

Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik für Sandwichwerkstoffe

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Kempf
aus
Stuttgart

Berichter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jörg Feldhusen
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Torsten Dellmann

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Dezember 2004

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt

in erster Linie meinem Doktorvater, Herrn Professor Feldhusen, für die produktive und stets unkomplizierte Zusammenarbeit während meiner Zeit an seinem Lehrstuhl

Professor Dellmann und Professor Abel, die mir durch eine faire Prüfung einen schönen Abschluss meiner Universitätszeit ermöglicht haben

meiner Freundin Sabine, die mir auch in stressigen Zeiten stets treu zur Seite gestanden ist

meinen Hiwis Tim Hundertmark, Stefan Pampel und Michael Noll sowie meinem Studienarbeiter Christoph Warkotsch, die allesamt mit viel Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben

Manfred Jansen und Rainer Bock, die eine schnelle Fertigung der Prototypen ermöglicht haben

meinen Kollegen am IKT, vor allem Alex Brezing und Nils Macke, die mit mir eine unvergessliche Zeit verbracht haben

meinen Eltern, die mir während meines gesamten Ausbildungswegs stets einen festen Halt gegeben und mich mit Ihrer Erziehung schon frühzeitig auf den richtigen Weg gebracht haben

meinen Großeltern, die mir vor allem das gehaltlose Studentenleben wesentlich erleichtert und stets an mich geglaubt haben

Es tut weh, dass Hedwig und Hermann diese Arbeit Ihres Enkels nicht mehr lesen können.

Dachau, im Dezember 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik	6
2.1	Stand der Technik bei Sandwichelementen	6
2.1.1	Allgemeiner Aufbau	6
2.1.2	Anwendungsbereiche	8
2.2	Stand der Technik bei Verbindungstechniken	9
2.2.1	Bekannte, allgemeine Verbindungstechniken	9
2.2.2	Verbindungstechniken für Sandwichelemente	14
2.2.3	Sandwichelemente im Praxiseinsatz	22
3	Systematik mechanischer Sandwichverbindungen	31
3.1	Anforderungsliste	31
3.2	Variation der grundlegenden Verbindungsparameter	33
3.2.1	Variation der Verbindungselemente	34
3.2.2	Variation der mechanischen Fügeverfahren	38
3.2.3	Bewertung	40
3.3	Prinziplösungen für Sandwichverbindungen	45
3.3.1	Sperrelemente	47
3.3.2	Fixierelemente	50
3.3.3	Beispiel: Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G2 und dem Fügeelement „Schraubenverbindung“	52
3.4	Bewertung der sinnvollen Lösungen	57
4	Auslegung der besten Sandwichverbindungen	61
4.1	Allgemeiner Lastfall am Sandwich	62
4.2	VE-Block 1: Standardschrauben außen	65
4.2.1	Geometrische Kennwerte	65
4.2.2	Belastung der Fügestellen	67
4.2.3	Resultierende Gesamtbelastung	69
4.2.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	70
4.2.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	78
4.2.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	81
4.3	VE-Block 2: Standardschrauben zentral	81
4.3.1	Geometrische Kennwerte	81
4.3.2	Belastung der Fügestellen	83
4.3.3	Resultierende Gesamtbelastung	85
4.3.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	87
4.3.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	103
4.3.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	106
4.4	VE-Block 3: Blindniete	107
4.4.1	Geometrische Kennwerte	107

4.4.2	Belastung der Fügestellen	108
4.4.3	Resultierende Gesamtbelastung	111
4.4.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	112
4.4.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	115
4.4.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	122
4.5	VE-Block 4: Exzenterverbinder	123
4.5.1	Geometrische Kennwerte	123
4.5.2	Belastung der Fügestelle	125
4.5.3	Resultierende Gesamtbelastung	125
4.5.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	126
4.5.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	128
4.5.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	132
4.6	VE-Block 4: Sperrklinkenverbinder	133
4.6.1	Geometrische Kennwerte	133
4.6.2	Belastung der Fügestellen	138
4.6.3	Resultierende Gesamtbelastung	139
4.6.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	140
4.6.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	143
4.6.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	147
4.7	VE-Block 5: Sperrelement-Schrauben-Verbinder	147
4.7.1	Geometrische Kennwerte	147
4.7.2	Belastung der Fügestelle	148
4.7.3	Resultierende Gesamtbelastung	149
4.7.4	Festigkeitsnachweis der Fügeelemente	150
4.7.5	Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente	156
4.7.6	Festigkeitsnachweis am Sandwichelement	157
4.8	VE-Block 6: Low-Cost-Verschlüsse	157
5	Gestaltung von Prototypen	158
5.1	Gestaltung der VE-Abschlüsse	158
5.2	Prototyp 1: Standardschraubenverbinder	164
5.3	Prototyp 2: Zentralschraubenverbinder	167
5.4	Prototyp 3: Blindnietverbinder	171
5.5	Prototyp 4: Exzenterverbinder	175
5.6	Prototyp 5: Sperrklinkenverbinder	181
5.7	Prototyp 6: SE-Schrauben-Verbinder	186
5.8	Prototyp 7: Low-Cost-Verbinder	191
5.9	Beurteilung der Prototypen anhand der Anforderungsliste	198
6	Zusammenfassung und Ausblick	201
7	Literaturverzeichnis	201
8	Anhang	208

1 Einleitung

Die Bestrebungen, technische Produkte so leicht als möglich zu gestalten, finden sich in allen Industriezweigen. Dabei unterscheidet man zwischen dem „Zweck-Leichtbau“ (Leichtbau als Funktionsbedingung, z.B. bei Fluggeräten oder schnell beschleunigten Roboterarmen), dem „Öko-Leichtbau“ (Leichtbau zur indirekten Kosteneinsparung, z.B. zur Reduzierung des Benzinverbrauchs beim PKW) und dem „Spar-Leichtbau“ (Leichtbau zur direkten Kosteneinsparung, z.B. erfordert der Einsatz von Aluminium anstelle von Stahl aufgrund des höheren spez. Volumens weniger Aussteifungen) [1].

Die technische Umsetzung der Gewichtsreduzierung wird durch verschiedene Bauweisen ermöglicht (siehe auch Abbildung 1):

- Bei der *Differenzialbauweise* werden die Einzelelemente der Struktur durch z.B. Nieten, Bolzen oder Punktschweißen punktuell verbunden (z.B. Haut, Stringer und Rippen im klassischen Blechbau).
- Bei der *Integralbauweise* wird die gesamte Struktur aus einem Stück hergestellt (z.B. Erzeugen von Stegen an einer Platte durch direktes Angießen oder Herausfräsen der Zwischennuten).
- Bei der *integrierenden Bauweise* sind die Einzelelemente durch geeignete Verbindungstechniken zu einer organischen Einheit verbunden (z.B. Haut mit aufgeklebten Verstärkungen).
- Bei der *Verbundbauweise* werden verschiedene Materialien nach ihren spezifischen Eigenschaften sinnvoll kombiniert (z.B. Kunststoffe mit Glas-, Kohle- oder Aramidfaser-Verstärkung).

Welche Bauweise bzw. welcher Werkstoff im Leichtbau zum Einsatz kommt, hängt von den gewichtsspezifischen Kenngrößen, von der Festigkeit oder von der Steifigkeit ab, die für den

einzelnen Anwendungsfall erforderlich sind. Abbildung 1 zeigt Differenzialbauweise, Integralbauweise und Verbundbauweise am Beispiel eines Tragflügelkastens.

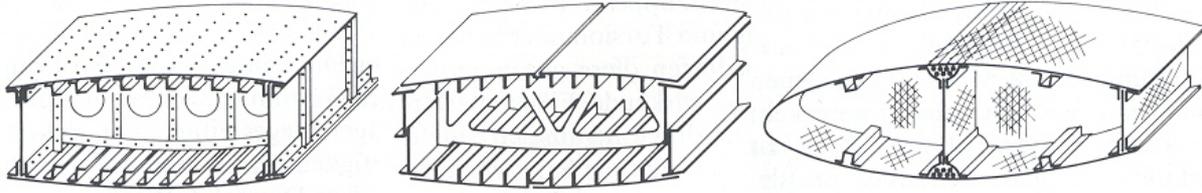


Abbildung 1: Differenzialbauweise, Integralbauweise und Verbundbauweise (von links nach rechts) am Beispiel eines Tragflügelkastens [1]

Vor allem die Verbundbauweise hat in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dabei wird das Bauteil aus verschiedenen Materialien aufgebaut, wobei die spezifischen Eigenschaften jedes Materialtyps durch Einsatz an geeigneter Stelle optimal ausgenutzt werden. Auf diese Weise entsteht ein Bauteil, das in seinen Eigenschaften jedem Bauteil aus nur einem der beteiligten Werkstoffe weit überlegen ist. Die vielfältigen Kombinationen moderner Materialien ermöglichen heutzutage die Herstellung immer leichter Strukturen mit immer höherer Steifigkeit.

Eine schon länger bekannte Möglichkeit zur Umsetzung der Verbundbauweise ist die Sandwichtechnologie, bei der ein möglichst leichtes Kernelement von dehnsteifen Deckschichten umschlossen wird. Die für den Aufbau solcher Elemente geeigneten Werkstoffe sind verfügbar und werden ständig weiterentwickelt, doch trotz ihrer vielen Vorteile hat sich die Sandwichtechnologie im Maschinenbau noch nicht auf breiter Ebene durchgesetzt. Einer der Gründe dafür ist die noch nicht bzw. nur im Ansatz vorhandene Verbindungstechnologie für Sandwichelemente.

Der gegenüber starker Druckbelastung empfindliche Kern verhindert eine Montage durch gängige mechanische Fügeverfahren wie z.B. Schrauben oder Niete. Sollen diese dennoch angewandt werden, so müssen die zu fügenden Bauteile aufwändig vorbereitet werden, um den Kern vor Deformationen zu schützen und die angreifenden Kräfte in beide Deckplatten des Sandwichelements zu leiten. Alternative Verfahren (z.B. Kleben oder Schweißen) sind entweder sehr aufwändig oder bringen oft nicht die erwünschten Festigkeiten. Den meisten bisher bekannten Verfahren ist gemein, dass sie sich noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung befinden und damit für eine breite industrielle Anwendung ungeeignet sind.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine mechanische Verbindungstechnik für Sandwichelemente entwickelt werden. Diese soll schnell montierbar und kostengünstig sein, eine gute Kraftleitung ohne Schädigung der Sandwichs ermöglichen und mit möglichst wenigen Spezialelementen im Sandwich selber auskommen, so dass der Einsatz von Sandwichhalbzeugen zum Aufbau einer Struktur ermöglicht wird.

Die Arbeit soll von einer systematischen Vorgehensweise im Sinne des allgemeinen Konstruktionsprozesses (z.B. nach Koller [2]) geprägt sein, d.h. es sollen alle theoretisch möglichen Lösungen erfasst werden. Aufgrund der Vielzahl der zu erwartenden Lösungen sollen durch die frühzeitige Anwendung geeigneter Bewertungsverfahren nur die erfolgversprechenden weiterentwickelt werden, um den Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten. Von diesen sollen als Abschluss der Arbeit Prototypen gebaut werden, mit deren Hilfe die Leistungsfähigkeit der Verbindungen nachgewiesen werden kann.

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik bei Sandwichelementen und die hierfür bekannten Verbindungstechniken wurden mittels einer Literatur- und Internetrecherche bestimmt. Im Folgenden sind die Ergebnisse aufgeführt.

2.1 Stand der Technik bei Sandwichelementen

2.1.1 Allgemeiner Aufbau

Sandwichelemente bestehen in der Regel aus zwei Deckschichten und einer dazwischen liegenden Kernschicht (Abbildung 2).

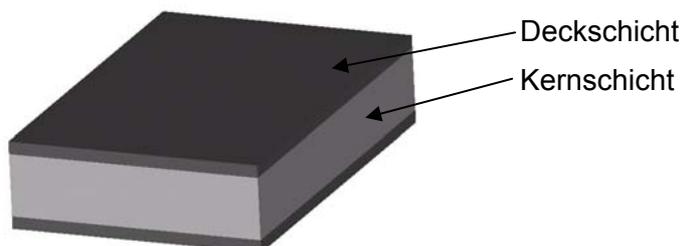


Abbildung 2: Aufbau eines Sandwichelements

Die Deckschichten nehmen die aus äußeren Belastungen entstehenden, tangential zur Bauteiloberfläche verlaufenden Zug- und Druckkräfte auf und werden daher möglichst dehnsteif ausgeführt. Als Deckschichtmaterialien kommen Bleche aus Stahl, Aluminium und Kupfer sowie faserverstärkte Kunststoffe (z.B. „Glasfaserverstärkter Kunststoff“ GFK,

„Kohlefaserverstärkter Kunststoff“ CFK, „Aramidfaserverstärkter Kunststoff“ AFK) zum Einsatz [3, 4].

Der Kern ist für die Aufnahme von Querschubkräften und für die Abstützung der beiden Deckschichten verantwortlich. Je größer der Abstand der Deckschichten ist, desto größer ist auch das Flächenträgheitsmoment des Querschnitts und damit die Steifigkeit des Sandwichelements.

Da der Kern bei optimaler Abstimmung 2/3 des Gesamtgewichts beansprucht, sollte er möglichst leicht gehalten werden. Gleichzeitig muss er jedoch eine gewisse Steifigkeit aufweisen, um bei einer Biegebelastung des Sandwichelements die Schubverformung möglichst gering zu halten [1]. Die Verformung eines unter Last stehenden Sandwichs mit schubweichem Kern hat ähnliche Auswirkungen wie im linken Bild in Abbildung 3 dargestellt und ist normalerweise unerwünscht.

Folgende Kernmaterialien werden verwendet: Kunststoffschäume (Polyurethane, PVC, Polystyrol), verpresstes Papier [4], Metallschäume (z.B. Aluminiumschaum, Titanschaum) [5, 6], Balsaholz (massiv, mit Höhlungen oder als Stege), Kunststoffschaum mit Bällen, Faltblech, Röhrchen- oder Honigwaben aus Papier oder Aluminium [1,4], Mineralfasern [7], Aramid-Wabenkerne [8].

Aus diesen Betrachtungen folgt, dass die Verbindung zwischen Deckschicht und Kern möglichst zug-, vor allem aber schubfest sein muss, um die Durchbiegung des Sandwichelements beim Angriff äußerer Kräfte senkrecht zu seiner Oberfläche gering zu halten (siehe Abbildung 3).

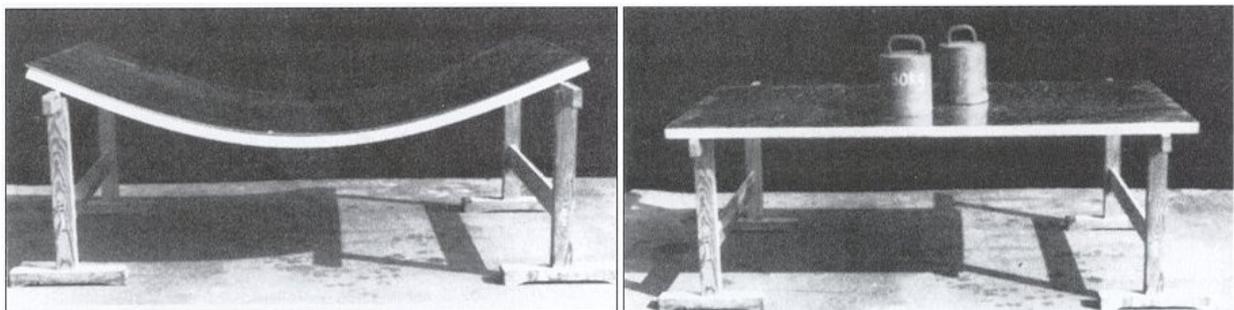


Abbildung 3: Tragfähigkeitsvergleich: Sandwich ohne Verbindung (links, nur unter Eigenlast) und Sandwich mit schub- und zugfester Verbindung (rechts, mit Gewichten) der Einzelschichten [3]

Gängige Fügeverfahren sind: Formschäumen (direktes Einspritzen des Kernmaterials zwischen die Deckbleche) [3], Verschrauben (mittels eingeschäumter Gewindebuchsen) [9],

Nieten [6], Kleben, Hartlöten [10], Laserstrahlschweißen [11], Diffusionsschweißen, Ultraschallschweißen [12], Walzplattieren [6].

2.1.2 Anwendungsbereiche

Der Einsatz von Sandwichwerkstoffen in technischen Produkten ist heutzutage in den meisten Branchen noch sehr beschränkt. Während es in der Bauindustrie bereits eine große Palette von Anwendungsmöglichkeiten und dazu passenden Bauelementen gibt, sind im Maschinenbau bisher nur verhältnismäßig wenige Einsatzfelder bekannt. Dies liegt vor allem an den Problemen, die der Einsatz von Sandwichelementen als (im Gegensatz zum Baugewerbe) tragende Teile mit sich bringt.

Unter anderem sind folgende Einsatzmöglichkeiten für Sandwichelemente bekannt bzw. geplant:

- Dach- und Bodenelemente im Schienenfahrzeug- und Busbau [13]
- Karosserieteile für Automobile [14]
- Rennsportsitze und andere Einzelbauteile für Motorräder und Automobile [15]
- LKW- und Spezialfahrzeug-Aufbauten, Raumcontainer, Behälter, Aufzüge, Strahlungs- und Schallschutze [16]
- Dach- und Fassadenelemente im Hausbau, Türen und Tore [3]
- Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen [17]
- Tragflächen und Rümpfe für den Flugzeugbau [18]
- Strukturen und Komponenten für die Raumfahrt [19]
- Rümpfe für den Bootsbau [20]

2.2 Stand der Technik bei Verbindungstechniken

2.2.1 Bekannte, allgemeine Verbindungstechniken

Technische Systeme setzen sich im Allgemeinen aus mehreren Bauteilen zusammen, die mit Hilfe verschiedener Verbindungstechniken gefügt werden. Die Verbindungen werden im Rahmen dieser Arbeit in Verfahren für spezielle Anwendungen (aufgrund der Geometrie der Fügepartner nicht für Sandwichmaterial geeignet) und allgemeine, d.h. auch für Sandwichmaterial einsetzbare Verfahren, unterteilt. Allgemein einsetzbare Verfahren werden wiederum nach ihrer Wirkungsweise in stoffschlüssig und mechanisch, d.h. formschlüssig, reibkraftschlüssig, feldkraftschlüssig und elastisch kraftschlüssig, unterschieden [21] (siehe Abbildung 4; Bereiche, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit uninteressant sind, sind grau dargestellt).

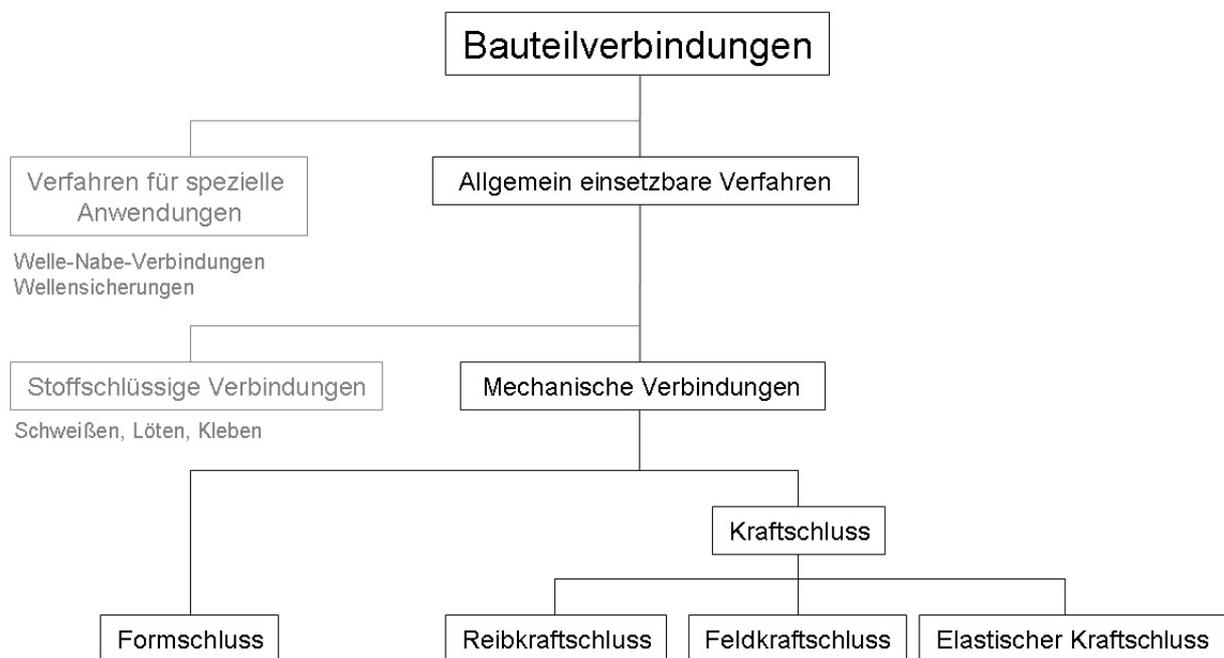


Abbildung 4: Einteilung technischer Verbindungen im Rahmen dieser Arbeit

Stoffschlüssige Verbindungen entstehen durch das stoffliche Vereinigen der Bauteilwerkstoffe an der Fügestelle, zum Teil unter Einsatz von Zusatzwerkstoffen. Sie sollen, wie schon

erwähnt, im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Formschlüssige Verbindungen wirken durch das geometrische Ineinandergreifen von Bauteilen, meist mit Hilfe zusätzlicher Elemente, so dass Wirkflächenpaare entstehen. Bei kraftschlüssigen Verbindungen schließlich werden Kräfte zwischen den beteiligten Bauteilen aufgebaut.

Im Folgenden werden kurz die drei grundlegenden Verbindungssysteme Stoffschluss, Formschluss und Kraftschluss mit Ihren jeweils gängigsten Verfahren vorgestellt [21,22,23,24].

Stoffschluss

Stoffschlüssige Verbindungen sind Schweißen, Lötten und Kleben. Die Fügewirkung wird durch Molekular- und Adhäsionskräfte zwischen den gefügten Oberflächen der beteiligten Körper bzw. zwischen einer Oberfläche und einem Zusatzwerkstoff hergestellt.

Prinzipielle Vorteile stoffschlüssiger Verbindungen:

- Das Fügen kann direkt zwischen zwei Oberflächen erfolgen (es sind keine Zusatzelemente wie z.B. Bohrungen erforderlich).
- Die Verbindung ist großflächig, positionstreu, leicht und dicht.

Prinzipielle Nachteile stoffschlüssiger Verbindungen:

- Die Fügestelle muss (zum Teil unter sehr großem Aufwand) vorbereitet werden.
- Der Fügevorgang muss sehr sorgfältig erfolgen (evtl. ist eine spezielle Ausbildung für das betroffene Personal erforderlich) und benötigt relativ viel Zeit.
- Die Verbindung ist meist nicht ohne Schädigung der Fügepartner lösbar.
- Es können nicht alle Werkstoffe gefügt werden.
- Die Verbindung erfolgt nur über die Oberflächen und nicht über das gesamte Materialvolumen.
- Zum Teil kann es durch das Fügen zu Änderungen der Werkstoffeigenschaften kommen.
- Die Verbindungsgüte ist nur schwer kontrollierbar.

Stoffschlüssige Verbindungen finden sich beispielsweise in Form geschweißter Rahmen für Schienenfahrzeuge oder im Flugzeugbau bei der gewichtsoptimalen Verklebung vieler Einzelteile (siehe Abbildung 5).

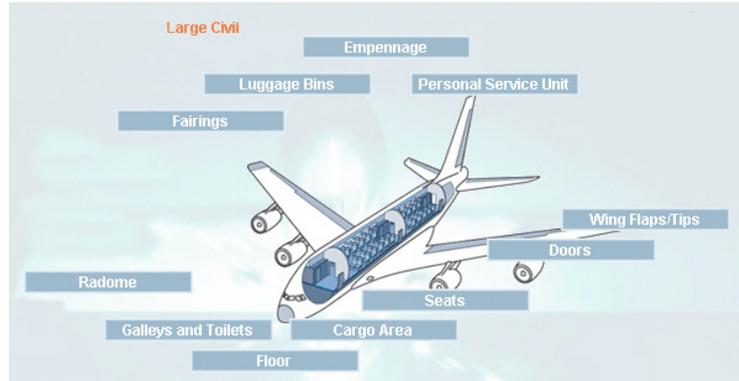
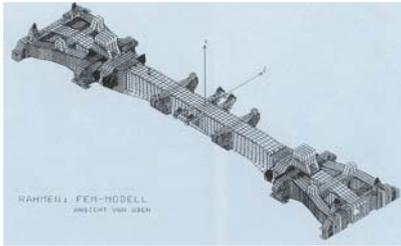


Abbildung 5: Geschweißter Rahmen eines Eisenbahn-Güterwagens (links), Einsatzbereiche von Klebeverbindungen am Beispiel eines großen Passagierflugzeugs (rechts)

Formschluss

Es gibt eine Vielzahl formschlüssiger Verbindungen, die allgemein einsetzbar sind (siehe Abbildung 6; aufgrund der Vielfalt möglicher Gestaltvariationen wurden bei den Nietverbindungen nur die wichtigsten aufgeführt).

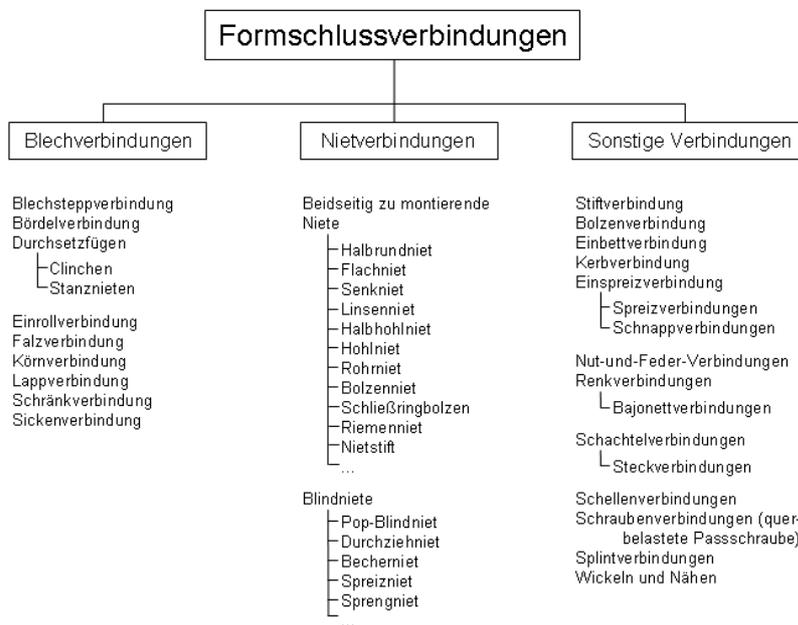


Abbildung 6: Formschlussverbindungen

Aufgrund der großen Zahl wird an dieser Stelle nicht näher auf die einzelnen Typen eingegangen. Allen gemeinsam ist jedoch, dass die Fügewirkung durch Normalkräfte an ineinander greifenden Wirkflächen hergestellt wird.

Prinzipielle Vorteile formschlüssiger Verbindungen:

- Die Werkstoffeigenschaften der beteiligten Fügepartner werden bis auf Ausnahmefälle nicht beeinflusst.
- Es können nahezu alle Materialien miteinander verbunden werden.
- Die Verbindung ist meist ohne Schädigung der Fügepartner lösbar.
- Der Fügevorgang ist meist relativ einfach und daher auch gut automatisierbar.

Prinzipielle Nachteile formschlüssiger Verbindungen:

- Die Bauteile werden zum Teil an der Verbindungsstelle geschwächt (z.B. durch Bohrungen).
- Durch die Verbindungselemente (z.B. Nieten) steigt das Gewicht des Bauteils.
- Ohne geeignete Zusatzmaßnahmen kann die Verbindung keine sichere Dichtwirkung gewährleisten.
- Es erfolgt oft keine flächige sondern nur eine punktuelle Verbindung (z.B. bei Schrauben).

Formschlüssige Verbindungen finden sich beispielsweise in Form von Nieten im Stahlbau oder im PC-Bereich als Schnappverbindungen für Gehäuseteile (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Nietverbindung an Stahlträgern im Hochhausbau (links), Schnappverbindung an einem PC-Gehäuse (rechts)

Kraftschluss

Kraftschlüssige Verbindungen entstehen durch Kräfte zwischen den Wirkflächen der Fügepartner. Man unterscheidet zwischen Feldkraftschluss (Nutzung von Feldkräften, z.B. Magnetkräfte), elastischem Kraftschluss (Nutzung elastischer Elemente zur Kräfteerzeugung, z.B. Federn) und der technisch wichtigsten Form, dem Reibkraftschluss (Nutzung des Coulombschen Reibungsgesetzes) (siehe Abbildung 8).

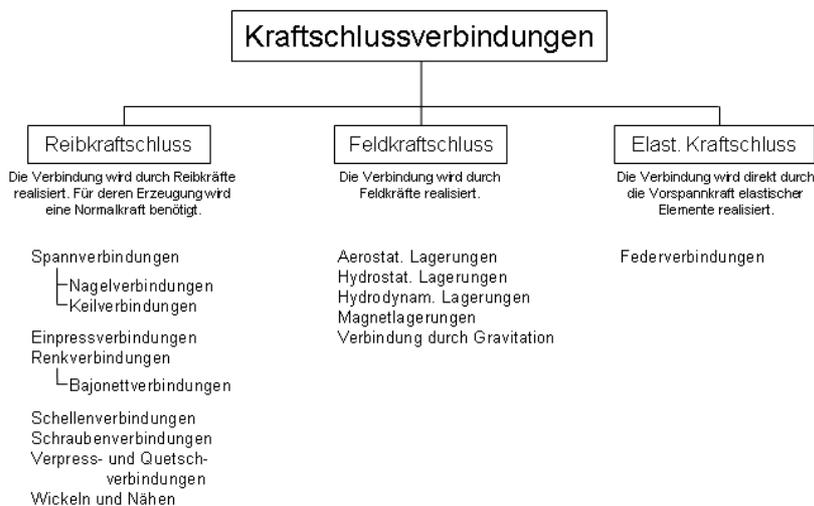


Abbildung 8: Kraftschlussverbindungen

Prinzipielle Vorteile kraftschlüssiger Verbindungen:

- Die Werkstoffeigenschaften der Fügepartner werden meist nicht verändert.
- Es können nahezu alle Materialien miteinander verbunden werden.
- Die Verbindung ist meist ohne Schädigung der Fügepartner lösbar.
- Die Kraftübertragung geschieht meist nicht punktförmig sondern über eine Fläche bzw. ein Volumen.
- Bei entsprechender Gestaltung kann die Verbindung auf Überbelastung mit einer Relativschiebung der Fügepartner reagieren und so Energie abbauen oder einen neuen Kraftleitungsweg herstellen (Prinzip des Selbstschutzes).

Prinzipielle Nachteile kraftschlüssiger Verbindungen:

- Werden die äußeren Kräfte größer als die Verbindungskräfte besteht die Gefahr einer Relativbewegung zwischen den Fügepartnern.

Kraftschlüssige Verbindungen finden sich beispielsweise in Kraftfahrzeugen als Radaufhängung (z.B. Schrauben- oder Blattfedern) oder in der Schienenfahrzeugtechnik zur Abstützung des gesamten Zuges (Magnetschwebbahn) (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Kraftschlüssige Radaufhängung durch Blattfedern an einem Geländewagen (links), Magnetschwebbahn (rechts)

2.2.2 Verbindungstechniken für Sandwichelemente

In der Literatur bzw. im Internet finden sich nur sehr wenige Informationen über Verbindungstechniken, die für Sandwichelemente geeignet sind, worauf zum Teil auch direkt hingewiesen wird (z.B. [6]). Sie sind im Folgenden nach der in Kapitel 2.2.1 vorgenommenen Einteilung aufgeführt. Der Vollständigkeit halber werden dort auch die nichtmechanischen sowie auch diejenigen Verbindungen berücksichtigt, bei denen eine Anpassung der Sandwichhalbzeuge erforderlich ist (z.B. bei der Verwendung von Einlegeteilen). Eine Bewertung der einzelnen Verbindungsarten erfolgt am Ende des Kapitels 2.2.2.

Stoffschlüssige Verbindungstechniken

Stoffschlüssige Verbindungen bei Sandwichelementen werden in der Regel dadurch realisiert, dass die Deckschichten miteinander bzw. mit einer umgebenden Struktur gefügt werden. In einzelnen Fällen werden auch die Kerne miteinander verbunden.

Klebeverbindungen

Durch Kleben lassen sich fast alle bekannten Werkstoffe großflächig verbinden [4], das spezielle Fügen von Sandwichelementen wird in der Literatur jedoch nur sehr selten erwähnt. So macht z.B. Hertel [10] einige Vorschläge zum Verbinden von Sandwichelementen mittels Klebeverbindungen und geeigneten Hilfskörpern wie Laschen, Versteifungen oder Eckanschlüssen. Diese Lösungen befinden sich jedoch erst im Prinziplösungsstadium, d.h. eine technische Realisierung ist nicht ohne weiteres möglich.

In der Industrie werden Sandwichelemente meist mittels Dickschichtklebungen verbunden [25], vor allem um Toleranzen der zum Teil großen Einzelbauteile auszugleichen. Ein sehr gutes Beispiel hierfür ist die Verklebung von Sandwichdach und Sandwichkopf einer Straßenbahn (siehe Abbildung 10).

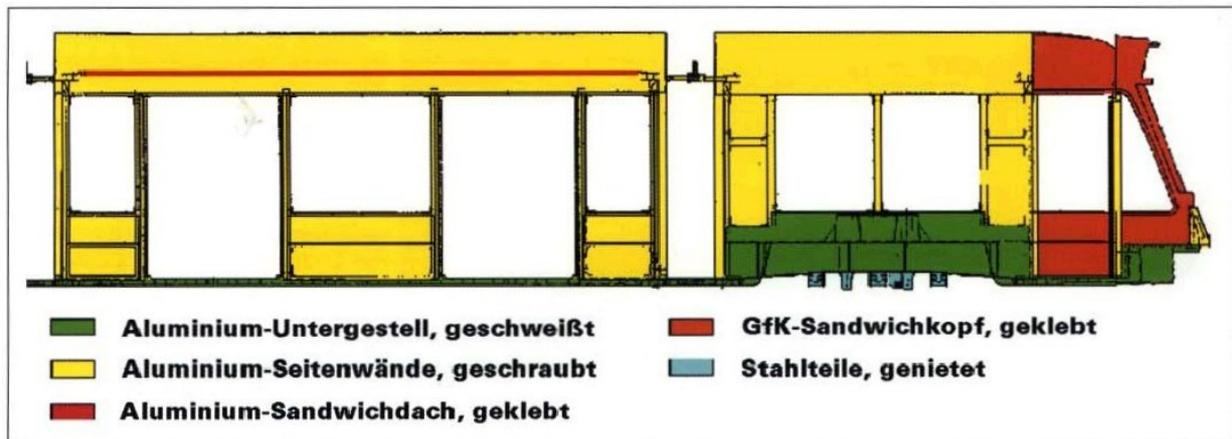


Abbildung 10: Wagenkastenstruktur des Combino, Fa. Siemens Duewag Schienenfahrzeuge [5, 26]

Lötverbindung (nur für Metallschäume!)

