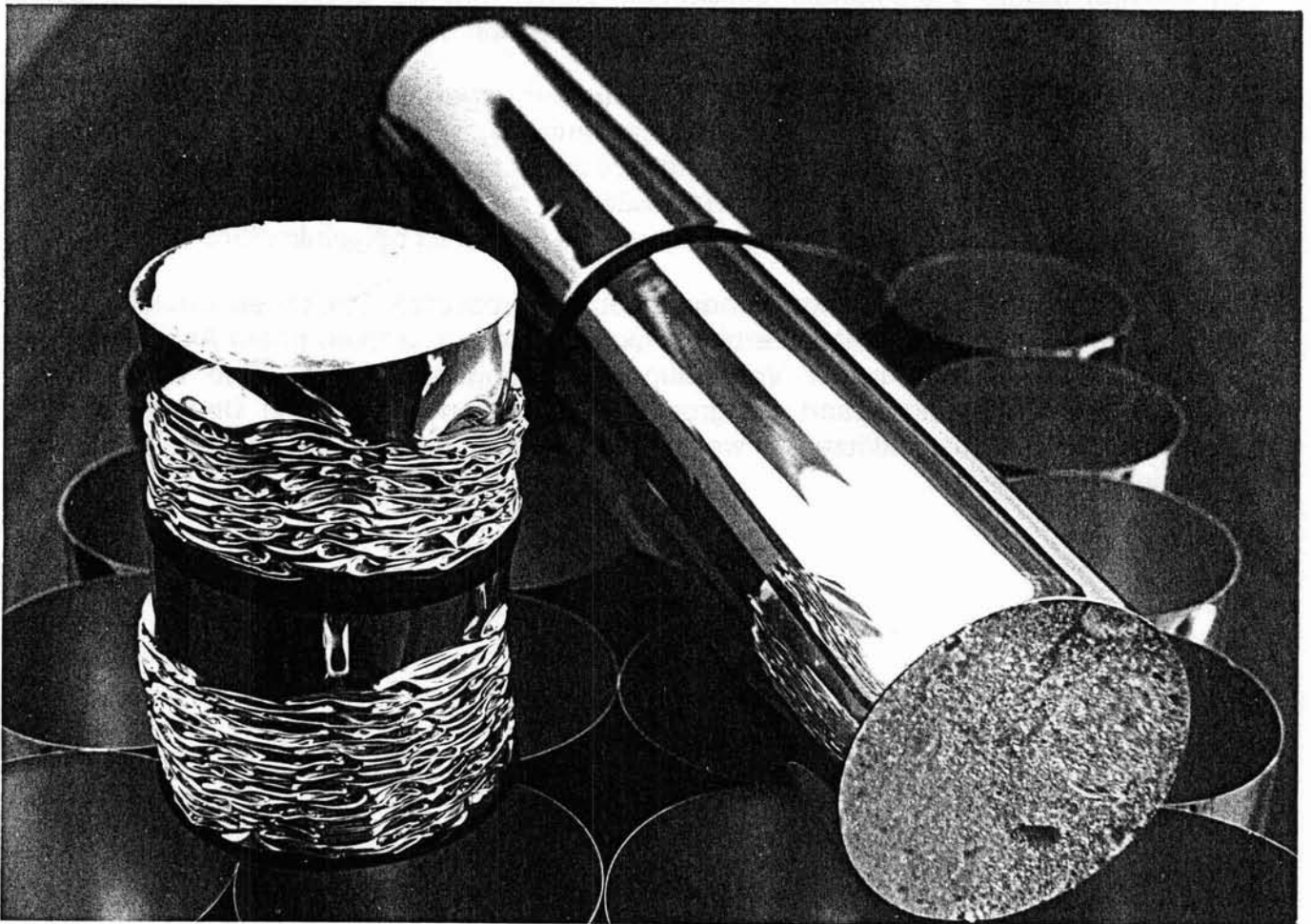


# "Alski/Alboo"

## Vorentwicklung einer neuen Leichtbaustruktur



W. Janach

August 1997

Schlussbericht BEW Projekt-Nr.: 19193  
VERTRAULICH bis 31. Dezember 1998



# "Alski/Alboo"

## Vorentwicklung einer neuen Leichtbaustruktur

W. Janach

August 1997

Schlussbericht BEW Projekt-Nr.: 19193  
VERTRAULICH bis 31. Dezember 1998

## Zusammenfassung

Aus Rohlingen von Aluminium-Getränkedosen, einem kostengünstigen und technisch hochwertigen Massenprodukt, werden mittels geklebter Verbindungen leichte Rundstangen mit hoher Steifigkeit und Festigkeit hergestellt. Die Böden der Dosen bilden einzelne Kammern und tragen so entscheidend zur Versteifung der Struktur bei.

Die geringe Stabilität der zylindrischen Wand gegen Einbeulen und Knicken wird entweder durch Ausschäumen oder durch Überlagerung von zwei oder mehr Dosen stark erhöht. Zum Ausschäumen sind die Dosenböden gelocht. Zur Bildung einer doppelten oder dreifachen Wandstärke werden die Dosen über die Hälfte oder zwei Drittel ihrer Länge übereinander geschoben. Dabei wird die äussere Dose elastisch gedehnt und die innere geschrumpft, wobei der Klebstoff als Gleitmittel dient.

In beiden Fällen nimmt die Stabilität der Struktur gegen Einbeulen wesentlich mehr zu als das Gewicht. Die ausgeschäumten Rohre vermögen grosse Deformationsenergien zu absorbieren und sind daher zum Bau von Fahrzeugstrukturen geeignet. Die Rohre mit Mehrfachwänden und eng zusammengerückten Zwischenböden besitzen maximale Steifigkeit und Festigkeit bei minimalem Gewicht.

