

Der Aluminium-Wagenkasten 4.1

Leichtbau durch integrierte FSW-Sandwiches

Simon Leutenegger	ZHAW, IMES Institut für Mechanische Systeme, Winterthur LEC Leutenegger Engineering & Consulting, Winterthur
Roland Fehr	ZHAW, IMES Institut für Mechanische Systeme, Winterthur
Cyril Huber	ZHAW, IMES Institut für Mechanische Systeme, Winterthur
Markus Hartwig	Airex Composite Structures, Altenrhein
Max Hossfeld	Rapid Technic AG, Killwangen
David Bossert	Rapid Technic AG, Killwangen

Inhalt

Bisherige Entwicklung der Alu-Wagenkästen

Wagenkasten 4.1: Konzept

Fertigungs-Konzept

KTI-Projekt: Ausgewählte Entwicklungs-Schritte

Kosten

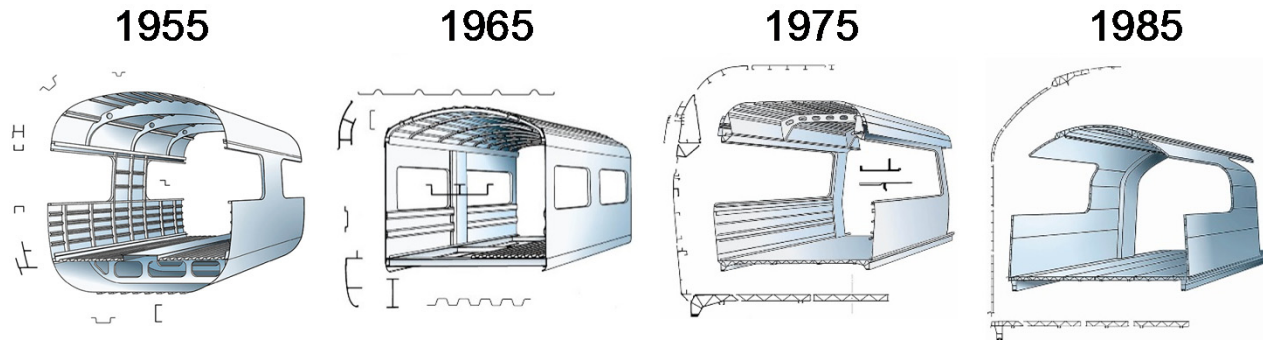
Lebensdauer 30 Jahre mit Sandwichs?

Zusammenfassung

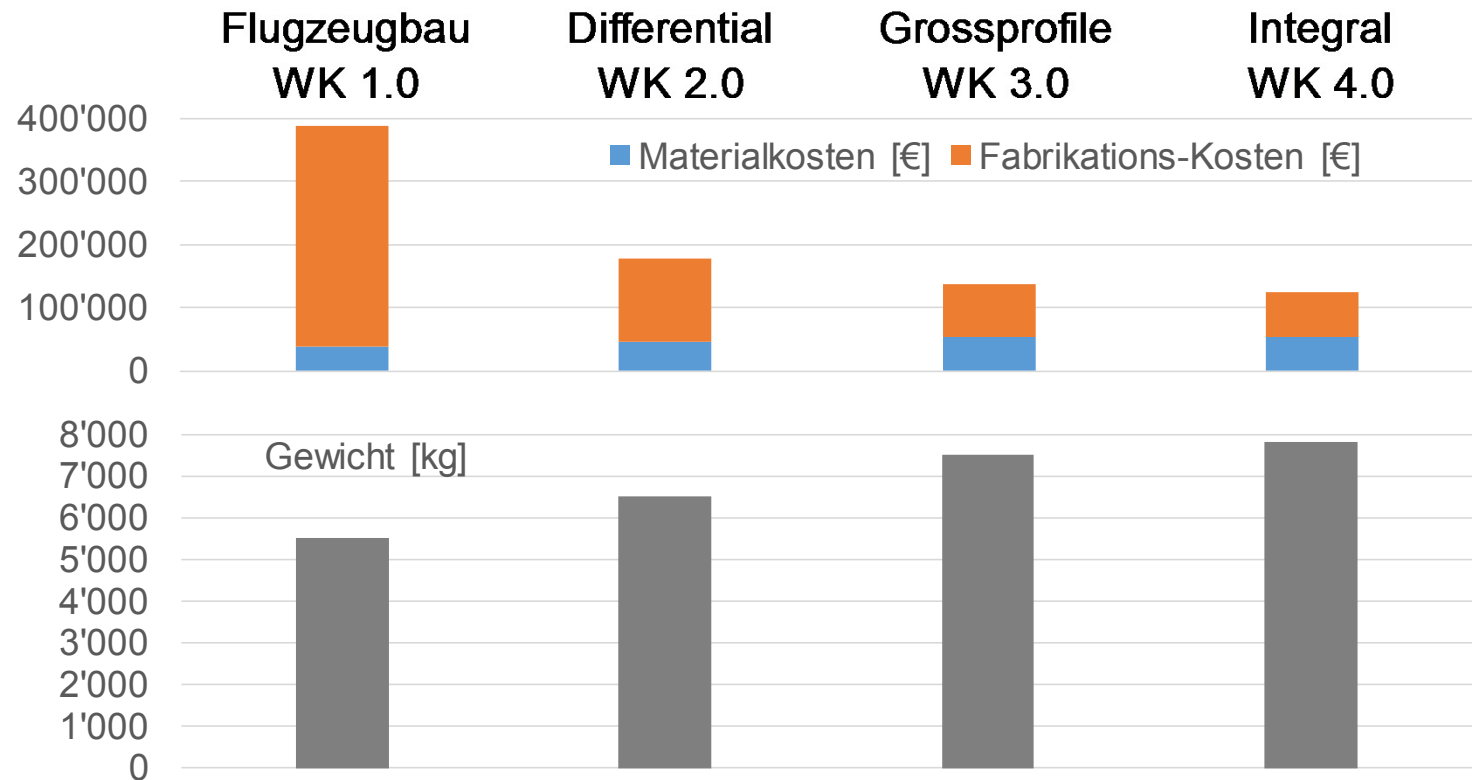
Ausblick

Entwicklung der Alu-Wagenkästen

Beispiel-Werte für Wagen 24 m



Quelle: Alusuisse / Alcan



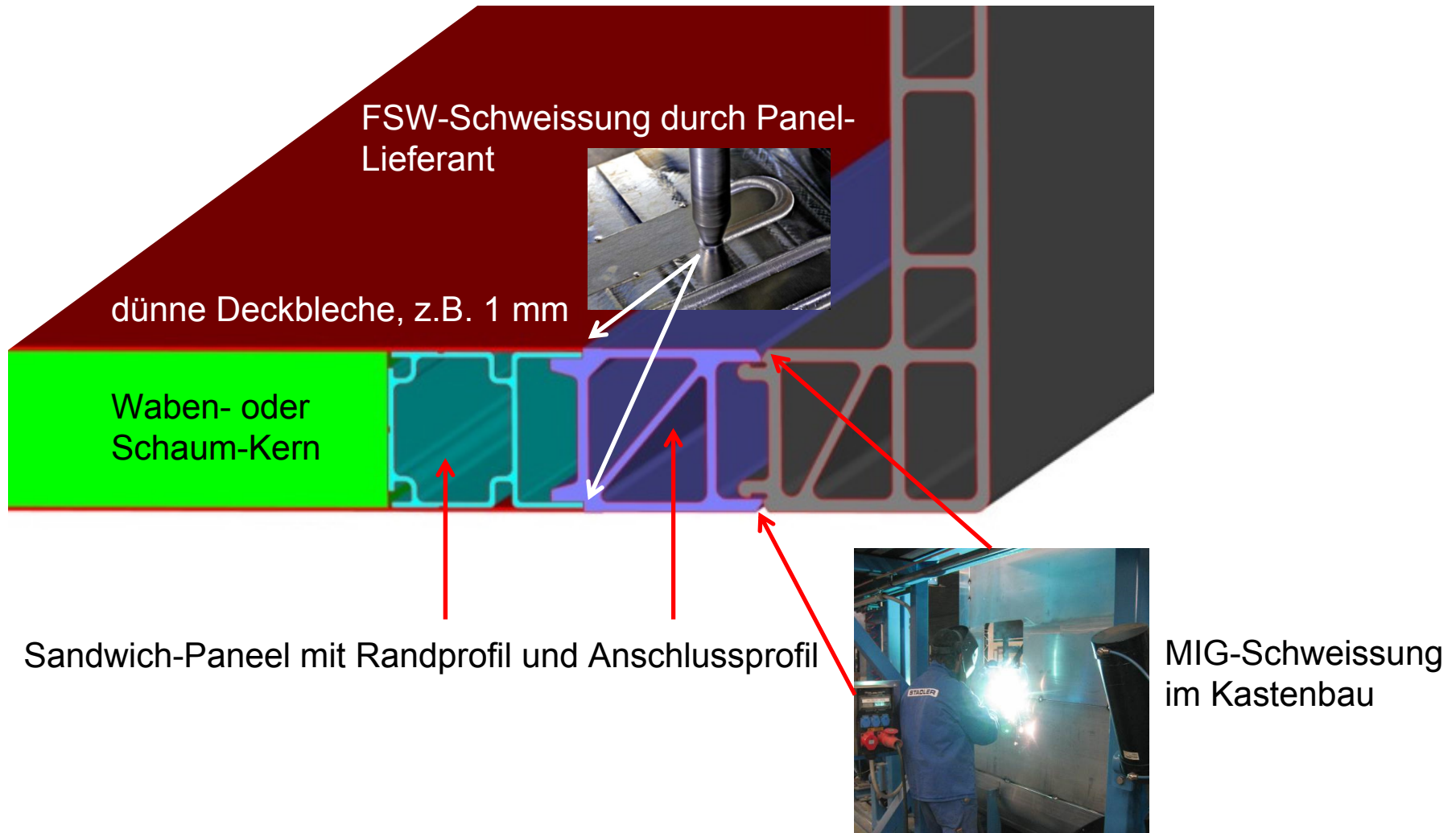
Wagenkasten 4.1: Ziele

- Gewichtsreduktion durch Sandwich-Bereiche
- Beherrschbare Technologien und bekannte Fügeverfahren
- Bisheriger Kastenbau soll nicht umgestellt werden
 - Einsatz-erprobte Schweiß-Technologien
 - keine höhere Toleranz-Anforderungen
- Wasserdichte Verbindungen
- Hohe Steifigkeiten
- Ausreichende Festigkeiten
- Die wesentlichen Kraftflüsse gehen über Verschweißungen
- Anerkannte Nachweis-Prozesse, keine dimensionierende Lebensdauer-Nachweise für Verklebungen
- Kombinations-Möglichkeit mit zusätzlicher Wärme- und Schalldämmung, d.h.
 - sekundäre Gewichtsreduktion
 - Reduktion des Platzbedarfs für Struktur plus Isolation
- Mehrkosten pro eingespartes Kilogramm < € 20
- Reparierbarkeit gewährleistet

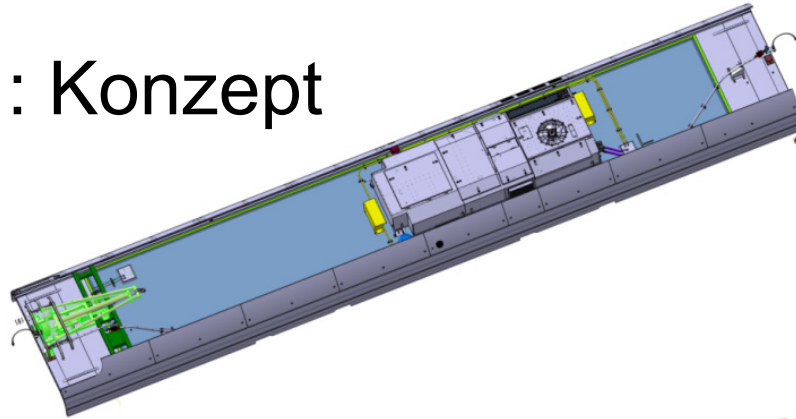
Bisherige Hybride Wagenkästen

- Schienenfahrzeuge mit z.B. Sandwich-Dächern sind seit den 90er-Jahren im Einsatz und sind zugelassen.
- Bisherige Probleme: Dickschichtgeklebter Verbund mit dem Rest des Wagenkastens:
 - Dichtigkeit über 40 Jahre Lebensdauer fraglich
 - Weiche Verbindung, d.h.
 - Sandwich-Bereiche entziehen sich dem Kraftfluss
 - tiefe Eigenfrequenzen
- Diese Nachteile werden mit der neuen voll verschweissten Bauweise aufgehoben.

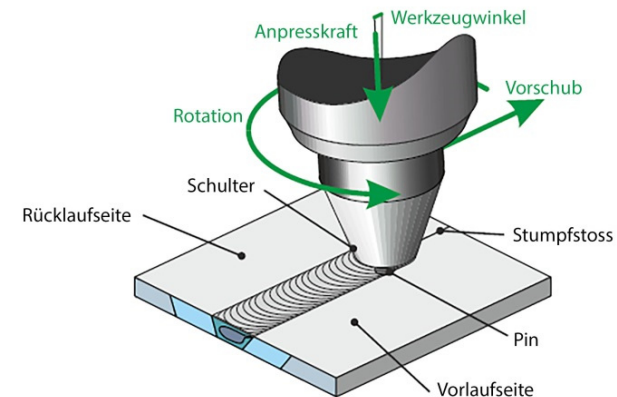
Wagenkasten 4.1: Konzept



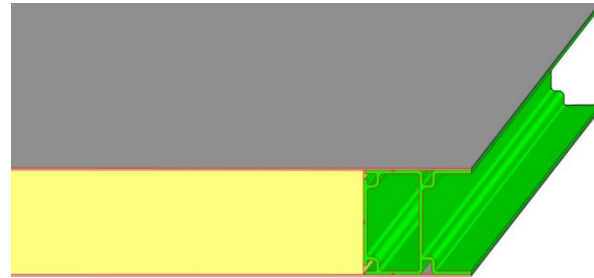
Wagenkasten 4.1: Konzept



- Profilplatten werden ersetzt durch einbaugleiche Sandwichplatten mit FSW-geschweissten Anschlussprofilen (Friction Stir Welding = Reibrührschweissen).
- Einbau im Kasten wie bisher mittels MIG, Kastenbauer braucht keine FSW-Anlage.
- Warum FSW in der Paneel-Herstellung?
 - Niedrige Prozess-Temperatur, d.h. nahe an Kern und Verklebungen möglich
 - Verschweissen dünner Sandwich-Deckbleche um 1 mm wesentlich prozess-sicherer als mittels Widerstands-Schweissung

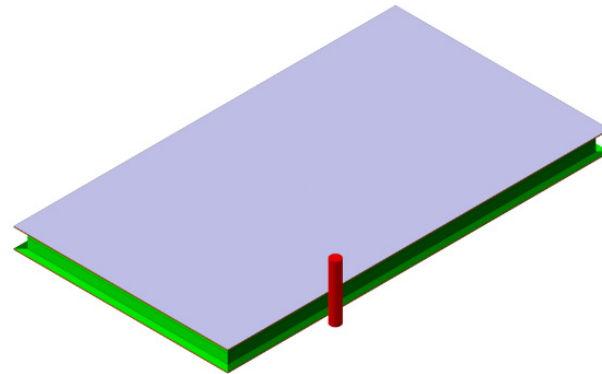


Fabrikationskonzept und Toleranzen

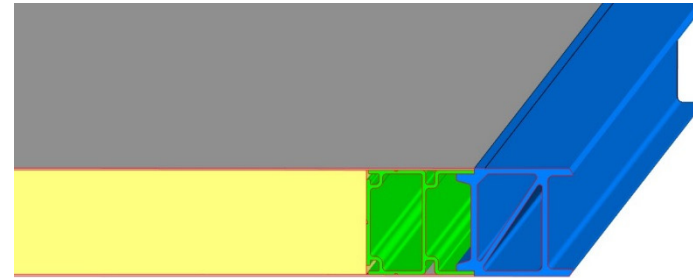


Panel-Herstellung:

- Sandwich inkl. Randprofil geklebt
- anschliessend zusammen mit Deckblechen besäumt
- Erforderliche Genauigkeit für FSW-Schweissung ans Anschluss-Profil ok
- Abmessung des fertigen Panels mit grosser Genauigkeit definiert

