

Entwicklung eines Konstruktionsprinzips zur Herstellung des Rohbaus von Wagenkästen in Integralbauweise für den Schienenfahrzeugbereich

Marcel Springmann¹, Johannes Kotter² und Wolfgang Trommeshauser³

¹Beuth Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin

²ZAHORANSKY AG, Anton-Zahoransky-Strasse 1, 79674 Todtnau-Geschwend

³engineering office Trommeshauser GmbH, Artur-Becker-Str. 1, 16515 Oranienburg

Veröffentlicht: Erstveröffentlichung 2019 in Methoden des Fortschritts II, ISBN 978-3-948133-00-9. Zweitveröffentlichung 2021 in Reports of Science mit Genehmigung der Autoren.

Schlüsselwörter: Wagenkastenrohbau, ZFD-System, Fügeprozess, Selbstfixierung, Toleranzfelder, FEM, TRIZ



REPORTS OF SCIENCE

moringa.pub/ojs/index.php/reports

ISSN 2567-3394



Soweit nicht anders angegeben, ist dieses Werk lizenziert unter der Creative Commons Attribution ShareAlike 4.0

International License:

creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma engineering office Trommeshauser GmbH (eoT) und behandelt ein neuartiges Konstruktionsprinzip zur Herstellung des Wagenkastenrohbaus von Schienenfahrzeugen in Integral-Stahlbauweise, dem sogenannten Zip Fastening Design (ZFD). Entwicklungsgegenstand ist ein Selbstfixierungssystem für die Vormontage der ZFD-Systemkomponenten für den anschließenden Fügeprozess durch Laserschweißen. Zur Abschätzung der benötigten Fügekraft zum Erreichen der Selbstfixierung und der dabei entstehenden plastischen Verformungen wird ein Finite Elemente Methode (FEM)-Simulationsmodell entwickelt, mit dem in einer strukturmechanischen Mehrschrittanalyse der gesamte Fügeprozess dargestellt werden kann. Ziel ist es, bei einer definierten Fügekraft eine Mindesthaltekraft zu erreichen, damit auch bei leicht ruckartigem Anheben des ZFD-Wandmoduls im selbstfixierten Zustand die Verbindung bestehen bleibt. Füge- und Mindesthaltekraft werden durch die vorgegebenen Toleranzen stark beeinflusst, wobei fertigungsübliche Toleranzfelder verwendet werden, um eine wirtschaftliche Herstellung der Bauteile zu gewährleisten. Die Ermittlung eines geeigneten ZFD-Systems erfolgt mit der TRIZ-Methodik nach Livotov und Petrov [7]. Die prinzipiellen Lösungen werden mit Argumentenbilanzen vergleichend dargestellt. Durch eine gewichtete Punktbewertung wird abschließend die am besten geeignete Lösung identifiziert und vorgestellt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	engineering office Trommeshauser GmbH	1
1.3	Zielsetzung	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Integralbauweise	2
2.2	Differentialbauweise	2
2.3	Vergleich der Bauweisen	3
3	Bauweise von Wagenkästen mit dem ZFD-Prinzip	3
4	Werkstoff und Fertigungsverfahren	7
4.1	Werkstoff	7
4.2	Fertigungsverfahren	7
5	Auswahl eines geeigneten ZFD-Systems	8
5.1	Anforderungen und Restriktionen	8
5.2	Ausgangssituation und Lösungsprozess	8
5.3	TRIZ-Methodik zur Überwindung des technischen Widerspruchs	11
6	Konstruktive und strukturmechanische Auslegung des ZFD-Systems	16
6.1	Voruntersuchungen	16

6.2	Vorgehensweise	17
6.3	Modellbildung und Randbedingungen	17
6.4	Variation des ZFD-Clip-Systems	18
6.5	Numerische Simulation des ZFD-Clip-Systems	21
6.6	Bewertung und Empfehlungen	23
7	Zusammenfassung und Ausblick	24

1 Einleitung

1.1 Motivation

Neuste Marktentwicklungen im Schienenfahrzeugbau erwecken ein gesteigertes Interesse, den Rohbau von Wagenkästen wieder in Stahlbauweise auszuführen. Aktuell werden Wagenkästen, besonders im Sektor der Triebzüge, hauptsächlich aus Aluminium hergestellt. Diese Bauweise bietet Vorteile beim Vergleich des Fertigungsaufwandes, bei der optischen Qualität im lackierten Endzustand, der Rohbaumasse sowie in den Rohbautoleranzen. Die Aluminiumbauweise hat jedoch gravierende Nachteile gegenüber der Stahlbauweise. So sind beispielsweise die Werkstoffkosten des Aluminiums um ein Vielfaches höher, die Brandschutzeigenschaften, die Festigkeit sowie die Steifigkeit vermindert.

Mit der Anwendung des Zip Fastening Design (ZFD)-Prinzips sollen die positiven Eigenschaften der Aluminiumbauweise in ein Stahlbaukonzept für die Herstellung von Wagenkästen integriert werden, wobei die vorteilhaften Eigenschaften der Stahlbauweise erhalten bleiben sollen. Das Ziel der ZFD-Entwicklung ist die Angleichung des Fertigungsaufwandes, der (optischen) Qualität, der Rohbautoleranzen und der Rohbaumasse an den Stand der Aluminiumbauweise. Zudem soll durch die Verwendung modernster Fertigungsverfahren mit einer Reduktion der benötigten Fertigungszeit sowie mit der Erhöhung des Automatisierungsgrades ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber der herkömmlichen Herstellung der Wagenkästen ermöglicht werden.

1.2 engineering office Trommeshauser GmbH

Die folgenden Ausführungen entstanden im Rahmen einer Masterarbeit [6] in Kooperation mit der engineering office Trommeshauser GmbH, einem Unternehmen das auf die Entwicklung und Konstruktion von Komponenten für den Schienenfahrzeugbau sowie von Betriebsmitteln für deren Fertigung spezialisiert ist. [8] Es wurde ein Patent mit dem Titel „Wandmodul und ein Verfahren zur Herstellung von Komponenten mit Wandmodulen für den Rohbau von Wagenkästen im Schienenfahrzeugbau in Differenzialbauweise“ unter dem Aktenzeichen EP18159743.6 angemeldet.

1.3 Zielsetzung

Bei der Herstellung von Wagenkästen mit dem ZFD-Konstruktionsprinzip werden walzprofilierte Bleche, sogenannte ZFD-Profile, welche die Außenbeblechung bilden, mit Querversteifungen, sogenannten Gerippeträgern, für die Herstellung von Wand-, Dach- und Stirnwandmodulen stoffschlüssig miteinander verbunden. Unterstützend für diesen Fügeprozess soll eine Struktur in die Gerippeträger eingebracht werden, welche die ZFD-Profil-Außenbeblechung so positioniert bzw. fixiert, dass sie mit möglichst geringem Vorrichtungsaufwand durch Laserschweißen mit den Gerippeträgern verbunden werden kann.

Ziel ist die Gestaltung einer neuen konstruktiven Lösung sowie die Entwicklung einer Vorgehensweise zur strukturmechanischen Simulation des Selbstfixierungssystems für den anschließenden Fügeprozess von ZFD-Profil- und Gerippeträger im Hinblick auf die

Herstellung von Wagenkastenwandmodulen und unter Beachtung der in [3] ermittelten ZFD-Systemparameter. Aufgrund der nur temporären Fixierung zur Vorbereitung des Schweißprozesses sollen die konstruktiven Maßnahmen für die Selbstfixierung einen möglichst geringen Einfluss auf die Struktur des Gesamtsystems haben. Des Weiteren soll eine lückenlose Beschichtung der gefügten Bauteile mit einem geeigneten Korrosionsschutz möglich sein.

2 Stand der Technik

Im Allgemeinen können zwei grundlegende Bauweisen bei der Herstellung von Wagenkästen aus Metall unterschieden werden, die Integral- und die Differentialbauweise.

2.1 Integralbauweise

Abbildung 1 (links) zeigt einen Wagenkastenrohbau in Integralbauweise. Der Rohbau wird aus durchgehenden Aluminium-Strangpressprofilen aufgebaut, welche durch Schweißen zu Untergestellen, Seitenwänden und Dächern zusammengefügt werden. Aus den vorgeschweißten Seitenwänden werden die Ausschnitte für Fenster und Türen ausgefräst und mechanisch bearbeitet. Durch die Verwendung von großflächigen Strangpressprofilen wird der Montageaufwand in der Rohbaufertigung erheblich reduziert. Bei dieser Bauweise werden tragende und verschalende Funktionen kombiniert. [5]



Abbildung 1: Wagenkastenrohbau eines ICE-Hochgeschwindigkeitszuges in Integralbauweise (links) und in Differentialbauweise (rechts) [5]

2.2 Differentialbauweise

Abbildung 1 (rechts) zeigt einen Wagenkastenrohbau in Differentialbauweise. Es werden bei der Fertigung in Fahrtrichtung verlaufende Stringer und senkrecht dazu angeordnete Spanten aus Stahl, die im Dachbereich als Querträger bezeichnet werden, miteinander zu einem Wagenkastengerüst verschweißt. Des Weiteren wird dieses Wagenkastengerüst mit glatten oder gesickten Blechen bestückt, welche nach dem Verschweißen mit dem Wagenkastengerüst die Außenbeblechung des Wagenkastens bildet. Diese Beblechung

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Integralbauweise von Wagenkästen

Vorteile	Nachteile
Hohe optische Qualität der Außenbeblechung im lackierten Endzustand	Hohe Herstellungskosten der einzelnen Bauteilprofile
Geringer Schweißverzug beim Fügen der Einzelteile	Ausschließliche Verwendung von Aluminiumwerkstoffen
Geringe Bauteiltoleranzen	Relativ teurer Werkstoff
Geringer Vorrichtungsaufwand beim Fügen der Bauteilprofile zur Fertigung der Seitenwände	Schlechte Reparaturmöglichkeiten der Wagenkästen
Schnelle und einfache Montage	Transport von sehr großen Bauteilen nötig
Geringe Anzahl an Einzelteilen	Unflexibel in der Ausbringung der Bauteilprofile
Gute Leichtbaueigenschaften	Schlechte Brandschutzeigenschaften
Hoher Automatisierungsgrad möglich	Schlechtere Werkstoffeigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit bei Aluminium

besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Segmenten, welche eine Stärke von ca. 2,0 mm haben. Es werden tragende und verschalende Funktionen klar voneinander getrennt. [3, 5]

