (linkes Feld) sowie (im rechten Feld) Epoxidharze dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Entzündungszeiten der EP-Harze kürzer, und deren HRR höher als die der Cyanate, d.h., wie auch literaturbekannt, sind EP-Harze deutlich besser brennbar als Cyanate. Besonders fatal ist gegenüber Cyanaten auch die Rauchgasentwicklung von EP-Harzen, in diesem für die Kabine wichtigen Kriterium differenzieren sich EP-Harze noch deutlich negativer von Cyanatharzen als in der HRR.

Interessant ist, dass Zähmodifikatoren wie z.B. CTBN, die auf Grund ihrer Struktur als sehr brennbar gelten dürften, die Brennbarkeit von damit modifizierten Cyanaten kaum erhöhen. Möglicherweise gibt es hier einen Schutzeffekt der Matrix. Derartige Modifikatoren entmischen zu partikulären Phasen, möglicherweise werden diese beim Brand durch die wenig brennbare Matrix geschützt. Dies ist ein interessanter Aspekt, weil sich damit ein breites Formulierungsspektrum für gering brennbare Harze mit brennbareren Modifikatoren auf tun würde, ohne dass die Brennbarkeit des Zweiphasensystems wesentlich erhöht wird. In diesem

Projekt konnte dieser Aspekt nicht weiter untersucht werden, sollte aber in weiteren Projekten näher betrachtet werden.

Ein wesentliches Resultat der Voruntersuchungen ist, dass durch die Kombination von Cyanaten mit Epoxiden (hier untersucht: Epikote 828 und Araldite LY1406) die Flammwidrigkeit der Cyanate deutlich verringert wird. Bei der HRR liegen die Werte dann bereits auf dem Niveau von Epoxidharzen, es ist also kein Vorteil der Härtung von EP mit Cyanat (gegenüber der Härtung mit z.B. Aminen) mehr feststellbar, bei der Rauchgasdichte (und auch bei der Entzündungszeit) gibt es noch einen Vorteil. Da aber die HRR ein entscheidender Parameter ist, wurden Kombinationen von Cyanaten mit Epoxiden in diesem Projekt nicht weiter verfolgt.

Diese sind für Prepregmaterialien auch bereits Stand der Technik. Man kombiniert Cyanate mit Epoxidharzen, um die Härtungstemperatur abzusenken, sowie möglicherweise auch, um zu preiswerteren Prepregharzen zu gelangen. Diese Vorteile werden jedoch, wie in Abb.n 3 bis 5 gezeigt, mit schlechtem Brandverhalten erkauft, und damit wird der eigentlich entscheidende Vorteil der Cyanatharze für Kabinenbauteile, deren intrinsische Flammwidrigkeit bei geringer Toxizität, weitgehend vernichtet.

Gegenstand der Untersuchungen und Entwicklungen in diesem Projekt waren daher vor allem Modifizierungsrichtungen, die eine Härtung bei niedrigen Temperaturen ermöglichen, dabei aber die intrinsische Flammwidrigkeit der Cyanate weitgehend bewahren.

Die oben erwähnten umfangreichen Vorarbeiten am IZM-Teltow sowie die Untersuchung des Marktes und der Literatur und Patente haben aufgezeigt, dass es Potentiale für derartige Modifizierungen geben sollte, diese aber bisher weder in Form von Patenten oder Veröffentlichungen dargestellt sind, noch als kommerzielle Produkte erhältlich sind.

Auch zwischen verschiedenen Epoxidharzen gibt es deutliche Unterschiede im Brandverhalten. (Es wurden bei der Monomerauswahl hier vorrangig diejenigen verglichen, welche in Formulierungen für Luftfahrt-Strukturharze eingesetzt werden). So ist gerade das einzige luftfahrtqualifizierte (und daher umfangreich eingesetzte) RTM6 sehr brennbar. Vorteile hinsichtlich Flammwidrigkeit bietet dagegen (ähnlich wie bei den Cyanaten) die Novolak-Struktur.

Interessant bei den Cyanaten ist, dass auch das XU366 trotz seines niedrigen T_g eine relativ geringe Brennbarkeit besitzt. Dieses Monomer, obwohl gegenwärtig in Europa nicht gelistet, wäre daher auf Grund der Kombination von sehr guten mechanischen Eigenschaften (Bruchzähigkeit) bei ausreichendem T_g und geringer Brennbarkeit von Interesse (auch für Strukturanwendungen mit Anforderungen an Brandverhalten) und wurde deshalb in die Untersuchungen mit einbezogen.

Erwartungsgemäß ist die Brennbarkeit des Cyanats mit der cycloaliphatischen Grundstruktur (XU71787.02) gegenüber denen mit aromatischer Grundstruktur (alle anderen Typen) erhöht, dieses Cyanat wurde daher im Weiteren nicht berücksichtigt. Ebenso ist das M10 durch die höhere Zahl von Methylgruppen brennbarer und wurde (auch wegen weiterer Nachteile wie geringe Reaktivität) im Weiteren nicht mehr berücksichtigt.

Cone Calorimeter test @ 50 kW/m²: Resin plates 60 x 60 x 5...6 mm³

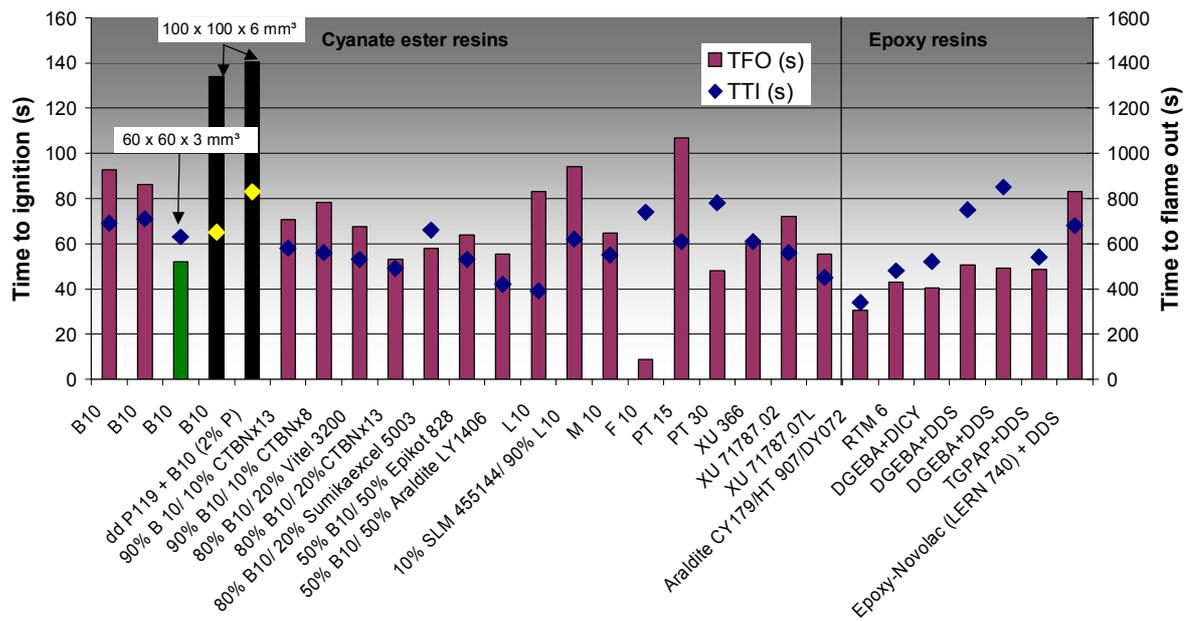


Abb. 3: Zeit bis zur Entzündung in Cone-Calorimeter Tests (50kW/m²) für gehärtete Cyanatharze, zähmodifizierte Cyanatharze und Epoxidharze.

Cone Calorimeter test @ 50 kW/m²: Resin plates 60 x 60 x 5...6 mm³

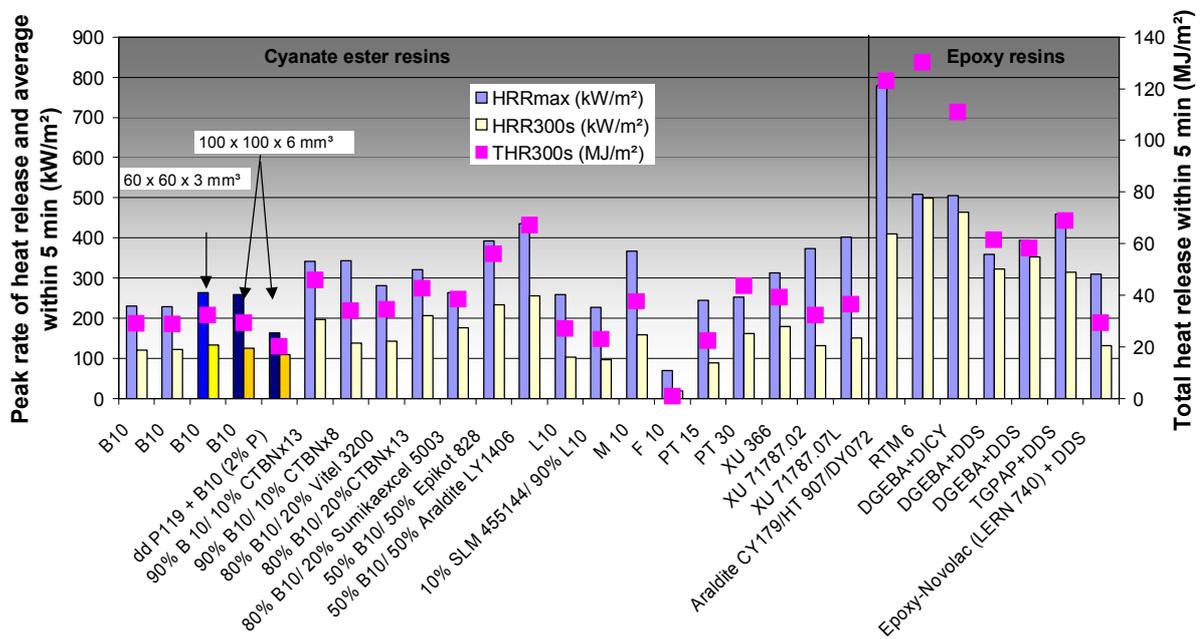


Abb. 4: Heat Release Rate (Maximum, HRR bei 300s und Total Heat Release Rate nach 300s) in Cone-Calorimeter Tests (50kW/m²) für gehärtete Cyanatharze, zähmodifizierte Cyanatharze und Epoxidharze

