

*Discussion Paper on International Management and Innovation*

*Eric Pfaffmann<sup>1</sup>*

***Internationale Technologie-Kooperation:  
Die Entwicklung der Spaceframe-Karosserie  
Aus Aluminium des Audi Modells A8***

*Discussion-Paper 00-01*

*Stuttgart, August 2000*

*ISSN 1433-531X*

---

<sup>1</sup> Dr. Eric Pfaffmann, DB Cargo AG, Projekt Prozess Redesign Produktion (PRP), Contact: ++49 6131 15601 99, Fax: ++49 06131 1561064, Email: [Eric.Pfaffmann@bahn.de](mailto:Eric.Pfaffmann@bahn.de).

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Hintergrund des Spaceframe-Projektes .....</b>	<b>3</b>
1.1	Beginn und Zielsetzungen im Spaceframe-Projekt .....	3
1.2	Zielsetzungen und Potenziale des Leichtbaus mit Aluminium.....	6
1.3	Der Einsatz von Aluminium in der Fahrzeugkarosserie .....	9
<b>2</b>	<b>Die Gestaltung der (außer-) vertraglichen Vereinbarungen und der technischen Baustruktur im Spaceframe-Projekt.....</b>	<b>12</b>
2.1	Vertragliche und außervertragliche Vereinbarungen zwischen Audi und Alcoa.....	12
2.2	Aufbau und Charakteristika der Spaceframe-Karosserie.....	18
2.3	Spezifika der Herstellungs- und Verbindungstechnik im Vergleich zu Stahlkarosserien.....	21
<b>3</b>	<b>Die Kooperation von Audi und Alcoa während des Entwicklungsprozesses des Spaceframe-Projektes.....</b>	<b>26</b>
3.1	Überblick über den Entwicklungsprozess im Spaceframe-Projekt .....	26
3.2	Die Phase der Vorentwicklung .....	28
3.3	Die Konzeptentwicklung und Serienentwicklung der Spaceframe- Karosserie.....	32
3.4	Die Herstellung der Spaceframe-Karosserie.....	36
<b>4</b>	<b>Fazit: Bedeutung und Problemfelder des Spaceframe- Projektes.....</b>	<b>38</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>41</b>

# 1 Hintergrund des Spaceframe-Projektes

Im Spätjahr 1981 beschlossen die Aluminium Company of America (Alcoa) und die Audi AG im Rahmen eines Arbeitstreffens, gemeinsam die Voraussetzungen für die Entwicklung einer hundertprozentigen Aluminiumkarosserie zu schaffen. An dem Treffen nahm auch Dr. Ferdinand Piëch teil, damals Vorstand „Technische Entwicklung“ bei der Audi AG. Das Ziel von Dr. Piëch war es, einen metallurgischen und konstruktiven Quantensprung zu vollziehen, der Audi aus der stetig wachsenden Gewichtsspirale bei Pkw befreien konnte.<sup>2</sup> Dem Meeting gingen einige Begegnungen von Alcoa und Audi sowohl in Pittsburgh, Pennsylvania, dem Stammsitz und Technischem Zentrum von Alcoa, als auch in Ingolstadt, dem Stammsitz und Sitz der Vorentwicklung von Audi voraus. Bei den ersten Begegnungen wurden bereits grundsätzliche, gegenseitige Übereinkommen erzielt.

## 1.1 Beginn und Zielsetzungen im Spaceframe-Projekt

Der erste Kontakt zwischen Audi und Alcoa fand im Juni 1981 statt, als eine Delegation von Audi dem Unternehmen Alcoa in Pittsburgh ein Besuch abstattete. Angestoßen durch Dr. Piëch war Audi auf der Suche nach Möglichkeiten, wie mit der Verwendung des Werkstoffs Aluminium im Karosseriebau eine signifikante Gewichtseinsparung bei Pkw erzielt werden konnte. Nach Auffassung von Audi war diese Gewichtseinsparung die Voraussetzung, um auch zukünftig große und luxuriöse Automobile vermarkten zu können, die sowohl ökonomische als auch ökologische Gesichtspunkte berücksichtigten. Außerdem wurde bereits damals bei Audi das „drei Liter-Auto“ thematisiert, wenngleich auch nur als Konzeptstudie, bei dem eruiert wurde, welche Charakteristika hinsichtlich Design, Gewicht und Motorisierung ein solches Fahrzeug aufzuweisen hat.

Bereits Ende der 70er Jahre suchte Alcoa als weltweit größter Aluminiumhersteller neue Märkte für das Leichtmetall. Das Unternehmen hatte bis dahin erste Erfahrungen mit der Automobilindustrie als Lieferant von Aluminiumblechen für die Karosseriebeplankung sowie von Aluminiumbarren für den Guss von Zylinderköpfen, Motorblöcken und sonstigen Gussteilen gesammelt.<sup>3</sup> Alcoa war daran interessiert, den Aluminiumabsatz zu erhöhen und hatte erkannt, dass der Einsatz von Aluminium in der Automobilindustrie nur dann signifikant

---

<sup>2</sup> Vgl. Lewandowski (1994), S. 56.

<sup>3</sup> Vgl. Lewandowski (1994), S. 23.

erhöht werden kann, wenn Aluminium als Werkstoff für strukturelle Bauteile eingesetzt wird, die bis dahin ausschließlich dem Werkstoff Stahl vorbehalten waren. Strukturelle Teile, die einen umfangreichen, mengenmäßigen Einsatz von Aluminium erlauben, beziehen sich bei einem Pkw u. a. auf die Karosserie. Für das Ziel, im großen Stil als Aluminiumzulieferer in die Automobilindustrie einzusteigen, war es unerlässlich, in den Aufbau von metallurgischem und konstruktivem Wissen zu investieren, und Alcoa war bereit, für dieses Ziel, finanzielle und personelle Ressourcen sowie viel Zeit bereitzustellen. Zu dieser Zeit war Alcoa der einzige Aluminiumhersteller mit der Strategie, Aluminiumkarosserien für Automobile zu bauen und das notwendige Wissen dafür zu entwickeln.

Bevor Alcoa sich auf die Suche nach Kooperationspartnern machte, hatte es bereits in seinem technischen Zentrum eine Studie zum Einsatz von Aluminium in strukturellen Fahrzeugteilen anhand des Oldsmobile Omega von General Motors ausgearbeitet. Im Anschluss an diese Vorarbeiten führte Alcoa Gespräche mit den drei großen amerikanischen Automobilherstellern, deren Resonanz jedoch außerordentlich enttäuschend gewesen war. David W. Schlen-dorf, Leiter der Produkt- und Marktentwicklung von Alcoa's Automobilsparte, führte hierzu aus:

„In einem Land, in dem der Treibstoff derartig billig ist und in dem bereits ein schlichter, millionenfach gebauter 'Chevrolet Caprice Classic' rund 1,6 Tonnen wog, interessierte sich niemand für ein derartig teures und exotisches Material wie Aluminium. Die amerikanischen Automobilhersteller waren auf dieses Material nicht vorbereitet - und sie sind es als Massenproduzenten bis heute nicht.“<sup>4</sup>

Nach den ersten Gesprächen im Juni 1981 trafen sich die Vertreter von Audi und Alcoa bereits im September des gleichen Jahres auf der Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt am Main wieder und hatten ein Arbeitstreffen für das Spätjahr in Ingolstadt vereinbart. Es bestand ein gemeinsamer Konsens darüber, dass weder Audi noch Alcoa im Alleingang in der Lage wären, die notwendigen Arbeiten zum Wissensaufbau für die Herstellung einer Aluminiumkarosserie durchzuführen. Audi fehlten die metallurgischen Kenntnisse und Erfahrungen über den Werkstoff Aluminium. Alcoas Element war zwar der Werkstoff Aluminium, gleichzeitig verfügte das Unternehmen aber nicht über die erforderlichen konstruktiven Kenntnisse und Erfahrungen beim Einsatz von Aluminium in einer Fahrzeugkarosserie. Vielmehr war klar, dass allein durch die Einrichtung von Arbeitsgruppen auf Seiten von Audi und Alcoa und die gemeinsame Arbeit an dem Aufbau von metallurgischem und konstruktiv-

---

<sup>4</sup> Lewandowski (1994), S. 23.

vem Wissen, in absehbarer Zeit eine Karosserie aus Aluminium entwickelt werden kann. Die Unternehmen erkannten, dass eine Symbiose von innovativem Automobil-Know how und umfangreichem F & E-Know how in der Anwendung des Werkstoffs Aluminium das Fundament einer erstmals praktizierten Entwicklungspartnerschaft dieser Dimension bildete.

Gegenstand des Ingolstädter Treffens im Spätjahr 1981 war es denn auch, die Omega-Studie zu präsentieren und gemeinsam über die technischen Aspekte beim Einsatz von Aluminium in strukturellen Fahrzeugkomponenten zu diskutieren. Alcoa fuhr mit einer Gruppe von Marketing-Mitarbeitern und Ingenieuren aus den Bereichen Werkstoffstruktur, Verbindungs- und Formtechnik nach Ingolstadt. Als Ergebnis wurde eine grundsätzliche Absichtserklärung zwischen Audi und Alcoa unterzeichnet und vereinbart, zunächst eine Blechkarosserie aus Aluminium zu entwickeln, die analog zu einer konventionellen Stahlkarosserie aus einzelnen Blechen zusammengeschweißt und selbsttragend war. Außerdem war eine Geheimhaltungsklausel Bestandteil der Vereinbarung, in der Alcoa sich verpflichtete, keine Informationen aus der Kooperation mit Audi an Dritte weiterzugeben. Die Geheimhaltung ging so weit, dass auch Informationen über die Existenz einer Kooperation zwischen beiden Unternehmen über lange Zeit geheim gehalten wurden.

Nach dem Ingolstädter Treffen ging Audi unter der Leitung von Heinrich Timm, damals Leiter „Konzept Grundlagen“, in Klausur, überprüfte die Ergebnisse der Omega-Studie und formulierte Ziele, die mit einem Einsatz von Aluminium in der Fahrzeugkarosserie erreicht werden mussten. Eine Aluminiumkarosserie hatte nur dann eine Erfolgchance, wenn das vollständige Potenzial des Werkstoffs Aluminium ausgeschöpft und dabei mindestens 30 % der Einzelteile eingespart werden konnten. Letzteres war als eine Sekundärmaßnahme erforderlich, um den Einsatz des teureren Werkstoffs zu rechtfertigen. Die neuartige Kombination aus Komponentenreduktion und werkstoffgerechtem Einsatz nahm das Konzept des späteren Spaceframe bereits vorweg. Der konzeptionelle Ansatz wurde zunächst „Audi-Alcoa Body Concept“ getauft und erst wesentlich später in „Audi Spaceframe“ umbenannt.

Im Frühsommer 1982 hatte Dr. Piëch dem von Heinrich Timm eingeschlagenen Weg zugestimmt und eine Delegation des Unternehmens fuhr zu dem entscheidenden Meeting nach Pittsburgh. Neben der Notwendigkeit, erhebliche Ressourcen für ein solches Projekt bereitzustellen, setzten die extrem anspruchsvollen Ziele die Bereitschaft voraus, in allen metallurgischen und konstruktiven Bereichen Neuland zu betreten und Grenzbereiche auszuloten. Heinrich Timm erläuterte:

„Die Antwort des Metallurgen von Alcoa war wiederholt ‚It’s impossible‘. Das ging soweit, dass er irgendwann wütend das Meeting verließ. Dann haben wir uns an den Vorstand von Alcoa gewandt und gefragt, ob sie denn noch Interesse hätten, den Weg gemeinsam zu beschreiten oder ob wir jetzt abreisen können. Nach einer kurzen Wartezeit haben wir die verbindliche Antwort erhalten: ‚Wir sind bereit, wir nehmen die Herausforderung an.‘“

Daraufhin wurde ein Entwicklungsvertrag abgeschlossen, der im Prinzip eine erneuerte und konkretisierte Absichtserklärung darstellte. Das war der Beginn einer langen und partnerschaftlichen Zusammenarbeit. Ab diesem Zeitpunkt wurde ein Projektteam aus ca. 20 Mitarbeitern aufgestellt, das etwa je zur Hälfte von Audi- und Alcoa-Mitarbeitern besetzt war. Neben dem Kernteam wurden bei Bedarf Fachabteilungen bei Audi und Alcoa zur Lösung spezieller Fragestellungen hinzugezogen. Aber erst sieben Jahre später, Anfang 1989, sollte die Entscheidung fallen, die neue Spaceframe-Technologie in ein Fahrzeug der Audi-Oberklasse, den neuen Audi A8, in Serie zu bringen.

## 1.2 Zielsetzungen und Potenziale des Leichtbaus mit Aluminium

Ende der 70er Jahre zeichnete sich ab, was treffend unter dem Schlagwort „Gewichtsspirale“ zusammengefasst werden kann. Damit gemeint war die scheinbar unausweichliche Gewichtszunahme bei Fahrzeugen über sämtliche Pkw-Klassen hinweg. Diese Gewichtszunahme wurde durch erhöhte Anforderungen an Sicherheit, Komfort, Fahrleistungen und Universalität des Fahrzeuges angetrieben, die eine Anpassung der Motorisierung, des Fahrwerks, der Fahrzeuggröße, des Tankvolumens und der Karosseriesteifigkeit erforderlich machten.<sup>5</sup> Neben den steigenden Ansprüchen an Sicherheit und Komfort trug auch maßgeblich eine verbesserte Korrosionsschutzvorsorge dazu bei, dass jede neue Modellgeneration schwerer wurde.

*Beispiel: Als der Audi 80 im Herbst 1972 auf den Markt kam, hatte er ein Leergewicht von rund 850 kg. Die Audi-Rohkarosse wog 235 kg. Zehn Jahre später erhöhte sich das Gewicht des etwas größer gewordenen Nachfolgers um rund 50 kg und nochmals deutlich schwerer wurde der 1986 in Serie gegangene Audi 80 der dritten Generation. Das vollgetankte Basismodell wog nunmehr 1068 kg. Das zusätzliche Gewicht kam u. a. durch eine großzügigere Verglasung (plus 12 kg), eine Akustik-Kapsel um den Motor (3,7 kg), verbesserte Sitze (plus 5,8 kg), größer dimensionierte Räder und Bremsen (plus 14 kg), das Rückhaltesystem Proconten von Audi (8 kg), verbesserten Korrosionsschutz (plus 30 kg), ein Antiblockiersystem (10 kg), elektrische Fensterheber (4 kg), eine Klimaanlage (35 kg), eine*

---

<sup>5</sup> Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 359-360; Paefgen, Leitermann (1995), S. 23-25.