Im Bereich der Lötverbindungen werden derzeit flussmittelfreie Lötssysteme entwickelt, die bei niedrigen Temperaturen arbeiten. Auch der Einsatz von Hartlöten (Flamm- und Ofenlötung) mit nichtkorrosivem Flussmittel und porositätsbildendem Zusatzwerkstoff war unter Laborbedingungen erfolgreich [6]. Diese Verfahren sind jedoch derzeit noch nicht serienreif.

Schweißverbindung (nur für Metallschäume!)

Das Laserstrahlschweißen mit oder ohne Zusatzwerkstoffe wird derzeit unter Laborbedingungen erprobt [6]. Es ist jedoch ebenfalls noch nicht serienreif.

Formschlüssige Verbindungstechniken

Verschraubung/Vernietung

Die Verbindung von Sandwichelementen mit Schrauben oder Nieten erfolgt durch den Einsatz großflächiger Unterlegscheiben und lokaler Verstärkungen der Decklaminaten durch zusätzliche Gewebelagen. Diese Maßnahmen sollen einem Einbeulen der Deckschichten entgegenwirken. Auch das Ersetzen des Wabenkerns durch ein Volllaminat oder die Auffüllung des Wabenkerns an der Kraffteinleitungsstelle mit Harz-Microballon-Gemisch sorgen für eine möglichst großflächige Kraffteinleitung ohne Beschädigung des Sandwichs (siehe Abbildung 11). Trotz all dieser Maßnahmen kann eine Schraubenverbindung in der Regel nicht wie üblich vorgespannt werden, da sonst das Kernmaterial beschädigt werden wird. Aus diesem Grund werden Schraubenverbindungen hier als „formschlüssig“ eingeordnet, da die Fügewirkung hauptsächlich auf Form- und weniger auf Kraftschluss beruht.

Weitere Verfahren sind der Einsatz von Kunststoffbuchsen zur Aufnahme der Fügeelemente oder der Einsatz von Sprengnieten (Stützwirkung für die Häute durch Ausbauchungen an beiden Enden) (siehe Abbildung 12).

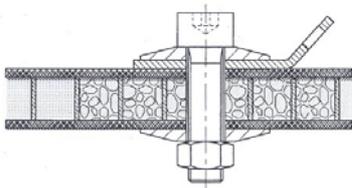


Abbildung 11: Großflächige Kraffteinleitung durch Unterlegscheibe und mit Harz ausgegossenem Kern [8]

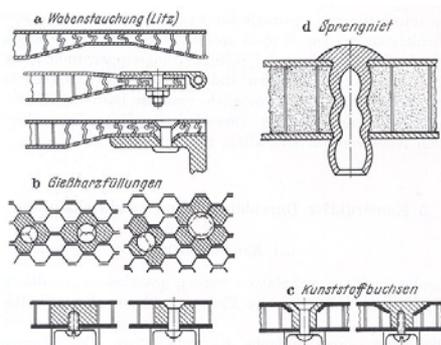


Abbildung 12: Örtliche Kraffteinleitung in Sandwichkörper [10]

Spezialverbindungen im Bauwesen

Im Bauwesen werden Stahlschrauben eingesetzt, zum Teil mit Stützgewinde unter dem Schraubenkopf (verhindert Dellenbildung im Sandwich beim Anziehen, Wirkprinzip ist jedoch auch hier Formschluss), integrierter Dichtscheibe unter dem Schraubenkopf und Bohrspitze (montagefreundlich: Vorbohren des Befestigungslochs entfällt). Alternativ werden auch Befestigungsklammern eingesetzt (siehe Abbildung 13). Die im Bauwesen eingesetzten Verbindungstechniken dienen jedoch nur zur Anbindung der Sandwichelemente an eine tragende Struktur (z.B. Stahlgerüst) und nicht zur Herstellung einer kraftübertragenden Verbindung zwischen den Sandwichelementen [3].

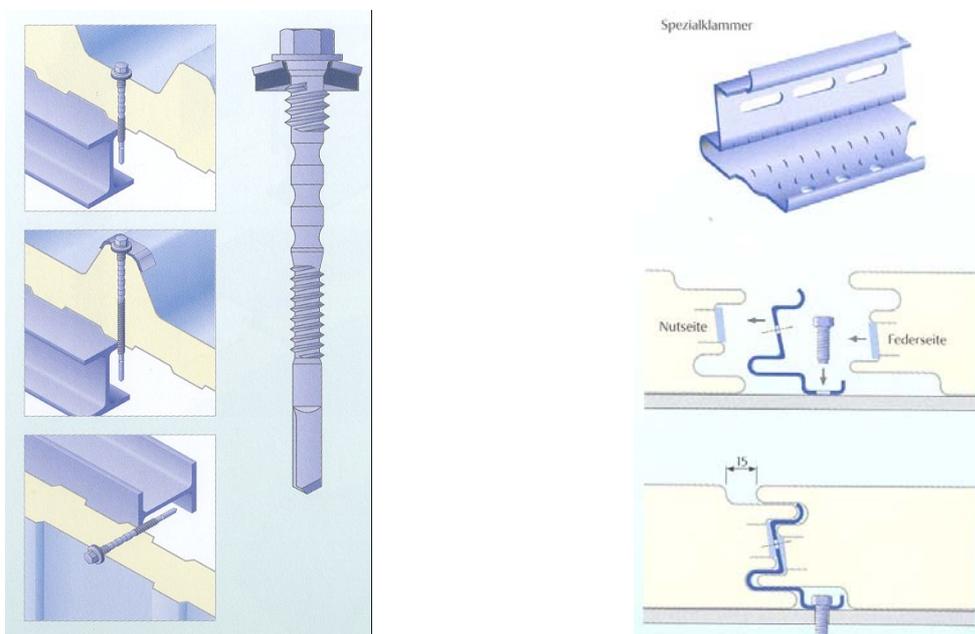


Abbildung 13: Selbstbohrende Stahlschraube für Durch-und-Durchverschraubungen von Sandwichelementen mit Stahl- und Holzbauteilen (links), Befestigungsklammer zum Fügen von Sandwichelementen mit einer tragenden Struktur (rechts) [3]

Stoff-/Formschlüssige Verbindung

Einlegeteile

Eine Kombination von stoff- und formschlüssiger Verbindung stellt das Aus- und Umschäumen von Einlegeteilen dar. Die beim Schäumprozess des Kerns um- bzw. eingeschäumten Einlegeteile sind gute Krafteinleitungspunkte (z.B. für eine daran angeschlossene Schraubenverbindung). Die Anbindung der Substrate erfolgt dabei über Formschluss und

Stoffschluss (kontinuierliche Vermischung von Substrat- und Schaumlegierung, d.h. beide befinden sich während des Verbindungsprozesses im Schmelzzustand (das Substrat nur an seiner Oberfläche)) (siehe Abbildung 14).

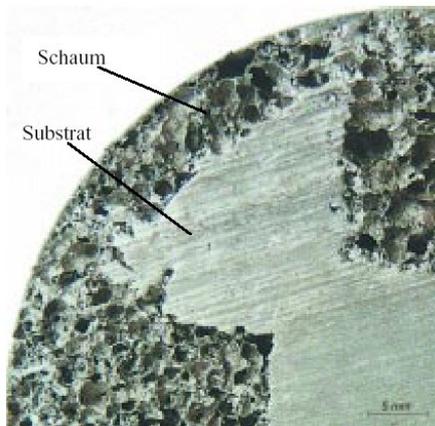


Abbildung 14: Schnittdarstellung einer Substrat-Verbindung aus Form- und Stoffschluss [27]

Querkrafteinleiter

Diese Verbindungselemente werden in der Regel geklebt und können zur Einleitung von Querkräften in ein Sandwichelement eingesetzt werden. Dabei sind, falls der Sandwichkern dafür geeignet ist, solche Konstruktionen zu bevorzugen, bei denen die Kraftverteilung auf beide Deckschichten nur durch den Kern erfolgt, so dass keine besonderen Verbindungsstege in den Kern eingesetzt werden müssen (siehe Abbildung 15). Aufgrund ihrer Geometrie wirken sie meist auch noch formschlüssig.

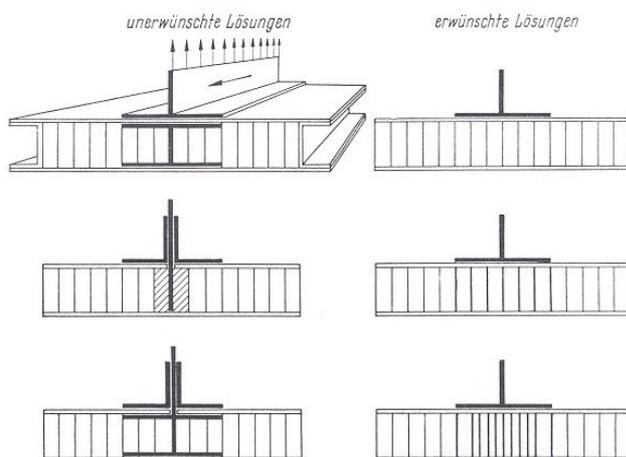


Abbildung 15: Querkraft-Einleitungskonstruktionen für Sandwichelemente [10]

Kraftschlüssige Verbindungstechniken

Als wahrscheinlich einziges bekanntes Verfahren zum rein kraftschlüssigen Fügen von Sandwichelementen kann das Stauchen der Wabenfüllung angeführt werden [10]. Dabei werden im Sandwichelement Vertiefungen für Anschlusssteile erzeugt, die dann z.B. durch Schrauben mit dem Sandwich verbunden werden. Das Verfahren eignet sich nur für nichttragende Teile, da die Festigkeit des Sandwichs erheblich geschwächt wird (siehe Abbildung 12).

Bewertung der Verbindungstechniken

Die zur Verbindung von Sandwichelementen bekannten und hier vorgestellten Verbindungstechniken weisen erhebliche Nachteile auf, die einen industriellen Einsatz erschweren. Sie werden im Folgenden beschrieben, Tabelle 1 gibt dann nochmals einen Überblick über alle Verfahren.

Klebeverbindungen erfordern eine Vorbereitung der Fügestelle (Reinigung und evtl. Aktivierung durch mechanische oder chemische Verfahren). Der Klebstoff wird von Hand oder durch Klebstoff-Applikationsmaschinen (meist Sonderanfertigungen) aufgebracht, beide Verfahren sind relativ kostenintensiv. Nach der Applikation müssen die Bauteile meist mit Hilfe einer Fügevorrichtung, deren Gestaltung große Erfahrung erfordert, fixiert werden, bis der Klebstoff ausgehärtet ist [22].

Klebeverbindungen sind nicht in Kombination mit allen Werkstoffen anwendbar. So kann es z.B. Probleme beim Fügen von oberflächenbeschichteten Werkstoffen geben (Ablösung der Beschichtung unter Kraftereinwirkung auf die Fügestelle, da Klebeverbindungen nur die Oberflächen der Werkstoffe fügen). Die schon angesprochenen Hilfskörper für Klebeverbindungen (Laschen, Versteifungen und Eckanschlüsse) wurden zwar schon von einigen Firmen für deren spezifische Anwendungen realisiert, es existieren bisher jedoch keine universell einsetzbaren und bzgl. der Gestaltgebung optimal angepassten Verbinder.

Lötverbindungen erfordern ebenfalls eine Vorbereitung der Fügestelle. Darüber hinaus müssen in der Regel Flussmittel eingesetzt werden, um die letzten verbleibenden Oxidschichten durch Reduktion zu lösen. Die zu verbindenden Bauteile müssen bis zur Abkühlung des Lotes fixiert werden. Danach muss die Fügestelle von Flussmittelresten gereinigt werden, da diese chemisch sehr aggressiv sind (dies kann mechanisch oder chemisch erfolgen, wobei bei Letzterem ein anschließendes, ausreichend langes Spülen mit

warmem Wasser zur Neutralisierung erforderlich ist).

Durch Löten können nur metallische Werkstoffe gefügt werden. Beim Fügen wird Wärme in die Fügestelle eingebracht, was zu Verzug oder Gefügebeeinflussung bei den beteiligten Bauteilen führen kann. Außerdem besteht bei einigen Metallen die Gefahr elektrolytischer Zerstörung, falls Lot und zu verbindender Werkstoff in der Spannungsreihe der Elemente zu weit auseinander liegen.

Lötverfahren sind bei großflächigen Verbindungsstellen aufgrund des hohen Lotbedarfs unwirtschaftlich. Die erreichbare Festigkeit der Lötverbindung liegt unter der Festigkeit der zu verbindenden Werkstoffe [22].

Laserstrahlschweißen muss automatisiert durchgeführt werden, da für die Qualität eine optimale Positionierung des Laserstrahls zum zu bearbeitenden Werkstück mittels einer numerischen Steuerung erforderlich ist [28], entsprechende Anlagen sind sehr kostenintensiv. Die zu verbindenden Bauteile müssen fixiert werden. Nach dem Schweißvorgang müssen die Werkstücke abkühlen, evtl. ist eine Nachbearbeitung der Fügestelle notwendig.

Beim Schweißprozess kollabiert meist die Schaumstruktur des Sandwichelements, der dadurch entstehende Volumenschwund muss durch Zusatzwerkstoffe ausgeglichen werden. Dadurch ergibt sich jedoch eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften an der Fügestelle (z.B. Steifigkeitssprung).

Nicht jeder Werkstoff bzw. jedes Metall ist zum Schweißen geeignet. Durch Reaktion der Gase im Schweißgut und in der angrenzenden Wärmeeinflusszone kann es zu Versprödungen, Rissen oder verringerter Korrosionsbeständigkeit kommen. Schweißverbindungen erfordern eine Vorbereitung der Fügestelle [6, 22].

Der Einsatz von Unterlegscheiben zur großflächigen Krafteinleitung ist sinnvoll, schützt den Kern jedoch nicht vollständig vor Deformationen. Das zu diesem Zweck einsetzbare Ausgießen des Kerns mit Harz ist nur bei offenzelligen Kernen wie z.B. Wabenkernen möglich (und nicht bei z.B. Schaumaluminium).

Spezial-Schraubenverbindungen und Befestigungsklammern werden im Bauwesen schon längere Zeit in Verbindung mit Sandwichelementen eingesetzt. Allerdings können damit, wie schon weiter oben in diesem Kapitel erwähnt, keine großen Kräfte bzw. Momente zwischen den einzelnen Elementen übertragen werden.

Das Fügen mit Hilfe umschäumter Einlegeteile muss bereits bei der Herstellung der Sandwichelemente berücksichtigt werden, d.h. für jede Anwendung werden spezielle Sandwichs benötigt, was zu erheblich höheren Kosten als bei der Verwendung von Halbzeugen führt.

Das Fügen mittels Querkrafteinleitern basiert im Wesentlichen auf Klebeverbindungen, deren Nachteile schon weiter oben aufgeführt wurden. Überdies befinden sie sich im Stadium der Prinziplösung. Fertig ausgestaltete und experimentell erprobte Verbindungen liegen nicht vor.

Das Stauchen des Wabenkerns ist nur bei nichttragenden Teilen möglich, außerdem muss der Kern die Verformung ertragen und die Kontur der (nun eingedrückte) Oberfläche des Sandwichelements darf keine Funktionsrelevanz besitzen.

Tabelle 1 gibt nochmals einen Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Verbindungstechniken.

	Keine Vorbereitung der Fügestelle erforderlich	Keine Fixierung der Bauteile erforderlich	Kurze Dauer des Fügevorgangs	Kein bzw. geringer Wärmeeintrag in die Fügestelle	Keine Nachbehandlung der Fügestelle erforderlich	Keine Änderung der Werkstoffeigenschaften an der Fügestelle	Festigkeit der Verbindung	Fügetechnik materialunabhängig einsetzbar	Einsatz bei Sandwichhalbzeugen möglich	Wirtschaftlichkeit der Verbindung
Klebeverbindung	--	--	--	++	++	++	-	+	+	--
Lötverbindung	--	--	-	--	--	--	0	--	--	-
Laserstrahlschweißen	--	--	-	--	-	--	+	--	--	--
Verschraubung/Vernietung	0	++	0	++	++	++	-	-	--	+
Spezialverbindungen im Bauwesen	++	++	++	++	++	++	--	+	--	++
Umschäumte Einlegeteile	++	++	++	++	++	++	+	-	--	--
Querkrafteinleiter	0	--	--	++	++	++	0	+	0	--
Wabenstauchung	--	++	0	++	++	--	--	--	0	0

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der bekannten Verbindungstechniken für Sandwichelemente

Bewertung der Kriterien: ++ sehr gut erfüllt + gut erfüllt 0 neutral - schlecht erfüllt -- sehr schlecht erfüllt

Die oben beschriebenen Nachteile der überwiegend auf Stoffschluss basierenden Verbindungstechnologien zeigen, dass durch die Entwicklung geeigneter mechanischer Verbindungselemente der industrielle Einsatz von Sandwichelementen erheblich erleichtert werden könnte.

2.2.3 Sandwichelemente im Praxiseinsatz

Um die Anforderungen, die an Sandwichelemente und Verbindungstechniken gestellt werden, vollständig zu erfassen, muss auch deren Praxiseinsatz betrachtet werden. Dies soll am Beispiel zweier Industriebetriebe geschehen, die freundlicherweise bereit waren, ihre Erfahrungen auf diesem Gebiet an das IKT weiterzugeben. Es handelt sich dabei um folgende Firmen:

- Hofmann Spezialfahrzeug Handelsgesellschaft mbH
Hommeswiese 114
D-57258 Freudenberg
Tel.: 02734-497-0
- Alcan Mass Transportation Systems
Alcan Alesa Engineering Ltd
Max Högger-Strasse 6
CH-8048 Zürich

Es wurde ein Fragebogen erstellt, der während der Firmenbesuche ausgefüllt wurde und die Vergleichbarkeit der Aussagen gewährleistet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Befragungen aufgeführt. Die Fragen entsprechen dabei dem Original-Fragebogen. Die für die jeweilige Firma unwichtigen Fragen wurden dabei weggelassen, die Antworten wurden für eine bessere Übersicht stichpunktartig zusammengestellt.

Hofmann Spezialfahrzeuge

Frage: In welchem Bereich werden die Sandwichs eingesetzt?

- Anhängerbau, Spezialfahrzeuge (siehe Abbildung 16).
- Kioske, Raumbauten (siehe Abbildung 16).

- Bei Wagen und Anhängern überwiegender Einsatz als tragende Elemente, nur in kritischen Bereichen (große Klappen, Eckpfeiler mit wenig Material) Versteifung durch Winkelprofile.
- Große Raumbauten: Einsatz nur als Verkleidung mit darunterliegendem Stahlgerüst (wegen Festigkeitsnachweis und Transport zum Kunden).



Abbildung 16: Produkte der Firma Hofmann: Spezialfahrzeug mit Sandwich-Aufbau (links), Kiosk aus Sandwichelementen (rechts)

Frage: Wie sind die Sandwichs aufgebaut (siehe auch Abbildung 17)?

- Deckschichten aus GFK-Laminat (zum Teil auf Kundenwunsch mit Trägerplatte aus Holz) oder aus Aluminium. Das Laminat für die GFK-Deckschichten kommt als Halbzeug vom Zulieferer (max. Breite 2,50m, in besonderen Fällen mehr). Die Alu-Deckbleche werden bis max. 1,50m Breite angeliefert (dies ist oft zu wenig).
- Kernschicht Styrofoam (Brandschutzklasse B1, geschlossenporig), bei wärmebelasteten Anwendungen PU-Schaum (teuer, Brandschutzklasse B2, geschlossenporig, 45-50kg/m²), für Einlegeteile Purenit (Presswerkstoff, Brandschutzklasse B2, wasserfest, 450-500kg/m²) oder Holz.
- Materialkennwerte (z.B. Zugfestigkeit etc.) sind nicht bekannt, was oft zu Problemen bei notwendigen Festigkeitsnachweisen führt.
- Die Verbindung Deckschicht-Kern erfolgt durch Klebung mittels 2K-PUR-Klebstoff (auch dafür sind keine Festigkeitswerte bekannt).

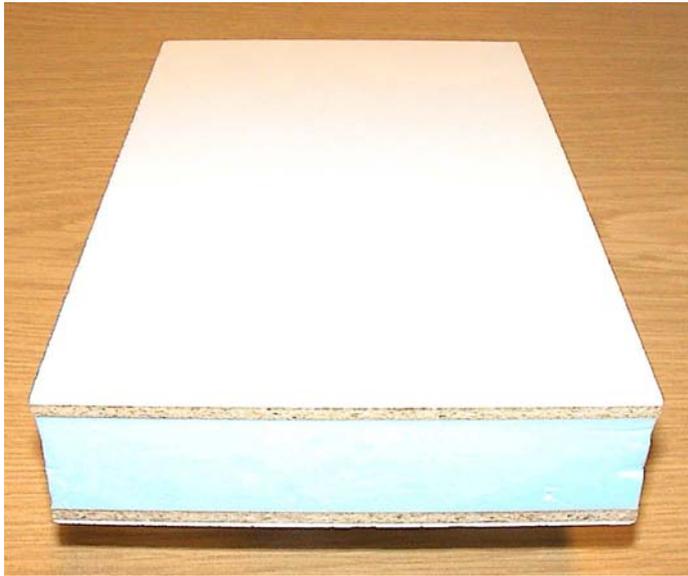


Abbildung 17: Sandwich der Firma Hofmann mit GFK-Holz-Deckschicht und Styrofoam-Kern

Frage: Wie werden die Sandwichs gefertigt?

- Der Schaumkern kommt als Halbzeug vom Zulieferer.
- Fügevorgang:
Kern positionieren, falls erforderlich Einlagen zur Kraffteinleitung einlegen (Holz- oder Alustege, dazu entsprechende Aussparungen schneiden), Klebstoff (2K) auftragen, Deckschichten positionieren, warm oder kalt aushärten lassen, bei Bedarf zusammenpressen. Aushärtedauer des Klebstoffs: eine Stunde.
Nachbearbeitung:
Säumen des Sandwichs (Abschneiden der Randstreifen). Bei nachträglichem Einbau von Einlegeteilen: Kern seitlich herausarbeiten, Einlage mit Faserspachtel einkleben.
Zur nachträglichen Formänderung können die Sandwichs mechanisch bearbeitet werden (Platten- oder Stichsäge, Handbohrmaschine).
- Zulässige Toleranzen: Dicke des Sandwich $\pm 0,5\text{mm}$ (wegen der anschließenden Profile), sonst Freimaßtoleranzen mittel.
- Alle Produkte werden individuell nach Kundenvorstellung gefertigt.

Frage: Wie werden die Sandwichs gelagert/transportiert?

- Anlieferung auf flacher Palette (z.B. 9,60x2,50m).

- Anheben über Kran mit Vakuumsauger (Saugnäpfe).

Frage: Wie werden die Sandwichelemente gefügt (siehe auch Abbildung 18)?

- Fügen durch Klebeverbindung. Primern der Oberfläche eigentlich erforderlich, ist aber zu aufwändig.
- Fixierung der Fügepartner durch Schrauben, die in Einlegeteile greifen (Schraubenabstand 300mm, die Schraubenköpfe werden durch ein aufgeklebtes Aluminiumprofil verdeckt). Einlegeteile aus Holz oder Purenit.

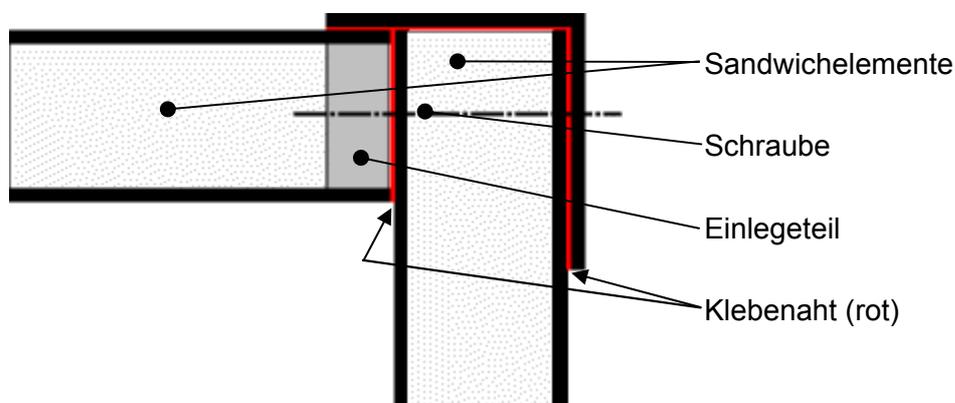


Abbildung 18: Sandwichverbindung der Firma Hofmann Spezialfahrzeuge

- Standmontage.
- Baugruppenfertigung nur bei zusammenhängenden Einheiten (z.B. Regale, Theken).
- Eine Prüfung der Verbindung findet nicht statt.
- Im Schadensfall (z.B. Unfall eines Spezialfahrzeugs) werden defekte Elemente komplett getauscht (keine Reparatur). Die Klebeverbindung wird dabei mit Hitze zerstört.

Frage: Übernimmt die Verbindung Zusatzfunktionen?

- Abdichtung gegen Wasser (u.a. durch Bestreichen mit SikaFlex-Silikon).

Frage: Welche Vorteile bringt der Sandwicheinsatz?

- Hohe Gewichtsersparnis gegenüber anderen Materialien, gute Wärmedämmung.

Frage: Welche Beschränkungen/Probleme bringt der Sandwicheinsatz?

- Hoher Preis von Sandwichkonstruktionen: Holz- bzw. Stahlgerüst mit Blechbeschichtung ist billiger, vor allem bei Kiosken und kleinen Häusern (Nachteil: geringere Haltbarkeit und Qualität, z.B. durch Wellen der Deckbleche im Sommer und starkes Straffen im Winter).
- Statische Berechnung von Sandwichkonstruktionen (Eigengewicht, Schneelast, Windlast etc.) nicht zufrieden stellend möglich (Kennwerte fehlen).

Frage: Welche Wünsche bzgl. einer zukünftigen Sandwichtechnologie gibt es?

- Alternative Fügemöglichkeit zum Kleben (teuer!), Dichtheit gegen Wasser muss jedoch erhalten bleiben.
- Statische Berechnung der Konstruktion sollte möglich sein.

Alcan Mass Transportation Systems

Frage: In welchem Bereich werden die Sandwichs eingesetzt?

- Busdächer und –böden (inkl. Zwischenboden bei Doppeldecker) (siehe Abbildung 19), Straßenbahnteile, Transrapid (Dach, Wände, Boden, durch Laserschweißen gefügt). Prinzipieller Aufbau: Alu-Großprofile als Rahmen (z.B. mit AluGrip verbunden), Sandwichs übernehmen Schubbelastung (sind über Elastic-Kleber mit Profilen gefügt).



Abbildung 19: Midibus Cito von Evobus mit Hybridtragstruktur [13]

- Fa. Bombardier: Verbindung Boden-Seitenwand über Winkel mit Nieten.

Frage: Wie sind die Sandwichs aufgebaut?

- Deckschichten aus Aluminium oder GFK.
- Kernschicht aus PVC-Schaum (Einsatztemperatur 70-80°C, bis 60°C kein Kriechen, sehr gutes Preis/Leistungs-Verhältnis) oder PEI-Schaum (Erex R82, sehr gute Brandschutzwerte, drei mal so teuer wie PVC, bis 160°C einsetzbar). PU wird nicht eingesetzt (schlechte Dauerfestigkeit).
- Materialkennwerte: Tests mit 10Mio Lastwechseln am Sandwich waren erfolgreich.
- Bei Alcan besitzt ein Sandwich stets angeklebte Randleisten.
- Sandwichgröße max. 15x2,4m.

Frage: Wie werden die Sandwichs gefertigt?

- Der Kern wird mit den Deckplatten verklebt, da beim Einschäumen des Kerns keine isotropen Eigenschaften erreicht werden können.
- Die Klebeflächen werden vor dem Fügen gereinigt.
- Mechanische Bearbeitung kann durch einen Schreiner mit gängigen Verfahren erfolgen. Schaum wird mit Holzwerkzeugen bearbeitet.
- Zulässige (bzw. auftretende) Toleranzen: bis 15mm.

Frage: Wie werden die Sandwichs gelagert/transportiert?

- Lagerung/Transport stets mit Randprofilen (Schutz der Randbereiche).
- Anheben über zwei Bandschlaufen (Anhebepunkte rechnerisch ermittelt), zum Teil mit speziellen Transportvorrichtungen.
- Sandwichplatten können mit Zwischenlagen aus Holz übereinander gestapelt werden.

Frage: Wie werden die Sandwichelemente gefügt?

- Standmontage, kein Spannen der Fügepartner notwendig.

Fügen am Beispiel eines Busses:

- Anbindung des Dach- und Bodensandwichs mit dickelastischem Kleber (Fa. Sika, $E=7$ MPasc, $G=4$ MPasc, Klebeschichtdicke 5-10 (max. 15) mm).
- Klebestelle verhält sich schadenstolerant (versteift mit Belastungsgeschwindigkeit) und tolerant gegen Maßabweichungen der Bauteile (Ungenauigkeiten bei Herstellung, Temperaturdehnung usw.).
- Sehr gutes Dämpfungsverhalten (z.B. Entkopplung von Schallerregern).
- Klebestellenvorbereitung: reinigen, primern, aktivieren.
- Qualitätssicherung: Überprüfung der Produkte vor dem Ausliefern (Klopfproben, Stichproben).
- Im Schadensfall Reparatur möglich (Ausschneiden des Deckblechs, Entfernen des Schaums, Einbringen von neuem Schaum, Anbringen von neuem Deckblech), Reparaturstelle bleibt jedoch optisch erkennbar.

Frage: Übernimmt die Verbindung Zusatzfunktionen?

- Dichtheit gegen Wasser.
- El. leitend/isolierend (Transrapid: Kupfermatte im GFK-Sandwichdach zum Erden bzw. Blitzschutz, Klebstoff ist isolierend).

Frage: Welche Vorteile bringt der Sandwicheinsatz?

- Kein Schweißen erforderlich, in Einzelfällen sehr schneller Klebevorgang (z.B. Bus Chita: reine Dach-Einklebezeit 20 Minuten (ohne Vorbereitung und Trockenzeit)).

Frage: Welche Beschränkungen/Probleme bringt der Sandwicheinsatz?

- Probleme beim Fügen von Sandwichelementen: schlechte Vorbehandlung der Klebestellen (abhängig vom ausführenden Personal), Verschmutzungsprobleme bei langen Klebenähten, sehr zeitintensives Verfahren (Ablüften, Trockenzeit usw.).
- Erwartete Schwierigkeiten bzgl. mechanischer Verbindungstechnik: Problem des Toleranzausgleichs bei großen Bauteilen (starke Maßabweichungen möglich, z.B. bei großen Dächern), Festigkeitsprobleme im Bereich des Übergangs zwischen Sandwich und äußerer Struktur.

- Beispiel Combino (Firma Siemens): Klebstoffhersteller gibt keine 30 Jahre (Einsatzdauer Fahrzeug) Garantie auf die Verklebung der Sandwich-Elemente mit der umgebenden Struktur.
- Bei mechanischem Fügen mit Schrauben oder Nieten: Verteilung der Schrauben- bzw. Nietkraft mit steifen Elementen auf große Fläche erforderlich.
- Steifigkeitsprobleme der Sandwichstruktur.

Frage: Welche Wünsche bzgl. einer zukünftigen Sandwichtechnologie gibt es?

- Es gibt einen sehr großen Bedarf an ausgereiften Sandwichverbindungen.

Ergebnis der Firmenbesuche

Die Ergebnisse der Firmenbefragung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sandwichs sind zum Großteil in die Lastübertragung eingebunden, es werden jedoch vor allem im Randbereich Verstärkungen eingesetzt (Randleisten, Einlegeteile, Winkelprofile).
- Die Sandwichs weisen stets die klassische Struktur Deckschicht-Kern-Deckschicht auf, wobei die Deckschichten z.T auch aus mehreren Lagen bestehen können (Hofmann).
- Die Sandwichs werden jeweils individuell angefertigt, zum Teil direkt nach Kundenwunsch (Hofmann), d.h. der Einsatz von Halbzeugen wird nicht praktiziert.
- Bei beiden Firmen werden Sandwichbauteile mittels Klebeverbindungen gefügt. Dies liegt zum Teil am Fehlen ausgereifter Alternativen, zum Teil aber auch an den Zusatzfunktionen wie z.B. Toleranzausgleich, die mit mechanischen Fügeverfahren bislang nicht befriedigend realisiert werden können. Die Klebungen werden mit (Hofmann) bzw. ohne (Alcan) Spannen der Fügepartner durchgeführt, zum Teil wird auf eine ausreichende Vorbereitung der Klebestelle verzichtet (Hofmann, zu aufwändig).
- Als Zusatzfunktion muss die Sandwichverbindung wasserdicht und zum Teil auch elektrisch leitend oder isolierend sein (Alcan).

Als Nachteile des Sandwicheinsatzes wurden bei Hofmann die hohen Kosten im Vergleich zu alternativen Materialien sowie die nicht zufrieden stellenden Berechnungsmöglichkeiten

genannt. Bei Alcan sind die „klassischen“ Probleme von Klebeverbindungen vorherrschend (ausreichende Vorbereitung der Klebestelle, Zeitaufwand, Lebensdauer der Verbindung).

Mit Hilfe leistungsfähiger mechanischer Sandwichverbindungen könnten die wichtigsten der angesprochenen Nachteile von Sandwichelementen gemildert bzw. vermieden werden (Kostenreduktion durch Halbzeugeinsatz, Vermeiden von Klebeverbindungen). So bekunden auch beide Hersteller ein starkes Interesse an alternativen Fügeverfahren, jedoch dürfen die positiven Eigenschaften der Klebeverbindung nicht verloren gehen, woran zum Teil Zweifel besteht (Wasserdichtheit, toleranzausgleichende Wirkung, „sanfter“ Übergang zwischen Sandwich und anschließender Struktur).

3 Systematik mechanischer Sandwichverbindungen

Das mechanische Verbinden von Sandwichhalbzeugen wurde bisher noch nicht umfassend untersucht (siehe Kapitel 2.2.2). Bestehende Lösungen wurden entweder direkt von bekannten Verbindungstechniken abgeleitet, wobei eine gezielte Anpassung an die speziellen Eigenschaften der Sandwichmaterialien und damit die volle Ausnutzung des Potenzials der Verbindung nicht erfolgt ist, oder befinden sich im Stadium einer Prinziplösung, so dass eine direkte technische Nutzung nicht möglich ist.

In diesem Kapitel sollen durch eine systematische Vorgehensweise alle Möglichkeiten zur mechanischen Verbindung von Sandwichhalbzeugen gefunden und dokumentiert werden.