Der Zusammenbau einzelner Rundstangen zu grösseren Strukturen erfolgt durch leichte, steckbare und verklebte Verbindungselemente aus umgeformtem Aluminium T-Profil, welche der Kontur der Verbindungsstelle angepasst sind. Eine alternative, weniger leichte Verbindungsart mit grosser Deformationsenergie bei Überbelastung, besteht aus Schaumstoffklötzen, in welche die zu verbindenden Rundstangen gesteckt und eingeklebt werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2. STRUKTURKOMPONENTEN .....</b>	<b>5</b>
2.1 HERSTELLUNG UND STRUKTUR DER RUNDSTANGEN .....	5
2.1.1 "Alski" Stangen .....	5
2.1.2 "Alboo" Stangen .....	6
2.2 VERBINDUNGSELEMENTE AUS T-PROFIL .....	7
2.3 VERBINDUNGEN MIT KNOTEN AUS SCHAUMSTOFF .....	8
2.4 KLEBTECHNIK .....	9
<b>3. BELASTUNGSVERSUCHE .....</b>	<b>9</b>
3.1 RUNDSTANGEN UNTER DRUCK UND BIEGUNG .....	10
3.2 WINKELVERBINDUNGEN .....	12
<b>4. BAU EINER RAHMENSTRUKTUR .....</b>	<b>13</b>
<b>5. BEURTEILUNG DES ENTWICKLUNGSSTANDS UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>14</b>
<b>6. WEITERENTWICKLUNG .....</b>	<b>15</b>
<b>7. LITERATURHINWEISE .....</b>	<b>16</b>
<b>8. PARTNER .....</b>	<b>16</b>

## 1. Einleitung

Dünnwandige Rohre sind ideale Leichtbauelemente. Bei Vergrößerung des Durchmessers und gleichzeitiger Verkleinerung der Wandstärke unter Konstanthaltung des Materialbedarfs nehmen die Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit proportional zum Durchmesser zu. Dabei bildet die abnehmende Stabilität der zylindrischen Schale gegen Beulen und Knicken die obere Grenze (**Bild 1**). Dünne Rohrwände können durch Spanten stabilisiert werden, wie bei einem Flugzeugrumpf, oder sie können analog wie bei Sandwichplatten durch Schaumstoff abgestützt werden (**Bild 2**). Damit lassen sich stabile Zylinder mit sehr dünner Wandstärke darstellen.

Die kostengünstige Herstellung sehr dünnwandiger Rohre ist ein Problem. Eine interessante Möglichkeit besteht in der Verwendung von Rohlingen für Getränkedosen aus Aluminium, ein artfremdes Produkt, das in grossen Stückzahlen kostengünstig produziert wird. Aus solchen Dosenrohlingen lassen sich extrem dünnwandige Rundstangen zusammensetzen [1]. Die durch Tiefziehen in Stückzahlen von mehr als einer Million pro Tag und Anlage hergestellten Rohlinge kosten nur etwa doppelt soviel wie Rohaluminium und gleich viel wie Aluminiumblech. Zur Herstellung von Stangen werden die Dosenrohlinge mit Böden ineinander gesteckt und verklebt, wobei die notwendige Dehnung und Schrumpfung rein elastisch erfolgen (**Bilder 3 und 4**). Der Klebstoff wirkt beim Zusammenschieben als Gleitmittel. Die Böden der Dosen bilden Spanten und unterteilen das Rohr in einzelne Kammern, wodurch eine massive Versteifung erreicht wird.

Für das Zusammensetzen von Rundstangen zu ganzen Baustrukturen dienen neuartige Verbindungselemente, in welche die zugeschnittenen Enden der Stangen gesteckt und verklebt werden [1]. Diese Elemente sind gleichzeitig hochfest und sehr leicht. Sie werden aus einem dünnwandigen Aluminium T-Profil durch Umformung hergestellt (**Bild 5**). Dazu dient ein Werkzeug mit der gleichen Kontur wie die Schnittstelle zwischen den zusammenzufügenden Zylindern. **Bild 6** zeigt eine mittels einem solchen Element hergestellte abgewinkelte Verbindung unter Belastung, und **Bild 7** das Modell einer einfachen daraus zusammengesetzten Rahmenstruktur. Durch Variation lässt sich das gleiche Konstruktionsprinzip auch für andere Verbindungen anwenden, zum Beispiel für Verzweigungen (**Bild 8**) oder auch für die Verbindung mit einer Platte.

## 2. Strukturkomponenten

Für das vorliegende Leichtbausystem werden Rohlinge von Getränkedosen aus Aluminium verwendet, welche durch Klebverbindungen zu extrem dünnwandigen Rohren mit Zwischenböden zusammengesetzt werden. Durch Ausschäumen entstehen sehr stabile und energieabsorbierende Rundstangen mit der Bezeichnung "**Alski**" für "**aluminum skin on foam core**". Als Alternative können die Dosenrohlinge auch so weit ineinander geschoben werden, dass überall die doppelte oder auch die dreifache Wandstärke entsteht, wodurch die Strukturstabilität auch ohne Schaumstoffkern erreicht wird. Hier weist die Bezeichnung "**Alboo**" für "**aluminum bamboo**" auf die Ähnlichkeit zum Bambusrohr.

### 2.1 Herstellung und Struktur der Rundstangen

Als Grundelement dienen Rohlinge von **0,5 Liter Aludosen** mit 66 mm Durchmesser, 0,12 mm Wandstärke und 160 mm Länge (zylindrischer Teil). Das Gewicht dieser Becher aus Aluminium beträgt 14 g. PLM-Austria stellt im Tag 1,5 Millionen solcher Dosen zum Preis von 8 Rappen her, was etwa dem doppelten Preis des Rohaluminiums entspricht. Die Herstellung erfolgt durch Tiefziehen aus Rondellen.

#### 2.1.1 "Alski" Stangen

Bei "**Alski**" handelt es sich um einen Verbund von dünner Aluminiumhaut und Schaumstoffkern (aluminum skin on foam core). Die 0,12 mm dünne Zylinderwand der Alubecher erhält ihre Stabilität gegen Einbeulen und Knicken durch den Schaumstoff (**Bild 9**). Die Herstellung von Rundstangen erfolgt dadurch, dass jeweils ein neuer Becher mit seinem offenen Ende etwa 7 bis 10 mm über den Boden des letzten Bechers der Stange geschoben und verklebt wird. Zur genauen Ausrichtung der Becher braucht es eine axiale Führung. Dabei entstehen im Abstand von rund 150 mm feste Verbindungen mit integrierter Versteifung durch den Zwischenboden. Die Verbindungsstelle ist eine **geklebte Schrumpfverbindung**, bei welcher die äussere Wand um 0,12/66 gedehnt und die innere um gleich viel tangential gestaucht wird. Bei einem Elastizitätsmodul von 700 kbar ergibt das eine Zug- bzw. Druckspannung von  $127 \text{ N/mm}^2$  und eine radiale Pressung von 4,6 bar. Die 0,25 mm dicken Zwischenböden werden für das nachfolgende Ausschäumen mit einem Loch von etwa 45 mm Durchmesser versehen, wodurch sich das Gewicht eines Bechers auf 13 g reduziert. **Bild 3** zeigt den Schnitt durch eine solche Verbindung nach dem Ausschäumen mit dem charakteristischen Rand des Dosenbodens. Der Schaumstoff dringt gut bis in die Ecken ein.