*elektrische Sitzverstellung (10 kg), eine Scheinwerferreinigungsanlage (10 kg), elektrische Außenspiegel (2,4 kg), eine Zentralverriegelung (3 kg), eine Niveauregulierung (13 kg), eine Differenzialsperre (5 kg) und eine Anhängerkupplung (26 kg) zustande.*<sup>6</sup>

Das zunehmende Fahrzeuggewicht wurde von einem steigenden Energieverbrauch begleitet, der im Widerspruch zu verschärften Verbrauchszielen und Abgasvorschriften stand. Der Energieverbrauch eines Fahrzeuges resultiert aus einer Kombination von Wirkungsgrad und Fahrwiderstand über die Fahrstrecke hinweg. Auf den Fahrwiderstand wirkt zu 70 - 80 % die Masse eines Fahrzeuges ein.<sup>7</sup> Die Fahrzeugmasse war deshalb der maßgebliche Ansatzpunkt, um eine nachhaltige Verbrauchsreduzierung erzielen zu können. Eine Verringerung der Fahrzeugmasse war aber nicht nur für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von zentraler Bedeutung, sondern ebenfalls für die Reduzierung von Emissionen sowie des Energieverbrauchs bei der Herstellung des eingesetzten Materials.

Das größte Potenzial, die Masse nachhaltig zu reduzieren, lag in der Karosserie, die bis zu einem Drittel des Fahrzeuggewichtes ausmachte. Dies war nicht nur wegen der Primärgewichtseinsparung der Fall, die durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien bei der Karosserie erreichbar war, sondern lag auch an den Sekundärgewichtseinsparungen, die dabei realisiert werden konnten. Unter Sekundärgewichtseinsparungen ist das Potenzial zur Realisierung von Gewichtseinsparungen bei anderen Fahrzeugkomponenten, wie z. B. Motor und Getriebe, Fahrwerk, Räder und Bereifung, Tankvolumen und Fahrzeuggröße zu verstehen. Eine signifikant leichtere Karosserie erlaubt es bspw., die Motorisierung unter Beibehaltung der gleichen Leistung zu reduzieren. Eine geringere Motorleistung kann dann auch mit einem kleineren und leichteren Motor erzielt werden. Alles in allem waren bei angepasster Motor- und Getriebeauslegung bei 10 % Gewichtsdivergenz ca. 7 % Verbrauchsdifferenz erreichbar.<sup>8</sup>

Der wichtigste Baustein zur Gewichtsreduzierung von Fahrzeugkomponenten war der Einsatz des Leichtbauwerkstoffes Aluminium, mit dessen Verwendung der bisherige Werkstoff Stahl ersetzt wurde.<sup>9</sup> Die Eigenschaften des Werkstoffes Aluminium boten die Chance, den Zielkon-

---

<sup>6</sup> Vgl. Lewandowski (1994), S. 20.

<sup>7</sup> Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 361; Leitemann (1995), S. 3; Timm, Reiter (1995), S. 1-2.

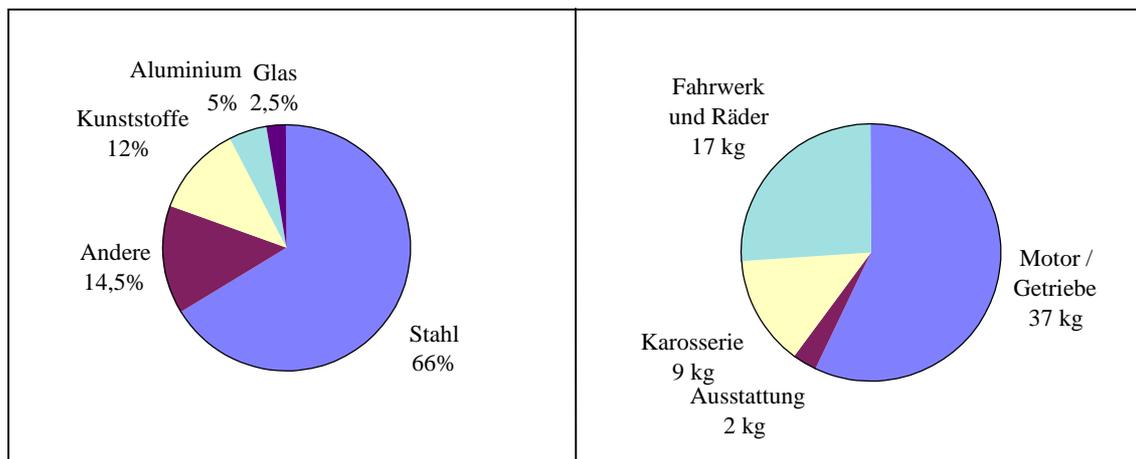
<sup>8</sup> Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 362.

<sup>9</sup> Stahl und Aluminium gehören zu den wichtigsten Metallen im Fahrzeugbau. Metalle spielen in der industriellen Anwendung aus mehreren Gründen eine herausragende Rolle. Neben etablierten Fertigungs- und Verarbeitungs- sowie Reparaturverfahren und einer hohen Rezyklierbarkeit, besitzen sie eine sehr gute Formbarkeit, Leitfähigkeit und die Eignung zur gezielten Einstellung von Eigenschaftskombinationen durch Legierung. Vgl. Kretschmer, Kohlhoff (1995), S. 19-20.

flikt zwischen hohen Komfort-, Steifigkeits- und Sicherheitsanforderungen und gleichzeitig beachtlicher Gewichtsreduzierung zu erfüllen. Aluminium ist ein Metall, das lediglich ein Drittel der Dichte von Stahl aufweist. Aluminium wird aus Bauxit synthetisiert, dessen Quellen seit langem gesichert sind. Das Metall zeichnet sich vor allem durch günstige mechanische Eigenschaften, sehr gute chemische Beständigkeit, gute Leitfähigkeit für Wärme und elektrischen Strom sowie hervorragende Verformung aus.<sup>10</sup>

Mitte der 90er Jahre wurden etwa 355.000 Tonnen Aluminium pro Jahr in Pkws verarbeitet. Der bei weitem wichtigste Werkstoff war nach wie vor Stahl: im Durchschnitt bestanden lediglich 5 % eines Automobils aus Aluminium (siehe Abbildung 1).<sup>11</sup> Die Ursache dafür, dass durchschnittlich auch nur 9 kg des Werkstoffs auf die Karosserie entfielen, lag darin begründet, dass eine umfangreichere Substitution von Stahl durch Aluminium erhebliche Investitionen in die Metallurgie und Herstellungsverfahren erforderten. Ein Automobilhersteller, der die Potenziale des Leichtbaus mit dem Werkstoff Aluminium ausschöpfen wollte, musste also vorher erhebliche Investitionen in den Aufbau von metallurgischem und konstruktivem Wissen tätigen, um einen umfangreichen Aluminiumeinsatz in der Karosserie realisieren zu können.

**Abbildung 1: Durchschnittlicher Werkstoffeinsatz und durchschnittliche Verwendung von 65 kg Aluminium in Fahrzeugen im Jahre 1995**



Quelle: Aluminium-Zentrale (1998), S. 8

Quelle: Aluminium-Zentrale (1998), S. 9.

<sup>10</sup> Vgl. Kretschmer, Kohlhoff (1995), S. 25-28.

<sup>11</sup> Vgl. Aluminium-Zentrale (1998), S. 8-10.

### 1.3 Der Einsatz von Aluminium in der Fahrzeugkarosserie

Fahrzeugkarosserien sind raumumschließende Tragstrukturen, die vielfältigen technischen Anforderungen zu genügen haben.<sup>12</sup> Grundanforderungen an jede Karosserie sind, die Betriebslasten aufzunehmen und dabei die zulässigen Spannungen und elastischen Verformungen nicht zu überschreiten. Darüber hinaus hat eine Fahrzeugkarosserie weitere Anforderungen zu erfüllen, die z. T. auch durch den Gesetzgeber vorgegeben sind. Der Schutz der Insassen verlangt bspw. eine stabil gestaltete Fahrgastzelle, die bei einem Unfall den Überlebensraum sichert. Eine stabile Fahrgastzelle wird hauptsächlich durch einen beul- und bruchresistenten Aufbau der Seitenwände erreicht, weil es in diesem Bereich kein vorgelagertes Strukturvolumen gibt, das bei einer Überlastung zuerst zusammenbricht und dadurch einen großen Teil der Stoßenergie vernichtet. Eine weitere Anforderung ist die ausreichende statische Torsionssteifigkeit. Die statische Torsionssteifigkeit ist ein Maß für Fahrkomfort und Geradeauslauf. Eine bessere Torsionssteifigkeit geht z. B. mit einem besseren Ansprechen des Fahrzeugs und einer höheren Kursstabilität bei Lenk- und Ausweichmanövern einher. Damit wird nicht nur der Fahrkomfort erhöht, sondern vor allem auch die Fahrsicherheit in Grenzsituationen.<sup>13</sup>

Obwohl der Werkstoff Aluminium dem Anforderungsbündel bei Fahrzeugkarosserien sehr entgegen kam, beschränkte sich seine Verwendung vorwiegend auf sog. „Hang on“-Teile, wie Motorhaube, Kofferraumdeckel, Kotflügel und Türen.<sup>14</sup> Während mit Hang on-Teilen keine Sekundärgewichtspotenziale erzielt werden konnten, ließ sich dagegen durch einen werkstoffgerechten Einsatz von Aluminium in einer Karosserie eine umfangreiche (Primär- und Sekundär-) Gewichtsreduzierung mit gleichzeitig hohen Steifigkeits-, Komfort- und Sicherheitsanforderungen realisieren.

---

<sup>12</sup> Vgl. Koewius (1994), S. 146.

<sup>13</sup> Weitere Anforderungen sind z. B. die Minimierung von (kleineren) Unfallschäden, um die Reparaturkosten einzugrenzen. Außerdem benötigt eine Karosserie als Ganzes genügend hohe Eigenfrequenzen. Dies ist deshalb erforderlich, um einen ausreichenden Abstand zu den in der Höhe nicht beeinflussbaren Anregungsfrequenzen der Komponenten, wie z. B. des Motors oder des Antriebsstrangs zu halten. Hohe Eigenfrequenzen sind eine Voraussetzung für einen niedrigen Innengeräuschpegel bzw. für ein Minimum an zusätzlichen Schalldämmmaßnahmen. Eine Karosseriestruktur muss darüber hinaus auch eine hohe Korrosionsbeständigkeit haben. Weiterhin ist eine Karosserie die stabile Grundlage für alle anderen Fahrzeugkomponenten. Schließlich sind Anforderungen hinsichtlich Design, Geräumigkeit, Reparierbarkeit und auch Rezyklierbarkeit zu erfüllen. Vgl. Koewius (1994), S. 146.

<sup>14</sup> Vgl. Timm, Reiter (1995), S. 2.

Die prozentuale Gewichtseinsparung an einer Aluminiumkarosserie ist von den Merkmalen des Werkstoffs und den Konstruktionsmerkmalen der Aluminiumkarosserie abhängig. Bei der Aluminiumkarosserie des A8 kamen neben den Aluminiumblechen vor allem auch Strangpressprofile und Gussknoten als Aluminiumkomponenten zum Einsatz. Die Festigkeit von warmausgehärteten Aluminiumblechen und Strangpressprofilen liegt mit den Festigkeitswerten von Stahl-Tiefziehblechen in vergleichbarer Höhe. Allerdings ist der Elastizitätsmodul von Aluminium, der die Steigung der Geraden im Kraft-Dehnungs-Diagramm angibt, um etwa zwei Drittel niedriger als der Elastizitätsmodul von Stahl.<sup>15</sup> Zur Erzielung der gleichen Beulsteifigkeit bei steifigkeitsrelevanten Aluminiumbauteilen musste deshalb bei der A8-Karosserie der geringere Elastizitätsmodul durch eine günstigere Geometriegestaltung und eine um den Faktor 1,44 höhere Wandstärke kompensiert werden. Eine vergleichbare Streckgrenze wie bei Stahl-Tiefziehblechen und die größeren Wandstärken verliehen der Aluminiumkarosserie insgesamt eine höhere Strukturfestigkeit.<sup>16</sup>

Die variablen Komponenten der A8-Karosserie ermöglichten eine werkstoff- und beanspruchungsgerechte Materialnutzung. Aluminium ist durch Umformtechniken, wie Walzen, Schmieden, Gießen, Kalt- und Warmpressen, vergleichsweise leicht formbar. Ein effizienter Materialeinsatz in der A8-Karosserie wurde dabei auch durch variable Wandstärkenverteilungen erreicht. Bei den Gussteilen und Strangpressprofilen wurde eine hohe geometrische und funktionale Integration erzielt. Die Gestaltungsfreiheit von Gussteilen gestattete zudem auch die Optimierung der Steifigkeit in den Karosserieknoten. Die Torsionssteifigkeit der Karosserie konnte um bis zu 20 % erhöht werden.<sup>17</sup>

Abbildung 2 vergleicht die Werkstoffe Stahl und Aluminium hinsichtlich der Steifigkeit und des Gewichts bei ihrer Verwendung in der Fahrzeugkarosserie. Entsprechend des Dichtigkeitsverhältnisses von Stahl und Aluminium ergibt eine reine Substitution von Stahl durch Aluminium eine maximale Gewichtseinsparung von 67 %. Die Versuche von Audi und Alcoa legten offen, dass diese Substitution allerdings nicht zu einer funktionstüchtigen Karosserie führte, weil gleichzeitig auch die Steifigkeit um mehr als 50 % abnahm. Mit einer Gewichtseinsparung von maximal 40 % konnte aber bei der Spaceframe-Karosserie durch

---

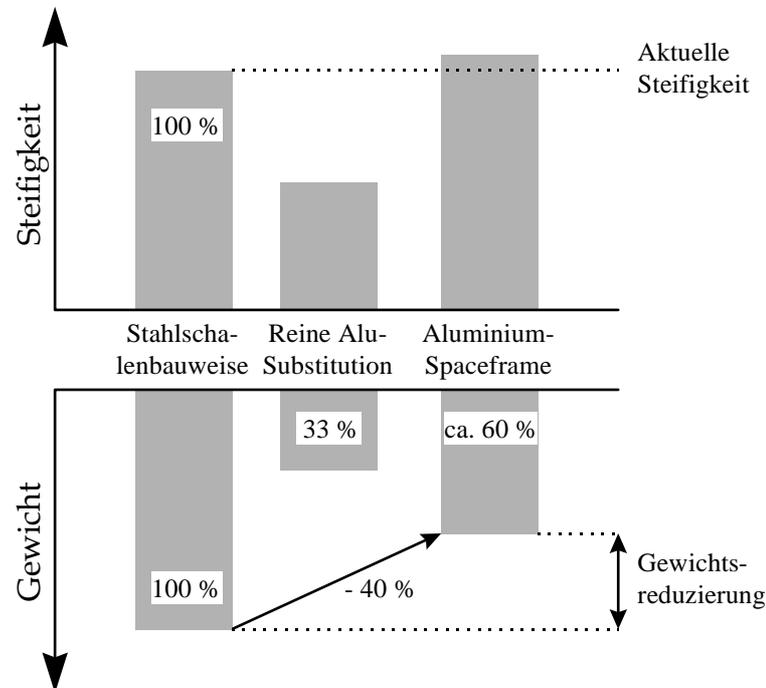
15 Der niedrigere E-Modul im elastischen Bereich - nicht im plastischen Bereich - besagt, dass Aluminium im Vergleich zu Stahl elastischer und dadurch die Steifigkeit tendenziell geringer ist.