3.1 Anforderungsliste

Die Hauptaufgaben einer Bauteilverbindung sind das Positionieren der zu verbindenden Teile zueinander sowie das Leiten von Kräften und Momenten zwischen diesen Teilen. Alle weitergehenden Aufgaben, wie z.B. die Abdichtung der Fügestelle gegen Wasser oder Gas, sind Zusatzfunktionen, die an dieser Stelle noch nicht betrachtet werden.

Damit ergibt sich für mechanische Sandwichverbindungen die nachfolgend aufgeführte Anforderungsliste. Alle Punkte, die unbedingt erfüllt werden müssen, sind mit einem F (= Forderung) versehen. Alle Punkte, deren Erfüllung wünschenswert ist, die aber für die Funktion nicht unbedingt notwendig sind, sind mit einem W (= Wunsch) gekennzeichnet.

1. Die Verbindung muss in der Lage sein, die an den Sandwichs auftretenden Kräfte und Momente zu leiten (F).
2. Die Abmaße der Verbindungsstelle sollen so klein wie möglich aber so groß wie nötig sein (F).
3. Es dürfen keine unzulässig großen elastischen Verformungen an den Verbindungsstellen auftreten, die zu funktionsgefährdenden Verzerrungen in der Gesamtstruktur führen könnten (F).
4. Die Verbindung soll so ausgelegt sein, dass sie im Falle einer Überbelastung der Gesamtstruktur möglichst gleichzeitig mit den Sandwichelementen versagt. Auf diese Weise wird das Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit erfüllt und die Verbindung ist nicht überdimensioniert (F).
5. Die Verbindungselemente sollen möglichst leicht sein, um den Gewichtsvorteil der Sandwichelemente gegenüber anderen Werkstoffen zu erhalten (F).
6. Der Übergang zwischen Sandwich und Verbindungsstelle soll geometrisch so gestaltet werden, dass es möglichst zu keinen negativen gegenseitigen Beeinflussungen (z.B. durch Steifigkeitssprünge) kommt (F).
7. Der Werkstoff der Verbindungselemente muss mit dem Sandwichwerkstoff verträglich sein, so dass es zu keinen negativen Wechselwirkungen kommen kann (z.B. Steifigkeitssprünge oder erhöhte Korrosion durch Bildung galvanischer Elemente) (F).
8. Die Sandwichverbindungen sollen unabhängig vom Sandwichmaterial (Deckschicht/Kern) einsetzbar sein (W). Ist dies nicht möglich müssen entsprechende Anpassungen für die verschiedenen Materialien durchgeführt werden (F).
9. Die Übertragung von Kräften und Momenten erfolgt im Sandwich, wie schon in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, im Wesentlichen über die Deckschichten, die von der Kernschicht gestützt und in konstantem Abstand gehalten werden. Die Steifigkeit eines Sandwichelements parallel zu seiner Oberfläche resultiert aus der schubsteifen Verbindung der Deckschichten durch die Kernschicht. Aus diesen Gründen soll der Kraftfluss von der Verbindungsstelle direkt in die Deckschichten des Sandwichelements geleitet werden. Dabei soll sowohl der Abstand als auch die

Positionierung der Deckschichten zueinander konstant bleiben, auch unter Belastung (F).

10. Die Verbindungselemente sollten eine möglichst geringe Komplexität aufweisen, so dass eine kostengünstige Herstellung mit gängigen Fertigungsverfahren in großen Stückzahlen möglich ist (W).
11. Für die Montage der Verbindungs- und Fügeelemente sollten möglichst wenige Vorbereitungen an den Sandwichelementen notwendig sein. Sind Vorbereitungsarbeiten nicht zu vermeiden, so sollten diese möglichst einfach durchführbar sein (z.B. sind kreisrunde Bohrungen gegenüber rechteckigen Öffnungen zu bevorzugen) (W).
12. Die Sandwichelemente sollten über die Verbindungselemente einfach zueinander positioniert werden können, um den Fügevorgang zu erleichtern (W).
13. Der Montagevorgang sollte möglichst einfach sein (W).
14. Die Verbindungsstelle sollte möglichst optisch unauffällig sein (W).

Auf Grundlage dieser Anforderungsliste werden nun systematisch Lösungen zum Verbinden von Sandwichelementen erarbeitet.

3.2 Variation der grundlegenden Verbindungsparameter

Eine Verbindung zwischen zwei Bauteilen wird durch eine Vielzahl von Parametern charakterisiert. Im Falle der Verbindung zweier Sandwichhalbzeuge sind die grundlegenden Parameter die Verbindungselemente und die mechanischen Fügeelemente.

Die Verbindung von Sandwichelementen kann mit oder ohne die Hilfe von Verbindungselementen erfolgen. Unter „Verbindungselementen“ (im Folgenden als „VE“ bezeichnet) werden in diesem Fall Hilfselemente verstanden, die mittels Fügeelementen (im Folgenden als „FE“ bezeichnet, z.B. Schrauben oder Nieten) mit den Sandwichbauteilen gefügt werden und so die Verbindung herstellen. Zu den Verbindungselementen gehören auch Einlegeteile, die in den Sandwichkern eingebracht werden. Abbildung 20 verdeutlicht die Begriffsdefinitionen.

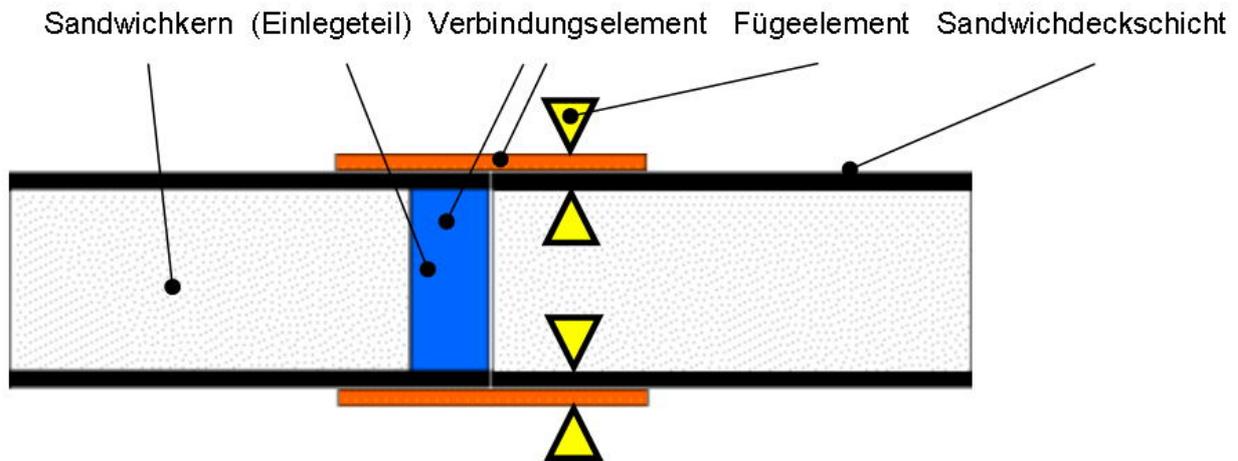


Abbildung 20: Begriffsdefinitionen für die Sandwichverbindung

Durch systematische Variation der Verbindungs- und Fügeelemente ergibt sich ein breites Lösungsfeld für eine mechanische Verbindungstechnik. Am Ende des Kapitels werden die gefundenen Teillösungen bewertet.

3.2.1 Variation der Verbindungselemente

Damit zwei Sandwichelemente miteinander gefügt werden können, muss eine Verbindung zwischen einzelnen Komponenten der Sandwichs und, falls vorhanden, der beteiligten Verbindungselemente erfolgen. Tabelle 2 zeigt die prinzipiell möglichen Komponentenverbindungen (rein qualitativ, Gestaltvariationen sind dabei noch nicht berücksichtigt).

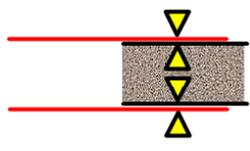
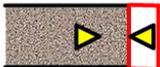
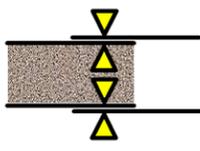
			
VE-Deckschicht	VE-Kern	Deckschicht-Deckschicht	Kern-Kern

Tabelle 2: Variation gefügter Einzelkomponenten bei Sandwichverbindungen

Für eine systematische Vorgehensweise können die Verbindungselemente in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1. herkömmliche Verbindungselemente
2. Sandwichelemente, d.h. die Sandwichdeckschichten werden zu Verbindungselementen geformt

Tabelle 3 zeigt die zwei Verbindungselementgruppen. Für diese grundlegende Untersuchung wird nur der Fall zweier in einer Ebene liegenden Sandwichelemente betrachtet. Andere Orientierungen der Sandwichs zueinander können später aus diesem abgeleitet werden.

Bei den herkömmlichen Verbindungselementen sind in Tabelle 3 nur Grundelemente aufgeführt. Komplexere VEs entstehen dann durch die nachfolgend beschriebene Kombination der einfacheren VEs. VE 7 ist dabei nur als Verstärkung der Deckbleche an den Fügstellen gedacht (z.B. Schutz gegen Einreißen), wird aber aus Gründen der Vollständigkeit mit aufgeführt. Die VEs 4 und 7 wurden im Interesse eines vollständigen VE-Lösungsfeldes bzgl. ihrer Gestalt variiert. Nur so können alle komplexeren Lösungen gefunden werden.

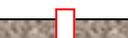
Herkömmliche VEs (Grundelemente)				Sandwichelemente	
1		5		8	
2		6		9	
3		7a		10	
4a		7b		11	
4b		7c			
4c					

Tabelle 3: Verbindungselementgruppen

Die Verbindungselemente können, wie schon erwähnt, nicht nur einzeln, sondern auch in Kombination mit anderen eingesetzt werden. Daher werden im Folgenden systematisch alle möglichen Kombinationen der Verbindungselemente ermittelt. Die Kombinatorik hält sich dabei an folgende Regeln:

- Jedes Element bzw. jede Elementkombination wird jeweils mit den nachfolgenden Elementen kombiniert. Auf diese Weise ergeben sich alle möglichen Kombinationen.
- Wenn sich zwei VEs berühren oder durchdringen, wird der resultierende Körper als neues, komplexeres VE angesehen.
- Es handelt sich bisher nur um qualitative Betrachtungen, die genaue Gestalt sowie die quantitativen Parameter der Verbindungselemente werden damit noch nicht festgelegt.

Sämtliche bei der Kombinatorik entstehende VEs werden direkt einer Grobbewertung unterzogen, um das sehr große Lösungsfeld frühzeitig durch Identifizierung unbrauchbarer Lösungen einzuschränken. Dabei führen folgende Kriterien zum Ausschluss einer Lösung:

- Geometrische Unverträglichkeit (g)
An einer oder mehreren Stellen der Lösung durchdringen sich Sandwichdeckschichten oder Sandwichdeckschicht und VE, oder die Sandwichdeckschicht müsste gleichzeitig in zwei Richtungen verformt werden (Beispiel: Kombination aus Grundelement 2 und Sandwichelement 10).
- Einschließung eines VEs in einem anderen (e)
Eines der Verbindungselemente wird vollständig von einem anderen umschlossen bzw. ist mit diesem deckungsgleich und damit überflüssig (Beispiel: Kombination der Grundelemente 3 und 5).
- Nachbau eines Grundelements aus einem anderen (n)
Eine Sandwichverbindung kommt bei Grundelementen mit rechtem/linken Teil nur zustande, wenn die entsprechenden Teile miteinander gefügt werden und somit ein anderes Grundelement „nachgebaut“ wird (Beispiel: Sandwichverbindung mit Grundelement 6 baut Grundelement 2 nach).
- VE-Teile ohne Funktion (f)
Die durch die Kombination neu hinzugekommenen Elemente besitzen keine Funktion bzw. ihre Funktion kann durch ein anderes Grundelement einfacher realisiert werden (Beispiel: Kombination der Grundelemente 1 und 7b).

Lösungen, die während der Bewertung ausscheiden, werden im weiteren Verlauf der Kombinatorik nicht weiter verfolgt.

Das vollständige Lösungsfeld ist aufgrund seines Umfangs im Anhang dargestellt. Insgesamt wurden 454 mögliche Lösungen erarbeitet, von denen 376 bei der Grobbewertung als nicht sinnvoll identifiziert wurden. Die verbleibenden 78 Lösungen sind in Abbildung 21 dargestellt.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Abbildung 21: Systematik möglicher Verbindungselement-Kombinationen

3.2.2 Variation der mechanischen Fügeverfahren

Das Fügen der einzelnen Komponenten miteinander soll, wie schon erwähnt, mittels mechanischer Fügeverfahren erfolgen. Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die in Kapitel 2.2.1 vorgestellten formschlüssigen und kraftschlüssigen Verfahren.

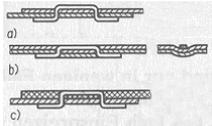
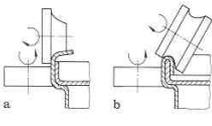
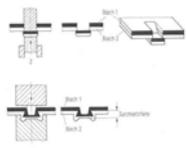
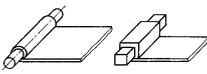
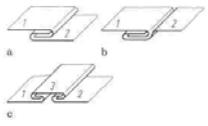
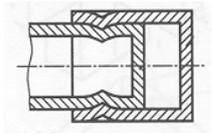
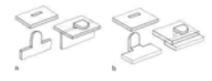
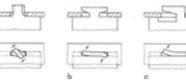
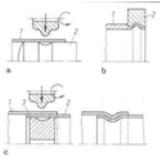
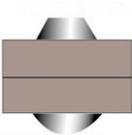
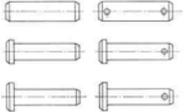
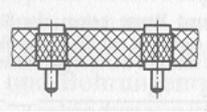
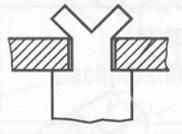
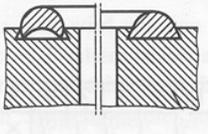
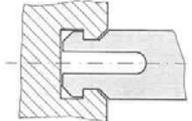
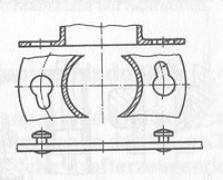
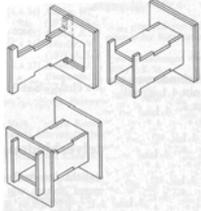
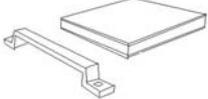
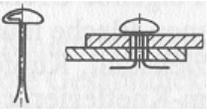
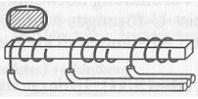
				
01 Blechsteppverbindung	02 Bördelverbindung	03 Durchsetzfugen	04 Einrollverbindung	05 Falzverbindung
				
06 Körnverbindung	07 Lappverbindung	08 Schränkverbindung	09 Sickenverbindung	10 Nietverbindung
				
11 Stiftverbindung	12 Bolzenverbindung	13 Einbettverbindung	14 Kerbverbindung	15 Spreizverbindung
				
16 Schnappverbindung	17 Nut und Feder-Verbindung	18 Renkverbindung	19 Schachtelverbindung	20 Schellenverbindung
				
21 Splintverbindung	22 Wickeln und Nähen			

Tabelle 4: Variation formschlüssiger mechanischer Fügeverfahren

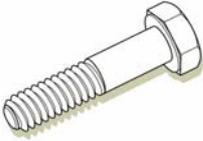
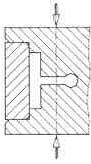
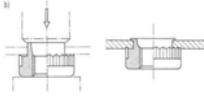
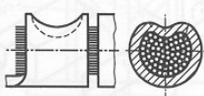
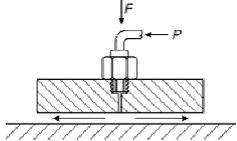
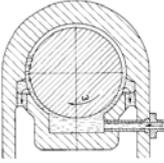
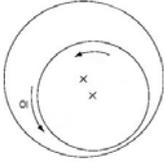
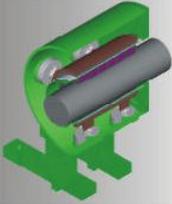
				
23 Schraubenverbindung	24 Spannverbindung	25 Einpressverbindung	26 Verpress- und Quetschverbindungen	27 Aerostat. Lagerung
				
28 Hydrostat. Lagerung	29 Hydrodynam. Lagerung	30 Magnetlagerung	31 Verbindung durch Gravitation	32 Federverbindung

Tabelle 5: Variation kraftschlüssiger mechanischer Fügeverfahren

3.2.3 Bewertung

In den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 wurden die für eine Verbindungstechnik wesentlichen Parameter „Verbindungselemente“ und „Fügeelemente“ vorgestellt. Mittels geeigneter Bewertungsverfahren sollen nun aus den einzelnen Lösungsfeldern die besten Lösungen ermittelt werden.

Verbindungselemente

Die Bewertung der Verbindungselemente erfolgt mit Hilfe einer Nutzwertanalyse. Dazu wird zuerst das Zielsystem aufgestellt. Hierbei werden in der ersten Ebene die grundlegenden Bewertungskriterien formuliert und gewichtet, in den darunter liegenden Ebenen erfolgt dann eine feinere Aufteilung. Die Bewertungskriterien einer Ebene müssen unabhängig voneinander sein, um Doppelbewertungen eines Kriteriums zu vermeiden. Der linke der beiden unterhalb der Kriterien dargestellten Gewichtungsfaktoren gibt die Gewichtung bezogen auf die übergeordnete Ebene, der rechte die Gewichtung bezogen auf das Gesamtsystem an.

Die einzelnen Bewertungskriterien können direkt aus der Anforderungsliste aus Kapitel 3.1

übernommen werden. Dabei muss beachtet werden, dass einige Punkte der Anforderungsliste nur durch eine entsprechende Gestaltung der Verbindungselemente realisiert werden können. Diese Punkte (2, 3, 6, 7, 8) werden also erst zu einem späteren Zeitpunkt relevant und bleiben daher an dieser Stelle unberücksichtigt.

Abbildung 22 zeigt das Zielsystem. Die einzelnen Bewertungskriterien werden nachfolgend erklärt.

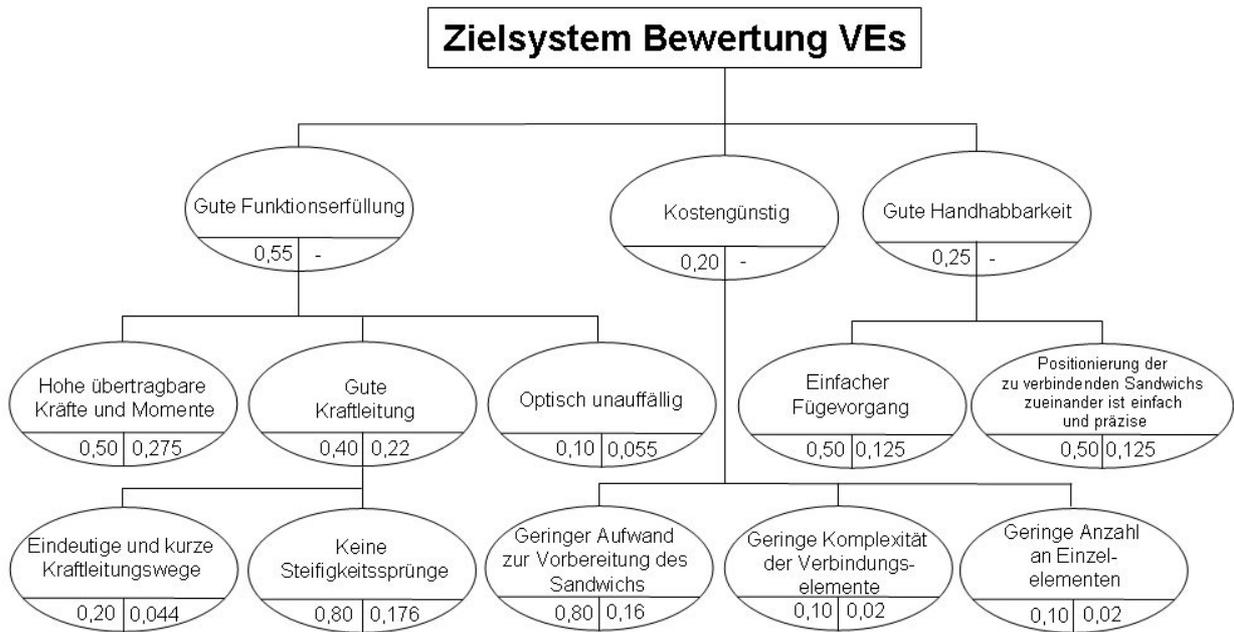


Abbildung 22: Zielsystem der VE-Nutzwertanalyse

Die Gewichtung der Kriterien begründet sich wie folgt:

- Das mit 55% der Gesamtgewichtung wichtigste Kriterium ist eine gute Funktionserfüllung, d.h. das erfolgreiche Verbinden von Bauteilen. Dabei ist ein hohes Kraft- bzw. Momentenleitvermögen am wichtigsten. Zweitwichtigstes Kriterium ist eine gute Kraftleitung, die möglichst keine Steifigkeitssprünge aufweist (sehr wichtig) und auf (in Bezug auf die Verbindungsstelle) unsymmetrische Kraftverzweigungen verzichtet (weniger wichtig), d.h. es sollten eindeutige und kurze Kraftleitungswege vorliegen (siehe auch Abbildung 23). Dadurch wird der Kraftfluss in der Struktur optimiert und nachfolgende Festigkeitsanalysen werden durch eindeutige Verhältnisse wesentlich vereinfacht. Die geringste Bedeutung fällt der

optischen Unauffälligkeit zu, da diese nicht die Funktion beeinflusst und durch entsprechende Maßnahmen (z.B. Verkleidungselemente) verbessert werden kann.

- Das zweite Kriterium (20% der Gesamtgewichtung) ist eine kostengünstige Herstellung. Da Sandwichhalbzeuge gefügt werden sollen, wurde ein geringer Aufwand zur Sandwichvorbereitung höher bewertet als wenige Einzel- und einfach gestaltete Verbindungselemente.
- Das dritte Kriterium (25% der Gesamtgewichtung) ist eine gute Handhabbarkeit. Die gleich bewerteten Unterkriterien sind hier zum einen eine gute und einfache Positionierbarkeit der zu fügenden Einzelemente, zum anderen die Einfachheit des Fügevorgangs selbst (d.h. das Einbringen der Fügeelemente). Die erste Anforderung soll zu einer reproduzierbaren Verbindungsqualität führen und das Fügen mit wenig Personal bzw. automatisiertes Fügen ermöglichen. Die zweite Anforderung soll die Fügedauer verkürzen sowie einen evtl. nötigen Einsatz von Spezialwerkzeug vermeiden.

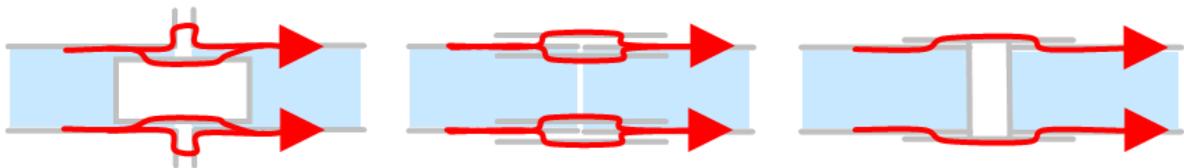


Abbildung 23: Sandwichverbindung mit unsymmetrischen (links), symmetrischen (mitte) und ohne (rechts) Kraftverzweigungen

- Pro Lösung und Kriterium werden Punkte von 0 bis 10 vergeben (0 Punkte: Lösungsvariante erfüllt das Kriterium nicht, 10 Punkte: Lösungsvariante erfüllt das Kriterium sehr gut) und mit der entsprechenden Gewichtung multipliziert. Die Summe der Bewertungen der Einzelkriterien ergibt die Gesamtpunktzahl einer Lösung. Diese liegt ebenfalls zwischen 0 und 10.

Die gesamte Nutzwertanalyse kann im Anhang eingesehen werden. Tabelle 6 zeigt die zehn besten Lösungen mit der jeweils erreichten Punktzahl.

				
1: G2 (9,465)	2: D10 (9,185)	3: D1 (8,525)	4: A1 (8,480)	5: C11 (8,450)
				
6: F7 (8,265)	7: B3 (8,133)	8: C1 (7,950)	9: E7 (7,855)	10: G10 (7,770)

Tabelle 6: Ergebnis der Nutzwertanalyse (die zehn Lösungen mit der höchsten Punktzahl)

Mechanische Fügeverfahren

Eine separate Bewertung der mechanischen Fügeverfahren ist nicht sinnvoll, da diese stark von den zum Einsatz kommenden Verbindungselementen und deren Gestaltung abhängt. Allerdings können diejenigen Lösungen ausgesondert werden, deren Einsatz im Zusammenhang mit Sandwichs allgemein nicht sinnvoll bzw. nicht möglich ist:

- Bördelverbindungen erfordern zwei Blechteile, deren Endkanten nebeneinander zum Liegen kommen. Dies ist bei der Paarung Verbindungs- und Sandwichelement nicht der Fall.
- Einrollverbindungen dienen nur zum Verbinden eines Stabes mit einem Blechteil.
- Stiftverbindungen beruhen auf Formschluss [23]. Da dies bei Belastung der Verbindung an den dünnen Deckschichten der Sandwichs einen sehr hohen Lochlaibungsdruck mit dem Risiko plastischer Verformungen erzeugen würde, besteht die Gefahr, dass Spiel entsteht. Daher sind diese Verbindungen hier ungeeignet.
- Bolzenverbindungen haben stets einen Freiheitsgrad, d.h. sie werden z.B. als Achs- oder Gelenkbolzen eingesetzt.
- Einbettverbindungen sind überwiegend an Verfahren des Urformens gebunden. Die zu verbindenden Bauteile sind dabei ganz oder teilweise plastifiziert oder verflüssigt. Diese Verbindungen können also nicht ortsunabhängig mit einfachen Hilfsmitteln hergestellt werden und sind daher ungeeignet.
- Bei Kerbverbindungen muss das zu kerbende Bauteil eine gewisse Wandstärke aufweisen, damit für die plastische Verformung genug Material vorhanden ist. Diese Wandstärke ist bei Sandwichs nicht vorhanden. Die Verwendung von Zusatz-

Kerbelementen ist nicht sinnvoll, da es hier bessere und erprobtere Elemente gibt (z.B. Schrauben).

- Spreizverbindungen benötigen eine minimale Materialstärke am Bauteil, um den Formschluss zum Verbindungselement realisieren zu können. Diese ist bei Sandwichwerkstoffen aufgrund der dünnen Deckschichten nicht gegeben.
- Schnappverbindungen können keine Spielfreiheit gewährleisten.
- Bei Renkverbindungen müssen die beiden Bauteile an der Fügestelle rotationssymmetrisch sein und durch gegenseitiges Verdrehen gefügt werden können.
- Schachtelverbindungen dienen zum Fügen einer größeren Anzahl von Teilen, deren Form den Erfordernissen des Verbindungsmechanismus angepasst werden muss. Daher sind sie nicht für die Verbindung einzelner, möglichst unveränderter Sandwichhalbzeuge geeignet.
- Schellenverbindungen umgreifen das zu fügende Teil und werden vorgespannt. Beide Eigenschaften können zu Deformationen des Sandwichkerns führen, daher ist dieser Verbindungstyp ungeeignet.
- Splintverbindungen haben keine Vorspannung, der vorhandene Formschluss ist nicht spielfrei. Daher ist diese schwache Verbindung nicht zur Übertragung von Kräften zwischen Sandwichelementen geeignet.
- Hydrostatische und hydrodynamische Lagerungen werden überwiegend zur Lagerung umlaufender Wellen eingesetzt. Eine derartige Lagerung ist also nicht dafür geeignet, die Bewegungsfähigkeit eines Körpers relativ zu einem anderen vollständig einzuschränken. Außerdem wäre die technische Umsetzung im Zusammenhang mit Sandwichhalbzeugen sehr aufwändig und nicht sinnvoll.
- Aerostatische und magnetische Lager sind wie hydrostatische bzw. –dynamische nicht zur vollständigen Festlegung eines Körpers relativ zu einem anderen geeignet. Außerdem sind auch diese Lagertypen nur sehr aufwändig zu realisieren.
- Verbindungen durch Gravitation sind nicht lageunabhängig und daher an dieser Stelle ungeeignet.
- Bei Federverbindungen erfolgt die Belastung in Richtung der Federachse, was im Zusammenhang mit Verbindungselementen nicht sinnvoll umsetzbar ist. Außerdem ist keine elastische Nachgiebigkeit erwünscht. Wird die Verbindung senkrecht zur Federachse belastet, handelt es sich um eine Spannverbindung.

Die Bewertung der übrigen Fügeverfahren wird zu einem späteren Zeitpunkt im Zusammenhang mit den jeweils eingesetzten Verbindungselementen untersucht.

3.3 Prinziplösungen für Sandwichverbindungen

Im Folgenden werden für diejenigen Verbindungselemente, die in der Nutzwertanalyse am besten abgeschnitten haben, Prinziplösungen entwickelt. Diese bestehen aus dem Sandwich, dem jeweiligen Verbindungselement und den mechanischen Fügeelementen.

Es werden systematisch alle möglichen Kombinationen aus Verbindungselementen und Fügeelementen untersucht. An dieser Stelle geht es, wie schon erwähnt, nur um die ebene Verbindung zweier Sandwichplatten. Sämtliche andere Anordnungen stellen nur eine Gestaltvariation der ebenen Anordnung dar und werden später aus dieser abgeleitet.

Tabelle 7 zeigt die aus diesem Vorgehen resultierende Matrix möglicher Kombinationen. Sie beinhaltet gleichzeitig die Kapitel, in der die jeweiligen Prinziplösungen behandelt werden (Kapitelnummer oder „A“ für „Anhang“). Ist eine Kombination aus technischen Gründen nicht geeignet, so ist „n.g.“ eingetragen. Die Begründung dafür findet sich jeweils am Ende eines Kombinations-Abschnitts.

Aufgrund des großen Umfangs wird nachfolgend nur ein Lösungsfeld beispielhaft gezeigt, der Rest findet sich im Anhang. Zuerst werden jedoch Prinziplösungen für Sperr- und Fixierelemente erarbeitet, da diese in einer Vielzahl von Lösungen benötigt werden.

											
Lösung Nr.		1: G2	2: D10	3: D1	4: A1	5: C11	6: F7	7: B3	8: C1	9: E7	10: G10
1	Blechstepp- verbindung	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	Durchsetzfügen	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	Falzverbindung	n.g.	A	n.g.	n.g.	A	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
4	Körnverbindung	n.g.	A	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	A	n.g.	n.g.
5	Lappverbindung	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
6	Schränkverbindung	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
7	Sickenverbindung	n.g.	A	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
8	Nietverbindung	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
9	Nut und Feder- Verbindung	A	A	A	A	A	n.g.	n.g.	A	n.g.	A
10	Schrauben- verbindung	3.3.3	A	A	A	A	A	A	A	A	A
11	Wickeln u. Nähen	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
12	Spannverbindung	A	A	A	n.g.	A	A	A	A	A	n.g.
13	Einpressverbindung	A	n.g.	n.g.	A	A	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	A
14	Verpress- und Quetschverbindung	n.g.	A	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.

Tabelle 7: Matrix für die Zuordnung der Verbindungselement-Fügeelement-Kombinationen zu dem Kapitel, in dem sie behandelt werden (A=Anhang, n.g.=nicht geeignet)

3.3.1 Sperrelemente

Beim Einsatz bestimmter Fügeelemente wird bei Montage von außen manchmal ein Element benötigt, das durch eine Öffnung in der Deckschicht des Sandwichs eingebracht und dann von innen gegen die Deckschicht verspannt werden kann. Dieses Element wird, da es sich gegen das Herausziehen aus dem Sandwich „sperrt“, im Folgenden als „Sperrelement“ bezeichnet (abgekürzt SE). Die optimale weil einfach herzustellende Öffnung zum Einbringen des Sperrelements ist dabei eine Bohrung.

Das Lösungsfeld möglicher Sperrelemente wird durch Variation der Sperrkörper-Kinematik aufgespannt. Die Sperrkörper (abgekürzt SK) des Sperrelements können prinzipiell, entsprechend der Freiheitsgrade im Raum, durch Rotation um eine der drei Raumachsen oder durch Translation in eine der drei Raumrichtungen aktiviert werden. Tabelle 8 zeigt die möglichen Prinziplösungen.

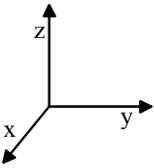
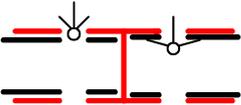
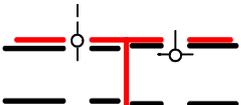
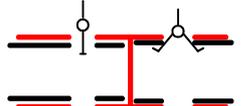
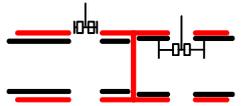
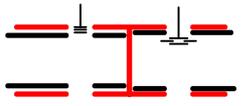
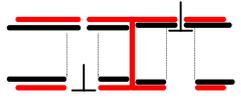
 Raumkoordinaten	Prinziplösungen		
Rotation um x = Rotation um y	1		Die SK sind an der Unterseite über ein Gelenk mit dem Grundkörper des SE verbunden.
	2		Die SK sind in der Mitte über ein Gelenk mit dem Grundkörper des SE verbunden.
	3		Die SK sind an der Oberseite über ein Gelenk mit dem Grundkörper des SE verbunden.
Rotation um z	4		Die SK sind an einem Ende über Gelenke mit dem Grundkörper des SE verbunden.
	5		Das längliche SE wird durch ein Langloch eingeführt und um 90° verdreht.
Translation in x = Translation in y	6		Die SK sind im Grundkörper des SE translatorisch verschiebbar in Nuten gelagert.
Translation in z	7		Direktes Einführen des SE von der Gegenseite aus, durch den Sandwichkern hindurch.

Tabelle 8: Sperrelemente: Variation der Kinematik

In Tabelle 8 wird nur die reine Kinematik der Sperrelemente betrachtet. Es bedarf jedoch noch eines von außerhalb des Sandwichs bedienbaren Mechanismus, mit dessen Hilfe die Sperrkörper von der Montage- in die Sperrposition bewegt werden können. Die prinzipiellen Möglichkeiten hierzu können mit Hilfe der physikalischen Prinzipkataloge nach Koller [2] bestimmt werden.

Die Funktionsstruktur des gesuchten Mechanismus besteht aus nur einer Grundfunktion. Diese ist entweder „Vergrößern/Verkleinern eines Weges oder einer Kraft“ oder „Wandeln in einen Weg oder eine Kraft“. In beiden Fällen ist die Ausgangsgröße ein Weg oder eine Kraft, die zum Verstellen der Sperrkörper genutzt werden kann.