Cone Calorimeter test @ 50 kW/m²: Resin plates 60 x 60 x 5...6 mm³

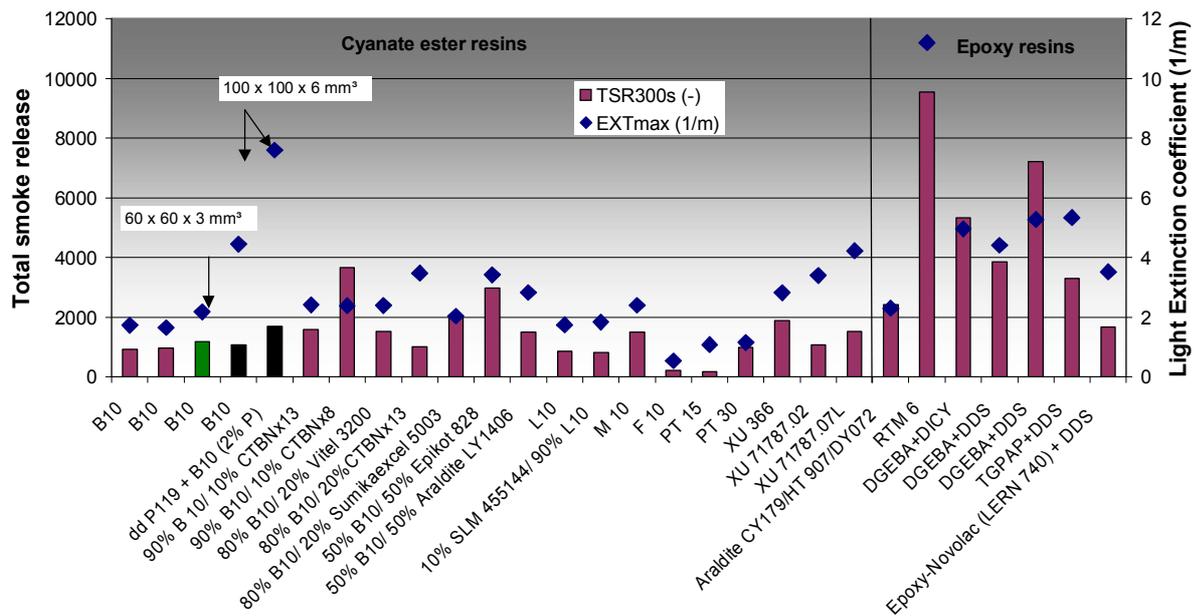


Abb. 5: Smoke Release (Maximum und Total Smoke Release nach 300 s) in Cone-Calorimeter Tests (50kW/m²) für gehärtete Cyanatharze, zähmodifizierte Cyanatharze und Epoxidharze

II. 1.1.3. Struktur-Eigenschafts-Untersuchungen sowie Entwicklung eines Prepregharzes und Herstellung von Prepregs für Innenaustattungsteile (Honeycomb-Sandwich)

Es wurden eine Reihe von Cyanaten sowie Kombinationen von diesen mit einem Co-Monomer bei verschiedenen Härtungstemperaturen zu verschiedenen Umsätzen gehärtet und der Einfluß des Umsatzes sowie des Co-Monomer-Anteils auf thermomechanische Eigenschaften, die Bruchzähigkeit und das Brandverhalten untersucht.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Prepregharz entwickelt, welches eine geringe Brennbarkeit (bzw. generell gute FST-Eigenschaften) aufweist, sowie Härtung bei niedrigen Härtungstemperaturen (z.B. 140°C 1h) ermöglicht. Es wurden Prepregs hergestellt und Airbus zur Testung zur Verfügung gestellt. Diese neuentwickelten Prepregharze erfüllen die Luftfahrt-Brandanforderungen, zeigen gute Schälfestigkeiten zur Honigwabe und zeigen nach Härtung im Crushed-Core-Prozeß eine exzellente Oberflächenqualität. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Phenolharz-Prepregs dar.

II. 1.2. Entwicklung neuartiger Kernwerkstoffe – Die Noppenwabe

II. 1.2.1. Zielstellung

Sandwichbauteile sind im Leichtbau häufig anzutreffende Konstruktionselemente. Sie setzen sich aus einem Kernwerkstoff mit beidseitigen Decklagen zusammen. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Kernwerkstoffes, der als Ersatz und Ergänzung zu den bisher in der Luftfahrt verwendeten Kernwerkstoffen eingesetzt werden kann. Dieser soll die folgenden Nachteile der Honeycombs überwinden:

- Schlechte akustische Dämpfung

- Hoher Preis
- Häufig unzureichende Decklagenanbindung
- Nicht oder nur unzureichend drainierbar (bzw. nicht zu entlüften)

II. 1.2.2. Übersicht zu Kernwerkstoffen

Honeycomb

Honeycombs werden aus unterschiedlichen Materialien wie Aluminium, Kunststoff und Papier hergestellt. In der Luftfahrt werden meist Aramidpapiere verwendet, da sie gute mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht bieten und außerdem schwer entflammbar sind. Honeycombs sind in der Luftfahrt bewährt und weit verbreitet.

Honeycombs bereiten bei der Herstellung von Sandwichbauteilen Probleme durch Telegraphing, weswegen die Bauteile oft geschliffen und gespachtelt werden müssen. Zudem ist die Anbindung der Deckschichten an die Waben problematisch, da die Anbindungsfläche sehr gering ist. Die schlechte Anbindung beeinträchtigt insbesondere das Impactverhalten. Die Anbindungsfläche kann erhöht werden, indem eine größere Menge Klebstoff zur Deckflächenanbindung aufgebracht wird. Diese Maßnahme erhöht das Flächengewicht um über 100g/m².

Honeycombs haben ein sehr geringes Raumgewicht und verleihen der Sandwichstruktur eine hohe Druckfestigkeit. Diese hohe Steifigkeit bedingt eine geringe Schlagzähigkeit, da Impactenergie nicht vom Kern aufgenommen und auf eine große Fläche verteilt wird, wie das z.B. bei Schäumen der Fall ist. Die akustische Dämpfung von Honeycombsandwiches ist gering, was ebenfalls durch die hohe Steifigkeit der Honeycombs in Dickenrichtung verursacht wird.

Phenolharzgetränkte Honeycombs absorbieren Wasser. Die Waben sind in der Regel nicht drainierbar, daher kommt es unter bestimmten Bedingungen zu Wasseransammlungen in den Waben.

Honeycombs haben unterschiedliche Steifigkeiten und Festigkeiten in unterschiedliche Richtungen parallel zur Bauteilebene.

Schäume

Schäume sind in sehr vielfältigen Ausführungen erhältlich. Sie unterscheiden sich primär durch die verwendeten Ausgangsstoffe. In der folgenden Aufzählung wird eine Auswahl an Grundmaterialien vorgestellt.

PVC Polyvinylchlorid: Schlagzäh und schältest, insbesondere lineares, unvernetztes PVC. Einzelne vernetzte Sorten sind für den Prepregprozess geeignet.

PU Polyurethan: Viele PU Schäume sind spröde, sie sind weder schlagzäh noch schältest.

PEI Polyetherimid: Geringe Wasserabsorption, hohe Temperaturbeständigkeit, geeignet für den Prepregprozess.

PMI Polymethacrylimid: Sehr chemikalienbeständig, hohe Temperaturbeständigkeit und Thermoelastizität. Geeignet für den Prepregprozess.

SAN Styrol / Acrylnitril: Einzelne Sorten sind geeignet für den Prepregprozess.

Metallschäume: Gute mechanische Eigenschaften bei einem im Vergleich zu den Polymeren Schaumwerkstoffen hohen Raumgewicht.

Schäume können nicht nur durch die unterschiedliche Ausgangsstoffe unterscheiden, sondern auch durch unterschiedliche Zellstrukturen:

Hartschäume: Um die Potentiale der Sandwichstruktur ausschöpfen zu können, kommen ausschließlich Hartschäume in Betracht.

Lineare Schäume: Langgezogene Zellen erhöhen die Steifigkeit in eine Richtung.

Offenzellige Schäume: Die Zellenwände sind durchbrochen, der Schaum ist evakuierbar und drainierbar.

Geschlossenzellige Schäume: Geschlossene Zellen verhindern das Eindringen von Harz oder Feuchtigkeit in den Schaumkern.

Thermoplastische Schäume: Warmverformen ist möglich.

Vernetzte Schäume: Warmverformen ist nicht oder nur begrenzt möglich. Die Wärmeformbeständigkeit ist höher als bei nicht vernetzten Schäumen des gleichen Materials.

Vernähte Schäume: Der Schaum wird mit den Deckschichten vernäht um die Schälffestigkeit zu erhöhen.

Die Anbindung zwischen Schaumkernen und den Deckschichten ist in vielen Fällen problematisch. Zudem sind Hartschäume unflexibel und kollabieren oder brechen bei Belastung.

Durch Vernähen der Deckschichten durch den Kern hindurch wird eine Erhöhung der Schälffestigkeit erzielt. Delaminationen der Deckschichten vom Kern werden erschwert und ihre Ausbreitung wird behindert. Bei einer dichten Vernähung werden von den Fäden in z-Richtung auch Druck- und Scherkräfte aufgenommen, insbesondere wenn die Fäden mit Harz getränkt sind. Die vernähten Schäume ähneln dann einem ausgeschäumten Abstandsgewebe. Durch das Vernähen steigt das Raumgewicht des Kernmaterials an.

Durch die im Vergleich zu Honeycombs geringe Zellgröße tritt bei Schäumen kein Telegraphing auf.

PMI Schäume absorbieren Wasser, sie müssen wasserdicht in Deckschichten eingebunden werden.