Es kommt ein Zweikomponenten **Polyuretanschaum** zur Anwendung, welcher über eine axial verschiebbare Lanze gleichmässig über die Länge des horizontal gelagerten Rohrs verteilt wird. Bisher wurden Rohre bis zu etwa 1 m Länge ausgeschäumt. Die einwandfreie Füllung erfordert den Abschluss beider Enden und feine Entlüftungslöcher für jeden Becher. Die für eine gute Füllung minimal erforderliche Schaumstoffdichte liegt bei etwa  $45 \text{ kg/m}^3$ .

Das **Gewicht** von "Alski" Rundstangen setzt sich wie folgt zusammen: Bei 150 mm Teilung entsprechend einer Klebstellenbreite von 10 mm beträgt der Aluminiumanteil 87 g/m und das Schaumgewicht bei 45 kg/m<sup>3</sup> Dichte 153 g/m, was zusammen 240 g/m ergibt.

### 2.1.2 "Alboo" Stangen

Bei der dem Bambusrohr ähnlichen "**Alboo**" Struktur (aluminum bamboo) werden die Aluminiumbecher um mindestens ihre halbe Länge übereinander geschoben und verklebt. Dadurch entsteht überall eine doppelte Rohrwand mit 0,25 mm Dicke und die Abstände zwischen den steifen Becherböden betragen etwas weniger als die halbe Becherlänge. Bei einwandfreier Klebverbindung zwischen Aussen- und Innenrohrwand nimmt die **Steifigkeit** gegen radiales Eindringen mit der dritten Potenz der Wandstärke zu, also um den Faktor 8. Damit wird eine hohe Stabilität der zylindrischen Schale auch ohne Schaumstoffkern erreicht. Die axiale Kraft für das Zusammenschieben der Dosenrohlinge ist eine Folge der Schrumpfverbindung zwischen Aussen- und Innenrohr (Abschnitt 2.1.1). Sie variiert zwischen 200 und 500 N in Abhängigkeit des Klebstoffs, dessen Verteilung und des Schiebewegs.

**Bild 10** zeigt eine "Alboo" Stange aus gelochten Dosenrohlingen mit zweifacher Wand von innen. Der vorderste Becher ist in seiner hinteren Hälfte in den nächsten eingeschrumpft, was an kleinen Beulen und einem schwach ausgebildeten Rand sichtbar ist. Die Beulchen enthalten überschüssigen Klebstoff, der unter dem Pressungsdruck von 4,6 bar (Abschnitt 2.1.1) zu einer **Instabilität** der unter tangentialem Druck vorgespannten Innenwand führt. Durch genaue Dosierung des Klebstoffs lassen sich die Beulchen vermeiden. Eine Variante dieser Instabilität des Innenrohrs ist ein einziger über die ganze Länge zwischen zwei Böden auftretender Wulst, welcher die Vorspannung vollständig abbaut. Sein plötzliches Auftreten wird durch radiale Punktbelastung bei noch nicht ausgehärtetem Klebstoff ausgelöst.

Werden die Becher um mindestens 2/3 ihrer Länge ineinandergesteckt, so rücken die Zwischenböden auf 1/3 der Becherlänge zusammen und die Wandstärke wird auf insgesamt 0,36 mm verdreifacht. Dabei erhöhen sich die tangentialen Spannungen im äusseren und inneren Rohr auf 190 N/mm<sup>2</sup>. Beim Innenrohr führt diese Vorspannung immer zu Knickinstabilität mit **Wulstbildung**. Zur sicheren Vermeidung muss der Klebstoff der inneren Verbindung zuerst aushärten können, was besondere Vorkehrungen verlangt. Beim Abschälen der äusseren Rohrwand zur Überprüfung der Klebverbindung zeigt sich, dass auch bei dreifacher Schichtung keine bleibende Deformation auftritt und die berechneten 190 N/mm<sup>2</sup> Vorspannung noch unterhalb der Elastizitätsgrenze liegen. Es wurde auch schon die vierfache Überlagerung erfolgreich hergestellt, wobei 500 bis 800 N axiale Kraft nötig sind. Unter der Voraussetzung, dass das Aluminium immer noch linear elastisches Verhalten aufweist, betragen nun die Zug- und Druckvorspannungen im äussersten und innersten der vier Rohre 254 N/mm<sup>2</sup>.

Das **Gewicht** von doppelwandigen "Alboo" Stangen mit einer Teilung von 76 mm beträgt 190 g/m und bei dreifacher Wand mit 50 mm Teilung etwa 300 g/m.

## 2.2 Verbindungselemente aus T-Profil

Der Schlüssel für das Zusammenbauen von Leichtbaustrukturen aus "Alski" oder "Alboo" Rundstangen bilden feste aber trotzdem sehr leichte Verbindungselemente für steckbare Klebverbindungen. Sie haben die Aufgabe, die Kräfte von der einen Rohrwand in die andere umzulenken. Das geht am einfachsten, wenn die beiden Rohre in ihrer **gemeinsamen Symmetrieebene** zum Schnitt gebracht werden und das Verbindungselement aus Aluminium über die passend zugeschnittenen Enden der Rohre gesteckt wird (**Bild 6**). Das **Kräftegleichgewicht** zwischen den ebenen Spannungszuständen in den beiden unter einem Winkel zusammengeführten Rohrwänden erfordert eine dritte Wand, welche zu Verbindungselementen mit T- oder Y-förmigem Querschnitt führt. **Bild 5** zeigt ein solches aus einem umgeformten T-Profil hergestelltes Element zusammen mit dem Werkzeug. Das Element entspricht der Geometrie der Schnittstelle zwischen den zu verbindenden Rohren und besteht aus drei in einer Linie verbundenen dünnen Ringwänden, wobei die beiden äusseren genau auf die beiden Rohre passen. Der nach innen gerichtete Ring liegt in der Schnittebene und kann mit einer Aluwand zur zusätzlichen Versteifung verklebt oder verschweisst werden. Zur Umformung des dünnwandigen T-Profils dreht sich das Werkzeug mit der Aussenkontur der Verbindungsstelle um eine Umdrehung. Das mit seinem Ende am Umfang des Werkzeugs befestigte T-Profil wird durch einen Schraubstock mit Bremsbacken gezogen, was auch zu dessen Streckung führt. Die Umformung erfolgt durch streckbiegen und radiales anpressen. Die **Bilder 11 und 12** zeigen die nach erfolgter Umformung getrennten Hälften des Werkzeugs. Das ringförmige elliptische Verbindungselement wird zur Erhöhung der Stabilität mittels einer Klebverbindung geschlossen. Dazu braucht es eine Überlappung des äusseren Teils von etwa 10 mm (**Bild 6**). Als Alternative könnten die Ringe durch Laserschweißen geschlossen werden.

