



## Gesenkschmiedete Aluminium-Bauteile für Schienenfahrzeug-Strukturen

### Forged Aluminium Parts for Rolling Stock Structures

#### Zusammenfassung

Der Einsatz von gesenkschmiedeten Aluminium-Bauteilen und –Komponenten in Schienenfahrzeug-Strukturen trägt bei tiefen Gesamtkosten zur Gewichtsreduktion bei. Dies ist bei den heute üblicherweise angestrebten und pönalisierten Gewichtslimiten ein Gebot der Stunde. In den letzten Jahren wurden die Möglichkeiten im Bereich der Formgebung von gesenkschmiedeten Aluminium-Teilen stark verbessert. Zudem wurden – in erster Linie für Anwendungen im Automotive- sowie im Luftfahrt-Bereich – neue hochfest aushärtbare Legierungen entwickelt.

Es werden die heute erreichbaren Eigenschaften von gesenkschmiedeten Aluminium-Bauteilen beschrieben sowie die wichtigsten Formgebungs-Parameter, welche bei deren Konstruktion zu beachten sind. Daraus ergeben sich gewichtsmässige Vorteile gegenüber vergleichbaren Komponenten in Stahl. Und kostenmässige Vorteile dann, wenn diese Stahl-Komponenten aus Einzelteilen zusammengeschweisst werden. Nach einem Vergleich mit geschweissten Alu-Komponenten werden etwas eingehender die Unterschiede zu Teilen aus Alu-Guss beschrieben. Schliesslich erfolgt ein Vergleich mit reinen Frästeilen in Alu oder Stahl und es werden die Bedingungen erläutert, unter welchen gesenkschmiedete Aluminium-Teile auch hier Kostenvorteile erzielen.

Am Beispiel des Gelenkbereiches eines Gliederzuges werden der Konstruktions- und Optimierungs-Prozess der beiden gesenkschmiedeten Hauptkomponenten, die Qualitätssicherung und die Nachweise bis zur Zulassung aufgezeigt. Dabei wird auch der Herstell-Prozess bis zum fertig bearbeiteten und eingebauten Gelenkmodul dargestellt.

In einem Exkurs zu weiteren möglichen und bereits realisierten Anwendungen wird die Meinung begründet, dass gesenkschmiedete Aluminium-Teile in verschiedenen Komponenten von Schienenfahrzeugen noch vermehrt und somit entscheidend zur Gewichts- und Kostenreduktion beitragen könnten. Und dabei steht und fällt der Erfolg damit, dass bereits ab der Konzeptphase das Gesamt-Strukturkonzept der betreffenden Zone oder des betreffenden Systems zusammen mit der gesenkschmiedeten Komponente optimiert wird, unter Berücksichtigung von deren kostengünstigen Herstellbarkeit.

Die Technologie eignet sich vielleicht punktwiese zum blossen Ersatz von bestehenden Teilen. Aber die grossen Vorteile bringt die Technologie erst, wenn sie mit ihren konstruktiven Eigenheiten und Formgebungs-Möglichkeiten für die betreffenden Teile schon zu Beginn der Entwicklung ins Gesamtkonzept einfließt. Erst wenn Konzept und Technologie zusammenpassen, erreicht man ein Optimum.



## Abstract

The use of aluminium alloy drop forgings contributes to weight reductions of rolling stock structures. And overall costs may be kept low.

Today's usually penalised weight limits in rolling stock specifications ask for a stronger lightweight construction focus. In the last few years skills in forming technologies of aluminium drop forgings have been improved remarkably. Additionally new heat treatable alloys with high strength properties have been developed, particularly for automotive and aerospace applications.

The article describes today's mechanical properties of aluminium alloy forgings as well as the most important design parameters.

This leads to the advantages regarding weight compared with components made in steel. And to cost advantages if those steel components are composed of several welded parts.

A comparison with welded aluminium components is followed by a more detailed description of the most important differences to aluminium castings. Finally we compare aluminium forgings with machined parts made of aluminium or steel. Conditions are given which will lead to cost benefits in these cases.

The case study is about the articulation joint of a low floor multiple unit. Design and optimisation processes of the two forged main parts is described as well as quality management, validation and certification processes. Doing so we will get an impression of the manufacturing process till the finally machined and assembled articulation module.

Summarizing further possible and already realized applications of aluminium forgings we find that such parts in several rolling stock structure components could contribute even much more and therefore significantly to a reduction of both weight and overall cost.

But success depends strongly on the concept approach: design parameters and therefore cost optimising manufacturing possibilities of drop forgings have to be part of the overall system concept right from the beginning. Both have to be optimised together and simultaneously.

It may be of a certain use to replace some existing parts by particularly designed forgings. But the forging technology offers big advantages if its design parameters and forming possibilities are considered for the parts concerned already when defining the very first overall concept. Only combining technology and concept leads to an optimum.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Eigenschaften gesenkgeschmiedeter Aluminium-Teile</b> .....	<b>5</b>
2.1	Materialeigenschaften .....	5
2.2	Formgebung und Konstruktionsparameter .....	7
2.3	Vorteile gesenkgeschmiedeter Aluminium-Teile .....	9
<b>3</b>	<b>Das Wagenkastengelenk eines Regional-Gliederzuges</b> .....	<b>10</b>
3.1	Der Konstruktionsprozess .....	12
3.2	Lastannahmen und Festigkeitsnachweise .....	17
3.3	Qualitätssicherung .....	18
3.4	Das fertige Gelenk-Modul .....	20
3.5	Zulassung .....	21
<b>4</b>	<b>Weitere Einsatzgebiete für Gesenkschmiedeteile in Aluminium</b> .....	<b>22</b>

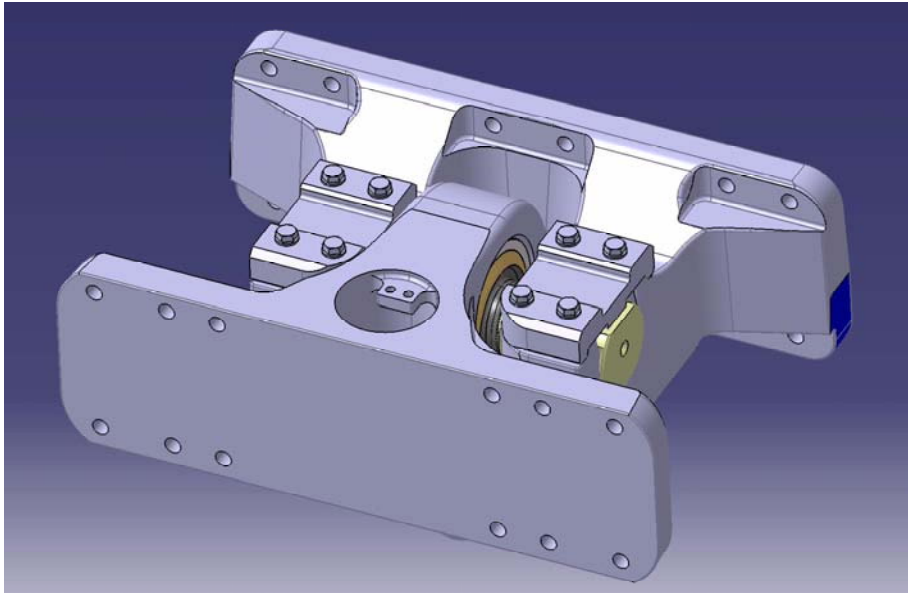


Bild 1: FLIRT Wagenkastengelenk; max. Längskraft: 1500 kN, max. Auslenkung: 13°, Gesamtgewicht: 223.8 kg



Bild 2: Niederflur-Nahverkehrs-Gliederzug FLIRT von Stadler Rail AG mit gesenkgeschmiedeten Wagenkasten-Gelenken (Bild: Stadler Rail AG)



## 1 Einleitung

Schienenfahrzeuge stellen steigende Anforderungen an den strukturellen Leichtbau. Im Streben nach leichten und zugleich kostengünstigen Schienenfahrzeugen kommt den Aluminium-Werkstoffen eine Schlüsselrolle zu. Für hochbeanspruchte Komponenten im Kastenbau haben diverse Knetlegierungen – insbesondere die 6000er-Legierungen - wegen ihrer günstigen Eigenschaftskombination einen festen Stellenwert.

In den letzten Jahren wurden die Möglichkeiten im Bereich der Formgebung von gesenkgeschmiedeten Aluminium-Teilen stark verbessert. Zudem wurden – in erster Linie für Anwendungen im Automotive- sowie im Luftfahrt-Bereich – neue hochfest aushärtbare Legierungen entwickelt [1]. Es ist daher naheliegend, dass solche Teile vermehrt für strukturelle Baugruppen von Schienenfahrzeugen eingesetzt werden. Dabei eignet sich die stärkste der verbreitetsten unter den betreffenden Legierungen, nämlich AlMgSi1, bestens für gesenkgeschmiedete Teile.