Diejenigen physikalischen Effekte der Grundfunktionen „Vergrößern/Verkleinern“ und „Wandeln“, die als Ausgangsgröße einen Weg bzw. eine Kraft aufweisen, sind im Anhang dargestellt. Sie wurden bzgl. ihrer prinzipiellen Eignung für das vorliegende System grob bewertet, um die Verfolgung ungeeigneter Lösungen frühzeitig auszuschließen. Dabei spielten z.B. die lageunabhängige Funktionsfähigkeit oder die erzeugbaren Kräfte (die Sperrelemente sollten prinzipiell in der Lage sein, beim Öffnen weiches Kernmaterial zu verdrängen) eine Rolle.

Folgende physikalische Effekte sind demnach prinzipiell geeignet:

- Hebel-Effekt
- Keil-Effekt
- Querkontraktion
- Schub
- Fluid-Effekt
- Hooksches Gesetz
- Torsion
- Boyle-Mariotte
- Zentrifugalkraft
- Strömungswiderstand

Die Prinziplösungen der Sperrelemente, d.h. die Kombinationen verschiedener Kinematiken mit den physikalischen Effekten, sind wegen ihrer großen Anzahl im Anhang aufgeführt. Dort wird auch eine Grobbewertung durchgeführt, um die große Zahl der prinzipiell möglichen Lösungen auf die sinnvollen zu reduzieren. Diese werden dann, nachdem die besten Prinziplösungen zur mechanischen Verbindung von Sandwichelementen erarbeitet wurden, zusammen mit den entsprechenden Verbindern weiterentwickelt.

3.3.2 Fixierelemente

Einige Fügeelemente erzeugen eine Verbindung, indem Sie die Deckschichten des Sandwichs gegen das Verbindungselement verspannen (siehe Abbildung 24).

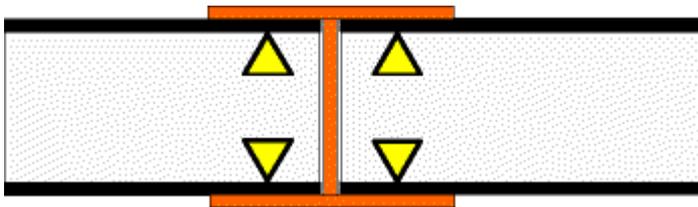


Abbildung 24: Fügen durch Verspannung der Sandwich-Deckschichten gegen das Verbindungselement

Diese Fügeelemente werden von einer Seite in das Sandwich eingebracht und stützen sich gegen die Deckschicht der anderen Seite ab. Das Abstützen erfolgt über das Fixierelement, das eine genaue Positionierung des Fügeelements ermöglicht, so dass es sich auch unter Last nicht verschieben kann. Tabelle 9 zeigt mögliche Ausführungen von Fixierelementen (die zugehörigen Fügeelemente werden später betrachtet).

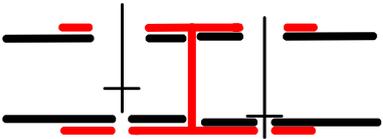
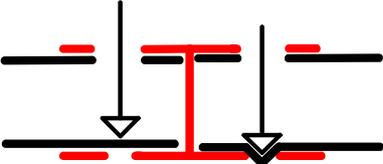
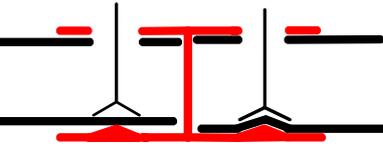
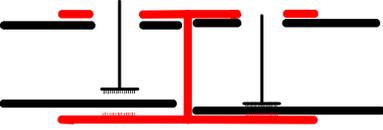
Nr.	Fixierelement	Beschreibung	Geeignet
1		<p>Das Ende des Fixierelements greift formschlüssig in eine Bohrung durch Sandwich und VE, eine Stützplatte nimmt Kräfte auf.</p>	✓
2		<p>Das kegelförmige Fixierelement quetscht die Sandwichdeckschicht in eine Bohrung im VE.</p>	✓
3		<p>Das kegelförmige Fixierelement quetscht die Sandwichdeckschicht in eine trichterförmige Vertiefung im VE.</p>	✓
4		<p>Das trichterförmige Fixierelement drückt die Sandwichdeckschicht über eine kegelförmige Erhebung im VE.</p>	✗
5		<p>Die Stützplatte des Fixierelements und das VE weisen raue Oberflächen auf, zwischen denen die Sandwichdeckschicht eingeklemmt wird.</p>	✗
<p>Symbol zur Darstellung der Fixierelemente:</p>			

Tabelle 9: Mögliche Ausführungen von Fixierelementen, Symbolik

Bewertung:

Die Herstellung eines VE mit kegelförmigen Erhebungen bzw. einem speziellen Reibbelag ist sehr aufwändig. Außerdem kann über die Reibung keine sichere Positionierung des Fügelements gewährleistet werden, daher scheidet die Lösungen FE4 und FE5 aus. Alle anderen Lösungen sind prinzipiell geeignet, daher werden Fixierelemente im Folgenden symbolisch als Dreieck dargestellt (siehe Tabelle 9), als Abkürzung wird FE gewählt.

3.3.3 Beispiel: Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G2 und dem Fügeelement „Schraubenverbindung“

In diesem Kapitel werden Prinziplösungen mechanischer Sandwichverbindungen erarbeitet, die auf dem Verbindungselement G2 und dem Fügeverfahren „Schraubenverbindung“ beruhen. Die weiteren Variationen der Verbindungs- und mechanischen Fügeelemente sind aufgrund des sehr großen Umfangs im Anhang dokumentiert.

Grundsätzlich wird zwischen Fügevorgängen von zwei und Fügevorgängen von einer Seite unterschieden. Dies ist besonders dann wichtig, wenn die Fügestelle nicht von beiden Seiten zugänglich ist.

Bei Schrauben wird zwischen gewindeschneidenden und nicht gewindeschneidenden unterschieden. Diese Einteilung ist sinnvoll, da damit festgelegt wird, ob das Gewinde direkt beim Einschrauben erzeugt wird oder ob ein entsprechendes Muttergewinde im Verbindungselement vorhanden sein muss.

Als Schraubenverbindungen sollen in diesem Zusammenhang nur solche Verbindungen bezeichnet werden, bei denen das Fügen direkt durch die Schraube erfolgt, d.h. die zu fügenden Elemente werden zwischen dem Schraubenkopf und einer Mutter verspannt. Es ist also möglich, dass andere Lösungen Schrauben beinhalten, aber nicht als Schraubenverbindung gelten.

Die einzelnen Verbindungen werden einer Grobbewertung unterzogen, um die Weiterentwicklung ungeeigneter Lösungen frühzeitig zu verhindern. Dieses Vorgehen ist bei der sehr großen Anzahl theoretisch möglicher Lösungen unumgänglich. Eine genauere Bewertung, z.B. mittels einer Nutzwertanalyse, würde einen unverhältnismäßig hohen Aufwand darstellen, der im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll ist und auch nicht geleistet werden kann.

Die Grobbewertung erfolgt anhand dreier Kriterien:

- Hohe übertragbare Kräfte und Momente, Symbol



- Einfacher Fügevorgang, Symbol



- Möglichst geringe Veränderungen am Sandwich, Symbol



Zusätzlich zu diesen Kriterien werden alle Lösungen, die in der Bewertung als „geeignet“ befunden werden, auf „sinnvoll“ oder „nicht sinnvoll“ geprüft. Unter „nicht sinnvoll“ sollen in diesem Zusammenhang Lösungen verstanden werden, die zwar prinzipiell geeignet aber zu aufwändig sind und zu denen „verwandte“, einfachere Lösungen existieren. So ist es z.B. nicht sinnvoll, bei Verwendung des VE D10 in Zusammenhang mit Schraubenverbindungen innen liegende SE-Muttern zu verwenden, da das Einbringen von Gewindelöchern in die inneren VE-Zungen eine wesentlich einfachere Lösung darstellt.

Die Bewertung erfolgt mit „++“ (Kriterium wird sehr gut erfüllt), „+“ (Kriterium wird gut erfüllt), „0“ (Kriterium wird ausreichend erfüllt), „-“ (Kriterium wird schlecht erfüllt) oder „--“ (Kriterium wird sehr schlecht erfüllt). Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der mathematischen Verknüpfung der drei Einzelbewertungen. Eine Lösung wird weiter verfolgt, wenn sie eine Gesamtbewertung von „+“ oder „++“ erreicht und als „sinnvoll“ eingestuft wird.

Das Ergebnis der Grobbewertung wird durch folgende Symbole dargestellt:

- Die Lösung wird weiter verfolgt, Symbol



- Die Lösung wird nicht weiter verfolgt, Symbol



- Die Lösung ist nicht sinnvoll, Symbol



Fügen mit gewindeschneidenden Schrauben

Tabelle 10 zeigt die Lösungen, die für das Fügen mit gewindeschneidenden Schrauben erarbeitet wurden.

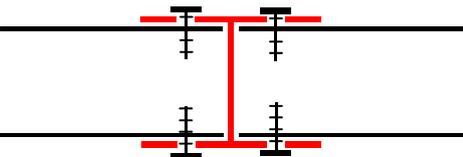
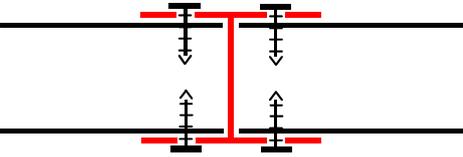
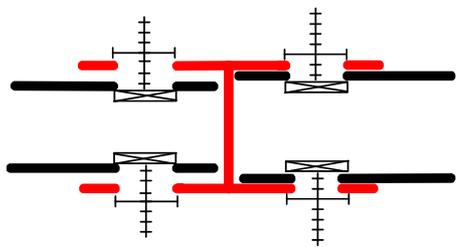
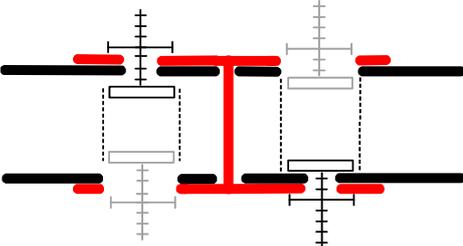
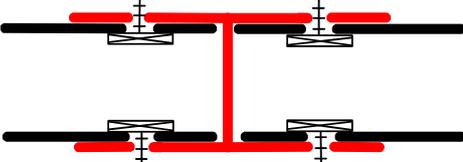
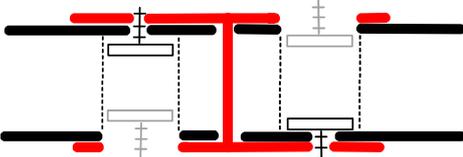
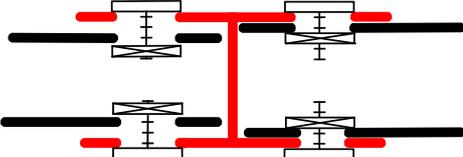
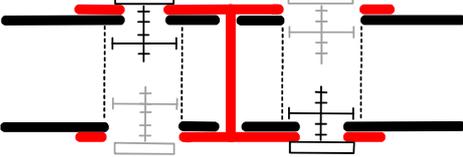
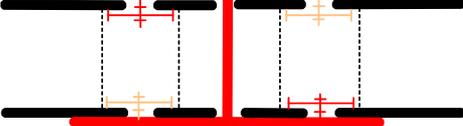
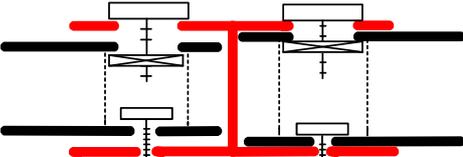
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Eindrehen der Blechschrauben von außen, Kernlöcher in Deckblech vorgebohrt.	+	++	0	✓
2		Eindrehen der kernlochbohrenden Blechschrauben von außen.	++	+	0	✓

Tabelle 10: Fügen mit gewindeschneidenden Schrauben

Fügen mit nicht gewindeschneidenden Schrauben

Tabelle 11 zeigt die Lösungen, die für das Fügen mit nicht gewindeschneidenden Schrauben erarbeitet wurden (da sich die Tabelle ohne Unterbrechung über die nächsten drei Seiten erstreckt wurde die Bezeichnung lediglich am Tabellenende angefügt).

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
3		Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	0	+	++	✓

4		<p>In der Tiefe versetzte Schrauben mit außen liegenden Muttern, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
5		<p>Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.</p>	0	+	++	✓
6		<p>In der Tiefe versetzte Schrauben werden von innen direkt ins VE eingedreht, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	0	++	✗
7		<p>Schrauben mit innen liegenden SE-Muttern.</p>	0	0	++	✓
8		<p>In der Tiefe versetzte Schrauben mit innen liegenden Muttern, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
9		<p>In der Tiefe versetzte Schrauben sind Bestandteil des VE, Montage der Muttern durch Kern hindurch.</p>	--	-	++	✗
Fügen von einer Seiten						
10		<p>Schrauben mit SE-Mutter oben, Standardschrauben unten.</p>	--	0	++	✗

11		SE-Schrauben mit Mutter oben, Standardschrauben unten.	--	+	++	✓
12		SE-Schrauben oben, Standardschrauben unten.	--	+	++	✓
13		Blechschaube oben, Kerndurchmesser ist größer als Kopfdurchmesser der unteren metrischen Gewindeschraube.	--	+	+	✗
14		Hohle Blechschaube mit langer metrischer Gewindeschraube in der Mitte.	--	+	+	✗
15		Hohlschraube mit SE-Mutter oben, Standardschraube unten.	--	-	++	✗
16		Hohlschraube mit SE-Kopf und Mutter oben, Standardschraube unten.	--	0	++	✗
17		Blechschaube mit metrischer Gewindeschraube am Ende. Die Verbindung bricht bei Erreichen des Anzugsmoments der unteren Schraube, danach kann die Blechschaube angezogen werden.	--	+	+	✗

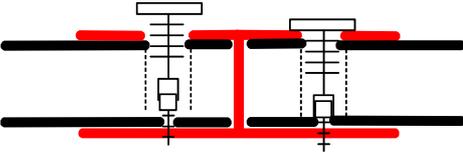
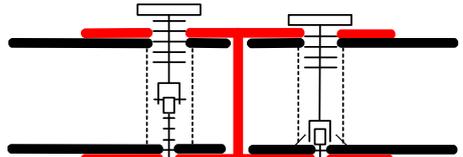
18		<p>Blechschaube mit axial verschiebbarer metrischer Gewindeschraube am Ende. Die Verbindung (Löt-, Klebe-, Klemmverbindung) rutscht bei Erreichen des Anzugsmoments der unteren Schraube durch, danach kann die Blechschaube angezogen werden.</p>	--	+	+	✗
19		<p>Blechschaube mit axial verschiebbarer metrischer Gewindeschraube am Ende. Die Verbindung bricht bei Erreichen des Anzugsmoments der unteren Schraube, danach kann die Blechschaube angezogen werden.</p>	--	+	+	✗

Tabelle 11: Fügen mit nicht gewindeschneidenden Schrauben

3.4 Bewertung der sinnvollen Lösungen

Nach der Grobbewertung verbleiben noch 83 sinnvolle Lösungen zur Verbindung zweier Sandwichelemente. Diese werden nun einer Nutzwertanalyse unterzogen, um die besten Lösungen zu identifizieren. Diese Lösungen werden dann konstruktiv ausgearbeitet und als Prototypen gefertigt, damit Ihre Leistungsfähigkeit experimentell nachgewiesen werden kann. Die einzelnen Lösungen werden wie folgt bezeichnet:

<VE-Nummer>_<Fügeelement-Nummer>_<Laufende Nummer der Prinziplösungstabelle>.

So bezeichnet G2_01_1 also die erste Lösung der Tabelle „Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Blechstappverbindungen“ (siehe Anhang).

Das Zielsystem der Nutzwertanalyse zeigt Abbildung 25.

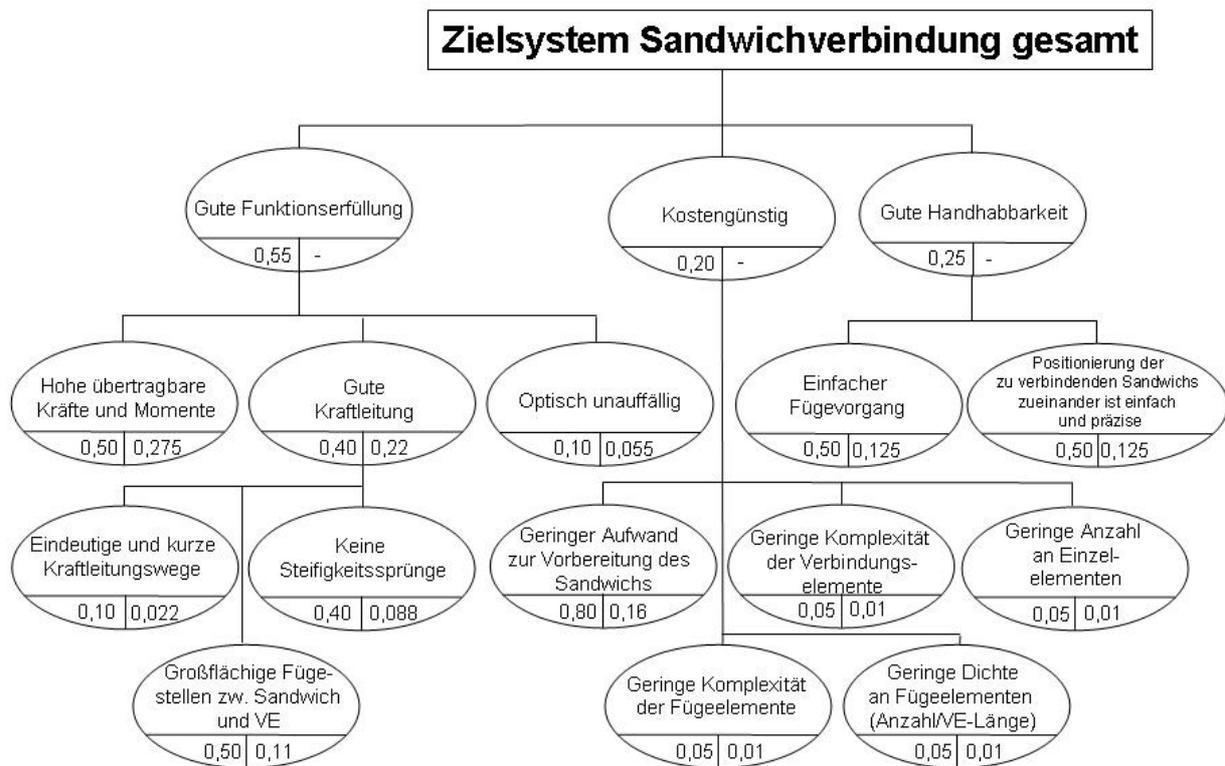


Abbildung 25: Zielsystem der Nutzwertanalyse zur Ermittlung der fünf besten Lösungen

Die Gewichtung der Kriterien begründet sich wie folgt:

- Das mit 55% der Gesamtgewichtung wichtigste Kriterium ist eine gute Funktionserfüllung, d.h. das erfolgreiche Verbinden von Bauteilen. Dabei ist ein hohes Kraft- bzw. Momentenleitvermögen am wichtigsten. Zweitwichtigstes Kriterium ist eine gute Kraftleitung, die über möglichst großflächige Fügestellen zwischen Sandwich und VE verläuft (sehr wichtig) sowie keine Steifigkeitssprünge aufweist (auch sehr wichtig) und auf (in Bezug auf die Verbindungsstelle) unsymmetrische Kraftverzweigungen verzichtet (weniger wichtig), d.h. es sollten eindeutige und kurze Kraftleitungswege vorliegen (siehe Abbildung 23). Dadurch wird der Kraftfluss in der Struktur optimiert und nachfolgende Festigkeitsanalysen werden durch eindeutige Verhältnisse wesentlich vereinfacht. Die geringste Bedeutung fällt der optischen Unauffälligkeit zu, da diese die Funktion nicht beeinflusst und durch entsprechende Maßnahmen (z.B. Verkleidungselemente) verbessert werden kann.
- Das zweite Kriterium (20% der Gesamtgewichtung) ist eine kostengünstige Herstellung. Da Sandwichhalbzeuge gefügt werden sollen, wurde ein geringer

Aufwand zur Sandwichvorbereitung höher bewertet als wenige Einzelelemente, eine geringe Dichte an Fügeelementen oder einfach gestaltete Verbindungs- bzw. Fügeelemente.

- Das dritte Kriterium (25% der Gesamtgewichtung) ist eine gute Handhabbarkeit. Die gleich bewerteten Unterkriterien sind hier zum einen eine gute und einfache Positionierbarkeit der zu fügenden Einzelelemente, zum anderen die Einfachheit des Fügevorgangs selbst (d.h. das Einbringen der Fügeelemente). Die erste Anforderung soll zu einer reproduzierbaren Verbindungsqualität führen und das Fügen mit wenig Personal bzw. automatisiertes Fügen ermöglichen. Die zweite Anforderung soll die Fügedauer verkürzen sowie einen evtl. nötigen Einsatz von Spezialwerkzeug vermeiden.

Die gesamte Nutzwertanalyse ist im Anhang dargestellt.

Tabelle 12 zeigt diejenigen Lösungen, die aufgrund der Nutzwertanalyse für eine konstruktive Umsetzung in Frage kommen.

Die letzten drei Lösungen werden trotz ihres schlechten Abschneidens in der Bewertung weiter verfolgt, da sie extrem kostengünstig und daher für Verbindungen interessant sind, bei denen keine großen Kräfte übertragen werden.

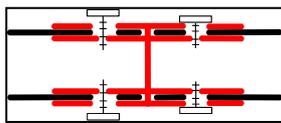
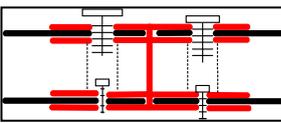
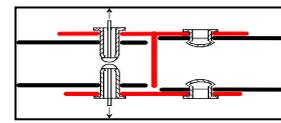
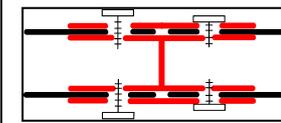
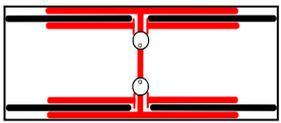
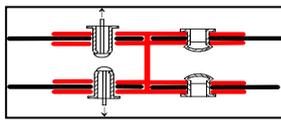
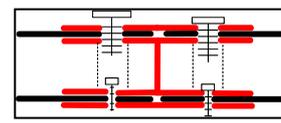
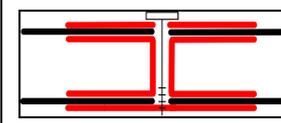
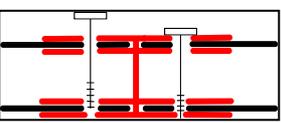
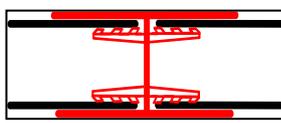
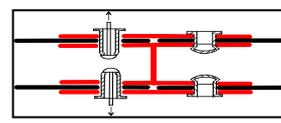
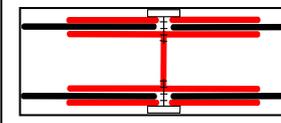
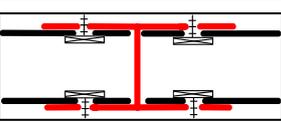
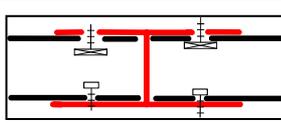
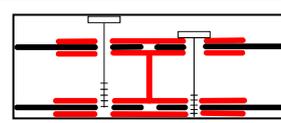
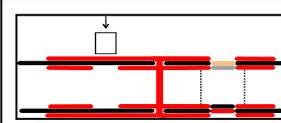
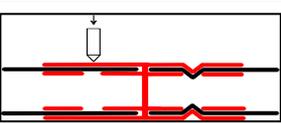
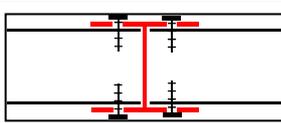
			
Rang 1 , 8,425 Punkte D10_21_1	Rang 2 , 8,265 Punkte D10_21_19	Rang 3 , 8,213 Punkte G2_10_3	Rang 4 , 8,155 Punkte D1_21_1
			
Rang 5 , 8,100 Punkte D10_24_42	Rang 6 , 8,030 Punkte D10_10_3	Rang 7 , 7,995 Punkte D1_21_32	Rang 8 , 7,983 Punkte D1_21_17
			
Rang 9 , 7,886 Punkte D10_21_12	Rang 10 , 7,785 Punkte D10_24_37	Rang 11 , 7,780 Punkte D1_10_3	Rang 12 , 7,708 Punkte D1_21_13
			
Rang 13A , 7,633 Punkte G2_21_5	Rang 13B , 7,633 Punkte G2_21_12	Rang 15 , 7,616 Punkte D1_21_10	Außer Konkurrenz 1 D10_03_1
			
Außer Konkurrenz 2 D10_06_3	Außer Konkurrenz 3 G2_21_1		

Tabelle 12: Die besten Prinziplösungen für mechanische Sandwichverbindungen

4 Auslegung der besten Sandwichverbindungen

Die in Kapitel 3 erarbeiteten besten Prinziplösungen für mechanische Sandwichverbindungen können, da sich einzelne Lösungen zum Teil sehr ähnlich sind bzw. auf dem gleichen Wirkprinzip beruhen, in sechs Blöcke eingeteilt werden:

Block 1 Standardschrauben außen	Block 2 Standardschrauben zentral	Block 3 Blindniete
Lösung 1, 2, 4, 7 (kurze Schrauben) und 9, 15 (lange Schrauben)	Lösung 8, 12	Lösung 3, 6, 11
Block 4 Schnellverschlüsse	Block 5 Sperrelement-Schrauben	Block 6 Low-Cost-Verschlüsse
Lösung 5, 10	Lösung 13A, 13B	Lösung „Außer Konkurrenz 1, 2, 3“

Tabelle 13: Einteilung der besten Sandwichverbindungen in sechs Blöcke

Block 1 beinhaltet alle Lösungen mit direkt in die Verbindungselement (im Weiteren als „VE“ abgekürzt) -Zungen eingedrehten Schrauben. Dabei kann pro Seite noch zwischen kurzen (verspannen jeweils nur die oberen oder unteren VE-Zungen) und langen (verspannen alle VE-Zungen einer Seite) Schrauben unterschieden werden.

In Block 2 sind Lösungen mit zentral angeordneten Schrauben zusammengefasst, die den Verbinder entweder seitenweise oder durch den Mittelsteg hindurch komplett verspannen.

Block 3 beinhaltet alle Lösungen mit Blindnieten als Fügeelemente.

In Block 4 werden die Schnellverschlüsse eingeordnet, mit deren Hilfe ein schnelles Fügen bzw. Lösen der Verbindung möglich ist.

Block 5 beschäftigt sich mit den Sperrelement-Schrauben, deren Schraubenkopf erst nach dem Eindrehen der Schraube in das Sandwich entsteht.

In Block 6 werden die Low-Cost-Verschlüsse behandelt, die zwar in der Bewertung schlecht

abgeschnitten haben, aufgrund ihrer extrem günstigen Herstellkosten jedoch weiter verfolgt werden sollen.

4.1 Allgemeiner Lastfall am Sandwich

Zur Auslegung der Sandwichverbindungen wird die Art aller am Sandwich angreifenden Kräfte und Momente benötigt. Daher wird an dieser Stelle ein allgemeiner Lastfall definiert, der für alle folgenden Betrachtungen gelten soll.

Entsprechend der sechs Freiheitsgrade im Raum kann ein gefügtes Sandwichelement von drei Kräften und drei Momenten belastet werden. In Abbildung 26 ist dieser allgemeine Lastfall dargestellt.

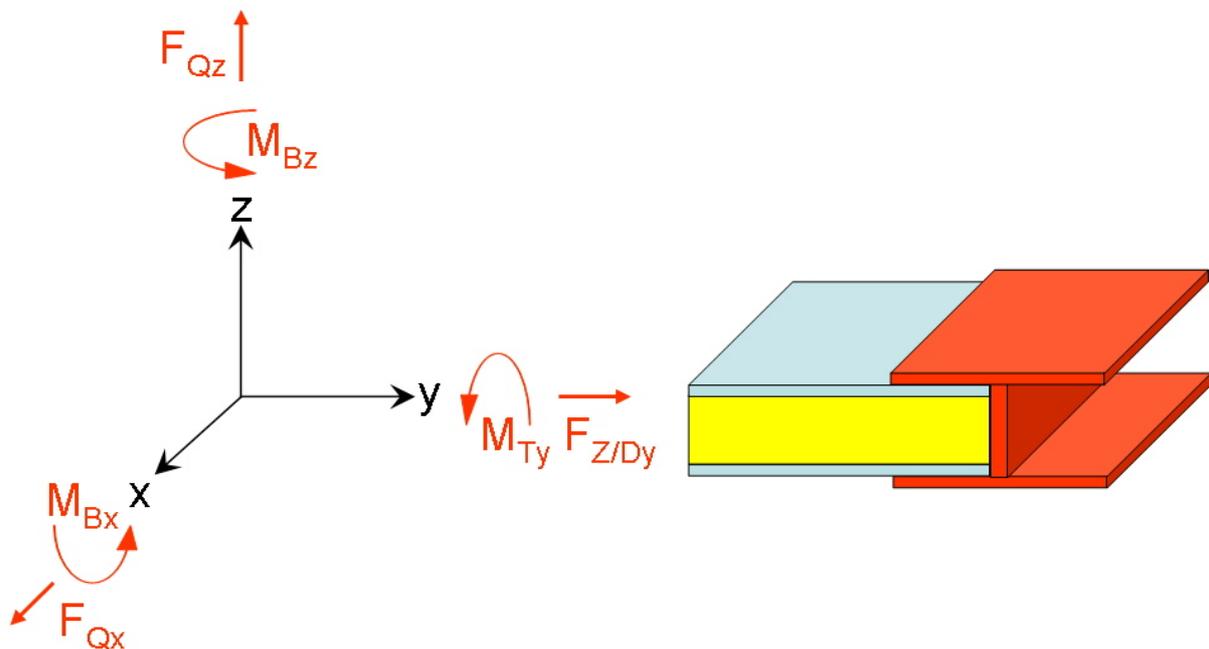


Abbildung 26: Allgemeiner Lastfall an einem gefügten Sandwichelement

Die Kräfte und Momente sind im Sinne eines Rechts-Koordinatensystems angeordnet:

- durch Drehung der x- auf die y-Achse auf kürzestem Weg ergibt sich die Drehrichtung von M_{Bz}

- durch Drehung der y - auf die z -Achse auf kürzestem Weg ergibt sich die Drehrichtung von M_{Bx}
- durch Drehung der z - auf die x -Achse auf kürzestem Weg ergibt sich die Drehrichtung von M_{Ty}

In Bezug auf das VE, welches das Sandwichelement an der rechten Seite festhält, werden F_{Qx} und F_{Qz} vom Sandwich als Querkräfte, $F_{z/Dy}$ als Zug- oder Druckkraft, M_{Bx} und M_{Bz} als Biegemomente und M_{Ty} als Torsionsmoment wahrgenommen. Da es unendlich viele Lastfälle gibt, werden im Rahmen der folgenden Festigkeitsnachweise für die sechs möglichen Belastungen keine Zahlenwerte sondern die jeweiligen Kurzbezeichnungen eingesetzt. Somit ist die Berechnung für jede beliebige Belastungskombination gültig.

Das Verhalten der Sandwichelemente unter Last ist nicht bekannt und soll im Rahmen dieser Arbeit auch nicht untersucht werden. Daher stellen die nachfolgenden Berechnungen eine zum Teil sehr grobe, erste Auslegung der Verbindungen dar. Diese soll als Basis für genauere Untersuchungen unter Einbeziehung des Sandwichverhaltens mit Hilfe der FEM-Methode dienen. Daher sollen im Weiteren die folgenden (zum Teil vereinfachenden) Annahmen gelten:

- Die Belastungen greifen stets symmetrisch an den Deckschichten des Sandwich an. Der Kern hat nur eine stabilisierende Wirkung, d.h. er hält die Deckschichten in konstantem Abstand. Dies entspricht den üblichen Annahmen für Sandwichelemente.
- Das Sandwich wird als normaler Festkörper behandelt, d.h. es gelten die in der elementaren Festigkeitslehre üblichen Annahmen (z.B. die Bernoullische Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte eines Balkens unter Biegebelastung).
- Die Belastungen, die das Sandwich erfährt, werden unverändert an das VE weitergeleitet, d.h. evtl. auftretende Verformungen des Sandwichs und damit einhergehende Veränderungen der auf das VE wirkenden Belastungen werden vernachlässigt. So wird z.B. die Querkraft F_{Qz} auch vom VE als Querkraft wahrgenommen.
- Der Mittelsteg des VE ist ortsfest fixiert, so dass die äußeren Belastungen darüber an die Umgebung abgeleitet werden können.
- Die Auslegung erfolgt jeweils nach der höchstbeanspruchten Stelle der Verbindung. Daher werden alle an dieser Stelle auftretenden Belastungen betragsmäßig addiert, die Vorzeichen spielen also keine Rolle. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da die Auslegung der Verbinder im Hinblick auf unterschiedliche Belastungsrichtungen eine

Vielzahl möglicher Verbindervariationen und damit erheblich höhere Produktionskosten zur Folge hätte. Außerdem kann eine Belastung in nur eine Richtung oft nicht mit Sicherheit garantiert werden, darüber hinaus können durch falsche Montage der nur für eine Belastungsrichtung ausgelegten Verbinder Versagensfälle entstehen.

- Für die Kraftübertragung vom Sandwich auf das VE werden oft sehr stark vereinfachende Annahmen zur sicheren Seite hin getroffen. Diese können zwar zum Teil zu einer Überdimensionierung des VE führen, jedoch ist eine exakte Berechnung aufgrund des unsicheren Sandwichverhaltens zum jetzigen Zeitpunkt nicht realisierbar und auch nicht sinnvoll. In einem nachfolgenden Projektzeitraum soll mittels einer Abbildung des Sandwich und der Verbinder in einem FEM-System die Richtigkeit der Annahmen verifiziert und wenn nötig optimiert werden.

Der Festigkeitsnachweis für die Sandwichelemente selbst wird im Rahmen dieser Arbeit nicht geführt. Dies ist zum einen aufgrund der unendlich großen Zahl möglicher Geometrie- und Material-Kombinationen, zum anderen aufgrund der schon erwähnten Komplexität des Sandwichverhaltens unter Last nicht möglich. Es wird daher im Folgenden davon ausgegangen, dass die zulässigen Belastungen vom Sandwichhersteller angegeben werden können. Die einzige Ausnahme stellen Beanspruchungen des Sandwichs dar, die sich aus der Verbindungstechnik ergeben. So kann z.B. der Festigkeitsnachweis gegen unzulässig hohe Flächenpressung oder Lochlaibung der Sandwich-Deckschicht problemlos geführt werden.