Die **Wandstärke** des Aluminiumprofils mit T-förmigem Querschnitt sollte nicht wesentlich grösser sein als die 0,12 mm der einfachen Rohrwand oder 0,25 bzw. 0,36 mm bei zwei- und dreifach überlagerten Dosenrohlingen. In der Regel sind so dünne Wände durch Strangpressen nicht herstellbar. Einem kleinen Spezialunternehmen in Deutschland ist der Versuch gelungen, ein Aluminium T-Profil mit 0,38 mm Wandstärke und Schenkellängen von 7,5 mm herzustellen. Daraus wurden dann die Verbindungselemente (**Bilder 5, 11 und 12**) hergestellt, mit einem Stückgewicht von 4,5 g. Die verwendete Legierung ist für die Kaltumformung geeignet und lässt sich auch aushärten. Es bestehen Vorstellungen, wie die Wandstärke des stranggepressten T-Profils weiter verringert werden könnte, wozu Versuche mit einem neuen Werkzeug nötig sind.

Mit dem gleichen Konstruktionsprinzip lässt sich auch die Verbindung von **mehr als zwei Rundstangen** im gleichen Knotenpunkt realisieren (**Bild 8**). Dazu werden die Stangen in jeder einzelnen Symmetrieebene geschnitten und entsprechende Abschnitte des Verbindungselements gebildet. Diese sind Ausschnitte von normalen Verbindungselementen und werden durch kleben oder schweißen miteinander verbunden. Daraus entsteht das zusammengesetzte Verbindungselement für Verzweigungen von mehreren Stangen.

Im Hinblick auf die Herstellung der Verbindungselemente in Grossserie besteht noch ein grosses Verbesserungspotenzial bei allen Fabrikationsschritten.

## 2.3 Verbindungen mit Knoten aus Schaumstoff

Für Steckverbindungen zwischen Rohren besteht eine grosse Vielfalt von Lösungsvarianten. Soll jedoch eine maximale Festigkeit mit minimalem Gewicht erreicht werden, so bleiben nur wenige davon übrig. Verbindungselemente aus umgeformtem T-Profil mit Zwischenwand in der Schnittebene sind eine solche. Das angewendete Konstruktionsprinzip ist gleich wie im Flugzeugbau und besteht in der Bildung von geschlossenen Kästen durch die Zwischenwand in der Schnittebene der zu verbindenden Rohre.

Soll die Verbindung zwischen zwei oder auch mehreren Rundstangen neben einer ausreichenden Festigkeit auch eine grosse Deformationsenergie bei Überbelastung gewährleisten, so sind Knoten aus Schaumstoff vorteilhafter, allerdings zum Preis eines grösseren Gewichts. Als Form für diese Knoten sind die Kugel oder der Rohrverzweigung **angepasste Klötze** geeignet. Die zu verbindenden Stangen werden in den Schaumstoffknoten gesteckt und verklebt. Zur Verstärkung kann die Oberfläche der Knoten mit faserverstärktem Kunststoff oder mit einer Aluminiumhaut beschichtet werden. Eine einfache und zugleich stabile Lösung für das Einstecken von "Alboo" Stangen besteht darin, mit einem runden, dünnen Schneidwerkzeug (Trepan) einen 20 bis 30 mm tiefen **zylindrischen Spalt** in den Schaumstoff zu scheiden, ohne den Kern herauszulösen. Das dünnwandige "Alboo" Rohr wird dann in diesen Ringspalt gesteckt und aussen sowie innen mit dem Schaumstoff verklebt. Dadurch ergibt sich eine besonders feste Verbindung durch Verdoppelung der Klebfläche und lokale Füllung des Rohrs mit Schaumstoff.

Verbindungen zwischen Rundstangen mit Knoten aus Schaumstoff sind nicht fester als solche mit Elementen aus umgeformten T-Profilen, aber sie können sich bei Überbelastung viel mehr deformieren, weil sie nachgiebiger sind. Dabei vermögen sie grössere **Deformationsenergien** zu absorbieren. Schaumstoffknoten haben daher ein besseres Crashverhalten.

Schaumstoffklötze lassen sich leicht aus Platten individuell zuschneiden, was eine grosse Flexibilität ergibt, vor allem für den Prototypenbau und Kleinserien. Als Variante ist auch eine gemischte Bauweise aus Rundstangen und **Sandwichplatten** mit Schaumstoffkern möglich. Das Einstecken und Verkleben von "Alboo" Stangen in den Schaumstoff von Knoten oder Platten eröffnet vielfältige Möglichkeiten auch für andere Anwendungsbereiche als Fahrzeugstrukturen.

## 2.4 Klebtechnik

Die Klebstellen zwischen den einzelnen Bechern sowie an den Winkelverbindungen sind für die Festigkeit der Struktur ausschlaggebend. Sie dürfen nicht versagen, bevor die Aluminiumwand reisst. Zu Beginn wurden die nur 7 mm breiten Verbindungen zwischen den Bechern von "Alski" Stangen mit Haushaltaraldit verklebt und haben im Biegetest regelmässig versagt. Erst bei Verwendung des zähelastischen Araldits 2015 waren die Klebverbindungen stärker als die 0,12 mm Aluminiumwand (**Bild 4**). Dabei ist für die Festigkeit der Klebverbindung wichtig, die Oberflächen vorschriftsgemäss vorzubehandeln. Araldit 2015 ist ein Zweikomponenten Epoxidklebstoff, der nicht abläuft (tixotroph), was für die Winkelverbindungen vorteilhaft ist.