Schäume bieten in vielen Fällen im Vergleich zu Honeycombs verbesserte akustische Dämpfung und thermische Isolierung.

Das Impactverhalten von PEI und PMI Schäumen ist dem von Honeycombs überlegen. Allerdings ist das Flächengewicht höher, ein Aramid-Honeycomb mit 48 kg/m^3 wird bei Luftfahrtanwendungen i.d.R. mit einem $70\text{-}80 \text{ kg/m}^3$ schweren PEI oder PMI Schaum ersetzt.

Schäume sind kommerziell mit sehr geringen Raumgewichten erhältlich (ab ca. 8 Kg/m^3). Nach oben hin ist das Raumgewicht durch das Raumgewicht des massiven Grundmaterials begrenzt.

Hohlprofilsegmente

Kurze Segmente eines rechteckigen Hohlprofils aus glasfaserverstärktem Kunststoff werden auf einem Trägermaterial fixiert und so als Kernmaterial in die Form eingelegt. Die Segmente liegen im Kern, d.h. zwei Seiten des Profils werden mit den Deckschichten der Sandwichstruktur verklebt. Dadurch ist der Kern drainierbar. Das Verfahren ist 2001 von der Shell International Trading and Shipping Co Ltd. patentiert worden. Die Erfinder sehen als Vorteile im Vergleich zu Schäumen oder Honeycombs die gute Drapierbarkeit und eine verringerte Rissfortschrittsrate. Eine große Anbindungsfläche der Kernsegmente an die Deckschichten gewährleistet eine hohe Schälffestigkeit. Die Herstellung des Kernmaterials scheint aufwändig, da eine große Anzahl kleiner Segmente auf dem Trägermaterial fixiert werden muss. Durch die Verwendung von Glasfaserverstärkung ist das Raumgewicht vermutlich hoch. Als Anwendungsgebiete sind insbesondere der Schiffsbau aber auch landgebundene Transportfahrzeuge angestrebt.

Balsaholz

Balsaholz ist aus prismenförmigen Zellen aufgebaut, die in ihrer Länge begrenzt und unregelmäßig sind. Die Zellwände bestehen aus Zellulosefasern in einer Ligninmatrix. Balsaholzsandwiches verfügen über gute Druck- und Schersteifigkeiten sowie über eine gute Schälffestigkeit. Balsaholz wurde schon früh als Sandwichmaterial in Flugzeugen eingesetzt, hat heute aber seinen Haupteinsatzbereich im Schiffsbau.

Balsaholz hat ein vergleichsweise hohes Raumgewicht. Feuchtigkeit verschlechtert die mechanischen Eigenschaften signifikant. Eine Drapierbarkeit ist nicht gegeben, eine Anpassung an die Bauteilgeometrie kann durch fräsen erreicht werden oder durch Anordnen von Blöcken, wobei allerdings in verformten Bereichen Spalte zwischen den Blöcken verbleiben.

Abstandsgewebe

Abstandsgewebe bieten den Vorteil, dass der Sandwicheaufbau bereits beim Weben fertiggestellt ist, er muss nicht beim Einlegen in die Form erstellt werden. Die Fäden, die durch den Kern laufen und den Abstand zwischen den Deckschichten überbrücken, sind üblicherweise dicke Einzelglasfasern. Sie besitzen die nötige Steifigkeit, die Deckschichten während des Herstellungsprozesses auseinander zuhalten.

Wenn das fertige Sandwichelement auf Druck oder Scherung belastet wird, werden die Fasern, die den Abstand zwischen den beiden Deckschichten überbrücken, auf Druck bzw. Biegung belastet. Bei beiden Belastungsarten bieten Fasern nur wenig Steifigkeit. Sie müssen mit einer großen Menge Harz stabilisiert werden, woraus ein hohes Raumgewicht resultiert. Die Harzmenge im Abstandsgewebe kann nur schlecht definiert werden, da Kern und Deckschichten in einem Schritt getränkt werden müssen.

Abstandsgewebe können ausgeschäumt werden, dadurch wird wie bei vernähten Schäumen die Druckfestigkeit des Schaums mit der Schälffestigkeit der miteinander verwebten Decklagen kombiniert.

Eine den Abstandsgeweben in Aufbau und Eigenschaften ähnliche Struktur sind die Abstandsgewirke. Die beidseitigen Deckschichten werden hierbei nicht gewebt sondern gewirkt. Ebenso wie beim Abstandsgewebe werden die senkrecht durch den Kern laufenden Fäden fest in die Deckschichten eingearbeitet. Da die Fäden beim Wirken stärker verformt werden als beim Weben, ist der Einsatz von Glasfasern problematisch.

Faltwabe

Faltwaben sind in einer Richtung drainierbar, wodurch sich Vorteile im Gebrauch des Sandwichbauteils ergeben. Durch die Drainage wird die Absorption von Wasser in der Struktur verhindert, das Gewicht nimmt ab.

Faltwaben können über gekrümmte Geometrien drapiert werden.

Eine Variante der Faltwabe ist Z-crimp, eine doppelt gefaltete Wabe. Die Flächen der einfachen Faltung sind ebenfalls gefaltet.

Bei Faltwaben steht für die Deckflächenanbindung nur eine kleine Fläche zur Verfügung. Die stützenden Papierstege verlaufen nicht senkrecht zur Bauteilebene, was die Drucksteifigkeit vermutlich verringert, die Dämpfung jedoch erhöhen dürfte.

KCo[®] ist eine Kombination aus Faltwabe und Schaum. Die Drainierbarkeit geht bei dieser Kombination verloren, dafür verbessert sich die Deckschichtenanbindung und das Isolations- und Dämpfungsverhalten.

Über die Faltwabe sind nur wenig Informationen veröffentlicht, sie wird zur Zeit von Airbus und dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart eingehend auf die Einsatzmöglichkeiten im Rumpfbereich von Flugzeugen untersucht.

Thermoplastische Kernstrukturen

Thermoplastische Kernstrukturen werden meist im Extrusionsverfahren hergestellt. Die Kernstrukturen werden endlos extrudiert und anschließend auf die für das Sandwichbauteil benötigte Dicke zugeschnitten.

Vorteile ergeben sich bei diesem Verfahren insbesondere bei der Verwendung von ebenfalls thermoplastischen Deckschichten. Die Deckschichtenanbindung ist in diesem Fall sehr gut. Thermoplastische Sandwichbauteile können miteinander verschweißt und warm umgeformt werden. So lassen sich große Strukturen, wie z.B. Lastwagenaufbauten mit geringem Aufwand realisieren.

Thermoplastische Kernstrukturen erreichen nicht die notwendigen spezifischen Eigenschaften, die in der Luftfahrt gefordert werden.

Kontinuierlich hergestellte Kernstrukturen der Katholieke Universiteit Leuven

FoldHex: Papier wird gestanzt und anschließend in einem kontinuierlichen Verfahren zu Honeycombs aufgefaltet. Eine Produktionsanlage im Labormaßstab wurde entwickelt. Durch den Faltprozess bleiben Flächen auf Ober- bzw. Unterseite der Wabe, die eine große Anbindungsfläche zu den Deckschichten ermöglichen. Dadurch ergibt sich im Gegensatz zu den herkömmlichen Honeycombs eine größere Schälfestigkeit und eine geringere Neigung zur Delamination.

ThermHex: Ähnlich den FoldHex Waben wird eine Honeycombstruktur gefaltet, in diesem Fall aus einem thermoplastischen Kunststoff. Der Kunststoff wird vor dem Auffalten in eine Honeycombstruktur thermoplastisch verformt, dadurch entfällt das Längsfalten, das bei den FoldHex Waben notwendig ist.

TorHex: Ein Papierverbund mit Wellpappenstruktur wird kontinuierlich in Streifen geschnitten, diese Streifen werden anschließend um 90° verdreht und wieder zusammengefügt. Dadurch

wird aus dem Ausgangsmaterial mit Wellpappenstruktur, in dem die Papierlagen vorwiegend horizontal liegen, eine Struktur mit vertikal gestellten Papierlagen. Die vertikal gestellten Papierebenen bilden im fertigen TorHex - Material eine wabenähnliche Struktur.

Bei allen drei kontinuierlichen Verfahren müssen senkrechte Flächen in den Kernstrukturen verklebt werden. Es ist anzunehmen, dass dieser Klebevorgang das kontinuierliche Verfahren stark verlangsamt und somit die Vorteile eines kontinuierlichen Verfahrens nicht ausgeschöpft werden können.

Noppenwabe

Von Noppenstrukturen werden aus theoretischen Überlegungen Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Kernmaterialien in mehreren Bereichen erwartet:

- Da die Wände der Noppen nicht senkrecht zu den Decklagen stehen, ist mit einer verbesserten akustischen Dämpfung zu rechnen.
- Eine bessere Deckschichtenanbindung als Honeycombs und Schäume durch große Auflageflächen der Deckschichten am Gewebe der Noppenkerne. Daraus resultiert eine höhere Schälfestigkeit und verbessertes Impactverhalten.
- Bessere Drapierbarkeit im Vergleich zu Honeycombs und Hartschäumen. Da die Noppen aus einer Fläche herausragen, ähneln die Drapiereigenschaften denen eines zweidimensionalen Gestricks.
- Im Gegensatz zu Hartschäumen kann bei Noppenkernen das bei Honeycombs verwendete Crushed Core Verfahren eingesetzt werden.
- Geringere Kosten als Honeycombs. Strick- und Tiefziehprozesse sind voraussichtlich weniger aufwändig als die Honeycombherstellung. Der Tränkvorgang ist bei Noppenkernen unkomplizierter als bei Honeycombs.
- Noppenkerne sind drainierbar, wenn sie aus einem offenmaschigen Gestrick hergestellt werden.