Das allgemeine Vorgehen bei den nachfolgenden Verbindungsauslegungen gestaltet sich wie folgt:

1. Bestimmung aller für die Verbindung relevanter geometrischer Kennwerte (allgemein).
2. Reduzierung der einzelnen Belastungen des allgemeinen Lastfalls auf die maximal belastete Fügestelle (z.B. bei den Nietverbindern aus Block 3: Ermittlung der Belastungen am maximal belasteten Niet in Abhängigkeit der sechs Belastungen des allgemeinen Lastfalls).
3. Addition gleichartiger Belastungen zu einer resultierenden Gesamtbelastung (z.B. Addition aller Scherkräfte an der Fügestelle).
4. Auslegung der Fügeelemente: Ermittlung der Beanspruchungen der Fügeelemente, Durchführung aller notwendigen Festigkeitsnachweise.

5. Ermittlung der kritischen Spannungen im VE, die sich durch den allgemeinen Lastfall ergeben, wenn notwendig Bilden der kritischen Vergleichsspannung. Durchführung aller notwendigen Festigkeitsnachweise.
6. Auslegung des Sandwichs im Bereich der Fügestelle.

Mit der Festlegung der geometrischen Kennwerte (Punkt 1) wird die Gestalt der Verbinder nur in qualitativer Hinsicht teilweise festgelegt. Die genaue qualitative und quantitative Gestaltung erfolgt in Kapitel 5.

4.2 VE-Block 1: Standardschrauben außen

Der Block „Standardschrauben außen“ beinhaltet die Lösungen 1,2,4,7,9 und 15. Auf Grund der Vielzahl der Varianten wird die Auslegung exemplarisch an Lösung 4 gezeigt.

4.2.1 Geometrische Kennwerte

Das Fügen von Sandwich und VE geschieht über Schrauben mittels Kraftschluß. Es existiert eine bestimmte Anzahl diskreter Fügstellen. Die geometrischen Kennwerte der Verbindung werden in Abbildung 27 veranschaulicht, für eine bessere Übersicht sind die Schrauben nicht dargestellt.

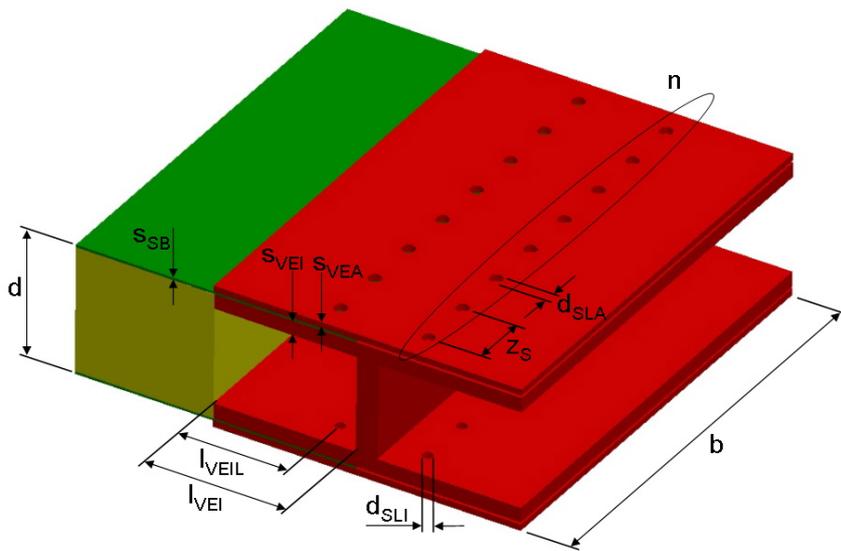


Abbildung 27: Kenngrößen der Standardschraubenverbindung

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)
- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- s_{VEA} ... Dicke des äußeren Teils der VE-Zunge im Verschraubungsbereich
- s_{VEI} ... Dicke des inneren Teils der VE-Zunge im Verschraubungsbereich
- l_{VEI} ... Länge der inneren Sandwichzungen
- l_{VEIL} ... Abstand der Schraubenlöcher vom Zungenende
- b ... VE-Breite
- z_S ... Bohrungsabstand
- d_{SLA} ... Bohrungsdurchmesser in äußerer VE-Zunge
- d_{SLI} ... Bohrungsdurchmesser in innerer VE-Zunge
- n ... Anzahl der Schrauben pro Sandwich-Deckblech

4.2.2 Belastung der Fügstellen

Im Folgenden werden die Belastungen des allgemeinen Lastfalls auf die diskreten Fügstellen reduziert. Dies sind in diesem Fall die $2n$ Schrauben pro Sandwichelement. Dabei sind nur die maximal belasteten Verschraubungsstellen von Interesse, die im Falle einer Überlastung der Verbindung zuerst versagen. Tabelle 14 zeigt die Schraubenbelastungen, die sich aus dem allgemeinen Lastfall ergeben.

Nr.	Belastung	Belastung der Schrauben F_S	Richtung von F_S	Güte	laut Lastannahme belastete VE-Zungen
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{S1} = \frac{F_{Z/Dy}}{2 \cdot n}$	in y-Richtung	exakt	alle VE-Zungen
2	M_{Bx}	$F_{S2} = \frac{M_{Bx}}{d \cdot n}$	in y-Richtung	sehr gut	alle VE-Zungen
3	M_{Bz}	$F_{S3,max} = \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{z_S \cdot (n^3 - n)}$	in y-Richtung	gut	alle VE-Zungen
4	M_{Ty}	$F_{S4/1,max} = \frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_S \quad (\text{axial})$ $F_{S4/2,max} = \frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot d \quad (\text{radial})$	in z-Richtung (axial) in x-Richtung (radial)	ausreichend	alle VE-Zungen
5	F_{Qz}	$F_{S5} = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot n}$	in z-Richtung	ausreichend	innere VE-Zungen
6	F_{Qx}	$F_{S6} = \frac{F_{Qx}}{2 \cdot n}$	in x-Richtung	exakt	alle VE-Zungen

Tabelle 14: Belastungen der Fügstellen des Standardschrauben-VEs

Tabelle 14 liegen folgende Lastannahmen zugrunde:

- F_{S1} : $F_{Z/Dy}$ belastet alle $2n$ Fügstellen gleichmäßig radial. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Reibung übertragen.
- F_{S2} : Die Dicke der VE-Zungen ist sehr viel kleiner als Ihre Länge, daher wird die Biegesteifigkeit vernachlässigt. M_{Bx} wird durch n gleiche Kräftepaare abgestützt und belastet alle $2n$ Fügstellen gleichmäßig radial. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Reibung übertragen.
- F_{S3} : M_{Bz} verteilt sich näherungsweise wie eine Biegespannung auf die einzelnen Fügstellen (abgeleitet aus der Nietberechnung nach [29]). Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Reibung übertragen. Durch Bildung des Momentengleichgewichts um den Mittelpunkt der Schraubenreihe und Anwendung der Strahlensätze kann die Kraft an der äußersten Schraube in Abhängigkeit der Abstände der gleich weit vom Mittelpunkt entfernten Schrauben und des Moments M_{Bz} dargestellt werden. Die Schraubenabstände bilden dabei eine endliche Folge, da es ja unendlich viele Möglichkeiten für die Anzahl der Schrauben gibt. Der Schritt zum allgemeinen Fall gelingt, indem die Folge durch einen arithmetischen Ausdruck ersetzt wird, der nur noch von n und z_S abhängt [30].
- F_{S4} : Die Verteilung von M_{Ty} auf die einzelnen Fügstellen kann mit vertretbarem Aufwand nicht mehr geschlossen analytisch ermittelt werden, da die Verformung der Deckbleche unter der Momenteneinwirkung nicht bekannt ist. Daher wird stark vereinfachend angenommen, dass nur die äußeren vier Schrauben tragen ($n > 1$), die Stützwirkung der äußeren VE-Zungen wird aufgrund der fehlenden momentensteifen Anbindung an den Mittelsteg zur Sicherheit vernachlässigt. Die Belastung an der einzelnen Schraube kann dabei in eine radiale ($F_{S4/2}$, Übertragung durch Reibung) und eine axiale Komponente ($F_{S4/1}$, Übertragung durch Formschluss) zerlegt werden, die für den allgemeinen Fall nur noch von n , z_S und d abhängen [30].
- F_{S5} : F_{Qz} belastet alle $2n$ Fügstellen gleichmäßig axial. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Formschluss übertragen. Es wird zur Sicherheit angenommen, dass F_{Qz} nur von den inneren VE-Zungen aufge-

nommen wird, da nur diese momentensteif mit dem Mittelsteg verbunden sind. Die Stützwirkung der äußeren Zungen wird vernachlässigt.

- F_{S6} : F_{Qx} belastet alle $2n$ Schrauben gleichmäßig radial, die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Reibung übertragen.

Abbildung 28 zeigt qualitativ die in Tabelle 14 ermittelten Schraubenbelastungen am Beispiel von Lösung 4 mit $n=8$. Zugunsten der Übersichtlichkeit sind die Belastungen nur an der oberen Schraubenreihe angetragen. Sie sind so orientiert, dass sich die maximale Schraubenbelastung ergibt (in diesem Fall an der vordersten Schraube).

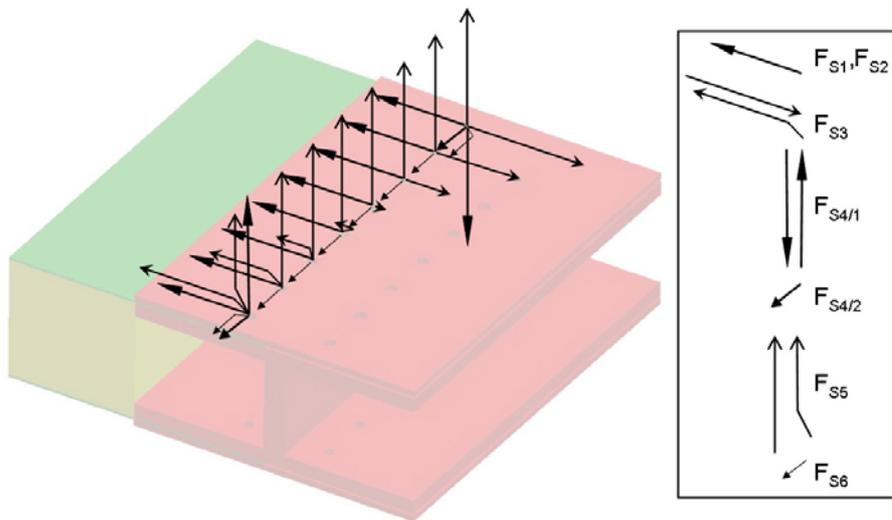


Abbildung 28: Schraubenbelastungen am Standardschrauben-VE am Beispiel von Lösung 4

4.2.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die Belastungen 1-6, die auf das VE wirken, können in zwei Gruppen zusammengefasst werden:

Die Belastungen 1,2,3, 4/2 und 6 belasten die Schrauben radial, da sie alle in der x-y-Ebene wirken. Die resultierende Gesamtbelastung $F_{S,radial,max}$ für den „Worst-Case“-Fall wird wie folgt bestimmt:

$$F_{S,radial,max} = \sqrt{(|F_{S1}| + |F_{S2}| + |F_{S3}|)^2 + (|F_{S4/2}| + |F_{S6}|)^2}$$

$$F_{S,radial,max} = \sqrt{\left(\frac{|F_{Z/Dy}|}{2 \cdot n} + \frac{|M_{Bx}|}{d \cdot n} + \frac{3 \cdot |M_{Bz}| \cdot (n-1)}{z_S \cdot (n^3 - n)}\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{2} |M_{Ty}| \cdot d}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_S^2} + \frac{|F_{Qx}|}{2 \cdot n}\right)^2}$$

Die Belastungen 4/1 und 5 belasten die Schrauben axial, da sie in z-Richtung wirken. Die resultierende Gesamtbelastung $F_{S,axial,max}$ für den „Worst-Case“-Fall wird wie folgt bestimmt:

$$F_{S,axial,max} = |F_{S4/1}| + |F_{S5}|$$

$$F_{S,axial,max} = \frac{\frac{1}{2} \cdot |M_{Ty}| \cdot (n-1) \cdot z_S}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_S^2} + \frac{|F_{Qz}|}{2 \cdot n}$$

4.2.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Versagensfall 1

Die Schraubenverbindung versagt.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Die Auslegung der Schrauben soll nach VDI2230 [31] erfolgen. Dafür ist eine konkrete Lastannahme erforderlich. Folgende Kräfte werden im Vorgriff auf Kapitel 5 angenommen:

$$F_{Z/Dy} = 10000N$$

$$F_{Qz} = 500N$$

Das kraftübertragende Sandwichelement hat die Dimensionen:

$$d = 60mm$$

$$b = 200\text{mm}$$

$$s_{SB} = 0,8\text{mm}$$

Vorab wird die Anzahl der Schrauben mit

$$n = 8$$

festgelegt, was der Empfehlung der VDI2230 für die Lastaufteilung ohne experimentelle Untersuchungen entspricht ($n \leq 8$). Mit dem später festgelegten Maß für die Bohrungen entspricht die Lastaufteilung der weiteren Empfehlung:

$$3d_h \leq z_S \leq 5d_h$$

mit $d_h = 5,3\text{mm}$... Bohrungsdurchmesser

$z_S = 25\text{mm}$... Bohrungsabstand

Mit der Lastannahme beträgt die Schraubenkraft:

$$F_{S,radial,max} = 625\text{N} \text{ und}$$

$$F_{S,axial,max} = 31,25\text{N}$$

Die VDI-Richtlinie gibt 14 Rechenschritte, benannt von R0 bis R13, zur Berechnung vor. Alle in diesem Kapitel noch folgenden Verweise auf Tabellen und Bilder beziehen sich auf die VDI2230. Unabhängig von den bisherigen Betrachtungen werden auch alle Kurzbezeichnungen der Schraubenverbindung direkt von der VDI-Richtlinie übernommen.

R0: Ermittlung des Nenndurchmessers d

Als Schraube wird nach Tabelle A7 die Größe M5, Festigkeitsklasse 10.9 ausgewählt.

R1: Ermittlung des Anziehungsfaktors

Der Anziehungsfaktor wird nach Tabelle A8 zu

$$\alpha_A = 1,6$$

bestimmt. Dazu ist beispielsweise ein drehmomentgesteuertes Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel erforderlich, wobei die Bestimmung des Sollanziehmoments durch Schätzen der Reibungszahl geschieht.

R2: Ermittlung der erforderlichen Mindestklemmkraft

Die vorhandene Querkraft muss durch Reibschluss übertragen werden. Die erforderliche Klemmkraft beträgt:

$$F_{Kerf} \geq F_{KQ} = \frac{F_{S,radial,max}}{q_F \cdot \mu_{Tmin}} = 1488,1N$$

mit $q_F = 2$... Anzahl der inneren kraftübertragenden Trennfugen

$\mu_{Tmin} = 0,21$... Reibungszahl in den Trennfugen; gewählt für die Stoffpaarung Aluminium – Aluminium (Tabelle A6)

Rechenschritt R12 empfiehlt bei statischer Belastung eine Sicherheit gegen Gleiten von mindestens $S_G=1,2$. Um diese zu erhalten, wird die erforderliche Klemmkraft auf

$$F_{Kerf} = 1800N$$

festgelegt.

R3: Aufteilung der Betriebskraft

Die axiale Nachgiebigkeit δ_S der hier verwendeten Sechskantschraube ISO 4017 M5 beträgt:

$$\delta_S = \delta_{SK} + \delta_{Gew} + \delta_G + \delta_M = \frac{0,5d}{E_S A_N} + \frac{l_{Gew}}{E_S A_{d3}} + \frac{0,5d}{E_S A_{d3}} + \frac{0,33d}{E_{Alu} A_N}$$

$$= 4,63 \cdot 10^{-6} \frac{mm}{N}$$

mit $d = 5mm$... Nenndurchmesser der Schraube

$l_{Gew} = 4,8mm$... freie Gewindelänge

$E_S = 2,05 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$... Elastizitätsmodul von Stahl

$$E_{Alu} = 7 \cdot 10^4 \frac{N}{mm^2} \quad \dots \quad \text{Elastizitätsmodul von Aluminium}$$

$$A_N = 19,6 mm^2 \quad \dots \quad \text{Nennquerschnitt der Schraube}$$

$$A_{d_3} = 12,7 mm^2 \quad \dots \quad \text{Kernquerschnitt des Schraubengewindes}$$

Die axiale Nachgiebigkeit δ_P der Zwischenlage wird nach [32] näherungsweise berechnet zu:

$$\delta_P = \frac{l}{E_P \cdot A_{Ers}} = \frac{l_S}{E_S \cdot \frac{\pi}{4} \left(\left(d_k + \frac{l}{6} \right)^2 - D_B^2 \right)} + \frac{l_{Alu}}{E_{Alu} \cdot \frac{\pi}{4} \left(\left(d_k + \frac{l}{6} \right)^2 - D_B^2 \right)} = 1,53 \cdot 10^{-6} \frac{mm}{N}$$

mit A_{Ers} \dots Ersatzquerschnitt der Platten

E_P \dots Elastizitätsmodul der Platten

$l = 4,8 mm$ \dots Dicke der Zwischenlage

$l_S = 1 mm$ \dots Dicke der Stahlzwischenlage

$l_{Alu} = 3,8 mm$ \dots Dicke der Aluminiumzwischenlage

$d_K = 8 mm$ \dots Kopfdurchmesser der Schraube

$D_B = 5,3 mm$ \dots Bohrungsdurchmesser

Damit beträgt das Kraftverhältnis Φ_n mit dem Kraffteinleitungsfaktor $n=1$ als Abschätzung zur sicheren Seite

$$\Phi_n = n \cdot \frac{\delta_P}{\delta_S + \delta_P} = 0,25$$

und die Schraubenzusatzkraft

$$F_{SA} = \Phi_n \cdot F_{S,axial,max} = 7,8 N.$$

R4: Vorspannkraftänderungen

Die VDI2230 gibt lediglich Anhaltswerte für Setzbeträge bei Stahl an. Der Vorspannkraftverlust durch Setzen bei Aluminium kann ohne Versuche also nur grob ermittelt werden, indem die Werte für Stahl verwendet werden. Die zu erwartenden Setzbeträge bei Aluminium sind größer als bei Stahl, so dass für die Fugen, an denen Aluminium beteiligt ist, die Werte aus Tabelle 5.4/1 für die größte angegebene Rautiefe unter Schubbelastung eingesetzt werden:

$$f_z = f_{Gew} + f_{Kopf / Scheibe} + f_{Scheibe / Alu} + 2f_{Alu / Alu} = 16,5 \mu m$$

Daraus resultiert der Vorspannkraftverlust durch Setzen:

$$F_Z = \frac{f_z}{\delta_S + \delta_P} = 2679 N$$

[33] gibt an, dass der Verlust an Vorspannung durch Setzen nach 5 Tagen abgeschlossen ist. Zu diesem Zeitpunkt sollte er wegen der beschriebenen Unsicherheit durch Nachziehen der Verbindungen ausgeglichen werden.

R5: Mindestmontagevorspannkraft

Die Mindestmontagevorspannkraft beträgt:

$$F_{Mmin} = F_{Kerf} + (1 - \Phi_n) F_{S,axial,max} + F_Z = 4502,4 N$$

R6: Maximalmontagevorspannkraft

Die Maximalmontagevorspannkraft beträgt:

$$F_{Mmax} = \alpha_A \cdot F_{Mmin} = 7203,8 N$$

R7: Montagebeanspruchung

Damit die ausgewählte Schraube verwendet werden kann, muss gelten:

$$F_{MTab} = 10600 N \geq F_{Mmax}$$

mit F_{MTab} ... Montagevorspannkraft aus Tabelle A1 für
M5 10.9 und $\mu_G = 0,12$

Die Bedingung ist erfüllt.

R8: Betriebsbeanspruchung

Die Gesamtschraubenkraft beträgt:

$$F_{Smax} = F_{Mzul} + \Phi_n \cdot F_{S,axial,max} = 7211,7N$$

mit $F_{Mzul} = F_{Mmax}$... zulässige Montagevorspannkraft

Die maximale Zugspannung in der Schraube wird damit zu:

$$\sigma_{Zmax} = \frac{F_{Smax}}{A_S} = 507,9 \frac{N}{mm^2}$$

mit $A_S = 14,2mm^2$... Spannungsquerschnitt des Schraubengewindes

Das Gewindemoment beträgt:

$$M_G = F_{Mzul} \frac{d_2}{2} \left(\frac{P}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \mu_{Gmin} \right) = 2408 Nmm$$

mit $d_2 = 4,48mm$... Flankendurchmesser des Schraubengewindes

$P = 0,8mm$... Gewindesteigung

$\mu_{Gmin} = 0,08$... Reibungszahl im Gewinde

Das polare Widerstandmoment des Schraubenquerschnitts beträgt:

$$W_p = \frac{\pi}{16} d_S^3 = 21,7 mm^3$$

mit $d_S = 4,8mm$... Durchmesser des Spannungsquerschnitts

Daraus resultiert die maximale Schubspannung:

$$\tau_{\max} = \frac{M_G}{W_p} = 111 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Daraus folgt die Vergleichsspannung im Betriebszustand:

$$\sigma_{\text{red},B} = \sqrt{\sigma_{Z\max}^2 + 3 \cdot (k_\tau \cdot \tau_{\max})^2} = 516,9 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

mit $k_\tau = 0,5$... Reduktionskoeffizient für verringerte Torsionsbeanspruchung im Betrieb

Damit ergibt sich die Sicherheit gegen Überschreitung der Streckgrenze:

$$S_F = \frac{R_{p0,2\min}}{\sigma_{\text{red},B}} = 1,82$$

mit $R_{p0,2\min} = 940 \frac{N}{\text{mm}^2}$... 0,2%-Dehngrenze der Schraube nach
DIN EN ISO 898-1

R9: Schwingbeanspruchung

Dieser Schritt entfällt, da ausschließlich eine statische Belastung der Verbindung angenommen wird.

R10: Flächenpressung

Die kritische Flächenpressung entsteht zwischen der Unterlegscheibe und der VE-Zunge aus Aluminium, da die Grenzflächenpressung von Aluminium im Allgemeinen unter der von Stahl liegt. An dieser Stelle beträgt sie:

$$p_{B\max} = \frac{F_{Mzul} + F_{SA}}{A_{p\min}} = 219,2 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

mit $A_{p\min} = 32,9 \text{mm}^2$... minimale Auflagefläche zwischen Scheibe und VE-Zunge

Die Berechnung von A_{pmin} setzt voraus, dass eine Scheibe ISO 7089 – 5 verwendet wird und das Durchgangsloch in der VE-Zunge der DIN EN 20 273 Reihe „fein“ (Durchmesser 5,3mm) entspricht.

Da die 0,2%-Dehngrenze des VE-Zungen-Werkstoffs mit $R_{p0,2}=150\text{N/mm}^2$ sehr vorsichtig angenommen und die Zugfestigkeit mit $R_m=290\text{N/mm}^2$ nicht erreicht wird, ist der Wert für die Flächenpressung zulässig. Geringe plastische Verformungen an den Verschraubungsstellen sind dabei tolerierbar.

R11: Mindesteinschraubtiefe

Die erforderliche bezogene Einschraubtiefe wird Bild 5.5/4 entnommen. Unter der Voraussetzung, dass der Werkstoff eine Scherfestigkeit $\tau \geq 150\text{N/mm}^2$ besitzt, folgt für eine Schraube der Festigkeitsklasse 10.9 ein Verhältnis von:

$$\frac{m_{eff}}{d} = 2,5$$

Daraus ergibt sich eine erforderliche effektive Einschraubtiefe von:

$$m_{eff} = 12,5\text{mm}$$

R12: Sicherheit gegen Gleiten

Die minimale Restklemmkraft in der Trennfuge beträgt:

$$F_{KRmin} = \frac{F_{Mzul}}{\alpha_A} - (1 - \Phi_n) \cdot F_{S,axial,max} - F_Z = 1800\text{N}$$

Damit ergibt sich die bei statischer Belastung ausreichende Sicherheit gegen Gleiten von:

$$S_G = \frac{F_{KRmin}}{F_{KQerf}} = 1,2$$

R13: Anziehdrehmoment

Das erforderliche Anziehdrehmoment beträgt:

$$M_A = F_{Mzul} \cdot \left(0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_{Gmin} + \frac{D_{Km}}{2} \mu_{Kmin} \right) = 4,2Nm$$

mit	$\mu_{Gmin} = 0,08$	...	minimale Reibungszahl im Gewinde, gewählt nach Tabelle A5, Reibungszahlklasse B
	$\mu_{Kmin} = 0,08$	...	Reibungszahl in der Kopfauflagefläche, gewählt nach Tabelle A5, Reibungszahlklasse B
	$D_{Km} = 6,19mm$	...	wirksamer Durchmesser in der Kopfauflagefläche

Die Schraubenverbindung ist also ausreichend dimensioniert, wenn die in den Berechnungen ermittelten geometrischen Kennwerte eingehalten werden.

4.2.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 2

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der äußeren VE-Zungen.

Versagensfall 3

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der inneren VE-Zungen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

Die höchste Beanspruchung tritt am geschwächten Schraubenlochquerschnitt A auf. Dieser Querschnitt wird zur Sicherheit für alle Belastungen verwendet, auch wenn diese zum Teil nicht direkt dort angreifen (wie z.B. F_{Qx}).

Folgende Belastungen wirken an den äußeren VE-Zungen:

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A. Dabei wird eine mögliche Verdrehung des Querschnitts durch unterschiedliche Dicken der inneren und äußeren VE-Zungen vereinfachend nicht berücksichtigt, d.h. alle Zungen erfahren nur eine (identische) Dehnung in y-Richtung.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}}{(b - n \cdot d_{SLI}) \cdot s_{VEI} + (b - n \cdot d_{SLA}) \cdot s_{VEA}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A. Es gelten die gleichen Annahmen wie bei F_{S1} .

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{\frac{M_{Bx}}{d}}{(b - n \cdot d_{SLI}) \cdot s_{VEI} + (b - n \cdot d_{SLA}) \cdot s_{VEA}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in A um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung [30].

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Bz}}{W_{BI} + W_{BA}}$$

mit W_{BI} ... Widerstandsmoment innere VE-Zunge

$$W_{BI} = \frac{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_S^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_S^2 d_{SLI} + (3n-3) z_S d_{SLI}^2 + (-n+1) d_{SLI}^3 + (b^3 - ((n-1)z_S + d_{SLI})^3) \right] s_{VEI}}{\frac{b}{2}}$$

W_{BA} ... Widerstandsmoment äußere VE-Zunge

$$W_{BA} = \frac{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_S^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_S^2 d_{SLA} + (3n-3) z_S d_{SLA}^2 + (-n+1) d_{SLA}^3 + (b^3 - ((n-1)z_S + d_{SLA})^3) \right] s_{VEA}}{\frac{b}{2}}$$

- M_{Ty} führt zu einer Torsion in A.

$$\Rightarrow \tau_4 = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot (s_{VEA}^2 + s_{VEI}^2) \cdot b}$$

mit ζ_2 ... Tabellenwert nach [4]

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{(b - n \cdot d_{SLI}) \cdot s_{VEI} + (b - n \cdot d_{SLA}) \cdot s_{VEA}}$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qx}}{(b - n \cdot d_{SLI}) \cdot s_{VEI} + (b - n \cdot d_{SLA}) \cdot s_{VEA}}$$

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt A ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, ebenso τ_4 und τ_5 (bei τ_4 ist nur der Anteil in z-Richtung relevant, da $b \gg d$). Die beiden so entstandenen Gesamtbeanspruchungen sowie τ_6 werden nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt zusammengefasst:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(|\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot (\tau_6^2 + (|\tau_4| + |\tau_5|)^2)}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die höchste Beanspruchung tritt am geschwächten Schraubenlochquerschnitt B auf. Dieser Querschnitt wird zur Sicherheit für alle Belastungen verwendet, auch wenn diese zum Teil nicht direkt dort angreifen (wie z.B. F_{Qx}).

Durch die Schraubenverbindung sind die jeweiligen Verbindungspartner reibschlüssig gefügt und erfahren somit die gleichen Dehnungen (Abweichungen durch unterschiedliche VE-Zungendicken bzw. durch geringfügig veränderte geometrische Verhältnisse werden vernachlässigt). Die Beanspruchung der inneren VE-Zungen in Querschnitt B entspricht damit der der äußeren VE-Zungen in Querschnitt A, d.h. Einzelspannungen, Vergleichsspannungsbildung sowie Festigkeitsnachweis sind identisch und müssen nicht separat durchgeführt werden.

4.2.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Das Sandwichelement wird durch die Verbindung nur auf Flächenpressung an den Deckschichten belastet. Dieser Festigkeitsnachweis wurde schon in Kapitel 4.2.4 geführt, weitere Betrachtungen sind daher nicht notwendig.

4.3 VE-Block 2: Standardschrauben zentral

Die beiden in diesem Block vertretenen Lösungen 8 und 12 sind bis auf die Art der Schrauben und die damit verbundenen Gestaltungsmerkmale des VEs (Gewinde- oder Durchgangslöcher im Mittelsteg) identisch. Daher muss bis auf die Schraubenberechnung keine Fallunterscheidung vorgenommen werden.

4.3.1 Geometrische Kennwerte

Das Fügen von Sandwich und VE geschieht mittels einer Klemmkraft, die, um eindeutige Verhältnisse zu schaffen, mittels Linienberührung auf das Sandwich übertragen wird. Da der Abstand der Sandwichdeckschichten stets gleich bleiben soll, werden die inneren Zungen sehr steif ausgeführt. Die äußeren Zungen weisen dagegen einen elastischen Bereich konstanter Dicke auf und spannen die Verbindung vor, indem sie gegen den Mittelsteg des VEs verschraubt und dadurch elastisch gebogen werden. Zur Vereinfachung der Auslegung wird nur die Hälfte der symmetrisch aufgebauten Verbindung betrachtet. Die Kraftübertragung sowie die geometrischen Kennwerte der Verbindung werden in Abbildung 29 veranschaulicht.

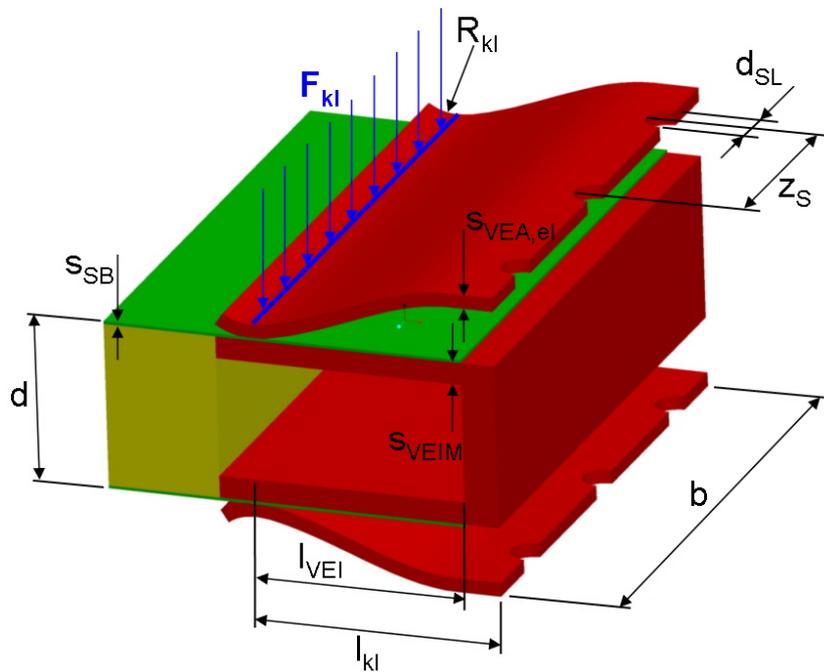


Abbildung 29: Kenngrößen der Zentralschrauben-Verbindung (halbe Darstellung, ohne Schrauben)

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)
- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- $s_{VEA,el}$... Dicke des elast. Bereichs der äußeren VE-Zunge
- s_{VEIM} ... Dicke der inneren VE-Zunge am Mittelsteg des VEs
- F_{kl} ... Klemmkraft
- l_{kl} ... Länge des elast. Klemmbereichs der äußeren VE-Zungen
- l_{VEI} ... Länge der inneren VE-Zungen von Klemmbereich bis Mittelsteg
- R_{kl} ... Radius der äußeren VE-Zungen an der Klemmstelle
- b ... VE-Breite
- z_S ... Schraubenabstand
- d_{SL} ... Schraubenloch-Durchmesser

4.3.2 Belastung der Fügstellen

Im Folgenden werden die Belastungen des allgemeinen Lastfalls auf die diskreten Fügstellen reduziert. Dies sind in diesem Fall die beiden linienförmigen Klemmbereiche. Die Linienkraft, die der Klemmbereich einer äußeren Belastung entgegensetzen kann, kann für jeden Belastungsfall durch eine resultierende Einzelkraft bzw. ein resultierendes Kräftepaar ersetzt werden. Das Ergebnis dieser Umrechnung zeigt Tabelle 15, die Kraftangriffspunkte der Kraftresultierenden werden nochmals in Abbildung 30 verdeutlicht. Zu beachten ist außerdem, dass es sich bei F_{F2} , F_{F3} und F_{F4} jeweils um Kräftepaare und keine Einzelkräfte handelt.

Nr.	Belastung	Belastung Fügstelle F_F	Richtung von F_F	Güte	belastete VE-Zungen
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{F1} = \frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}$	in y-Richtung	exakt	alle VE-Zungen
2	M_{Bx}	$F_{F2} = \frac{M_{Bx}}{d}$	in y-Richtung	sehr gut	alle VE-Zungen
3	M_{Bz}	$F_{F3} = \frac{M_{Bz}}{b}$	in y-Richtung	gut	alle VE-Zungen
4	M_{Ty}	$F_{F4} = \frac{M_{Ty}}{b}$	in z-Richtung	befriedigend	alle VE-Zungen
5	F_{Qz}	$F_{F5} = \frac{1}{2} \cdot F_{Qz}$	in z-Richtung	befriedigend	alle VE-Zungen
6	F_{Qx}	$F_{F6} = \frac{1}{2} F_{Qx}$	in x-Richtung	exakt	alle VE-Zungen

Tabelle 15: Belastungen der Fügstellen des Zentralschrauben-VE

Tabelle 15 liegen folgende Lastannahmen zugrunde:

- F_{F1} : $F_{Z/Dy}$ belastet alle $2n$ Fügstellen gleichmäßig in y-Richtung. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Reibung übertragen.

- F_{F2} : Die Dicke der VE-Zungen ist sehr viel kleiner als Ihre Länge, daher wird die Biegesteifigkeit vernachlässigt. M_{Bx} wird vom VE durch ein Kräftepaar abgestützt.
- F_{F3} : Das Moment teilt sich gleichmäßig auf das obere bzw. untere Sandwich-Deckblech auf und wird dort vom VE jeweils durch ein Kräftepaar abgestützt.
- F_{F4} : In der Regel ist $b \gg d$, daher wird das Moment gleichmäßig auf das obere bzw. untere Sandwich-Deckblech aufgeteilt und dort vom VE jeweils durch ein Kräftepaar abgestützt.
- F_{F5} : F_{Qz} belastet die beiden Fügestellen gleichmäßig in z-Richtung.
- F_{F6} : F_{Qx} belastet die beiden Fügestellen gleichmäßig in x-Richtung.