Beim Ineinanderschieben der Becher über die Hälfte ihrer Länge oder mehr zur Herstellung von doppelwandigen "Alboo" Stangen hat der Klebstoff **zwei Funktionen**. Beim Zusammenschieben muss er als Gleitmittel wirken und die Oberflächen gut benetzen, nach dem Aushärten muss er eine steife Verbindung zwischen den beiden Wänden bilden. Versuche mit Klebstoffen auf Kautschukbasis ergaben, dass die Steifigkeit der Doppelwand gegen Eindrücken nicht den achtfachen Wert der einfachen Wand erreicht, weil die Klebstoffschicht elastisch bleibt und die beiden Wände nicht starr verbindet. Für die maximale Versteifung braucht es einen genügend aushärtenden Klebstoff wie Araldit. Als weitere Alternative wurde auch ergo-4430 von Kisling, ein anaerob aushärtender, einkomponentiger Strukturklebstoff versucht. Seine Vorteile sind, dass er keine Topfzeit hat und nach dem Zusammenfügen innert Sekunden aushärtet. Allerdings ist die Endfestigkeit nicht so hoch wie mit Araldit. Ein weiterer Vorteil ist das leichte Entfernen von überschüssigem Klebstoff.

Die Klebtechnik ist die **Schlüsseltechnologie** für die Herstellung von "Alski/Alboo" Leichtbaustrukturen und bedarf noch einer Weiterentwicklung. Dabei ist die Operation Kleben mit ihren Teilschritten Vorbehandlung, Auftragung der Klebstoffschichten, Zusammenfügen, Entfernen von Klebstoffresten als Kern des Fertigungsprozesses zu optimieren. Die Fertigungskosten hängen entscheidend von der Gesamtlösung für die Klebtechnik ab.

## 3. Belastungsversuche

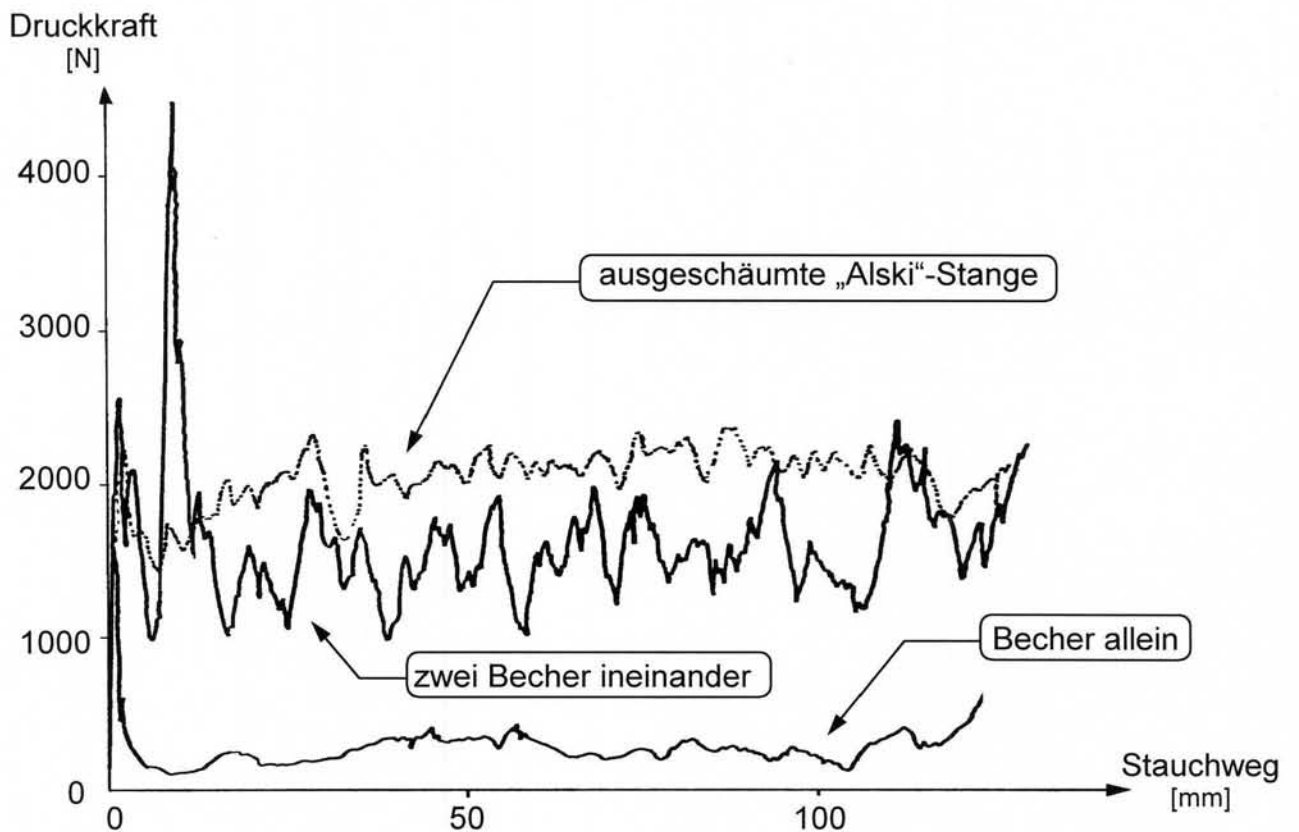
Parallel zum Bau von Rundstangen aus Rohlingen von Aludosen, ihrem Ausschäumen und der Herstellung von Winkelverbindungen aus Elementen mit T-Querschnitt, wurden auf einer **Prüfmaschine** Belastungsversuche zur Beobachtung und Überprüfung des Deformations- und Bruchverhaltens durchgeführt. Diese Versuche haben entscheidend zum Verständnis des **Strukturverhaltens** und zu Verbesserungen von Struktur und Klebtechnik beigetragen. Dabei wurden die Rundstangen axial gestaucht (**Bilder 13 und 14**) oder als doppelt aufgelegte Biegebalken belastet (**Bilder 15, 16 und 17**). Auch die 45° Winkelverbindung wurde gestaucht (**Bilder 18 und 19**), wobei hier zusätzlich Biegebeanspruchung auftritt. Beim Flachlegen der Winkelverbindung liegt praktisch reine Biegung vor, mit Biegung nach innen (**Bilder 6, 20, 21 und 22**) und nach aussen (**Bild 23**). Dabei traten auf der

Zugseite Risse in der dünnen Rohrwand (**Bild 20**) oder im Verbindungselement selbst auf (**Bild 21**).