Bei hoher statischer und dynamischer Festigkeit im wärmebehandelten Zustand (F31 bzw. T6), guter Duktilität und Zähigkeit ist AlMgSi1 bezüglich Korrosionsbeständigkeit den aushärtbaren Aluminium-Legierungen mit noch höheren Festigkeiten, wie AlCuMg, AlZnMg und AlZnMgCu, weit überlegen.

Die Entwicklung geeigneter Aluminium-Schmiedeteile wird am Beispiel des Gelenkbereiches (*Bild 1*) eines Gliederzuges (*Bild 2*) aufgezeigt.

## 2 Eigenschaften gesenkgeschmiedeter Aluminium-Teile

### 2.1 Materialeigenschaften

Geschmiedet werden alle üblichen Knetlegierungen. Für strukturelle Anwendungen im Bahnbereich eignen sich insbesondere die 6000er-Legierungen, da sie aushärtbar sind.

Der Verformungsgrad, den das Werkstück in seinem Entstehungsprozess erfährt, ist ausschlaggebend für das Erreichen von guten mechanischen Eigenschaften. Ergibt sich dieser nicht automatisch in ausreichender Höhe aus der Form des Bauteils, wie dies z.B. bei einfachen Formen vorkommen kann, so wird ein genügender Umformgrad in der Herstellung durch Vorverformungen vor dem eigentlichen Gesenk-Schmiedeprozess gewährleistet.

In der *Tafel 1* sind die mechanischen Eigenschaften einiger ausgewählter Legierungen zusammengestellt. Die erreichbaren Werte sind abhängig von der Bauteildicke und damit von der Abkühlgeschwindigkeit beim Abschrecken. Bis zu Dicken von 100 mm lassen sich immer noch sehr gute Festigkeitswerte erreichen.



Tafel 1: Mechanische Werte von gesenkgeschmiedeten Teilen für Dicken bis 100 mm

Legierung Zustand	Grundlage	Proben- lage	Streck- grenze $R_{p0.2}$	Zug- festigkeit $R_m$	Bruch- dehnung $A_5$	Spannungsamplitude bei $N=10^7$ und $R=-1$ glatt
			N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>
AlMgSi1/F31	DIN 1749	L	260	310	6	
	DIN 17606	T	250	290	5	
AS10.62 (AlMgSi1/T6 von Otto Fuchs)	gemessene Mindestwerte	L	305	330	13	120
		T	270	310	10	
AS28.62 (AlMgSi1/T6 von Otto Fuchs) siehe [1]	garantiert	L	350	380	8	
	gemessene Mindestwerte	L	396	419	13	170

L Parallel zur Faserrichtung und quer zur Schmiederichtung

T Nicht parallel zur Faserrichtung

Gegenwärtig ist der Entwurf der EN13981-4 [2] in der Phase der Stellungnahmen. Die Norm wird in Ergänzung zur EN586-2 [3] die mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Dauerschwingeigenschaften im Rahmen der technischen Lieferbedingungen für Aluminium-Schmiedeteile für tragende Anwendungen im Schienenfahrzeugbau definieren.

Dimensionierung und Nachweise erfolgen jedoch in der Regel mit versuchstechnisch abgesicherten Festigkeitswerten, ermittelt an anwendungsspezifischen Bauteilproben. Die dabei gemessenen Festigkeitswerte sind normalerweise wesentlich höher als diejenigen aus [2] bzw. [3]. Liegen keine effektiven Prüfwerte vor, so können die Nachweise mit den Werten aus [4] geführt werden.



### 2.2 Formgebung und Konstruktionsparameter

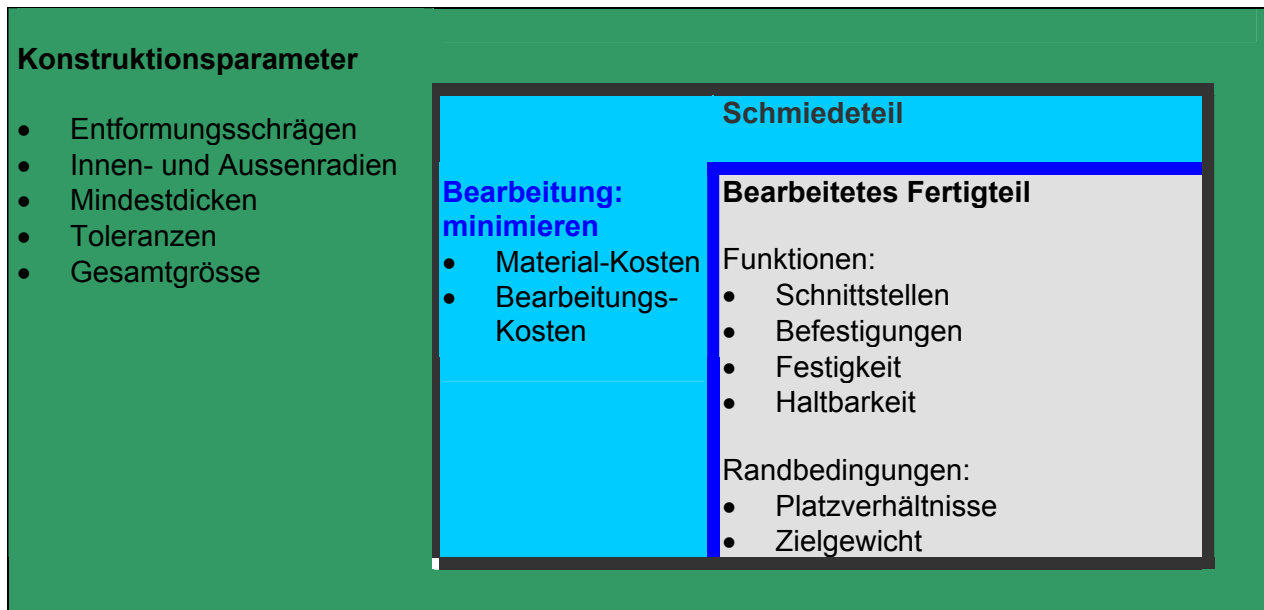
Folgende Parameter definieren die schmiedbare Kontur und sind bei der konstruktiven Auslegung zu berücksichtigen:

- Die Entformungs-Schrägen müssen eingehalten werden, typisch ist ein Winkel von ca. 3°; Hinterschnitte sind nicht möglich.
- Die Trennfläche der beiden Werkzeughälften muss frühzeitig im Bauteil-Konzept festgelegt werden.
- Die minimal möglichen Innenradien betragen 12 bis 30 mm, in großen Vertiefungen jedoch mehr.
- Die minimal möglichen Aussenradien betragen ca. 10 mm bei Bauteilen von der hier beschriebenen Größe, bei kleineren Bauteilen entsprechend weniger.
- Die minimalen Wandstärken in Schlagrichtung bei Einfachwerkzeug betragen ca. 25 mm. Mehrstufen-Verfahren erlauben kleinere Wandstärken, sind aber wesentlich teurer.
- Die minimalen Wandstärken quer zur Schlagrichtung müssen mindestens ein Drittel der Tiefe betragen.
- Konkave Vertiefungen können mit einem Tiefenverhältnis von ca. 1:1 hergestellt werden
- Die Toleranzen in Schlagrichtung betragen – je nach Bauteilgröße – ca. +3/-1.5 mm bei Bauteilen von der hier beschriebenen Größe.
- Dazu kommen die Ebenheitstoleranzen von ca. ±1-2 mm.
- Es sind daher für spätere Bearbeitungen bis zu 5 mm Bearbeitungszuschlag vorzusehen
- Die Toleranzen quer zur Schlagrichtung betragen bei Teilen von der hier beschriebenen Größe minimal ± 0.9 mm, jedoch nicht mehr als ca. ± 0.3% des jeweiligen Breitenmaßes.
- Der maximale Werkzeugversatz beträgt ca. 1.5 mm, abhängig von der Größe des Werkzeuges.
- Die maximale Bauteilgröße hängt von der Pressengröße der Hersteller ab. In Europa sind Bauteile bis zu einer Länge von 3100 mm schmiedbar. Ansonsten liegen die hier beschriebenen Teile gemäss *Tafel 3* bezüglich Abmessungen und Rohteil-Gewicht im oberen machbaren Bereich.