Abbildung 30 zeigt qualitativ die in Tabelle 15 ermittelten Belastungen der Fügestelle. Aus Gründen der Übersicht sind diese nur an den oberen VE-Zungen angetragen. Alle Kräfte sind so orientiert, dass sich die maximale Verbindungsbelastung ergibt.

Die beiden Linien über die gesamte VE-Zungenbreite stellen die Klemmlinie der oberen bzw. der unteren Zunge dar. Dies sind die Kontaktstellen zwischen dem Sandwich-Deckblech und den VE-Zungen. Natürlich liegt das Sandwich über eine Fläche an der inneren Zunge an, jedoch findet entlang der Linie die Klemmkraft-Übertragung statt. Kräfte, die an der oberen Linie angreifen, wirken nur auf die obere VE-Zunge, Entsprechendes gilt für die untere Linie. Kräfte, die in der Mitte zwischen den beiden Linien angreifen, wirken gleichmäßig auf beide Zungen.

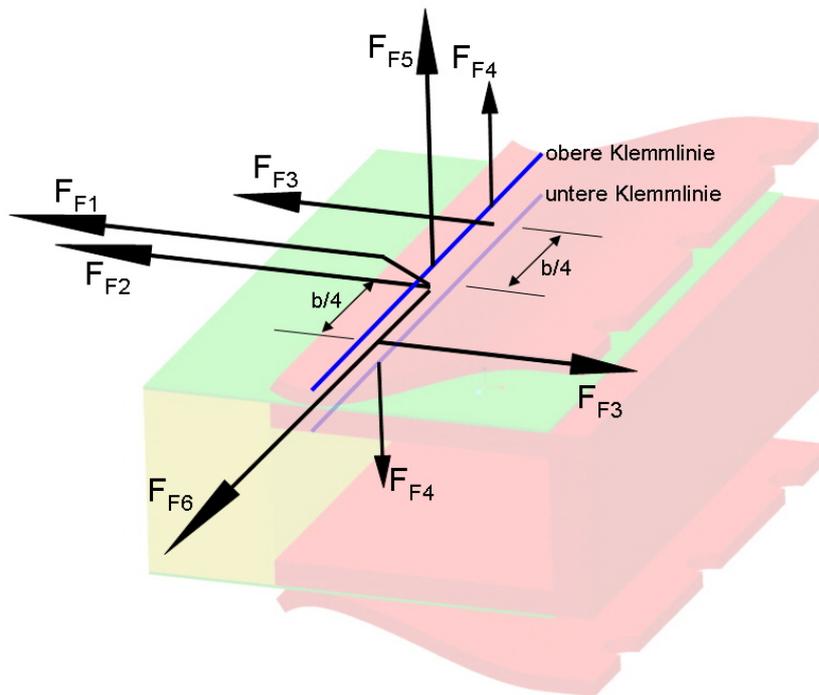


Abbildung 30: Belastungen an der Klemmstelle des Zentralschrauben-VEs

4.3.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die Belastungen 1-6, die auf das VE wirken, können in zwei Gruppen zusammengefasst werden:

Die Belastungen 1,2,3 und 6 werden durch Reibung vom Sandwich-Deckblech auf das VE übertragen, da sie alle in der x-y-Ebene wirken. Die resultierende Gesamtbelastung für den „Worst-Case“-Fall wird wie folgt bestimmt:

- Lineare Addition von F_{F1} und F_{F2} :

$$F_{F12} = F_{F1} + F_{F2} = \frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}$$

- Vektorielle Addition von F_{F12} und F_6 :

$$F_{F126} = F_{F12} + F_{F6} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2}$$

- Addition von F_{F126} und dem Moment M_{Bz} (entspricht dem Kräftepaar F_{F3}) nach VDI2230 [31]:

$$F_{F1236} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + \frac{|M_{Bz}|}{\frac{1}{2} \cdot b}$$

$$F_{F1236} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b}$$

Dies ist die resultierende Kraft in der x-y-Ebene, die mittels Reibung vom Sandwich auf das VE übertragen werden muss.

Die Belastungen 4 und 5 werden durch Formschluss vom Sandwich-Deckblech auf das VE übertragen. Sie wirken in z-Richtung und greifen direkt an den einzelnen VE-Zungen an. Die maximale Belastung kann durch direkte Addition ermittelt werden, da die Einzelkräfte des Kräftepaars F_{F4} nicht an derselben VE-Zunge angreifen.

$$F_{F45} = F_{F4} + F_{F5} = \frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{2} \cdot |F_{Qz}|$$

Dies ist die resultierende Kraft, die vom Sandwich-Deckblech aus lotrecht auf die VE-Zungen wirkt.

4.3.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Für den Fügebereich der Verbindung müssen folgende Versagensfälle ausgeschlossen werden:

Versagensfall 1

Die Belastung F_{F1236} wird so groß, dass die Sandwichdeckschichten aus dem VE herausrutschen (Abbildung 31).

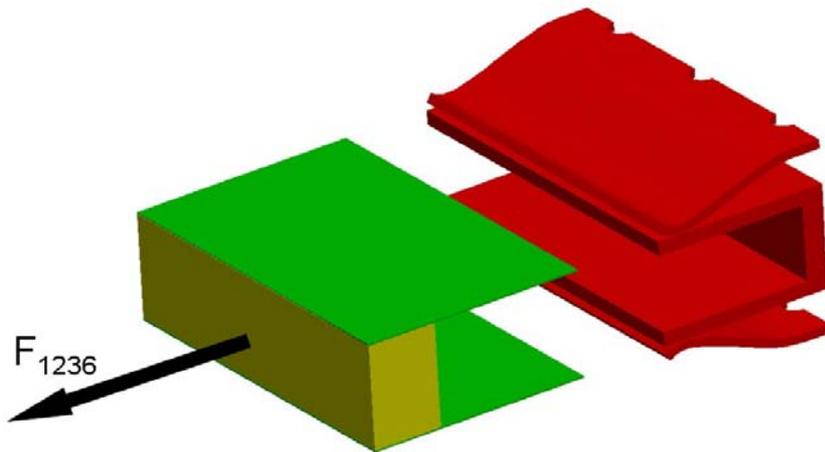


Abbildung 31: Zentralschraubenverbindung, Versagensfall 1

Versagensfall 2

Die Belastung F_{F45} wird so groß, dass an einer oder beiden äußeren Zungen die Klemmkraft F_{kl} überschritten und die Zunge bzw. die Zungen gerade etwas nach außen gebogen wird bzw. werden. Das Sandwich-Deckblech verliert ganz oder teilweise den Kontakt zu den VE-Zungen. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 32 die beiden Belastungen aus Versagensfall 2 getrennt und die Verformungen stark übertrieben. Der Kern wurde für einen besseren Einblick im Bereich des VEs entfernt. Für die Auswirkung von M_{Ty} wird vereinfachend angenommen, dass das Sandwich-Deckblech beim Abheben der Zungen noch auf jeweils halber Breite an diesen anliegt. Das sonstige Festigkeitsverhalten des Sandwichs und damit auch eine

mögliche Biegung der Deckschichten unter Querkraft wird, wie schon erwähnt, nicht berücksichtigt. Im Falle von F_{Qz} wird angenommen, dass sich der Kern unter einer äußeren Belastung minimal dehnen kann.

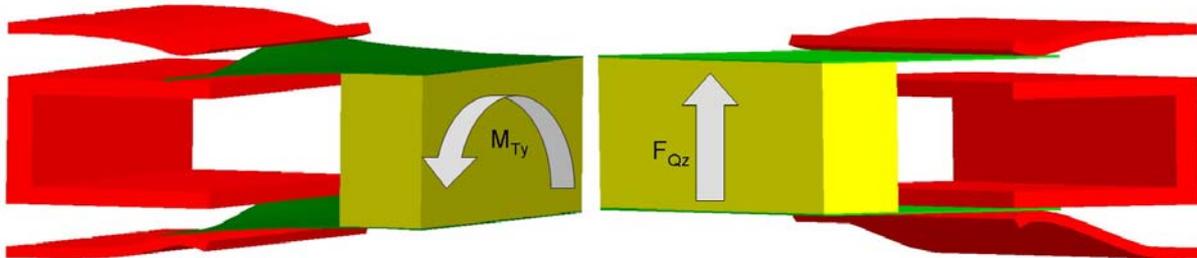


Abbildung 32: Zentralschraubenverbindung, Versagensfall 2, hervorgerufen durch M_{Ty} (links) und/oder F_{Qz} (rechts), zur Veranschaulichung stark übertrieben dargestellt

Versagensfall 3

Die Klemmkraft F_{kl} ist so groß, dass die zulässige Flächenpressung in den Klemmstellen überschritten wird.

Versagensfall 4

Die Klemmkraft F_{kl} ist so groß, dass die Zentralschrauben versagen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Um ein Herausrutschen der Sandwichdeckschichten aus dem VE zu verhindern, muss die Klemmkraft F_{kl} zwischen den beiden VE-Zungen genügend groß sein. Die Bedingung dafür lautet:

$$F_{kl} \geq \frac{F_{1236}}{\mu_0 \cdot q} \quad \text{mit} \quad \mu_0 \dots \text{Haftreibungskoeffizient}$$

$$q \dots \text{Schnittigkeit der Verbindung}$$

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3.3 erhält man also für die erforderliche Klemmkraft:

$$F_{kl,erf} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b}}{\mu_0 \cdot q}$$

Dies ist die Klemmkraft auf einer Seite des VEs (vgl. Abbildung 29). Von Interesse ist jedoch vor allem die zentrale Vorspannkraft F_{Vz} in der Mitte der äußeren Zungen, die von den Schrauben aufgenommen werden muss. Sie beträgt:

$$F_{Vz} = 2 \cdot F_{kl,erf} = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}| \right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b} \right)}{\mu_0 \cdot q}$$

In der Auslegung sind keine Sicherheitsfaktoren enthalten, diese müssen bei Bedarf ergänzt werden.

Die äußeren Zungen weisen zwischen Zungenmitte und Klemmstelle einen Bereich konstanter Dicke der Länge l_{kl} auf, durch dessen elastische Biegung die Klemmkraft aufgebracht wird. Daher kann nach [34] die dazu notwendige Verschiebung f_m folgendermaßen errechnet werden (siehe auch Abbildung 33):

$$f_m = \frac{2 \cdot F_{Vz} \cdot l_{kl}^3}{E \cdot b \cdot s_{VEA,el}^3}$$

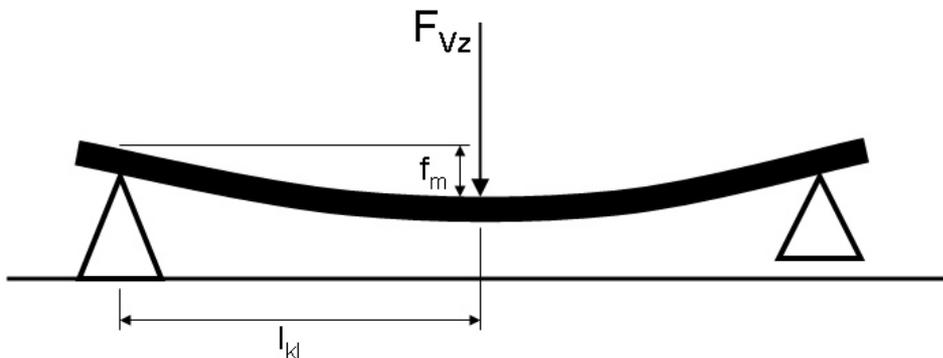


Abbildung 33: Notwendige Verschiebung f_m der äußeren Zungen

Die Klemmkraft F_{kl} bewirkt neben dem gewollten Einklemmen der Sandwich-Deckbleche eine ungewollte Biegung der inneren VE-Zungen. Diese mindert die Vorspannung in den äußeren VE-Zungen und darf daher nicht zu groß werden.

Wird für die inneren VE-Zungen die Geometrie aus Abbildung 34 zugrunde gelegt, so kann zur Berechnung der maximal auftretenden Durchbiegung der Satz von Castigliano angewendet werden.

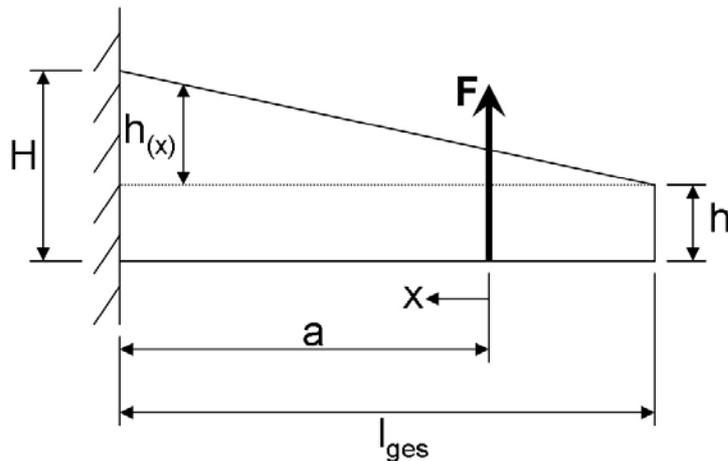


Abbildung 34: Geometrie zur Berechnung der Durchbiegung der inneren VE-Zungen

Beim Satz von Castigliano wird die Formänderungsenergie U bestimmt und nach der Kraft F abgeleitet. Es ergibt sich die Verschiebung bzw. Durchbiegung am Kraftangriffspunkt a .

Bestimmung der Formänderungsenergie U :

$$U = \frac{1}{2} \cdot \int_0^a \frac{M_B^2}{E \cdot I} dx + \frac{1}{2} \cdot \int_0^a \frac{Q^2}{G \cdot A} dx$$

mit $M_B = F \cdot x$ (Biegemoment)

$Q = F$ (Querkraft)

$I = \frac{b \cdot (h(x) + h)^3}{12}$ (Flächenträgheitsmoment)

$h(x) = \frac{H - h}{l_{ges}} \cdot ((l_{ges} - a) + x)$

Daraus folgt für U :

$$U = \frac{6 \cdot F^2 \cdot \lg es^3}{E \cdot b \cdot (H-h)^3} \cdot \left[\left(\ln(H) + \frac{2 \cdot \left(h + \frac{H-h}{\lg es} (\lg es - a) \right)}{H} - \frac{\left(h + \frac{H-h}{\lg es} (\lg es - a) \right)^2}{2 \cdot H^2} \right) - \right. \\ \left. - \ln \left(h + \frac{H-h}{\lg es} (\lg es - a) \right) - 1,5 \right] + \\ + \frac{F^2 \cdot \lg es}{2 \cdot G \cdot b \cdot (H-h)} \cdot \ln \left(1 + \frac{H-h}{\lg es} \cdot \frac{a}{\left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right)} \right)$$

Mit $f = \frac{\partial U}{\partial F}$ folgt für die Verschiebung an der Stelle a:

$$f = \left[\frac{12}{E \cdot b} \cdot \left(\frac{\lg es}{H-h} \right)^3 \left[\ln H + \frac{2}{H} \cdot \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right) - \frac{1}{2 \cdot H^2} \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right)^2 \right] - \right. \\ \left. - \ln \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right) - 1,5 \right] + \\ + \frac{\lg es}{G \cdot b \cdot (H-h)} \cdot \ln \left(1 + \frac{(H-h) \cdot a}{\lg es \cdot \left(h + (H-h) \cdot \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right)} \right) \right] \cdot F$$

Die zum Vorspannen des Zentralschrauben-VEs notwendige Verschiebung f_v wird also wie folgt bestimmt:

$$f_v = f_m + f$$

Der nachfolgend betrachtete Versagensfall 2 hat keine Auswirkungen auf diesen Festigkeitsnachweis, solange das Versagenskriterium, d.h. ein Kontaktverlust zwischen Sandwichdeckschicht und entsprechender VE-Zunge, nicht eintritt. Das Auftreten von Querkräften in z-Richtung erhöht zwar die Anpresskraft an einer von zwei zusammengehörigen VE-Zungen und vermindert sie an der anderen, in Bezug auf die in der x-y-Ebene übertragbare Reibkraft heben sich diese beiden Effekte jedoch gegenseitig auf.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

Um einen Kontaktverlust zwischen dem Sandwich-Deckblech und einer der inneren VE-Zungen zu vermeiden, muss eine genügend große Klemmkraft F_{kl} vorhanden sein, die der äußeren Belastung entgegenwirkt. Die Ermittlung dieser Klemmkraft erfolgt durch

Freischneiden der einzelnen Verbindungsteile. Abbildung 35 verdeutlicht vorab die Verbindungsansicht, mit deren Hilfe das Freischneiden erfolgt.

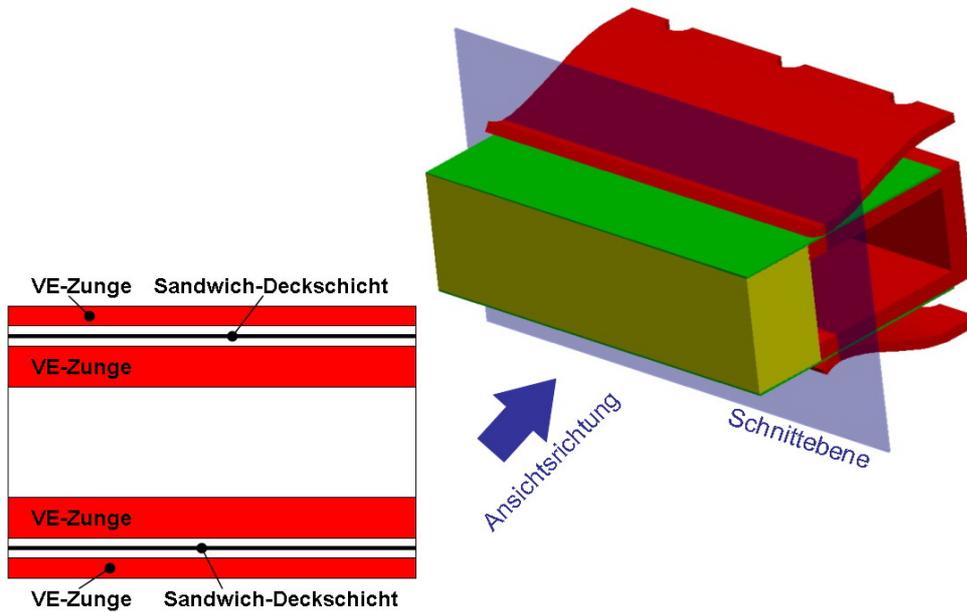


Abbildung 35: VE-Ansicht für das Freischneiden der Verbindungsteile

Wird die Verbindung entlang der Schnittebene geschnitten und der Betrachter blickt in der bezeichneten Ansichtsrichtung, so sieht er die zweidimensionale Darstellung links unten in Abbildung 35. In dieser Darstellung werden nun alle Einzelemente gedanklich freigeschnitten und die sich dabei ergebenden Schnittgrößen angetragen. Das Ergebnis dieser Überlegung zeigt Abbildung 36.

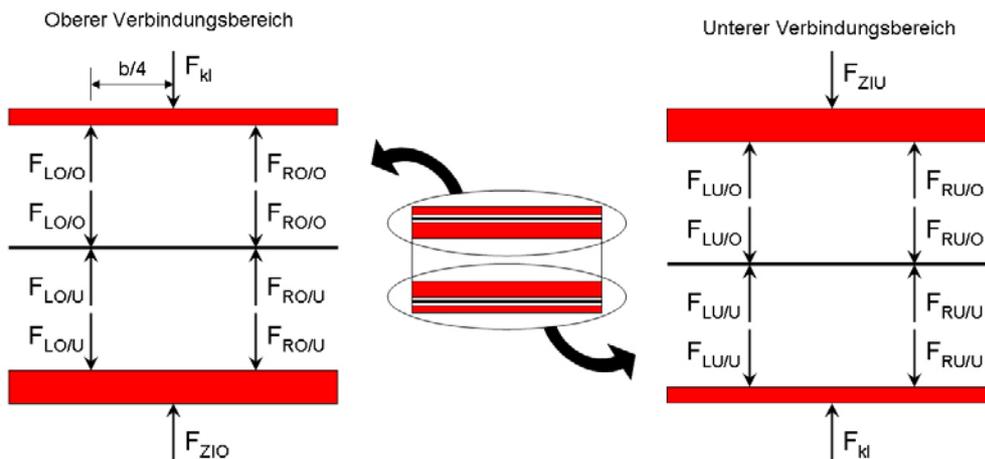


Abbildung 36: Freischneiden der Verbindungsteile ohne äußere Belastungen

Es wird vereinfachend angenommen, dass die VE-Zungen nur an jeweils zwei Punkten am Sandwich-Deckblech anliegen. Diese Punkte sind jeweils um $b/4$ von der Sandwich-Mittelebene entfernt und fallen somit mit den Kraftangriffspunkten der Kräftepaare aus Abbildung 30 zusammen.

Die Kurzbezeichnungen in Abbildung 36 bedeuten:

- F_{kl} ... Klemmkraft, die über die äußeren VE-Zungen eingeleitet wird
- $F_{LO/O}$... Schnittkraft im **L**inken Teil des VEs, im **O**beren Verbindungsbe-
reich und dort an der **O**beren VE-Zunge (entsprechend alle ande-
ren Schnittkräfte)
- F_{ZIO} ... Reaktionskraft der Inneren **O**beren VE-Zunge
- F_{ZIU} ... Reaktionskraft der Inneren **U**nteren VE-Zunge

Abbildung 36 zeigt die Verbindung im unbelasteten Zustand, als eingeprägte Kräfte wirken nur die Klemmkräfte F_{kl} . Alle anderen Kräfte sind Reaktionskräfte.

Wenn nun die beiden äußeren Belastungen F_{F4} und F_{F5} im Sinne des allgemeinen Lastfalls auf das Sandwich wirken, so treten sie ebenfalls als eingeprägte Kräfte auf. Diesen Zustand zeigt Abbildung 37.

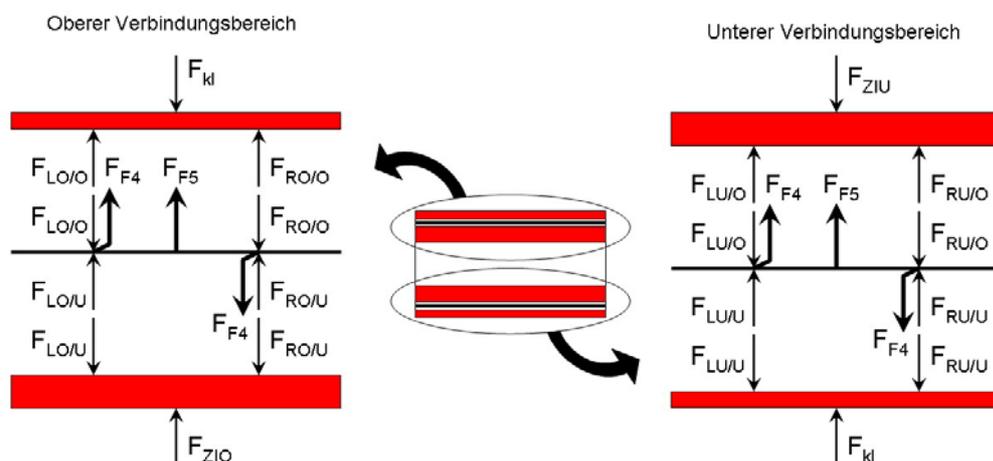


Abbildung 37: Freischneiden der Verbindungsteile mit äußeren Belastungen

An jedem Teilkörper kann nun ein Kräftegleichgewicht aufgestellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass nur an den Sandwich-Deckblechen alle für die Aufstellung eines Momentengleichgewichts notwendigen Kräfte angetragen sind. An den Sandwichzungen fehlen dafür die Stützmomente, die der Mittelsteg dem Verdrehen der Zungen entgegensetzt.

Da diese jedoch nicht von Interesse sind, da vereinfachend von einem gleichmäßigen Anheben der Zungen über die gesamte Sandwichbreite ausgegangen wird (vgl. Annahmen aus Kapitel 4.1), wird das Momentengleichgewicht nur für die Sandwich-Deckbleche aufgestellt. Es werden dabei zwei Fälle betrachtet, einmal nur mit F_{F4} und einmal nur mit F_{F5} als äußere Belastungen. Aus diesen Lastfällen und mit Hilfe von Symmetriebetrachtungen können die fehlenden Reaktionskräfte ermittelt werden. Sind die äußeren Belastungen anders orientiert, ergibt sich für die Verbindung die gleiche Belastung, nur an einer anderen Stelle.

Aus den resultierenden Gleichungen lassen sich die unbekanntenen Reaktionskräfte bestimmen. Diese sind:

$$\begin{aligned}
 F_{LO/O} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| + \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} & F_{RO/O} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| - \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} \\
 F_{LO/U} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| - \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} - \frac{1}{4}|F_{Qz}| & F_{RO/U} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| + \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} - \frac{1}{4}|F_{Qz}| \\
 F_{LU/O} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| + \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{4}|F_{Qz}| & F_{RU/O} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| - \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{4}|F_{Qz}| \\
 F_{LU/U} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| - \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b} & F_{RU/U} &= \frac{1}{2}|F_{kl}| + \frac{1}{2}\frac{|M_{Ty}|}{b}
 \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser Kräfte kann nun eine Bedingung gegen den Versagensfall 2 aufgestellt werden. Mathematisch drückt sich das Versagen, d.h. der Kontaktverlust zwischen einer Sandwichdeckschicht und einer VE-Zunge, dadurch aus, dass eine Reaktionskraft, die bisher stillschweigend als Druckkraft angenommen wurde, einen negativen Wert erhält. Das bedeutet, dass die Kontaktstelle, an der die Kraft wirkt, Zugkräfte übertragen müsste, was physikalisch nicht möglich ist.

Einen negativen Wert können nur die Kräfte $F_{LO/U}$, $F_{LU/U}$, $F_{RO/O}$, $F_{RO/U}$ und $F_{RU/O}$ annehmen. Formuliert man für jede dieser Kräfte die Gleichung $F > 0$, so ergeben sich fünf Bedingungen für die Klemmkraft F_{kl} gegen ein Versagen an der jeweiligen Stelle. Diejenige Bedingung, aus der die größte Klemmkraft hervorgeht, sichert die gesamte Sandwichverbindung gegen den Versagensfall 2 ab. Dies ist:

$$F_{kl} = \frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{2}|F_{Qz}| \quad \text{bzw.} \quad F_{Vz} = 2 \cdot \left(\frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{2}|F_{Qz}| \right)$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die auftretende Flächenpressung kann nach Hertz [34] berechnet werden. Als „Worst Case“ wird hierbei angenommen, dass das Sandwich-Deckblech an den Klemmbereichen aufgrund eines großen M_{Ty} gerade den Kontakt zu jeweils einer Zungenhälfte verliert (vgl. Abbildung 32). Die Berührlinie wird dadurch halbiert, die Flächenpressung berechnet sich zu:

$$\sigma_{\max} = - \sqrt{\frac{F_{kl} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot \frac{b}{2} \cdot (1 - \nu^2)}}$$

mit E ... Elastizitätsmodul (bei 2 Werkstoffen: $E = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{(E_1 + E_2)}$)

ν ... Querdehnungszahl (wird einheitlich zu 0,3 gesetzt)

Damit lautet der Festigkeitsnachweis:

$$|\sigma_{\max}| \leq |\sigma_{zul}|$$

$$\sqrt{\frac{F_{kl} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot \frac{b}{2} \cdot (1 - \nu^2)}} \leq \frac{R_{p0,2}}{s_F} \quad \text{mit} \quad s_F \quad \dots \quad \text{Sicherheit gegen Fließen}$$

Als $R_{p0,2}$ ist der kleinere Wert aus VE- und Sandwichdeckschicht-Material einzusetzen.

Die Querkraft F_{Qz} hat keinen Einfluss auf die maximale Flächenpressung. Die äußeren Zungen sind mit F_{Vz} vorgespannt, die Flächenpressung dort bleibt daher konstant, solange die Zungen nicht versagen und aufgebogen werden. An den inneren Zungen liegt das Sandwich großflächig an, ein Überschreiten der zulässigen Flächenpressung kann daher sicher ausgeschlossen werden.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 4

Die Auslegung der Schrauben in Anlehnung an VDI2230 [31] geschieht unter der Annahme, dass die Schrauben hier ausschließlich axial belastet sind. An dieser Stelle muss ein Vorgriff auf die Berechnung in Kapitel 5.3 erfolgen, da eine konkrete Lastannahme erforderlich ist. Das Ergebnis ist, dass eine Gesamtklemmkraft in Höhe von

$$F_{kl,erf,ges} = 2500N$$

auf jeder Seite des Verbinders aufgebracht werden muss. Bei einer Anzahl von vier Schrauben pro Seite beträgt die erforderliche Klemmkraft einer einzelnen Schraube:

$$F_{Kerf,min} = 625N$$

Wie bereits in Kapitel 4.2.4 erfolgt nun der Festigkeitsnachweis an Hand der Rechenschritte in VDI2230. Alle in diesem Kapitel noch folgenden Verweise auf Tabellen und Bilder beziehen sich auf diese Richtlinie. Unabhängig von den bisherigen Betrachtungen werden auch alle Kurzbezeichnungen der Schraubenverbindung direkt von dort übernommen.

R0: Ermittlung des Nenndurchmessers d

Als Schraube wird die Größe M5, Festigkeitsklasse 8.8, ausgewählt.

R1: Ermittlung des Anziehungsfaktors

Der Anziehungsfaktor wird nach Tabelle A8 zu

$$\alpha_A = 1,6$$

bestimmt. Dazu ist beispielsweise ein drehmomentgesteuertes Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel erforderlich, wobei die Bestimmung des Sollanziehmoments durch Schätzen der Reibungszahl geschieht.

R2: Ermittlung der erforderlichen Mindestklemmkraft

Die erforderliche Mindestklemmkraft pro Schraube beträgt:

$$F_{Kerf} \geq 625N$$

Bei dieser Berechnung wurde noch kein Sicherheitsbeiwert berücksichtigt. Rechenschritt R12 empfiehlt bei statischer Belastung eine Sicherheit gegen Gleiten von mindestens $S_G=1,2$. Um diese zu erhalten, wird die erforderliche Klemmkraft auf

$$F_{Kerf} = 750 N$$

festgelegt. Dieser Sicherheitsbeiwert bezieht sich hier auf das Versagen durch Gleiten der Sandwich-Deckbleche aus der Verbindung.

R3: Aufteilung der Betriebskraft

Die axiale Nachgiebigkeit δ_S der hier verwendeten Sechskantschraube ISO 4017 M5 beträgt:

$$\begin{aligned} \delta_S &= \delta_{SK} + \delta_{Gew} + \delta_G + \delta_M = \frac{0,5d}{E_S A_N} + \frac{l_{Gew}}{E_S A_{d_3}} + \frac{0,5d}{E_S A_{d_3}} + \frac{0,33d}{E_{Alu} A_N} \\ &= 9,55 \cdot 10^{-6} \frac{mm}{N} \end{aligned}$$

mit	$d = 5mm$	...	Nenn Durchmesser der Schraube
	$l_{Gew} = 17,6mm$	...	freie Gewindelänge
	$E_S = 2,05 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$	...	Elastizitätsmodul von Stahl
	$E_{Alu} = 7 \cdot 10^4 \frac{N}{mm^2}$	...	Elastizitätsmodul von Aluminium
	$A_N = 19,6mm^2$	...	Nennquerschnitt der Schraube
	$A_{d_3} = 12,7mm^2$	...	Kernquerschnitt des Schraubengewindes

Die axiale Nachgiebigkeit δ_P der Zwischenlage wird nach [32] mit Hilfe eines Ersatzquerschnitts bestimmt, der durch die Schraube verformt wird. Die Bestimmung des Ersatzquerschnitts für die Zwischenlage ist nur durch eine grobe Näherung möglich. Im Längsschnitt hat die Zwischenlage eine deutlich größere Ausdehnung als im Querschnitt, wo sie stellenweise nur 8 mm breit ist. Für die Berechnung wird ein Ersatzquerschnitt verwendet, der durch Mittelung des Ersatzquerschnitts für eine Zwischenlage von 8 mm Durchmesser und des Ersatzquerschnitts für eine beliebig große Zwischenlage entsteht.

$$A_{Ers,1} = \frac{\pi}{4} (D_A^2 - D_B^2) = 26,51 \text{ mm}^2$$

$$A_{Ers,2} = \frac{\pi}{4} \left(\left(d_k + \frac{l}{6} \right)^2 - D_B^2 \right) = 70,13 \text{ mm}^2$$

$$A_{Ers} = \frac{A_{Ers,1} + A_{Ers,2}}{2} = 48,32 \text{ mm}^2$$

$$\delta_P = \frac{l}{E_P \cdot A_{Ers}} = \frac{l_S}{E_S \cdot A_{Ers}} + \frac{l_{Alu}}{E_{Alu} \cdot A_{Ers}} = 5,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{N}}$$

mit	A_{Ers}	...	Ersatzquerschnitt der Platten
	E_P	...	Elastizitätsmodul der Platten
	$l = 17,6 \text{ mm}$	...	Dicke der Zwischenlage
	$l_S = 1 \text{ mm}$	...	Dicke der Stahlzwischenlage
	$l_{Alu} = 16,6 \text{ mm}$	...	Dicke der Aluminiumzwischenlage
	$d_K = 8 \text{ mm}$	...	Kopfdurchmesser der Schraube
	$D_A = 8 \text{ mm}$	...	Außendurchmesser der Zwischenlage
	$D_B = 5,5 \text{ mm}$	...	Bohrungsdurchmesser

R4: Vorspannkraftänderungen

VDI2230 gibt lediglich Anhaltswerte für Setzbeträge bei Stahl, nicht aber für das hier eingesetzte Aluminium an. Der Vorspannkraftverlust durch Setzen bei Aluminium kann ohne Versuche also nur grob ermittelt werden, indem die Werte für Stahl verwendet werden. Die zu erwartenden Setzbeträge bei Aluminium sind größer als bei Stahl, so dass für die Fugen, an denen Aluminium beteiligt ist, die Werte aus Tabelle 5.4/1 für die größte angegebene Rautiefe unter Zug/Druck-Belastung eingesetzt werden:

$$f_z = f_{Gew} + f_{Kopf / Scheibe} + f_{Scheibe / Alu} + 2f_{Alu / Alu} = 14,5 \mu m$$

Daraus resultiert der Vorspannkraftverlust durch Setzen:

$$F_Z = \frac{f_z}{\delta_S + \delta_P} = 996 N$$

[33] gibt an, dass der Verlust an Vorspannung durch Setzen nach 5 Tagen abgeschlossen ist. Zu diesem Zeitpunkt sollte er wegen der beschriebenen Unsicherheit durch Nachziehen der Verbindungen ausgeglichen werden.