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf ein Wagenkastengerüst in Differentialbauweise mit L-Stahl-Profilen. Die Spanten werden mit einer Blechdicke von 2,0 mm durchgängig laufend und die Stringer mit einer Blechstärke von 3,0 mm gestückelt ausgeführt. Durch die Stückelung der Stringer und Segmentierung der Außenbeblechung ergibt sich eine hohe Anzahl an Einzelteilen, was zu einem beträchtlichen Vorrichtungsaufwand bei der Montage führt. [3]

2.3 Vergleich der Bauweisen

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen ausgewählte Vor- und Nachteile der Integral- und Differentialbauweise für die konventionellen Bauweisen der Rohbaustruktur von Wagenkästen. [6]

3 Bauweise von Wagenkästen mit dem ZFD-Prinzip

Die Zip Fastening Design (ZFD)-Bauweise stellt ein Optimierungsprinzip der Differentialbauweise zur Herstellung von Seitenwand-, Stirnwand- und Dachmodulen für Schienenfahrzeuge dar, welche sich optimal für den Einsatz modernster Fertigungs- und Fügeverfahren eignet.

Das Ziel bei der Herstellung von Wagenkästen in ZFD-Bauweise ist, die Vorteile der

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Differentialbauweise von Wagenkästen

Vorteile	Nachteile
Günstige Halbzeuge	Schlechte optische Qualität der Außenblechung im lackierten Endzustand
Kaum Werkstoffeinschränkungen	Sehr hoher Fertigungsaufwand durch hohe Anzahl an Einzelteilen
Gute Reparaturmöglichkeiten der Wagenkästen	Hoher Vorrichtungsaufwand zum Fügen der Einzelteile
Sehr flexibel bei lokalen Änderungen der Konstruktion	Hoher Schweißverzug
Gute Brandschutzeigenschaften bei Stahl	Erhöhte Rohbautoleranzen bei gleicher Fahrzeugabmessung
Gute Werkstoffeigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit bei Stahl	Erhöhte Rohbaumasse bei gleicher Fahrzeugabmessung

Aluminium-Integralbauweise auf ein System in Stahlbauweise zu übertragen und dadurch die Nachteile der klassischen Stahlbauweise deutlich zu reduzieren, aber deren Vorteile möglichst beizubehalten.

Die mit dem Einsatz modernster Fertigungs- und Fügeverfahren verbundene Steigerung des Automatisierungsgrades ermöglicht eine prozessübergreifende Reduzierung der Fertigungskosten, des Vorrichtungsaufwandes, der Montagezeiten und der Logistik. Durch eine gezielt für den Einsatz von Laserfügeverfahren zugeschnittene konstruktive Gestaltung werden der Schweißverzug und die Rohbautoleranzen minimiert und gleichzeitig die optische Oberflächenqualität der Außenblechung gesteigert. Zusätzlich ermöglicht die ZFD-Bauweise durch die Verwendung von Walzprofilen mit hohem Kaltverfestigungsgrad eine reduzierte Blechdicke der Außenblechungen und damit eine Verringerung der Rohbauwagenkastenmasse, die der Differenzialbauweise von Aluminiumwagenkästen nahekommt.

In einem ersten Schritt werden ZFD-Profile stoffschlüssig miteinander zu Außenblechen gefügt. Im zweiten Schritt werden die Außenbleche durch Formschluss ähnlich dem Reißverschlussprinzip (zip fastening) mit den in einer Vorrichtung positionierten Gerippeträgern temporär fixiert, damit diese miteinander zu Seitenwand-, Stirnwand- und Dachsegmenten verschweißt werden können. Die temporäre Fixierung von Außenblechung und Gerippeträger für den Fügeprozess wird in der ZFD-Bauweise als Clip-System (ohne zusätzliche Spannelemente wie Kniehebelspanner o. ä.) realisiert. Anschließend erfolgt das Laserschneiden der Tür-, Fenster-, Dach- und sonstigen Ausbrüche sowie die Anbindung von Fensterrahmen, Türspanten, Voutenträgern etc. zur Fertigstellung der Seitenwand-, Dach- und Stirnwandmodule.

Grundlegend müssen jedoch die Struktureigenschaften des Wagenkastens in ZFD-Bauweise sowie das Aufnahmevermögen stoßartiger Belastungen im Schadensfall mindestens denen des Wagenkastens in konventioneller Differentialbauweise genügen. [3]

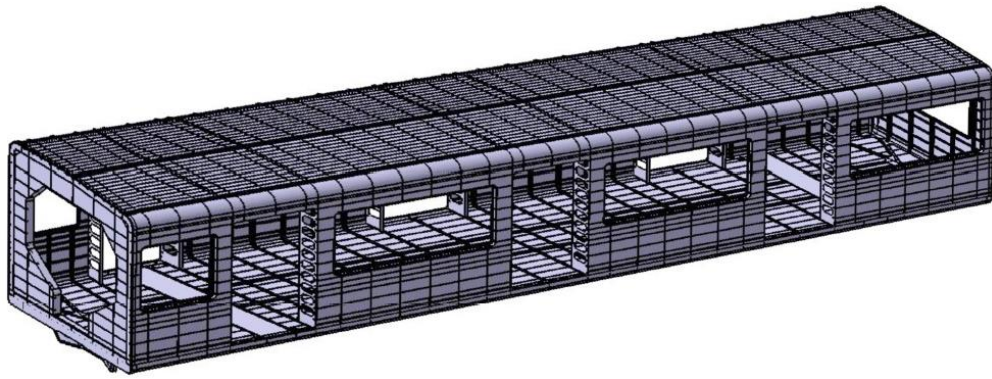


Abbildung 2: Wagenkastenrohbau in ZFD-Bauweise [3]

Abbildung 2 zeigt den Wagenkastenrohbau in ZFD-Bauweise. Die Haupt- und Rastermaße entsprechen denen des konventionellen Modells. Durch den identischen Detaillierungsgrad des Wagenkastens in ZFD-Bauweise zum Wagenkasten in konventioneller Bauweise ist eine gute Vergleichbarkeit von Masse und Struktureigenschaften gewährleistet. In Voruntersuchungen, siehe [3], konnte bereits das Gesamtgewicht des Wagenkastens in ZFD-Bauweise in der dargestellten Modifikation um ca. 7 % reduziert werden. Im Einzelnen betrachtet, wird das Potential der ZFD-Bauweise deutlicher, da das bei beiden Varianten identische Untergestell den größten Massenanteil hat. So sind bei der ZFD-Bauweise das Dach ca. 20 %, die Stirnwände jeweils 7 % bis 12 % und die Seitenwände jeweils ca. 11% leichter als bei der konventionellen Bauweise. Die Kostenreduktion durch Materialeinsparungen sowie die bereits genannten fertigungstechnischen Vorzüge sind wesentliche Vorteile bei der Herstellung von Wagenkästen mit dem ZFD-Prinzip. [3]

In Abbildung 3 ist ein Detail der Seitenwand in ZFD-Bauweise dargestellt. Durch die Fertigung der Außenbeblechung aus mehreren, durchgängig verlaufenden ZFD-Profilen entfällt eine Vielzahl an Schweißnahtunterbrechungen in Längsrichtung gegenüber der konventionellen Differentialbauweise. Durch die Profilform der einzelnen ZFD-Profile wird dabei eine hohe Längssteifigkeit erreicht. Die Quersteifigkeit der Seitenwand wird hingegen durch Gerippeträger erzeugt, die wiederum aus zwei Einzelteilen, dem Steg und dem Gurt, durch Schweißen gefertigt werden. Die Abstände der integrierten Längsversteifungen der ZFD-Profile entsprechen in dieser Darstellung der konventionellen Bauweise. [3]

Abbildung 4 zeigt die Detaildarstellung des Ausschnittes „B“ aus Abbildung 3 und verdeutlicht das Prinzip der Selbstpositionierung von Gerippeträger und ZFD-Profil [6]. Des Weiteren ist der Bereich der T-Stoß Schweißverbindung von Gerippeträger und ZFD-Profil angezeigt.

Abbildung 5 zeigt aus der Richtung „C“ nach Abbildung 4 im Bildabschnitt a) das prinzipielle Clip-System zur Selbstpositionierung von Gerippeträger und ZFD-Profil für den anschließenden Schweißprozess. Dabei ist die Aussparung so geartet, dass sie das Hohlprofil des ZFD-Profils geringfügig umschließt, um einen definierten Sitz zu ermöglichen und ein zufälliges Abheben zu verhindern. Die Auslegung dieses ZFD-

