

## Schweizer MSC.Software Anwendertreffen Luzern, 12. April 2005

### Nichtlineare FE-Analyse und Sicherheitsnachweis an der Gelenkverbindung des FLIRT Triebwagenzuges von Stadler Rail AG



Foto: Thomas Stutz  
www.eisenbahnfotos.ch

# Nichtlineare FE-Analyse und Sicherheitsnachweis an der Gelenkverbindung des FLIRT Triebwagenzuges von Stadler Rail AG

Martin Züger, pinPlus ag  
Simon Leutenegger, LEC Engineering & Consulting (Einleitung)

## 1 Zusammenfassung

Seit dem grossen Fahrplanwechsel im Dezember 2004 verkehren auf dem schweizerischen Schienennetz die RABe 521 und 523, vierteilige Gliederzüge, welche von der Firma Stadler Rail AG entwickelt und gebaut worden sind. Der "flinke leichte innovative Regional-Triebwagen" (FLIRT) ist konsequent in Aluminium-Leichtbauweise entwickelt worden. Auch die tragenden Teile des Gelenkes, welches die Wagenkästen mit dem Jakobsdrehgestell verbindet, sind aus Aluminium produziert worden.

Für den rechnerischen Sicherheitsnachweis wurde ein FE-Modell entwickelt, welches den vollständigen Kraftfluss durch das Gelenk unter Berücksichtigung von Vorspannungen aus Schrauben und Presssitz sowie der Steifigkeitseigenschaften der Elastomerkomponenten, abbildet. Für den Nachweis der Sonderlasten wurde auch Plastizität berücksichtigt. Ein Vergleich der Rechenergebnisse mit den durchgeführten Messungen hat eine gute Übereinstimmung gezeigt.

## 2 Einleitung

Moderne Interregional- und Regionaltriebzüge werden immer häufiger als Gliederzüge in Gelenkbauweise produziert: Dies verringert die Anzahl Achsen, was nicht nur Gewicht- sondern auch Unterhaltskosten einspart und zudem einen grossen Niederflurbereich ermöglicht. Voraussetzung zur Realisierung dieses Konzeptes ist konsequenter Leichtbau (Wagenkasten aus Aluminium), damit die zulässige Achslast nicht überschritten wird. Eine vierteilige FLIRT-Komposition weist 10 Achsen auf, im Gegensatz zu den früheren Pendelzügen, welche vierteilig 16 Achsen auf die Schiene brachten.

Das Gelenk überträgt die Längskräfte (maximal 1500 kN) zwischen den Wagen und bildet die Verbindung zum Jakobs-Laufdrehgestell, auf welches zwei Wagenkästen abgestützt werden.

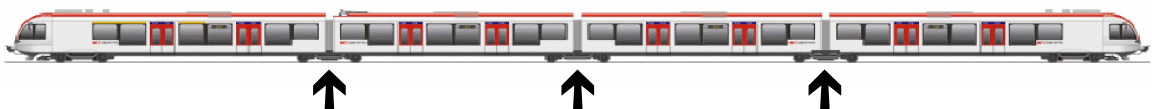


Abbildung 1: Typenbild RABe 523 SBB (FLIRT) mit Positionen der Gelenke

Im Zentrum des Gelenkes liegt ein horizontal eingebautes Elastomersphärolager. Die Gelenkigkeit wird mit einem aus Naturkautschuk bestehenden Ring erreicht, welcher zwischen Gelenkwelle und Gelenkaussenring einvulkanisiert ist. Die Geometrie des Gelenkes ist vom Gelenkhersteller auf die erforderlichen Bewegungswinkel und das entsprechende Bewegungskollektiv ausgelegt worden. Der Gelenkaussenring wird in die Gelenkaufnahme eingepresst, während die Gelenkwelle mit zwei federvorgespannten, verschraubten Stahlbügeln in der U-förmigen Vertiefung des Gelenkträgers befestigt wird. Die beiden grössten Teile, Gelenkaufnahme und Gelenkträger bestehen aus gesenkgeschmiedetem Aluminium (6000er Legierung) (Vgl. Abbildung 2).