16 Vgl. Leitermann (1995), S. 4-5.

17 Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 364-365.

eine konsequente, werkstoffgerechte Konstruktion das Steifigkeitsniveau von modernen, selbsttragenden Stahlblechkarosserien überboten werden.<sup>18</sup>

**Abbildung 2: Vergleich der Steifigkeit und des Gewichts beim Einsatz von Stahl und Aluminium in der Fahrzeugkarosserie**



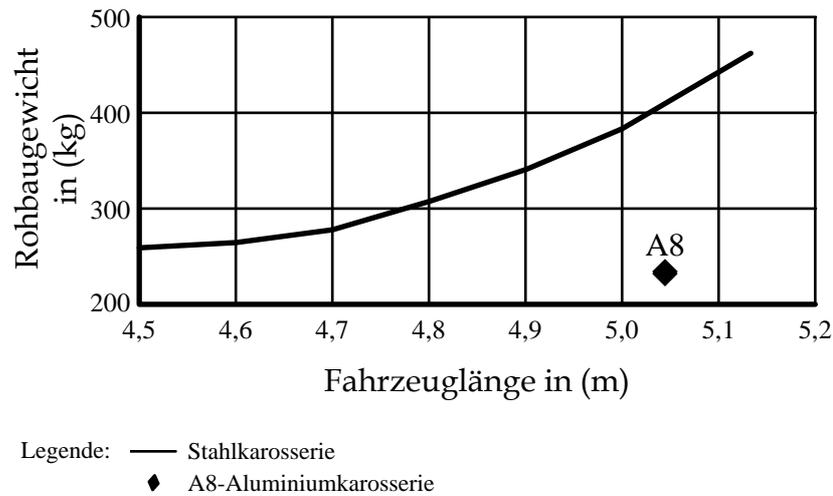
Quelle: Timm, Reiter (1995), S. 3.

Abbildung 3 verdeutlicht in alternativer Darstellung den Vergleich von Stahl und Aluminium als Werkstoff im Karosseriebau. Die Kurve zeigt das Gewicht von modernen Stahlkarosserie-Rohbauten in Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge. Die Karosserielänge des Spaceframe-Rohbaus beim A8 betrug 5,03 Meter und ist durch den Punkt in der Abbildung markiert. Dieses Gewicht liegt ca. 40 % unter dem darüber befindlichen Stahlrohbau. Aus dem Kurvenverlauf wird ersichtlich, dass erst Stahlkarosserie-Rohbauten von Kompaktfahrzeugen mit einer Gesamtlänge um und unter 4 Meter, wie z. B. der VW Golf oder die A-Klasse von Mercedes-Benz mit der Spaceframe-Karosserie des A8 gewichtsgleich waren.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 366; Leitermann (1995), S. 5; Timm, Reiter (1995), S. 3.

<sup>19</sup> Vgl. Leitermann (1995), S. 7.

**Abbildung 3: Vergleich von Karosserie-Rohbaugewichten bei Stahl und Aluminium**



Quelle: Leitermann (1995), S. 10.

## 2 Die Gestaltung der (außer-) vertraglichen Vereinbarungen und der technischen Baustruktur im Spaceframe-Projekt

### 2.1 Vertragliche und außervertragliche Vereinbarungen zwischen Audi und Alcoa

Für die Realisierung der Spaceframe-Karosserie, war eine enge Zusammenarbeit über einen ex ante unbestimmten Zeitraum zwischen Audi und Alcoa erforderlich. Bei Audi und Alcoa handelte es sich jeweils um rechtlich selbständige Unternehmen aus verschiedenen Branchen, bei denen die Kooperationsbereitschaft und Koordination abzusichern war. Diese Aufgabe wurde durch die Überschaubarkeit des Projektes erleichtert: In der Regel waren nicht mehr als die erwähnten 20 - 30 Mitarbeiter von Audi und Alcoa in das Projekt involviert. Dies lag zum einen daran, dass sich die Kooperation nicht auf ein vollständiges Automobil, sondern lediglich auf eine - wenn auch komplexe - Komponente erstreckte. Zum anderen wurde die meiste Zeit über in der forschungsorientierten Vorentwicklungsphase kooperiert, in der das Investitionsvolumen noch nicht den Umfang hatte, wie es für die Serienentwicklung und Herstellung erforderlich ist. Die Aufgabenverteilung war eher grundsätzlicher und strategischer Natur, und zwar dergestalt, dass Alcoa das metallurgische und Audi das fahrzeugspezifische Wissen einbringen sollte. Auch noch in späteren Projektphasen wurde keine klare Arbeitsteilung zwischen Audi und Alcoa angestrebt, die Problemlösungen wurden vielmehr gemeinsam angegangen und ausgearbeitet.

Vor dem Hintergrund der personellen Überschaubarkeit des Projektes und der unklaren Aufgabenverteilung wurden die Kooperationsbereitschaft und Koordination vorwiegend auf der Basis persönlicher Beziehungen gewährleistet, die durch eine geringe Fluktuation der Projektmitglieder und durch häufige und längerfristige Sequenzen gemeinsamer Teamarbeit in Pittsburgh und Ingolstadt bzw. Neckarsulm gekennzeichnet waren. Dennoch wurden im Spaceframe-Projekt auch Kooperationsvereinbarungen getroffen, das Übereinkommen über die Verteilung der intellektuellen Eigentumsrechte festgelegt und später ein Zuliefervertrag zwischen Audi und Alcoa ausgehandelt. Ziel war dabei, mögliche Kooperations- und Kommunikationsbarrieren aus dem Weg zu räumen und den Projektpartnern dadurch eine vertrauensvolle und effektive Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg zu ermöglichen. Tabelle gibt einen Überblick über die festgelegten Maßnahmen und zwischenbetrieblichen Vereinbarungen.

**Tabelle 1: Kooperationsprinzipien im Spaceframe-Projekt**

Maßnahmen	Vereinbarungen
(1) Kooperationsvereinbarungen	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Ursprünglich einfach aufgebauter und kurzer Kooperationsvertrag;</li> <li>2) Stillschweigen gegenüber Dritten;</li> <li>3) Jährliche Abstimmung der Arbeitsteilung und der weiteren Schritte;</li> <li>4) Jährliches Projektreview und Freigabe von Investitionsmitteln.</li> </ol>
(2) Intellektuelle Eigentumsrechte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Gemeinsame Patente werden nicht angemeldet;</li> <li>2) Audi behält die Eigentumsrechte an allen Patenten, die die Spaceframe-Karosserie ('Automobile Technology') betreffen;</li> <li>3) Alcoa behält die Eigentumsrechte an Patenten, die die Legierungs- und Prozesstechnologie betreffen, allerdings besteht kein Ausschließlichkeitsanspruch. Prozesstechnologie, die von Audi entwickelt wird, kann auch von Audi angemeldet werden;</li> <li>4) Nach einer Sperrfrist von 3 Jahren, gerechnet ab der Markteinführung des A8, kann Alcoa die Spaceframe-Technologie kostenlos auch für andere Fahrzeugprojekte verwenden.</li> </ol>
(3) Richtlinien und Informationsflüsse	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Audi hat die Federführung des Projektes inne;</li> <li>2) Bei Bedarf wird gemeinsam an einem Standort am Projekt gearbeitet;</li> <li>3) Der Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern soll ungehindert erfolgen;</li> <li>4) Projektfortschritte werden protokolliert und ggf. einander zugänglich gemacht.</li> </ol>
(4) Zuliefervertrag	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Single sourcing für den A8;</li> <li>2) Cost plus-Vereinbarung bis 2002;</li> <li>3) Vertragsdauer über den Modelllebenszyklus;</li> <li>4) Garantierte Mindestabnahme von 80 Stück pro Tag</li> <li>5) Garantie einer (kleinen) Gewinnmarge pro Stück;</li> <li>6) Intervall für die Zielkosten, die erst gegen Ende der Serienentwicklung zu definieren waren.</li> </ol>

*Kooperationsvereinbarungen.* Das Projekt begann mit einer langen Phase der Erforschung metallurgischer und konstruktiver Themenbereiche im Einsatz von Aluminium als Werkstoff für den automobilen Karosseriebau. Es gab praktisch keine erprobten (Vor-) Kenntnisse, auf welchen hätte aufgebaut werden können. Zielsetzung war deshalb auch, die Machbarkeit einer Aluminiumkarosserie zu beweisen und das erforderliche Wissen über den Werkstoff, die Karosserie und Prozesstechnologie aufzubauen. In dieser Zeit war nicht nur offen, ob das Projekt ein Erfolg wird, sondern auch, wie eine werkstoffgerechte Aluminiumkarosserie konkret aufgebaut ist, wie lange die beiden Partnerunternehmen kooperieren und wieviel Ressourcen dabei notwendig sein würden.

In dieser Situation der Unklarheit, des mangelnden Wissens und des unbestimmten Ersteinsetzes war der unbeeinträchtigte zwischenbetriebliche Wissensaustausch unerlässlich, der durch wenige grundsätzliche Kooperationsvereinbarungen gefördert wurde. Zwischen Audi und Alcoa wurde ursprünglich ein sehr kurzer und aus juristischer Sicht einfach aufgebauter Vertrag ausgehandelt, der mehr den Charakter einer Absichtserklärung hatte. Neben der bereits erwähnten Geheimhaltungsklausel wurden jährliche Projektreviews vereinbart. Auf Basis eines jährlich definierten Projektplans wurde über die weitere Vorgehensweise entschieden, der Aspekte wie Zielsetzungen, geplante Arbeitsschritte und finanzielle sowie personelle Budgetierung des Projektes in grundlegender Form enthielt. Der Projektplan wurde zwischen den Kooperationspartnern diskutiert und abgestimmt, die Budgetierung und Mittelfreigabe erfolgte jedoch in jedem Unternehmen getrennt. In der Retrospektive zeigte sich, dass die Vorentwicklung wesentlich länger und investitionsintensiver war, als ursprünglich vermutet. Sowohl Audi als auch Alcoa investierten mehr als 100 Millionen US-Dollar in die Vorentwicklung der Spaceframe-Karosserie.

*Intellektuelle Eigentumsrechte.* Die Vereinbarung über die Verteilung der intellektuellen Eigentumsrechte war sowohl für Audi als auch Alcoa von Bedeutung, weil mit dieser Vereinbarung die späteren Nutzungsrechte an den Ergebnissen der gemeinsamen Aktivitäten im Projekt festgelegt wurden, deren Gestalt und Umfang ex ante noch unbekannt waren. Das Ziel von Audi war es, die Gewichtsspirale durch den Einsatz von Aluminium in der Fahrzeugkarosserie umzukehren und damit seine Wettbewerbsposition als innovativer Automobilhersteller zu stärken, während das Interesse von Alcoa als Aluminiumhersteller vorwiegend darin bestand, ein neues Marktsegment für den Einsatz von Aluminium zu erschließen und die einmal erarbeitete Technologie auch anderen Automobilherstellern anzubieten. Diese unterschiedliche globale Interessenslage war den beiden Unternehmen durchaus klar. Die Zielharmonie lag nun darin, dass sie erst gemeinsam die Technologie entwickeln mussten, um damit ihre übergeordneten Zielsetzungen bedienen zu können. In diesem Kontext konnten die Vereinbarungen über die Verteilung der Patentrechte auch dabei behilflich sein, die Zielkonvergenz über das Ende der eigentlichen Kooperation hinaus sicherzustellen.

Die grundsätzliche Verteilung der Patentrechte sah vor, dass Audi sich bei allen Patenten die Eigentumsrechte vorbehielt, die sich auf die Karosserie bezogen, während Alcoa Patente anmelden konnte, die sich auf die Legierungs- und Prozesstechnologie erstreckten. Die kos-

tenlose Nutzung der späteren Spaceframe-Karosserie durch Alcoa war eine weitere Vereinbarung, die es Alcoa erlaubte, die Technologie auch bei anderen Automobilherstellern als Zulieferer einsetzen zu können. Lediglich innerhalb einer Frist von 3 Jahren nach Markteinführung des A8 war die Verwendung der Spaceframe-Technologie bei Fahrzeugprojekten mit anderen Herstellern ausgeschlossen. Auf den ersten Blick schien dies den Interessen von Audi entgegenzustehen, exklusiver Hersteller von Aluminium-Spaceframe-Karosserien zu sein. Bei genauerer Analyse war es jedoch keineswegs der Fall, dass Audi alleiniger Anbieter einer Spaceframe-Technologie sein wollte, sondern lediglich Erfinder und Vorreiter.<sup>20</sup> Diese Vorreiterrolle blieb Audi in jedem Fall erhalten, zumal es sehr unwahrscheinlich gewesen war, dass ein anderer Hersteller mit Alcoa als Zulieferer die Spaceframe-Technologie in einer Großserie hätte einsetzen können, bevor Audi dazu in der Lage gewesen wäre.

Bezüglich der Legierungs- und Prozesstechnologie, die von seiten Alcoas patentiert wurde, bestand die gleiche Übereinkunft, dass Audi sie bei Bedarf kostenlos nutzen konnte. Allerdings hatte Alcoa hier keinen exklusiven Anspruch auf die Patentierung der aluminiumseitigen Herstellungsverfahren. Hier galt das Prinzip, dass dasjenige Unternehmen, welches maßgeblich eine patentierfähige Erfindung entwickelte, es als solche auch anmelden konnte. Aus dem Spaceframe-Projekt resultierten u. a. insgesamt 40 karosseriebezogene Patente und 7 Patente auf neue Aluminiumlegierungen.<sup>21</sup>

*Richtlinien und Informationsflüsse.* Zur Festlegung der Richtlinien und Informationsflüsse im Projekt wurden neben den sehr bedeutenden persönlichen Kontakten ein paar grundsätzliche Vereinbarungen eingehalten, die nicht unbedingt ex ante explizit definiert wurden, sondern sich im Projektverlauf herausbildeten. Grundsätzlich hatte Audi als Automobilhersteller die Federführung im Projekt inne. Audi hatte zu entscheiden, ob, in welcher Form und in welches Fahrzeug eine Aluminiumkarosserie einzusetzen war. Weiterhin wurde vereinbart, dass die Projektmitarbeiter von Audi und Alcoa gemeinsam an Problemlösungen arbeiten. Die ungehinderte Kooperation wurde dabei durch einen partnerschaftlichen und projektbezogenen Informationsaustausch gewährleistet. Schließlich wurden Projektfortschritte, die bspw. aus Versuchen und Tests über die Funktionalität, Festigkeit oder Steifigkeit resultierten, protokolliert und bei Bedarf einander zugänglich gemacht.