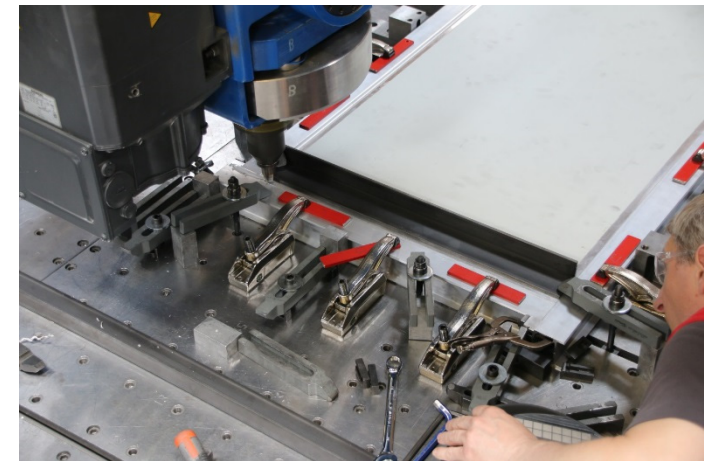
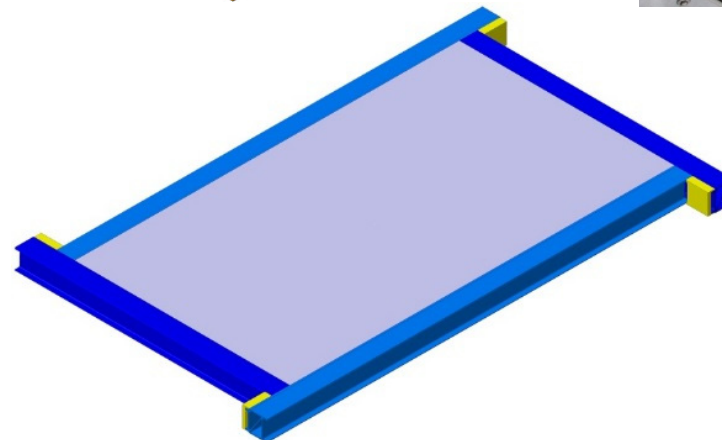
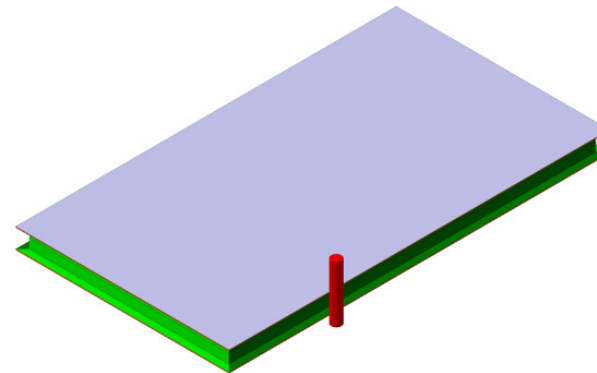


Fabrikationskonzept und Toleranzen

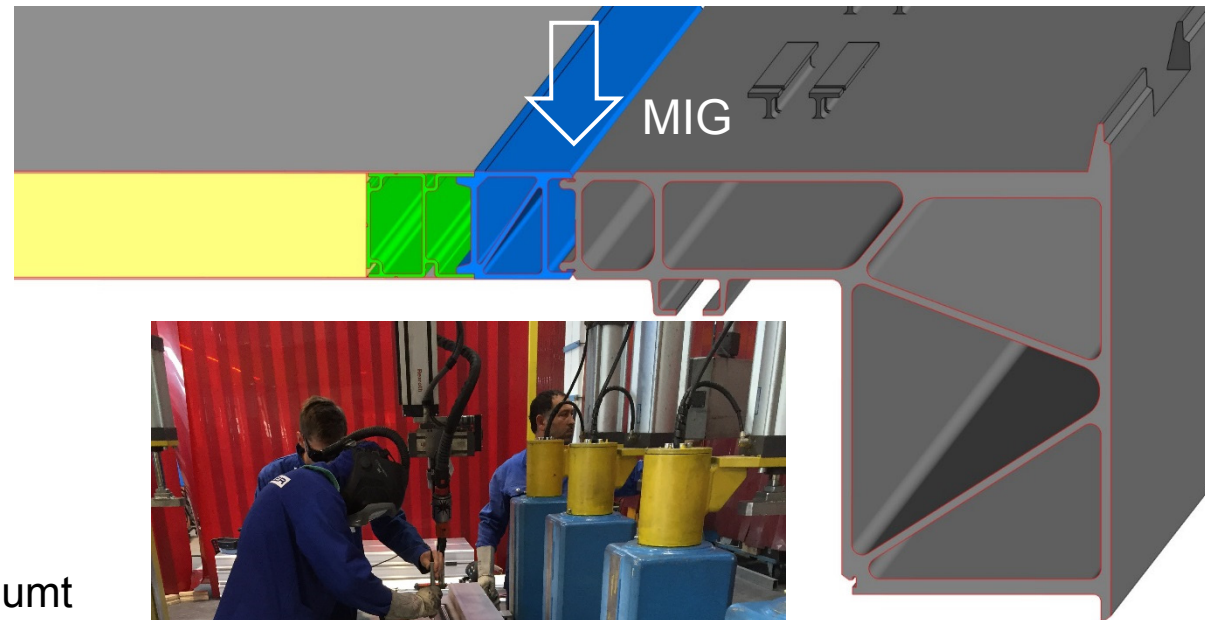


Panel-Herstellung:

- Sandwich inkl. Randprofil geklebt
- anschliessend zusammen mit Deckblechen besäumt
- Erforderliche Genauigkeit für FSW-Schweissung ans Anschluss-Profil ok
- Abmessung des fertigen Panels mit grosser Genauigkeit definiert
- FSW-Verschweissung mit Anschluss-Profil

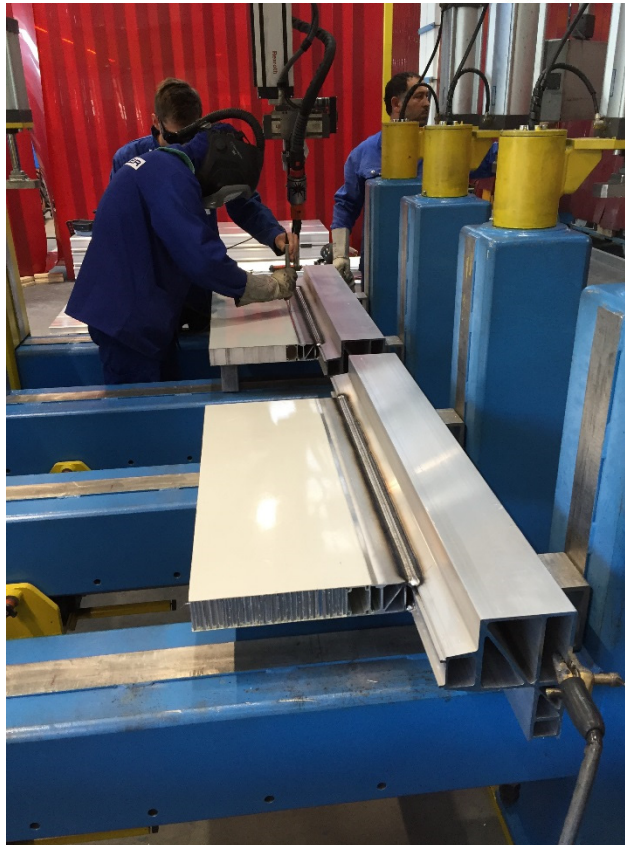


Fabrikationskonzept und Toleranzen



Panel-Herstellung:

- Sandwich inkl. Randprofil geklebt
- anschliessend zusammen mit Deckblechen besäumt
- Erforderliche Genauigkeit für FSW-Schweissung ans Anschluss-Profil ok
- Abmessung des fertigen Panels mit grosser Genauigkeit definiert
- FSW-Verschweissung mit Anschluss-Profil



Kastenbau:

- Massgenaue Paneele erfordern keine weiteren Toleranzaufnahmen mehr, d.h. Schiebesitze etc. entfallen

KTI-Projekt



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF

Kommission für Technologie und Innovation KTI
Förderagentur für Innovation

Projekt-Nr. 17118.1 PFIW-IW

Gewichtseinsparung durch Integrierte Sandwich-Technologie für Schienenfahrzeuge

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



PL, Konstruktion, Berechnung,
Versuche



Technologie



FSW



Sandwich

Weitere Sponsoren



Constellium

Untergurt-Profile

STADLER

MIG-Schweissung, Zuschnitt

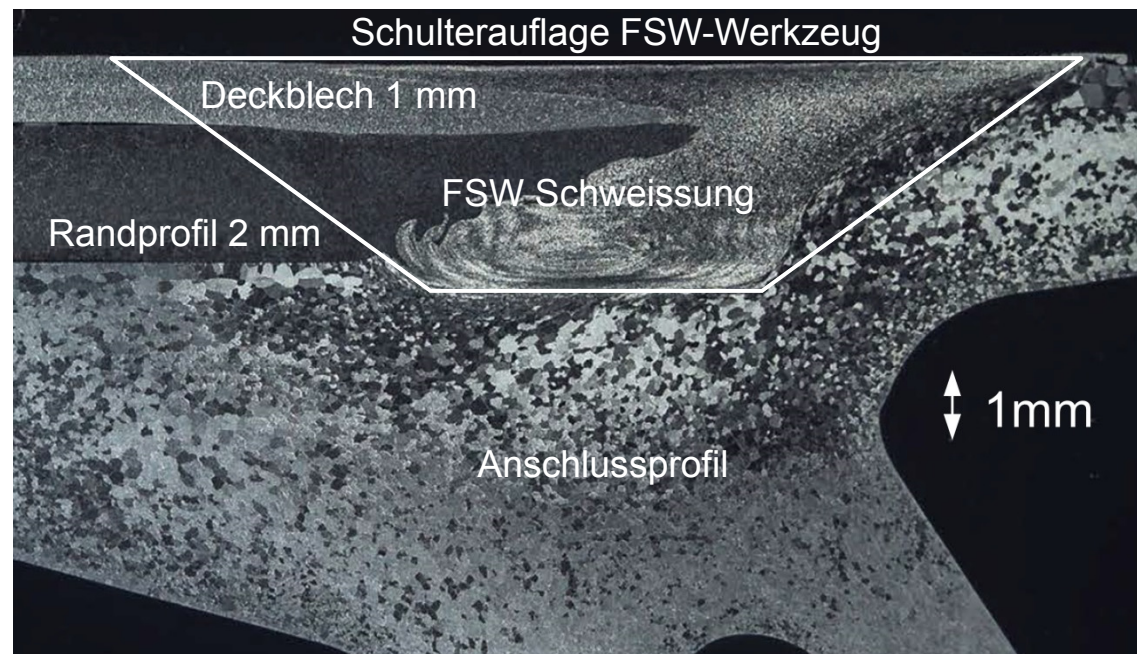
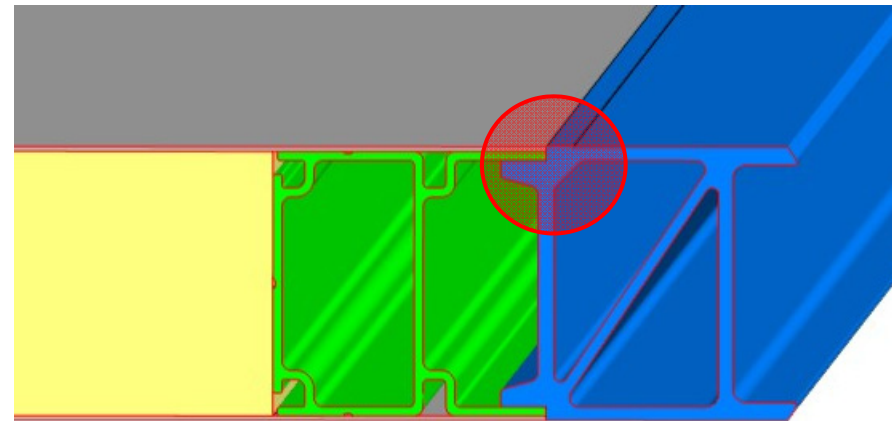
Projekt-Dauer: Mai 2015 bis Februar 2017

KTI-Projekt Ziele: Machbarkeit zeigen

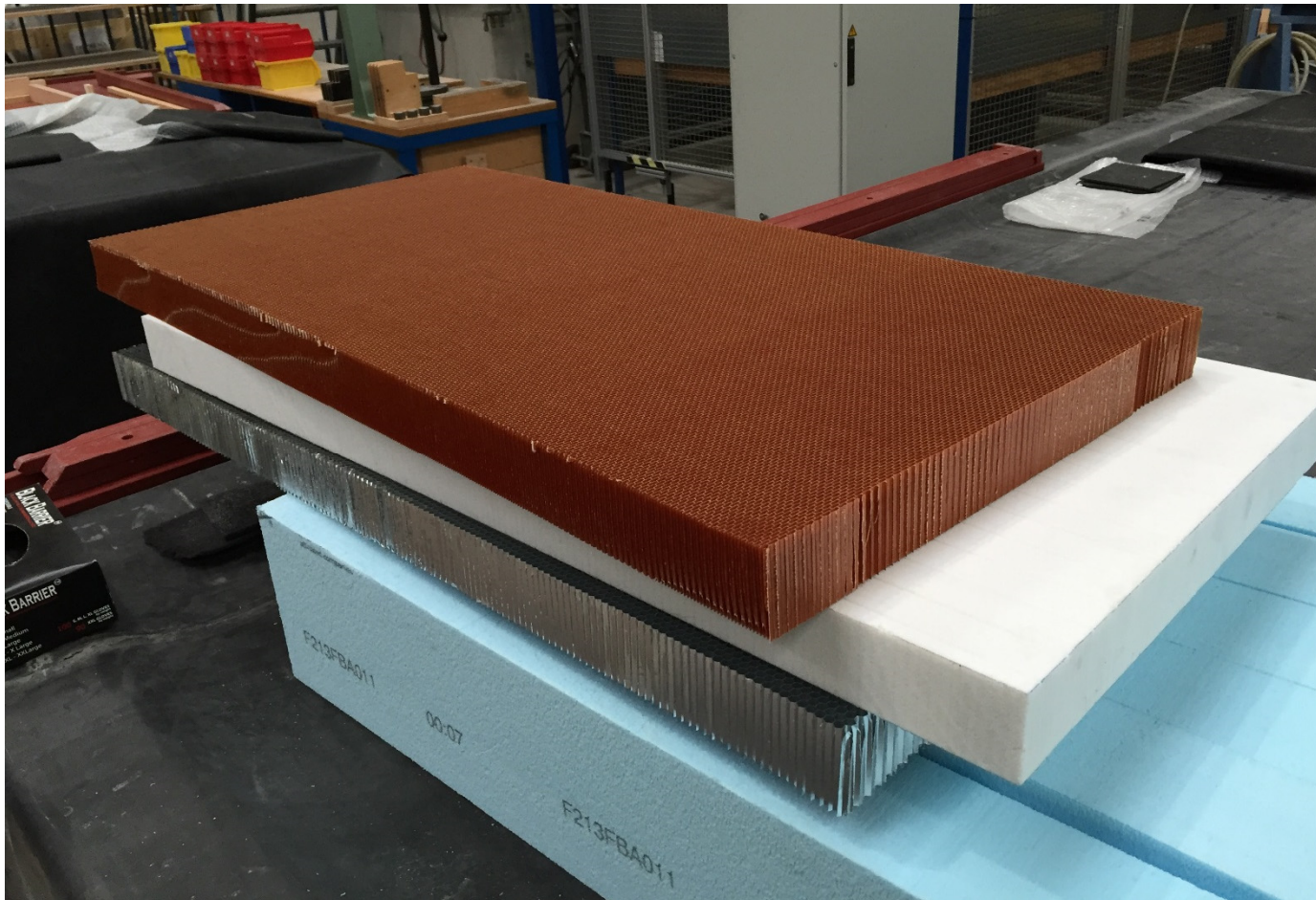
- Bauweise verglichen mit Alu-Integral:
 - gleiche oder bessere **Festigkeit**, Lastfälle gemäss Norm EN 12663
 - gleiches oder besseres **Ermüdungsverhalten**, Lastfälle gemäss Norm EN 12663
 - Normkonformes **Kollisionsverhalten** gemäss EN 15227 darstellbar
 - Wagenkasten **Lebensdauer** grösser als 30 Jahre
 - gleiche oder bessere **Wärme- und Schallisolation**
 - Erfüllung der Anforderungen für **Tritt- und Hagelfestigkeit**
- Messbare Projekt-Ziele:
 - Das neue Verbindungskonzept ist für den Anwendungsfall Wagenkasten für Schienenfahrzeuge **auskonstruiert** und rechnerisch **dimensioniert**.
 - Der rechnerische **Auslegungsprozess** des Verbindungskonzeptes in Wagenkastenstrukturen mittels **FEM** ist definiert.
 - Die **Herstellbarkeit** ist an **Probestücken** erprobt und der Herstellprozess qualifiziert.
 - **Proben** sind hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Festigkeit **geprüft**.
 - Die neue **FSW-Verbindungstechnologie** ist bezüglich geltender Normen und Vorschriften für Schienenfahrzeuge bewertet.
 - Die **technischen** wie **kommerziellen** Aspekte der neuen Bauweise sind mit **bestehenden** und im Schienenfahrzeugbau eingesetzten Technologien **verglichen**.