Bei einer wirtschaftlichen Konstruktion liegt die geschmiedete Kontur möglichst nahe an der End-Geometrie, welche die Funktion der Teile optimal erfüllt. Mechanische Bearbeitungen des Schmiederohlings müssen aus Kostengründen auf ein Minimum reduziert werden. In erster Linie vermeidet man damit das Schmieden von überschüssigem und teurem Material. Diese Einflussfaktoren auf die Gestaltung von optimierten Gesenkschmiedeteilen sind in *Tafel 2* dargestellt.

Tafel 2: Einflussfaktoren, welche bei der Optimierung von Schmiedeteilen zu beachten sind







### 2.3 Vorteile gesenkgeschmiedeter Aluminium-Teile

Werden die geschmiedeten Aluminium-Bauteile mit Komponenten aus Stahl verglichen, so liegen die Vorteile des Aluminium - bei den heute erreichbaren mechanischen Werten - zunächst in einer beträchtlichen Einsparung an Gewicht. Das gilt sowohl für den Vergleich mit geschweißten als auch mit gegossenen Stahlteilen.

Werden die Konstruktionsparameter bei der Auslegung optimal ausgenutzt, so können gegenüber Schweißkonstruktionen in Stahl zusätzlich wesentliche Kostenvorteile realisiert werden. Nämlich dann, wenn möglichst die gesamte Endform in einem Stück geschmiedet wird. Das teure Ergänzen beispielsweise durch Versteifungsrippen etc. entfällt dann.

Dieser Kostenvorteil von gesenkgeschmiedeten Aluminium-Teilen wird normalerweise auch gegenüber Schweisskonstruktionen in Aluminium realisiert.

Gesenkschmiedete Aluminium-Teile haben gegenüber Aluminium-Gussteilen ganz entscheidende Vorteile:

- die Prozesssicherheit,
- die Gefügequalität,
- die Bruchdehnung,
- die Bruchzähigkeit und
- die Ermüdungseigenschaften

sind wesentlich besser. Aluminium-Guss hat dagegen den Vorteil, dass sich Hohlkörper realisieren lassen und dass die Bauteile kostengünstig sind.

Gegenüber rein gefrästen Teilen mit hohem Zerspanungsgrad in Stahl und insbesondere in Aluminium ergeben sich dann Vorteile, wenn so nahe an die Endkontur herangeschmiedet werden kann, dass das an sich teurere Schmiedeteil plus die Werkzeugkosten kompensiert werden durch Einsparungen an Bearbeitung und vor allem an einzukaufendem Rohmaterial.

Üblicherweise werden gefräste Aluminium-Teile auf der Basis von gewalzten Halbzeugen hergestellt. Das hat zwei entscheidende Nachteile:

Zum einen stösst man bezüglich der Bauteilgröße sehr schnell an die Grenzen, die durch die Plattendicken vorgegeben sind, welche noch vertretbare mechanische Werte garantieren bzw. überhaupt noch erhältlich sind. Bei AlMgSi1 liegt diese Grenze bei 150 mm (wärmebehandelt auf T6 bzw. T651). Weicht man beispielsweise auf AlMg4.5Mn aus, so sind über 40 – 50 mm Plattendicke nur noch Streckgrenzen um 110 N/mm<sup>2</sup> realisierbar (Zustand weich bis leicht kaltverfestigt). Demgegenüber sind gesenkgeschmiedete Teile, wie sie im folgenden beschrieben werden, in wesentlich größeren Dimensionen herstellbar und erreichen dank hohem Umformgrad sehr hohe Festigkeiten durch nachfolgende Wärmebehandlung. Das gilt wie erwähnt für die bezüglich Korrosion am besten geeigneten 6000er-Legierungen und insbesondere für AlMgSi1 (EN-AW 6082). In 7000er-Legierungen sind zwar Halbzeuge für Frästeile in sehr großen Dimensionen und mit guten Festigkeitswerten erhältlich, aber es muss dann sehr viel teures Material zerspannt werden. Und vor allem sind diese Legierungen wegen ihrer mangelnden Korrosionsfestigkeit für den Einsatz im Bahnbetrieb nicht geeignet.

Der zweite Nachteil von Frästeilen aus gewalztem AlMgSi1 betrifft dessen Neigung zu Terrassenbrüchen. Diese Gefahr besteht bei gesenkgeschmiedeten Teilen nicht. Das ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Bauteile noch verschweißt werden.



### 3 Das Wagenkastengelenk eines Regional-Gliederzuges

Gliederzüge finden zunehmend im Personen-Nahverkehr und im Hochgeschwindigkeitsbereich Verwendung. Der Gelenkbereich solcher Züge stellt hohe Anforderungen bezüglich Platzverhältnisse, statische und dynamische Strukturfestigkeit sowie Bewegungsmöglichkeiten, und dies alles bei möglichst kleinem Gewicht und niedrigen Gesamtkosten.

Das Gelenk übernimmt - neben der Funktion der Bewegung - die kraftschlüssige Verbindung zwischen den Wagen. Es überträgt insbesondere die Längskräfte (max. 1500 kN Druck) und muss diese auf eine rel. grosse Fläche in den Aluminium-Wagenkästen verteilen, da die betreffende Anschluss-Struktur teilweise geschweisst ist, mit den entsprechend niedrigen zulässigen Spannungen. Schliesslich bildet das Gelenk die Auflage zweier Wagen auf ein gemeinsames Jakobsdrehgestell. Die Positionen der Gelenke sind in Bild 3 dargestellt. Bei diesem Fahrzeug handelt es sich um den Niederflur-Nahverkehrs-Gliederzug FLIRT (Flinker, Leichter, Innovativer Regional-Triebzug) von Stadler Rail AG.

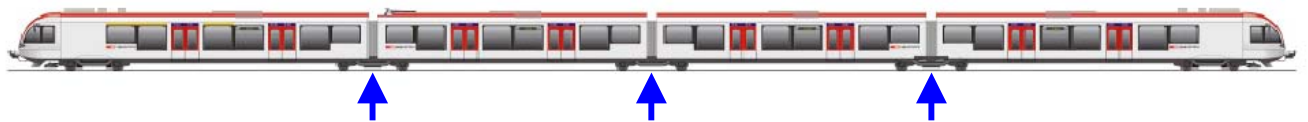


Bild 3: Typenbild FLIRT SBB mit Positionen der Wagenkasten-Gelenke

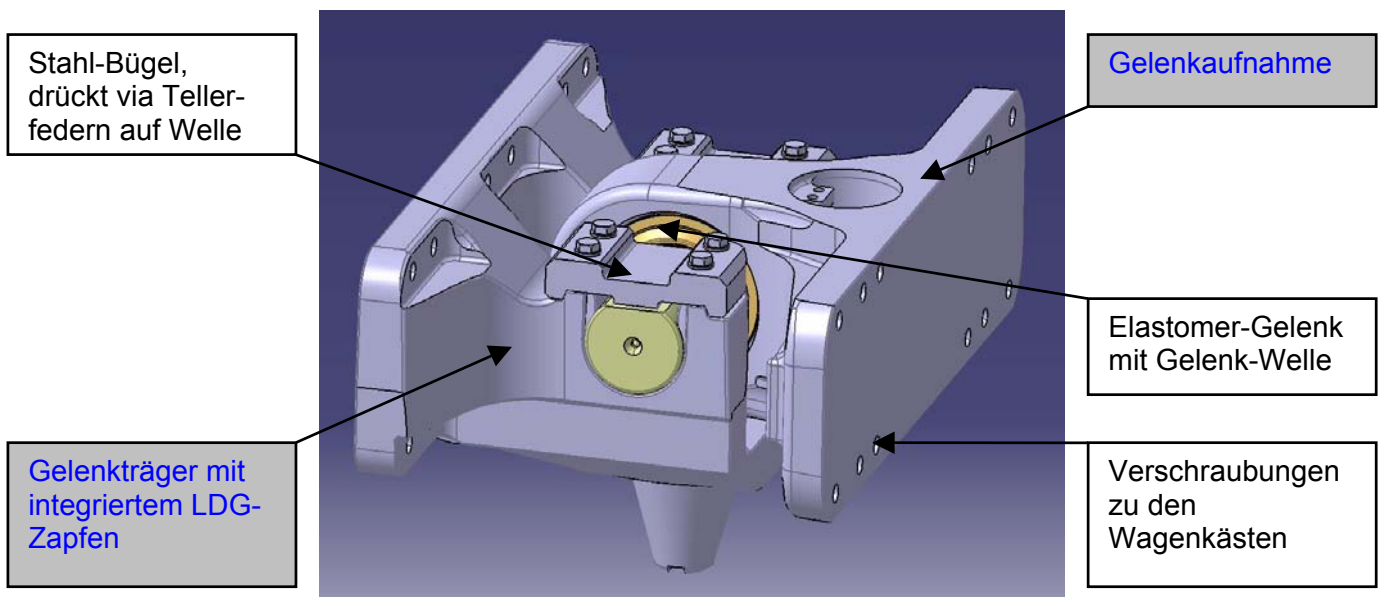


Bild 4: Übersicht der Bestandteile des Wagenkastengelenks

*Bild 4* zeigt die Bestandteile des Wagenkastengelenks. Zentrales Element ist das quergelegte Elastomer-Sphärolager mit horizontal liegender Welle. Das Elastomer besteht aus einem zwischen Welle und Außenring einvulkanisierten Ring auf der Basis von Naturkautschuk. Dessen Geometrie ist für die erforderlichen Bewegungs-Winkel sowie für das geforderte Bewegungskollektiv optimiert. Das Sphärolager muss die geforderten Lasten übertragen. Diese definieren insbesondere den Durchmesser der Welle. Daraus ergibt sich die Gesamt-Geometrie des Lagers und damit die „innere Randbedingung“ für die Auslegung der Grossteile Gelenkaufnahme und Gelenkträger.