II. 1.2.3. Mögliche Technologien zur Herstellung der Noppenwabe

Für die Herstellung von Noppenwaben aus Gestricken wurden zwei Methoden angewendet:

Methode 1

Bei der ersten Methode ist das Ausgangsmaterial für die Noppenwabe ein Gestrick oder ein Gewirk aus hochfesten Fasern z.B. aus Aramid oder Polyester. Dieses liegt i.d.R. als bahnenförmiges Material vor und wird als solches mit einem Reaktivharz (z.B. Phenolharz) imprägniert. Das imprägnierte Gestrick / Gewirk ist nach der Imprägnierung ein Prepreg, d.h. das Harz ist in der Regel trocken, aber noch nicht ausgehärtet. Beim Tiefziehen im beheizten Werkzeug schmilzt das Harz zunächst auf und fixiert beim Aushärten die Noppen der Noppenwabe. Anhang 1 zeigt Bilder der einzelnen Herstellungsschritte. Dieses Verfahren ist aus einem Patent der Hoechst AG bekannt, wurde aber bislang nicht zur Herstellung eines Kernwerkstoffes für die Luftfahrt weiterentwickelt.

Methode 2

Die zweite Methode geht ebenfalls von einem Gestrick oder Gewirk aus, allerdings wird als Garn ein POY (partially oriented yarn) aus Polyester verwendet. Das Gestrick wird zunächst

tiefgezogen, wobei die Garne verstreckt werden. Die Noppen bleiben auch ohne Imprägnierung formstabil genug für die Weiterverarbeitung. Erst nach dem Tiefziehen wird das Gestrick mit Harz imprägniert und kann dann direkt zur Noppenwabe ausgehärtet oder als Prepreg - Noppe weiterverarbeitet werden. Dieses Verfahren ist von der Fa. Watermann patentiert, wird bislang aber ebenfalls noch nicht zur Herstellung von Kernwerkstoffen für die Luftfahrt verwendet.

Als weiteres Verfahren, eine Noppenstruktur herzustellen, wurde das Pressen und das Spritzpressen untersucht. Hierbei wird eine Harz-Faser-Mischung in einer Form ausgepresst, bzw. über einen Spritzpressvorgang in eine Kavität gespritzt. Diese Vorgehensweise ist nicht aus der Literatur bekannt, insbesondere nicht aus der Verarbeitung von Harz-Aramidfaser-Mischungen. Bei der Verarbeitung von anderen hochgefüllten Reaktivharzen finden jedoch beide Verfahren Anwendung.

II. 1.2.4. Aufarbeitung des Standes der Technik

Die Noppenwabe wurde erstmals 1977 von der Hoechst AG patentiert, von den umfangreichen Untersuchungen, die bei der Hoechst AG durchgeführt wurden, ist allerdings nur sehr wenig veröffentlicht worden. Da die Hoechst AG in der Form nicht mehr existiert, ist eine Zusammenarbeit nicht möglich, das Know-how ist bei den Nachfolgegesellschaften nicht mehr vorhanden.

Das Fraunhofer IZM hat ausführlich über die Noppenwabe recherchiert, es fanden Gespräche mit dem Erfinder der Noppenwabe, Herrn Disselbeck, statt. Herr Disselbeck informierte dabei mündlich über den bei den Entwicklungsarbeiten der Fa. Höchst erreichten Stand, es konnte bei diesen Gesprächen jedoch keine Möglichkeit gefunden werden, dem IZM-Teltow firmeninternes Berichtsmaterial zu den damaligen Höchst-Arbeiten zur Verfügung zu stellen. Mit der Hoechst - Nachfolgegesellschaft INVISTA wurde ebenso kooperiert wie mit der Fa. Karl Mayer Textilmaschinen, die an den Entwicklungen der Hoechst AG mit beteiligt war. Die Fa. Karl Mayer Textilmaschinen und die Fa. Mattes & Ammann stellen Gestricke bzw. Gewirke für Versuche zur Verfügung. Auch zur Fa. Watermann wurde Kontakt hergestellt, woraus sich eine Kooperation entwickelt hat.

II. 1.2.5. Technologische Voraussetzungen am IZM und bei Partnern

Für die Herstellung und Entwicklung von Noppenwaben werden die folgenden Maschinen, Verfahren und Geräte benötigt:

Die Gestricke und Gewirke müssen auf Strick- oder Wirkmaschinen hergestellt werden. Hierfür wurde über die gesamte Projektdauer mit den Firmen Karl Mayer Textilmaschinen und Mattes & Ammann kooperiert.

Um das seitliche Aufrollen der Gestricke und Längsverzug zu verhindern, wurden die Gestricke auf beiden Seiten vom Fraunhofer IZM mit Bändern besäumt.

Für die anschließende Imprägnierung eignet sich am besten eine horizontale Imprägnieranlage, die mit einem Trägermedium arbeitet. Die Imprägnierung wurde von der Fa. epo durchgeführt.

Das Tiefziehen der imprägnierten Gestricke wurde zunächst bei der Fa. INVISTA durchgeführt, später wurden die Werkzeuge von dort ausgeliehen und eine Presse am Fraunhofer IZM so modifiziert, dass die Werkzeuge darin montiert werden können.

II. 1.2.6. Entwicklung der Noppenwabe nach Methode 1

Tiefziehfähigkeit

Ein wichtiges Kriterium für die Verwendbarkeit von Noppenwaben ist die ausreichende Tiefziehfähigkeit. Diese wird maßgeblich von dem verwendeten Gestrück / Gewirk beeinflusst. Der Harzauftrag kann die Tiefziehfähigkeit beeinflussen, insbesondere verringern, wenn das Harz bereits begonnen hat auszuhärten und damit die Schlaufen des Gestricks / Gewirks daran hindert, aneinander abzugleiten.

Für eine qualitative Untersuchung der Tiefziehfähigkeit wurde ein Versuchsaufbau konstruiert (Anhang 2, Abb. A6). Der Versuchsaufbau stellt das Tiefziehen einer einzelnen Noppe nach. Mit diesem Aufbau wurden Gestrücke und Gewirke untersucht, die von unseren Kooperationspartnern Karl Mayer Textilmaschinen und Mattes & Ammann entwickelt und gefertigt wurden. Die Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen zeigen Tabelle 3 und Abb. A7 im Anhang 2.

Die im Versuchsaufbau qualitativ ermittelte Tiefziehfähigkeit ist deutlich höher als die Tiefziehfähigkeit im Tiefziehwerkzeug. Die qualitativ erhaltene Aussage, ob ein Gestrück oder Gewirk besser tiefziehfähig ist als ein anderes, kann vom Versuchsaufbau auf das Tiefziehwerkzeug übertragen werden.

Die Tiefziehfähigkeit der Gestrücke basiert bei Methode 1 ausschließlich auf der Verformung der Maschen, die Fasern werden nicht verstreckt. Wie sich bei den Versuchen herausgestellt hat, bleibt die Tiefziehfähigkeit dadurch sehr gering. Um eine Wabenstärke von ca. 6,5 mm zu erreichen, müssen die Noppen bei 8 mm Innendurchmesser (oben gemessen) in einem Raster von 13 mm stehen. Bei dieser geringen Noppendichte können keine hohen Steifigkeiten erreicht werden.

Handhabung der Gestrücke / Gewirke

Die Handhabung der Gestrücke bereitete zunächst Probleme, da sie beim Imprägnieren leicht in Längsrichtung verzogen werden und sich von der Seite her stark aufrollen. Um das Handling zu verbessern, wurde auf beiden Seiten der Stoffbahn ein ca. 50 mm breites, zugfestes Band angenäht. Dieses Band verhindert zum einen das seitliche Aufrollen des Stoffes und verhindert zum anderen, dass der Stoff beim Wickeln in Längsrichtung verzogen wird.

Oberfläche von Noppenwabensandwiches

Die veränderte Kernstruktur erfordert aus Sicht der Oberflächenqualität Veränderungen im Herstellungsprozess der Sandwichplatte. Die übliche Vorgehensweise kombiniert mit den üblicherweise verwendeten Prepregs aus dem Luftfahrt- Interior- Bereich führt zu Einfallstellen zwischen den Noppen, da die nicht unterstützten Bereiche im Vergleich zu Honeycombs groß sind. Die Einfallstellen treten auch auf der Bauteilunterseite auf.

Eine einfache und naheliegende Methode zur Verbesserung der Oberfläche ist das Aufkleben von ausgehärteten Laminaten anstelle von Prepregs. In unseren Versuchen wurde als „Klebstoff“ eine Lage Prepreg verwendet, die zwischen das Laminate und die Noppenwabe gelegt wurde. Auf diese Weise lässt sich die Oberflächenqualität verbessern, allerdings wird das Gewicht der Sandwichplatte erhöht.

Eine ebenfalls erfolgversprechende Vorgehensweise ist das Anpassen der Prepregs, insbesondere der Harze, an die veränderten Anforderungen. Hier sind erste Vorversuche mit einem Additionsharz durchgeführt worden, die zu besseren Oberflächen geführt haben.

Mechanische Untersuchungen und Brandtests an zwei Varianten der Methode 1

Zwei Materialien, die sich aus der Untersuchung der Tiefziehfähigkeit als am besten geeignet erwiesen haben, wurden als derzeitiger Stand der Entwicklung untersucht:

Variante A basiert auf dem Mattes & Ammann Gestrück mit der Art. Nr.: 49627. Es besteht zu 90% aus Aramid (Nomex) und zu 10% aus flammfest ausgerüstetem Polyester (Trevira CS)

Variante P basiert auf dem Mattes & Ammann Gestrück mit der Art Nr.: 49626. Es besteht zu 100% aus flammfest ausgerüstetem Polyester (Trevira CS)

An die Gestrücke beider Varianten wurden am Fraunhofer IZM seitlich Bänder für die verbesserte Handhabung angenäht. Anschließend wurden sie von der Firma epo mit Phenolharz (epo-Phenolharz 0453 mod.) imprägniert und am Fraunhofer IZM auf ca. 6,5 mm tiefgezogen. Die Noppen haben oben einen Innendurchmesser von 8 mm und ein Raster von 13 mm. (Die Tiefziehfähigkeit der Gestrücke ist damit ausgeschöpft).

Aus den Noppenwaben wurden Sandwiches hergestellt, hierfür wurde der Noppenkern mit oben und unten jeweils einem Prepreg (PHG600-68-37) verpresst. Die Dicke der Sandwiches wurde mit Abstandshaltern auf 6 mm festgelegt.