Die 3-Blech-FSW-Naht

- mit 1 mm Deckblech anspruchsvoll, aber prozess-sicher beherrschbar
- Alle Schweissparameter konsolidiert
 - Spindel-Druck
 - Drehzahl / Drehrichtung
 - Vorschub
 - Werkzeug



Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



Nomex-Waben
R-I 4.8-48
Industriequalität

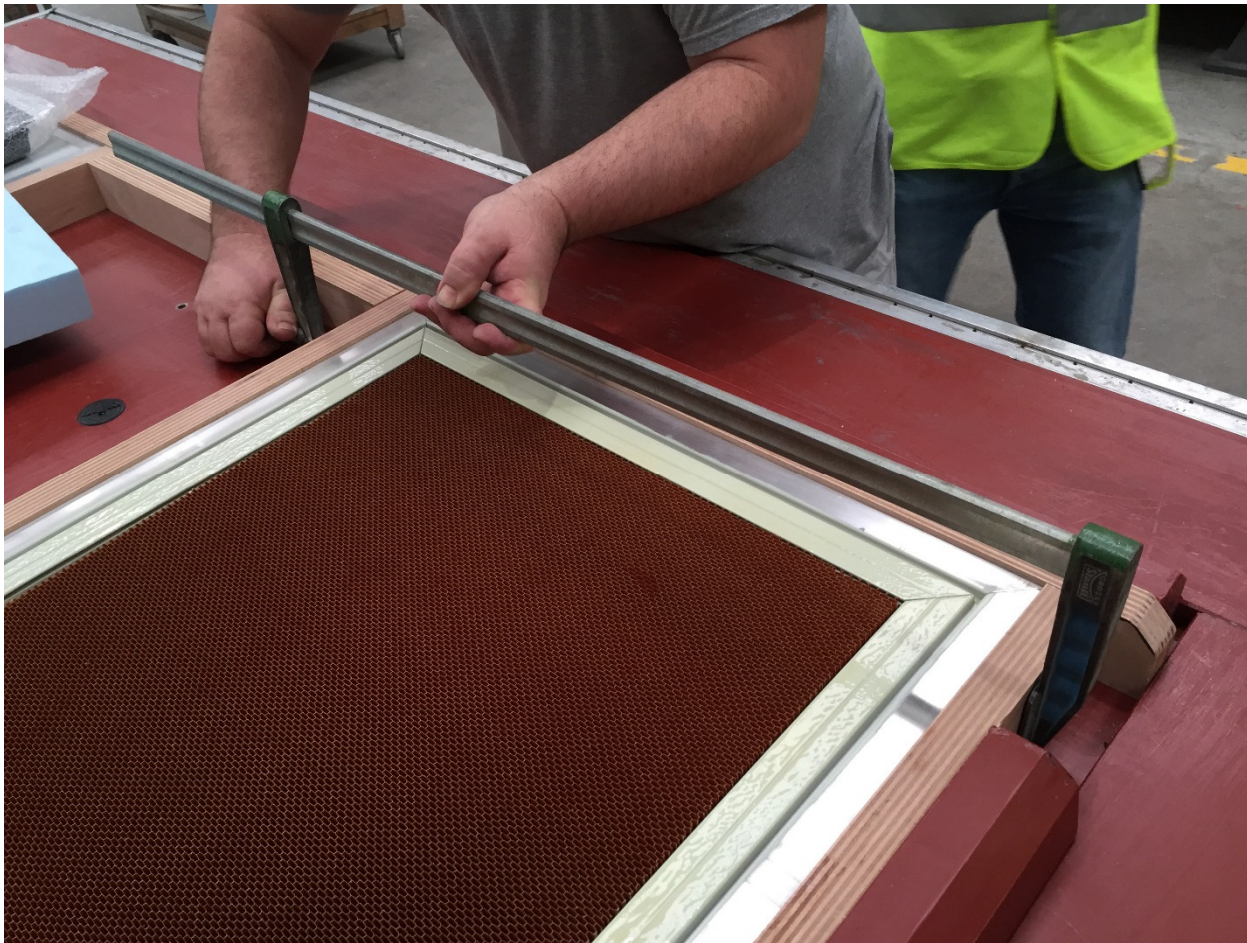
PET-Schaum
T90.100

Alu Waben
6.4-60

Kern-Werkstoffe

Kern	Spez. Gewicht [kg/m ³]	Therm. Isolation	Akkustik	Tritt-Festigkeit	Platten-Steifigkeit	Geeignet für
Nomex-Waben	48	+++	++	++	++	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenplatte mit separatem Innenboden • Zwischenboden • Seitenwand • Dach
Alu-Waben	60	-	++	+	+++	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenplatte mit separatem Innenboden • Zwischenboden • Seitenwand
PET-Schaum	110	+++	++	+++	+	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenplatte direkt begehbar • Zwischenboden • Seitenwand • Dach

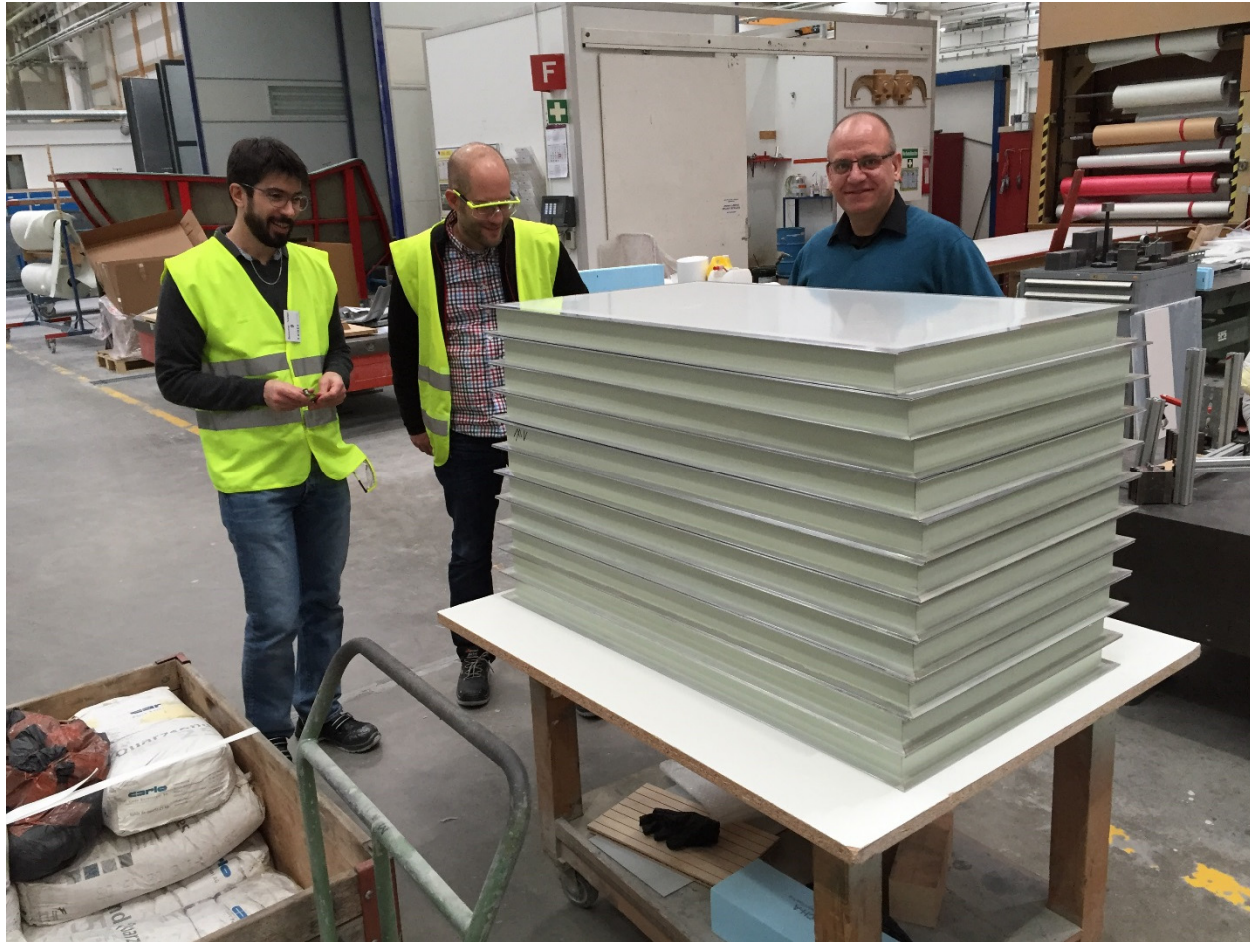
Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



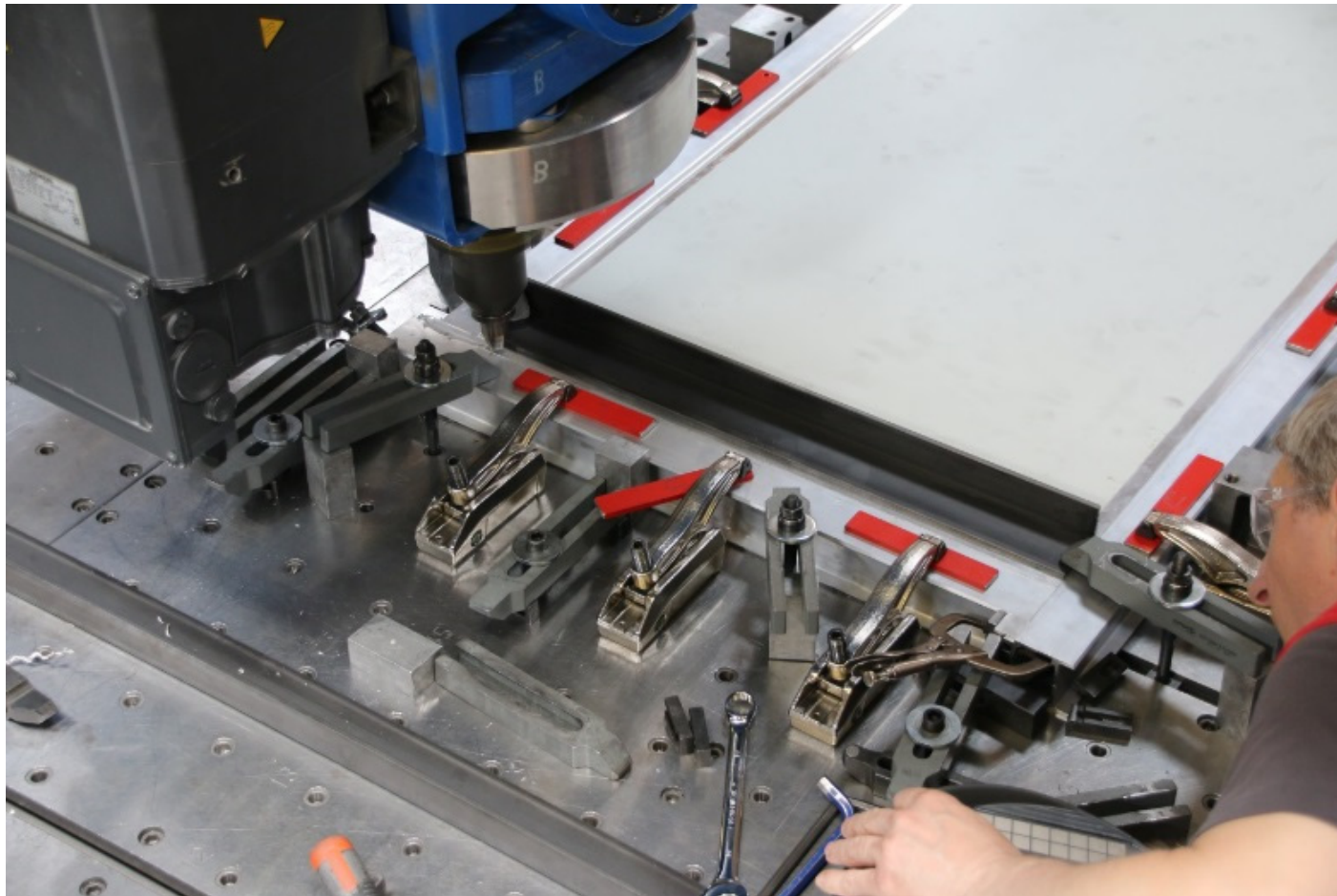
Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



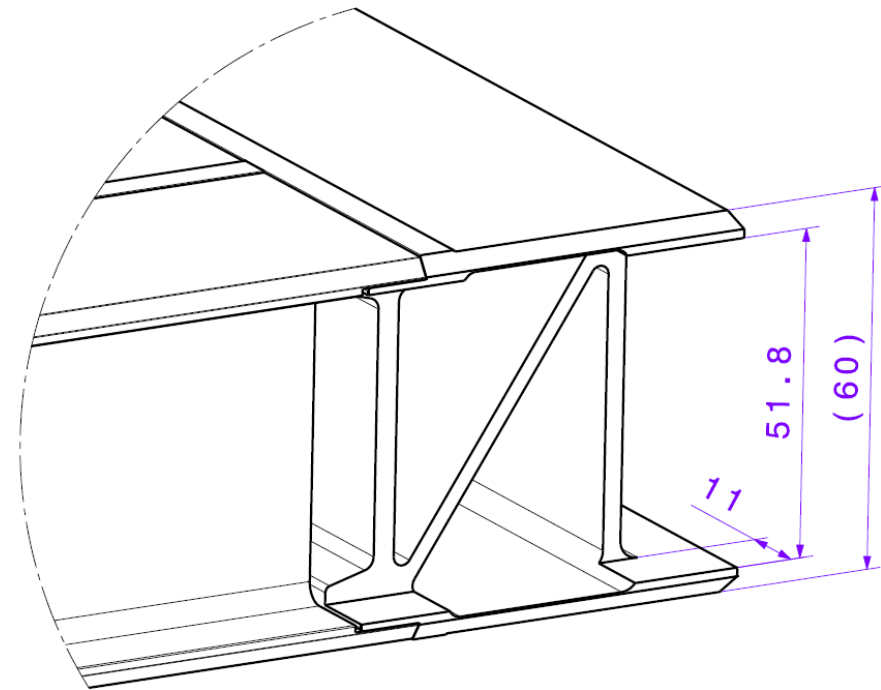
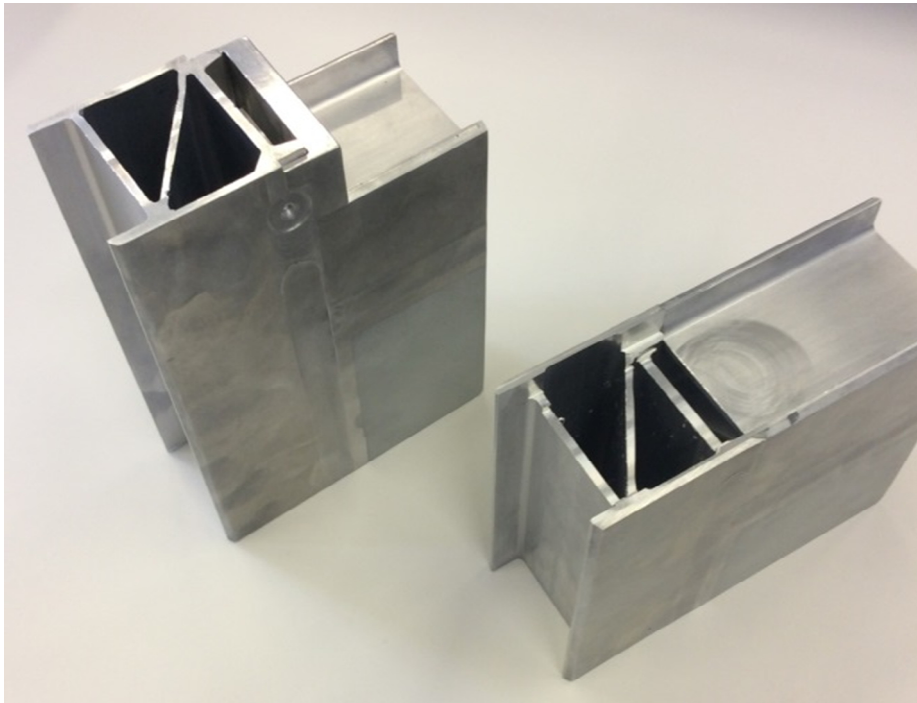
Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



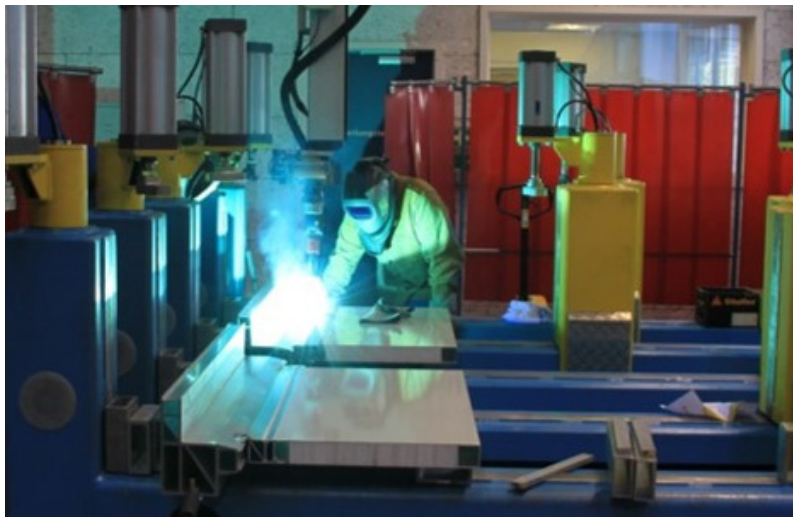
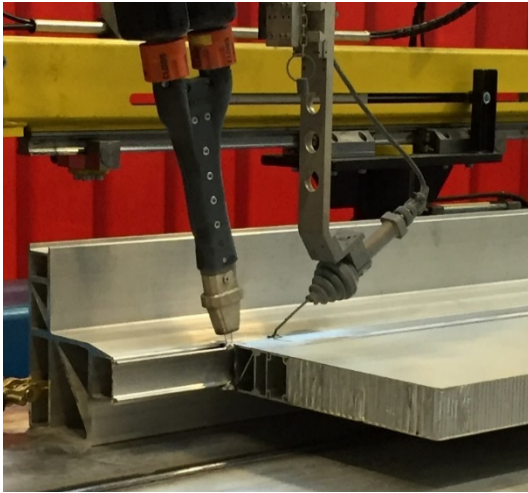
Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