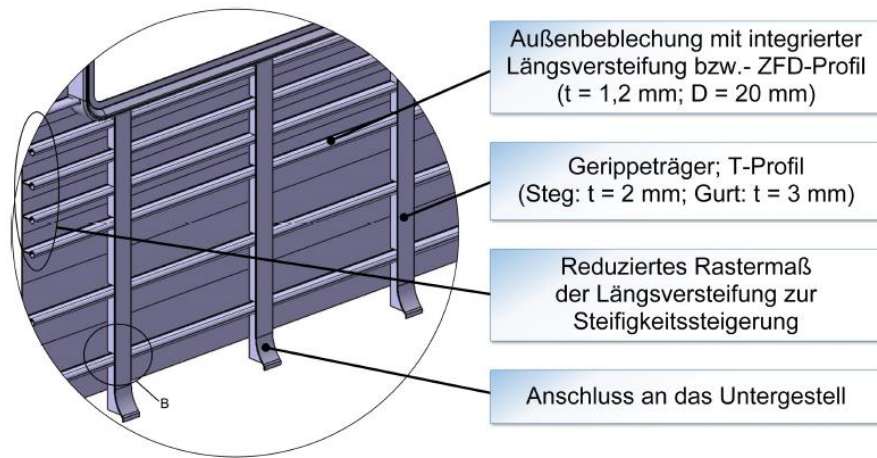


Abbildung 3: Detail der Seitenwand in ZFD-Bauweise

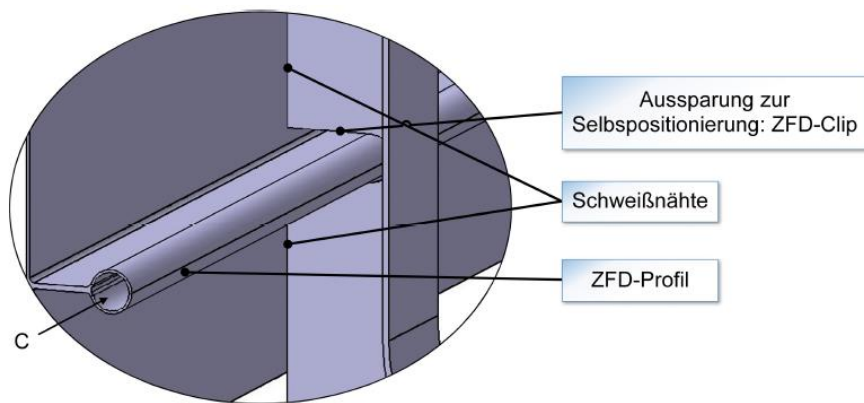


Abbildung 4: Detailausschnitt „B“ der Seitenwand in ZFD-Bauweise [3]

Clip-Systems ist wesentlicher Bestandteil der folgenden Ausführungen. Der Bildbereich b) zeigt das prinzipielle ZFD-Profil, das durch Walzprofilieren aus einem Blechband hergestellt wird. Die angewendeten Biegeradien entsprechen den Vorgaben der DIN 6935, die Mindestbiegeradien für Flacherzeugnisse aus Stahl in Abhängigkeit der Materialstärke und dem Werkstoff angibt. Der mit einem Oval markierte Bereich zeigt den Steg des ZFD-Profils. Der Spalt zwischen den beiden Stegflanken wird durch ein geeignetes Fügeverfahren stoffschlüssig geschlossen. Dadurch wird die Stabilität des ZFD-Profils gewährleistet und gleichzeitig verhindert, dass Flüssigkeit in den Spalt eindringen kann und Korrosion hervorruft. [DIN 6935, DIN 65169, 3]

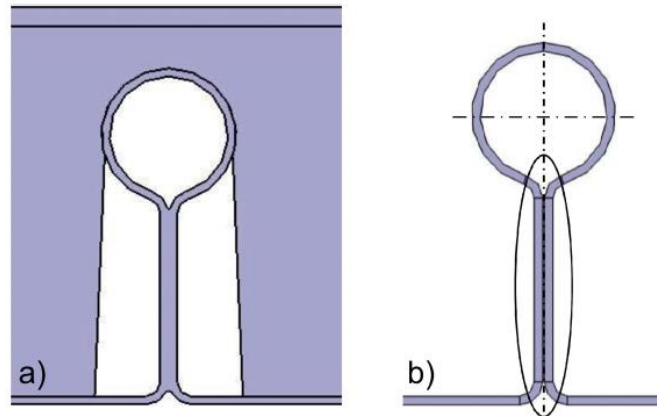


Abbildung 5: a) Prinzipieller Formschluss zwischen ZFD-Profil und Gerippeträger [3], b) ZFD-Profil

4 Werkstoff und Fertigungsverfahren

4.1 Werkstoff

Zur Herstellung des ZFD-Profils und des Gerippeträgers wird ein warm gewalzter unlegierter Baustahl nach DIN EN 10025-1 mit der Materialbezeichnung prEN 10025-2 S355J2C+AR bzw. +N verwendet. Der ausgewiesene Werkstoff weist eine hohe Streckgrenze auf und zeichnet sich durch beste Schweißbeignung aus. Nach EN 10027-1 ist S355J2C bei der weiteren Verarbeitung zum Abkanten, Walzprofilieren und Kaltziehen gut geeignet. Somit erfüllt das Material S355J2 die hier gestellten Anforderungen für hoch beanspruchte und kalt verformte Schweißteile.

4.2 Fertigungsverfahren

Das ZFD-Profil wird mit dem Fertigungsverfahren Walzprofilieren hergestellt. Beim Profilieren werden Blechbänder oder Platinen mit Hilfe von mehreren speziell geformten Walzen (Rollen) zu Profilen geformt. Die Formgebung wird kontinuierlich durch hintereinander angeordnete Walzenpaare realisiert. Die Grenzabmaße für das Walzprofilieren

sind in DIN 10162 hinterlegt. Voruntersuchungen zeigen jedoch, dass deutlich geringere Grenzabmaße sowie zugeordnete Toleranzen bei der Fertigung des ZFD-Profiles mit dem Werkstoff S355J2C+AR und einer Blechstärke von 1,2 mm erreicht werden können.

Da die meisten Wagenkästen eine von außen konvexe Form der Seitenwände und des Daches zur Maximierung des Fahrgastraumes aufweisen (siehe Abbildung 1) und keine Einschränkungen in der Formgebung entstehen sollen, werden die Gerippeträgerstege durch Laserschneiden (aus 2 mm dicken Blechen) geschnitten. Anschließend wird der Gerippeträgersteg mit dem Gerippeträgergurt aus 3 mm dickem Blech zu einem T-Profil zusammengeschweißt (siehe Abbildung 3).

5 Auswahl eines geeigneten ZFD-Systems

5.1 Anforderungen und Restriktionen

Bei der Entwicklung eines geeigneten ZFD-Systems ist auf eine möglichst optimale Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften des verwendeten Baustahls S355J2C zu achten. Aufgrund der hochdynamisch beanspruchten Seitenwand eines Wagenkastens im Betriebsfall ist eine kerbarme Konstruktionsweise anzuwenden, um die Dauerfestigkeit bei minimaler ZFD-Profil-Blechstärke zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang ist weiterhin zu berücksichtigen, dass das ZFD-Profil nach dem Walzprofilieren keinem Hochtemperaturprozess ausgesetzt wird, der eine Rekristallisation des Materialgefüges und damit eine Festigkeitsabnahme hervorruft.

Die Herausforderung der Integration eines Selbstfixierungssystems für die Vormontage von ZFD-Profil-Außenbeblechung und Gerippeträgern zum anschließenden Verschweißen ist, dass die Werkstoffeigenschaften des S355J2C Baustahls ungünstige Voraussetzungen für die Realisierung eines rein elastischen Selbstfixierungssystems, gegenüber z. B. eines Federstahls mit deutlich höherer Fließgrenze, haben. Durch das eher geringe elastische Potenzial des S355J2C Baustahls müssen die elastischen Werkstoffeigenschaften voll ausgenutzt und vermutlich überschritten werden, um eine Selbstfixierung zu erreichen. Dabei gilt es, die auftretenden plastischen Verformungen möglichst gering zu halten, so dass keine Beeinträchtigung der Gesamtstruktur des ZFD-Systems daraus hervorgehen kann. Des Weiteren soll die Gesamtstruktur durch die Integration des Selbstfixierungssystems, insbesondere durch die Aussparung im Gerippeträger, für die Aufnahme des ZFD-Profiles möglichst wenig geschwächt werden (siehe Abbildung 4).

Damit die Konstruktion eines Wagenkastens in ZFD-Bauweise eine möglichst hohe Lebensdauer aufweist, muss sichergestellt werden, dass der Wagenkasten dauerhaft ausgelegt ist und eine lückenlose Beschichtung der miteinander gefügten Bauteile mit einem geeigneten Korrosionsschutzmittel möglich ist.

In Tabelle 3 sind die Auslegungsparameter für das ZFD-System gelistet.

5.2 Ausgangssituation und Lösungsprozess

Als strukturierende Methode für die konstruktive Auslegung eines ZFD-Systems wird der allgemeine Lösungsprozess nach Pahl/Beitz [4] verwendet. Abbildung 6 zeigt das

Tabelle 3: Auslegungsparameter für das ZFD-System

Benennung	Größe
Max. Fügekraft ZFD-Profil mit Gerippeträger	$F_f < 30 \text{ N}$ (pro Profilstoß)
Min. Haltekraft ZFD-Profil mit Gerippeträger	$30 \text{ N} \leq F_h \leq 100 \text{ N}$ (pro Profilstoß)
Spaltmaß zwischen ZFD-Außenbeblechung und Gerippeträger-Steg	$\leq 0,2 \text{ mm}$
Spaltmaß zwischen ZFD-Hohlprofil und Gerippeträger-Aussparung	$\leq 0,5 \text{ mm}$
Toleranzfeld Abmessungen ZFD-Profil	$\pm 0,2 \text{ mm}$ (durch Rollprofilierung kaltgeformtes Profil)
Toleranzfeld Abmessungen Gerippeträger	nach DIN EN ISO 9013:2014-12 bzw. $\pm 0,2 \text{ mm}$
Blechdicke Gerippeträger-Steg	2 mm
Blechdicke Gerippeträger-Gurt	3 mm
Gurtbreite Gerippeträger	60 mm
Gesamthöhe Gerippeträger	60 mm
Blechdicke ZFD-Profil	1,2 mm
ZFD- Hohlprofildurchmesser	$20 \text{ mm} \leq D \leq 30 \text{ mm}$
ZFD-Profilhöhe	50 mm

abgeleitete Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit.