Das Sphärolager ist in die Gelenkaufnahme gepresst. Die Gelenk-Welle liegt direkt formschlüssig in einer U-förmigen Vertiefung des Gelenkträgers. Sie wird mittels zweier Stahl-Bügel über Tellerfedern in diese Vertiefung gedrückt. Die Stahlbügel halten gleichzeitig für den Fall von Zugkräften den Gelenkträger zusammen. Die Schrauben werden in Gewindeeinsätze gedreht, welche im bearbeiteten Gelenkträger eingesetzt sind.



### 3.1 Der Konstruktionsprozess

Es steht sehr wenig Bauraum zur Verfügung. Die Passagiere möchten über eine möglichst tief liegende Rampe von einem zum nächsten Niederflur-Wagen gehen. Zwischen der Rampe und dem Gelenk ist der raumabschließende Faltenbalg angeordnet. Außerdem wird der Platz unten und seitlich begrenzt durch das sich bewegende Jakobs-Drehgestell, welches genau hier in Längs- und Querrichtung an die miteinander gekoppelten Wagen angebunden sein muss. Zudem muss der Gelenkbereich - und damit die Gesamtlänge des Gliederzuges - möglichst kurz sein (*Bild 5*). Die Aufgabe, für diesen eingeschränkten Bauraum das Gelenk zu konzipieren und zu konstruieren, war nicht ganz einfach. Das Gelenk-Modul muss folgende Aufgaben erfüllen:

- Wagenkästen miteinander verbinden
- Rotationen um alle Achsen ermöglichen
- Elastomer-Gelenk aufnehmen (Gelenkaufnahme)
- Lasten zwischen den Wagenkästen übertragen
- Lasten von und zum Drehgestell übertragen (Gelenkträger)
- Montage, Unterhalt und Demontage inkl. Wagentrennungen ermöglichen
- Ersatz von Verschleißteilen ermöglichen, insbesondere des Elastomergelenks alle 8 Betriebsjahre

Das konnte nur dank interdisziplinärer Zusammenarbeit der Verantwortlichen für das Fahrzeug-Konzept, für die Konstruktion, die Berechnung, die Produktion sowie der Verantwortlichen für den Unterhalt gelingen.

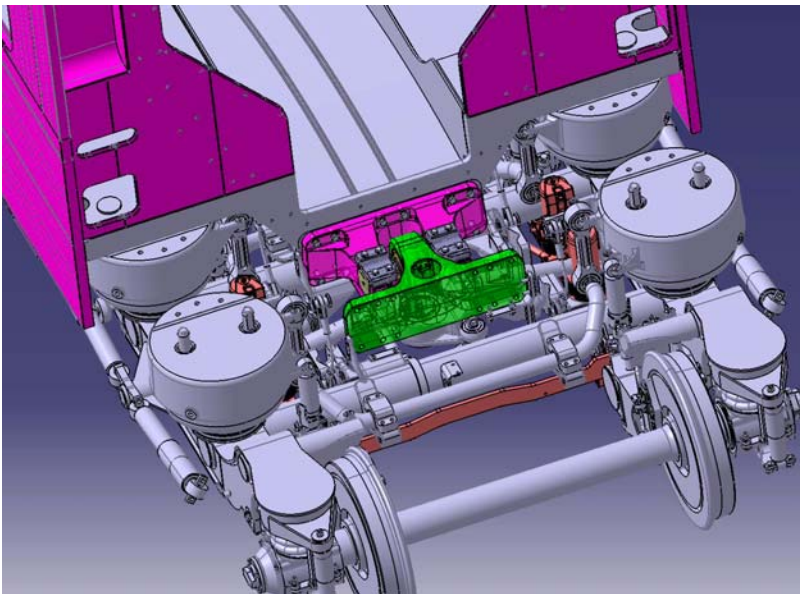


Bild 5: Enge Platzverhältnisse im Gelenkbereich. Nicht dargestellt sind Faltenbalg und Personen-Übergang

Ein entscheidender Punkt bei der Entwicklung war die Minimierung des Gesamtgewichtes des Zuges, und damit auch dieser Gelenkverbindung. Wie heutzutage üblich verband die SBB als Bestellerin die Einhaltung der vertraglich festgelegten maximalen Tara-Masse des Zuges mit einer Gewichtspönale. Gleichzeitig sollten die Gesamtkosten gering sein.

Das Kostenziel wird u.a. durch die Reduktion der Anzahl der herzustellenden und miteinander zu verbindenden Einzelteile erreicht. Aus diesem Grund wurde von der Konzeptphase an die Idee verfolgt, den Drehzapfen als horizontale Anbindung der Laufdrehgestelle direkt ins Gelenk zu in-



tegrieren. Dies wurde dadurch ermöglicht, dass der Gelenkträger inklusive Drehzapfen aus einem Stück geschmiedet werden konnte. Das unterstreicht die Eleganz der Lösung mit gesenkgeschmiedeten Grossbauteilen (*Bild 6*).

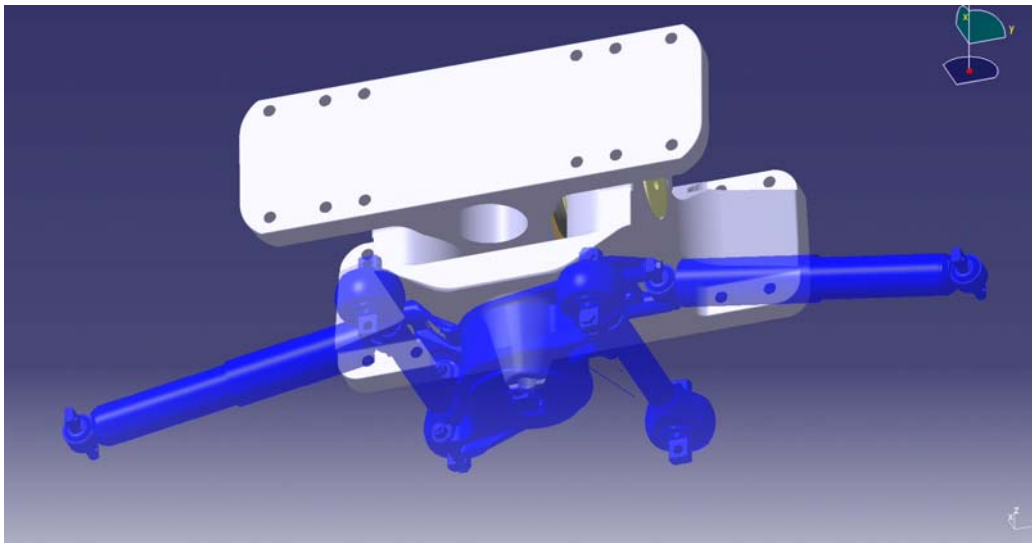


Bild 6: Am geschmiedeten Gelenkträger direkt integrierter Laufdrehgestell-Drehzapfen, auf welchen die Lemniskatenplatte mit Befestigung der Querdämpfer und Längslenker geschraubt wird

### 3.1.1 Konzept-Entscheid

Die komplexen und multifunktionalen Formen der beiden Hauptteile Gelenkaufnahme und Gelenkträger haben bei der Konzeptfindung schnell auf das Gesenkgeschmieden als Fertigungsmethode geführt. Zudem liess sich früh erkennen, dass für beide Teile eine Schmiederichtung gewählt werden kann, welche das Schmieden sehr nahe an die Endkontur ermöglicht, d.h. die anschliessende Bearbeitung konnte weitgehend auf die Schnittstellen zum Sphärolager, zur Verschraubung zu den Wagenkästen und zum Drehgestell reduziert werden.