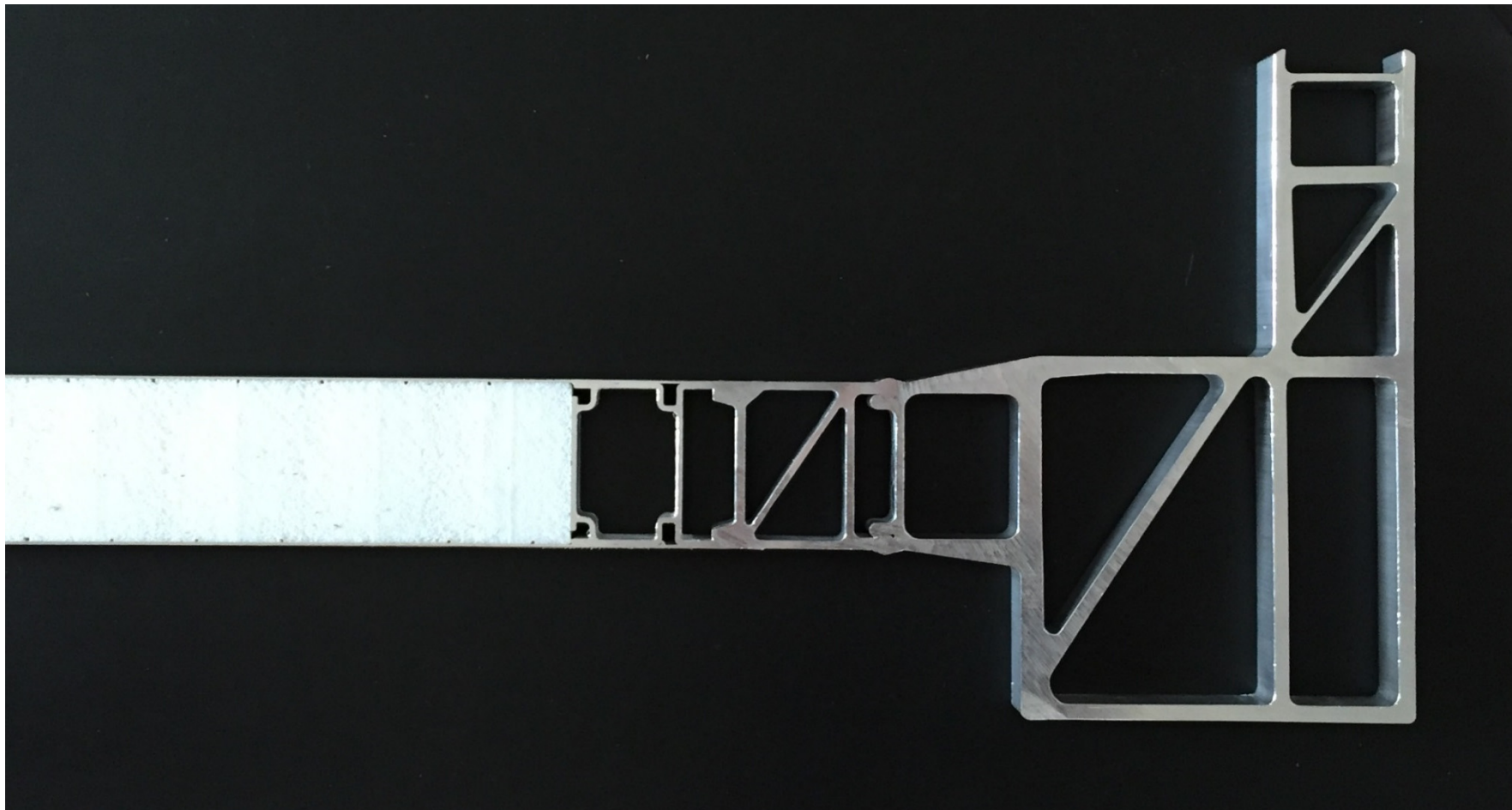
Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



Herstellung von Demo- und Test-Paneelen

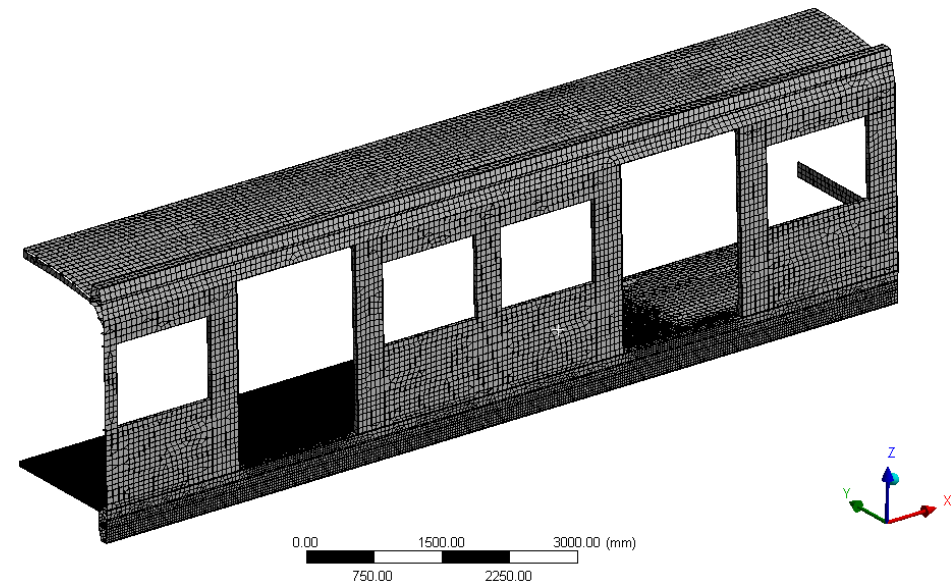
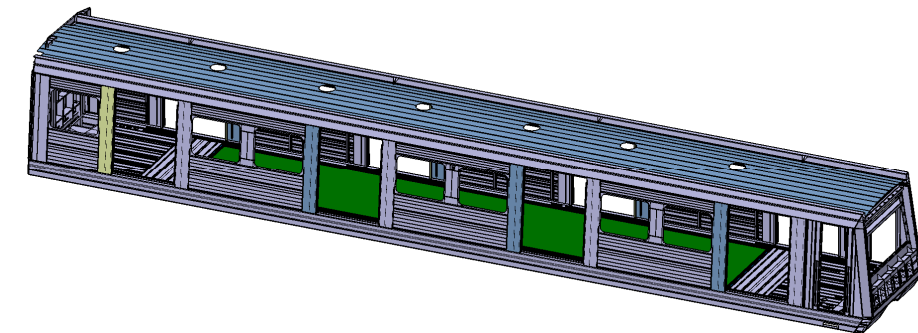
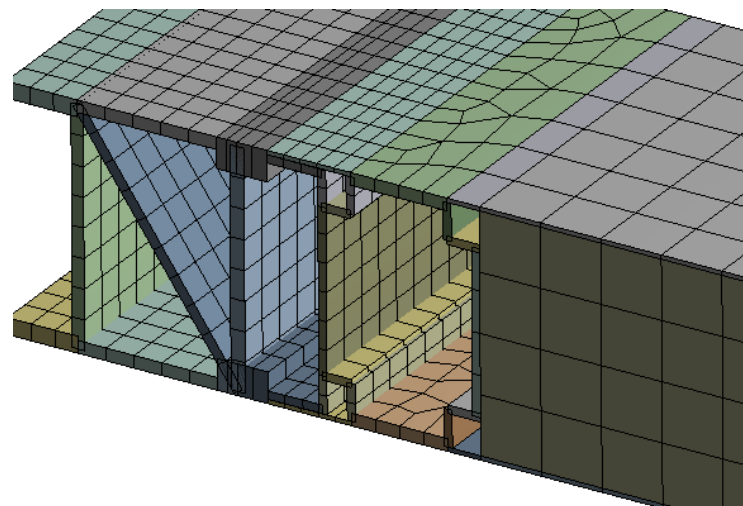


Herstellung von Demo- und Test-Paneelen



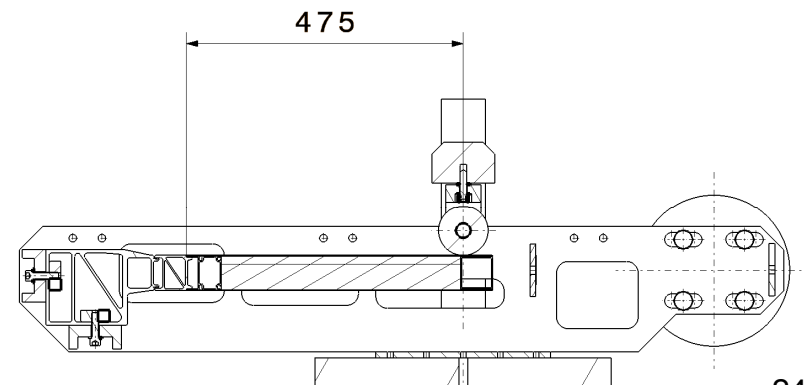
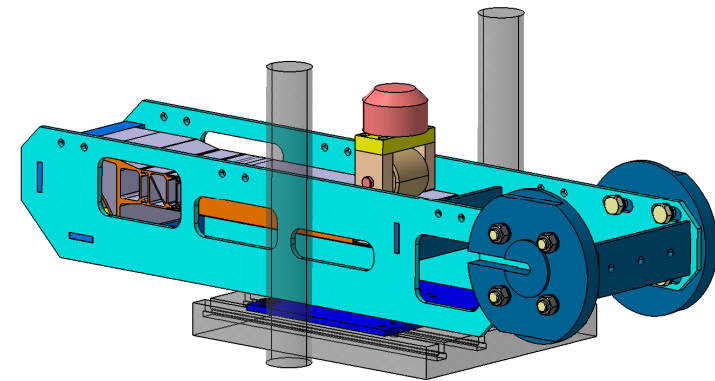
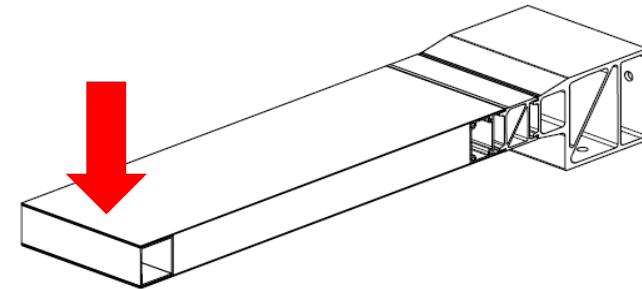
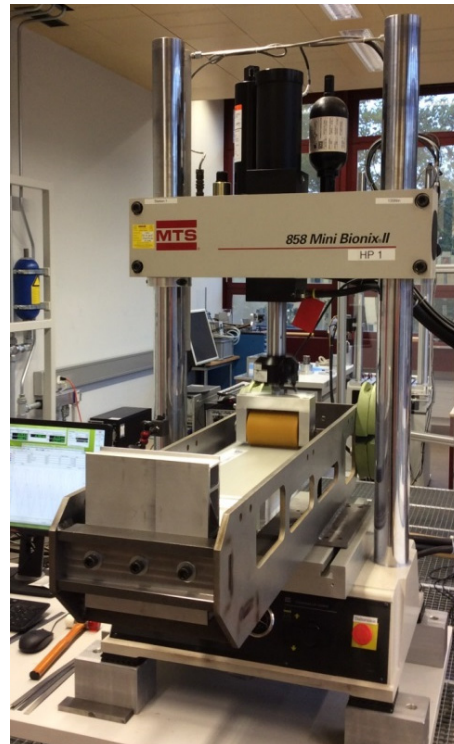
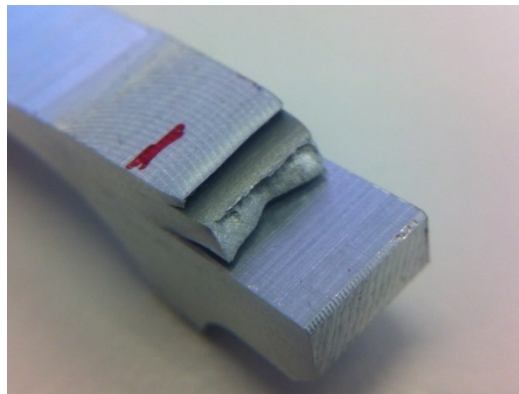
FE-Analysen

- Wichtigste Lastfälle nach EN12663 statisch und Ermüdung an beispielhaftem vereinfachtem Metro-Wagenkasten mit Sandwich-Boden nachgewiesen
- **Modellierungs-Technik Sandwich und Anschluss-Details erarbeitet, vereinfacht und verifiziert**
- Zufriedenstellende Resultate ohne (nichtlineare) Kontaktbedingungen im Bereich der FSW Schweissung
- Lineare Kontaktbedingungen zwischen Deckblech und Kernwerkstoffen



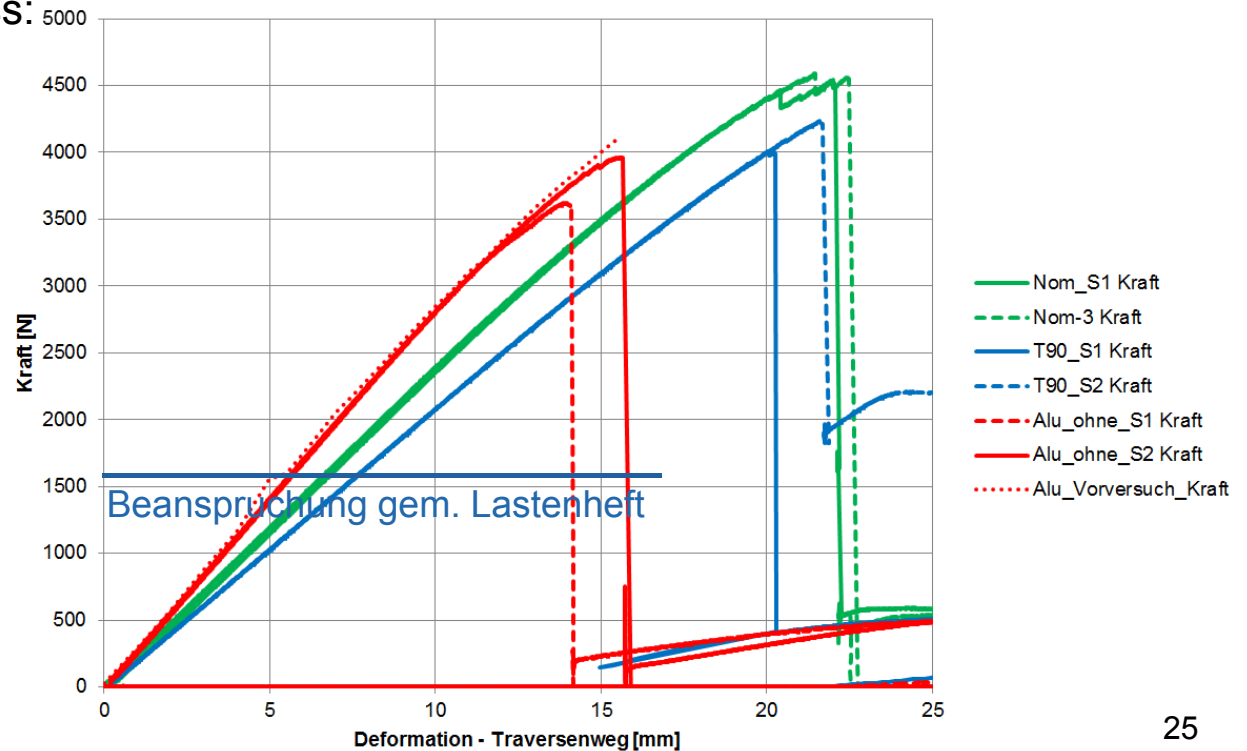
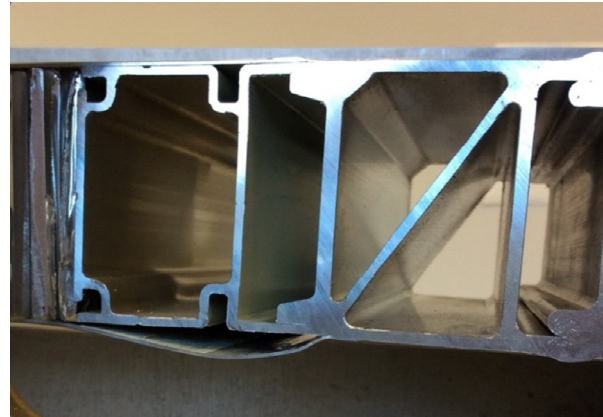
Statische Versuche

- Einzel-Zugstab-Proben FSW-Naht
- Komponenten-Versuch: Verbindung Sandwich-Gurtprofil: Hebel-Arm so, dass Verhältnis Schub – Biegemoment den realen Verhältnissen entspricht
- 3 Kern-Materialien