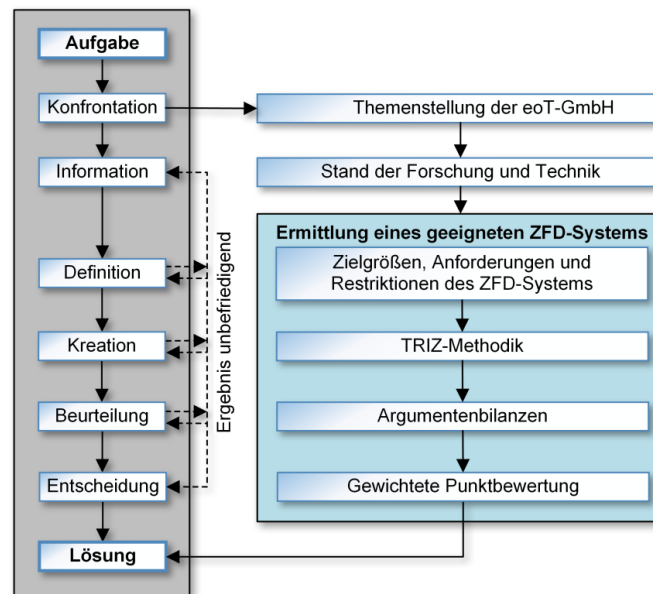


Abbildung 6: Lösungsprozess und Vorgehensweise der konstruktiven Auslegung des ZFD-Systems

Im Ergebnis des ZFD-Prinzips wird eine Selbstpositionierung bzw. Selbstfixierung von ZFD-Profil-Außenbeblechung und Gerippeträger zur Positionierung für den Fügeprozess ohne zusätzlichen Vorrichtungsaufwand angestrebt. Dafür soll die aus einzelnen ZFD-Profilstreifen bereits zusammengeschweißte Außenbeblechung mit den in einer Vorrichtung positionierten Gerippeträgern so miteinander verbunden werden, dass der T-Stoß-Fügespalt zwischen ZFD-Profil-Außenbeblechung und Gerippeträger ausreichend klein ist, damit im Folgeprozess die Außenbeblechung mit dem Gerippeträger durch Laserschweißen stoffschlüssig verbunden werden kann (siehe Abbildung 4). Diese Selbstfixierung ist besonders wichtig, wenn der zu fertigende Wagenkasten eine gewölbte Außenbeblechung aufweist, was zumindest im Dachbereich der Fall sein wird. Ein selbständiges Abheben der Außenbeblechung von den Gerippeträgern wird somit vermieden. Nach dem Verschweißen von ZFD-Außenbeblechung und Gerippeträger soll sichergestellt werden, dass das ZFD-System keinen Einfluss mehr auf die Gesamtstruktur des Wagenkastenrohbaus hat. Daraus resultiert, dass der Gerippeträger und das ZFD-Hohlprofil im gefügten Endzustand durch einen Luftspalt getrennt sind, damit bei etwaigen Relativbewegungen keine störenden Geräusche entstehen und zudem eine lückenlose Beschichtung der Außenbeblechung sowie der Gerippeträger mit einem geeigneten Korrosionsschutz ermöglicht wird.

Als Grundlage der ZFD-System-Gestaltung wird das in [3] erarbeitete ZFD-Clip-System (siehe Abbildung 7), bei dem die Elastizität des ZFD-Hohlprofils ausgenutzt wird, verwendet. Durch ein Übermaß der Gerippeträger-Aussparung im Bezug zum ZFD-Hohlprofil Durchmesser soll eine Schnappverbindung realisiert werden.

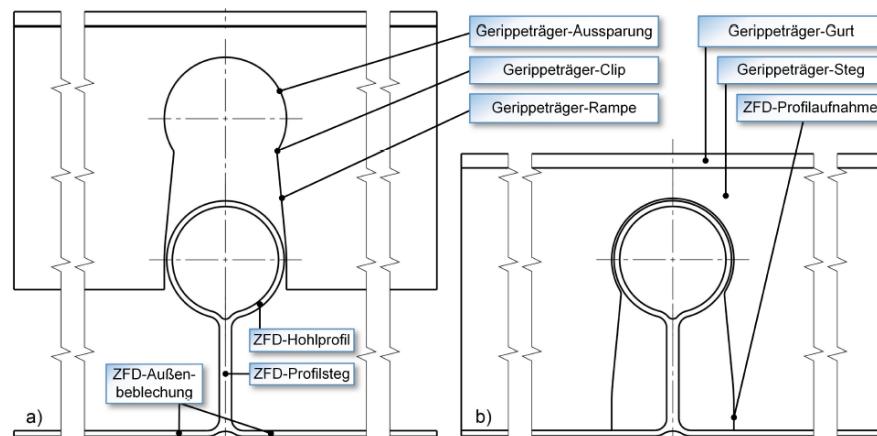


Abbildung 7: Prinzipiell geeignetes ZFD-Clip-System, a) Geöffneter Clip-Formschluss, b) Geschlossener Clip-Formschluss

5.3 TRIZ-Methodik zur Überwindung des technischen Widerspruchs

Nach den in Tabelle 3 dargestellten Zielvorgaben ist das ZFD-System so auszulegen, dass die benötigte Fügekraft F_f , um die Selbstpositionierung zu erreichen, kleiner 30 N sein soll, damit dieser Fertigungsschritt von Hand durchgeführt werden kann. Zudem soll die Mindesthaltekraft F_h im Bereich von 30 N bis 100 N liegen, damit die gesamte Seitenwand im vorfixierten Zustand gegebenenfalls gewendet werden kann, ohne dass sich die Verbindung zur Positionierung löst.

Diese ZFD-System-Zielgrößen der Füge- und Haltekraft führen zu einem technischen Widerspruch:

- Einerseits soll eine möglichst geringe Fügekraft F_f bei einer möglichst geringen plastischen Verformung der Gesamtstruktur gewährleistet werden, was zu einem ZFD-Clip-System mit einem möglichst kleinen Clip führt.
- Auf der anderen Seite wird eine große Haltekraft F_h benötigt, was zu einem ZFD-Clip-System mit einem möglichst großen Clip führt.

Zur Überwindung dieses technischen Widerspruchs ist die Anwendung der Methodik des „erfinderischen Problemlösens“ TRIZ nach G. S. Altshuller [1] geeignet. Hauptmerkmal der Problemlösung mit der TRIZ-Methodik ist das Formulieren, Verstärken und Überwinden technischer und physikalischer Widersprüche in technischen Systemen. Im Gegensatz zu den gebräuchlichen Varianten des „Versuch-und-Irrtum“-Lösungsverfahren, berücksichtigt die TRIZ-Methode empirisch ermittelte Entwicklungsgesetze technischer Systeme und ermöglicht daher eine gezielte Suche nach Problemlösungen. Grundlage für diese Entwicklungsgesetze bildete eine umfangreiche Analyse von Patenten. [7]

Die Überwindung technischer Widersprüche kann laut Livotov und Petrov [7] mit der TRIZ-Methodik, durch die Anwendung von 39 technischen Parametern, 40 innovativen Grundprinzipien und der Widerspruchstabelle, ermöglicht werden. Eine vollständige

Darstellung der benötigten Parameter und Prinzipien ist in [1, 4] dargelegt. Für die Suche nach passenden Lösungsprinzipien wird in folgenden Schritten vorgegangen: [7]

1. Formulierung eines technischen Widerspruchs mit Hilfe der 39 Eingangsparameter
2. Auswahl einer zu verändernden bzw. zu verbessernden Eigenschaft aus der Liste der 39 Parameter
3. Auswahl einer oder mehrerer Eigenschaften aus der Liste der 39 Parameter, die sich bei der Verbesserung der zuvor ausgewählten Eigenschaft verschlechtern
4. Ermittlung von bis zu vier Lösungsprinzipien mithilfe der Widerspruchstabelle
5. Wiederholung der Schritte 2 bis 4, falls mehrere Widersprüche formuliert werden
6. Vertauschen der Reihenfolge der in den Schritten 2 und 3 eingegebenen Parameter, wenn ein zweiter (invertierter) technischer Widerspruch aus dem ersten Widerspruch abgeleitet wird
7. Auswahl der Prinzipien, die mehrmals bzw. am häufigsten von der Tabelle vorgeschlagen werden
8. Entwicklung neuer Lösungskonzepte durch Kombination der vorgeschlagenen Lösungsprinzipien und davon abgeleiteter Ideen

Für die Eingangsparameter wird für den bereits formulierten technischen Widerspruch die Eigenschaft „Kraft“ als zu verbessernder Parameter und „Länge des beweglichen bzw. unbeweglichen Objekts“, dem Gerippeträgeraussparungsübermaß des ZFD-Clips, als sich verschlechternder Parameter ausgewählt. Die Formulierung der Auswahl lautet: „Je besser (größer) die Haltekraft sein soll, umso schlechter (größer) wird das Übermaß der Gerippeträgeraussparung“.

Die in der Widerspruchstabelle vorgeschlagenen Lösungsprinzipien (siehe [6]) mit den in [1] zugeordneten Nummern lauten:

4. Asymmetrie
9. Vorherige Gegenwirkung
10. Vorherige Wirkung
17. Übergang zu anderen Dimensionen
19. Periodische Wirkung
28. Ersetzen des mechanischen Systems
36. Anwendung der Phasenübergänge

Die vorgeschlagenen Lösungen Nr. 9, Nr. 19 sowie Nr. 36 können nicht sinnvoll auf das vorliegende ZFD-Clip-System übertragen werden.