R5: Mindestmontagevorspannkraft

Die Mindestmontagevorspannkraft beträgt:

$$F_{Mmin} = F_{Kerf} + F_Z = 1746 N$$

R6: Maximalmontagevorspannkraft

Die Maximalmontagevorspannkraft beträgt:

$$F_{Mmax} = \alpha_A \cdot F_{Mmin} = 2794 N$$

R7: Montagebeanspruchung

Damit die ausgewählte Schraube verwendet werden kann, muss gelten:

$$F_{MTab} = 7200 N \geq F_{Mmax}$$

mit F_{MTab} ... Montagevorspannkraft aus Tabelle A1 für
M5 8.8 und $\mu_G = 0,12$

Die Bedingung ist erfüllt.

R8: Betriebsbeanspruchung

Die Gesamtschraubkraft beträgt:

$$F_{Smax} = F_{Mzul} = 2794 N$$

mit $F_{Mzul} = F_{Mmax}$... zulässige Montagevorspannkraft

Die maximale Zugspannung in der Schraube wird damit zu:

$$\sigma_{Zmax} = \frac{F_{Smax}}{A_S} = 196,8 \frac{N}{mm^2}$$

mit $A_S = 14,2mm^2$... Spannungsquerschnitt des Schraubengewindes

Das Gewindemoment beträgt:

$$M_G = F_{Mzul} \frac{d_2}{2} \left(\frac{P}{\pi \cdot d_2} + 1,155 \mu_{Gmin} \right) = 934 Nmm$$

mit $d_2 = 4,48mm$... Flankendurchmesser des Schraubengewindes

$P = 0,8mm$... Gewindesteigung

$\mu_{Gmin} = 0,08$... Reibungszahl im Gewinde

Das polare Widerstandmoment des Schraubenquerschnitts beträgt:

$$W_p = \frac{\pi}{16} d_S^3 = 21,7 mm^3$$

mit $d_S = 4,8mm$... Durchmesser des Spannungsquerschnitts

Daraus resultiert die maximale Schubspannung:

$$\tau_{max} = \frac{M_G}{W_p} = 43 \frac{N}{mm^2}$$

Daraus folgt die Vergleichsspannung im Betriebszustand:

$$\sigma_{red,B} = \sqrt{\sigma_{Zmax}^2 + 3 \cdot (k_\tau \cdot \tau_{max})^2} = 200,3 \frac{N}{mm^2}$$

mit $k_\tau = 0,5$... Reduktionskoeffizient für verringerte Torsionsbeanspruchung im Betrieb

Damit ergibt sich die Sicherheit gegen Überschreitung der Streckgrenze:

$$S_F = \frac{R_{p0,2\min}}{\sigma_{red,B}} = 3,2$$

mit $R_{p0,2\min} = 640 \frac{N}{mm^2}$... 0,2%-Dehngrenze der Schraube nach
DIN EN ISO 898-1

R9: Schwingbeanspruchung

Dieser Schritt entfällt, da ausschließlich eine statische Belastung der Verbindung angenommen wird.

R10: Flächenpressung

Die kritische Flächenpressung entsteht zwischen der Unterlegscheibe und dem Außenteil des VEs aus Aluminium, da die Grenzflächenpressung von Aluminium im Allgemeinen unter der von Stahl liegt. An dieser Stelle beträgt sie:

$$p_{B\max} = \frac{F_{Mzul}}{A_{p\min}} = 85,4 \frac{N}{mm^2}$$

mit $A_{p\min} = 32,7 mm^2$... minimale Auflagefläche zwischen Scheibe und
Außenteil VE

Die Berechnung von $A_{p\min}$ setzt voraus, dass eine Scheibe ISO 7089 – 5 verwendet wird und das Durchgangsloch in der VE-Zunge der DIN EN 20273 Reihe „mittel“ (Durchmesser 5,5mm) entspricht.

Die zulässige Flächenpressung wird nicht überschritten.

R11: Mindesteinschraubtiefe

Die erforderliche bezogene Einschraubtiefe wird Bild 5.5/4 entnommen. Unter der Voraussetzung, dass der Werkstoff eine Scherfestigkeit $\tau \geq 150 \text{ N/mm}^2$ besitzt, folgt für eine Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 ein Verhältnis von:

$$\frac{m_{eff}}{d} = 2,1$$

Dieser Wert bezieht sich auf eine Schraube, die bis zu ihrer maximalen Zugfestigkeit belastet wird. Hier erfolgt nur ein Anziehen in den elastischen Bereich, der Ausnutzungsgrad der Schraube beträgt $\nu = 0,313$.

Berücksichtigt man weiterhin, dass nach [33] durch den niedrigen Elastizitätsmodul von Aluminium alle Gewindegänge gleichmäßig tragen, ergibt sich näherungsweise eine erforderliche effektive Einschraubtiefe von:

$$m_{eff} = 2,1 \cdot d \cdot \nu = 3,3 \text{ mm}$$

R12: Sicherheit gegen Gleiten

Die Zwischenlagen sind wegen des Formschlusses gegeneinander nicht zu verschieben.

R13: Anziehdrehmoment

Das erforderliche Anziehdrehmoment beträgt:

$$M_A = F_{Mzul} \cdot \left(0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_{Gmin} + \frac{D_{Km}}{2} \mu_{Kmin} \right) = 1,63 \text{ Nm}$$

mit	$\mu_{Gmin} = 0,08$	...	minimale Reibungszahl im Gewinde, gewählt nach Tabelle A5, Reibungszahlklasse B
	$\mu_{Kmin} = 0,08$	...	Reibungszahl in der Kopfauflagefläche, gewählt nach Tabelle A5, Reibungszahlklasse B
	$D_{Km} = 6,19 \text{ mm}$	...	wirksamer Durchmesser in der Kopfauflagefläche

Die Schraubenverbindung ist also ausreichend dimensioniert, wenn die in den Berechnungen ermittelten geometrischen Kennwerte (z.B. Einschraubtiefe) eingehalten werden.

4.3.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 5

Die äußeren Belastungen und die Vorspannkraft F_{Vz} führen zu einem Versagen der äußeren VE-Zungen.

Versagensfall 6

Die äußeren Belastungen und die Vorspannkraft F_{Vz} führen zu einem Versagen der inneren VE-Zungen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 5

Die höchste Beanspruchung tritt am innen gelegenen Ende des elastischen Biegebereichs auf (kritischer Querschnitt A).

Folgende Belastungen wirken an den äußeren VE-Zungen:

- F_{Vz} führt zu einer Biegung in A um die x-Achse, d.h. innen herrscht Zug-, außen Druckbeanspruchung. Die Schubbeanspruchung kann dabei vernachlässigt werden, da $I_{kl} \gg s_{VEA,el}$.

$$\Rightarrow \sigma_{Vz} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{3 \cdot F_{Vz} \cdot I_{kl}}{b \cdot s_{VEA,el}^2}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot b \cdot s_{VEA,el}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot b \cdot s_{VEA,el}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in A um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung.

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{3 \cdot M_{Bz}}{2 \cdot s_{VEA,el} \cdot b^2}$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{Qx}}{4 \cdot s_{VEA,el} \cdot b}$$

M_{Ty} und F_{Qz} sind hier uninteressant, da das Abheben der VE-Zungen vom Sandwich-Deckblech durch die vorangegangenen Festigkeitsnachweise ausgeschlossen wurde. Die Bewegung der inneren VE-Zungen, die wesentlich steifer als die äußeren sind, wird dabei vernachlässigt, d.h. es ergibt sich für die äußeren VE-Zungen in z-Richtung keine Belastungsänderung.

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt A ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_{Vz} , σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, τ_6 wird nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt berücksichtigt:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(|\sigma_{Vz}| + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot \tau_6^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 6

Die höchste Beanspruchung tritt an dem dem Mittelsteg nächstgelegenen Querschnitt B auf.

Folgende Belastungen wirken an den inneren VE-Zungen:

- F_{Vz} führt zu einer Biegung in B um die x-Achse, d.h. außen herrscht Zug-, innen Druckbeanspruchung. Die Schubbeanspruchung kann dabei vernachlässigt werden,

da $l_{VEI} \gg s_{VEIM}$.

$$\Rightarrow \sigma_{Vz} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{3 \cdot F_{Vz} \cdot l_{VEI}}{b \cdot s_{VEIM}^2}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in B um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung.

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{3 \cdot M_{Bz}}{2 \cdot s_{VEIM} \cdot b^2}$$

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot b \cdot s_{VEIM}}$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{Qx}}{4 \cdot s_{VEIM} \cdot b}$$

M_{Ty} ist hier uninteressant, da durch das Verdrehen der Deckbleche in der Klemmstelle keine zusätzliche Belastung auf die Zungen wirkt, sondern lediglich die kraftübertragenden Flächen an den Sandwich-Deckblechen bzw. VE-Zungen reduziert werden (siehe Versagensfall 3).

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt B ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_{Vz} , σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, τ_5 und τ_6 werden nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt berücksichtigt:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{\left(|\sigma_{Vz}| + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_6^2 + \tau_5^2\right)}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{s_F}$$

4.3.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Das Sandwichelement wird durch die Verbindung nur auf Flächenpressung in der Klemmstelle beansprucht. Dieser Festigkeitsnachweis wurde schon in Kapitel 4.3.4 geführt, weitere Betrachtungen sind daher nicht notwendig.

4.4 VE-Block 3: Blindniete

Die Lösungen 3, 6 und 11, die in diesem Block aufgeführt sind, unterscheiden sich in der Art des VEs. Es werden also im Folgenden, wenn erforderlich, unterschiedliche Fälle betrachtet.

4.4.1 Geometrische Kennwerte

Das Fügen von Sandwich und VE geschieht über die Blindniete mittels Formschluss, es existiert also eine bestimmte Anzahl diskreter Fügstellen. Die geometrischen Kennwerte der Verbindung werden in Abbildung 38 am Beispiel von Lösung 3 veranschaulicht, für eine bessere Übersicht wurden die Niete nicht dargestellt.

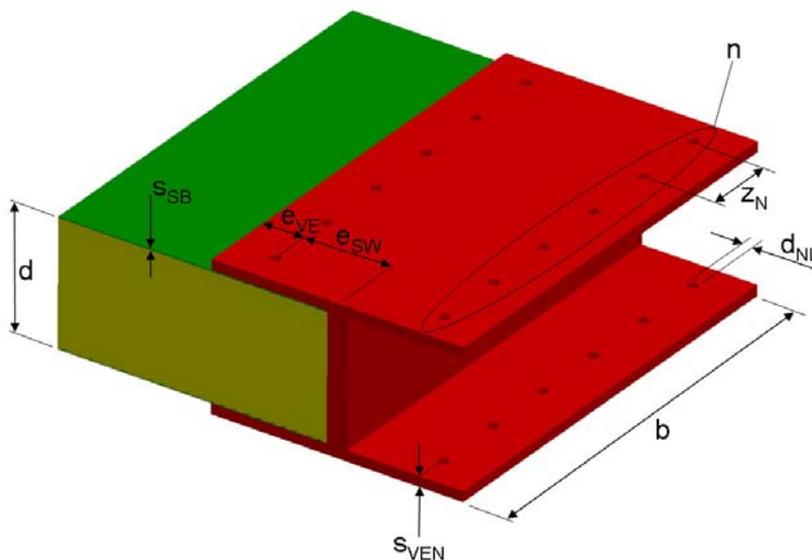


Abbildung 38: Kenngrößen der Blindnietverbindung

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)

- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- s_{VEN} ... Dicke der VE-Zunge im Nietbereich
- b ... VE-Breite
- z_N ... Nietlochabstand
- d_{NL} ... Nietlochdurchmesser
- e_{VE} ... Randabstand der Nietlöcher im VE
- e_{SW} ... Randabstand der Nietlöcher im Sandwich
- n ... Anzahl der Niete pro Sandwich-Deckblech

4.4.2 Belastung der Fügstellen

Im Folgenden werden die Belastungen des allgemeinen Lastfalls auf die diskreten Fügstellen reduziert. Dies sind in diesem Fall die $2n$ Nietstellen pro Sandwichelement. Dabei sind nur die maximal belasteten Niete von Interesse, die im Falle einer Überlastung der Verbindung zuerst versagen. Tabelle 16 zeigt die Nietbelastungen, die sich aus dem allgemeinen Lastfall ergeben. Aufgrund der unterschiedlichen VEs sind diese Belastungen bei Lösung 6 teilweise anders. Die abweichenden Nietbelastungen sind in Tabelle 17 dargestellt. Lösung 11 hat zwar wie Lösung 6 vier VE-Zungen, jedoch sind die äußeren Zungen nur durch die Niete angebunden. Da also keine direkte, steife Verbindung zum Mittelsteg besteht (die Vorspannung einer kaltgefügteten Nietverbindung kann vernachlässigt werden [35]), können die äußeren Zungen in z-Richtung nur sehr geringe Kräfte aufnehmen. Diese Kräfte werden vernachlässigt.

Nr.	Belastung	Belastung der Niete F_N	Richtung von F_F	Güte	belastete VE-Zungen
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{N1} = \frac{F_{Z/Dy}}{2 \cdot n}$	in y-Richtung	exakt	alle VE-Zungen
2	M_{Bx}	$F_{N2} = \frac{M_{Bx}}{d \cdot n}$	in y-Richtung	sehr gut	alle VE-Zungen
3	M_{Bz}	$F_{N3,max} = \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{z_N \cdot (n^3 - n)}$	in y-Richtung	gut	alle VE-Zungen
4	M_{Ty}	$F_{N4/1,max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_N}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} \text{ (Zug)}$ $F_{N4/2,max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{Ty} \cdot d}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} \text{ (Scherung)}$	in z-Richtung (Zug)/ in x-Richtung (Scherung)	ausreichend	alle VE-Zungen bzw. innere VE-Zungen (Lsg.11)
5	F_{Qz}	$F_{N5} = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot n}$	in z-Richtung	ausreichend	alle VE-Zungen bzw. innere VE-Zungen (Lsg.11)
6	F_{Qx}	$F_{N6} = \frac{F_{Qx}}{2 \cdot n}$	in x-Richtung	gut	alle VE-Zungen

Tabelle 16: Belastungen der Niete für Lösung 3 und 11

Nr.	Belastung	Belastung der Niete F_N	Richtung von F_F	Güte	belastete VE-Zungen
4	M_{Ty}	$F_{N4/1,max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_N}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} \text{ (Zug)}$	in z-Richtung	ausreichend	alle VE-Zungen
5	F_{Qz}	$F_{N5} = \frac{F_{Qz}}{4 \cdot n}$	in z-Richtung	ausreichend	alle VE-Zungen

Tabelle 17: Von Tabelle 16 abweichende Belastungen der Niete für Lösung 6

Die einzelnen Belastungen werden wie folgt ermittelt:

- F_{N1} : $F_{Z/Dy}$ belastet alle $2n$ Niete gleichmäßig auf Scherung. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Lochlaibung übertragen.
- F_{N2} : Die Dicke der VE-Zungen ist sehr viel kleiner als ihre Länge, daher wird die Biegesteifigkeit vernachlässigt. M_{Bx} wird vom VE durch n gleiche Kräftepaare abgestützt und belastet alle $2n$ Niete gleichmäßig auf Scherung. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Lochlaibung übertragen.
- F_{N3} : M_{Bz} verteilt sich näherungsweise wie eine Biegespannung auf die einzelnen Niete [29], die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Lochlaibung übertragen. Durch Bildung des Momentengleichgewichts um den Mittelpunkt der Nietreihe und Anwendung der Strahlensätze kann die Kraft am äußersten Niet in Abhängigkeit der Abstände der gleich weit vom Mittelpunkt entfernten Niete und des Moments M_{Bz} dargestellt werden. Die Nietabstände bilden dabei eine endliche Folge, da es ja unendlich viele Möglichkeiten für die Nietanzahl gibt. Der Schritt zum allgemeinen Fall gelingt, indem die Folge durch einen arithmetischen Ausdruck ersetzt wird, der nur noch von n und z_N abhängt [30].
- F_{N4} : Die Verteilung von M_{Ty} auf die einzelnen Niete kann mit vertretbarem Aufwand nicht mehr geschlossen analytisch ermittelt werden, da die Verformung der Deckbleche unter der Momenteneinwirkung nicht bekannt ist. Daher wird stark vereinfachend angenommen, dass nur die äußeren vier Niete tragen ($n > 1$). Bei Lösung 11 wird die Stützwirkung der äußeren VE-Zungen aufgrund der fehlenden momentensteifen Anbindung an den Mittelsteg zur Sicherheit vernachlässigt. Die Belastung am einzelnen Niet kann in eine horizontale ($F_{N4/2}$) und eine vertikale Komponente ($F_{N4/1}$) zerlegt werden, die für den allgemeinen Fall nur noch von n , z_N und d abhängen. Bei Lösung 6 werden die Niete im Vergleich zu den anderen Lösungen nur mit der halben Kraft belastet, die andere Hälfte wird direkt durch Formschluss auf die VE-Zungen übertragen [30].
- F_{N5} : F_{Qz} belastet alle $2n$ Fügstellen gleichmäßig in z -Richtung. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Formschluss übertragen. Bei Lösung 11 wird die Kraftübertragung auf die äußeren Zungen aufgrund der

fehlenden momentensteifen Anbindung an den Mittelsteg zur Sicherheit vernachlässigt. Bei Lösung 6 werden die Niete im Vergleich zu den anderen Lösungen nur mit der halben Kraft belastet, die andere Hälfte wird direkt durch Formschluss auf die VE-Zungen übertragen.

- F_{N6} : F_{Qx} belastet alle $2n$ Niete gleichmäßig auf Scherung. Die Kraft zwischen VE und Sandwich-Deckblech wird durch Lochlaibung übertragen.

Abbildung 39 zeigt qualitativ die in Tabelle 16 und Tabelle 17 ermittelten Nietbelastungen am Beispiel von Lösung 3 mit $n=6$. Zugunsten der Übersichtlichkeit sind die Belastungen nur an der oberen Nietreihe angetragen. Sie sind so orientiert, dass sich die maximale Nietbelastung ergibt (in diesem Fall am vordersten Niet).

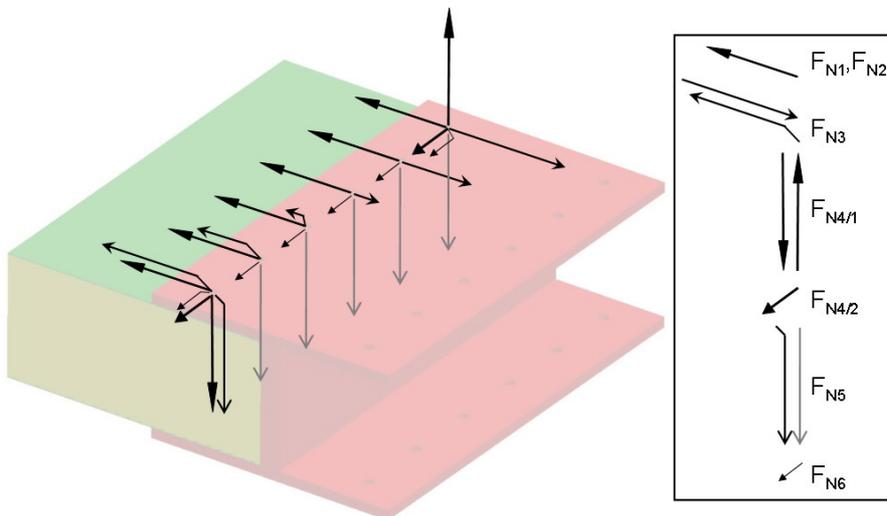


Abbildung 39: Belastungen der Niete am Blindniet-VE am Beispiel von Lösung 3

4.4.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die Belastungen 1-6, die auf das VE wirken, können in zwei Gruppen zusammengefasst werden:

Die Belastungen 1,2,3, 4/2 und 6 belasten die Niete auf Scherung, da sie alle in der x-y-Ebene wirken. Die resultierende Gesamtbelastung $F_{N,Scher,max}$ für den „Worst-Case“-Fall wird wie folgt bestimmt:

$$F_{N,Scher,max} = \sqrt{(|F_{N1}| + |F_{N2}| + |F_{N3}|)^2 + (|F_{N4/2}| + |F_{N6}|)^2}$$

$$F_{N,Scher,max} = \sqrt{\left(\frac{|F_{Z/Dy}|}{2 \cdot n} + \frac{|M_{Bx}|}{d \cdot n} + \frac{3 \cdot |M_{Bz}| \cdot (n-1)}{z_N \cdot (n^3 - n)} \right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{2} |M_{Ty}| \cdot d}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} + \frac{|F_{Qx}|}{2 \cdot n} \right)^2}$$

Die Belastungen 4/1 und 5 belasten die Niete auf Zug, da sie in z-Richtung wirken. Die resultierende Gesamtbelastung $F_{N,Zug,max}$ für den „Worst-Case“-Fall wird wie folgt bestimmt:

$$F_{N,Zug,max} = |F_{N4/1}| + |F_{N5}|$$

Hier muss nach Lösung 3 und 11 sowie Lösung 6 unterschieden werden.

Für Lösung 3 und 11 ergibt sich:

$$F_{N,Zug,max} = \frac{\frac{1}{2} \cdot |M_{Ty}| \cdot (n-1) \cdot z_N}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} + \frac{|F_{Qz}|}{2 \cdot n}$$

Für Lösung 6 ergibt sich:

$$F_{N,Zug,max} = \frac{\frac{1}{4} \cdot |M_{Ty}| \cdot (n-1) \cdot z_N}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_N^2} + \frac{|F_{Qz}|}{4 \cdot n}$$

4.4.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Für den Fügebereich der Verbindung müssen folgende Versagensfälle ausgeschlossen werden:

Versagensfall 1

$F_{N,Scher,max}$ wird so groß, dass der maximal belastete Niet abgeschert wird.

Versagensfall 2

$F_{N,Zug,max}$ wird so groß, dass der maximal belastete Niet abreißt.

Versagensfall 3

Es liegt eine kombinierte Belastung aus Scher- und Zugkraft vor, gegen die die Niete abgesichert werden müssen.

Versagensfall 4

Der Lochlaibungsdruck am Niet wird so groß, dass sich der Niet, das Sandwich-Deckblech oder das VE plastisch verformt.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Die Auslegung eines Blindnietes gegen Abscherung erfolgt nach [36]:

$$F_{N,Scher,max} \leq 0,5 \cdot X_q \cdot d_s^2 \cdot m$$

mit	0,5	...	Sicherheitsbeiwert
	X_q	...	Werkstoff-Form-Faktor für Scherung
	d_s	...	Niethülsendurchmesser
	m	...	Schnittigkeit der Verbindung
	$X_q \cdot d_s^2 = Q_n$		(Scherbruchkraft des Blindniet)

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

Die Auslegung eines Blindnietes gegen plastische Verformung aufgrund einer zu hohen axialen Zugkraft erfolgt nach folgender Formel:

$$F_{N,Zug,max} \leq R_{p0,2,NH} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{NHA}^2 - d_{NHI}^2) \cdot \frac{1}{S_F}$$

mit $R_{p0,2,NH}$... 0,2%-Dehngrenze des Niethülsenwerkstoffs
 d_{NHA} ... Niethüsendurchmesser außen
 d_{NHI} ... Niethüsendurchmesser innen
 s_F ... Sicherheitsbeiwert gegen plastische Verformung

Dabei wird von einem Versagen des Nietschafts ausgegangen, da das Versagen des Nietkopfs nicht auf einfache Weise berechnet werden kann. Ist die zulässige Zugbruchkraft Z_n jedoch bekannt, so reduziert sich die Formel auf:

$$F_{N,Zug,max} \leq \frac{Z_n}{s_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die Auslegung eines Blindnietes bei kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung erfolgt nach [36] und dem Nachweis aus Versagensfall 2 wie folgt (bei bekanntem Z_n kann die Formel entsprechend angepasst werden):

$$\frac{F_{N,Scher,max}}{X_q \cdot d_{NHA}^2 \cdot 0,5 \cdot m} + \frac{F_{N,Zug,max}}{k \cdot R_{p0,2,NH} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{NHA}^2 - d_{NHI}^2) \cdot \frac{1}{s_F}} < 1$$

mit k ... tabellierter Abminderungsfaktor

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 4

Der Niet wird durch das Sandwich-Deckblech und die VE-Zungen auf Lochlaibung beansprucht. Daher müssen folgende Fälle beachtet werden:

Nachweis gegen zu hohe Lochlaibung am Niet im Bereich des Sandwich-Deckblechs:

$$F_{N,Scher,max} \leq R_{p0,2,NH} \cdot d_{NL} \cdot s_{SB} \cdot \frac{1}{s_F}$$

mit d_{NL} ... Durchmesser Nietloch

Nachweis gegen zu hohe Lochlaibung am Niet im Bereich der VE-Zungen (nur Lösung 6 und 11):

$$F_{N,Scher,max} \cdot \frac{s_{SB} + s_{VE,max}}{s_{VE,min} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VE,max}} \leq R_{p0,2,NH} \cdot d_{NL} \cdot s_{VE,min} \cdot \frac{1}{s_F}$$

mit $s_{VE,max}$... Dicke der dickeren VE-Zunge im Nietbereich

$s_{VE,min}$... Dicke der dünneren VE-Zunge im Nietbereich

Sind beide VE-Zungen gleich dick, vereinfacht sich die Formel zu:

$$\frac{1}{2} \cdot F_{N,Scher,max} \leq R_{p0,2,NH} \cdot d_{NL} \cdot s_{VEN} \cdot \frac{1}{s_F}$$

Nachweis gegen zu hohe Lochlaibung am Niet im Bereich der VE-Zungen (nur Lösung 3):

$$F_{N,Scher,max} \leq R_{p0,2,NH} \cdot d_{NL} \cdot s_{VEN} \cdot \frac{1}{s_F}$$

Die Nachweise gegen zu hohe Lochlaibung am Sandwich-Deckblech bzw. am VE sind bis auf den jeweils einzusetzenden $R_{p0,2}$ -Wert identisch.

4.4.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 5

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der äußeren VE-Zungen

Versagensfall 6

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der inneren VE-Zungen (nur Lösung 6 und 11).

Versagensfall 7

Die Nietlöcher in den VE-Zungen reißen wegen zu geringem Randabstand aus.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 5

Die höchste Beanspruchung tritt am geschwächten Nietlochquerschnitt A auf. Dieser Querschnitt wird zur Sicherheit für alle Belastungen verwendet, auch wenn diese zum Teil nicht direkt dort angreifen (wie z.B. F_{Qx}).

Folgende Belastungen wirken an den äußeren VE-Zungen:

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}} \quad (\text{Lösung 3})$$

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{aussen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENA}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{aussen} = \frac{s_{SB} + s_{VENI}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}$$

s_{VENA}/s_{VENI} ... Dicke der äußeren/inneren VE-Zungen im Nietbereich

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot (b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung an A.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{\frac{M_{Bx}}{d}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}} \quad (\text{Lösung 3})$$

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{F_{aussen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENA}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{aussen} = \frac{s_{SB} + s_{VENI}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{Bx}}{d}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot (b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in A um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung [30].

⇒

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Bz}}{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_N^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_N^2 d_{NL} + (3n-3) z_N d_{NL}^2 + (-n+1) d_{NL}^3 + \left(b^3 - ((n-1)z_N + d_{NL})^3 \right) \right] s_{VEN} \cdot \frac{b}{2}}$$

(Lösung 3)

⇒

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{M_{aussen}}{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_N^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_N^2 d_{NL} + (3n-3) z_N d_{NL}^2 + (-n+1) d_{NL}^3 + \left(b^3 - ((n-1)z_N + d_{NL})^3 \right) \right] s_{VENA} \cdot \frac{b}{2}}$$

(Lösung 6/11)

$$\text{mit } M_{aussen} = \frac{s_{SB} + s_{VENI}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot M_{Bz}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{4} \cdot M_{Bz}}{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_N^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_N^2 d_{NL} + (3n-3) z_N d_{NL}^2 + (-n+1) d_{NL}^3 + \left(b^3 - ((n-1)z_N + d_{NL})^3 \right) \right] s_{VEN} \cdot \frac{b}{2}}$$

- M_{Ty} führt zu einer Torsion in A.

$$\Rightarrow \tau_4 = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot s_{VEN}^2 \cdot b}$$

(Lösung 3)

mit ζ_2 ... Tabellenwert nach [4]

$$\Rightarrow \tau_4 = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot (s_{VENA}^2 + s_{VENI}^2) \cdot b}$$

(Lösung 6)

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\tau_4 = \frac{\frac{1}{4} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot s_{VEN}^2 \cdot b}$$

Aufgrund der fehlenden drehmomentsteifen Anbindung an den VE-Mittelsteg werden bei Lösung 11 an dieser Stelle die äußeren Zungen nicht berücksichtigt.

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{b \cdot s_{VEN}} \quad (\text{Lösung 3})$$

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot (s_{VENA} + s_{VENI})} \quad (\text{Lösung 6})$$

Aufgrund der fehlenden drehmomentsteifen Anbindung an den VE-Mittelsteg werden bei Lösung 11 an dieser Stelle die äußeren Zungen nicht berücksichtigt.

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qx}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}} \quad (\text{Lösung 3})$$

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{aussen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENA}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{aussen} = \frac{s_{SB} + s_{VENI}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot F_{Qx}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\tau_6 = \frac{\frac{1}{4} \cdot F_{Qx}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt A ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, ebenso τ_4 und τ_5 (bei τ_4 ist nur der Anteil in z-Richtung relevant, da $b \gg d$). Die beiden so entstandenen Gesamtbeanspruchungen sowie τ_6 werden nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt zusammengefasst:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(|\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot (\tau_6^2 + (|\tau_4| + |\tau_5|)^2)}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 6

Die höchste Beanspruchung tritt am geschwächten Nietlochquerschnitt B auf. Dieser Querschnitt wird zur Sicherheit für alle Belastungen verwendet, auch wenn diese zum Teil nicht direkt dort angreifen (wie z.B. F_{Qx}). Lösung 3 wird hier nicht berücksichtigt, da sie keine inneren VE-Zungen besitzt.

Folgende Belastungen wirken an den inneren VE-Zungen:

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{innen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENI}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{innen} = \frac{s_{SB} + s_{VENA}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot (b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{F_{innen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENI}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{innen} = \frac{s_{SB} + s_{VENA}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{Bx}}{d}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot (b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in B um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung [30].

⇒

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{M_{\text{innen}}}{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_N^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_N^2 d_{NL} + (3n-3) z_N d_{NL}^2 + (-n+1) d_{NL}^3 + (b^3 - ((n-1)z_N + d_{NL})^3 \right] s_{VENI}}{\frac{b}{2}}$$

(Lösung 6/11)

$$\text{mit } M_{\text{innen}} = \frac{s_{SB} + s_{VENA}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot M_{Bz}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{4} \cdot M_{Bz}}{\frac{1}{12} \left[(n-1)^3 z_N^3 + (-n^3 + 3n^2 - 5n + 3) z_N^2 d_{NL} + (3n-3) z_N d_{NL}^2 + (-n+1) d_{NL}^3 + (b^3 - ((n-1)z_N + d_{NL})^3 \right] s_{VEN}}$$

- M_{Ty} führt zu einer Torsion in B.

$$\Rightarrow \tau_4 = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot s_{VENI}^2 \cdot b} \quad (\text{Lösung 11})$$

mit ζ_2 ... Tabellenwert nach [4]

Die äußeren Zungen sind nicht drehmomentsteif mit dem VE-Mittelsteg verbunden und werden zur Sicherheit nicht berücksichtigt.

$$\Rightarrow \tau_4 = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot (s_{VENA}^2 + s_{VENI}^2) \cdot b} \quad (\text{Lösung 6})$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\tau_4 = \frac{\frac{1}{4} \cdot M_{Ty}}{\frac{1}{3} \cdot \zeta_2 \cdot s_{VEN}^2 \cdot b}$$

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{b \cdot s_{VENI}} \quad (\text{Lösung 11})$$

Die äußeren Zungen sind nicht drehmomentsteif mit dem VE-Mittelsteg verbunden und werden zur Sicherheit nicht berücksichtigt.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot (s_{VENA} + s_{VENI})} \quad (\text{Lösung 6})$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{innen}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VENI}} \quad (\text{Lösung 6/11})$$

$$\text{mit } F_{innen} = \frac{s_{SB} + s_{VENA}}{(s_{VENA} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VENI})} \cdot \frac{1}{2} \cdot F_{Qx}$$

Sonderfall bei gleicher Dicke aller VE-Zungen:

$$\tau_6 = \frac{\frac{1}{4} \cdot F_{Qx}}{(b - n \cdot d_{NL}) \cdot s_{VEN}}$$

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt A ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, ebenso τ_4 und τ_5 (bei τ_4 ist nur der Anteil in z-Richtung relevant, da $b \gg d$). Die beiden so entstandenen Gesamtbeanspruchungen sowie τ_6 werden nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt zusammengefasst:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(|\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot (\tau_6^2 + (|\tau_4| + |\tau_5|)^2)}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 7

Tabelle 18 zeigt die nach [36] zu führenden Nachweise.

Lösung 3	Lösung 6/11
$F_{N,Scher,max} \leq \frac{0,7 \cdot R_{m,VE} \cdot s_{VEN} \cdot e_{VE}}{s_g}$ <p>mit s_g ... Lastfaktor ($s_{g,Alu}=2,8$; $s_{g,Stahl}=2,4$)</p>	$F_{N,Scher,max} \cdot \frac{s_{SB} + s_{VE,max}}{s_{VE,min} + 2 \cdot s_{SB} + s_{VE,max}} \leq \frac{0,7 \cdot R_{m,VE} \cdot s_{VE,min} \cdot e_{VE}}{s_g}$ <p>mit $s_{VE,min}/s_{VE,max}$... Dicke der dünneren bzw. dickeren VE-Zunge</p> <p>bei gleicher Dicke aller VE-Zungen im Nietbereich:</p> $\frac{1}{2} \cdot F_{N,Scher,max} \leq \frac{0,7 \cdot R_{m,VE} \cdot s_{VEN} \cdot e_{VE}}{s_g}$

Tabelle 18: Festigkeitsnachweis gegen Ausreißen der Nietlöcher im VE

4.4.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Im Nietbereich des Sandwichs kann es zu folgenden Versagensfällen kommen:

Versagensfall 8

Die Nietlöcher reißen wegen zu geringem Randabstand aus.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 8 [36]

$$F_{N,Scher,max} \leq \frac{0,7 \cdot R_{m,SB} \cdot s_{SB} \cdot e_{SW}}{s_g}$$

mit $R_{m,SB}$... Zugfestigkeit der Sandwichdeckschicht

4.5 VE-Block 4: Exzenterverbinder

VE-Block 4 beinhaltet zwei Schnellverbinder, also Lösungen, die schnell gefügt und wieder gelöst werden können. In diesem Kapitel wird der Exzenterverbinder behandelt.