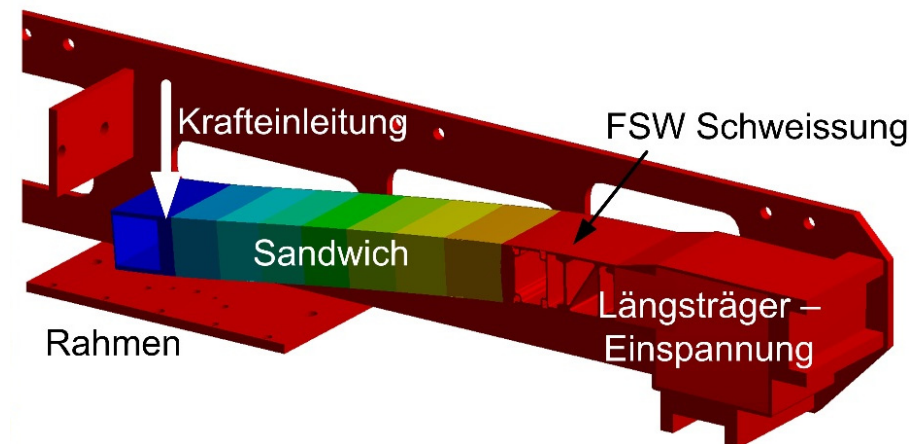
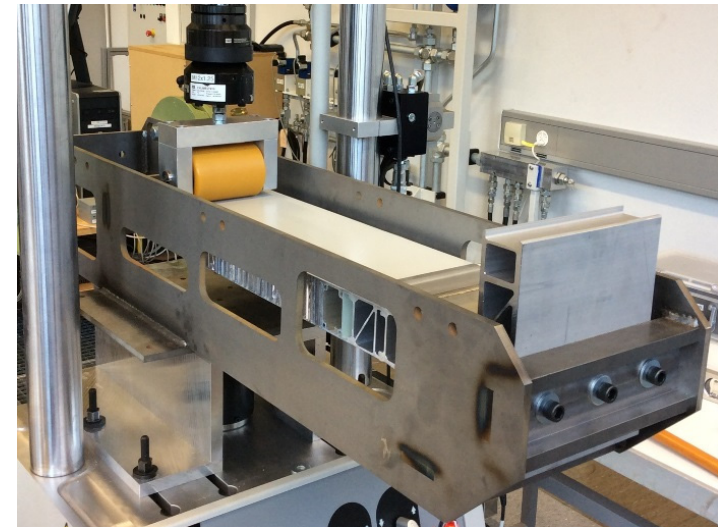
Statische Versuche: Resultate

- Festigkeit unter allen massgebenden Belastungen nach EN12663 experimentell bestätigt
- Streckgrenze FSW-Naht: ≥ 150 MPa (Deckblech 1mm, EN AW-5042 H46, $\sigma_{0.2} = 180$ MPa)
- Bruchversuch Bodenanschluss: Bruchsicherheit ≥ 2.0



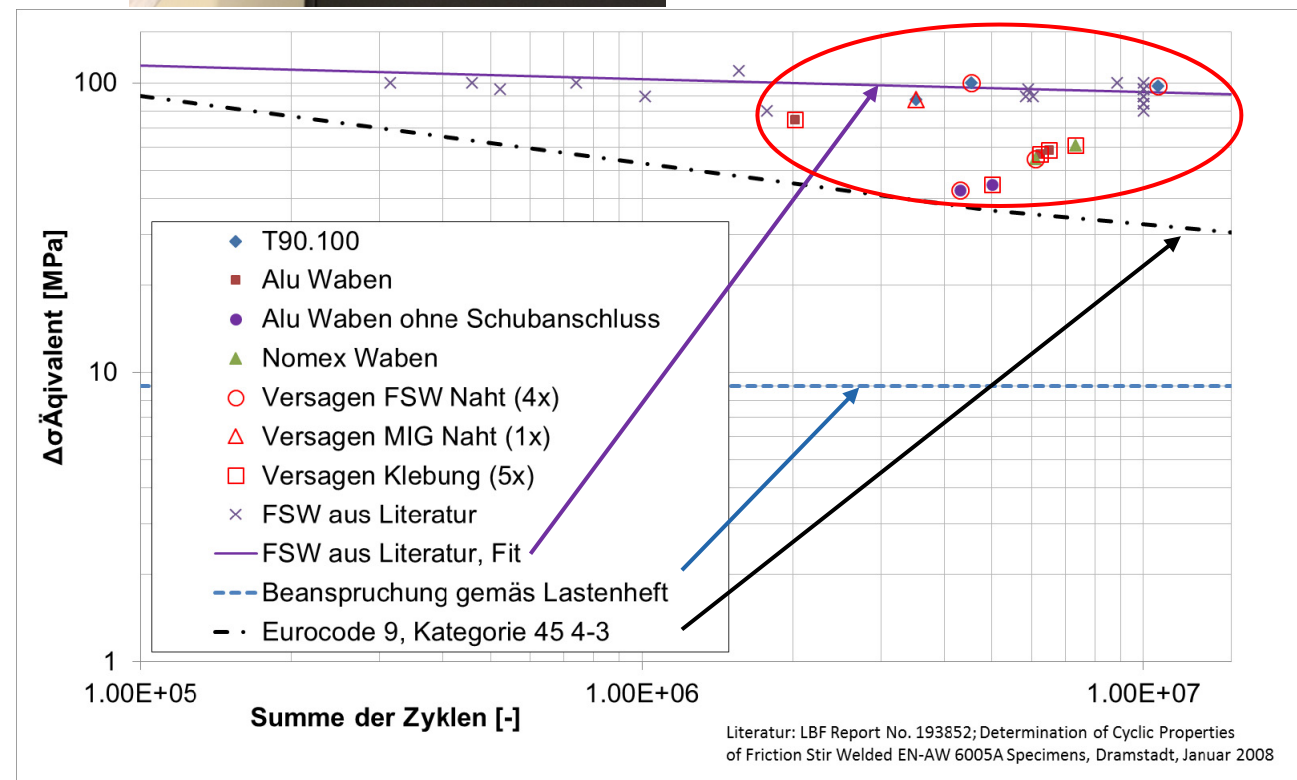
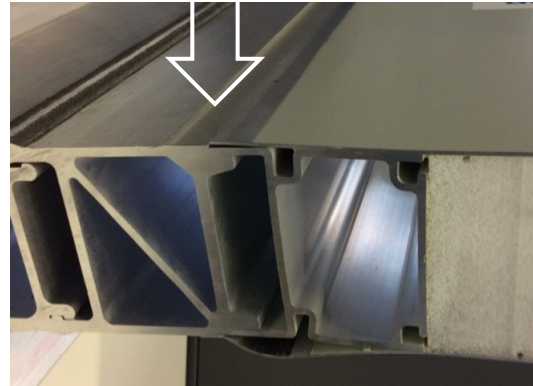
Ermüdungsversuche

- Gleiche Versuchs-Geometrie wie statische Versuche
- Versuchs-Kräfte aus vertikalen Belastungen der Bodenplatte im realen Wagenkasten
- 3 Kern-Materialien
- Total 10 Komponenten-Proben
- Spannungs-Kollektiv umgerechnet in äquivalentes $\Delta\sigma$ in der FSW-Naht mittels linearer Schadensakkumulation
- Auswerte-Punkt: grösste Haupt-Spannung FSW-Naht 1mm-Blech als $\Delta\sigma$



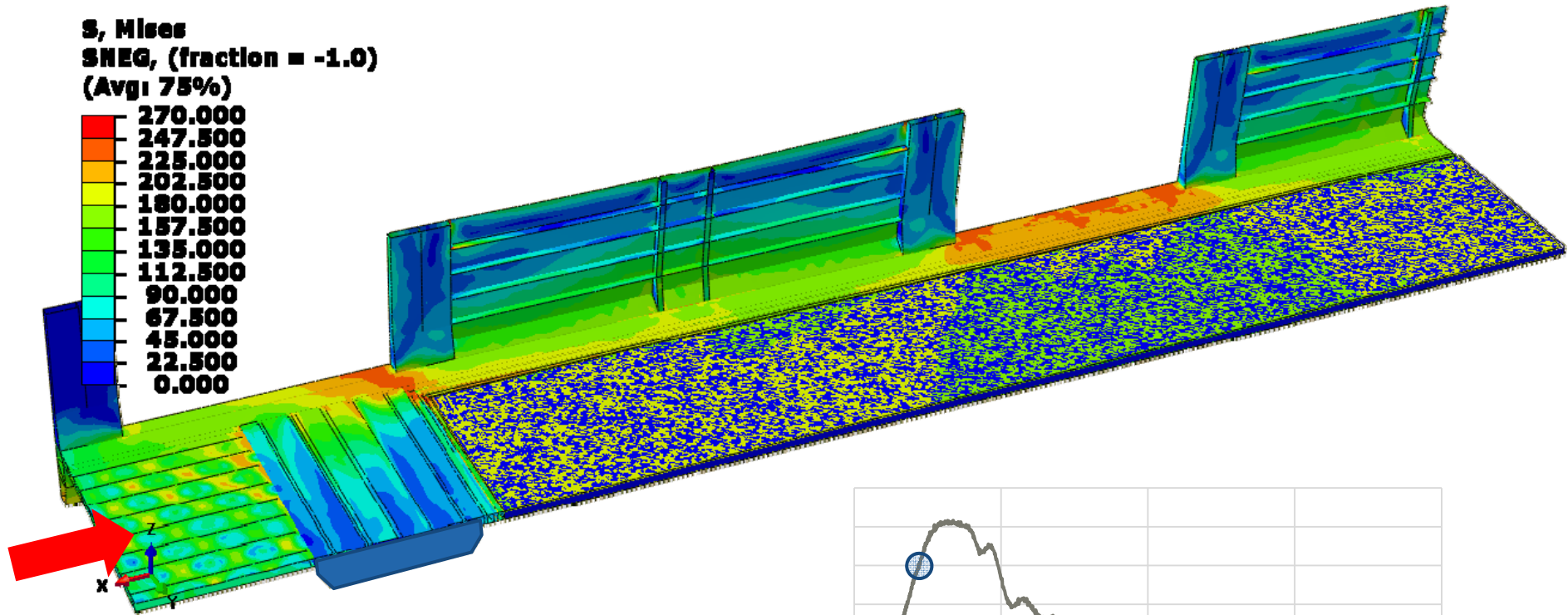
Ermüdungsversuche: Resultate

- 3 Versagens-Arten:
 - FSW-Naht
 - MIG-Naht zum Untergurt
 - Klebung
- Immer referenziert auf äquivalentes $\Delta\sigma$ in FSW-Naht, für alle Versagensarten
- FSW Schweissnaht erfüllt EUROCODE 9, Detail-Kategorie 45 4-3
- die referenzierten weiteren Versagensarten ebenfalls
- Genügende Sicherheit gegenüber Beanspruchung im realen Wagenkasten

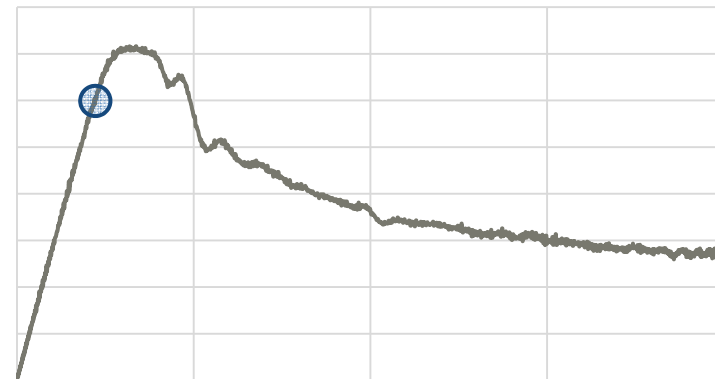


Crashtauglichkeit

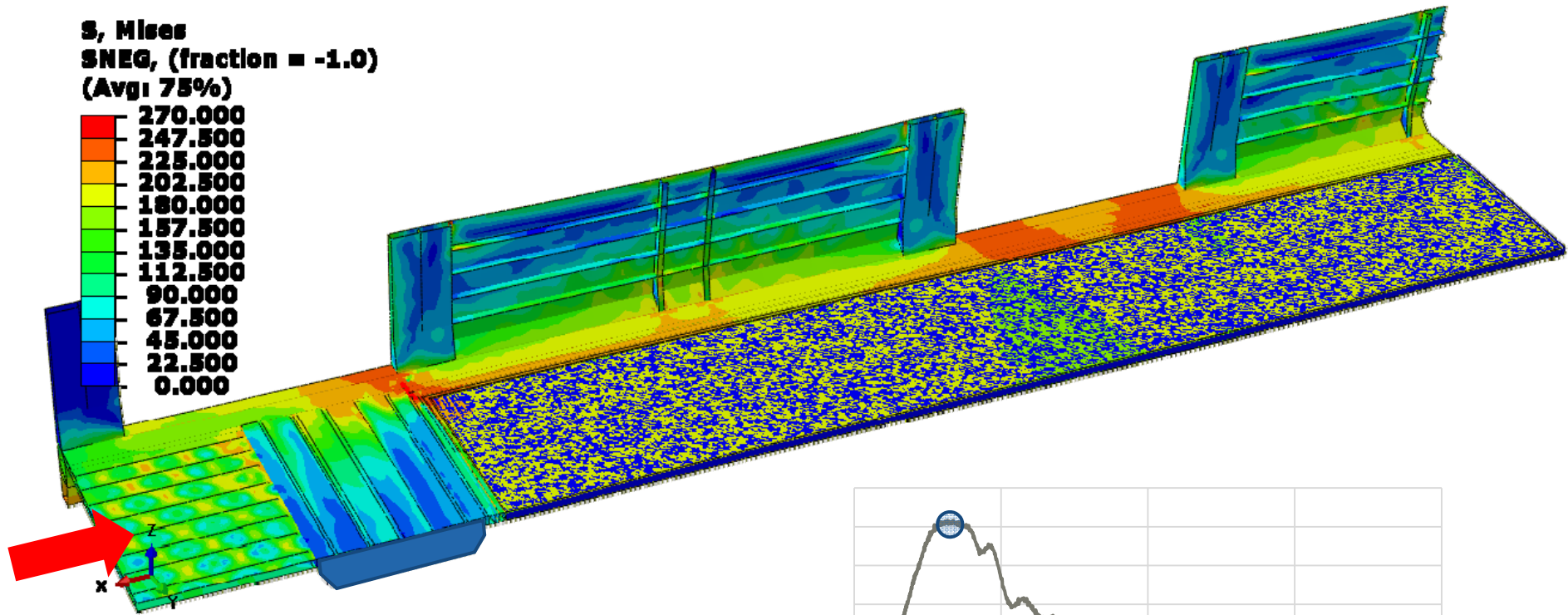
Vergleich an vereinfachtem Modell, quasi-statisch