### 3.1 Rundstangen unter Druck und Biegung

Im **axialen Stauchversuch** zeigt sich das unterschiedliche Verhalten der verschieden aufgebauten Rundstangen, woraus sich ihre Belastbarkeit und Absorption von Deformationsenergie beurteilen lassen. Der stabilisierende Einfluss der doppelten Wand oder der Schaumfüllung (**Bild 13**) werden im Vergleich zum einfachen Rohr (**Bild 1**) klar ersichtlich. Auch die Versteifung der Struktur durch die Zwischenböden wird deutlich. Wie die in **Bild 14** dargestellten Kraft-Weg Diagramme zeigen, steigt zu Beginn die axiale Kraft rasch auf einen Maximalwert an, worauf die Struktur nach Überschreiten ihres stabilen Zustands zu kollabieren beginnt und die Kraft zum Teil massiv zurückfällt. Das hängt mit dem Einbeulen und der fortschreitenden Bildung von tangentialen Falten zusammen. Hier zeigt sich beim Vergleich von **Bild 1 und 13** der entscheidende Unterschied: während die ungestützte zylindrische Wand mit grossen Falten bei kleiner Kraft einknickt, bilden sich mit Schaumstoffkern bei viel höherer Kraft feine und regelmässige Falten. Folgende **charakteristische Grössen** werden in Anlehnung an [2] für die Vergleiche benützt (**Bild 14**): die zu Beginn vor dem Kollaps auftretende Maximalkraft  $F_{\max}$ , die unmittelbar danach folgende Minimalkraft  $F_{\min}$ , die über den Stauchweg ohne den Endbereich gemittelte Kraft  $F_{\text{mitt}}$  und ihr Verhältnis  $F_{\text{mitt}}/F_{\max}$  sowie die spezifische Deformationsenergie  $E_s$  in kJ/kg. Diese ist definiert als Produkt von mittlere Kraft mal Stauchhub, bezogen auf das Gewicht des deformierten Stangenteils. Dieser gestauchte Teil ist immer etwas länger als der Stauchhub. Das Verhältnis von Stauchhub zur ursprünglichen Länge des gestauchten Stangenteils wird Hubeffizienz genannt und variiert zwischen 0,8 und 0,95.

**Bild 14** zeigt die Kraft-Weg Diagramme von Stauchversuchen mit einem leeren Becher (Dosenrohling), zwei vollständig ineinander geschobenen, verklebten Bechern und einer ausgeschäumten "Alski" Stange. Die charakteristischen Werte sind zusammen mit denen von weiteren Versuchen in **Tabelle 1** zusammengestellt. Der einzelne leere Becher hat Maximal- und Minimalkräfte von 1500 und 140 N, wobei die Kraft im Laufe des Stauchhubs nur wenig und erst ab 120 mm Weg infolge Versteifung rasch zunimmt. Die mittlere Kraft  $F_{\text{mitt}}$  von 250 N wurde über die ersten 120 mm ermittelt. Bei zwei ineinandergefügten Bechern (doppelte Wandstärke) werden die Kräfte massiv grösser und nimmt  $F_{\text{mitt}}$  um einen Faktor 6 auf 1525 N zu. Die spezifischen Deformationsenergien, mit Hubeffizienzen von 0,95 bzw 0,9, betragen 2,9 und 8,3 kJ/kg. So vermag die Doppelwand, als Folge der grösseren Stabilität der zylindrischen Schale gegen Einbeulen, pro Gewichtseinheit fast die dreifache spezifische Energie zu absorbieren. Charakteristisch für die **ausgeschäumte "Alski" Stange** (mit einfacher Wand) ist, dass die anfängliche Spitzenkraft von 2200 N nicht über die nachfolgenden Spitzenwerte hinausragt und nur 7 % höher als die 2050 N Mittelwert ist, was ein ideales Verhalten für die Absorption von Crashenergie darstellt. Als Folge des grösseren Gewichts ist die spezifische Deformationsenergie mit 6,8 kJ/kg nicht ganz so hoch wie beim doppelwandigen Becher.



**Bild 14** Kraft-Weg Diagramme für axialen Stauchversuch mit Rundstangen

	$F_{max}$	$F_{min}$	$F_{mitt}$	$F_{mitt} / F_{max}$	$E_s$
	N	N	N	-	kJ/kg
<b>Becher allein</b>	1500	140	250	0.17	2.9
<b>halber Becher</b>	1400	200	450	0.32	5.0
<b>zwei Becher ineinander</b>	4500	1000	1525	0.34	8.3
<b>‘Alboo’ doppelwandig</b>	2950	1250	2000	0.68	9.7
<b>‘Alski’</b>	2200	1500	2050	0.93	6.8

**Tabelle 1** Ergebnisse der Stauchversuche

**Tabelle 1** enthält im weiteren die Ergebnisse für den einfachen Becher mit halber Länge. Infolge der grösseren Stabilität der kurzen zylindrischen Schale nehmen hier  $F_{\min}$  und  $F_{\text{mitt}}$  zu, wodurch  $E_s$  auf 5 kJ/kg ansteigt. Von grosser Bedeutung sind die Werte der **doppelwandigen "Alboo" Stange** mit Zwischenböden im Abstand der halben Dosenlänge. Die Maximalkraft wird gegenüber der einfachen Wand mit halber Becherlänge auf 2950 N mehr als verdoppelt und die mittlere Kraft um einen Faktor 4,4 auf 2000 N vergrössert, woraus die hohe Deformationsenergie von 9,7 kJ/kg resultiert. Dabei wurde für die einfache und doppelte Wandstärke wiederum mit Hubeffizienzen von 0,95 bzw. 0,9 gerechnet.

Eine "Alski" Stange im **Biegetest** zeigt **Bild 15**, mit einem mittleren Stempel und zwei Auflagen mit 25 mm Radius. Charakteristisch ist das Muster der zwei divergierenden Reihen von Falten, ein Ergebnis der Schaumstofffüllung. Nach anfänglichem Versagen der Klebverbindungen zwischen den einzelnen Bechern konnte der Abstand zwischen den beiden Auflagen auf 200 mm vergrössert werden. In 8 Biegetests mit unterschiedlicher Position der Stempelauflage bezüglich den Zwischenböden, wurden maximale Kräfte des Stempels von 1000 bis 1400 N gemessen, welche nach einem Hub von 10 bis 15 mm erreicht werden. Bei weiterer Deformation bis über 50 mm hinaus nimmt die Kraft praktisch nicht mehr zu. Auf der Unterseite wird in der 0,12 mm Aluwand mit Zugspannung die Streckgrenze erreicht und es tritt plastische Deformation auf (**Bild 16**). Eine grobe Abschätzung ergibt eine Streckgrenze von 300 bis 400 N/mm<sup>2</sup>. In keinem dieser Versuche trat ein Riss auf. Das zeigt, dass für diesen Belastungsfall der Schaumstoff auf der Druckseite genügend nachgiebig ist. Der Zugspannungsriss in **Bild 17** trat nicht bei diesen Versuchen, sondern unter schlagartiger dynamischer Biegebelastung auf.