Brandfestigkeit

Um die Brandfestigkeit der Noppenwabensandwiches abzuschätzen, wurden Branduntersuchungen mit dem Cone-Calorimeter durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Variante P in allen untersuchten Verarbeitungsstadien (als reines Gestrück, als Noppenwabe und als Noppenwabensandwich) ein schlechteres Brandverhalten aufweist als die Variante A. Obwohl das Garn im fertigen Sandwich nur einen geringen Anteil ausmacht, ist sein Einfluss auf das Brandverhalten nicht unerheblich.

Die Branduntersuchung zeigt, dass die Variante A voraussichtlich mit keinen oder geringen Modifikationen (Zugabe von Flammenschutzmitteln) für die Luftfahrt einsetzbar ist.

Detaillierte Ergebnisse der Branduntersuchung sind in Anhang 3 aufgeführt.

Untersuchungen bei AIRBUS

Für die Durchführung von mechanischen Untersuchungen sowie Brandtests wurden von beiden Varianten jeweils 2 Platten (ca. 35 cm x 35 cm und ca. 35 cm x 45 cm) hergestellt und an AIRBUS geliefert.

Bei der Herstellung der Noppenwaben muss das imprägnierte Gestrück endlos durch die Presse geführt werden, um ausreichend große zusammenhängende Stücke der Noppenwabe zu erhalten. Die Noppenwabe soll keine Fehlstellen enthalten, daher ist es notwendig, mehrere Pressungen nacheinander durchzuführen, ohne dass eine Noppe defekt ist. Als häufigster Defekt trat das Umdrehen von Noppen „auf links“ auf, wenn beim Öffnen des Werkzeuges das

Gestrick mit dem Werkzeug verklebt ist. Die Neigung zum Verkleben wird begünstigt durch eine z.T. raue Werkzeugoberfläche, durch nicht optimal abgestimmtes Trennmittel und durch ungleichmäßige Temperaturverteilung im Werkzeug. Die Herstellung in unserem Technikum gestaltete sich daher aufwändig.

Schälfestigkeit

Die Schälfestigkeit der Varianten A und P wurde am Fraunhofer IZM untersucht. Die gemessenen Schälfestigkeiten und die Messkurven sind in Anhang 4 dargestellt. Im Vergleich zu Honeycombsandwiches ist der Verlauf der Schälfestigkeit über den Schälweg sehr ungleichmäßig. Es entsteht ein ausgeprägt sägezahnähnlicher Verlauf der Schälkraft-Kurve. Der Verlauf ist dadurch begründet, dass die Klebefläche über den Probekörper nicht konstant verteilt ist. Auf der Oberseite werden beim Schälen zunächst alle in einer Reihe stehenden Noppen belastet. Sobald die Klebung hier abgeschält ist, ist zunächst kein Kontakt zwischen Decklage und der Noppenwabe, bis die nächste Reihe Noppen belastet wird.

Die theoretische Erwartung, dass sich die Varianten A und P bezüglich der Schälfestigkeit sehr ähnlich verhalten, wurde von den Messungen nicht bestätigt. Auf der Oberseite hat die Variante A die bessere Schälfestigkeit, auf der Unterseite die Variante P. Eine Erklärung hierfür können wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht geben.

Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit von Noppenwabensandwiches wurde mittels Drei-Punkt-Biegeuntersuchung ermittelt. Geprüft wurden 250 mm lange, 50 mm breite und 6 mm starke Honeycombs. Die Stützweite der Prüfvorrichtung betrug 200 mm.

Die Noppenwabensandwiches wurden mit einem kommerziell verfügbaren Honeycombsandwich verglichen. Das Honeycombsandwich besteht aus Honeycombs mit einer Wabengröße von 3,2 mm und einem Raumgewicht von 48 Kg/m³ und jeweils einer Decklage gemäß DAN 407-08. Die Noppenwaben im Noppenwabensandwich entsprechen den oben beschriebenen Varianten A und P. Als Decklagen wurde jeweils eine Lage ausgehärtetes Laminat aus Prepreg gemäß DAN 407-08 mit einer Klebefolie aufgeklebt. Die Varianten werden in Anhang 3 als Varianten A* und P* bezeichnet. Das Einkleben der Noppenwabe in ausgehärtete Laminat führt zu einer deutlich verbesserten Oberfläche im Vergleich zu den Varianten A und P.

In Anhang 5 sind die Messwerte tabellarisch aufgeführt.

Sowohl die Biegesteifigkeit als auch die Biegefestigkeit des Noppenwabensandwiches sind deutlich geringer als die des Honeycombsandwiches.

II. 1.2.7. Entwicklung der Noppenwabe nach Methode 2

Die oben genannten Varianten A und P wurden ausgewählt, da sie bei vorangegangenen Untersuchungen die größte Tiefziehfähigkeit aufwiesen. Dennoch ist die realisierbare Noppendichte gering.

Bei den Varianten A und P wird die Tiefziehfähigkeit allein durch Verformung der Maschen der Gestricke erreicht. Ein anderer Ansatz wird in einem Patent der Fa. Watermann umgesetzt. Hier werden teilverstreckte Polyester als Garne verwendet, die während dem Tiefziehen verstreckt werden. Die Noppen bleiben auch ohne Imprägnierung erhalten, so dass es möglich ist, die

Imprägnierung nach dem Tiefziehprozess durchzuführen. Noppenwaben aus teilverstreckten Polyestern werden hergestellt, aber bislang nicht als Kernwerkstoffe eingesetzt.

Erste Versuche haben gezeigt, dass die teilverstreckten Polyester eine wesentlich bessere Tiefziehfähigkeit aufweisen als die bisher verwendeten Aramid- und Polyesterfasern. Dadurch können bei gleicher Noppendichte stärkere Noppenwaben hergestellt, bzw. bei gleicher Stärke eine größere Noppendichte realisiert werden.

Das Tiefziehen von teilverstreckten Polyestern erfordert eine angepasste Technologie. Der Tiefziehvorgang muss sehr schnell durchgeführt werden, da die Garne bei Einwirkung von Hitze schrumpfen. Aus diesem Grund konnten am Fraunhofer Institut nur Vorversuche im kleinen Maßstab durchgeführt werden.

Branduntersuchungen mit teilverstreckten Polyestern haben noch nicht stattgefunden, es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Brandeigenschaften im Vergleich zu Aramidfasern schlecht sind und durch Additive im Harz ausgeglichen werden müssen.

Die Möglichkeit, die Noppenwaben erst nach dem Tiefziehen zu imprägnieren, ermöglicht die Herstellung von Noppen - Prepregs. Diese Technologie ist bislang nur in Vorversuchen erprobt und erfordert eine sorgfältige Abstimmung aller Sandwichkomponenten.

Pressen / Spritzpressen

Ziel war hier die Untersuchung eines alternativen Herstellungsverfahrens für die Herstellung von Noppenwaben.

Spritzpressen ist eine Methode, mit der sich hochgefüllte und damit höherviskose Reaktivharze verarbeiten lassen. Abhängig von der Fließfähigkeit ist es möglich, Bauteile mit geringen Wandstärken und komplexen Strukturen herzustellen.

Durch die Formgebung durch Spritzpressen wäre die Formgebung im Vergleich zum Tiefziehen von Gestricken wesentlich variabler. Es ließen sich damit z.B. (annähernd) senkrecht stehende Noppenwände realisieren und die Noppendichte könnte leicht erhöht werden und wäre nicht mehr durch die Verstreckbarkeit des Gestricks begrenzt.

Um die Eignung des Verfahrens für die Herstellung von Noppenwaben zu evaluieren, wurde ein Versuchsaufbau realisiert und Spritzpressversuche mit verschiedenen Mischungen aus Aramid-Pulpe und Harzen durchgeführt.

Es wurde ein Versuchsaufbau realisiert, in dem das zu verarbeitende Material im Werkzeug in einem Reservoir aufgeheizt und dann beim Schließen der Presse durch einen dünnen Anguss in eine 1 mm x 100 mm x 100 mm große Kavität gedrückt wird. Hierfür wurde ein Versuchswerkzeug angefertigt. Das Versuchswerkzeug ist simpel aufgebaut, es steht frei in der Presse, wird also von der Presse nach dem Pressvorgang nicht wieder geöffnet. Zudem wurde auf Anbauten wie Ausstoßer verzichtet.

Als Material wurde eine den Honeycombs ähnliche Materialmischung gewählt, die ähnliche Eigenschaften verspricht. Honeycombs bestehen aus Aramid- (meist Nomex®-) Papier, das mit Harz versteift ist. Aramidpapier wird aus einer Aramidpulpe hergestellt, eine derartige Pulpe wurde uns von der Fa. Teijin Twaron in verschiedenen Qualitäten zur Verfügung gestellt. Pulpe ist eine fibrillierte Kurzfaser. Durch die Fibrillen hat die Faser eine große Oberfläche und damit eine gewisse „Saugfähigkeit“, um Harz aufzunehmen.

Die Pulpe ließ sich am Walzenknetter gut mit dem Harz vermischen, wobei mit Temperaturen gearbeitet wurde, die das Harz zwar flüssig werden, es aber nicht aushärten lassen. Wie am Walzenknetter üblich, wurde ein sog. Walzfell aus Harz- Pulpemischung entnommen. Bei Raumtemperatur ist das Walzfell fest. Für den Spritzpressvorgang wurde es grob zerkleinert und in das Reservoir des Spritzpresswerkzeugs gegeben. Nach einer Wartezeit, damit das Material aufschmelzen kann, wurde die Presse für den Injektionsvorgang zugefahren.

Die Versuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Trotz weitreichender Variationen der Versuchsbedingungen war es nicht möglich, einen verwendbaren Demonstrator herzustellen. Die Mischung aus Harz und Aramidfasern ist nicht fließfähig.

Möglich wäre auch das direkte Pressen der Harz- Aramid- Mischung. Ein solches Pressen hat im Reservoir stattgefunden. Hier zeigen sich Entmischungserscheinungen, die Fasern sind nicht gleichmäßig im Harz verteilt. Mit bloßem Auge sind Reinharzzonen erkennbar.