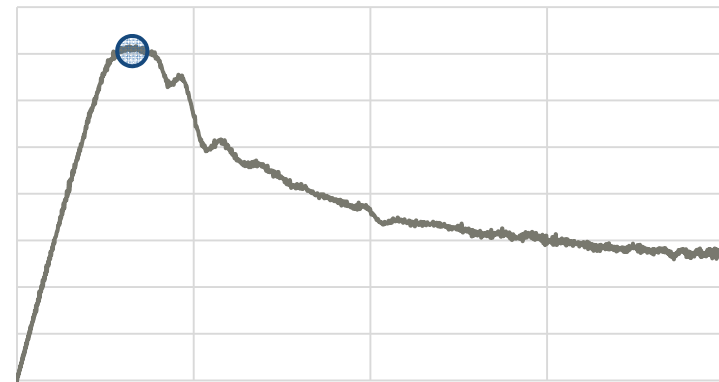
3'000 kN



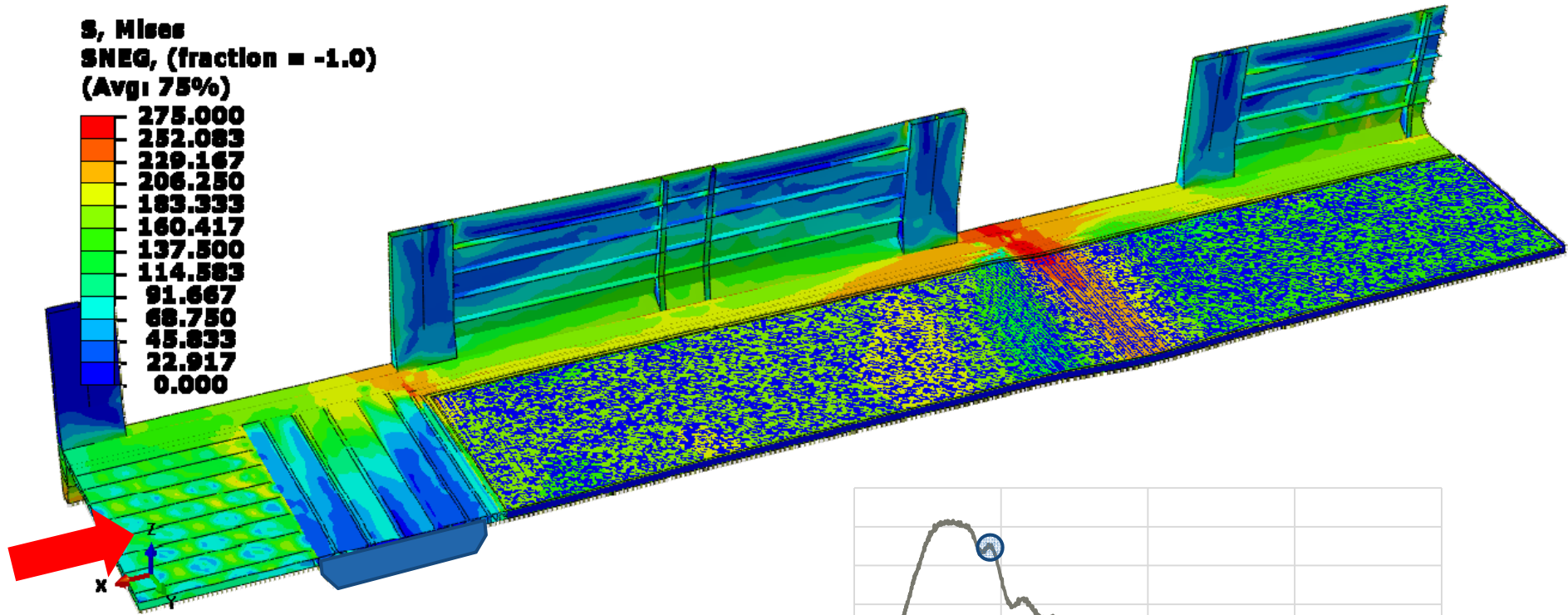
Crashtauglichkeit



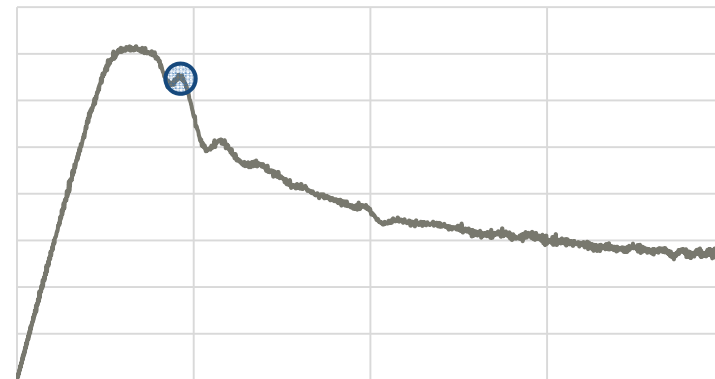
3'500 kN



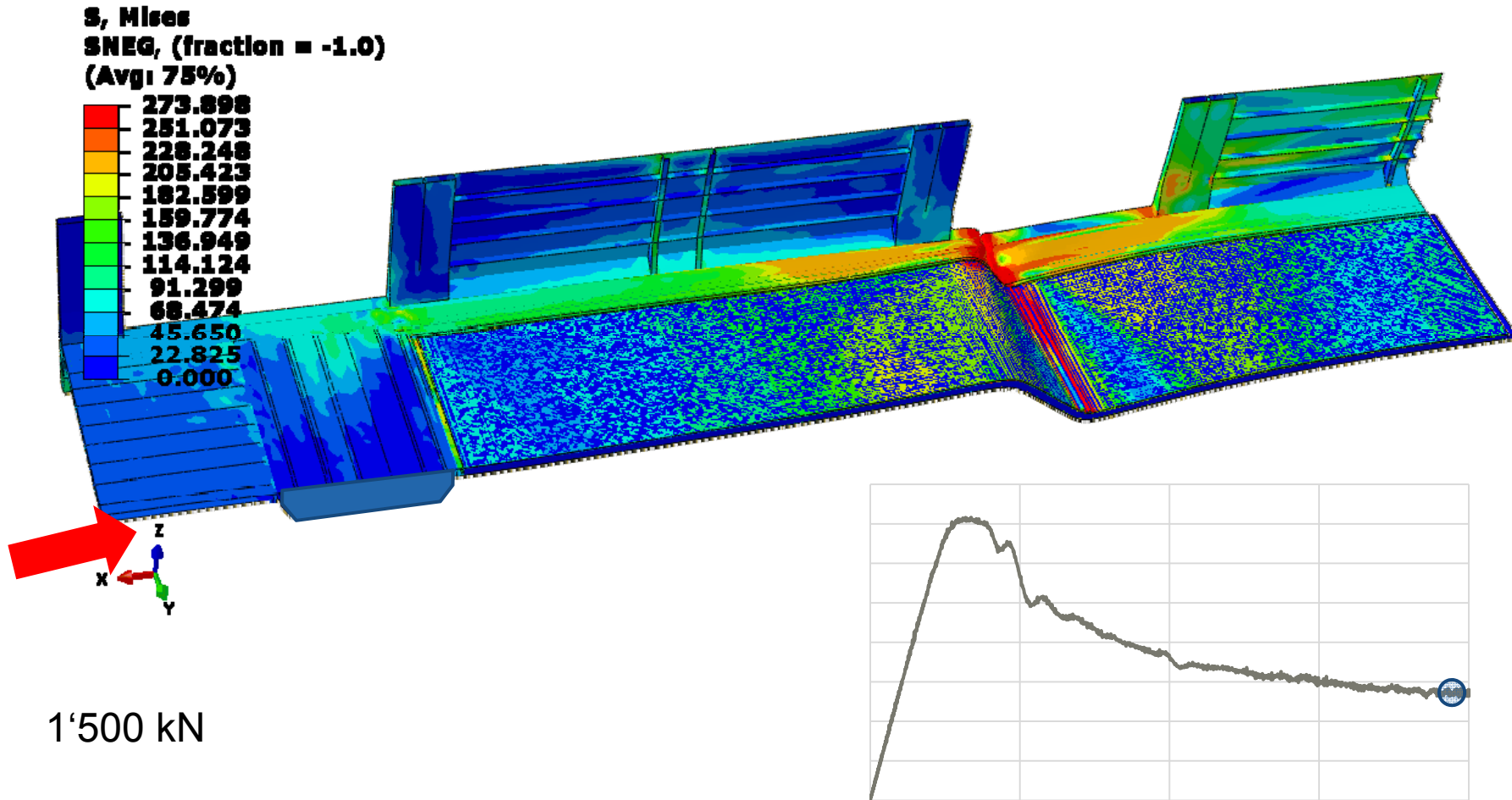
Crashtauglichkeit



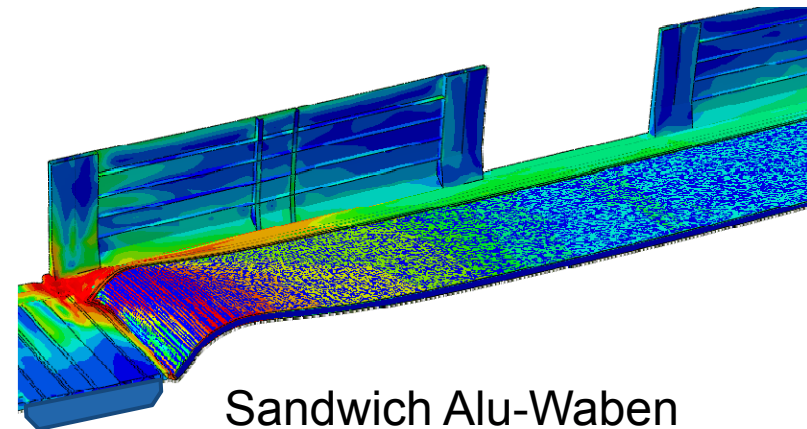
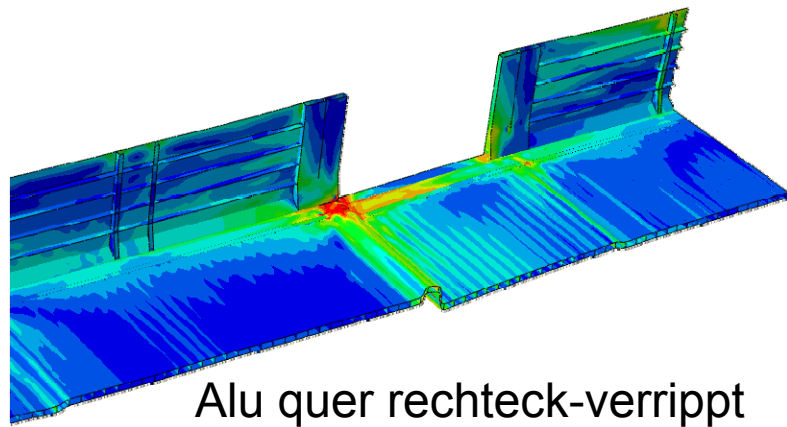
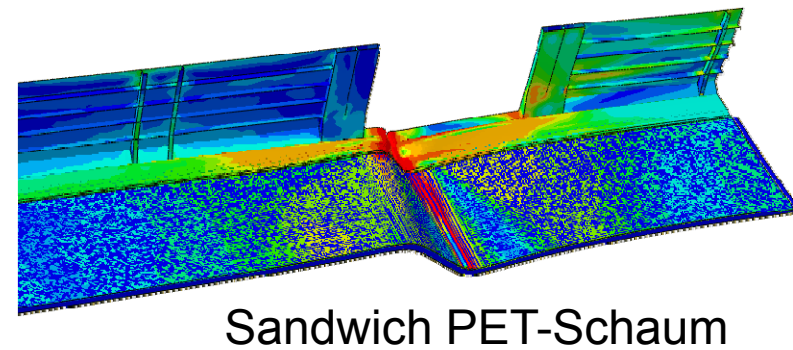
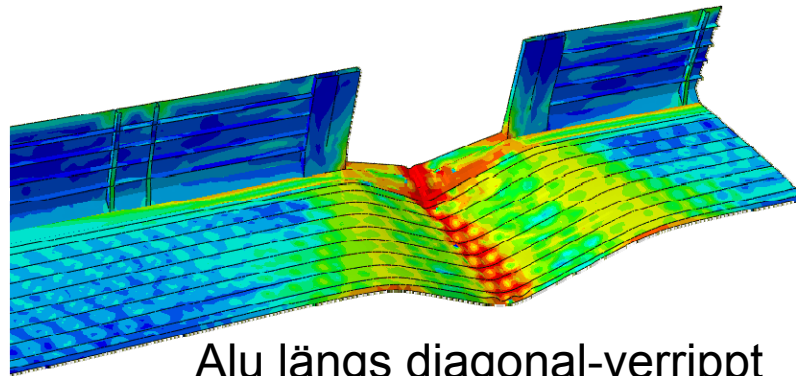
3'300 kN



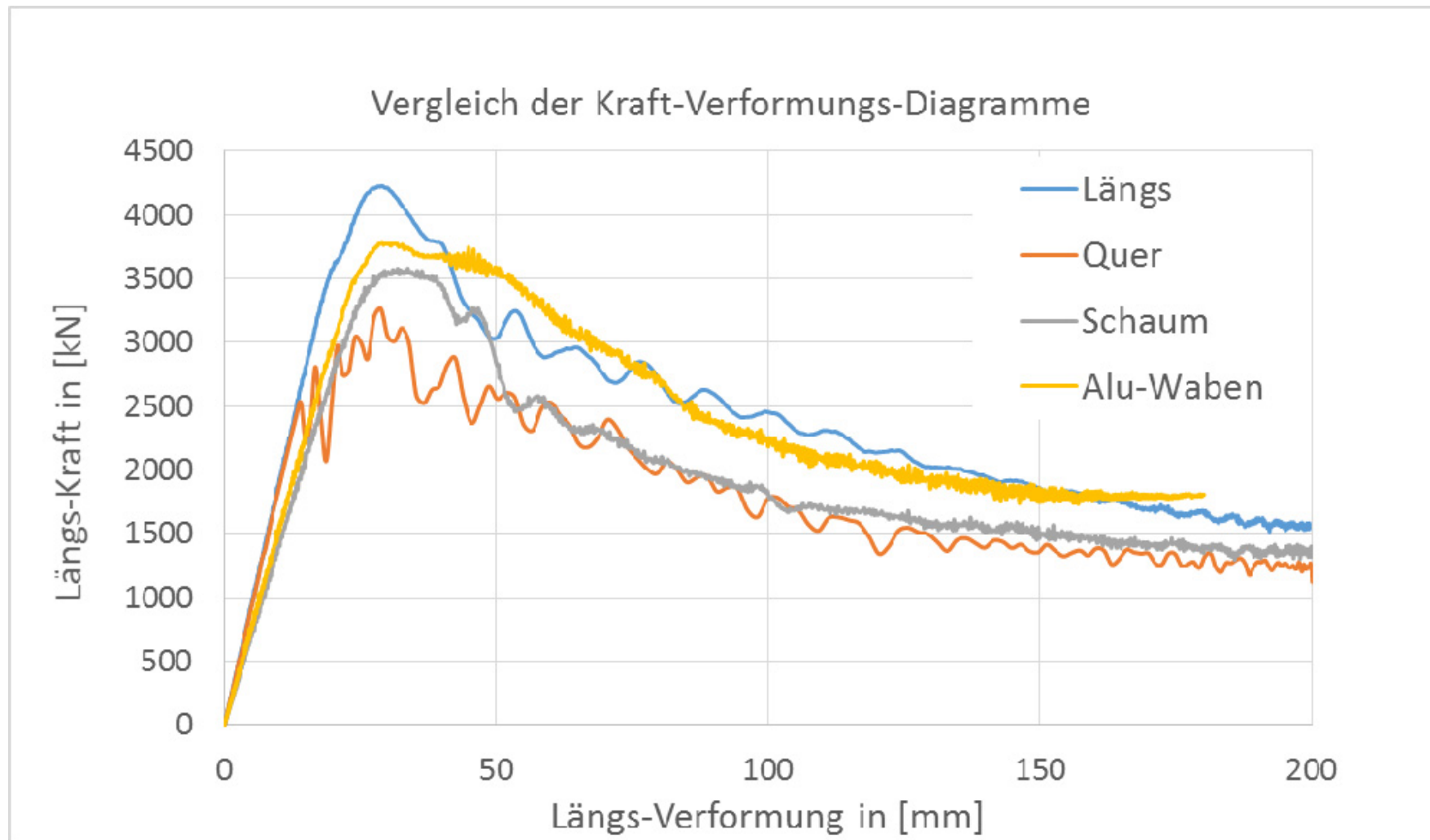
Crashtauglichkeit



Crashtauglichkeit: Vergleich im kollabierten Zustand



Crashtauglichkeit



Crashtauglichkeit

- Die ersten Beulen treten immer ausserhalb der Sandwich-Bereiche auf.
- Der Ersatz von Hohlprofil-Platten durch wesentlich leichtere Sandwich-Paneele mit metallischen Deckschichten hat keine Nachteile für die Crashtauglichkeit.
- Die wesentlichen Längslasten werden in den Haupt-Tragelemente Dach- und Untergurte übertragen. Diese müssen nicht verstärkt werden.
- Sandwich-Böden stellen keine erhöhte Gefährdung der Überlebensräume dar verglichen mit Alu-Integral-Bodenstrukturen. Es kann kein plötzliches Durchschlagen der Sandwichplatten festgestellt werden.