Dadurch, dass somit bereits zu Beginn der Entwicklung die spezifischen Möglichkeiten, aber auch die herstellungsbedingten Grenzen ins Gesamtkonzept dieses Gelenkmoduls einfließen, konnten wir im folgenden Optimierungsprozess voll die Vorteile dieser Technologie ausnützen.

Die gedrängten Platzverhältnisse erforderten eine kompakte Bauweise des Gelenks. Auch dieser Umstand kommt gesenkgeschmiedeten Teilen entgegen. Feingliedrige und in Verstärkungsrippen auslaufende Teile sind weniger gut schmiedbar als kompakte.

Zur Begrenzung des Gewichtes kam als Material nur eine hochfeste Aluminium-Legierung in Frage. Wie schon bei einer früheren Entwicklung (Kastengelenk für GTW2 von Stadler Rail AG) wurde AlMgSi1 mit Wärmebehandlung und anschliessender Bearbeitung gewählt. Die Gewichtseinsparung gegenüber einer Stahl-Lösung (gefräst und/oder zusammengeschweißt) beträgt ca. 170 kg pro Gelenk, d.h. ca. 510 kg für den vierteiligen Gliederzug.

Aufwändige nichtlineare FE-Analysen mit Solid-Modellen und Kontaktbedingungen konnten die Machbarkeit der Teile bereits in der Konzeptphase nachweisen. Dabei wurden alle Einflüsse wie die Vorspannung der Schrauben sowie die Eigenschaften des Presssitzes in der Gelenkaufnahme inklusive des Temperatureinflusses (unterschiedliche Wärmedehnung der Aluminium-Gelenkaufnahme und des Stahl-Lagers) miterfasst.



### 3.1.2 Detail-Optimierungen

Unter Beachtung der Konstruktionsparameter für Schmiedeteile (Entformungs-Schrägen, Materialfluss etc.) wurden dann optimierte Geometrien erarbeitet. Dies erfolgte iterativ in der üblichen Interaktion zwischen dem Hersteller der Schmiedeteile und den Abteilungen des Fahrzeugherstellers für die Fahrzeug-Konstruktion, die Berechnung und die Fahrzeug-Produktion.

Für die Berechnung wurde dazu das FE-Modell aus der Konzeptphase konstruktionsbegleitend mitentwickelt und verfeinert. *Bild 7* zeigt einige Details aus der FEA.

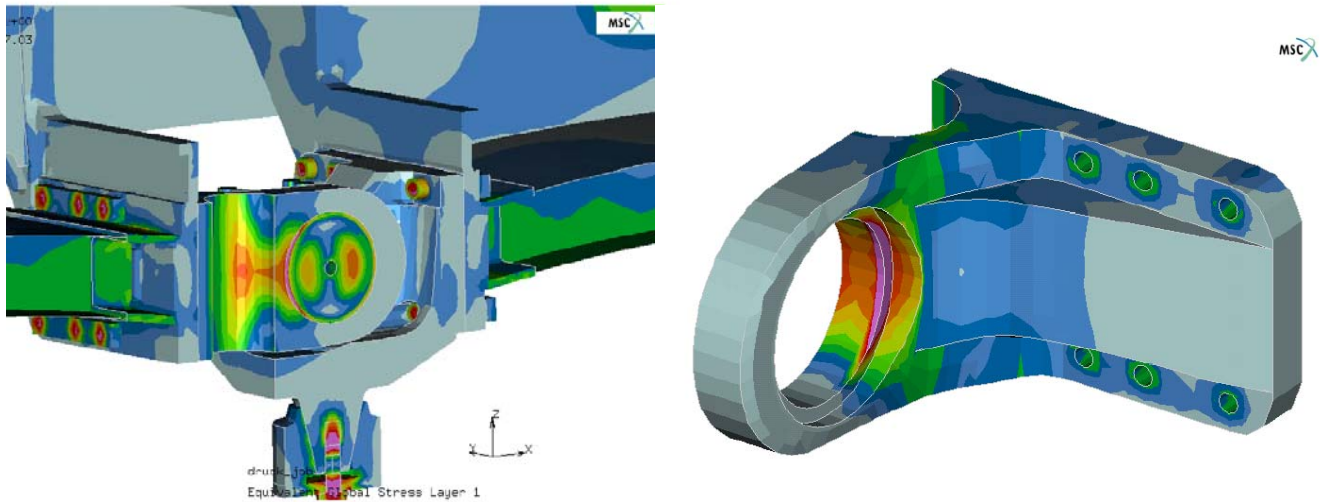


Bild 7: Konstruktionsbegleitendes Halbmodell mit gesamter Struktur-Umgebung: Spannungsplot bei 1500 kN Längskraft; rechts: Halbmodell Gelenkaufnahme





Die Kontrollen der Bewegungsmöglichkeiten der stark ineinandergreifenden Teile erfolgte mittels 3D-CAD. Die Endformen der Schmiederohlinge sind in *Bild 8* ersichtlich.



Bild 8: Gesenkgeschmiedete Rohlinge der Gelenkaufnahme (links) und des Gelenkträgers (rechts)

Das Ziel bei der Konstruktion von Gesenkschmiedeteilen besteht unter anderem darin, Geometrien zu entwickeln, welche bei einem Minimum an Materialaufwand ein Minimum an zusätzlicher Bearbeitung erlauben. Wie gut das im vorliegenden Fall gelungen ist, zeigt *Bild 9*. Relativ umfangreiche Flächen werden geschmiedet belassen.

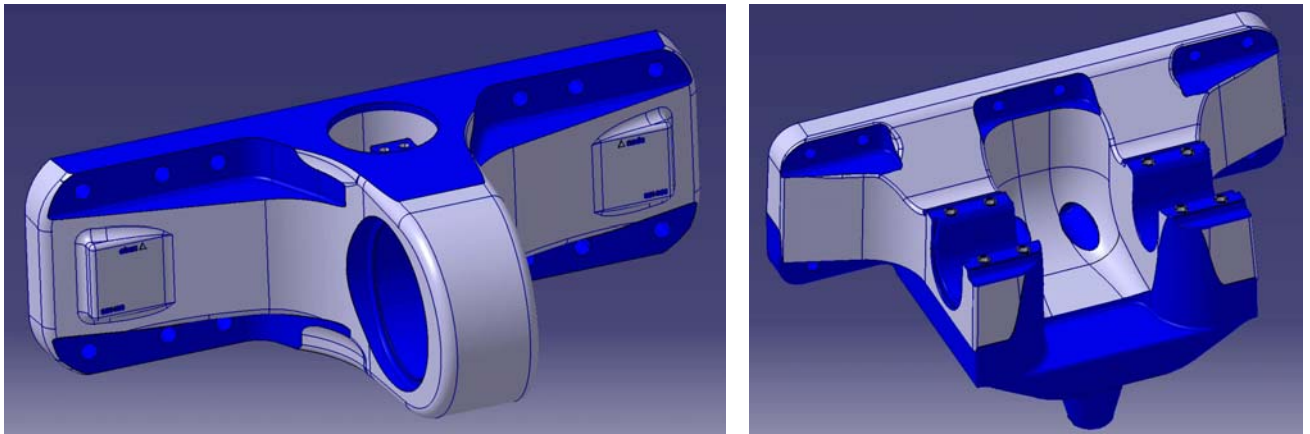


Bild 9: Blau: bearbeitete Flächen, grau: im unbearbeiteten Schmiedezustand belassene Oberflächen



### 3.1.3 Korrosionsschutz

Es ist in vielen Fällen nicht zu vermeiden, dass die strukturellen Aluminium-Teile unmittelbaren Kontakt zu Stahlteilen haben. Damit besteht grundsätzlich die Gefahr der Kontaktkorrosion. Im vorliegenden Fall sitzt die Stahl-Welle des Sphärolagers direkt im bearbeiteten, aber blank belassenen Aluminium-Gelenkträger. Die Stahl-Teile (Sphärolager-Welle und Aussenring in 42CrMo4V und Bügel in QSTE 690 TM) sind mit einer Schichtdicke von 15µm galvanisch verzinkt und gelb chromatiert.

Zusätzlich werden – außer beim Presssitz des Sphärolagers in der Gelenkaufnahme - vor der jeweiligen Montage sämtliche Stahl-Aluminium-Kontaktflächen ganzflächig mit Dinitrol 77B eingesprüht. Mit demselben Produkt werden sämtliche Berührungsstellen nach der Montage noch einmal behandelt und kritische Vertiefungen werden aufgefüllt. Zudem werden die Oberflächen auf beiden Seiten aller Stahl-Aluminium-Kontaktstellen mit Dinitrol 4941 konserviert und versiegelt. Konstruktiv wird weiterhin dafür gesorgt, dass sich Wasser und insbesondere Reinigungsmittel an keiner Stelle ansammeln kann. Mit all diesen Massnahmen werden jegliche Korrosionserscheinungen soweit möglich minimiert und insbesondere Kontaktkorrosion zwischen Stahl- und Aluminium-Teilen sowie Spalt-Korrosion vermieden.