Auch der Einsatz von nicht fibrillierten Kurzfasern brachte keine Verbesserung der Ergebnisse.

Eine Versuchsmatrix über die durchgeführten Versuche findet sich in Anhang 6.

Es zeigt sich, dass Spritzpressen und Pressen nicht geeignet als formgebender Prozess für eine Harz- Faser- Mischung mit hohem Kurzfasernanteil zu sein scheinen. Die „Mitnahmefähigkeit“ des Harzes scheint nicht ausreichend, so dass das Harz aus der Pulpe herausgepresst wird. Auch die Fließfähigkeit der harzgetränkten Pulpe in kleine Kavitäten erwies sich nicht als ausreichend. Diese Versuche werden daher nicht weiterverfolgt.

II. 1.2.8. Lieferungen an Airbus im Rahmen des Unterauftrages:

- Bericht zu kommerziell verfügbaren Kernwerkstoff-Materialien zur Entwicklung von Noppenwaben im Dezember 2003
- Bericht zur Auswahl der Kernwerkstoff-Materialien im März 2004
- Teilbericht „Mitwirkung bei der Spezifikation von Kernwerkstoffmaterialien“ im Mai 2004
- Ergänzung der Berichte zur Erläuterung der Auswahl der Noppenwabe im September 2004
- Musterpanel, 5 mm stark im Dezember 2004
- Muster von den oben genannten Varianten A und P im April 2005

II. 2. Voraussichtlicher Nutzen

Prepregharze: Die im Projekt gestellten technischen Ziele wurden erreicht, so dass die Verwertung wie im Antrag beschrieben, auf verschiedenem Wege erfolgen kann bzw. bereits erfolgt ist. Im Rahmen des Projektes wurde gemeinsam mit Airbus ein Patent zu neuartigen Preprepharzen angemeldet. Es wurde gezeigt, dass die entwickelten Prepregharze den Qualitätsanforderungen von Airbus entsprechen und in typischen Unternehmen der Prepreghersteller problemlos herstellbar sind. Die Ergebnisse wurden und werden außerdem auf Messen wie der JEC in Paris und der ILA 2008 vorgestellt, sowohl durch Demonstratoren als auch im Rahmen von Vorträgen.

Noppenwabe: Die Arbeiten zur Noppenwabe wurden wie im Antrag vorgesehen bis zu ersten Demonstratoren entwickelt und in der Fachpresse publiziert.

Die Arbeiten sind Voraussetzungen für weitere gemeinsame Entwicklungen mit Airbus und der Luftfahrtzulieferindustrie. Über die Luftfahrtindustrie hinaus gibt es erste Anfragen aus anderen Bereichen der Verkehrstechnik. Es wird davon ausgegangen, dass die vorliegenden Ergebnisse in anderen Industriebereichen vermarktet werden können. Hierzu wird als Marketing-Instrument der regelmäßig stattfindende Industrietag der Fraunhofer-PYCO (ehemals Fraunhofer IZM Teltow) genutzt.

II. 3. Während der Durchführung des Vorhabens bekanntgewordener Fortschritt bei Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens ist kein Fortschritt bei Dritten auf den Gebieten Prepregharze für Kabinenanwendungen sowie der Noppenwabe bekanntgeworden.

II. 4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse zum Teil Noppenwabe wurden in

„Sandwiches mit Noppenwabenkern“, Bauer, M., Friede P., Uhlig, C. Kunststoffe 8/2006 pp.95-97

veröffentlicht.

Die Ergebnisse zum Teil Prepregharze wurden gemeinsam mit Airbus patentiert:

Flammfeste, niedrigtemperaturhärtende, cyanatbasierte Prepregharze für Honeycomb-Sandwichbauteile, Europäische Patentanmeldung EP 1 854 828 A2

Die Ergebnisse wurden und werden außerdem auf Messen wie der JEC in Paris und der ILA 2008 vorgestellt, sowohl durch Demonstratoren als auch im Rahmen von Vorträgen vorgestellt.

Die Ergebnisse zu Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in Cyanaten werden noch in einem Fachartikel veröffentlicht.

Anhang 1: Herstellung der Noppenwabe



Abb. A1: Gestrick



Abb. A2: Imprägniertes Gestrick (Prepreg)

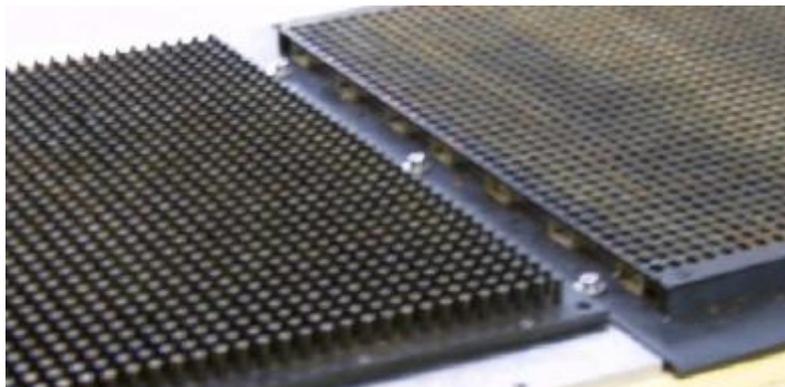


Abb. A3: Tiefziehwerkzeug (geöffnet)