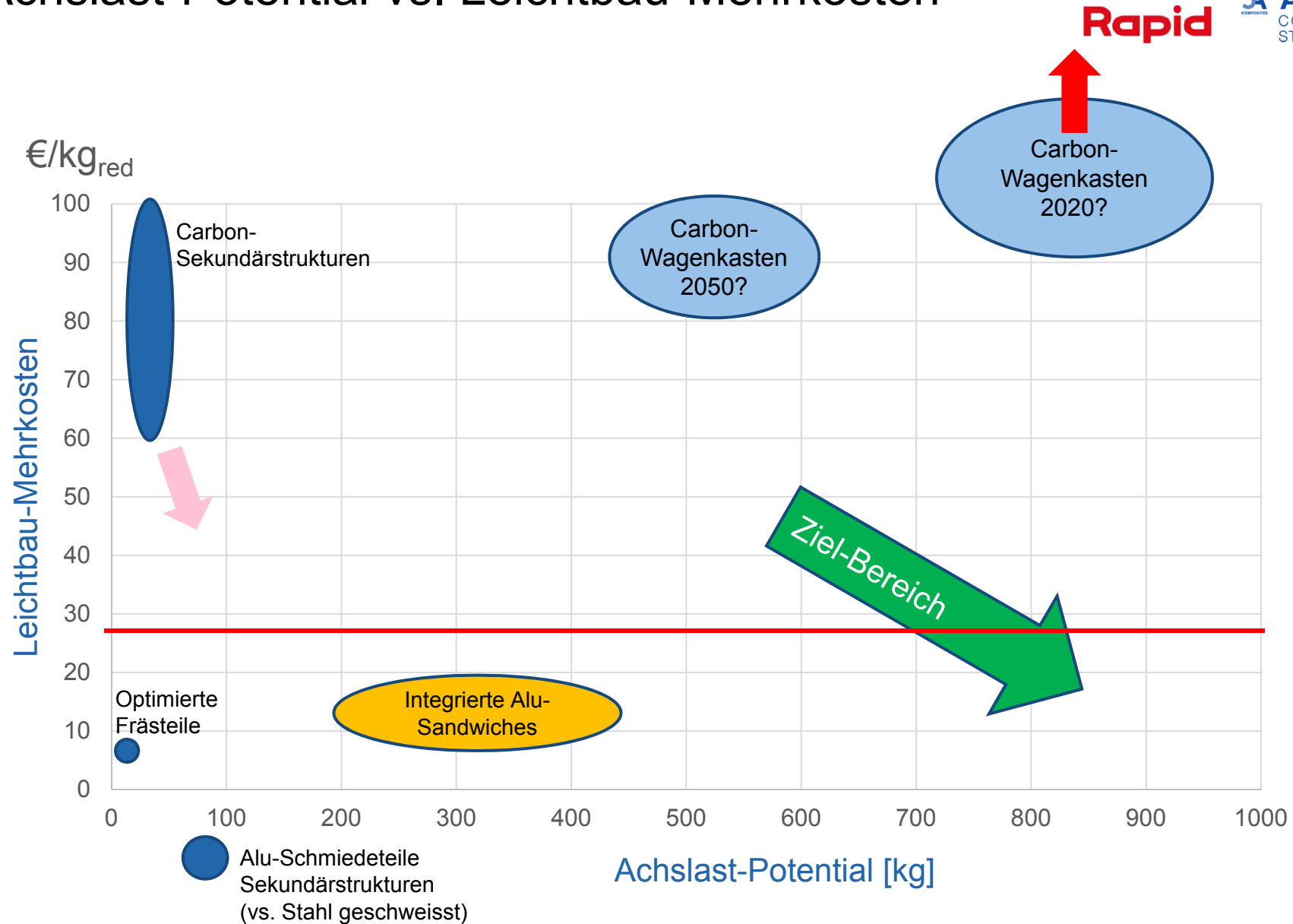
Kosten und Gewichtsreduktionen: Leichtbau-Mehrkosten

- Wiederkehrende Kosten einer (Boden-) Platte aus zusammengeschnittenen Alu-Hohlprofilen ca. 170.- bis 210.- €/m²
 Flächengewicht ca. 18.5 – 25 kg/m²
- Entsprechendes fertig einschweißbares Sandwich-Paneel gleicher Festigkeit ca. 325.- €/m²
 Flächengewicht ca. 10 – 13 kg/m²
- Bei einer Gewichtsreduktion von ca. 10 kg/m² ergeben sich **Leichtbau-Mehrkosten von ca. 12.- bis 16.- €/kg_{red}**
- Akzeptable Leichtbau-Mehrkosten *):
 - Fernverkehr **20 €/kg_{red}**
 - LRV, Regionalverkehr **20 €/kg_{red}**
 - Metro **30 €/kg_{red}**

*) Heutige Annahmen, basierend auf

- Kosten für Traktionsenergie
- Verschleiss von Radsätzen
- Schienenverschleiss
- Lebensdauer der Bremsätze

Achslast-Potential vs. Leichtbau-Mehrkosten

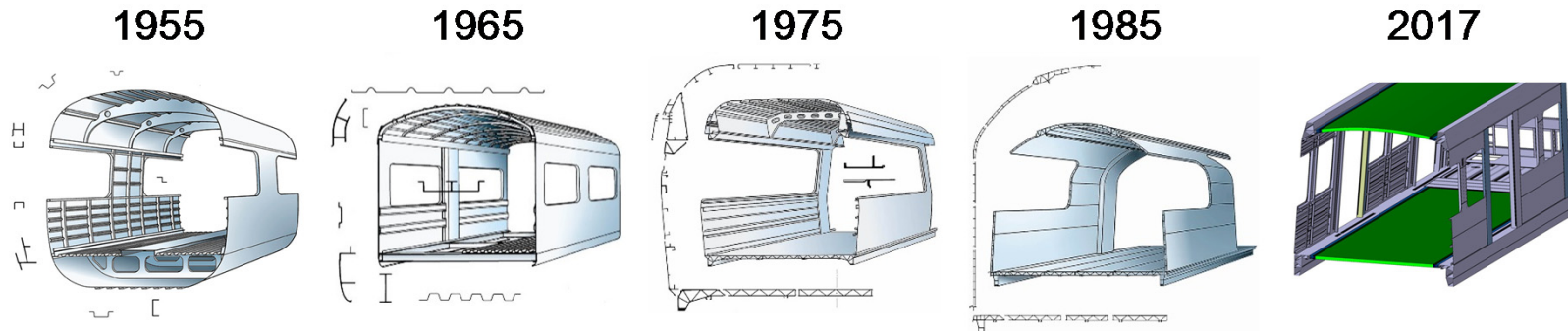


Lebensdauer 30 Jahre

- Was geschieht im dichtgeschweissten Kernbereich über die gesamte Lebensdauer?
- Gibt es da Unterschiede zwischen den Kernmaterialien?
- Heutige Erfahrungen mit geklebten Sandwich-Dächern von Regional-Zügen und Bussen sind bezüglich reinem Sandwich-Bereich zufriedenstellend. Probleme bot nur der bisher dickschicht-verklebte Verbund mit dem Rest der Struktur.
- Könnte der Kernbereich entwässert und belüftet werden, z.B. durch Raster von Bohrungen?

Entwicklung der Alu-Wagenkästen

Beispiel-Werte für Wagen 24 m



Quelle: Alusuisse / Alcan

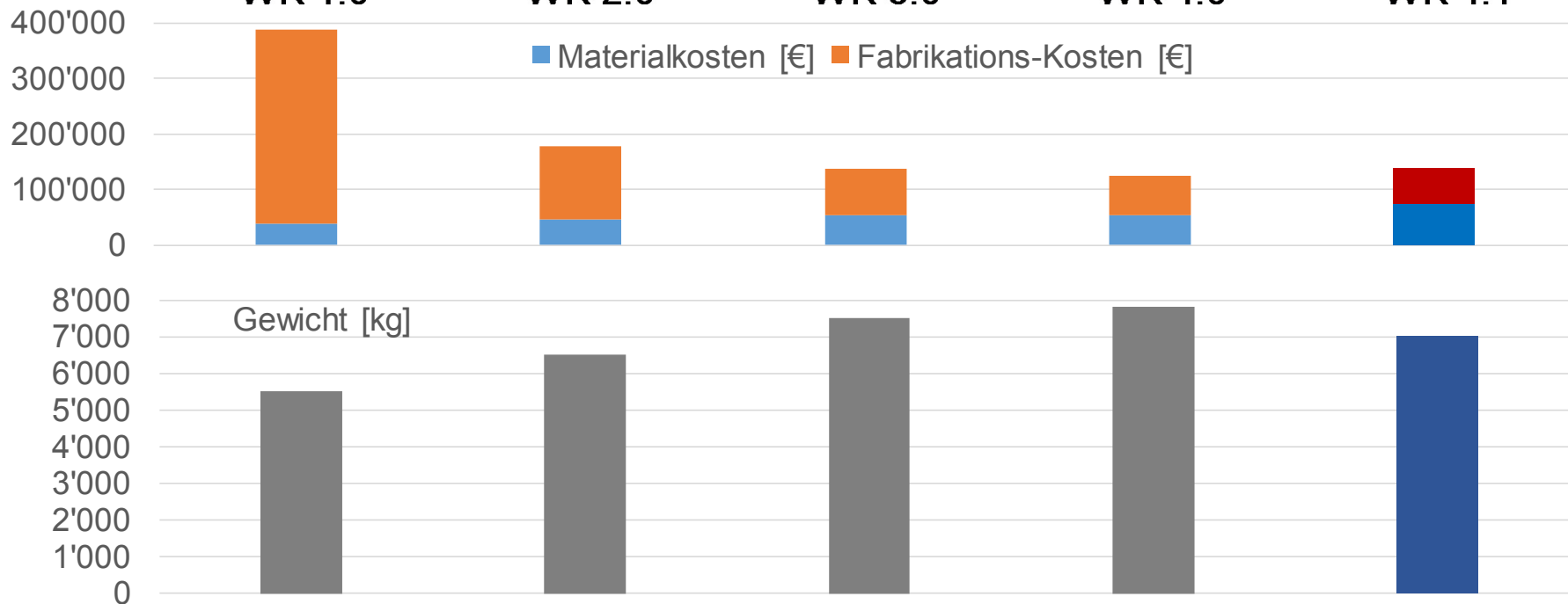
Flugzeugbau
WK 1.0

Differential
WK 2.0

Grossprofile
WK 3.0

Integral
WK 4.0

Integrierte
Sandwiches
WK 4.1



Resultate, Erkenntnisse

- Die Machbarkeit der Bauweise wird bestätigt
- Mittels vollumfänglich geschweisst integrierter Sandwichbereiche wird das Wagenkastengewicht im herkömmlichen geschweissten Aluminium-Kastenbau signifikant gesenkt
- Gewichtsreduktion gegenüber Integral-Bauweise ca. 10 kg/m²
- Leichtbau-Mehrkosten < 20€/kg eingespartes Gewicht
- Damit nähert man sich wieder dem Gewicht der Differential-Bauweise, jedoch bei wesentlich tieferen Gesamtkosten
- **Die Bauweise ist beherrschbar, verfügbar, bezahlbar.**

Weitere Projekt-Ergebnisse

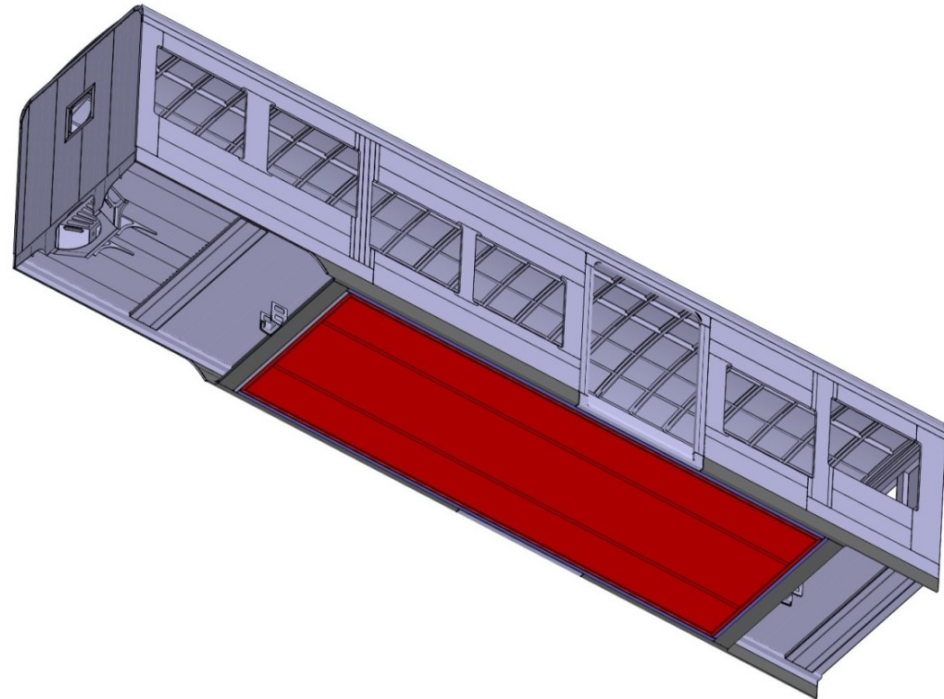
- FE-Analysen und Belastungs-Versuche
 - Es gibt in allen Arten von Schienenfahrzeugen **grossflächige Bereiche**, in denen die **norm-mässigen Belastungen** sowohl statisch als auch betr. Ermüdung durch diese Bauweise **aufgenommen** werden können
 - Die Verklebungen haben i.d.R. höhere Sicherheitsmargen als die massgebenden Schweissnähte
- Konstruktion
 - Anschlussgeometrien im Detail erarbeitet
 - Eckdetail konstruktiv und fabrikations- sowie toleranzmässig optimiert
 - **Konzepte** und konstruktive Details für **Befestigungen von Anbauten** und lokale Kraffteinleitungen aufgezeigt
- Herstellung
 - Konversions-Schicht auf Deckblechen kann bleiben, nur der Primer muss im FSW-Bereich entfernt werden
 - Die **kritischen Temperaturen von Klebstoffen und Kernwerkstoffen** werden **nicht erreicht**, weder bei der Paneel-Herstellung noch im Kastenbau
 - Der Sandwich-Kern muss nicht zwingend mit dem Randprofil verklebt werden
- **Trittsicherheit** und **Hagel-Festigkeit** kann für alle 3 untersuchten Kernwerkstoffe gewährleistet werden.
- **Brandsicherheit:** HL3 nach EN45545
- **Thermische und akustische Isolation**
 - Die Verwendung isolierender Kernwerkstoffe reduziert den Isolations-Bedarf im Innenausbau: weitere Gewichts-Reduktion sowie Platzgewinn, z.B. pro Seitenwand und Dach ca. 20 mm
- **Reparatur-Konzepte** wurden aufgezeigt

Mögliche Anwendungen

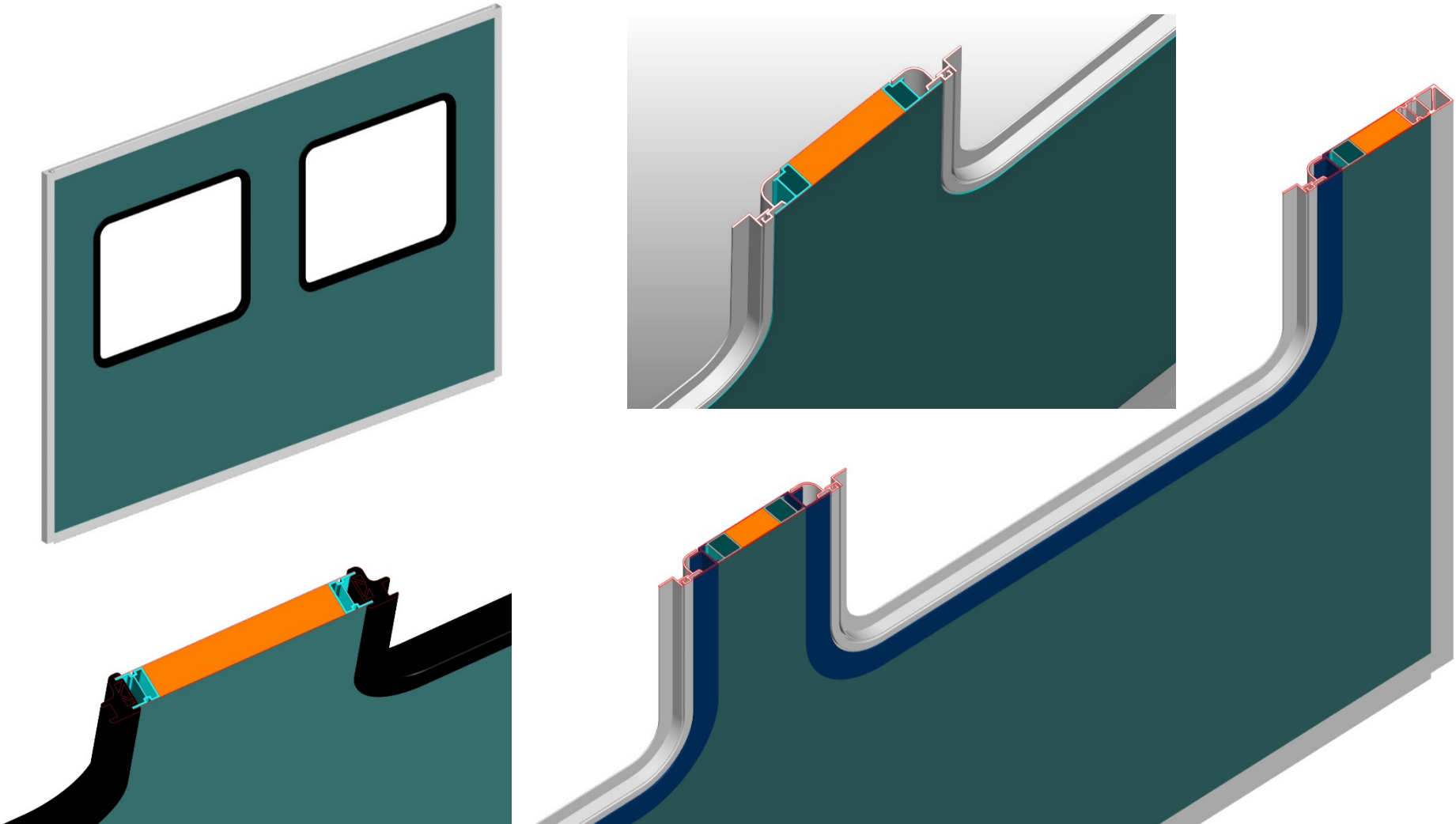
- Schmalspur-Bergbahn, 12 Wagen. Leider abgesagt, Kunde will Nostalgie-Wagen...