Aus dem Lösungsprinzip Nr. 4 kann in Kombination mit den Lösungsprinzipien Nr. 17 und Nr. 28 die in Abbildung 8 dargestellte ZFD-System-Variante abgeleitet werden. Bei dieser sogenannten Biege-Formschluss-Variante wird die Haltekraft F_h durch

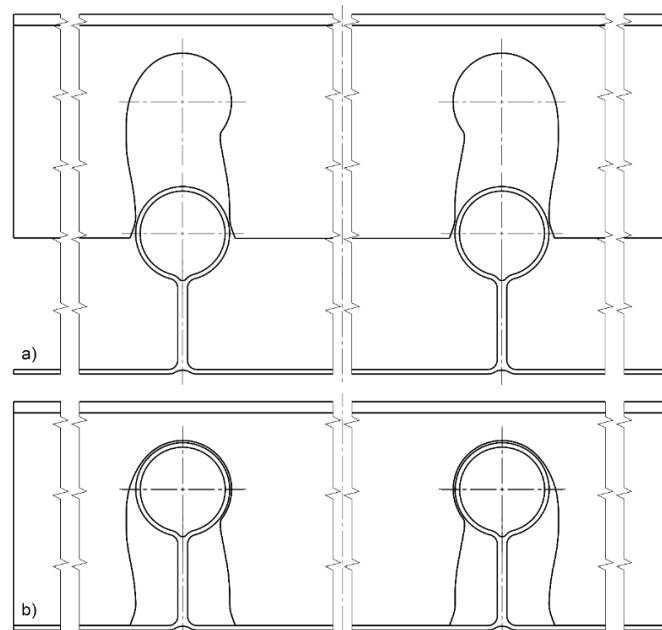


Abbildung 8: Asymmetrischer Biege-Formschluss des ZFD-Systems, a) Geöffneter Biege-Formschluss, b) Geschlossener Biege-Formschluss

die Ausnutzung der ZFD-Steg- und ZFD-Außenbeblechungs-Steifigkeit erzeugt. Dafür wird ein Dimensionsübergang vom lokalen ZFD-Clip-System zum globalen ZFD-Biege-System erzeugt, denn durch die asymmetrische Gerippeträgeraussparungskontur kann die Haltekraft F_h nur bei einer paarweise-gespiegelten Anordnung der Aussparungen aufgebaut werden. Zusätzlich wird das mechanische Clip-System durch ein mechanisches „Verspannungs“-System ersetzt.

Aus dem Lösungsprinzip Nr. 10 wird ein elastisches Vorspannen des Gerippeträgers abgeleitet, bei dem die Gerippeträgeraussparungen zum Fügen der ZFD-Außenbeblechung elastisch aufgeweitet werden, damit beim Fügen eine möglichst geringe Fügekraft F_f entsteht (siehe Abbildung 9). Dieses Lösungsprinzip stellt zwar keine geometrische Modifikation der in Abbildung 7 dargestellten Grundvariante des ZFD-Clip-Systems dar, kann aber als unterstützende Maßnahme in den Fügeprozess zur Selbstpositionierung integriert werden.

Durch das einfache Ersetzen des ZFD-Clip-Systems wird mit Hilfe des Lösungsprinzips Nr. 28 ein ZFD-Schnapp-System erarbeitet, welches die hohe Steifigkeit des Gerippeträgersteges so anpassbar macht, dass das elastische Verhalten des ZFD-Hohlprofils für den Fügeprozess keine Rolle spielt. Abbildung 10 zeigt das ZFD-Schnapp-System, bei dem die gesamte für den Fügeprozess benötigte elastische Verformung durch die Elastizität der Schnapparme ermöglicht wird.

Die Vor- und Nachteile der identifizierten Lösungsprinzipien sind in Argumentenbilanzen (siehe [6]) detailliert aufgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf der Grundlage der Argumentenbilanzen mit Hilfe einer Punktbewertung die Rangfolge für das geeignetste

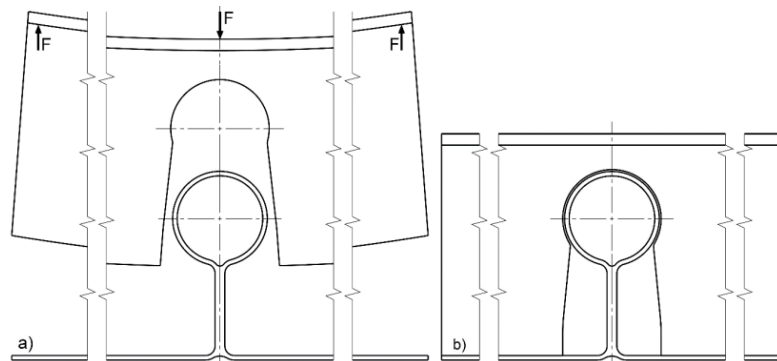


Abbildung 9: Zum Fügen elastisch vorgespannter Gerippeträger, a) Vorspannter Gerippeträger zum Fügen, b) Geschlossener Clip-Formschluss

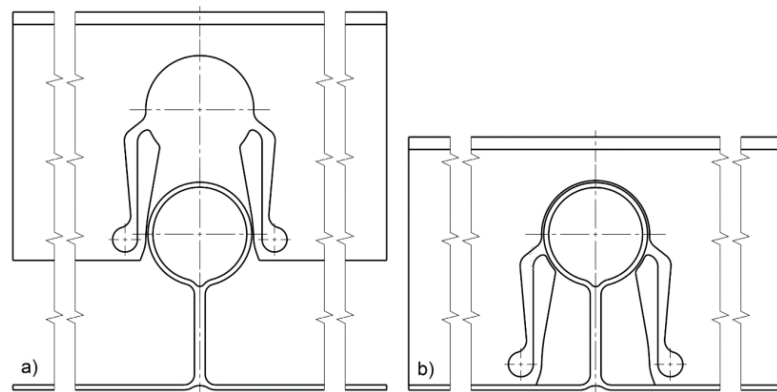


Abbildung 10: Elastischer Schnapp-Formschluss des ZFD-Systems, a) Geöffneter Schnapp-Formschluss, b) Geschlossener Schnapp-Formschluss

ZFD-System ermittelt. Das Vorgehen lässt sich in sechs Schritte gliedern:

1. *Bewertungskriterien festlegen:* Haltekraft, wirtschaftliche Herstellung, Gerippeträger-Stabilität, Korrosionsschutzhaltbarkeit, Zugänglichkeit für den Korrosionsschutz, Fügekraft, elastische Verformungen, Toleranzen
2. *Gewichtung der Bewertungskriterien bestimmen:* „2“ sehr wichtig, „1“ untergeordnetes Kriterium
3. *Eigenschaften der Varianten beschreiben:* qualitative Eigenschaften herausarbeiten, siehe [6]
4. *Eigenschaften mit Punkten bewerten:* „3“ gut erfüllt, „2“ eher mäßig erfüllt, „1“ eher nicht erfüllt
5. *Punkte mit Gewichtung multiplizieren:* Berechnung von gewichteten Punktzahlen
6. *Aufsummieren der Resultate aus der Multiplikation von Kriteriengewichten mit den Punktzahlen für jede Variante:* Ermittlung der Rangfolge der einzelnen Varianten, siehe Tabelle 4

Tabelle 4: Gewichtete Eigenschaftserfüllung der ZFD-Systeme

Bewertungskriterium	Gewichtung	Clip-System	Biege-System	Schnapp-System
Große Haltekraft	2	3	1	3
Wirtschaftliche Herstellung	2	3	3	2
Gerippeträger-Stabilität	2	3	2	1
Korrosionsschutz-haltbarkeit	2	2	2	1
Zugänglichkeit für den Korrosionsschutz	1	3	3	2
Kleine Fügekraft	1	1	2	3
Elastische Verformungen	1	2	3	3
Große Toleranzen möglich	1	2	3	3
Summenprodukt		30	27	25

Somit wird im Weiteren das in Abbildung 7 dargestellte ZFD-Clip-System als Grundlage für die konstruktive und strukturmechanische Auslegung der Selbstfixierung des ZFD-Systems verwendet.

6 Konstruktive und strukturmechanische Auslegung des ZFD-Systems

Um eine optimale geometrische Form für das ZFD-Clip-System zu erhalten, wird ein ZFD-Simulationsmodell entwickelt. Das elastische Potential spielt im Zusammenhang mit der Halte- und Fügekraft dabei eine entscheidende Rolle. Es wird das Vorgehen aus Abbildung 11 angewendet. Die numerischen Simulationen werden mit Hilfe der Methode der finiten Elemente durchgeführt und dienen der Abschätzung einer generellen Machbarkeit, der benötigten Fügekräfte sowie der beim Fügen entstehenden plastischen Verformungen unter Berücksichtigung der fertigungsüblichen Toleranzen. Es wird das FE-System ANSYS Workbench verwendet.

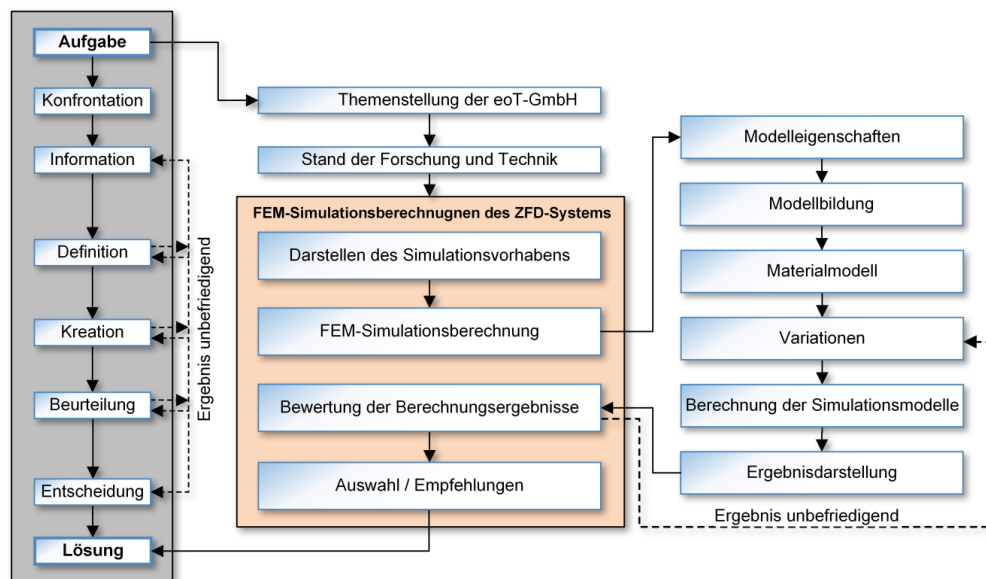


Abbildung 11: Lösungsprozess und Vorgehen für die FEM-Simulationsberechnungen

6.1 Voruntersuchungen

Zur Ermittlung geeigneter Simulationsparameter wurden verschiedene Untersuchungen hinsichtlich der Modellierung eines Schnappsystems durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung ist in [6] gegeben.