Die restlichen Oberflächen dieser dickwandigen Gesenkschmiedeteile können aufgrund der günstigen Korrosionseigenschaften von AlMgSi1 in ihrem blanken oder lediglich chromsäure-anodisierten Auslieferungszustand belassen werden.





### 3.2 Lastannahmen und Festigkeitsnachweise

Die Kräfte auf die Wagenkästen wurden nach [5] bestimmt, Fahrzeugkategorie P-II (Triebzugeinheiten), diejenigen aus der Drehgestell-Anbindung nach prEN13749. Die strukturelle Festigkeit wurde mit den Vorgaben aus [4] nachgewiesen.

Die Modellierung der Gelenkverbindung ist wegen des nichtlinearen Verhaltens der Verschraubungen (Kontakt-Bedingungen) und des Presssitzes sowie der mechanischen Eigenschaften des Elastomer-Lagers sehr komplex.

Für die Berechnung der Beanspruchungen der gesamten Gelenkverbindung unter den statischen Lastfällen wurde ein FE-Modell verwendet, welches aus allen Teilen der Gelenkverbindung sowie den vereinfacht modellierten angrenzenden Wagenkästen besteht.

Gegenstand der statischen Nachweise bildeten die Gelenkaufnahme und der Gelenkträger. Der Gummi im Gelenk wurde mit einem vereinfachten Modell berücksichtigt. Bei der Berechnung wurden der nichtlineare Kontakt (alle Verschraubungen vorgespannt) sowie die elastisch/plastische Werkstoff-Nichtlinearität berücksichtigt. Ebenso beinhaltet das Modell den Presssitz der Gelenkwelle in der Gelenkaufnahme bei theoretisch maximalem Übermaß.

Berechnet wurden fünf statische Lastfallkombinationen gemäß der Technischen Spezifikation des Strukturnachweises:

- Brutto (Tara plus Zuladung) mit Vertikalbeschleunigung 1,3g,
- Tara plus 1500 kN Kupplungsdruck,
- Brutto plus 1500 kN Kupplungsdruck,
- Tara plus 1000 kN Kupplungszug und
- Brutto plus 1000 kN Kupplungszug.

Der Nachweis fordert eine minimale Sicherheit gegen Fließen von 1,0. Es werden kleine, lokal eng begrenzte plastische Dehnungen zugelassen.

Für den Nachweis der Sicherheiten gegen Dauerbruch nach EC-9 [4], Part 2, in der Gelenkaufnahme und im Gelenkträger wurde am selben Modell ein klassisches Verfahren angewendet, welches die mittelspannungsabhängige Ausschlagsicherheit verwendet. Berücksichtigt wurde ein Kollektiv aus folgenden Lasten gemäß der Technischen Spezifikation bezgl. Lastkollektiv Ermüdung:

- Montagezustand
- Vertikalbelastung aus unterschiedlicher Zuladung der angrenzenden Wagen
- Dynamische Wechsellasten aus Beschleunigungskräften
  - Vertikal
  - Quer
  - Längs



### 3.3 Qualitätssicherung

Für die wärmebehandelten Schmiederohlinge wurden detaillierte Bauteil-Spezifikationen erarbeitet, welche unter anderem die Materialeigenschaften und die Bauteil-Prüfungen festlegen.

Die zerstörungsfreien Prüfungen umfassen die Punkte:

- Rissprüfung
- Oberflächenkontrolle
- Massprüfung
- Ultraschallprüfung
- Härteprüfung
- Elektrische Leitfähigkeit

Die zerstörenden Prüfungen umfassen die Punkte:

- Zugversuche
- Makrogefügeprüfung
- Ermüdungsversuche als Rundlauf-Biegeversuche

Es werden während der Produktion stichprobenweise Rohlinge zerstörend geprüft. Die Stellen für die Entnahme von Zug- und Ermüdungs-Proben sind definiert. *Bild 10* zeigt einen Probenlageplan für statische und Ermüdungstests.

Weitere Prüfungen betreffen die chemische Analyse sowie die Kontrolle der Wärmebehandlung.

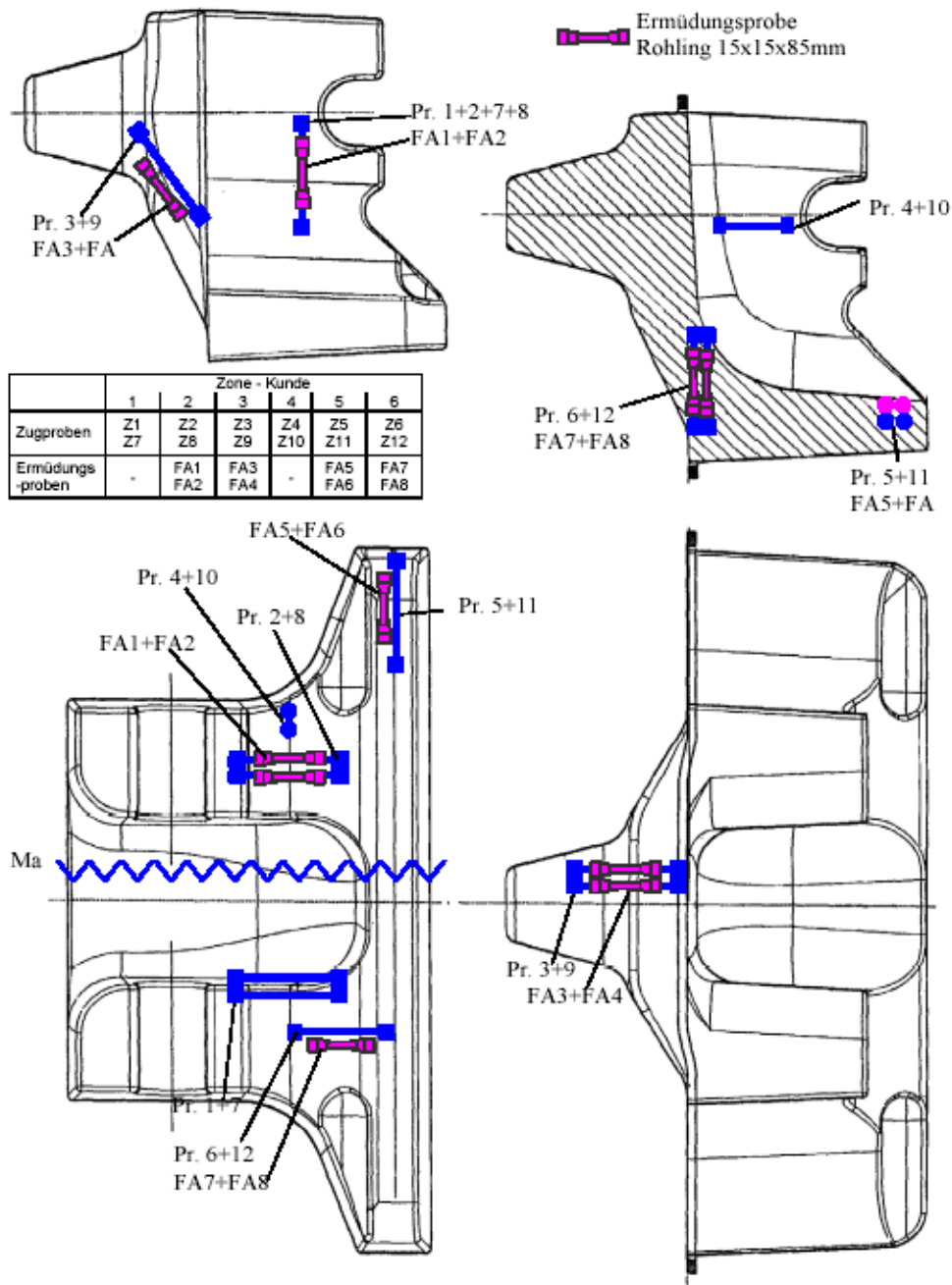


Bild 10: Beispiel Probenlageplan für statische und Ermüdungstests an periodischen Ausfallmustern von Schmiede-Rohteilen

Bei den bisher geprüften Bauteilen zeigte sich durchwegs, dass die spezifizierten Materialwerte bei weitem übertroffen werden. Beispielsweise wurde dem rechnerischen Festigkeitsnachweis eine Streckgrenze von  $220 \text{ N/mm}^2$  zugrundegelegt. Die gemessenen Werte liegen alle bei mindestens  $270 \text{ N/mm}^2$ .