---

<sup>20</sup> Ein Interviewpartner fasste diese Motivation sehr treffend in dem Satz zusammen: „You can’t be a leader without followers.“

<sup>21</sup> Vgl. Bartholomew (1997), S. 13.

Die gemeinsame Arbeit an Problemlösungen durch Mitarbeiter beider Unternehmen an einem Standort war häufig erforderlich, weil einerseits die Mitarbeiter beider Unternehmen ihre speziellen Kenntnisse für die Ausarbeitung von Problemlösungen einbringen mussten und andererseits für die Durchführung bestimmter Untersuchungen Werkzeuge und Maschinen benötigt wurden, die nur an einem Standort verfügbar waren. Die personelle Kontinuität und die enge Zusammenarbeit waren hier für den reibungslosen und ungehinderten Informationsaustausch sehr förderlich. Die detaillierte Protokollierung von Fortschritten und Testergebnissen im Projekt war zwar bei der erkenntnisorientierten, explorativen Tätigkeit selbstverständlich. Jedoch war es nicht so, dass die Protokolle als Instrument zur Strukturierung der Informationsflüsse zwischen Audi und Alcoa eingesetzt wurden. Vielmehr wurden mit ihnen die erarbeiteten Ergebnisse zwischen den Projektpartnern ausgetauscht, um diese à jour zu halten und ihnen für ihre Aktivitäten eine zielrichtende Orientierung zu geben. Sofern bspw. ein Partner selbständig Untersuchungen durchgeführt hatte, deren Ergebnisse für die Arbeit des anderen von Bedeutung waren, wurden die Dokumentationen einander zugänglich gemacht. Je nach Gegenstand der Untersuchungen enthielten die Protokolle Daten über karosserie-, werkstoff- und verfahrensbezogene Bereiche. Das produktive Wissen war aufgrund dessen genauso wenig klar zwischen Audi und Alcoa alloziert wie die Arbeitsteilung im Projekt.

*Zuliefervertrag.* Der Zuliefervertrag, der zwischen Audi und Alcoa für die Belieferung der Spaceframe-Komponenten vereinbart wurde, enthielt Exklusivitätsrechte für Alcoa, wie z. B. die Single sourcing-Vereinbarung. Der Vertrag legte auch fest, dass Audi die Risiken, die aus der Belieferung des A8 entstanden, bis zum Jahre 2002 vollständig übernahm. Im Vertrag wurde außerdem festgelegt, dass die Vertragsdauer den Modelllebenszyklus umfasst und Mindestabnahmemengen sowie Gewinnstückmargen garantiert sind. Verbindliche Zielkosten für einzelne Komponenten konnten erst am Ende der Serienentwicklung festgelegt werden, weil diese Größe für beide Unternehmen bis zum Abschluss des Projektes nicht detailliert zu ermitteln waren. Aufgrund dessen hatte Audi ein Zielkostenintervall definiert, das letztlich leicht überschritten wurde. Die Zielkosten standen damit in der (Serien-) Entwicklung der Spaceframe-Karosserie nicht als Referenzgröße für die Bewertung von Kosten (-abweichungen) zur Verfügung.

## 2.2 Aufbau und Charakteristika der Spaceframe-Karosserie

Das Ergebnis der Kooperation zwischen Audi und Alcoa war die Spaceframe-Karosserie des Audi A8. Mit dem A8 war 1994 erstmalig in der Automobilindustrie ein Fahrzeug in Serie gegangen, das über eine hundertprozentige Aluminiumkarosserie verfügte. Der Grundgedanke der Spaceframe-Karosserie bestand darin, eine dem Werkstoff Aluminium gerechte Bauweise bei der Karosserie umzusetzen. Die Konstruktionsweise der Spaceframe-Karosserie unterschied sich dahingehend von der Bauweise einer modernen Stahlkarosserie, dass letztere in selbsttragender Schalenbauweise aufgebaut ist und die Strangpressteile aus Blech sind, die durch (viele) Schweisspunkte miteinander verbunden sind.

Bei der Spaceframe-Karosserie handelte es sich dagegen um eine Rahmenstruktur, in die jedes Flächenteil mittragend integriert wurde. Die Bezeichnung „Spaceframe“ bezog sich dabei auf die raumumschließende Rahmenstruktur. Die Rahmenstruktur wurde aus den oben erwähnten Aluminiumkomponenten zusammengesetzt, wobei Strangpressprofile die Stäbe und Druckgussstücke die Knoten des Fachwerks bildeten.<sup>22</sup> Die Strangpressprofile des geschlossenen Rahmens kamen sowohl in gerader als auch in gebogener Form zum Einsatz, die in hoch beanspruchten Eck- und Verbindungspunkten mit Druckgussteilen verbunden waren (siehe Abbildung 4).<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> Vgl. Audi AG (1993); Koewius (1994), S. 46.

<sup>23</sup> Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 366;

**Abbildung 4: Die Spaceframe-Karosserie des Audi A8 aus Aluminium**



Quelle: Audi AG

Durch die Gussknoten an den Verbindungs- und Kräfteinleitungsstellen wurde eine deutliche Gewichtsreduzierung erzielt, weil sie einen optimierten Materialeinsatz, eine variable Wandstärkendimensionierung und damit auch hohe lokale Steifigkeitsrealisierungen an den Kräfteinleitungspunkten des Fahrzeuges erlaubten.<sup>24</sup> Die Strangpressprofile waren als nahtlos geschlossene Hohlprofile sehr steif. Die Stabilität der Karosserie wurde nun sowohl durch eine formschlüssige als auch durch eine kraftschlüssige Verbindung erreicht. Die formschlüssige Verbindung bezog sich auf die geschlossenen Strangpressprofile, die in den Druckgussknoten zusammenliefen. Die kraftschlüssige Verbindung der Karosserie resultierte aus der eingesetzten Verbindungstechnik, wie z.B. dem MIG-Schweißverfahren. In diese Rahmenstruktur wurden die Blechflächen eingebunden, die zusätzlich einen erheblichen Beitrag zur Versteifung der Karosserie leisteten.<sup>25</sup> Die komplette Spaceframe-Karosserie aus Strangpressprofilen, Druckgussknoten und Blechteilen wog 210 kg (siehe auch Abbildung 3).<sup>26</sup>

Der alternative Aufbau der Spaceframe-Karosserie im Vergleich zur Stahlkarosserie schuf die Voraussetzung, eine geometrische und funktionale Integration bei den Karosseriekomponenten vorzunehmen und insgesamt weniger Komponenten einzusetzen. Eine moderne Stahl-

<sup>24</sup> Vgl. Paefgen, Leitermann (1995), S. 31.

<sup>25</sup> Der Anteil der Blechflächen an der Gesamtsteifigkeit der Karosserie betrug ca. 75 %. Vgl. Leitermann (1995), S. 6.

<sup>26</sup> Vgl. Koewius (1994), S. 147.

karosserie besteht aus 322 Teilen, während bei der Spaceframe-Karosserie nunmehr lediglich 245 Komponenten benötigt wurden.<sup>27</sup> In diesen Komponenten waren jeweils 40 Strangpressprofile und 40 Druckgussknoten verarbeitet, die als Karosserieeinzelteile von Alcoa warmausgehärtet angeliefert wurden.

Die Bauweise der Spaceframe-Karosserie stellte außerdem Sicherheitsreserven hinsichtlich der Festigkeit und Stabilität der Karosserie, der Energieabsorption im Falle eines Unfalls sowie Sicherheitspotenziale im gesamten Unfallspektrum zur Verfügung. Im Hinblick auf das gesamte Unfallspektrum wirken sich Leichtbaumaßnahmen in der Summe grundsätzlich positiv aus, sofern die Gewichtsminderung bei identischer Deformationssteifigkeit und höherer Zellenstabilität realisiert werden kann. Die geringere Masse geht bei einem bewegten Fahrzeug mit einer reduzierten (kinetischen) Energie einher. Dadurch behält das Fahrzeug c. p. von vornherein einen größeren verbleibenden Überlebensraum zur Insassensicherung, weil eine geringe kinetische Energie verminderte Aufprallenergien erzeugt.<sup>28</sup> Bei dem Sicherheitskäfig der Spaceframe-Karosserie waren außerdem erheblich höhere Kraftaufwendungen erforderlich als bei Stahlblechkarosserien, um Deformationen der Karosserie auszulösen. Neben der Verminderung des globalen Spannungsniveaus der Karosserie durch höhere Wandstärken bei den Druckgussteilen, lag dies auch daran, dass Aluminiumprofile im Vergleich zu Stahlprofilen eine höhere Energieaufnahme pro Masseneinheit besitzen. Die gleiche Energieaufnahme des Aluminiumprofils ist bereits mit weniger als der Hälfte des Gewichts eines Stahlträgers zu erzielen.<sup>29</sup> Der ideale Strangpressprofilquerschnitt ist das Rohrprofil, das bei identischer Energieaufnahme eine Gewichtseinsparung von 63 % gegenüber dem Stahlträger eröffnet. In den am meisten gefährdeten Unfallzonen wurden außerdem Steifigkeitsstaffelungen konzipiert. So lag die Pralldämpferwiderstandskraft unter der Deformationskraft des vorderen Längsträgerteils und diese wiederum unter der Deformationskraft der Fahrgastzelle.<sup>30</sup> Insgesamt erhöhte das geringere Gewicht in Kombination mit dem verbesserten Fahrverhalten die aktive Fahrsicherheit, die durch kürzere Bremswege, besseres Beschleunigen sowie schnelleres und direkteres Lenkverhalten herbeigeführt wurde.<sup>31</sup>

---

27 Vgl. Lewandowski (1994), S. 32.

28 Die Vorteile der verringerten Masse lassen sich auch auf die Unfallpartner übertragen, die ebenfalls reduzierte Eindringungen erfahren. Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 370.

29 Vgl. Paefgen, Timm (1993), S. 367-369.

30 Vgl. Lewandowski (1994), S. 36-40.

31 Vgl. Paefgen, Leitermann (1995), S. 53-54.

Tabelle fasst die angeführten Charakteristika der Aluminium-Spaceframe-Karosserie überblickartig zusammen.

**Tabelle 2: Charakteristika der Spaceframe-Karosserie**

<b>Merkmale</b>	<b>Ausprägungen</b>
(1) Aufbau der Karosserie	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Die Karosserie stellt eine raumumschließende, integrative Rahmenstruktur dar;</li> <li>2) Komponenten bestehen aus Strangpressprofilen, Druckgussknoten, Aluminiumblechen;</li> <li>3) Strangpressprofile werden in gerader und gebogener Form eingesetzt;</li> <li>4) Druckgussknoten werden je nach Belastung unterschiedlich dimensioniert;</li> <li>5) Stabilität wird durch form- und kraftschlüssige Verbindungen erzielt.</li> </ol>
(2) Komponentenanzahl und Gewicht	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Die Bauweise ermöglicht die Reduktion der sonst üblichen Komponentenanzahl durch geometrische und funktionale Integration;</li> <li>2) insgesamt werden 245 Komponenten zur Karosserie verarbeitet;</li> <li>3) jede Karosserie enthält 40 Strangpressprofile und 40 Druckgussknoten;</li> <li>4) das Gewicht der Karosserie beträgt insgesamt 210 kg.</li> </ol>
(3) Fahrgastsicherheit	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Geringere Masse aufgrund der Gewichtsreduzierung führt zu einer geringeren kinetischen Energie;</li> <li>2) Aluminiumprofile haben im Vergleich zu Stahlprofilen eine höhere Energieaufnahme pro Masseneinheit;</li> <li>3) Steifigkeitsstufen werden in den gefährdetsten Unfallzonen vorgenommen;</li> <li>4) besseres aktives Fahrverhalten wird durch hohe Torsionssteifigkeit und geringeres relatives Gewicht erreicht.</li> </ol>

### **2.3 Spezifika der Herstellungs- und Verbindungstechnik im Vergleich zu Stahlkarosserien**

Die Kooperation zwischen Audi und Alcoa fokussierte den Aufbau des metallurgischen und konstruktiven Wissens, das für das Produkt „Spaceframe-Karosserie“ sowie für dessen Herstellung erforderlich war. Neuartig waren nicht nur die Spaceframe-Karosserie mit ihren oben beschriebenen Charakteristika, sondern auch die Herstellungs- und Verbindungstechniken, die von etablierten Verfahren bei modernen Stahlkarosserien signifikant abwichen und deren Entwicklung sowie verfahrenstechnische Absicherung für die Serienproduktion zu wichtigen Arbeitsgebieten der Kooperation von Audi und Alcoa gehörten.

Bei der Herstellung einer Stahlkarosserie werden die einzelnen Karosserieteile, wie z. B. Träger, Schweller, Türen, Klappen, Kotflügel etc. aus verzinkten Stahlblechen gefertigt. Diese Bleche werden in großen Pressen mit Presswerkzeugen tiefgezogen. Ausreichende Steifigkeiten werden erreicht, indem bspw. bei Längsträgern und Türpfosten Bleche unterschiedlicher Dicke eingesetzt oder zwei Blechschalen zu einem Hohlprofil verschweißt werden. Aus Blecheinzelteilen entstehen Schweißgruppen, aus denen dann die Karosserie zusammengefügt wird. Bei der Fertigung der Spaceframe-Karosserie war ein Herstellungsprozess in dieser Form kaum darstellbar, weil die Spaceframe-Karosserie aus Strangpress- und Druckgussteilen und einer komplexen Außenhaut aus Aluminiumblechen gefertigt wurde. Im Gegensatz zur Schalenbauweise der Stahlkarosserien spricht man hier auch von der Strukturbauweise. Die Strukturbauweise wies im Vergleich zur Schalenbauweise in drei Bereichen Unterschiede auf. Die Unterschiede betrafen zum einen die Fertigung der Spaceframe-Karosserie mit Strangpress- und Druckgussteilen, zum anderen die Fertigung der Anbauteile, bei der Strangpressprofile als Verstärkungselemente in Türen und Klappen verwendet wurden, und schließlich bezogen sich die Unterschiede auf die Fertigstellung der Spaceframe-Rohkarosserie, bei der Vorder- und Hinterwagen separat erstellt und angebaut wurden.<sup>32</sup> Tabelle führt die Spezifika der Herstellungs- und Verbindungstechniken der Spaceframe-Karosserie im Vergleich zur modernen Stahlkarosserie auf.