Die Voruntersuchungen beinhalten unter anderem:

- Variationen der Geometrie zur Ermittlung des elastischen Potentials (unter Einhaltung der gesetzten Topologie)
- Berechnungen zum lokalen Verformungs- und Steifigkeitsverhalten in Verbindung mit der analytischen Beschreibung des Kontaktes von Zylinder und ebener Platte

- Analysen zur Netzfeinheit im Kontaktbereich in Verbindung mit der analytischen Lösung zur Hertz'schen Pressung
- Beschreibungen der fertigungsbedingten Toleranzfelder
- Analytische und numerische Berechnungen von Schnappverbindungen unter Berücksichtigung und Variation der Vernetzung, Schrittweite und Reibungskoeffizienten

Im Vergleich zur ursprünglichen Geometrie (siehe Abbildung 7) zeigte sich, dass eine reduzierte Spaltlänge zwischen den ZFD-Stegflanken (siehe Abbildung 12) ein größeres elastisches Potential sowie einen technologischen Vorteil beim Fügen der Stegflanken hat.

6.2 Vorgehensweise

Abbildung 12 zeigt das Prinzip des ZFD-Clip-Simulationsmodells. Dabei wird in der Ausgangsstellung der Gerippeträger so positioniert, dass die Gerippeträger-Rampe gerade das ZFD-Hohlprofil berührt (a). Zur Abschätzung der Fügekraft F_f wird in mehreren Schritten der Fügeprozess simuliert (b). Die resultierende Haltekraft F_h wird durch das anschließende Auseinanderziehen von Gerippeträger und ZFD-Profil ermittelt (c).

Ziel der konstruktiven und numerischen Untersuchungen ist es, die geometrischen Parameter des ZFD-Clip-Systems zu identifizieren bei denen, unter Berücksichtigung der festgelegten Toleranzfelder, die maximale Fügekraft $F_f = 30$ N nicht überschritten sowie die Mindesthaltekraft $F_h = 30$ N nicht unterschritten wird.

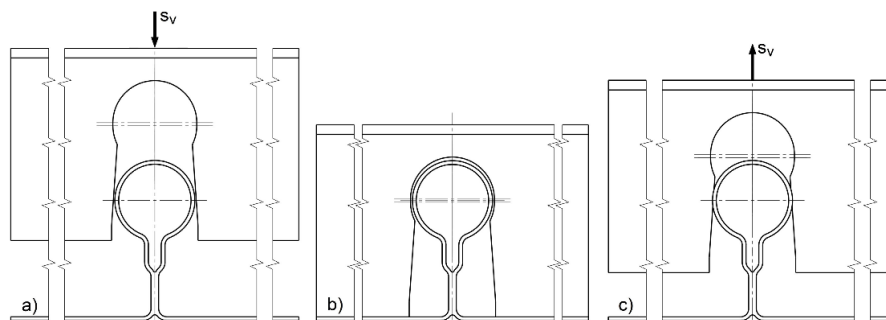


Abbildung 12: Vorgehensweise der numerischen ZFD-Clip-System-Simulation, a) Ausgangsstellung, b) Gefügter Zustand, c) Endstellung

6.3 Modellbildung und Randbedingungen

Die Ausgangsbedingungen für das numerische ZFD-Simulationsmodell werden wie folgt festgelegt [6]:

- Statisch-mechanische Mehrschrittanalyse, Schrittweite 0,1 mm
- Vernachlässigung von dynamischen Effekten

- 3D-Modell, Ausnutzung der Symmetrie, z. T. zusätzliche Modellreduktionen
- Asymmetrischer Kontakt, Reibungskoeffizient $\mu = 0,15$, Augmented Lagrange-Verfahren [2], Elementgröße im Kontaktbereich 0,04 mm
- Elastisch-bilinear-plastisches Materialverhalten mit kinematischer Verfestigung

Da der Werkstoff während des Fügens (Ermittlung der Fügekräfte) und des anschließenden wieder Auseinanderziehens (Ermittlung der Haltekräfte) in unterschiedlichen Richtungen plastisch verformt wird, hat der Bauschinger-Effekt einen Einfluss auf die entstehenden Kräfte. Aus diesem Grund wird die kinematische Verfestigung gewählt. [6]

Zur Bestimmung der Randbedingungen des ZFD-Clip-Systems wird der Fügevorgang zur Selbstfixierung zunächst visualisiert. Abbildung 13 a) zeigt die zur Montage minimal benötigten Komponenten. Zur Vorbereitung des Fügevorgangs wird der Gerippeträger zur Positionierung in eine Montagevorrichtung eingelegt (b). Anschließend wird die ZFD-Außenbeblechung mit den Gerippeträgeraussparungen gefügt (c).

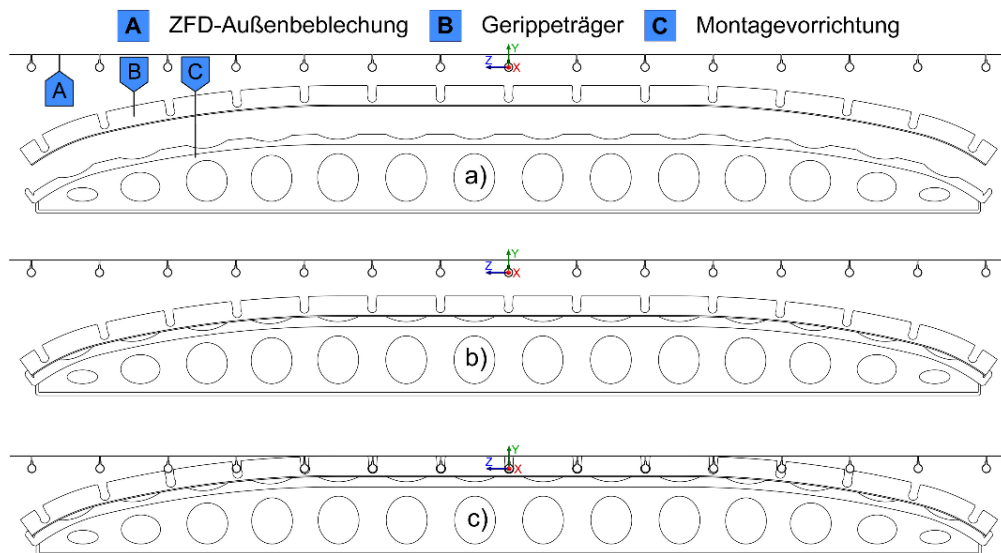


Abbildung 13: Montageprinzip des ZFD-Clip-Systems, a) ZFD-Komponenten und Montagevorrichtung, b) In Vorrichtung eingelegter Gerippeträger, c) Teilweise gefügte ZFD-Seitenwandmodul

Der Gerippeträger liegt bei der Montage in einer sehr steifen Montagevorrichtung. Der Gerippeträger-Gurt kann somit im Simulationsmodell als unendlich steif angesehen werden. Die Lagerungs- und Symmetrierandbedingungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

6.4 Variation des ZFD-Clip-Systems

Die zu variierenden Parameter des ZFD-Clip-Systems zur Einflussuntersuchung auf die Fügekraft F_f sowie der Haltekraft F_h sind (Bezeichnungen siehe Abbildung 7):

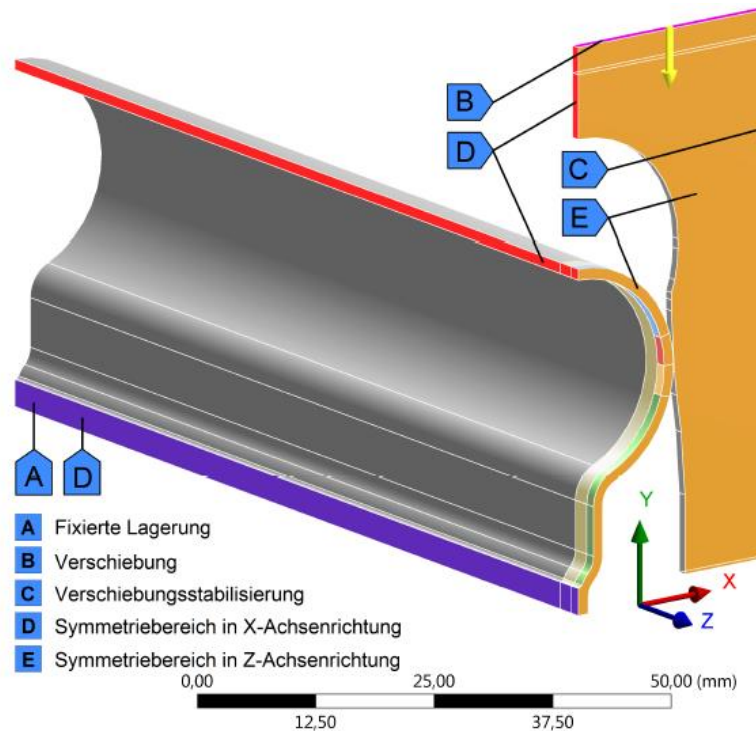


Abbildung 14: Lagerungs- und Symmetrierandbedingungen des ZFD-Clip-Simulationsmodells

- Rampenwinkel
- Rampenform (Absatz)
- Clip-Kanten Geometrie des Gerippeträgers

Für die Auswahl von geometrischen Modifikationen der Gerippeträger-Aussparungskontur sind Parameter zu bevorzugen, die einen möglichst kurzen Fügekraftweg bis zum Erreichen der Fügehöchstkraft ermöglichen und zudem eine möglichst geringe maximale Fügehöchstkraft erzeugen, damit so wenig Arbeit wie möglich bis zum Erreichen der Fügehöchstkraft aufgewendet werden muss.

Die Fügekraft wird bei kleiner werdendem Rampenwinkel ebenfalls kleiner, jedoch wächst in diesem Fall der Fügeweg. Die Haltekraft sowie die maximalen plastischen Verformungen sind nahezu konstant, siehe Abbildung 15.