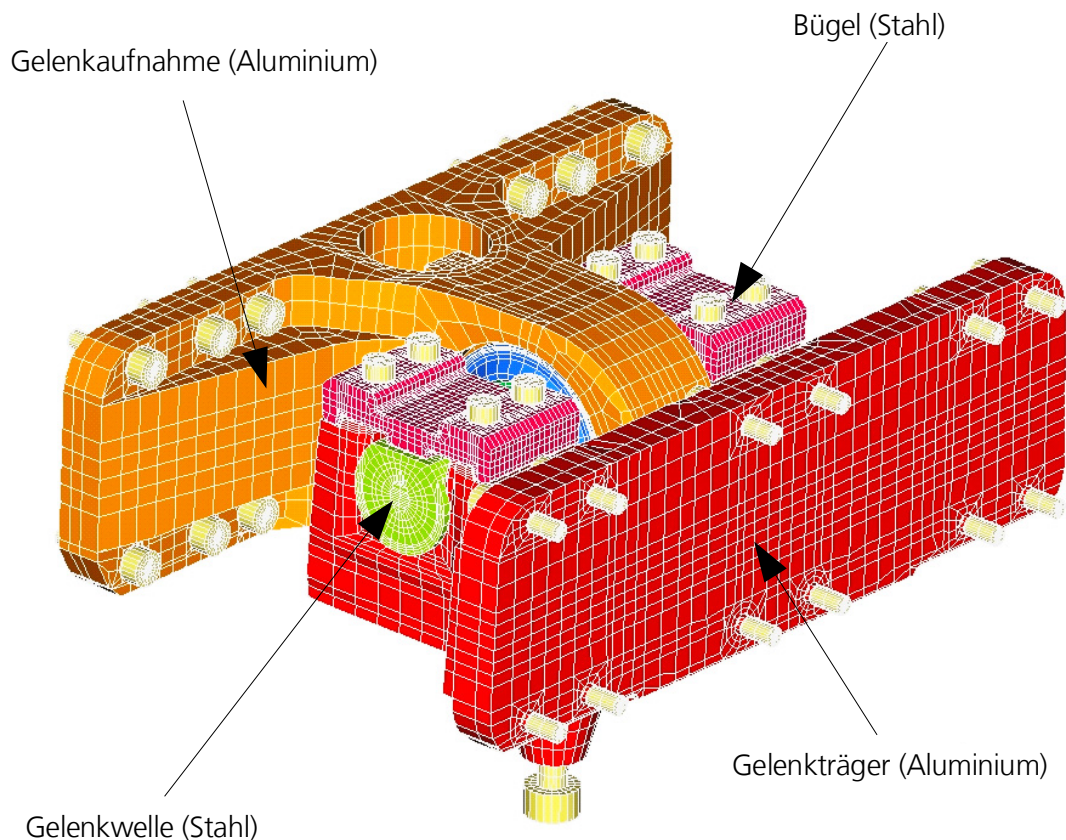


Abbildung 2: Ueberblick über das Gelenk

### 3 Nachweiskonzept

Bereits parallel zur Konstruktion wurde ein FE-Modell für nichtlineare Berechnung aufgebaut, welches für Konzeptentscheide mit berücksichtigt wurde. Die sehr kurze Entwicklungszeit konnte auch dank der frühen Einbindung der nichtlinearen FE-Simulation realisiert werden. Zudem konnte das in den frühen Fasen der Entwicklung bereits erarbeitete Modellkonzept auch für die Nachweisberechnungen verwendet werden.

Das Nachweiskonzept für Wagenkasten und Gelenk sah verschiedene FE-Modelle vor, welche aufeinander abgestimmt wurden. Als Schnittstelle wurde die Fuge zwischen Gelenkaufnahme und Wagenkastenendplatte bzw. Gelenkträger und Wagenkastenendplatte definiert. Der Nachweis des Wagenkastens wurde durch die Firma SAS ausgeführt.