Abb. A4: Tiefziehwerkzeug (geschlossen) mit Prepreg



Abb. A5: Noppenwaben

Anhang 2: Tiefziehuntersuchungen



Abb. A6: Versuchsaufbau zur qualitativen Ermittlung der Tiefziehfähigkeit

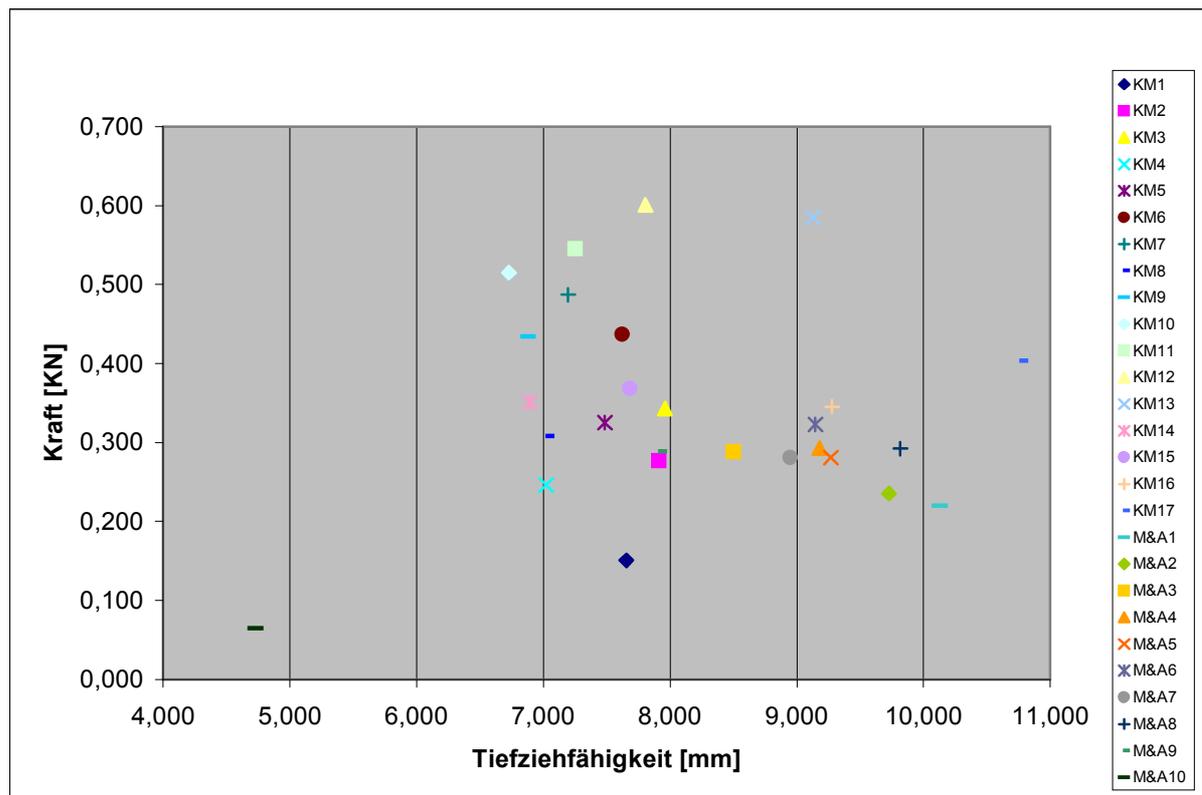


Abb. A7: Ergebnisse der Tiefziehuntersuchungen

Tabelle 3: Ergebnisse der Tiefziehuntersuchungen

Nr.	Hersteller	Bezeichnung / Artikelnummer	Material	Tiefziehfähigkeit t [mm]	Kraft [kN]	Flächengewicht [g/m ²]
KM1	Karl Mayer	Legung 1; 4 M/cm *)	Aramid	7,653	0,151	
KM2	Karl Mayer	Legung 1; 6 M/cm	Aramid	7,913	0,276	
KM3	Karl Mayer	Legung 1; 8 M/cm	Aramid	7,959	0,343	
KM4	Karl Mayer	Legung 2; 3,9 M/cm	Aramid	7,021	0,246	
KM5	Karl Mayer	Legung 2; 4,8 M/cm	Aramid	7,483	0,325	
KM6	Karl Mayer	Legung 2; 6,5 M/cm	Aramid	7,622	0,437	
KM7	Karl Mayer	Legung 2; 8,6 M/cm	Aramid	7,194	0,487	
KM8	Karl Mayer	Legung 3; 4 M/cm	Aramid	7,027	0,308	
KM9	Karl Mayer	Legung 3; 6 M/cm	Aramid	6,881	0,434	
KM10	Karl Mayer	Legung 3; 8 M/cm	Aramid	6,727	0,515	
KM11	Karl Mayer	Legung 3; 10 M/cm	Aramid	7,250	0,545	
KM12	Karl Mayer	Legung 3; 12 M/cm	Aramid	7,803	0,601	
KM13	Karl Mayer	Legung 3; 14 M/cm	Aramid	9,127	0,585	
KM14	Karl Mayer	Legung 4; 10 M/cm	Aramid	6,893	0,351	
KM15	Karl Mayer	Legung 4; 12 M/cm	Aramid	7,683	0,368	
KM16	Karl Mayer	Legung 4; 14 M/cm	Aramid	9,277	0,345	
KM17	Karl Mayer	Legung 4; 16 M/cm	Aramid	10,767	0,403	
M&A1	Ammann Mattes &	49626	Polyester (Trevira CS) 90% Nomex; 10%	10,129	0,220	170
M&A2	Ammann Mattes &	49627	Polyester	9,728	0,235	210
M&A3	Ammann Mattes &	49620	Polyester	8,500	0,288	
M&A4	Ammann Mattes &	49619	unbekannt	9,178	0,293	
M&A5	Ammann Mattes &	49618	unbekannt	9,267	0,281	
M&A6	Ammann Mattes &	49610	Polyamid 84% Nomex; 16%	9,147	0,323	
M&A7	Ammann Mattes &	49609	Polyamid 84% Nomex; 16%	8,950	0,281	
M&A8	Ammann Mattes &	49608	Polyamid 84% Nomex; 16%	9,817	0,292	290
M&A9	Ammann	49607	Polyester	7,917	0,288	
M&A10	Ammann	31476	100% Polyester	4,730	0,064	

Anhang 3: Vergleich von Parametern des Brandverhaltens von Noppenkernmaterialien

Ermittelt mit Cone-Kalorimeter (Anordnung: horizontal, Wärmefluss: 50 kW/m²)

Proben: Gestrick, Noppenkern und Sandwich

Bemerkung: Messungen an Gestrick und Noppenkern mit Gitter, das ein Aufwölben der Verkohlungs-schicht und damit eine Veränderung der freien Probenfläche von 94 mm x 94 mm verhindert

Tabelle 4: Branduntersuchung von Noppenwabensandwiches und Vorprodukten

Probe	m ₀	t _{ign}	t _{HRR-Peak}	t _{flameout}	Δm	MLR	MARHE	HRR _{1min}	HRR _{2min}	HRR _{3min}	HRR _{4min}
	g	s	s	s	g	g/s	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²
Gestrick A	2,55	0	-	-	0,5	0,008	-	-	-	-	-
Gestrick P	2,41	49	58	91	1,9	0,048	40	52	29	24	-
Noppenkern A	3,9	21	31	78	1,8	0,027	52	52	36	31	-
Noppenkern P	4,11	14	21	148	3,1	0,023	80	76	49	39	31
Sandwich A	16,0	89	111	306	3,7	0,013	41	82	63	56	52
Sandwich P	15,7	31	45	347	4,8	0,014	75	108	78	62	54

	HRR _{peak}	HRR _{total}	THR/m ₀	THR/Δm	THR _{120s}	EXT _{total}	EXT _{peak}	CO _{total}	CO _{120s}	CO _{peak}
	kW/m ²		MJ/(g·m ²)		MJ/m ²	1/m	1/m	ppm		
Gestrick A	-	-	-	-	-	0,2	0,4	-	-	-
Gestrick P	221	72	1,3	1,6	3,3	1,4	5,2	62	145	199
Noppenkern A	124	54	0,8	1,7	3,9	0,4	1,2	12	4	20
Noppenkern P	151	46	1,5	2,0	5,6	0,4	2,5	84	93	127
Sandwich A	117	53	0,8	3,4	3,4	0,2	1,0	10	60	121
Sandwich P	175	49	1,0	3,3	8,4	0,2	1,7	33	97	179

Parameter:

MARHE = maximale mittlere Wärmefreisetzungsrate

- Maximalwert des laufenden Mittelwerts der Wärmefreisetzungsrate nach Versuchsbeginn t=0

HRR_{total} = mittlere Wärmefreisetzungsrate von t_{ignition} bis t_{FlameOut}

HRR_{peak} = maximale Wärmefreisetzungsrate

t_{ignition} = Zeit bis zur Entzündung

t_{FlameOut} = Zeit bis zum Ende des effektiven Brandes

m₀ = Ausgangsmasse

Δm = Masseverlust

THR₁₂₀ = freigesetzte Gesamtwärme in 120 s nach Testbeginn

- THR_{total} / m₀ ist der Heizwert der Probe,

- THR_{total} / Δm ist ein Maß für die Brandlast der Probe.

EXT_{peak} = maximale (Rauchgas-)Extinktion von t_{ignition} bis t_{FlameOut}

- gemessen wird die Lichtschwächung eines Helium-Neon-Lasers im Abzugsrohr des Cone-Kalorimeters, EXT_{peak} ist der maximale Lichtschwächungskoeffizient nach $I = I_0 e^{-EXT_{peak} l}$, wobei l der Durchmesser des Abzugsrohrs, also die Wegstrecke des Lichts durch den Rauch ist.

CO_{total} = mittlere CO-Rauchgaskonzentration von $t_{Ignition}$ bis $t_{FlameOut}$
 CO_{120} = mittlere CO-Rauchgaskonzentration in 120 s nach Testbeginn $t=0$
 CO_{peak} = maximale CO-Rauchgaskonzentration bis $t_{Flameout}$

Erläuterungen:

Gestrick: Untersucht wurde das reine Gestrick, unimprägniert

Noppenkern: Das Gestrick mit Phenolharz imprägniert und auf ca. 6,5 mm tiefgezogen.

Sandwich: Noppenkern in zwei Prepregs eingepresst, Dicke der Platte: 6mm.

Anhang 4: Schälfestigkeit von Noppenkernsandwiches

Die Unterseite der Noppenwabe ist die Grundfläche aus der die Noppen herausstehen. An der „Spitze“ der Noppen ist die Oberseite.

Tabelle 5: Schälfestigkeiten von Noppenkernsandwiches

Variante	Mittlere Schälfestigkeit in [N/mm]
A Oberseite	30,2
A Unterseite	56,3
P Oberseite	23,0
P Unterseite	63,0

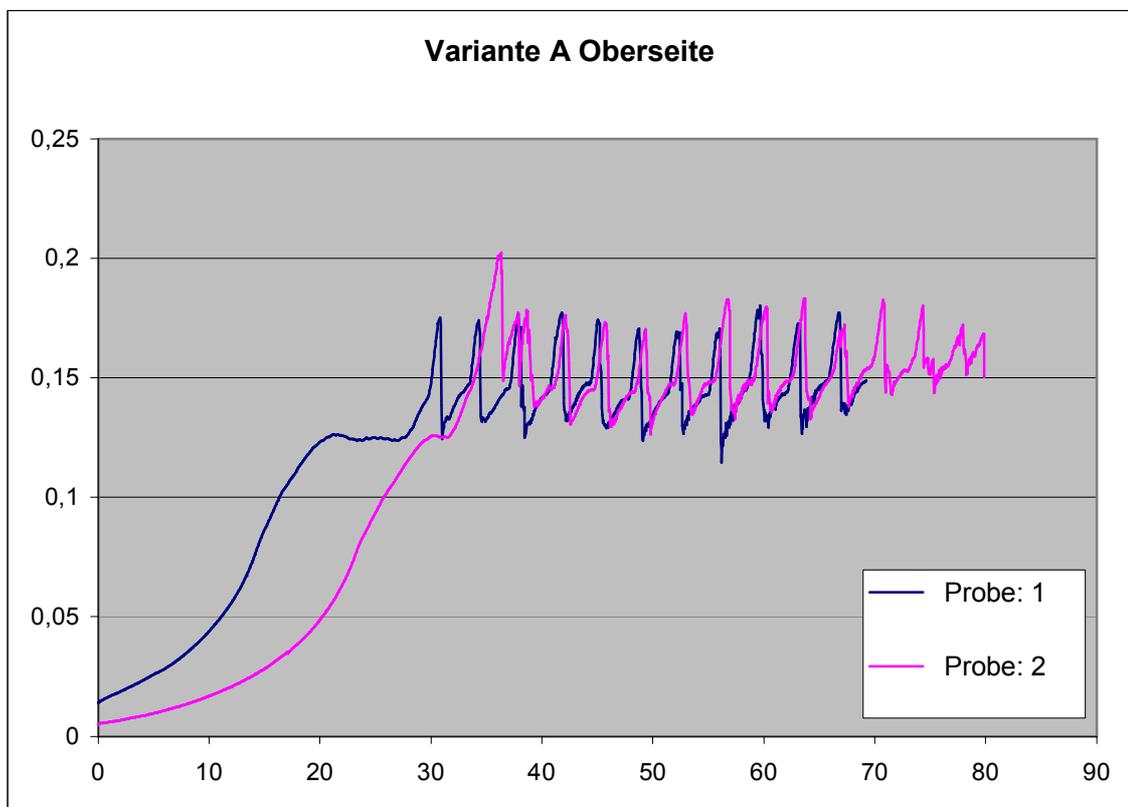


Abb. A8: Schälfestigkeitsverlauf beim Abschälen der oberen Decklage von Variante A