Zur Reduzierung des Fügewegs wird die Rampenlänge, wie in Abbildung 16 dargestellt, auf 5 mm beschränkt. Der weitere Verlauf der Aussparung wird durch einen Radius von $R = 50$ mm abgesetzt. Dadurch wird die Breite der ZFD-Profilaufnahme geringfügig vergrößert, was in Verbindung mit der Fase im Eingangsbereich zu einer einfacheren „Einfädelerung“ beim tatsächlichen Fügeprozess führen soll.

Als Auswahl für das ZFD-Clip-System wird ein Rampenwinkel von 3° präferiert, da hierdurch die maximale Fügekraft bei einem relativ kurzen Fügeweg erreicht wird, ohne

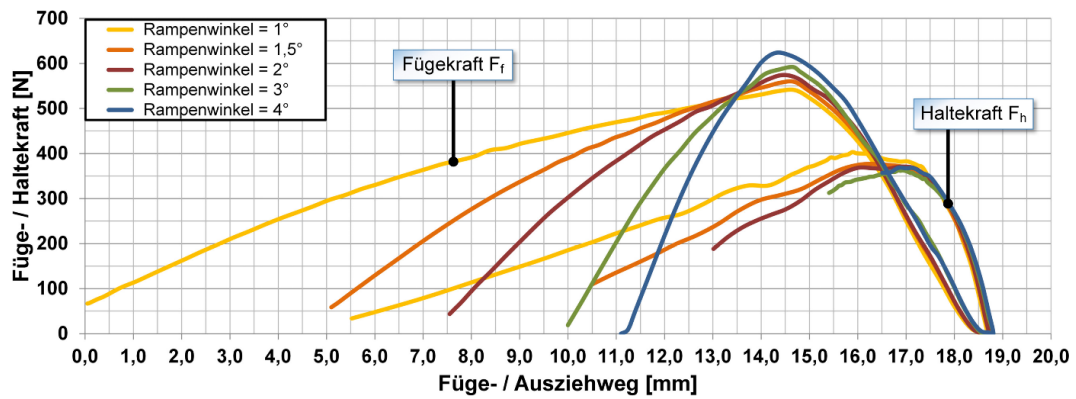


Abbildung 15: Einfluss des Rampenwinkels auf den Fügekraftverlauf des ZFD-Clip-Systems

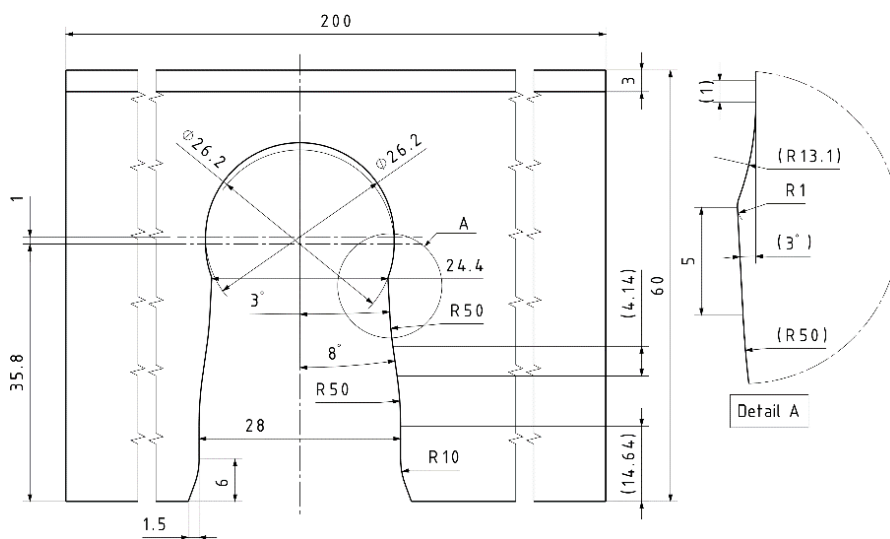


Abbildung 16: Skizze der abgesetzten Rampe des Gerippeträgers

dass der anfängliche Fügweg durch den Einfluss der abgesetzten Rampe in Verbindung mit kleineren Rampenwinkeln unnötig verlängert wird.

Zur Untersuchung der Clip-Kanten-Geometrie des Gerippeträgers werden drei unterschiedliche Kantentypen untersucht („rund“, „spitz“, „parallel“, siehe Abbildung 17).

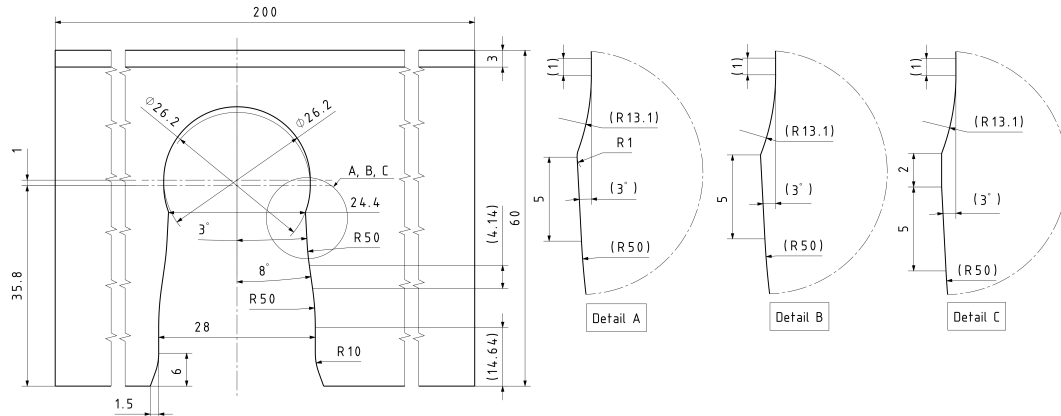


Abbildung 17: Skizze der zu untersuchenden Clip-Kanten-Typen, a) Abgerundete Kante, b) Scharfe Kante, c) Scharfe Kante mit Parallelführung

Die Berechnungen der maximalen Fügekräfte zeigen, dass kaum Unterschiede bestehen. Bei der Parallelführung wird jedoch eine etwas höhere Haltekraft erreicht. [6]

6.5 Numerische Simulation des ZFD-Clip-Systems

Aus den vorangestellten Untersuchungen resultieren folgende ZFD-Clip-System-Eigenschaften:

- ZFD-Profil mit reduzierter Steglänge, siehe Abbildung 12
- Gerippeträger-Rampenwinkel von 3° und abgesetzter Rampe
- Parallel geführte Clip-Kanten

Zur Untersuchung des ZFD-Clip-Systemverhaltens werden mit den ermittelten geometrischen Spezifikationen die fertigungsbedingten Grenzmaße (Höchst-, Nenn- und Mindestmaße) verwendet. Des Weiteren werden neben den zulässigen Mindestwerten der Materialkenngrößen auch die eher vorherrschenden Materialeigenschaften abgeschätzt und in der Simulation verwendet. Zugfestigkeit und Streckgrenze werden dazu um 145 MPa angehoben.

Abbildung 18 zeigt die Beträge der ermittelten Kraftverläufe des ZFD-Clip-Systems bei minimalen und maximalen Toleranzlagen sowie bei Nennmaßen. Des Weiteren ist der Einfluss der höheren Streckgrenze (H-S) bei den einzelnen Grenzmaßen abgebildet. Die Vorgabe der Toleranzfeldgrößen in Verbindung mit dem Konstruktionswerkstoff S355J2C bedingt eine sehr große Varianz der möglichen Fügekräfte F_f und Haltekräfte F_h . Der

Fügeweg wird ebenfalls durch die unterschiedlichen Toleranzlagen stark beeinflusst, so dass sich ein Mindestweg von ca. 6 mm und ein maximaler Weg von ca. 11,5 mm ergibt. Ein „Einschnappen“ der Clip-Verbindung bei Überschreitung des Clip-Kanten-Totpunkts, also bei Überschreitung der maximalen ZFD-Hohlprofil-Kontraktion, ist nicht gegeben, da die ermittelte Kraft an der Verschiebungs-Randbedingung über den gesamten Fügeprozess keine Krafrichtungsumkehrung erfährt.

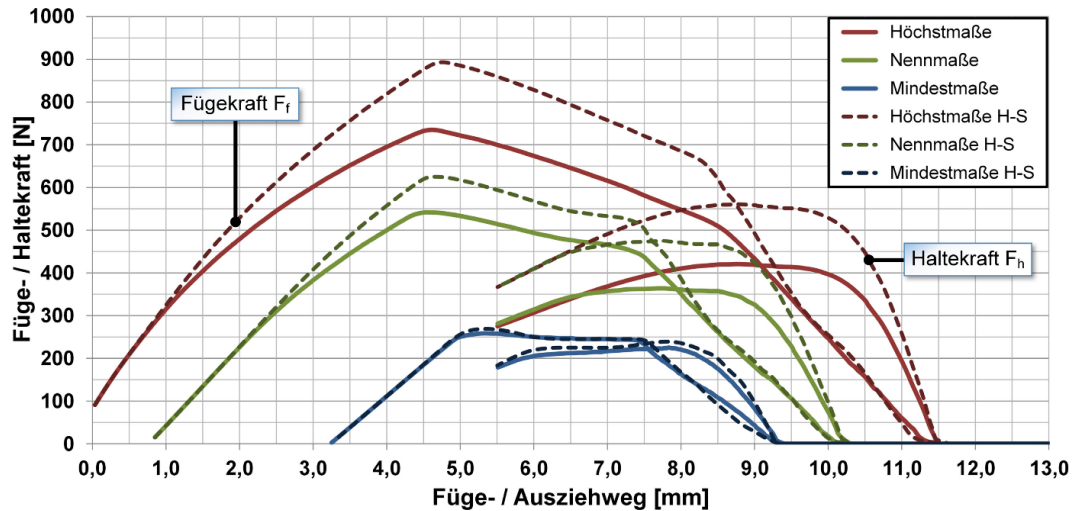


Abbildung 18: Kraftverläufe des ZFD-Clip-Systems bei Höchst-, Nenn- und Mindestmaßen sowie jeweils mit erhöhter Streckgrenze des Werkstoffes (H-S)

Der vollständig abgeschlossene Fügeprozess wird in allen Simulationsmodellen bei einem Fügeweg von 13 mm erreicht. An dieser Stelle liegt die Gerippeträger-Steg-Unterkante bündig, d. h. mit einem Spaltmaß von 0 mm, an der ZFD-Außenbeblechung an und entspricht der Position mit optimalen Voraussetzungen für den anschließenden Fügeprozess von Gerippeträger und ZFD-Profil. Da jedoch zwischen ZFD-Hohlprofil und Gerippeträger-Aussparung ein Mindestspalt von $\geq 0,5$ mm zur Korrosionsschutzbeschichtung gefordert ist, kann durch die eingeschränkte Verschiebbarkeit des ZFD-Profiles in Auszugsrichtung ein Spalt zwischen ZFD-Außenbeblechung und Gerippeträger-Steg-Unterkante entstehen. Der Abstand zwischen dem maximalen Fügeweg (13 mm) und dem jeweiligen Haltekraftbeginn zeigt im Rahmen der zulässigen Toleranzen die maximal möglichen Abstände von Gerippeträger-Steg-Unterkante und Außenbeblechung im selbstfixierten Zustand des entwickelten ZFD-Clip-Systems von 1,5 mm bis zu 3,75 mm.