Für die Abnahme des Fahrzeuges war für das Gelenk ein statischer sowie ein Ermüdungsnachweis erforderlich. Der statische Nachweis umfasst die extremalen Längslasten Pufferdruck (1500 kN) und Kupplungszug (1000 kN). Bei diesen Sonderlasten wird lokal eng begrenztes Fließen der Bauteile zugelassen, wobei im Allgemeinen eine Sicherheit von 1 gegen Fließen verlangt wird. Für den Ermüdungsnachweis werden die Betriebslasten verwendet und die Sicherheit gegen Dauerbruch nach Eurocode 9 ausgewiesen.

## 4 Modellkonzept

### 4.1 Netzaufbau

Das FE-Modell wurde im Hinblick auf die Berechnung der Sonderlasten entwickelt. Diese wirken symmetrisch zur vertikalen Längsmittlebene des Fahrzeuges, sodass für den statischen Nachweis eine Symmetriehälfte verwendet werden konnte. Für den Ermüdungsnachweis, welcher mit den Betriebslasten geführt wird, wurde das Vollmodell berechnet. Um die das Gelenk umgebenden Steifigkeiten korrekt wiedergeben zu können, sind die Mittelflächen der Wagenkastengeometrie übernommen und mit einem relativ groben Schalennetz in das Modell integriert worden. Die Wagenkastenendplatten wurden mit Volumenelementen vernetzt und mit vorgespannten Schrauben mit dem Gelenkträger bzw. der Gelenkaufnahme verbunden. Die nachzuweisenden Teile wurden mit hexaederförmigen Volumenelementen aufgebaut.

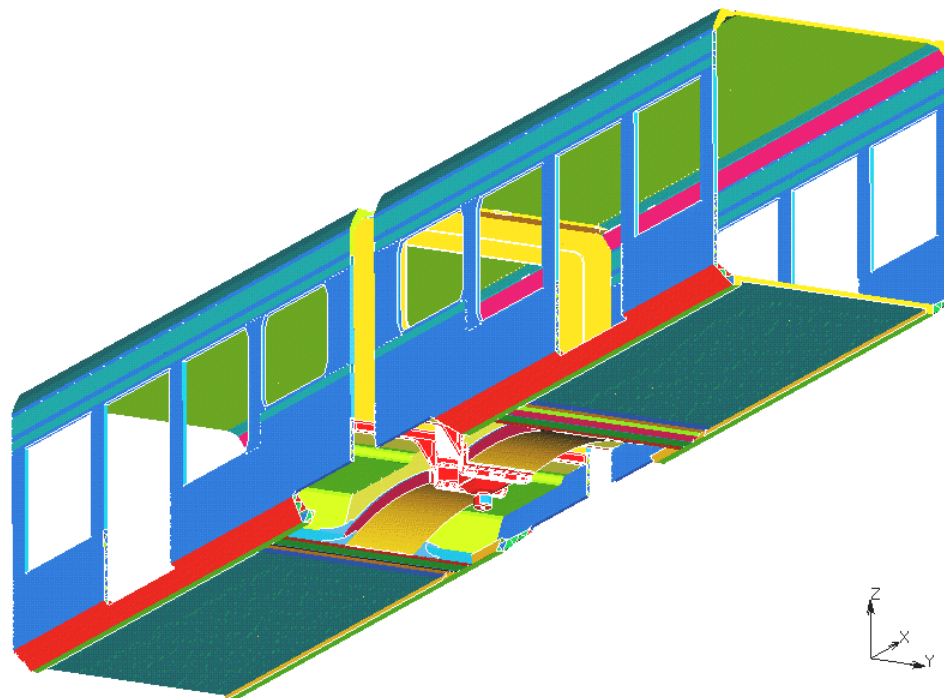


Abbildung 3: FE-Modell für den Ermüdungsnachweis (ca. 550'000 Freiheitsgrade)

### 4.2 Werkstoffe

Für den statischen Nachweis am Halbmodell sind bei den Bauteilen des Gelenkes nichtlinear elastisch/plastische Werkstoffeigenschaften verwendet worden. Die Elastomerteile (Gelenk, Sekundärfedern) wurden mit einem Mooney-Werkstoffgesetz berücksichtigt. Für die Analyse des Vollmodelles unter Betriebslasten wurden alle metallischen Teile linear elastisch berechnet.