### 3.4 Das fertige Gelenk-Modul

Bilder 11 und 12 zeigen das fertige Gelenk in verschiedenen Einbau-Phasen.

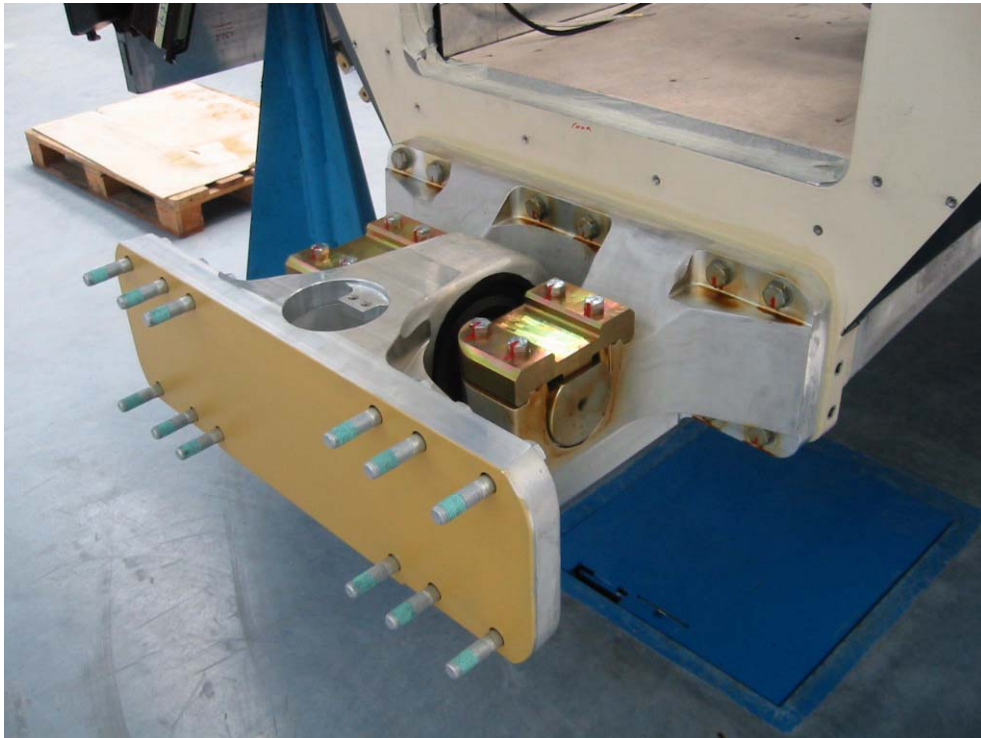


Bild 11: Fertig montiertes Gelenk-Modul

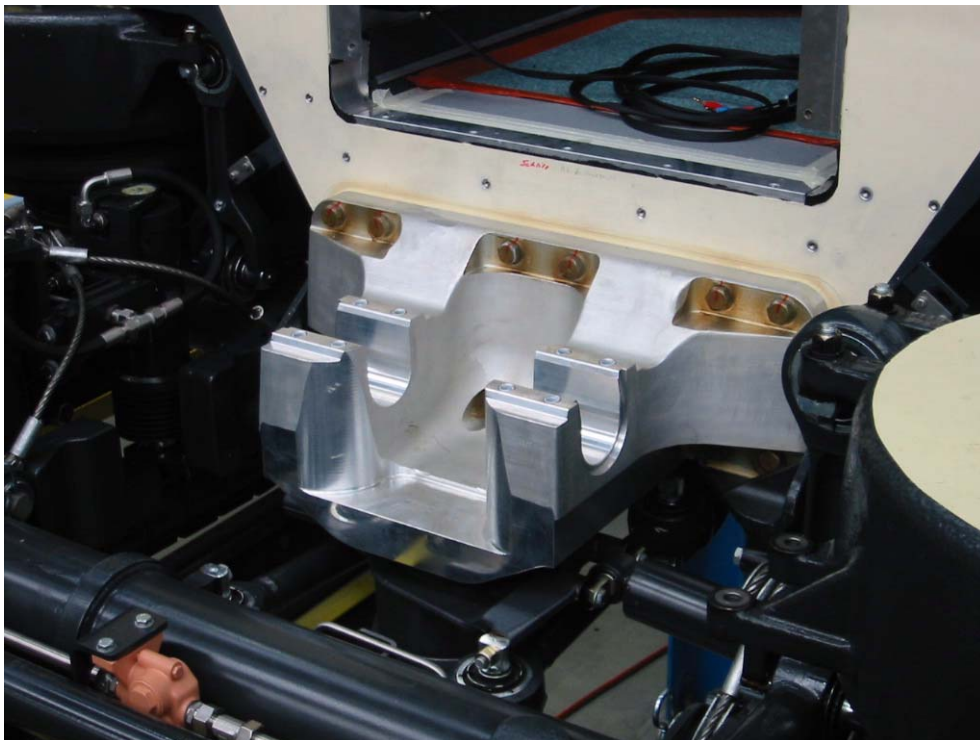


Bild 12: Montierter Gelenkträger vor dem Einsetzen des Gegen-Wagens mit Gelenk, die Lemniskatenplatte des Jakobs-Drehgestells ist am Drehzapfen montiert

Tafel 3: Zusammenstellung der wichtigsten Eckdaten der beiden Gesenkschmiedeteile

	Haupt- abmessungen	Masse Rohteil	Kosten Rohteil	Kosten Werkzeug	Masse bearbeitet	Bearbeitungs- grad
	[mm]	[kg]	[€]	[€]	[kg]	%
<b>Gelenkaufnahme</b>	830x440x295	90.7	1'320.-	46'000.-	59.3	35
<b>Gelenkträger</b>	850x490x415	129.7	1'435.-	75'000.-	106.9	18

### 3.5 Zulassung

Dazu diente der unter 3.2 beschriebene statische und dynamische FEA-Nachweis sowie der Wagenkasten-Druckversuch. Bei letzterem wurden die Lasten über ein komplett eingebautes Gelenk in den getesteten Endwagen eingeleitet. Am Gelenkträger wurden 4, an der Gelenkaufnahme wurden 5 Dehnungsmessstreifen (DMS) angebracht, um an diesen Referenzpunkten den Abgleich zwischen gerechneten Spannungen und gemessenen Dehnungen herzustellen. Dieser Abgleich ergab Abweichungen von weniger als 20% an allen betrachteten Punkten.





### 4 Weitere Einsatzgebiete für Gesenkschmiedeteile in Aluminium

Gesenkschmiedeteile eignen sich, wenn folgende Voraussetzungen und Randbedingungen erfüllt sind:

- komplexe, multifunktionale Bauteile mit aufwändigen Formen,
- schmiedetechnisch mit einer Schmiede-Richtung („Schlag-Richtung“) herstellbare Bauteile,
- generell strukturell beanspruchte Teile mit einer multifunktionalen Formgebung,
- Bedarf an Leichtbau,
- Stückzahlen lassen Werkzeugkosten amortisieren,
- nicht zu dünnwandige, endkonturnah schmiedbare Teile, bei denen schon in der Konzept-Phase die Eigenschaften von gesenkschmiedeten Teilen berücksichtigt werden können; nur mit diesem konzeptionellen Ansatz in einem frühen Stadium der Entwicklungen können die Vorteile von gesenkschmiedeten Aluminium-Teilen optimal ausgenutzt werden,
- Ersatz von bestehenden Teilen in Stahl oder Aluminium, welche aus verschiedenen Halbzeugen zusammengesweißt sind oder
- Ersatz von gefrästen Teilen mit hohem Zerspanungsgrad in Stahl und insbesondere in Aluminium, wenn so nahe an die Endkontur herangeschmiedet werden kann, dass die höheren Kosten für das Schmiedeteil inklusive Werkzeug durch Einsparungen an Bearbeitung und vor allem an einzukaufendem Rohmaterial kompensiert werden.

Der Ersatz von bereits bestehenden Teilen in Aluminium-Guss, in Sphäro- oder Stahlguss sowie in geschmiedetem Stahl führt nur in Ausnahmefällen zum Erfolg. Die Teile müssen zu diesem Zweck neu konstruiert und hinsichtlich der Gestaltungsmöglichkeiten sowie der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Festigkeit von gesenkschmiedeten Aluminium-Teilen, optimiert werden.