---

32 Vgl. Gugisch (1993), S. 918.

**Tabelle 3: Spezifika der Herstellungs- und Verbindungstechnik bei der Spaceframe-Karosserie im Vergleich zur Stahlkarosserie**

Merkmale	Ausprägungen
(1) Strukturbauweise aus Aluminium vs. Schalenbauweise aus Stahl	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Die Strukturbauweise zeigt im Vergleich zum Stahlbau erhebliche Unterschiede auf, die drei Bereiche umfassen:</li> <li>2) die Fertigung der Spaceframe-Karosserie mit ihren Strangpress- und Druckgussteilen;</li> <li>3) die Fertigung der Anbauteile, wobei Strangteile als Verstärkungselemente in Türen und Klappen verwendet werden;</li> <li>4) die Fertigstellung der Rohkarosserie durch separaten Vorder- und Hinterwagen zur Rohkarosserie.</li> </ol>
(2) Fertigungsverfahren bei den Spaceframe-Komponenten	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Strangpressprofile werden durch spezielle Biegewerkzeugmaschinen in ihre jeweilige Form gezogen;</li> <li>2) Druckgussknoten werden durch Vacuralgussverfahren hergestellt;</li> <li>3) Strangpressprofile und Druckgussknoten erhalten eine Wärmebehandlung, die für die erforderliche Duktilität notwendig ist;</li> <li>4) Aluminiumbleche werden im Pressverfahren hergestellt.</li> </ol>
(3) Relative Schwierigkeit der Fertigungsverfahren	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Das Vacuralgussverfahren ist technisch recht aufwendig, Prozessparameter sind genau einzuhalten;</li> <li>2) Aluminiumbleche haben geringere Dehnungs- und Streckgrenzwerte als Stahlbleche;</li> <li>3) Aluminium besitzt ein anderes Auffederungsverhalten als Stahl;</li> <li>4) der Transport von Aluminiumblechen ist aufgrund der Oberflächenempfindlichkeit schwieriger;</li> <li>5) bei der Spaceframe-Karosserie ist eine Wärmebehandlung erforderlich;</li> <li>6) alle Werkzeuge müssen auf den Werkstoff Aluminium abgestimmt sein.</li> </ol>
(4) Verbindungstechnik	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Bei Stahlkarosserien wird vorwiegend das Punktschweißen eingesetzt. Bei der Spaceframe-Karosserie ist dies nicht möglich, dagegen kommen folgende Techniken zum Einsatz:</li> <li>2) MIG-Schutzgasschweißen;</li> <li>3) Nieten. Das Nieten ist eine neue Verbindungstechnik im Automobilbau und zeichnet sich durch eine 30 % höhere Festigkeit gegenüber dem Punktschweißen aus;</li> <li>4) Clinchen;</li> <li>5) Kleben.</li> </ol>

Strangpressprofile wurden mit Hilfe von speziellen Biegewerkzeugmaschinen in ihre vorge-sehene Form gezogen. Die Herstellung von Druckgussknoten erfolgte dagegen im sog. Vacu-ralgussverfahren. Flüssiges Aluminium wurde dabei in eine vorgefertigte Form aus Stahl eingeschossen, die vorher unter Vakuum gesetzt worden war. Bereits bei der Herstellung der Strangpress- und Druckgussteile war eine Wärmebehandlung erforderlich, bei der die Teile zur Erzielung einer hinreichenden Duktilität aus hoher Temperatur sehr schnell herunterge-

kühlt werden mussten.<sup>33</sup> Diese Technik war Voraussetzung für die Herstellung homogener und gasarmer Druckgussteile, die dem geforderten Qualitätsniveau genügten. Beim Vacuralgussverfahren mussten die definierte Qualität der Schmelze, die Gießparameter sowie die Wärmebehandlungsregime genau eingehalten werden, um die geforderte hohe Festigkeit, Maßhaltigkeit und Schweißbarkeit der Druckgussteile sicherzustellen.<sup>34</sup> Durch die Wärmebehandlung entstanden größere thermische Einwirkungen auf das Material, wodurch die Maßtoleranzen beeinträchtigt und der Verarbeitungsprozess insgesamt schwieriger gestaltet wurden.

Die Verwendung von Aluminiumblechen erfolgte in drei verschiedenen Legierungen, die ebenfalls während der Kooperation von Audi und Alcoa speziell für den Einsatz in der Spaceframe-Karosserie entwickelt wurden. Die Bleche wurden nach den jeweils unterschiedlichen Streckgrenzen, Energieaufnahmepotenzialen und Korrosionsverhalten der Legierungen für innenliegende Strukturbleche und Außenhautteile eingesetzt oder für Verstärkungen und Halter verwendet.<sup>35</sup> Die Problematik bei den dünnwandigen Aluminiumblechen, die im Pressverfahren hergestellt wurden, lag in ihren geringen Dehnungs- und Streckgrenzwerten im Vergleich zu Stahlblechen. Dies gestaltete die Umformung von Aluminiumblechen wesentlich schwieriger als bei Stahlblechen und erforderte, dass auch die Presswerkzeuge in werkstoffangepasster Weise konstruiert und hergestellt werden mussten.<sup>36</sup>

Aluminium hat außerdem ein anderes Rückfederungsverhalten als Stahl. Dies war insbesondere bei der Bombierung an den Türen und Klappen des A8 sowie bei den Biegeradien zu berücksichtigen. Bspw. wurde es erforderlich, die Form der üblichen Türgriffmulde durch Fertigungsversuche auf den Werkstoff Aluminium abzustimmen. Auch der Transport von Aluminiumblechen, die für die Außenhaut der A8-Karosserie eingesetzt wurden, musste in speziellen Transportgestellen durchgeführt werden, weil die Oberfläche der Bleche gegen Kratzer besonders empfindlich war.<sup>37</sup>

---

33 Vgl. Leitermann (1995), S. 7-9.

34 Der Gasgehalt des Aluminiumbauteils durfte 5 ml / 100 g nicht überschreiten. Die auf diese Weise hergestellten Druckgussteile ließen sich sehr gut glühen und schweißen.

35 Vgl. Leitermann (1995), S. 7-9.

36 Vgl. Gugisch (1993), S. 919.

37 Vgl. Gugisch (1993), S. 919.

Die Vervollständigung der Spaceframe-Rohkarosserie erfolgte durch die Montage der Anbauteile. Dabei wurden Anbauteile wie Türen, Klappen und Kotflügel durch Schrauben montiert. Um aber die erforderliche Festigkeit der kompletten Karosserie für den Blechbereich zu erreichen, war eine Wärmebehandlung der Spaceframe-Karosserie erforderlich, bei der die Karosserie 30 Minuten lang einer Temperatur von 205 °C ausgesetzt wurde. Das Finish der Außenhaut der Karosserie vor der Lackierung erfolgte analog zum Finishing von Stahlkarosserien durch Schleifen, wobei aber Schleifmittel und Schleifgeräte auf den Werkstoff Aluminium abzustimmen waren.

Die bei der Herstellung eingesetzten werkstoff- und konstruktionsbedingten Verfahrenstechniken ließen die Fertigung der Spaceframe-Karosserie insgesamt aufwendiger erscheinen als die Fertigung von Stahlkarosserien. Nach Meinung eines Interviewpartners konnte dieser Eindruck aber auch von der mangelnden Großserienerfahrung mit der Spaceframe-Technologie herrühren. Die Werkzeugkosten für die Extrusion der Strangpressprofile waren jedenfalls wesentlich geringer als die Werkzeugkosten der sonst üblichen Zieh- und Schieberwerkzeuge für die Blechumformung von selbsttragenden Stahlkarosserien.<sup>38</sup>

Als Verbindungstechniken werden bei modernen Stahlkarosserien das Punktschweißen, Schutzgasschweißen, das Schutzgaslöten und in zunehmender Weise auch das Kleben eingesetzt. Die Übernahme dieser Verbindungstechniken war bei der Spaceframe-Karosserie aus metallurgischen Gründen nur eingeschränkt möglich. Zum einen gab es für die Punktschweißzangen zum Verbinden der geschlossenen Strangpressprofile mit den Druckgussknoten keine Zugänglichkeit, zum anderen stellte das Punktschweißen von Aluminium bislang kein großserienfähiges und zuverlässiges Verfahren dar.<sup>39</sup> Als Verbindungstechniken wurden bei der Spaceframe-Karosserie vorwiegend das MIG-Schutzgasschweißen, das Nieten und Clinchen verwendet.<sup>40</sup> Dabei stellte insbesondere das Nieten ein Substitut für das Punktschweißen dar. Diese Technik wurde erst während der Serienentwicklung von Audi als Verbindungstechnik im Karosseriebau entwickelt, während zuvor Klebetechniken eingesetzt

---

38 Vgl. Schmidt-Offhaus (1993), S. 9.

39 Vgl. Leitermann (1995), S. 11-12.

40 Den ca. 5000 Schweißpunkten eines Stahl-Rohbaus und den wenigen Metern Schutzgasschweißen und Kleben standen bei der Spaceframe-Karosserie des A8 70 Meter MIG-Schweißnaht, 1.360 Nieten und 310 Clinchpunkte mit zum Teil geklebten Flanschen sowie 540 Schweißpunkte gegenüber. Vgl. Paefgen, Leitermann (1995), S. 43-45.

worden waren.<sup>41</sup> Das Nieten ist eine energiesparende, kalte Verbindungstechnik. Die Nietverbindung ist gegenüber dem Punktschweißen prozesssicherer und zeichnet sich gegenüber diesem durch eine 30 % höhere Festigkeit aus.<sup>42</sup>

### **3 Die Kooperation von Audi und Alcoa während des Entwicklungsprozesses des Spaceframe-Projektes**

#### **3.1 Überblick über den Entwicklungsprozess im Spaceframe-Projekt**

Die Vorentwicklung der Aluminiumkarosserie fand in einem Zeitraum von etwa sieben Jahren statt. Zu Beginn des Jahres 1989 wurde das Projektschwergewicht von Ingolstadt nach Neckarsulm verlagert. Nach abgeschlossener Vor- und Konzeptentwicklung in Ingolstadt, begann bereits Anfang 1986 in Neckarsulm die Konzeptabsicherung und die Serienentwicklung.<sup>43</sup> Die Verlagerung beinhaltete einen Wissenstransfer derart, dass ein Realisierungs- und Steuerungsteam aus Mitgliedern des Vorentwicklungsmanagements und der neuen Serien- sowie des Produktionsmanagements installiert wurde. Dieses Team war von der Konzeptübergabe bis zum Produktionsstart tätig. Durch die Übergabe gingen die Verantwortlichkeiten vom Leiter der Abteilung „Konzept Grundlagen“ zum Leiter der Abteilung „Rohbauentwicklung“ über. Abbildung 5 gibt einen Überblick über den gesamten Zeitraum des Entwicklungsprozesses im Spaceframe-Projekt.

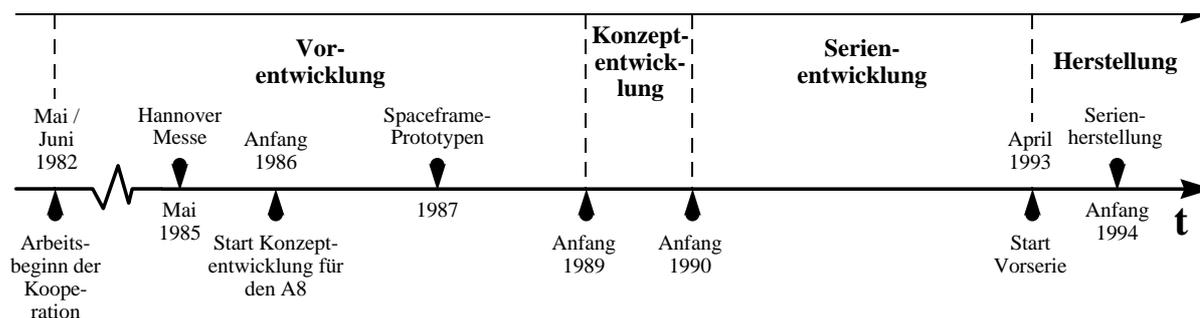
---

41 Beim Nieten wird ein gehärteter und korrosionsgeschützter Stahlniet hydraulisch in die zu verbindenden Teile gegen eine in gleicher Werkzeugachse befindliche Matrize ohne Vorlochung gepresst. Der wachsende Pressdruck von 30-40 kN spreizt den Niet im Schneidebereich plastisch auf und führt zur formschlüssigen Verbindung. Eingebettet in Aluminium ist er gegen Korrosion geschützt. Vgl. Leitemann (1995), S. 11-12.

42 Vgl. Gugisch (1993), S. 919.

43 Aus den Experteninterviews geht nicht eindeutig hervor, ob in Ingolstadt lediglich die Vorentwicklung durchgeführt oder sowohl die Vor- als auch Konzeptentwicklung ausgeführt wurde. Gleichmaßen bleibt unklar, ob in Neckarsulm die vollständige Konzept- und Serienentwicklung oder lediglich die Serienentwicklung implementiert wurde. Auf der Basis der Experteninterviews und von Plausibilitätsüberlegungen wird hier davon ausgegangen, dass in Ingolstadt die Vor- und Konzeptentwicklung und in Neckarsulm die Konzeptabsicherung und Serienentwicklung durchgeführt wurde. Sofern also im folgenden von „Konzeptentwicklung in Neckarsulm“ gesprochen wird, ist lediglich die Konzeptabsicherung gemeint. Dies bezieht sich auch auf die Darstellung der Struktur des Produktentwicklungsprozesses im Spaceframe-Projekt

**Abbildung 5: Struktur des Produktentwicklungsprozesses im Spaceframe-Projekt**



Mit der Projektverlagerung wurde Anfang 1989 eine endgültige Entscheidung für den Einsatz der Spaceframe-Karosserie im A8 durch die Konzernleitung getroffen. In der Konzeptphase des A8, der unter der Audi-internen Baureihenbezeichnung „D2“ firmierte, entstanden bis dahin zwei alternative Konzeptvarianten, bei der die Variante D2A mit einer konventionellen Stahlkarosserie versehen war. Mit der Variante D2B stand bereits im August 1988 ein Fahrzeug mit einem Aluminium-Spaceframe-Konzept zur Verfügung.<sup>44</sup>

Die Intensität, mit der das Projekt in der Vorentwicklung vorangetrieben wurde, war durchaus uneinheitlich und musste vor einer definitiven Entscheidung des Konzeptes auch Antworten für Reparatur-, Produktions- und Umweltfragen erarbeiten. Obwohl bereits 1987 eine funktionstüchtige Spaceframe-Karosserie zur Verfügung stand und damit die Vorentwicklung de facto abgeschlossen war, dauerte es noch bis Anfang 1989 bis klar war, dass die Spaceframe-Technologie in Serie gebracht werden sollte. Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Konzeptentwicklung des A8 bereits in einem fortgeschrittenen Stadium. Während der Jahre der Vorentwicklung war es für alle Projektteilnehmer bei Audi und Alcoa ungewiss, ob das Projekt in eine Fahrzeugserie münden würde oder nicht. Bei der Entscheidung für die Verwendung der Spaceframe-Karosserie spielten nicht nur technologische Gesichtspunkte eine Rolle, sondern auch das Marketing oder die Schulung der Händler und Mitarbeiter der Vertragswerkstätten.