Mögliches Einstieg-Projekt:

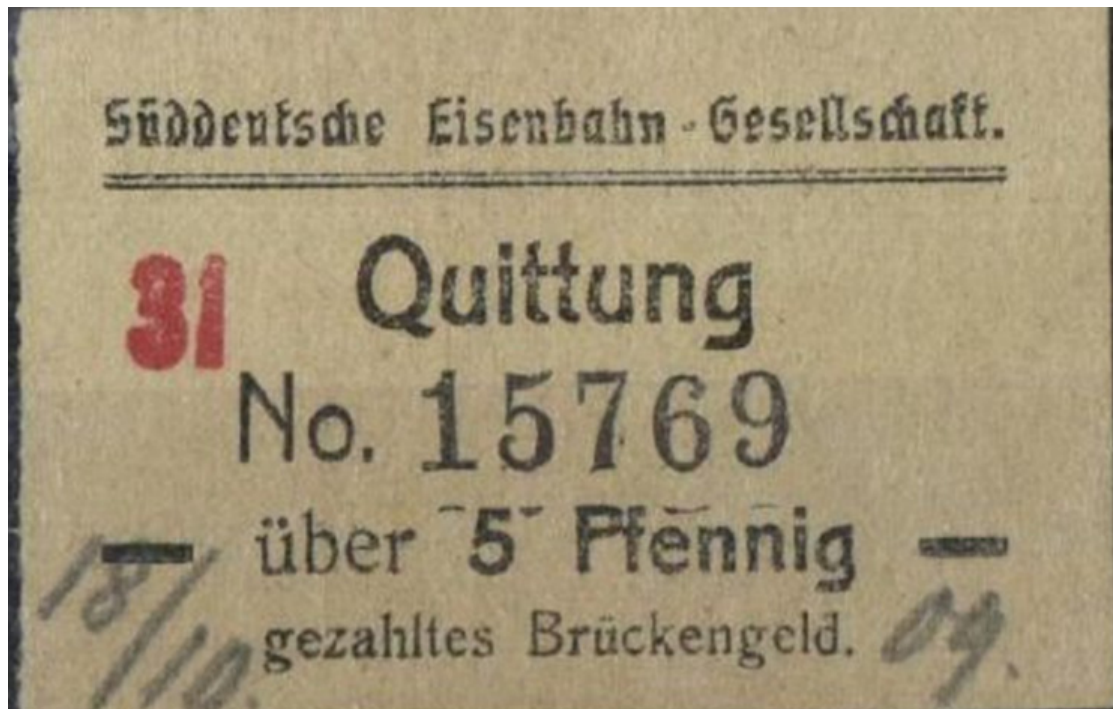
- Vollbahn oder Metro, Seriengrösse ca. 50 Wagen.
- Aufgrund der klassischen Verschweissung könnten auch **existierende Konstruktionen ohne Änderung der angrenzenden Profile** im Neubau mit Sandwich-Platten in Boden oder Dach ausgerüstet werden.



Seitenwände inkl. Fenster



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



...so günstig wird's ohne Leichtbau nie mehr...

leur@zhaw.ch

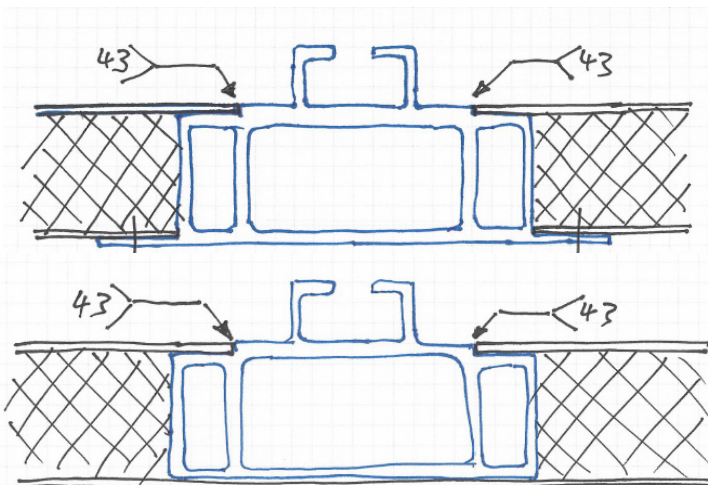
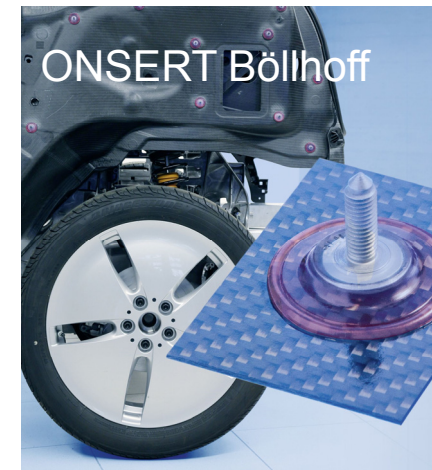
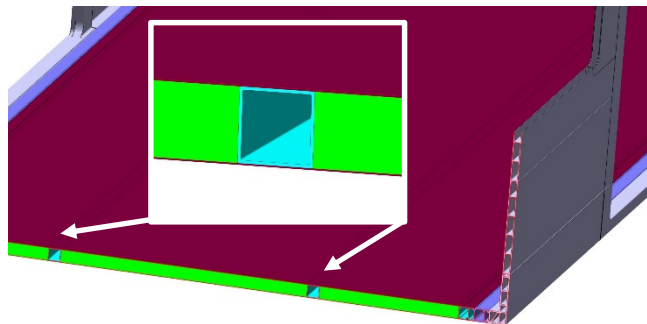
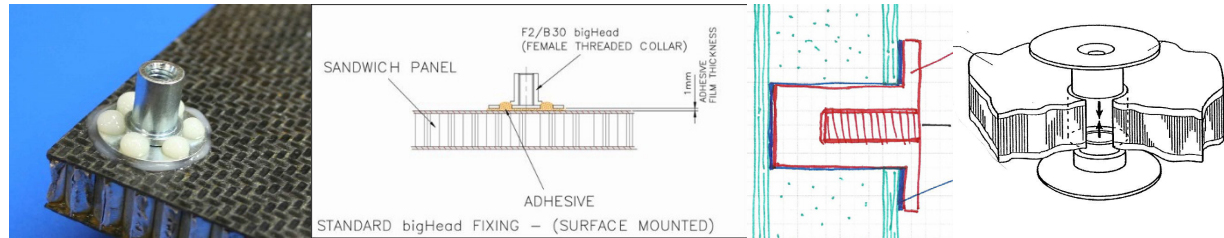
simon.leutenegger@leconsult.ch

+41 52 238 24 49

+41 79 287 03 32

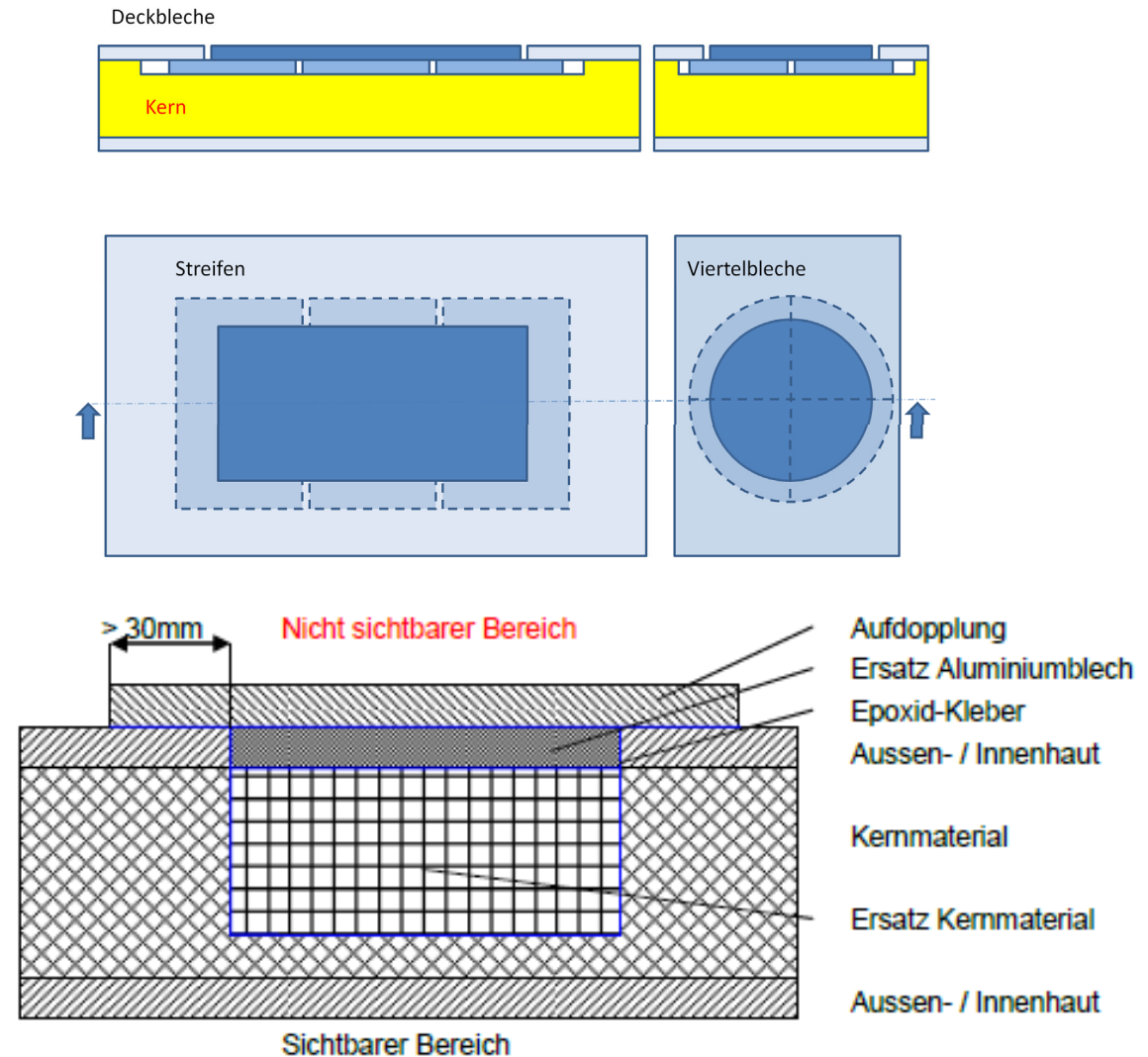
Befestigungen und Anbauten

- Schwere Geräte ohnehin aus Eigenfrequenz-Gründen in separaten Boxen oder via Rahmen an Gurt-Profilen aufgehängt
- Zahlreiche handelsübliche Inserts, Gewinde-Einsätze etc. verfügbar
- Einlege-Rohre z.B. für Sitz-Reihen
- FSW-geschweisste Einlege-Profile oder Einzellast-Einleitungen

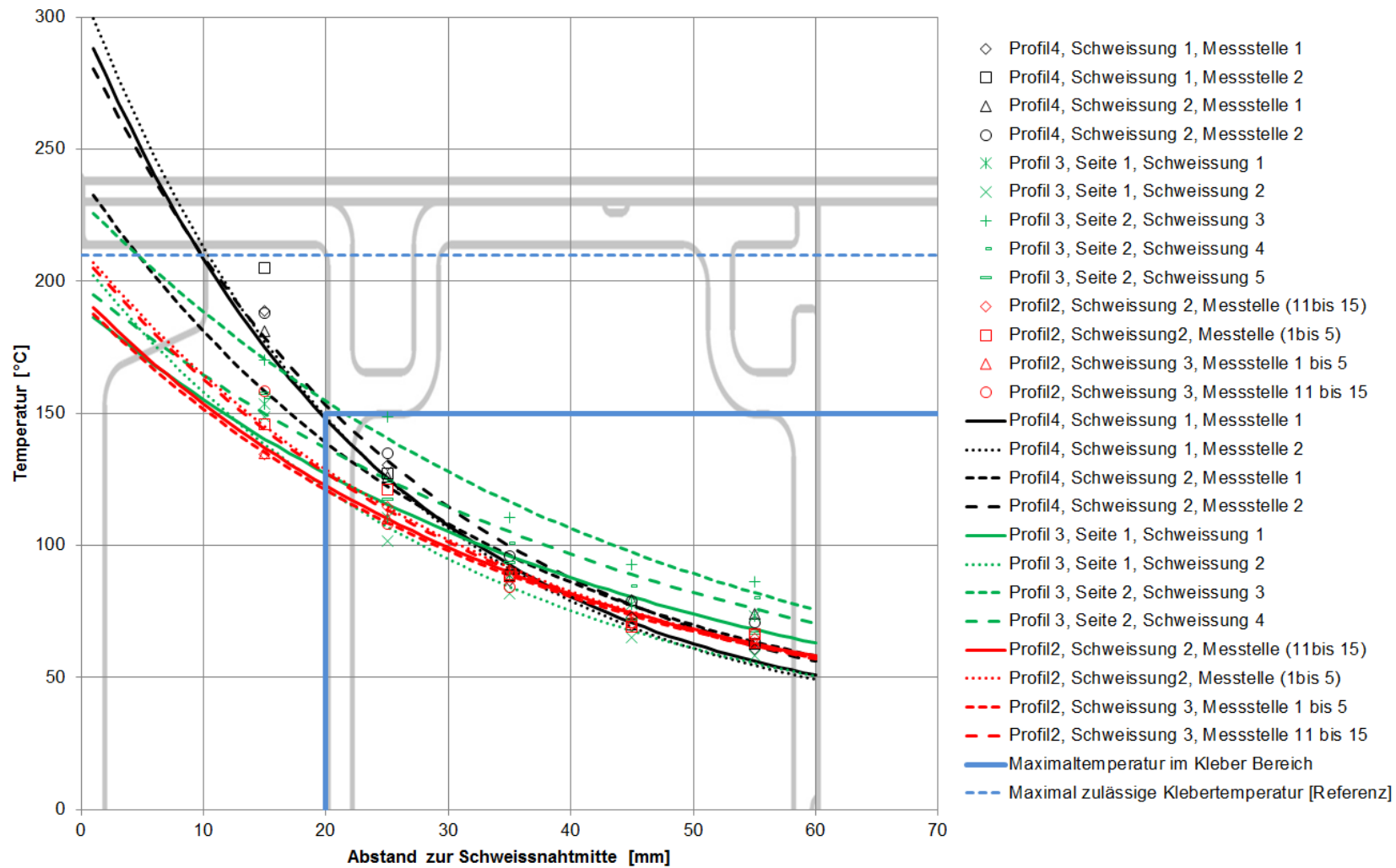


Reparaturen

- In Sandwich-Platte: mit aufgesetztem oder eingelegtem Deckblech, ggf. kombiniert mit Vernietung
- Im Bereich der Verbindung zur Alu-Haupt-Struktur:
 - Kern-Bereich mit Abstand ca. 80 mm zu Reparatur-Schweissbereichen ausschneiden
 - Gefräste Substitutions-Profile TIG-schweissen, ggf. kühlen
 - Kerne einkleben
 - Deckbleche kleben/nieten



Temperaturen FSW



Temperaturen MIG



Bruchkriterien Schaum

- Schaum als Volumen-Elemente
- properties „crushable foam“
- nichtlineares Stauchverhalten abgebildet
- Limite von Principle Strain als Bruchkriterium so eingestellt, dass Korrelation 4-Punkt-Biegetest mit Berechnung ok
- Elemente mit höherem Principle Strain werden gelöscht

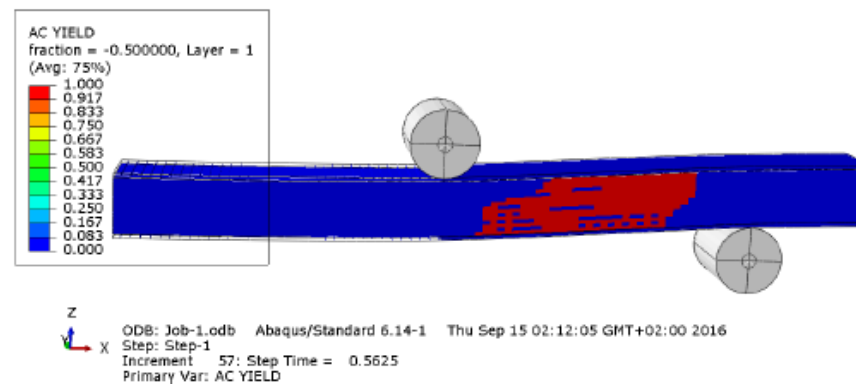
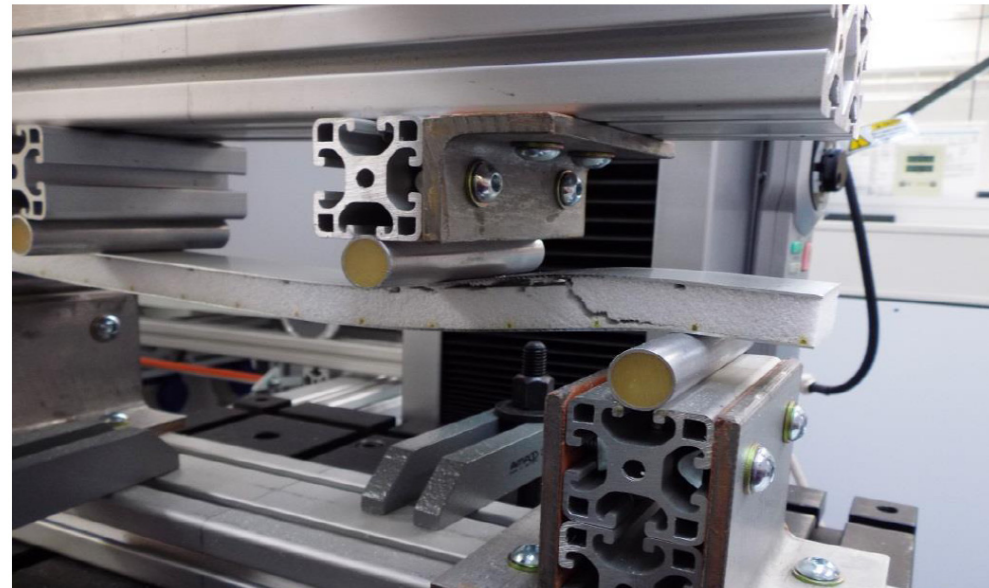


Figure 21 Area of Failure in foam four-point bending (ABAQUS simulation).