Beispiele weiterer im Bahnbereich bereits realisierter Gesenkschmiedeteile in Aluminium sind in den *Bildern 13, 14 und 15 dargestellt.*

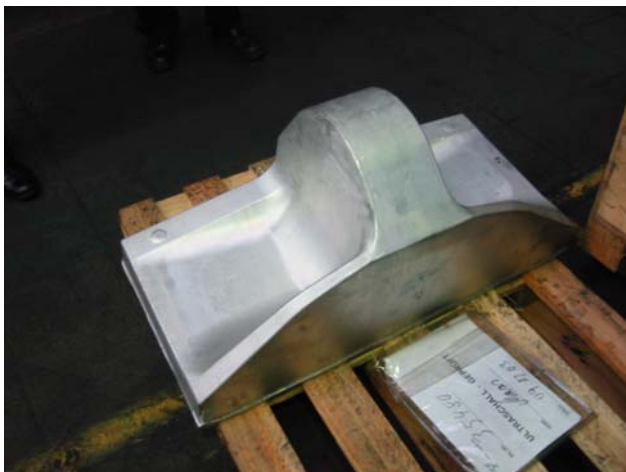


Bild 13: Gelenkkonsolen des Gelenktriebwagens von Stadler Rail AG. Geschmiedeter Rohling und eingebautes, bearbeitetes Bauteil. (Rohteil: 146.4 kg, Bearbeitungsgrad 29%)

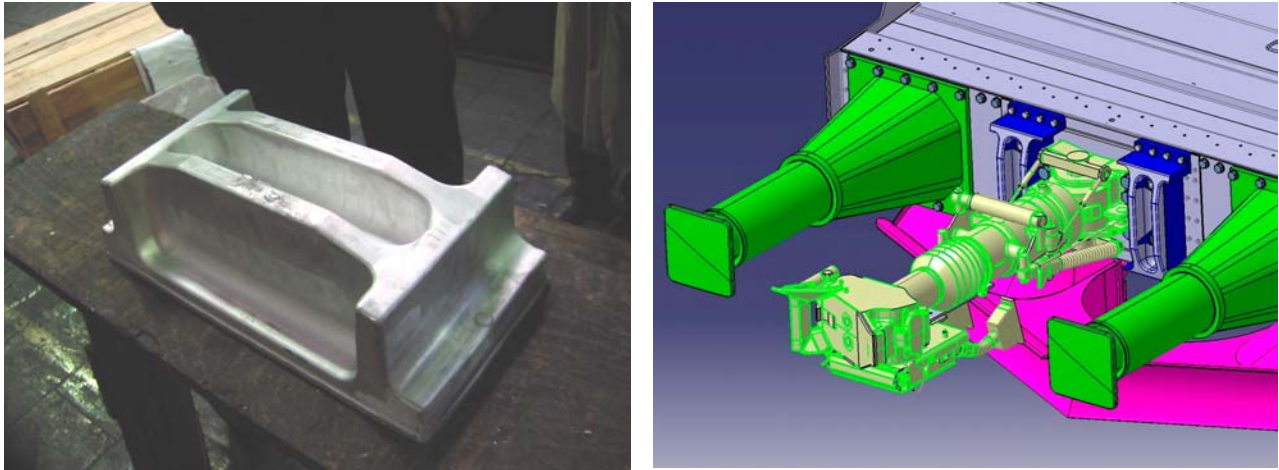


Bild 14: Kupplungskonsole FLIRT. Geschmiedeter Rohling und CAD-Darstellung. (Rohteil: 32.9 kg, Bearbeitungsgrad 30%)



Bild 15: Geschmiedete Rohlinge für Lenker, Welle und Lagerbock des Hochgeschwindigkeitszuges Talgo 350, Legierung: AlMgSi1 (Bild: Otto Fuchs KG, Meinerzhagen, Deutschland)

Weitere denkbare Anwendungen sind:

- Primär- und Sekundärstrukturteile von Drehgestellen,
- Trafogehäuse und
- Sitzkonsolen.

Zudem wird auf den bereits erfolgreichen Einsatz von gesenkschmiedeten Radscheiben aus Aluminium-Legierungen hingewiesen. Diese Technologie ist anwendungsreif, zumindest für Schienenfahrzeuge mit Maximalgeschwindigkeiten bis 160 km/h. Es können Gewichtseinsparungen von ca. 75 kg pro Radscheibe realisiert werden, d.h. 300 kg pro Drehgestell, bei angemessenen Kosten. Einer noch viel verbreiteteren Anwendung dieser Technologie steht von Seiten der Sicherheit nichts im Wege.



Abschließend sei am vielleicht etwas futuristisch anmutenden Beispiel eines ganzen Drehgestells aus geschmiedeten Aluminium-Bauteilen der oben erwähnte Ansatz, dass deren Möglichkeiten und Eigenschaften bereits im Gesamtkonzept mitberücksichtigt werden müssen, nochmals aufgegriffen.

Nach demselben Denkansatz wurden vor Jahren Aluminium-Drehgestelle mit sehr unkonventioneller Kinematik entwickelt und gebaut, jedoch unter Verwendung von Aluminium-Gussteilen, die teilweise sogar miteinander verschweißt wurden (z.B. Kesselwagen-DG der Rhätischen Bahn, Güterwagen-Drehgestelle für die SBB und für USA, Triebdrehgestell „Aludrive“ für Nahverkehrsfahrzeuge).

Setzt man sich zum Ziel, ein leichtes, kostengünstiges Personen- oder Güterwagen-Drehgestell zu bauen, so wird der bloße Ersatz bestehender Stahl-Einzelteile durch Gesenkschmiedeteile in Aluminium kaum oder höchstens punktuell zum Erfolg führen, auch wenn die Teile technologie-spezifisch neu optimiert werden.

Es müsste ein Drehgestell als Gesamtes im Hinblick auf den optimierten Einsatz von Aluminium-Gesenkschmiedeteilen vollständig neu konzipiert werden. Das Konzept des Gesamt-Drehgestells wäre untrennbar mit der Herstellbarkeit von Gesenkschmiedeteilen und mit deren Optimierung verbunden. Ein solches Drehgestell würde recht anders aussehen als ein herkömmliches. Einen geschweißten Rahmen würde man nicht mehr finden, sondern mechanisch verbundene, endkonturnah geschmiedete und bearbeitete Aluminium-Teile als Bestandteile einer neu konzipierten Drehgestell-Kinematik.

Gesenkschmiedete Aluminium-Teile können somit in verschiedenen Komponenten von Schienenfahrzeugen noch vermehrt und entscheidend zur Gewichts- und Kostenreduktion beitragen. Dabei ist jedoch der Ansatz wichtig, dass daran bereits in der Konzept-Phase gedacht wird, damit die Eigenschaften und konstruktiven Prämissen gesenkschmiedeter Teile bei der Entwicklung des Gesamt-Konzeptes mitberücksichtigt werden und so die Vorteile dieser Technologie voll ausgeschöpft werden können.

### Literatur

- [1] Becker, J.; Fischer, G.: AS 28: Ein hochfester Konstruktionswerkstoff auf der Legierungsbasis Al-Mg-Si. Sonderdruck aus Leichtmetalle im Automobilbau (1995/96), Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart.
- [2] prEN13981-4 (2004): Aluminium und Aluminium-Legierungen – Erzeugnisse für tragende Anwendungen im Schienenfahrzeugbau, Technische Lieferbedingungen – Teil 4: Schmiedestücke.
- [3] EN586-2 (1994): Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schmiedestücke - Teil 2: Mechanische Eigenschaften und zusätzliche Eigenschaftsanforderungen.
- [4] Eurocode 9 (1999): Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten.
- [5] DIN EN12663: Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen. Europäisches Komitee für Normung, 2002.



## Gesenkschmiedeteile in Aluminium



Mitwirkende Firmen:

Gesamtfahrzeug:

Stadler Rail AG, Bussnang und Altenrhein  
([www.stadlerrail.com](http://www.stadlerrail.com))

Konzept und Technische Projektleitung:

LEC, Winterthur

Konstruktion:

Design & Technik, Altenrhein ([www.d-t.ch](http://www.d-t.ch))

Berechnung:

SAS, Arbon ([www.sas-ingenieurbuero.ch](http://www.sas-ingenieurbuero.ch))

Fachhochschule Bern

Schmiedeteile:

Otto Fuchs KG, Meinerzhagen (D)

Simon Leutenegger

Dipl. Ing. ETH/SIA

Inhaber LEC

Leutenegger Engineering & Consulting

Im Weidli 6

CH-8405 Winterthur

0041 52 238 24 49

[www.leconsult.ch](http://www.leconsult.ch)

[simon.leutenegger@leconsult.ch](mailto:simon.leutenegger@leconsult.ch)