Die Geschwindigkeit im Projekt nahm durch die Entscheidung, die Spaceframe-Karosserie mit dem A8 in Serie zu bringen, deutlich zu. Bereits Anfang 1990 war das Aluminium-Karosseriekonzept des A8 abgesichert und das Projekt ging in die Serienentwicklung der Karosserie über. Die Serienentwicklung selbst nahm einen Zeitraum von drei Jahren in Anspruch und mündete im April 1993 in die Vorserie des A8. Anfang 1994 startete dann für den A8 und damit auch für die Spaceframe-Karosserie die Serienproduktion.

<sup>44</sup> Vgl. Lewandowski (1994), S. 8-10.

### 3.2 Die Phase der Vorentwicklung

Nach der Zustimmung durch Dr. Piëch und der Formulierung grundlegender Anforderungen für eine erfolgversprechende Aluminiumkarosserie, war das erste und ursprüngliche Ziel der Kooperation, Karosserieprototypen in selbsttragender Schalenbauweise aus Aluminium zu entwickeln. Diese Bauweise war weitestgehend eine Substitution moderner Stahlkarosserien durch Aluminium und enthielt Modifikationen beim Karosseriequerschnitt und bei den Wandstärken.<sup>45</sup> Dabei wurde auch geprüft, wie groß eine Gewichtsverminderung bei gleichbleibender bzw. verbesserter Sicherheit ausfallen kann. Ziel bei der Aluminium-Blechkarosserie war es, eine Gewichtsreduktion von 50 % zu erreichen. Realisiert wurde schließlich eine Gewichtsreduktion von 67 % (siehe Abbildung 2). Ein weiteres grundlegendes Ziel zu Beginn des Projektes war, die Machbarkeit des Einsatzes von Aluminium als Werkstoff im Karosseriebau zu beweisen.

Abgesehen von der Omega-Studie lagen am Anfang der Vorentwicklung praktisch keine Erfahrungen in der Anwendung von Aluminium in der Fahrzeugkarosserie vor, auf die die Projektmitarbeiter zurückgreifen konnten. Für die Audi-Projektmitglieder war der Umgang mit dem Werkstoff Aluminium in diesem Bereich völlig neu. Zunächst wurden deshalb von Audi und Alcoa einzelne Werkstoffstudien und Einzelteile für eine Blechkarosserie aus Aluminium angefertigt. Dabei wurden z. B. Erfahrungen über das Verhalten des Werkstoffs beim Pressvorgang gesammelt. Im Zuge dessen konstruierten die Projektpartner mehrere Aluminiumblechkarosserien, bei denen auch alternative Verbindungstechniken eruiert wurden.

Diese Phase in der Vorentwicklung dauerte etwa zwei Jahre und war bis Ende 1984 abgeschlossen. Mit den Blechteilen, die im Laufe der Zeit die Pressen verließen, wurden die ersten Karosserien durch Kleben sowie Voll- und Pop-Nieten zusammengebaut. Zu Studienzwecken wurden zwei Aluminium-Blechkarosserien in einen Audi 80 und einen Audi 100 eingebaut. Mit dem Einsatz der Blechkarosserien in verschiedenen Baureihen konnte auch untersucht werden, in welcher Weise sich die Gewichtsreduktion bei unterschiedlicher Motorisierung und unterschiedlichen Getrieben auf den Energieverbrauch auswirkt. Mit den ersten fahrbereiten Aluminiumautos wurden mehrere hunderttausend Kilometer zurückgelegt und dabei Kenntnisse über Themenbereiche wie Materialermüdung, Langzeit- und Korrosionsverhalten und Akustik gewonnen. Die Akustik war dabei ein besonders wichtiges Themenfeld, das in

---

<sup>45</sup> Vgl. Timm, Reiter (1995), S. 2.

der Vergangenheit jegliche Versuche einer Werkstoffsubstitution im Karosseriebau scheitern ließ. Die Schallübertragung und –durchleitung sind bei Aluminium völlig anders als bei Stahl. Bei einer reinen Substitution von Stahl durch Aluminium entsteht eine Steigerung des Innen-geräuschpegels um 9 db, das einer Verdreifachung der Geräusche im Fahrgastraum entspricht. Das andere Dämpfungsverhalten erforderte von daher bei Verwendung des Werkstoffs Aluminium besondere Maßnahmen zur Reduzierung der Innenraumgeräusche und konnte durch eine solide geometrische Karosseriegestaltung eliminiert werden. Außerdem wurden Crashversuche durchgeführt und dabei die Energieabsorption und das Deformationsverhalten analysiert.

Im Mai 1985 wurde eine Aluminium-Blechkarosserie erstmals auf der Hannover Messe ausgestellt, die nur etwa 120 kg wog. Die Aluminium-Blechkarosserie stellte nach Meinung von Heinrich Timm einen ersten Versuch und wichtigen Schritt in Richtung der Aluminiumkarosserie dar: Ein Schritt zur Absicherung der fahrzeugspezifischen Anforderungen durch direkten Vergleich zu einem identischen Serienfahrzeug, der den Beteiligten viele metallurgische Erkenntnisse einbrachte. Jedoch wird mit der Blechbauweise der Werkstoff Aluminium nicht optimal genutzt. Bei der selbsttragenden Aluminium-Blechkarosserie waren zur weiteren Verbesserung von Leichtbau und Sicherheit bei der Konstruktion und Montage Doppler und Versteifungen erforderlich, welche die Herstellkosten zusätzlich zum höheren Materialpreis noch anhoben. Heinrich Timm erklärte deshalb:

„Eigentlich war uns die Erkenntnis, dass die Verwendung des neuen Werkstoffs Aluminium auch zu einer neuen, werkstoffgerechten Konstruktion führen müßte, von Anfang an klar, aber es war gut, über diese ersten Fahrzeuge in der ‘falschen’ Bauweise zu verfügen, denn sie erbrachten die notwendigen Erkenntnisse über die Brauchbarkeit des Werkstoffs Aluminium in der Karosserie. Sie bestätigten uns aber auch darin, unseren eigenen Weg zu gehen.“<sup>46</sup>

Eine Aluminium-Blechkarosserie sollte nicht in Serie entwickelt werden, da sie im Vergleich zur strukturgleichen Stahlkarosserie nicht hinreichend innovativ und außer einer Gewichtsreduzierung keine Vorteile brachte. Bezüglich der technologischen Seite hatte Dr. Piëch die deutliche Abhebung von der konventionellen Stahlkarosserie gefehlt. Ein Interviewpartner von Alcoa berichtete, dass Audi damals auf seine Fahnen am Eingang des Werksgelände hingewiesen hatte, worauf Audis Anspruch „Vorsprung durch Technik“ formuliert war. Der geforderte Weg im weiteren Verlauf des Projektes war der einer werkstoffgerechten Kon-

---

46 Lewandowski (1994), S. 25.

struktionsweise, bei der die Blechschalenbauweise sukzessive durch eine Rahmenstrukturbauweise ersetzt wurde. Bereits zur Zeit der Hannover Messe entstanden weitere Prototypen der Aluminiumkarosserie, die zum Teil das Prinzip des Spaceframe darstellten.

Dabei wurde auch damit begonnen, die Komponenten der Karosserie hinsichtlich möglicher Gewichtseinsparungen und Preisminderungen zu untersuchen. Auch die Aluminium-Guss-Technologie wurde verstärkt bearbeitet. Die zentrale Frage des Projektteams war nun aber, wie man eine Karosserie anders konstruieren konnte, als aus einzelnen, miteinander verschweißten Blechen. Das Ergebnis dieser Überlegungen war zunächst eine Mischbauweise, die im Prinzip die Konstruktion der Spaceframe-Karosserie antizipierte und teilweise aus ersten Strangpressprofilen und Gussknoten bestand.

Es war unmöglich, auf Anhieb einen ersten Prototypen zu bauen, der mit dem heute verwendeten Spaceframe des A8 vergleichbar war. Dies war vielmehr ein Prozess, der sich über einen Zeitraum von über zwei Jahren erstreckte und mehrere Prototypengenerationen sowie Entwicklungen in den Bereichen Karosseriekomponenten, Gusstechnik, Verfahrenstechnik und Legierungen erforderte. Während die erste Versuchsgeneration der Spaceframe-Karosserie noch über eine konventionelle Konstruktionstechnik verfügte, bei der lediglich der vordere linke Teil der Karosserie als Spaceframe ausgebildet war, wurden über drei Stufen hinweg alle Teile der Karosserie durch Spaceframe-Komponenten ersetzt, bis letztlich die Konfiguration der Karosserie derjenigen der A8-Karosserie entsprach. Mit diesen aufeinanderfolgenden Prototypengenerationen konnten die Projektmitarbeiter Erfahrungen sammeln, anhand von Crashversuchen feststellen, ob berechnete Werte und Simulationen auch der Realität standhielten, und Testfahrten unter allen klimatischen Bedingungen durchführen.<sup>47</sup>

Die bislang unbekannte Mischung aus niedrigem Gewicht und hoher Steifigkeit der Spaceframe-Karosserie wurde durch Strukturanalysen für die in Geometrie und Werkstoff neuartige Karosseriebauweise erzeugt. Erste Konzeptanalysen befassten sich dabei mit der statischen und dynamischen Karosseriesteifigkeit, der mathematischen Gewichtsoptimierung der Karosserie, mit Untersuchungen der Gesamtfahrzeugdynamik und des Komforts sowie mit Simulationen zur Analyse des Crashverhaltens. Mit Hilfe eines Hochleistungs-Computers von Audi wurden sog. Finite Elemente-Analysen (FEM) über das strukturmechanische Ver-

---

<sup>47</sup> Vgl. Lewandowski (1994), S. 27.

halten von Fahrzeugkomponenten sowie über das Schwingungsverhalten durchgeführt.<sup>48</sup> Die FEM-Analyse ist ein zentrales mathematisches Verfahren im Karosseriebau, das für die Analyse struktureller Komponenten und der anspruchsgerechten Gestaltoptimierung eingesetzt wird.<sup>49</sup> Dieses Verfahren lieferte umfangreiche Datensätze über die Beschaffenheit und statischen Karosserieeigenschaften, bevor physische Prototypen hergestellt wurden.

Studien wurden auch über das formgerechte Biegen von Strangpressprofilen, die Dünnwandigkeit von Strangpressprofilen und Druckgussknoten durchgeführt. Mit der Guss-Technologie wurde experimentiert, um verschiedene Druckgussverfahren zu analysieren. Auch verschiedene Aluminiumlegierungen wurden entwickelt, die unterschiedliche bedarfsgerechte Eigenschaften aufweisen mussten. Schließlich wurde bis Ende 1988 auch an der Weiterentwicklung dünnwandiger Aluminiumblechteile und an verschiedenen Verbindungsverfahren gearbeitet.

Die einzelnen Arbeitspakete, die während dieser Zeit bearbeitet wurden, wurden ex ante lediglich in grundsätzlicher Weise identifiziert und verteilt. Für die einzelnen Arbeiten bildete man spezielle Arbeitsgruppen im Projekt, die sowohl aus Mitarbeitern jeweils eines Unternehmens als auch aus Mitarbeitern beider Unternehmen zusammengesetzt waren. Nicht die Unternehmenszugehörigkeit war für den Einsatz in einer Arbeitsgruppe maßgeblich, sondern die erforderliche Spezialisierung der Ingenieure und Techniker. Die Arbeitsgruppen formierten sich auch ad hoc je nach Problemstellung und veränderten sich wieder, ohne dass es hierzu eines formellen Beschlusses bedurfte. Im Ergebnis arbeitete jeder Mitarbeiter eng mit seinen Kollegen im Projekt zusammen. Ein Interviewpartner erklärte, dass die Untersuchung eines technischen Problems einfach durchgeführt wurde, und jeder mitwirkte, der einen Beitrag zur Problemlösung leisten konnte, unabhängig davon, ob er ein Audi- oder Alcoa-Mitarbeiter war. Die enge Interaktion war auch deshalb gefordert, weil weder Audi noch Alcoa ex ante determinieren konnte, wie hoch die Herstellungskosten und wie investitionsintensiv das Projekt sein würde und wie die identifizierten Anforderungen umzusetzen waren.

Der geographische Projektschwerpunkt lag tendenziell bei Audi in Ingolstadt. Alcoa-Mitarbeiter waren nahezu ununterbrochen im Ingolstädter Werk und flogen alle drei bis vier Wochen in die USA zurück. In Ingolstadt wurden die Karosseriekomponenten hergestellt und

---

48 Vgl. Lewandowski (1994), S. 34.

49 Vgl. Kretschmer, Kohlhoff (1995), S. 20.

Simulationen und Tests mit den Komponenten durchgeführt. Dafür bedurfte es eines existierenden Produktionswerks, das in Ingolstadt vorhanden war. Natürlich waren die Anlagen mit der Produktion von (Stahl-) Karosserien der damaligen Fahrzeugserien ausgelastet, weshalb die Anlagen von den Projektmitarbeitern auch nur nachts oder am Wochenende benutzt werden konnten, wenn die Produktion ruhte. Für die Erstellung und das Testen von Druckgussteilen benötigte man zudem eine Gießerei. Als die Analysen mit den Druckgussteilen intensiviert wurden, hatte Audi für Ingolstadt zwei Druckgussmaschinen beschafft. Auch Alcoa stand in seinem Technischem Zentrum eine Gießerei zur Verfügung.