Zur Bestimmung der spezifischen Deformationsenergie wurde angenommen, dass ein Stangenabschnitt mit der Länge eines Durchmesser betroffen ist. Damit ergaben sich Werte zwischen 1,2 und 4 kJ/kg je nach Ausmass der Deformation.

### 3.2 Winkelverbindungen

Nach dem Zerschneiden von "Alski" Rundstangen unter einem Winkel von 22,5° im Abstand von 150 mm (gleich wie zwischen den Klebstellen) wurden die entstandenen Abschnitte mittels Verbindungselementen mit 45° zu **abgewinkelten Probekörpern** zusammengesetzt. Diese haben im undeforinierten Zustand zwei parallele Endflächen mit 280 mm Abstand. Sie wurden in einem ersten Versuch in Längsrichtung **gestaucht (Bilder 9, 18 und 19)**, wobei neben Druck- auch Biegebelastung auftritt. Die verklebte Winkelverbindung hat in keinem dieser Versuche versagt. Dabei wurden einzelne Probekörper bis zu 115 mm gestaucht (**Bild 19**). Die Deformation erfolgt durch Faltenbildung in der 0,12 mm Wand beidseitig des Verbindungselements und neben den Zwischenböden (**Bild 18**). Die axiale Kraft beträgt zu Beginn zwischen 600 und 900 N in Abhängigkeit von der Schaumstofffüllung und nimmt im Lauf der Deformation leicht ab auf Endwerte zwischen 400 und 700 N. Ein einziger Versuch endete mit einem Gewaltbruch, ausgehend von einem Riss auf der Zugseite in 40 mm Abstand von der Verbindungsstelle, nach 80 mm Hub bei einer Kraft von 700 N. In diesem Fall war der

Schaum auf der Druckseite zu wenig nachgiebig, was zur Überbeanspruchung der dünnen Wand auf der Zugseite geführt hat.

Der gleiche Probekörper wurde auch unter **Biegung** getestet, zunächst wie in **Bild 6** gezeigt, mit Stempelwirkung von aussen gegen innen. Verglichen mit dem Stauchtest, bei welchem sich aussen Druck- und Zugbeanspruchung teilweise kompensieren, liegt hier auf der Innenseite der Winkelverbindung praktisch reiner Zug vor. Zu Beginn tritt oben Stauchung mit Faltenbildung auf (**Bild 6**), mit raschem Kraftanstieg auf 500 bis 600 N. Während der weiteren Deformation nimmt die Kraft nur noch wenig zu, bis nach einem Gesamtweg von 15 bis 20 mm bei einer Maximalkraft zwischen 650 und 800 N ein Gewaltbruch erfolgt. Dieser beginnt immer auf der Zugseite unten an der Winkelverbindung, entweder als Riss in der dünnen Rohrwand (**Bild 20**) oder als Riss im Verbindungselement selbst (**Bild 21**). Beim gleichem Biegetest unter schlagartiger dynamischer Beanspruchung riss die Rohrwand am Rand des Verbindungselements vollständig ab (**Bild 22**).

Der für die Praxis weniger interessante Biegetest nach aussen (**Bild 23**) hat zu keinem Gewaltbruch geführt. Hier nahm die Stempelkraft von anfänglich 650 bis auf 1250 N zu, nach einem Gesamtweg von über 60 mm.

## 4. Bau einer Rahmenstruktur

Die Anwendung von "Alski/Alboo" Rundstangen und Verbindungselementen mit T-Profil zum Leichtbau von **Fahrzeugstrukturen** wird noch viel Entwicklungsarbeit erfordern. Dazu braucht es auch Becher mit grösserem Durchmesser und etwa doppelter Wandstärke, was technisch machbar aber in kleinen Stückzahlen sehr kostenintensiv ist.

Daher wurde als erster Schritt versuchsweise ein extrem leichter Rahmen für eine **Liege** oder "lounge chair" gebaut. **Bild 24** zeigt das erste Muster des Rahmens aus "Alboo" Stangen mit Doppelwand (ohne Schaumstoff) und 12 gleichen Verbindungselementen mit 45° Abwinkelung. Die "Alboo" Stangen mit einer Teilung von 76 mm zwischen den Bechern wurden in ganzen Vielfachen dieser 76 mm schräg zugeschnitten. Dabei haben die 12 Einzelstücke insgesamt 3350 mm Länge und 650 g Gewicht, entsprechend 44 mal die 76 mm Teilung. Zusammen mit den 12 Verbindungselementen mit je 4,5 g und dem Klebstoff wurde für den Rahmen ein Gesamtgewicht von nur 750 g erreicht.

**Bild 25** zeigt das mit einem umlaufenden Stoffband und zwei Unterlagen aus Schaumstoff hergestellte Funktionsmuster der Liege. Diese wurde statisch mit bis zu 120 kg ohne Schaden belastet. Allerdings hat später, infolge zu grosser Biegebeanspruchung durch falsche Belastung, eine der beiden unteren hinteren Winkelverbindungen versagt. Daraus muss geschlossen werden, dass zukünftige Konstruktionen weitgehend als Fachwerke zu konzipieren sind, was den Bau von komplexeren Verbindungselementen für die mehrfache Verzweigung der Rundstangen erfordert.

## 5. Beurteilung des Entwicklungsstands und Schlussfolgerungen

Aus den bisherigen Arbeiten und Versuchsergebnissen lassen sich bereits wichtige Schlussfolgerungen ziehen. Weil die Rundstangen aus Rohlingen von Aludosen eine viel kleinere Wandstärke als stranggepresste Rohre haben, ergeben sich daraus zusammen mit der Versteifung durch die Dosenböden und dem Schaumstoffkern (Option) **einzigartige Struktureigenschaften**. Damit wird ein Verhältnis Festigkeit und Steifigkeit zu Gewicht erreicht wie sonst nur mit aufwendigem Faserverbund. Die einzelnen Operationen für das Zusammenfügen der Dosenrohlinge sind vom Prinzip her so einfach, dass die Möglichkeit für ein kostengünstiges Fabrikationsverfahren gegeben ist.