Mit den festgelegten Toleranzen und den Mindestwerten der Materialkenngrößen ergibt sich ein Fügekraftbereich von ca. $540_{(-280)}^{(+200)}$ N. Die erreichbaren Haltekräfte liegen in einem Bereich von ca. $360_{(-135)}^{(+60)}$ N. Bleibende Verformungen aufgrund plastischen Materialverhaltens nehmen in radialer Richtung am Umfang des ZFD-Hohlprofils einen Wert von 0,22 mm an. [6]

Durch die Erhöhung der Streckgrenze (Abbildung 18, H-S) bleiben die geometrisch bedingten Größen des Fügewegs und des möglichen Spaltmaßes zwischen ZFD-Außenbeblechung

und Gerippeträger-Steg-Unterkante erhalten. Der Kraftverlauf wird hingegen durch die erhöhte Streckgrenze, abhängig von der jeweiligen Toleranzlage, entsprechend verändert. Dadurch entsteht ein Anstieg der maximalen Fügekraft von über 20 % bei den Höchstmaßen des ZFD-Clip-Systems.

Die detaillierten Berechnungsergebnisse inklusive plastischer Deformationen und Vergleichsspannungen sind in [6] aufgeführt.

6.6 Bewertung und Empfehlungen

Aus den Berechnungsergebnissen der FE-Simulationen folgt, dass das entwickelte ZFD-Clip-System grundsätzlich für die Realisierung einer Selbstfixierung von ZFD-Profil und Gerippeträger für den anschließenden Fügeprozess durch Laserschweißen zur Fertigung eines ZFD-Wandmoduls geeignet ist.

Die Resultate der berechneten Kräfte zeigen jedoch, dass die in Tabelle 3 dargestellten Zielgrößen des ZFD-Systems im Bezug zur Füge- und Haltekraft mit dem verwendeten Werkstoff, dem erarbeiteten Clip-System, den zu verwendenden Fertigungsverfahren und den ausgewählten Toleranzfeldgrößen technisch nicht erfüllbar sind. Die maximal aufzubringende Fügekraft F_f zum Erreichen der temporären Selbstfixierung für den anschließenden Fügeprozess von ZFD-Profil und Gerippeträger durch Laserschweißen ist unter Einbeziehung einer erhöhten Streckgrenze des S355J2C Baustahls mit ca. 900 N dreißigmal so groß wie die vorgegebene Zielgröße von maximal 30 N. Ebenso ist die überschlägig berechnete maximal benötigte Haltekraft von $F_h = 100$ N für eine einzelne ZFD-Clip-Verbindung mit mindestens 225 N bei ZFD-System-Mindestmaßen mehr als doppelt so groß, wobei jedoch hier keine Nachteile zu erwarten sind.

Die berechneten maximalen Fügekräfte F_f bedingen unter Berücksichtigung einer vorausgesetzten Handkraft eine Montagevorrichtung zur Vormontage des ZFD-Systems. In [6] werden unterschiedliche Systeme für die Vormontage vorgestellt. In Abbildung 19 (Baugruppe G und H) ist eine mechanische Fügevorrichtung abgebildet.

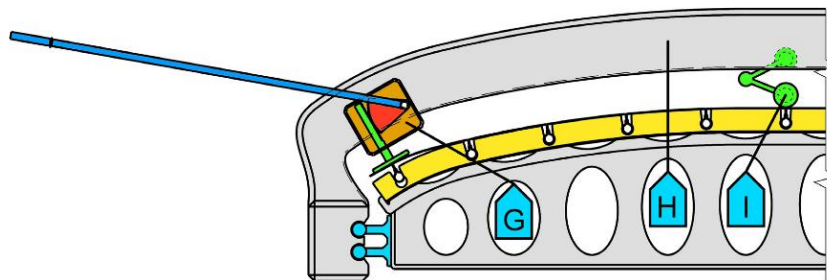


Abbildung 19: ZFD-Montagevorrichtung mit mechanischer Fügevorrichtung und Anpressrolle

Die resultierenden plastischen Verformungen, mit einem lokalen Maximum von 0,22 mm im Kontaktbereich, die bei der Berechnung des ZFD-Clip-Simulationsmodells mit Höchstmaßen entstehen, sind im Verhältnis zu den Gesamtabmessungen des ZFD-Hohlprofils sehr gering. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die globalen Struktureigen-

schaften des ZFD-Hohlprofils durch die im Fügeprozess entstehenden Deformationen vernachlässigbar sind.

Durch die geometrischen Vorgaben und Toleranzfeldgrößen des ZFD-Clip-Systems ist eine eingeschränkte Verschiebbarkeit von ZFD-Profil und Gerippeträger im gefügten Zustand vorhanden und es entsteht ein mögliches Spaltmaß von 1,5 mm bis zu 3,75 mm zwischen ZFD-Außenbeblechung und Gerippeträger-Steg-Unterkante. Da dieser mögliche Abstand deutlich größer als das benötigte Spaltmaß von 0,0 bis 0,12 mm zum Laserschweißen der T-Stoß-Verbindung ist, muss der Fügeprozess mit einem Gegenhalter unterstützt werden, der den Schweißspalt minimiert. Dieser Gegenhalter kann in Form einer Rolle realisiert werden, die in geeigneter Weise dem Schweißprozess vorausgehend die ZFD-Außenbeblechung mit einem definierten Anpressdruck auf die in einer Vorrichtung positionierten Gerippeträger drückt (Abbildung 19, Baugruppe I).

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Konstruktionsprinzip für die Herstellung von Schienenwagenkästen in Stahlbauweise vorgestellt. Mit diesem Verfahren können verschiedene Nachteile gegenüber der Aluminiumbauweise überwunden werden. Die Anwendung des Zip Fastening Design (ZFD)-Konstruktionsprinzips ermöglicht eine Selbstfixierung für den anschließenden Fügeprozess von ZFD-Profil und Gerippeträger zur Herstellung von entsprechenden Wandmodulen.

Mit der TRIZ-Methodik der „erfinderischen Problemlösung“ konnte eine grundlegende geometrische Form gefunden werden, mit der die höchste Übereinstimmung auf der Basis der Anforderungen erreicht wird. Zur Identifikation eines geeigneten ZFD-Profils für das ZFD-Clip-System wurde eine Parameterstudie mit Hilfe eines FEM-Modells durchgeführt, mit der das elastische Potenzial der ZFD-Profile ermittelt wurde.

Mit der finalen Geometrie, den Grenztoleranzen und Materialeigenschaften sind schließlich die Füge- und Haltekräfte berechnet worden. Es zeigte sich, dass unter den gegebenen Voraussetzungen ein System zur Vormontage erforderlich ist, um die ZFD-Profile zu fügen und zu positionieren.

Zukünftige Arbeiten behandeln wichtige Aspekte für die Herstellung und Betriebstauglichkeit von Wagenkästen in ZFD-Bauweise. Reale Belastungstests sowie Betriebsfestigkeitsanalysen mit einer entsprechenden Aussage zur Lebensdauer sind durchzuführen. Des Weiteren ist ein geeignetes Verfahren zur stoffschlüssigen Verbindung der ZFD-Profil-Stegflanken zu bestimmen.

Literatur

- [1] G. S. Altschuller. *Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme*. Hrsg. von M. Möhrle. Limitierter Nachdruck der 2. Cottbus: PI – Planung und Innovation, 1998.
- [2] ANSYS, Inc. *Mechanical User's Guide. Release 15.0*. ANSYS, Inc., Southpointe, 2600 ANSYS Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, 2013.

- [3] E. Begerack. *Bewertung und Optimierung des ZFD-Profiles für die Entwicklung eines neuen Rohbaukonzeptes im Schienenfahrzeugbau*. Master-Thesis, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VIII. 2016.
- [4] J. Feldhusen und K. H. Grote. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- [5] J. Janicki, H. Reinhard und M. Ruffer. *Schienenfahrzeugtechnik*. 3. DB-Fachbuch, BFV Bahn-Fachverlag, Berlin, 2013.
- [6] J. Kotter. *Konstruktive und Strukturmechanische Auslegung der Selbstfixierung (ZFD-Clip) und Entwicklung eines Verfahrens zur Vormontage der ZFD-Wandmodule*. Master-Thesis, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VIII. 2017.
- [7] P. Livotov und V. Petrov. *TRIZ Innovationstechnologie. Produktentwicklung und Problemlösung, Handbuch*. TriS Europe Innovation Academy, Berlin, 2012.
- [8] W. Trommshauser. *engineering office Trommshauser GmbH. Bewerten Optimieren Konstruieren*. 2018. URL: <http://www.eotonline.de/>.