Bei den regelmäßigen Aufenthalten von Alcoa-Projektmitarbeitern in den USA wurden die Ergebnisse aufgearbeitet und ebenfalls einzelne Untersuchungen durchgeführt und die Resultate mit den jeweiligen Teams zusammengeführt. Aber auch Audi-Mitarbeiter waren in Pittsburgh tätig, insbesondere, wenn werkstoff- und verfahrensspezifische Fragen nicht ohne konstruktives Know how zu bearbeiten waren. Alcoa hat in monatlichen Abständen, Berichte über den Projektfortschritt nach Pittsburgh in sein Technisches Zentrum weitergeleitet. Auch die Zentrale von Alcoa wurde mindestens quartalsweise über den Stand der Dinge informiert.

Bereits 1987 war die Spaceframe-Karosserie soweit fertig entwickelt und in Testfahrzeugen im Einsatz. Danach nahm die Intensität der Kooperation bis zur definitiven Entscheidung für den Einsatz der Aluminiumkarosserie im A8 Anfang 1989 ab. Bis zum offiziellen Ende der Vorentwicklung im Spätjahr 1988 hatte das Projekt bereits eine außergewöhnlich lange Laufzeit akkumuliert. Noch bis zu diesem Zeitpunkt war es ungewiss – sieben Jahre nach Projektbeginn –, ob die Spaceframe-Karosserie jemals in Serie gehen würde.

### **3.3 Die Konzeptentwicklung und Serienentwicklung der Spaceframe-Karosserie**

*Konzeptentwicklung.* Der Übergang zwischen der Vor- und Konzeptentwicklung in die Konzeptabsicherung und Serienentwicklung war durch mehrere Veränderungen im Projekt gekennzeichnet. Das Projekt wurde von Ingolstadt nach Neckarsulm verlagert und die Leitung durch Wulf Leitermann, damals Leiter „Karosserieentwicklung“ bei Audi in Neckarsulm, übernommen. Für Alcoa bedeutete dieser Wechsel eine erhebliche Zäsur, die den Charakter des Projektes für das Unternehmen nachhaltig veränderte: Nicht nur der Projektstandort wurde gewechselt, sondern auch die Projektmannschaft auf seiten von Audi nahezu vollstän-

dig verändert.<sup>50</sup> Nach Auffassung eines Alcoa-Mitarbeiters hatte dies die engen Verbindungen zerstört, die über die lange Zeit zu Audi in Ingolstadt aufgebaut worden waren. Alcoa gelang es demnach nicht mehr, so gute und enge Verbindungen zu den Projektpartnern zu entfalten, wie das während der gemeinsamen Vorentwicklung der Fall gewesen war. Ein Grund hierfür war aber auch das veränderte Anforderungsprofil, das mit der beginnenden Serienentwicklung verbunden war.

Personelle Veränderungen im Projekt waren nunmehr auch deshalb möglich geworden, weil die Entwicklung der Spaceframe-Technologie und ihre weitere Verwendung soweit vorangeschritten war, dass sie nicht mehr an einige zentrale Wissensträger gebunden war und auch auf eine breitere Basis gestellt werden musste. Aus der Perspektive von Audi gestaltete sich der Wechsel von der Vor- und Konzeptentwicklung zur Konzeptabsicherung und Serienentwicklung aus mehreren Gründen eher fließend. Erstens wurden ab 1988 vor Beginn der offiziellen Konzeptentwicklung Mitarbeiter der Audi-Produktion aus Neckarsulm zeitweise nach Ingolstadt geschickt, um sich dort mit der Spaceframe-Karosserie und dem Werkstoff Aluminium vertraut zu machen. In Neckarsulm hatte man zu diesem Zeitpunkt noch keinerlei Erfahrung mit Aluminium im Karosseriebau. Auch Wulf Leitermann war bereits in das Projekt einbezogen. Zweitens waren die FEM-Analysen, die zu Optimierungszwecken praktisch bis zum Produktionsstart durchgeführt wurden, weiterhin unter der Federführung von Heinrich Timm verblieben. Diese Teilverantwortung im Projekt hat Timm bis zum Ende der Serienentwicklung beibehalten.

In Neckarsulm wurde das Projekt mit dem Ziel fortgesetzt, bis Frühjahr 1993 eine serienreife Spaceframe-Karosserie zu entwickeln sowie die hierfür notwendigen prozessualen und personellen Voraussetzungen zu schaffen. Die Konzeptfindung und -absicherung der Spaceframe-Karosserie schritt zügig voran. Es waren bereits mehrere Spaceframe-Prototypgenerationen vorhanden, und mit dem Konzeptfahrzeug D2B stand im August 1988 ein Fahrzeug mit Aluminium-Spaceframe bereit. Neben weiteren Analysen z. B. zum Crashverhalten oder zur Dauerschwingfestigkeit standen vorwiegend Optimierungen des Packaging im Bereich der Radaufhängung an.

---

<sup>50</sup> Die Projektverlagerung nach Neckarsulm und die Errichtung des Aluminium-Zentrum von Audi in Neckarsulm anstelle von Ingolstadt erfolgte nach Angaben des Unternehmens aufgrund von unternehmenspolitischen Zielsetzungen.

*Serienentwicklung.* Bereits Anfang 1990 konnte zur Serienentwicklung der Spaceframe-Karosserie übergegangen werden. In der Serienentwicklung wurden von Audi und Alcoa drei Prototypbaureihen der A8-Karosserie erstellt. Der Karosserie-Rohbau ist das verbindende Glied für alle anderen Fahrzeugbestandteile, wie z. B. dem Motor oder Fahrwerk. Die Prototypbaureihen wurden deshalb jeweils auch mit weiterentwickelten Fahrzeugkomponenten ausgestattet und getestet, weil diese auch auf die Funktionalität der Karosserie Einfluss nahmen.

In der Serienentwicklung waren prinzipiell alle verfahrens- und werkstofftechnischen Fragen und Prozesse für die Serienherstellung abzusichern. Dies erstreckte sich auf die Vacuralgusstechnik, die Druckgusswerkstoffauswahl, die Oberflächenbehandlung und chemische Reinigung der Spaceframe-Komponenten, die Werkzeugformen, die Abdichtung der Werkzeugformen oder die Analyse und Stabilität von Prozessparametern. Besondere Schwierigkeiten bereiteten bspw. die Definition sowie die großserientechnische Wiederholbarkeit der Vacuralguss-Prozessparameter und die Auswahl der Aluminiumlegierungen für das Vacuralgussverfahren. Die Verträglichkeit der Aluminiumlegierungen mit dem Werkstoff Stahl, der für die Druckgusswerkzeuge verwendet wurde, war nicht ohne weiteres gewährleistet. Wulf Leitemann führte hierzu aus:

„Bestimmte Aluminium-Legierungen mit sehr niedrigem Eisengehalt haben eine sehr hohe Affinität zu Stahl. Sie können Stahl förmlich ‚fressen‘. Dieses Phänomen führte bei Serienanlauf zur extrem schnellen Zerstörung der Druckgussformen. Nur ein schneller Legierungswechsel bewahrte uns vor einer Katastrophe. Auch bestand die Aufgabe, die Prozessparameter des Vakuraldruckgussverfahrens und hier insbesondere das stabile Vakuum selbst, produktions sicher zu fahren. Für dieses Gießverfahren mit derartig anspruchsvollem Teil gab es zuvor keine vergleichbare Serienanwendung, wie es bei Stahl als Karosserie-Werkstoff schon seit Jahrzehnten der Fall ist.“

Nicht nur bei Audi sondern auch bei Alcoa mussten Fertigungsprozesse definiert sowie ein Produktionswerk gebaut und bestückt werden. Alcoa hatte zunächst einzelne Produktionszellen in der Nachbarschaft des westfälischen Soest bei der Firma Honsel aufgebaut. Die Firma Honsel war ein Spezialist für Aluminiumlegierungen, der als Zulieferer von Extrusionsprofilen für die Spaceframe-Komponenten von Alcoa ausgesucht worden war. Bei Alcoa wurden Werkzeugmaschinen für den Vacuraldruckguss beschafft und Herstellungsverfahren für die Serienproduktion definiert und getestet. Mit dem Abschluss eines Zuliefervertrages wurde das Fabrikgelände in Soest gekauft und das Werk mit Investitionen in Höhe von 150 Millionen DM aufgebaut.

Während der Konzeptabsicherung und Serienentwicklung arbeitete Audi in der Rohbauentwicklung mit ca. 20 Mitarbeitern, die sich als Spezialisten für den Stahlkarosseriebau zunächst einmal in das Thema Aluminium einarbeiten mussten. Mit der Serienentwicklung der Spaceframe-Karosserie wurde wiederum völliges Neuland betreten, da niemals zuvor eine Vollaluminium-Karosserie in dieser Bauweise in Serie gegangen war. Damit hatten Audi die Vorbilder nicht nur in der Vorentwicklung, sondern auch in allen nachfolgenden Phasen des Entwicklungsprozesses gefehlt. Wulf Leitermann verdeutlichte:

„In der Serienentwicklung wussten wir, welche Bauteile wir für die Karosserie benötigen, welchen Anforderungen die Bauteile und Karosserie zu genügen hatten und welche Verbindungstechniken wir einsetzen. Mehr aber auch nicht. So kam es, dass die auszuführenden Arbeitsschritte nicht klar waren und sowohl bei uns als auch bei Alcoa das Know how fehlte.“

Auch für Alcoa als Zulieferer war es das erste Mal, dass das Unternehmen in diesem Umfang als Komponentenlieferant für einen Automobilhersteller tätig wurde. Entsprechend gering war die Erfahrung, die dem Unternehmen bei der Definition und Einhaltung von Prozessparametern sowie zur Stabilität der Prozesse zur Verfügung stand. Ein Interviewpartner von Audi erklärte, dass dies einen sehr großen Betreuungsaufwand erforderte, bei dem in vielerlei Hinsicht Hilfestellung und Wissenstransfer von Audi zu Alcoa geleistet wurde. Audi-Mitarbeiter waren z. B. zu Beginn sehr häufig in Soest, um Prozessparameter abzustimmen und Anlaufschwierigkeiten zu überwinden.

Aus diesen Gründen war auch in der Serienentwicklung keine klare Aufgabenverteilung zwischen Audi und Alcoa möglich. Zwar verfolgte Alcoa auch hier grundsätzlich die Entwicklung der Werkstoff- und Verfahrenstechnik, jedoch begleitete Audi das Unternehmen dabei, da jeder Schritt der erste Schritt war. Dieser Weg gestaltete sich als ein aufwendiger und mühsamer Lernprozess über den Werkstoff, die Verfahren und die bei beiden Unternehmen zu erfüllenden Anforderungen. Wulf Leitermann verglich diese Situation mit der Serienentwicklung von Stahlkarosserien:

„Sie müssen diese Situation mit der Zulieferung von Materialien und Bauteilen für Stahlkarosserien vergleichen. Die Belieferung und die Weiterentwicklung von Materialspezifikationen und von Herstellverfahren für Stahlkarosserien erfolgt durch Firmen, die sich in einem Jahrzehnte dauernden Dialog mit der Automobilindustrie einen hochqualifizierten Mitarbeiterstamm und perfekte Fertigungstechniken aufgebaut haben. Mit diesen Voraussetzungen und Kenntnissen sind sie auch in der Lage, für die Automobilindustrie federführend und verantwortlich maßgebliche Weiterentwicklungen im Bereich der Stahlkarosserie zu betreiben. Mit dem Wechsel des Karosserie-Werkstoffs von Stahl zu Aluminium wird hier ‚Neuland‘ beschritten.“

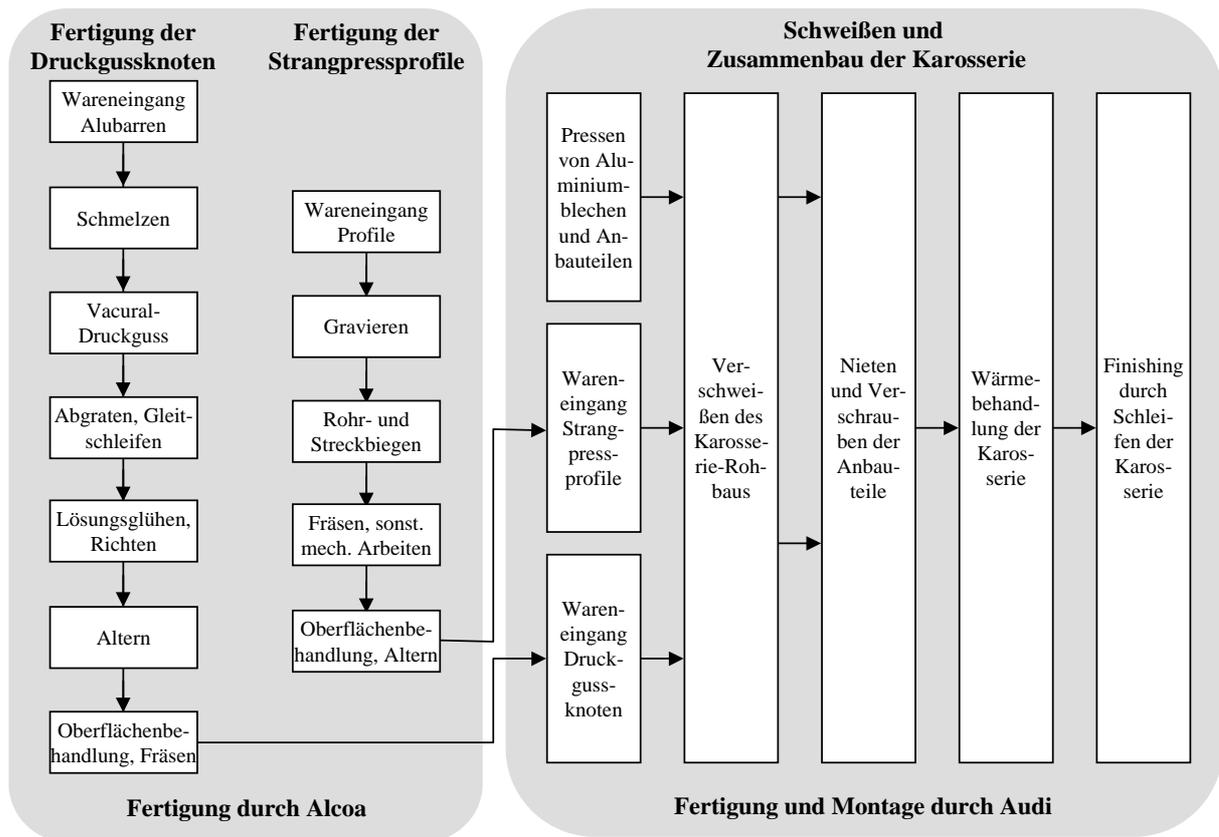
Von Alcoa waren in dieser Phase etwa 15 Mitarbeiter im Kernteam in Neckarsulm und Pittsburgh involviert. Nach wie vor gab es einen Austausch zwischen Pittsburgh und Neckarsulm, auch wenn der Schwerpunkt der Interaktion jetzt mehr auf den Standorten Neckarsulm und Soest lag. Für die Serienherstellung der Strangpressprofile und Druckgussknoten des A8 beschäftigte Alcoa im Werk Soest ca. 140 Produktionsmitarbeiter.