Die bisherigen Versuche haben die technische Machbarkeit und die einzigartigen Struktureigenschaften erwiesen. Wichtig sind auch die aufgezeigten Grenzen und die praktischen Erfahrungen bei den einzelnen Herstellungsschritten für die Rundstangen, das Ausschäumen, das spezielle T-Profil, die Verbindungselemente und den Zusammenbau einfacher Strukturen. Obwohl die Ergebnisse der Belastungsversuche noch keine definitive Optimierung der Struktur unter allen möglichen Bedingungen erlauben, lassen sich die wichtigsten Parameter bereits gut abschätzen. So haben die "Alski" Stangen vorzugsweise eine einfache 0,12 mm Wand über einem Schaumstoffkern mit  $45 \text{ kg/m}^3$ , wobei es für gewisse Anwendungen die doppelwandige massivere Ausführung brauchen wird. Die "Alboo" Rohre sind in der Regel doppelwandig, können aber auch mit dreifacher oder sogar vierfacher Wandstärke hergestellt werden. Für Fahnenstangen ist die Wandstärke von oben nach unten zu vergrössern.

Das **Verbindungselement** aus umgeformtem T-Profil ist sehr leicht und fest, aber dessen kostengünstige Herstellung ist noch nicht realisiert. Es ist möglich, dass andere Lösungen mit etwas mehr Gewicht insgesamt vorteilhafter wären, auch was das Design betrifft. Hier besteht noch ein grosser Spielraum für die Entwicklung von Varianten. Weil die Optimierung des Verbindungselements auch von der jeweiligen Anwendung abhängig ist, hat sie weniger Priorität als die kostengünstige Herstellung der Stangen.

Aus den bisherigen Arbeiten wird deutlich, dass die "Alski/Alboo" Leichtbaustruktur nicht losgelöst von den Anwendungen entwickelt werden kann. Die einmalig neuen Eigenschaften schliessen einen direkten Ersatz einer konventionell gebauten Struktur aus, was nichts anderes bedeutet, als dass auch die Anwendungen zu suchen und zu "erfinden" sind. Ein typisches Beispiel dafür ist die Umsetzung des Lasers in kommerzielle Produkte.

## 6. Weiterentwicklung

Die Vorteile von "Alski/Alboo" Rundstangen hängen direkt mit der Verwendung von Rohlingen für Aludosen zusammen, einem technisch hochstehendem und gleichzeitig kostengünstigem Massenprodukt. Soll der Kostenvorteil auch im Endprodukt zum tragen kommen, so muss die Fabrikation der Rundstangen mit ähnlich niedrigen Kosten erfolgen, was eine grosse Herausforderung darstellt. Nur so kann es gelingen, dieses neue Leichtbauverfahren über Nischen hinaus auch in Serienprodukten wie Fahrzeugen anzuwenden. Das Potenzial dazu ist bei "Alski/Alboo" vorhanden. Daher hat die Entwicklung eines **rationellen und kostengünstigen Fabrikationsverfahrens** für die Rundstangen aus Rohlingen von Aludosen erste Priorität. "Alski" Stangen mit ihrer Schaumstofffüllung sind für crashfähige Fahrzeugstrukturen vorgesehen. Weil sich die bambusartigen "Alboo" Rohre für andere Anwendungen als Fahrzeuge eignen, zum Beispiel für Möbel, Ausstellungsarchitektur oder Fahnenstangen, und sich solche Anwendungen schneller auf dem Markt umsetzen lassen, sollte zuerst das "Alboo" Fabrikationsverfahren entwickelt werden.

Das **Kostenziel** für die Produktion von "Alboo" Stangen hat sich nach dem Preis von 0,08 Fr für einen Dosenrohling zu richten. Soll der mit diesem Massenprodukt verbundene Kostenvorteil auch im Endprodukt erhalten bleiben, so darf die Fabrikation der Stangen nicht wesentlich mehr kosten als das verwendete Ausgangsprodukt. Daraus lässt sich sofort eine Grössenordnung für die **Produktivität** der Stangenherstellung abschätzen. Bei einer mechanisierten und teilweise automatisierten einfachen Produktionsanlage ist eine Verarbeitung von 1000 Dosenrohlingen pro Stunde ein absolutes Minimum, weil damit der Dosenanteil erst gerade 80 Fr/h ausmacht. Das ergibt eine Taktzeit pro Becher von gut 3 Sekunden, was bereits hohe Anforderungen stellt. Daraus resultiert eine theoretische Produktionsleistung von 76 m doppelwandige "Alboo" Stangen pro Stunde. Als **Ziel** wäre eine Taktzeit von 1 bis 2 Sekunden anzustreben. Das bedeutet, dass alle Schritte inklusive das Auftragen des Klebstoffs und das Handling automatisch erfolgen müssen. Die hypothetische oberste Grenze ist durch die Produktion von mehr als einer Millionen Dosen pro Tag in einem Werk gegeben. Hier wird deutlich, dass die minimalen Kosten erst durch die integrierte Produktion von Dosenrohlingen und Rundstangen im gleichen Werk zu erreichen sind. Diesbezüglich sind Gespräche mit einem Dosenhersteller geplant. Vorgängig müssen jedoch die Schutzrechte definitiv geklärt und geregelt werden.

## 7. Literaturhinweise

- [1] Janach W.: Leichtbaustruktur. CH-Patentgesuch 02926/96
- [2] Kindervater C.: Crash Resistance and Strength of High Performance Composite Light Weight Substructures. In: Proceedings 27th ISATA Conference on Electric & Hybrid Vehicles and Supercars, Aachen (1994), 741-751
- [3] Zihlmann R.: Strukturkleben, von der Alternative zur ersten Wahl. In: SMM, Nr. 15 (1997), 62-65

## 8. Partner

- Alusuisse, Neuhausen
- Airex, Sins
- Lean Alu, D-78224 Singen
- PLM Austria, A-2551 Enzesfeld
- Ciba, Basel
- Bucher Leichtbau, Fällanden
- Karrosserie Kläger, Gersau
- Putex, Glattfelden
- Kisling, Zürich
- AWB, Kriens