### 4.3 Kontaktkonzept

Grundsätzlich wurden alle Gelenkbauteile als einzelne Kontaktkörper definiert. Es gibt keine idealisierten Verbindungen zwischen den einzelnen Teilen des Gelenkes, wozu sämtliche Schraubenverbindungen vorgespannt worden sind. Ebenso ist der Presssitz des Gelenkes in der Gelenkaufnahme mit modelliert worden, wobei zur Verbesserung der Ergebnisqualität analytischer Kontakt verwendet wurde, d.h. dass über die Knoten der Kontaktflächen in MARC eine Nurbsfläche gelegt wird und der Kontakt nicht zwischen Knoten und Elementflächen sondern zwischen den geometrisch viel genauer beschriebenen Nurbsflächen berücksichtigt wird. Besonders aufwändig gestaltete sich die Verbindung zwischen Gelenkwelle und Gelenkträger. Die U-förmige Oeffnung im Gelenkträger wird mit dem angeschraubten Stahlbügel verschlossen. Die Fugen zwischen den verschraubten Teilen verlaufen keilförmig. Dadurch wird mit zunehmender Schraubenvorspannung

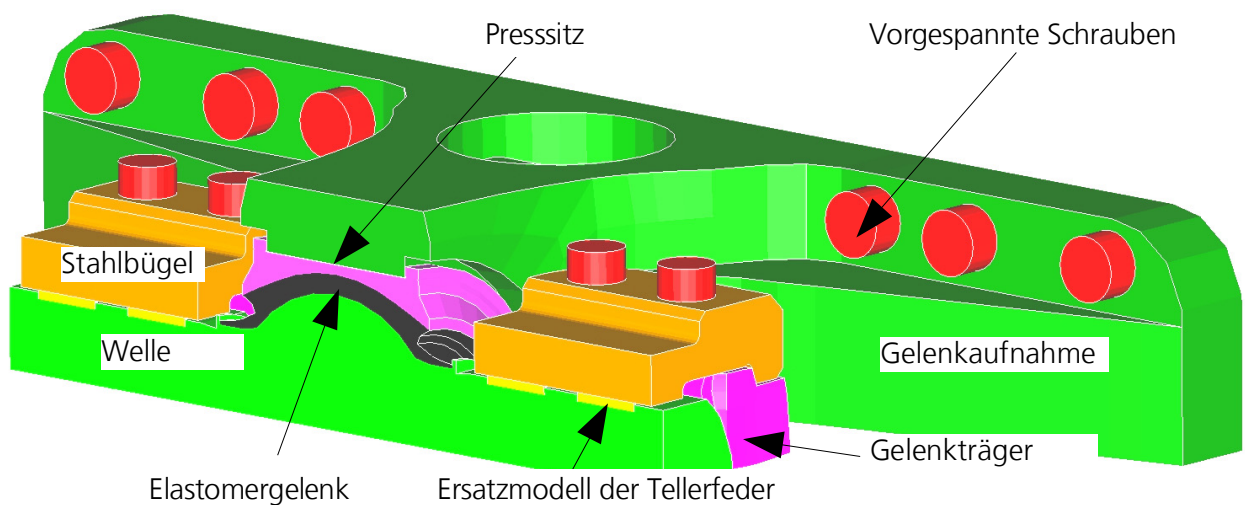


Abbildung 4: Schnitt durch das Gelenk

die Welle in den Schenkeln des U's in horizontaler Richtung immer stärker eingeklemmt. Zusätzlich sind Tellerfedern zwischen Gelenkwelle und Stahlbügel dafür besorgt, dass in vertikale Richtung die Welle an den Grund des U's gedrückt wird. Die Einspannbedingung der Gelenkwelle im Gelenkträger ist zentral für den Kraftfluss des Gelenkes. Je nachdem wie viel Einspannmoment diese Verbindung aufnehmen kann, reduziert dies die Beanspruchung in der Welle und verteilt die bei den Druck-Sonderlasten auftretenden Pressungen besser. Bei den Zug-Sonderlasten wird der Stahlbügel dafür sorgen, dass die U-förmige Oeffnung nicht aufklafft und der Kraftschluss zwischen Gelenkwelle und Gelenkträger bestehen bleibt.

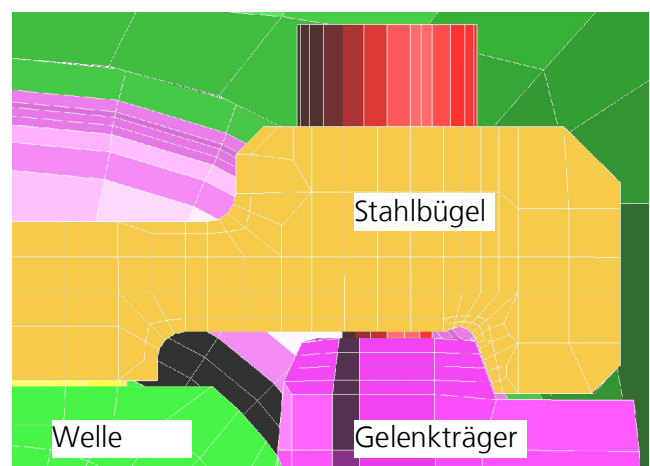


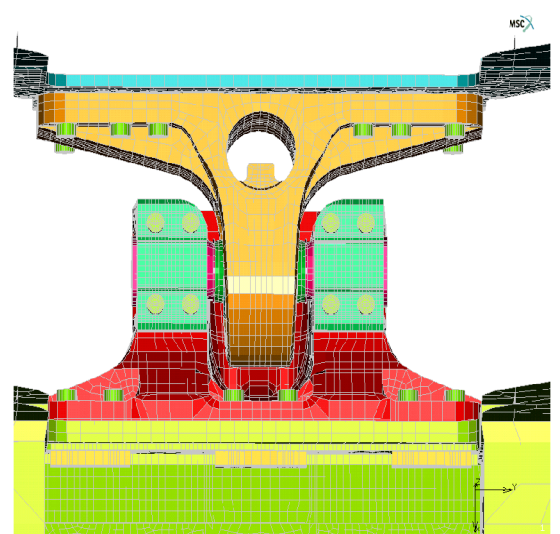
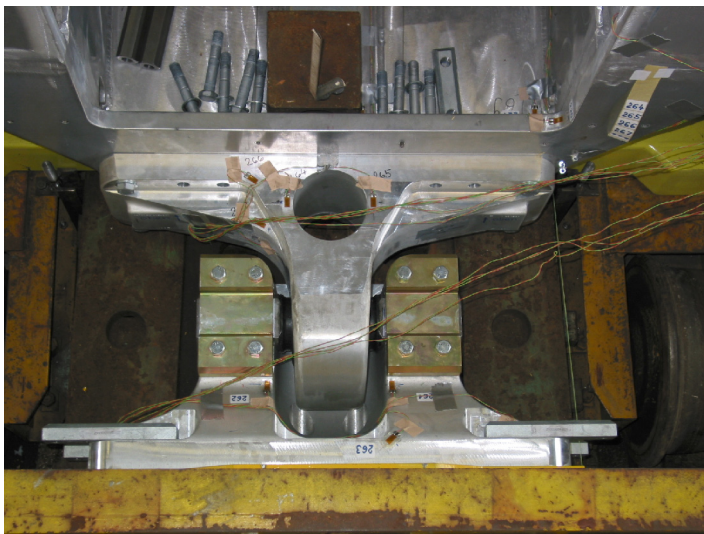
Abbildung 5: Detail Keilverbindung