### **3.4 Die Herstellung der Spaceframe-Karosserie**

Oben wurde bereits dargelegt, dass sich auch der Fertigungsprozess der Spaceframe-Karosserie von dem Fertigungsprozess bei modernen Stahlkarosserien unterschied. Das Rohaluminium für den A8 produzierte Alcoa in einem norwegischen Werk. Anschließend wurde es an Honsel zur Verarbeitung in Strangpressprofile geschickt. Honsel lieferte die fertigen Teile an Alcoa. Abbildung 6 verdeutlicht in vereinfachter Darstellung die Fertigung der Druckgussknoten und Strangpressprofile bei Alcoa in Soest sowie den Zusammenbau der kompletten Spaceframe-Karosserie bei Audi in Neckarsulm. Die Schnittstelle zwischen Audi und Alcoa in der Fertigung der Karosserie wurde bei dem Verschweißvorgang der Druckgussknoten und Strangpressprofile zum Karosserie-Rohbau gezogen.

Bei den Strangpressprofilen wurde zunächst die Aluminiumlegierung in Form von Rundbarren auf 550 °C erhitzt, durch eine Matrize gedrückt und dadurch in ihre spezielle Form gebracht. Dort kühlten die Strangpressprofile ab und wurden anschließend gesägt. Für das Biegen wurde je ein Rohrbiege- oder ein Streckbiegeverfahren angewendet. Danach erfolgte die sog. Alterung bzw. Warmlagerung der Strangpressprofile. Durch die Auslagerung wurde die Verformbarkeit der Strangpressprofile reduziert und die Streckgrenze erhöht. Hierfür wurde das Material auf 205 °C erhitzt. Da Aluminium recht schnell oxidiert, musste anschließend eine Oberflächenbehandlung an den Profilen vorgenommen werden. Dies wurde zum einen durch die sog. Ätzung erreicht, mit der eine metallische Reinheit hergestellt wurde und zum anderen durch die anschließende Passivierung, mit der eine dünne Oxidschicht gewonnen wurde. Dies garantierte über mehrere Wochen hinweg einen Schutz vor weiterer Oxidation und somit sichere Schweißparameter. Schließlich wurden die fertigen Strangpressprofile verpackt und zu Audi nach Neckarsulm verschickt.

**Abbildung 6: Fertigung und Montage der Spaceframe-Karosserie**



Das Vacural-Druckgussverfahren für die Gussknoten stellte sich folgendermaßen dar: Zunächst wurden die Aluminiumbarren im Ofensystem eingeschmolzen. Dann wurde die flüssige Legierung per Vakuum in die Form gesogen und mit Schließkräften zwischen 750 t und 1600 t verdichtet. Anschließend erfolgte das Abgraten und Gleitschleifen der Druckgussteile. Hier schloss sich das Lösungsglühen und die Alterung an. Schließlich wurden die Druckgussteile noch gefräßt, oberflächenbehandelt, verpackt und verschickt. Zur Montage des Karosserie-Rohbaus bei Audi wurden die Guss- und Strangteile bei den Richt-, Biege- und Beschnittwerkstätten mit Referenzbohrungen versehen. In diesen Fixierbohrungen wurden die Einzelteile in den Spann- und Schweißvorrichtungen zum MIG-Schweißen lagegerecht aufgenommen. In die steife Struktur des Karosserieunterbaus wurden durch Nieten, Clinchen, Punktschweißen und MIG-Schweißen die flächenschließenden Aluminiumbleche eingebracht. Dadurch entstanden über Längsträger- und Radhausuntergruppen der Vorder- und der Hinterwagen. Beide wurden auf einem Aufbaubock positioniert und mit Schweller, Boden, Dachrahmen, Dach und Pfosten B zum Gesamtrohbau zusammengefügt.<sup>51</sup>

<sup>51</sup> Vgl. Paefgen, Leitermann (1995), S. 49-50.

## 4 Fazit: Bedeutung und Problemfelder des Spaceframe-Projektes

Die Spaceframe-Karosserie stellt sich als außerordentlich innovatives Projekt in der Entwicklung einer neuartigen Vollaluminiumkarosserie dar. Das Projekt hatte eine Vorreiterfunktion beim Einsatz von Aluminium im Karosseriebau sowie in metallurgischer und verfahrenstechnischer Hinsicht. Hier wurde von Audi und Alcoa Neuland beschritten, indem die Unternehmen Werkstoffgrenzen ausloteten, neue Legierungen und Verbindungstechniken entwickelten sowie Fertigungsverfahren und Karosseriestrukturen definierten. Die Spaceframe-Karosserie des A8 stand nun als Pilotprojekt für einen weitergehenden Einsatz in anderen Fahrzeugmodellen zur Verfügung.

Audi und Alcoa arbeiteten gemeinsam über einen Zeitraum von sieben Jahren an der Vorentwicklung der neuen Spaceframe-Technologie. Das Projekt wurde dabei in überschaubaren Grenzen gehalten, bei dem Audi als Automobilhersteller zwar die Federführung oblag, aber dennoch in einer partnerschaftlichen und ergebnisorientierten Weise mit Alcoa als späterem Zulieferer der Spaceframe-Komponenten kooperierte. Für die erfolgreiche Umsetzung des Projektes war es erforderlich, dass beide Unternehmen ihre komplementären metallurgischen und konstruktiven Vorkenntnisse und Erfahrungen einbrachten, um dabei ein Produkt hervorzubringen, das die beiden Wissensgebiete in einer neuartigen Weise miteinander verband. Das Grundprinzip der Spaceframe-Karosserie war es denn auch, einen werkstoffgerechten Einsatz von Aluminium beim Einsatz in einer Fahrzeugkarosserie zu ermöglichen. Eine Arbeitsteilung zwischen den beiden Unternehmen fand dabei auf einer grundsätzlichen Ebene im Sinne einer strategischen Grundtrennung der Arbeitsgebiete statt. Dabei waren fahrzeugspezifische Verantwortlichkeiten bei Audi und werkstoffspezifische Verantwortlichkeiten bei Alcoa verankert. Innerhalb der Arbeitsgruppen, die sich problemorientiert formierten und veränderten, wurde gemeinsam an Problemlösungen gearbeitet. Für den Einsatz in einer Arbeitsgruppe war nicht die Unternehmenszugehörigkeit ausschlaggebend, sondern das jeweilige Know how der Mitarbeiter.

In der Gestaltung der Kooperation zwischen Audi und Alcoa wurde insbesondere in der Vorentwicklung darauf geachtet, mögliche administrative Hindernisse auszuschalten, die eine reibungslose Zusammenarbeit der Projektmitglieder hätten behindern können. Aufgrund der unklaren Aufgaben und der detaillierten zwischenbetrieblichen Arbeitsteilung wurde zur Sicherstellung der Koordination und Kooperationsbereitschaft vorwiegend auf funktionierende persönliche Beziehungen der Projektteilnehmer gebaut. Dies wurde durch die überschau-

bare Größe des Projektes gefördert. Andere Faktoren, wie z. B. die Vertragsgestaltung und formelle Richtlinien traten dabei in den Hintergrund. Auch mögliche Konflikte, die durch die Verwertung der Erkenntnisse aus dem Projekt hätten entstehen können, wurden durch die grundlegende Verteilung der Patentrechte geregelt und so die Arbeitsebene davon unberührt gelassen.

Das noch nicht vorhandene Wissen über die zu entwickelnden Spezifikationen der Spaceframe-Karosserie machte eine sonst übliche zwischenbetriebliche Arbeitsteilung mit klar definierten Kostenzielen und organisatorischen Schnittstellen unmöglich. Noch während der Serienentwicklung konnten die Partner auf Basis von definierten Spezifikationen und Zielkostenvereinbarungen den Entwicklungsprozess nicht gestalten. Zwar wurden auch von seiten Audis Evaluierungsverfahren zur Bewertung der Serienreife der Spaceframe-Komponenten eingesetzt. Diese dienten aber weniger der Strukturierung der Interaktion und der Kontrolle des Zulieferers, sondern vielmehr der Definition von Prozessen und dem Transfer des erforderlichen Wissens zwischen Automobilhersteller und Zulieferer.

Bei der Durchführung des Spaceframe-Projektes war auch eine Reihe von Problemfeldern zu meistern. Das Spaceframe-Projekt war ein transnationales Projekt, bei dem die deutschen und amerikanischen Projektmitarbeiter Sprachschwierigkeiten und Unterschiede in der Denk- und Arbeitsweise handhaben mussten. Ein Interviewpartner von Alcoa erläuterte hierzu:

„Die Sprache, vor allem die technische Fachsprache, stellte ein Hindernis in unserer Kommunikation dar. Es gab häufiger Missverständnisse, weil bestimmte technische Begriffe in der einen Sprache keine Entsprechung in der anderen hatten oder aber etwas anderes bedeuteten. Die unterschiedliche Mentalität ging eben auch mit sehr unterschiedlichen Management-Inhalten oder unterschiedlichen Auffassungen über Dringlichkeiten einher. Es kam schon einmal vor, dass Alcoa der Meinung war, ein Problem müsste sehr schnell gelöst werden und Audi der Meinung war, dass man die Sache gründlich und zeitaufwendig durchdenken sollte.“

Während der Konzeptabsicherung und Serienentwicklung fehlten Alcoa die erforderlichen Fähigkeiten und Erfahrungen als Automobilzulieferer im Bereich struktureller Aluminiumkomponenten. Dies führte zu einem erhöhten Aufwand bei der Gewährleistung der Prozesssicherheit und -stabilität. Ein grundsätzliches Problem war z. B. die geringe Erfahrung im Bereich der Umsetzung eines Konzeptentwurfs, bspw. in Form einer Zeichnung, in eine physische Komponente. Die erforderlichen Kenntnisse und Erfahrungen, die Gründlichkeit und Gewissenhaftigkeit des Entwicklungs- und Absicherungsprozesses konnte Alcoa im Verlauf

der Konzept- und Serienentwicklung aufbauen und nunmehr auch für andere Automobilhersteller verwenden.

Ein schwerwiegendes Problem in der Vorentwicklung war die lange Zeit der Unsicherheit, ob überhaupt, zu welchem Zeitpunkt und in welches Audi-Modell die Spaceframe-Technologie eingesetzt würde. Audi musste entscheiden, was es mit der fertigen Technologie anfangen wollte. Es bestand immer noch die Möglichkeit, die Spaceframe-Technologie in der Schublade verschwinden zu lassen, zumal das Projekt nach wie vor geheim gehalten wurde. Ein erstes Exemplar der Spaceframe-Karosserie wurde erst 1993 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Die Vorentwicklung des Projektes war 1987 de facto beendet. Die Entscheidung für die Konzeptentwicklung erfolgte erst zu Beginn des Jahres 1989. In diesem Zeitraum kamen der Entwicklungsprozess zeitweise zum Erliegen. Aber auch Investitionsentscheidungen von Alcoa über die Ansiedlung und den Aufbau eines neuen Werks, die für die Herstellung der Spaceframe-Komponenten erforderlich waren, gingen nicht vorwärts, weil Audi in dieser Phase noch keinen Zuliefervertrag mit Alcoa abgeschlossen hatte.

Schließlich fiel 1989 die Entscheidung für den Einsatz des Spaceframe im Audi A8, und das Projekt wurde mit der beginnenden Konzeptabsicherung in geordnete Produktentwicklungsbahnen gelenkt. Seither wurden die Fertigungsprozesse der Spaceframe-Technologie weiter verbessert und an einer stärkeren Automatisierung, die für eine größere Serie erforderlich war, gearbeitet. Auch das Kostenverhalten des Werkstoffeinsatzes sowie der Fertigungsverfahren wurde analysiert und verbessert. Weitere Einsparungspotenziale von bis zu 20 % waren im Bereich der Umformung von Halbzeugen zu fertigen Komponenten, einem weiterentwickelten Karosserie-Rohbau mit moderner Verbindungstechnik und dem verstärkten Einsatz von recyceltem (Sekundär-) Aluminium realisierbar. Damit standen nunmehr die Aluminiumkarosserie und die zugrunde liegende Prozesstechnologie für einen weitergehenden Einsatz im VW-Konzern und anderswo bereit.

## Literaturverzeichnis

- Aluminium-Zentrale* (1998), Aluminium im Verkehr, Düsseldorf.
- Bartholomew, Doug* (1997), Audi AG Ingolstadt, Germany: Audi A8 Aluminium Luxury Sedan, in: Industry Week, December, S. 13-15.
- Gugisch, Klaus* (1993), Die Fertigungstechnologie der Aluminium-Space-Frame-Karosserie, in: Blech Rohre Profile, 40. Jg., H. 12, S. 918-919.
- Koewius, A.* (1994), Aluminium-Spaceframe-Technologie: Der Leichtbau des Serienautomobils erreicht eine neue Dimension, in: Aluminium, 70. Jg., H. 1/2 und 3/4, S. 38-48 und S. 144-156.
- Kretschmer, Thomas, Kohlhoff, Jürgen* (1995), Neue Werkstoffe: Überblick und Trends, Berlin u. a.
- Leitermann, Wulf* (1995), Aluminium als Karosserie-Leichtbauwerkstoff für Personenkraftwagen, in: Stuttgarter Symposium, Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart.
- Lewandowski, Jürgen* (1994), Audi A8, Bielefeld.
- Paefgen, Franz-Josef, Leitermann, Wulf* (1994), Audi Space Frame - ASF: Ein neues PKW-Rohbaukonzept in Aluminium, in: VDI Berichte Nr. 1134, S. 23-70.
- Paefgen, Franz-Josef, Timm, Heinrich* (1993), Aluminium SpaceFrame - Ein neuer Weg im PKW-Bau, in: VDI Berichte Nr. 1099 [Hrsg.], Beiträge der Fahrzeugtechnik zur Verbrauchssenkung, Düsseldorf, S. 359-373.
- Schmidt-Offhaus, Eberhard* (1993), Neue Space-Frame-Technik für Karosserien aus Aluminium, in: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ / MTZ, 95. Jg, Sonderausgabe Fertigungstechnik, S. 7-9.
- Timm, Heinrich, Reiter, H.* (1995), Karosseriekonzepte in Aluminium und deren Auswirkungen, Arbeitspapier, Audi AG, Ingolstadt.