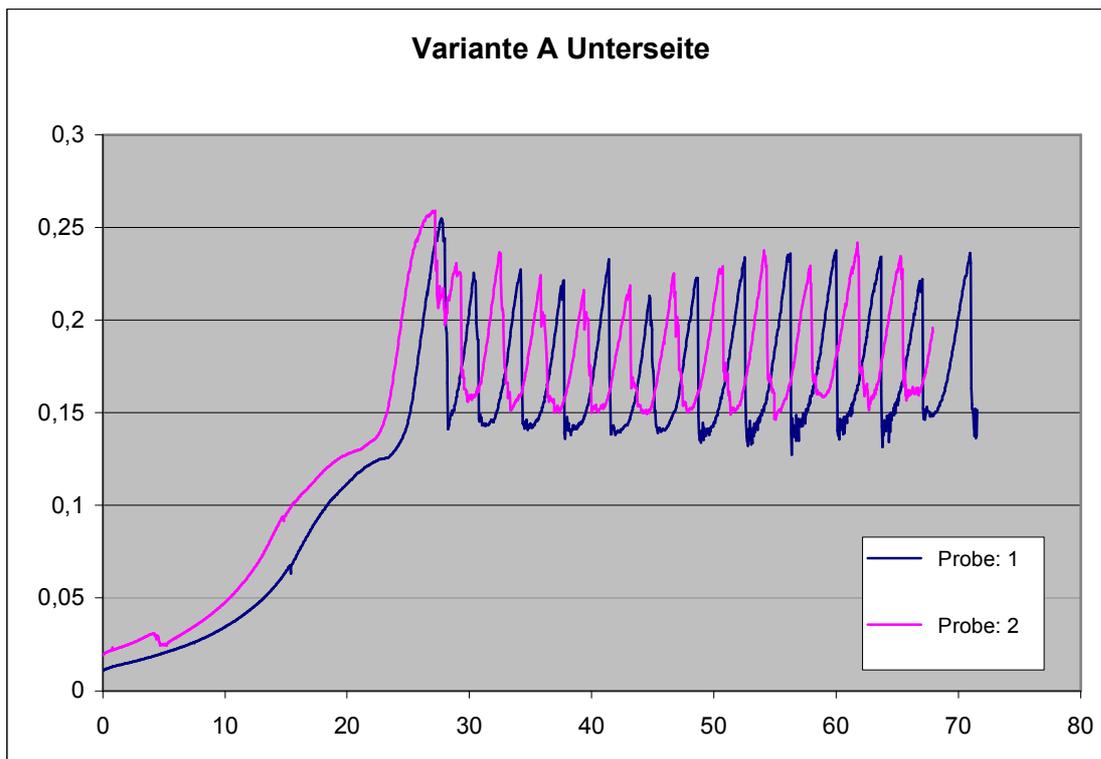


Abb. A9: Schälfestigkeitsverlauf beim Abschälen der unteren Decklage von Variante A

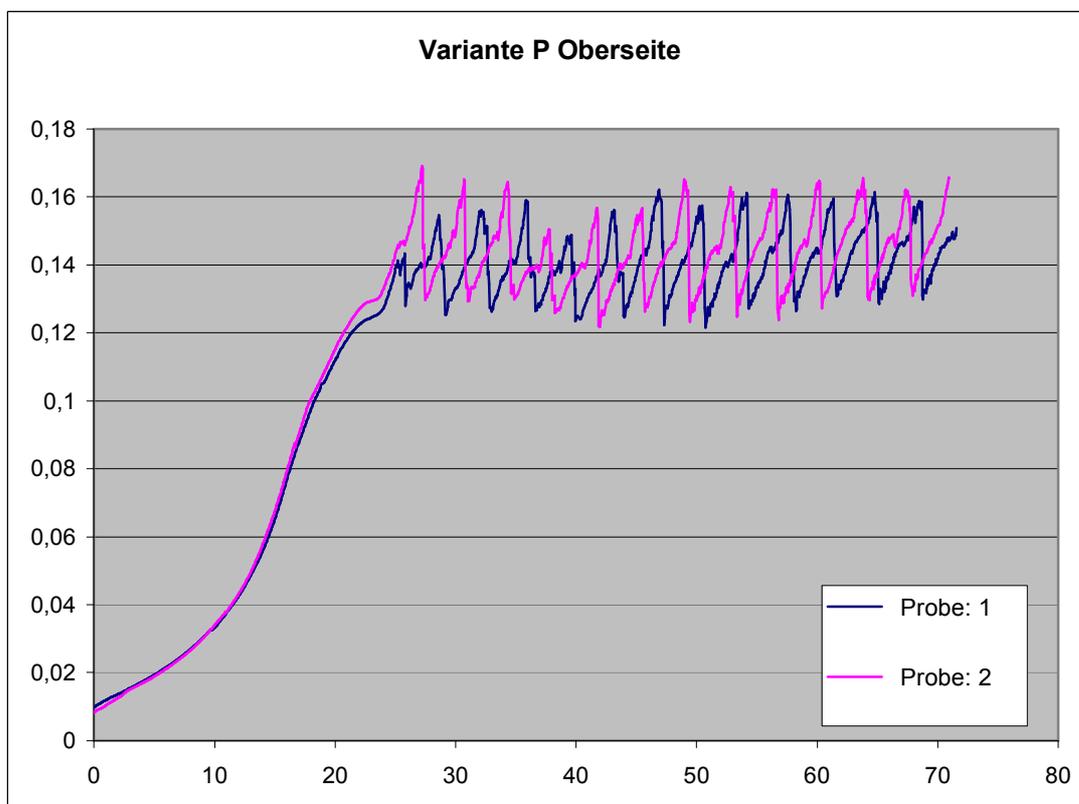


Abb. A10: Schälfestigkeitsverlauf beim Abschälen der oberen Decklage von Variante A

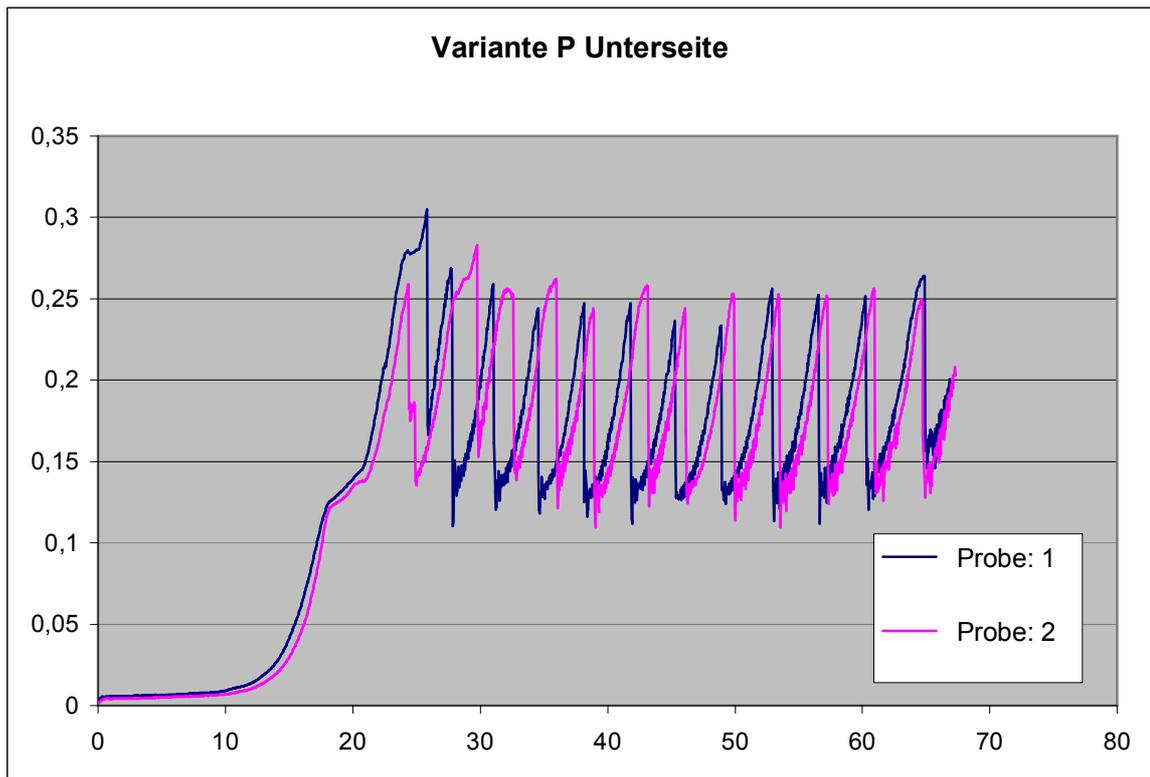


Abb. A11: Schälfestigkeitsverlauf beim Abschälen der unteren Decklage von Variante P

Anhang 5: Biegeuntersuchung an Noppenwabensandwiches

Tabelle 6: E-Moduli und Verformung von Noppensandwiches

Prüfkörper	Max. Kraft [N]	Verformung bei Max. Kraft [mm]
Variante A* Noppe nach oben	73	6,1
Variante A* Noppe nach unten	60	7,0
Variante P* Noppe nach oben	48	4,4
Variante P* Noppe nach unten	61	6,4
Vergleich Honeycomb	291	10,5

Anhang 6: Spritzpressversuche

Tabelle 7: Versuchsmatrix und Ergebnisse der Spritzpress- bzw. Pressversuche

Nr.	Harz	Faser	Pressdruck [bar]	Presstemperatur [°C]	Angussdurchmesser [mm]	Ergebnis
1	Harz 1	6,9% Twaron 1091	150	160	1	Injektion möglich, unregelm. Faserverteilung
2	Harz 2	34% Twaron 1091	150	160	1	Material im Reservoir nicht aufgeschmolzen
3	Harz 2	34% Twaron 1091	280	130 während des Pressens auf 160 erhöht	1	Material im Reservoir nicht aufgeschmolzen
4	Harz 3	39% Twaron 1080	280	150	1	Harz aus den Fasern herausgepresst
5	Harz 3	39% Twaron 1091	280	140	1	Material im Reservoir nicht aufgeschmolzen
6	Harz 4	40% Twaron 1091	280	160 während des Pressens auf 200 erhöht	1	Material im Reservoir aufgeschmolzen aber nur in geringem Maße in die Kavität gepresst
7	Harz 4	40% Twaron 1091	280	160 während des Pressens auf 200 erhöht	1,5	Im Vergleich zu Nr. 6 erreicht etwas mehr Material die Kavität
8	Harz 4	33% Twaron 1091	280	120 während des Pressens auf 200 erhöht	3	Im Vergleich zu Nr. 7 erreicht etwas mehr Material die Kavität, dennoch ist die Menge sehr gering. Starke Entmischung in der Kavität
9	Harz 5	33% Twaron 1091	280	100 während des Pressens auf 200 erhöht	3	Kein Unterschied zu Nr. 8