## 4.4 History

Die Berechnung wurde in 6 Loadcases (Steps) unterteilt, welche je mit mehreren Inkrementen berechnet wurden. Beim Aufbau der History musste darauf geachtet werden, dass die einzelnen Verbindungen entsprechend der wirklichen Montagereihenfolge miteinander verbunden wurden. Dazu waren vorübergehend in den ersten Steps Hilfsrandbedingungen erforderlich, welche die Teile in der Montageposition hielten, bis die Schrauben "angezogen" bzw. der Presssitz gefügt war. Daraus resultierte eine History mit 6 Steps, wobei erst der letzte Step die eigentlichen Lasten enthielt. Die Berechnung erfolgte parallelisiert auf 2CPU's einer sgi-Octane2 mit dem IRIX 64bit Solver von MSC Marc.

## 5 Ergebnisse

Für die Nachweise wurden die Reaktionskräfte, die Deformationen, die ungemittelten Elementknotenspannungen und die plastischen Dehnungen verwendet. Im Weiteren konnten die wirkenden Schraubenkräfte sowie die Kontaktzonen (Zonen der Lastübertragung von Gelenkaufnahme/Gelenkträger auf die Wagenkästen) im Nachweis des Kastens berücksichtigt werden. Die mechanischen Spannungen in den Wagenkästen sowie im Gelenk wurden mit ca. 150 DMS ermittelt. Am Gelenk selber wurden 9 DMS angebracht. Die Validierung des FE-Modelles erfolgte mit den statischen Lastfällen, es wurden also nebst den Nichtlinearitäten der Kontaktfugen und des Elastomergelenkes auch die Einflüsse des lokalen Fließens mit einbezogen.



Abbildungen 6 und 7: Anordnung der DMS am Versuchsträger

Der Vergleich der Messungen mit der Berechnung lieferte die geforderte Übereinstimmung im Bereich  $< 20\%$ . An verschiedenen Stellen lagen die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Spannungen sogar unter  $10\%$ .

## 6 Schlussbemerkungen

Die strukturmechanische Simulation dieses Gelenkes konnte mit MSC.Marc in einer Detailtreue realisiert werden, welche heute noch nicht selbstverständlich ist. Die Berücksichtigung mehrerer verschiedener Nichtlinearitäten in einer derart grossen Struktur verlangt nach wie vor einiges von der Berechnungsseite. Insbesondere können die langen Rechenzeiten zu einem Problem werden. Diese werden durch die Verwendung der hexaederförmigen Solids anstelle der üblichen Tetraederelemente deutlich reduziert, ohne dass bei der Ergebnisqualität Abstriche hingenommen werden müssen. Ein Hexmesh ist jedoch teurer als ein Tetmesh, zudem erfordert die Vernetzung von Volumenmodellen einer gewissen Komplexität auch grosse Erfahrung. Dafür mussten beim vorliegenden Berechnungsprojekt bei der Abbildung des Kraftflusses keine Kompromisse eingegangen werden. Die gute Uebereinstimmung von Messung und Rechnung hat gezeigt, dass sich der Aufwand gelohnt hat. Zudem sind durch die umfassende Modellierung viele Diskussionen über Randbedingungen entfallen.

## 7 Anhang

Hard- und Software:

Marc 2003 auf sgi IRIX 64 bit (Solver)  
Mentat 2003 auf Linux 32 bit (Pre/Post)  
I-DEAS 10 auf Windows (Geometrie/Meshing)

Literatur:

*Simon Leutenegger*, LEC Engineering & Consulting, Winterthur:  
Gesenkgeschmiedete Aluminium-Bauteile für Schienenfahrzeugstrukturen  
erschieden in ZEVrail, Ausgabe November/Dezember 2004

*Steffen Obst*, Stadler Pankow GmbH, Berlin:  
Der FLIRT im Eisenbahnpersonenverkehr  
erschieden im Eisenbahn Amateur 12, 2004