4.5.1 Geometrische Kennwerte

Die Auslegung des Exzenterverbinders erfordert die Festlegung einiger qualitativer Gestaltungsmerkmale:

- Die Zustellbewegung für das Klemmen der Sandwich-Deckschichten soll durch einen Doppel-Exzenter realisiert werden, der die inneren Zungen bewegt. Die äußeren Zungen werden sehr steif ausgeführt, um eine Vergrößerung des Sandwich-Deckschichtabstands beim Spannen des VEs zu verhindern.
- Die innere Zunge einer Seite wird durch mehrere Einzelelemente dargestellt, da der Mittelsteg für eine einzelne innere Zunge pro Seite auf seiner ganzen Breite unterbrochen werden müsste, das VE würde auseinander fallen.
- Die Klemmkraft wird durch die elastische Verformung der inneren Zungen bei der Zustellung erzeugt.
- Durch Anbringen eines entsprechenden Radius im Klemmbereich der inneren Zungen wird eine definierte Kontaktstelle erzeugt.
- Die nachfolgenden Festigkeitsnachweise können in enger Anlehnung an Kapitel 4.3 durchgeführt werden und sind daher zum Teil sehr kurz gehalten. Die geometrischen Kennwerte des VEs zeigt Abbildung 40.

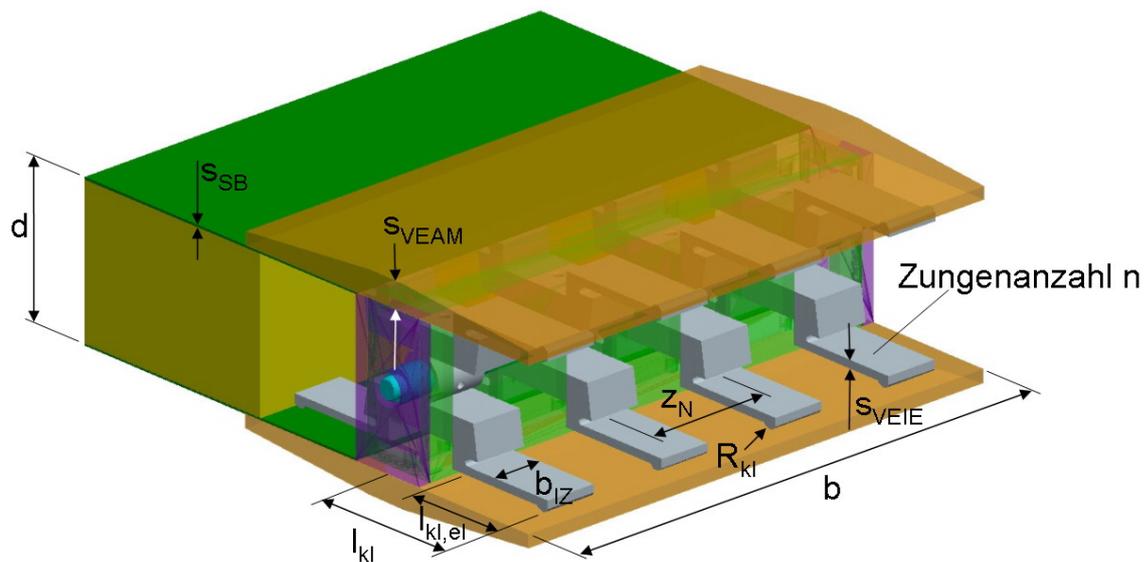


Abbildung 40: Kenngrößen der Exzenter-Verbindung

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)
- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- s_{VEAM} ... Dicke der äußeren VE-Zunge am Mittelsteg des VEs
- s_{VEIE} ... Dicke der inneren VE-Zungen im elastischen Bereich
- l_{kl} ... Abstand der Klemmlinie von der VE-Mitte
- $l_{kl,el}$... Länge des elastischen Klemmbereichs der inneren Zungen
- b_{IZ} ... Breite einer inneren Zunge
- z_N ... Abstand der inneren Zungen
- R_{kl} ... Radius einer Innenzunge an der Klemmstelle
- b ... VE-Breite
- n ... Anzahl innerer Zungen pro Sandwich-Deckblech

4.5.2 Belastung der Fügestelle

Die Kräfte und Momente, die auf die Verbindungsstelle wirken, können direkt vom Zentralschraubenverbinder übernommen werden. Sie sind in Tabelle 19 dargestellt. Dabei wird zunächst von jeweils einer Klemmstelle pro Sandwich-Deckblech ausgegangen, unabhängig von der Anzahl der inneren VE-Zungen.

Nr.	Belastung	Belastung Fügestelle F_F	Richtung von F_F
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{F1} = \frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}$	in y-Richtung
2	M_{Bx}	$F_{F2} = \frac{M_{Bx}}{d}$	in y-Richtung
3	M_{Bz}	$F_{F3} = \frac{M_{Bz}}{b}$	in y-Richtung
4	M_{Ty}	$F_{F4} = \frac{M_{Ty}}{b}$	in z-Richtung
5	F_{Qz}	$F_{F5} = \frac{1}{2} \cdot F_{Qz}$	in z-Richtung
6	F_{Qx}	$F_{F6} = \frac{1}{2} F_{Qx}$	in x-Richtung

Tabelle 19: Belastungen der Fügstellen des Exzenterverbinders

4.5.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die resultierenden Gesamtbelastungen in der x-y-Ebene und in z-Richtung können direkt vom Zentralschraubenverbinder übernommen werden:

$$F_{F1236} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b}$$

F_{F1236} ist die resultierende Kraft in der x-y-Ebene, die mittels Reibung vom Sandwich auf das VE übertragen werden muss.

$$F_{F45} = \frac{|M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{2} \cdot |F_{Qz}|$$

F_{F45} ist die resultierende Kraft, die vom Sandwich-Deckblech aus lotrecht auf die VE-Zungen wirkt.

4.5.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Für den Fügebereich der Verbindung müssen folgende Versagensfälle ausgeschlossen werden:

Versagensfall 1

Die Belastung F_{1236} wird so groß, dass die Sandwichdeckschichten aus dem VE herausrutschen (vgl. Abbildung 31 des Zentralschraubenverbinders).

Versagensfall 2

Die Belastung F_{F45} wird so groß, dass an einer oder beiden VE-Seiten die Klemmkraft F_{kl} der inneren Zungen überschritten wird und die Zungen minimal nach innen gebogen werden. Das Sandwich-Deckblech verliert ganz oder teilweise den Kontakt zu den VE-Zungen (vgl. Abbildung 32 des Zentralschraubenverbinders).

Versagensfall 3

Die Klemmkraft F_{kl} ist so groß, dass die zulässige Flächenpressung an den Klemmstellen überschritten wird.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Die Ermittlung der erforderlichen Gesamtklemmkraft verläuft analog zum Zentralschraubenverbinder. Sie kann damit direkt übernommen werden:

$$F_{kl,erf} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b}}{\mu_0 \cdot q}$$

Da die innere Zunge des VEs aus n Einzelementen besteht, beträgt die Vorspannkraft F_{VzE} , die jedes Einzelement aufbringen muss:

$$F_{VzE} = \frac{2}{n} \cdot F_{kl,erf} = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Z/Dy}| + \frac{|M_{Bx}|}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot |F_{Qx}|\right)^2} + 2 \cdot \frac{|M_{Bz}|}{b} \right)}{n \cdot \mu_0 \cdot q}$$

Die Durchbiegung einer inneren VE-Zunge, die zur Erzeugung der Vorspannkraft F_{VzE} erforderlich ist, errechnet sich in Anlehnung an den Zentralschraubenverbinder (die entsprechenden Einzelformeln können dort entnommen werden) zu:

$$f_V = f_m + f$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

F_{Qz} hat die gleiche Auswirkung auf den Exzenterverbinder wie auf den Zentralschraubenverbinder. Bei M_{Ty} gibt es jedoch einen Unterschied.

Die innere Zunge besteht beim Exzenterverbinder aus mehreren Einzelementen. Wird das vereinfachte Verformungsverhalten des VEs nach Abbildung 32 zugrunde gelegt (beim Versagen durch M_{Ty} liegt jeweils nur noch die Hälfte der Sandwichdeckschicht-Breite an der jeweiligen VE-Zunge an), so werden durch M_{Ty} nicht alle, sondern nur die Hälfte aller Einzelemente entgegen Ihrer Vorspannkraft belastet. Damit kann der Nachweis gegen Versagensfall 2 zwar in Analogie zum Zentralschraubenverbinder durchgeführt werden, es müssen jedoch die folgenden Abweichungen berücksichtigt werden:

- Die Klemmkraft wird nicht von den äußeren, sondern von den inneren VE-Zungen aufgebracht.
- Es wirken nur die Hälfte aller inneren VE-Zungen mit Ihrer Klemmkraft einer Verformung durch M_{Ty} entgegen.

Unter Berücksichtigung dieser Punkte und ansonsten analoger Vorgehensweise zum Zentralschraubenverbinder kann Versagensfall 2 durch folgende Bedingung ausgeschlossen werden:

$$F_{VzE} = \frac{2}{n} \cdot \left(\frac{2 \cdot |M_{Ty}|}{b} + \frac{1}{2} \cdot |F_{Qz}| \right)$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die zwischen den inneren Einzelzungen und dem Sandwich-Deckblech auftretende Flächenpressung kann nach Hertz [34] berechnet werden. Sie beträgt:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} F_{VzE} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot b_{IZ} \cdot (1 - \nu^2)}}$$

Damit lautet der Festigkeitsnachweis:

$$|\sigma_{\max}| \leq |\sigma_{zul}|$$

$$\sqrt{\frac{\frac{1}{2} F_{VzE} \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot b_{IZ} \cdot (1 - \nu^2)}} \leq \frac{R_{p0,2}}{s_F}$$

4.5.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 4

Die äußeren Belastungen und die Vorspannkkräfte F_{VzE} führen zu einem Versagen der äußeren VE-Zungen.

Versagensfall 5

Die äußeren Belastungen und die Vorspannkkräfte F_{VzE} führen zu einem Versagen der inneren VE-Zungen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 4

Aufgrund seiner Komplexität kann der Aufbau des Exzenter-VEs aus mehreren Einzelteilen auch nach einer Überarbeitung des Prototyps hinsichtlich Serientauglichkeit nicht ausgeschlossen werden. Die höchste Beanspruchung wird daher an dem in der VE-Zungenmitte gelegenen Querschnitt A angenommen. Die Schwächung dieses Querschnitts durch möglicherweise erforderliche Schraubenlöcher ist sehr klein und wird zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

Folgende Belastungen wirken an den äußeren VE-Zungen:

- Die Vorspannungen F_{VzE} führen zu einer Biegung in A um die x-Achse, d.h. innen herrscht Zug-, außen Druckbeanspruchung. Die Schubbeanspruchung kann dabei vernachlässigt werden, da $l_{kl} \gg s_{VEAM}$.

$$\Rightarrow \sigma_{VzE} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{3 \cdot n \cdot F_{VzE} \cdot l_{kl}}{b \cdot s_{VEAM}^2}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot b \cdot s_{VEAM}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot b \cdot s_{VEAM}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in A um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung.

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{3 \cdot M_{Bz}}{2 \cdot s_{VEAM} \cdot b^2}$$

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot s_{VEAM} \cdot b}$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{Qx}}{4 \cdot s_{VEAM} \cdot b}$$

M_{Ty} ist hier uninteressant, da durch das Verdrehen der Deckbleche in der Klemmstelle keine zusätzliche Belastung auf die Zungen wirkt, sondern lediglich die kraftübertragenden Flächen an den Sandwich-Deckblechen bzw. VE-Zungen reduziert werden (siehe Versagensfall 3).

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt B ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_{VzE} , σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, τ_5 und τ_6 werden nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt berücksichtigt:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{\left(|\sigma_{VzE}| + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|\right)^2 + 3 \cdot \left(\tau_6^2 + \tau_5^2\right)}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 5

Die höchste Beanspruchung tritt am innen gelegenen Ende des elastischen Biegebereichs auf (kritischer Querschnitt B).

Folgende Belastungen wirken an den inneren VE-Zungen:

- F_{VzE} führt zu einer Biegung in B um die x-Achse, d.h. innen herrscht Druck-, außen Zugbeanspruchung. Die Schubbeanspruchung kann dabei vernachlässigt werden, da

$$I_{kl,el} \gg s_{VEIE}$$

$$\Rightarrow \sigma_{VzE} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{3 \cdot F_{VzE} \cdot I_{kl,el}}{b_{IZ} \cdot s_{VEIE}^2}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{F_{Z/Dy}}{4 \cdot b_{IZ} \cdot n \cdot s_{VEIE}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{M_{Bx}}{2 \cdot d \cdot b_{IZ} \cdot n \cdot s_{VEIE}}$$

- M_{Bz} führt an einer Hälfte der inneren VE-Zungen zu einer Zug-, an der anderen Hälfte zu einer Druckbeanspruchung in B. Die maximale Spannung in den äußeren VE-Zungen wird in Analogie zum Blindniet-VE bestimmt.

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{2 \cdot z_N \cdot (n^3 - n) \cdot b_{IZ} \cdot s_{VEIE}}$$

- F_{Qx} führt zu einer Schubbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \tau_6 = \frac{F_{Qx}}{4 \cdot n \cdot b_{IZ} \cdot s_{VEIE}}$$

M_{Ty} und F_{Qz} sind hier uninteressant, da das Abheben der VE-Zungen vom Sandwich-Deckblech durch die vorangegangenen Festigkeitsnachweise ausgeschlossen wurde. Die Bewegung der äußeren VE-Zungen, die wesentlich steifer als die inneren sind, wird dabei vernachlässigt, d.h. es ergibt sich für die inneren VE-Zungen in z-Richtung keine Belastungsänderung.

Die maximal auftretende Beanspruchung im Querschnitt B ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. σ_{VZE} , σ_1 , σ_2 und σ_3 können dabei direkt addiert werden, τ_6 wird nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] wie folgt berücksichtigt:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(|\sigma_{VZE}| + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot \tau_6^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{s_F}$$

Der Festigkeitsnachweis für die im Mittelsteg gelegene zentrale Spanneinheit erfolgt bei der Gestaltgebung, da die genaue Geometrie zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht bekannt ist.

4.5.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Das Sandwichelement wird durch die Verbindung nur auf Flächenpressung in der Klemmstelle belastet. Dieser Festigkeitsnachweis wurde schon in Kapitel 4.5.4 geführt, weitere Betrachtungen sind daher nicht notwendig.

4.6 VE-Block 4: Sperrklinkenverbinder

In diesem Kapitel wird als zweite Lösung der Schnellverbinder der Sperrklinkenverbinder behandelt.

Das Fügen von Sandwich und VE erfolgt beim Sperrklinkenverbinder mittels einzelner Klinken, die auf den inneren VE-Zungen in einer Reihe angeordnet sind. Beim Einschieben des Sandwichs in den Verbinder werden diese Klinken nach innen weggedrückt. Ihr Neigungswinkel ist so ausgelegt, dass sich eine selbsthemmende Reibverbindung ergibt, d.h. die maximale Reibkraft zwischen den Klinken bzw. der gegenüberliegenden äußeren VE-Zunge und dem Sandwich-Deckblech ist stets größer als die in y-Richtung wirkenden äußeren Belastungen. Das Sandwichelement kann damit nicht mehr in y-Richtung aus dem Verbinder herausgezogen werden. Belastungen in x-Richtung müssen durch gesonderte Maßnahmen wie z.B. Randabschlüsse aufgenommen werden. Diese können jedoch erst bei der endgültigen Gestaltung der VEs als ausgereiftes Verbindungssystem festgelegt werden. Sie werden daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr betrachtet.

4.6.1 Geometrische Kennwerte

Die geometrischen Kennwerte der Verbindung werden in Abbildung 41 veranschaulicht, für eine bessere Übersicht sind die äußeren VE-Zungen transparent und das gesamte VE nur halb dargestellt.

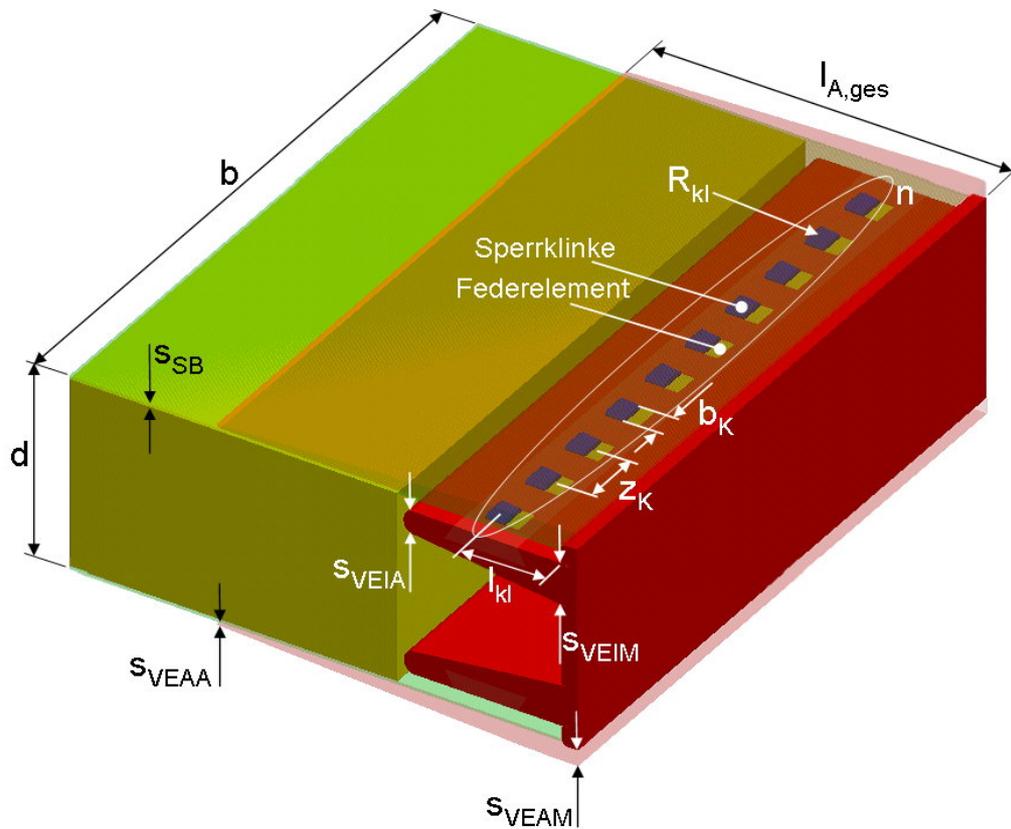


Abbildung 41: Kenngrößen der Sperrklinken-Verbindung

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)
- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- s_{VEAM} ... Dicke der äußeren VE-Zunge am Mittelsteg des VEs
- s_{VEAA} ... Dicke der äußeren VE-Zunge am äußeren Zungenende
- s_{VEIM} ... Dicke der inneren VE-Zunge am Mittelsteg des VEs
- s_{VEIA} ... Dicke der inneren VE-Zunge am äußeren Zungenende
- l_{kl} ... Abstand der Klemmlinie der Klinken vom Mittelsteg
- b_K ... Sperrklinkenbreite
- z_K ... Sperrklinkenabstand
- $l_{A,ges}$... Gesamtlänge einer äußeren VE-Zunge
- b ... VE-Breite
- R_{kl} ... Radius des Klinken-Klemmbereichs

- n ... Anzahl Sperrklinken pro Sandwich-Deckblech

Zusätzlich zu den oben dargestellten Kennwerten muss auch die Sperrklinken-Geometrie betrachtet werden. Diese wird im Folgenden unter Berücksichtigung des Selbsthemmungseffekts hergeleitet.

Abbildung 42 zeigt die an einer Klemmstelle wirkenden Kräfte, wenn das Sandwich-Deckblech in y-Richtung mit der Kraft F_y belastet wird. Der Index SW bedeutet, dass eine Kraft am Sandwich-Deckblech angreift, R steht für Reibkraft, N für Normalkraft.

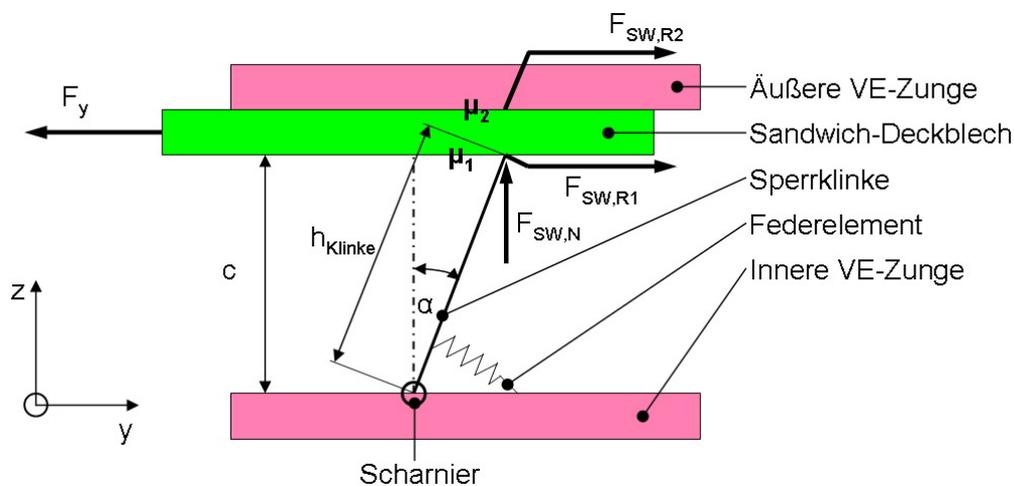


Abbildung 42: Sperrklinken-Geometrie

Die Sperrklinke wird vom Federelement gegen das Sandwich-Deckblech gedrückt. Wirkt nun die Kraft F_y , so muss für den Fall der Selbsthemmung stets folgende Bedingung gelten:

$$F_y < F_{SW,R1,max} + F_{SW,R2,max},$$

d.h. die maximal übertragbaren Reibkräfte an den beiden Kontaktflächen zwischen Sandwich-Deckblech und Sperrklinke bzw. äußerer VE-Zunge sind zusammen stets größer als die angreifende Kraft F_y . Mit Hilfe der Beziehungen

$$F_{SW,R,max} = \mu \cdot F_{SW,N} \text{ und } F_y = F_{SW,N} \cdot \tan \alpha$$

ergibt sich die Gleichung

$$\alpha < \arctan \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}.$$

Ist diese Gleichung erfüllt, so herrscht an der Verbindungsstelle Selbsthemmung, d.h. jede angreifende Kraft F_y initiiert eine maximal übertragbare Reibkraft $F_{SW,R1,max} + F_{SW,R2,max}$, die stets größer ist als F_y selbst.

Die geometrische Umsetzung des Selbsthemmungs-Effekts erfolgt durch die Festlegung der Klinkenhöhe h_{Klinke} . Diese wird so gewählt, dass sich nach dem Einschieben des Sandwich-Deckblechs in das VE der Winkel α aus obiger Bedingung einstellt.

$$h_{Klinke} = \frac{c}{\cos \alpha}$$

Die Berechnungen zum Selbsthemmungseffekt wurden mit Hilfe eines Prüfstands verifiziert, bei dem eine Blechtafel von 1mm Dicke durch zwei Sperrklinken gefügt wird. Abbildung 43 zeigt das 3D-Modell des Prüfstands in Pro/Engineer Wildfire. Die obere Prüfstands-Zunge ist zur besseren Übersicht transparent dargestellt.

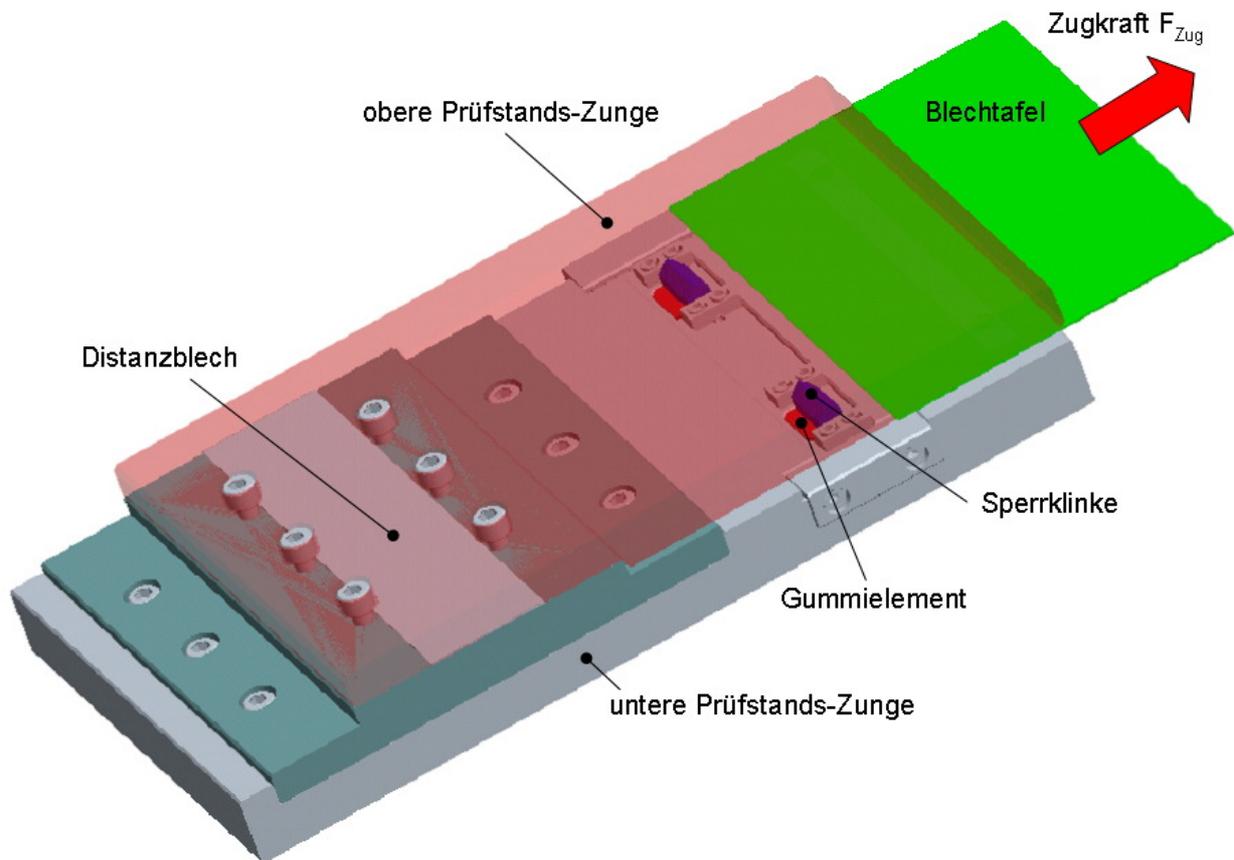


Abbildung 43: 3D-Modell des Sperrklinken-Prüfstands in Pro/Engineer Wildfire

Der Abstand zwischen oberer und unterer Prüfstands-Zunge kann mit Hilfe von Distanzblechen in 0,1mm-Schritten eingestellt werden. Als Federelemente werden Gummiblöcke eingesetzt. Die Sperrklinken sind auf Achsen drehbar in der unteren Prüfstands-Zunge gelagert. Die Blechtefel wird durch Einschieben in den Prüfstand gefügt und dann mit der Zugkraft F_{Zug} belastet.

Der Reibkoeffizient zwischen Blechtefel und Klinken bzw. äußerer Prüfstands-Zunge wird aus Sicherheitsgründen mit 0,1 angenommen. Damit ergibt sich für Selbsthemmung die Forderung $\alpha < 11,3^\circ$. Der Abstand der beiden Prüfstands-Zungen beträgt im Ausgangszustand 16mm. Bei einer Dicke der Blechtefel von 1mm ergibt sich also eine erforderliche Klinkenhöhe von:

$$h_{Klinke} = \frac{15\text{mm}}{\cos 11,3^\circ} = 15,3\text{mm}$$

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass das System äußerst sensibel auf Änderungen des Zungenabstands reagiert. Wird der Abstand nur um wenige zehntel Millimeter

zu klein, ist keine Selbsthemmung mehr gegeben. Wird der Abstand um einige zehntel Millimeter zu groß, so wird die zwischen den Zungen wirkende Normalkraft so groß, dass die daraus resultierende Aufbiegung der Zungen bzw. Quetschung des Blechs zu einem Umklappen der Sperrklinken in Richtung von F_{Zug} führt. In beiden Fällen kann die Blechtafel aus dem Prüfstand herausgezogen werden. Bei einem späteren Prototypen ist daher auf eine genaue Einhaltung des Zungenabstands zu achten.

Die Gummielemente haben sich als ungeeignet erwiesen. Sind sie zu weich, so reicht die Anpresskraft der Klinken an den Blechstreifen nicht aus. Sind sie zu hart, so wird der Federweg zu klein und die Klinken können beim Fügen nicht mehr genügend geneigt werden. Aus diesem Grund sollen bei einem späteren Prototypen Stahlfedern verwendet werden.

Unter Beachtung der zuletzt beschriebenen Punkte konnte die Funktionsfähigkeit der Verbindung einwandfrei nachgewiesen werden. Dabei war es einer Versuchsperson auch unter äußerster Kraftanstrengung nicht möglich, die Blechtafel aus dem Prüfstand zu ziehen. Die zu schwachen Gummielemente wurden dabei durch das Aufbringen einer zusätzlichen Vorspannkraft von außen auf die Sperrklinken unterstützt.

4.6.2 Belastung der Fügestellen

Die Kräfte und Momente, die auf die Verbindungsstelle wirken, können direkt vom Standardschraubenverbinder übernommen werden. Sie sind in Tabelle 19 dargestellt. Wie schon weiter oben erwähnt, werden alle in x-Richtung wirkenden Belastungen zum jetzigen Zeitpunkt nicht beachtet.

Nr.	Belastung	Belastung Fügestelle F_F	Richtung von F_F
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{K1} = \frac{F_{Z/Dy}}{2 \cdot n}$	in y-Richtung
2	M_{Bx}	$F_{K2} = \frac{M_{Bx}}{d \cdot n}$	in y-Richtung
3	M_{Bz}	$F_{K3,max} = \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{z_K \cdot (n^3 - n)}$	in y-Richtung
4	M_{Ty}	$F_{K4,max} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_K}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_K^2}$	in z-Richtung
5	F_{Qz}	$F_{K5} = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot n}$	in z-Richtung

Tabelle 20: Belastungen der Fügestellen des Sperrklinkenverbinders

4.6.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die resultierenden Gesamtbelastungen ergeben sich zu:

$$F_{K123} = \frac{F_{Z/Dy}}{2 \cdot n} + \frac{M_{Bx}}{d \cdot n} + \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{z_K \cdot (n^3 - n)} \quad \text{in y-Richtung und}$$

$$F_{K45} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_K}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_K^2} + \frac{F_{Qz}}{2 \cdot n} \quad \text{in z-Richtung.}$$

In z-Richtung wirkt hier noch zusätzlich die Normalkraft $F_{SW,N}$. Sie bewirkt in Abhängigkeit von F_{K123} ein Auseinanderbiegen der zusammengehörigen inneren und äußeren Sandwich-Zungen und muss bei den nachfolgenden Auslegungen zum Teil berücksichtigt werden.

$$F_{SW,N} = F_{K123} \cdot \frac{1}{2 \cdot \tan \alpha}$$

Die Kraft des Federelements wird bei den weiteren Festigkeitsauslegungen nicht berücksichtigt, da sie sehr klein ist.

4.6.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Für den Fügebereich der Verbindung müssen folgende Versagensfälle ausgeschlossen werden:

Versagensfall 1

Die Flächenpressung zwischen Klinken und Sandwich-Deckblech wird zu groß.

Versagensfall 2

Die Klinken werden durch die Kräfte in z-Richtung so stark gestaucht, dass sie unter Belastung in y-Richtung nach außen umklappen.

Versagensfall 3

Die Kraft des Federelements ist zu gering um den Selbsthemmungseffekt zu initiieren.

Versagensfall 4

Die Drehachse der Klinken wird durch die Belastungen abgeschert bzw. die zulässige Flächenpressung zwischen Bolzen und Bohrung wird überschritten.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Die zwischen den Sperrklinken und dem Sandwich-Deckblech auftretende Flächenpressung kann nach Hertz [34] berechnet werden. Sie beträgt:

$$\sigma_{\max} = -\sqrt{\frac{(F_{K45} + F_{SW,N}) \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot b_K \cdot (1 - \nu^2)}}$$

Damit lautet der Festigkeitsnachweis:

$$|\sigma_{\max}| \leq |\sigma_{zul}|$$

$$\sqrt{\frac{(F_{K45} + F_{SW,N}) \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot R_{kl} \cdot b_K \cdot (1 - \nu^2)}} \leq \frac{R_{p0,2}}{s_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird die Klinke in zwei Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 44).

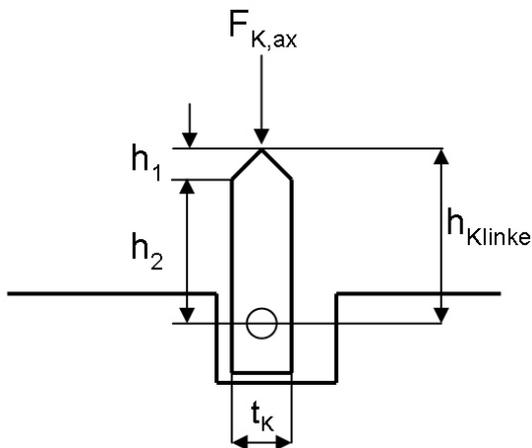


Abbildung 44: Unterteilung der Sperrklinke und Kopf- und Schaftbereich

Bereich 1 ist der Kopfbereich der Sperrklinke mit der Höhe h_1 . Unter der Annahme, dass die Klinke senkrecht von der Kraft $F_{K,ax}$ belastet wird, kann die Stauchung des Kopfbereichs näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$l_{gestaucht,Kopf} = l_{g,1} = h_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{MK}}{E}\right) \text{ mit der mittleren Kopfspannung } \sigma_{MK} = \frac{F_{K,ax}}{b_K \cdot \frac{t_K}{2}}$$

Bereich 2 ist der Schaftbereich der Sperrklinke mit der Höhe h_2 . Seine Stauchung beträgt:

$$l_{gestaucht,Schaft} = l_{g,2} = h_2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_S}{E}\right) \text{ mit der Schaftspannung } \sigma_S = \frac{F_{K,ax}}{b_K \cdot t_K}$$

Aus Abbildung 42 und Kapitel 4.6.3 kann $F_{K,ax}$ bestimmt werden:

$$F_{K,ax} = \frac{F_{SW,N} + F_{K45}}{\cos \alpha}$$

Die Länge der gestauchten Sperrklinke ist damit:

$$h_{Klinke,g} = l_{g,1} + l_{g,2}$$

Das hier betrachtete Versagen der Verbindung hängt eng mit Versagensfall 7 zusammen, da in beiden Fällen der Abstand zwischen Sperrklinken-Spitze und VE-Zunge zu groß wird. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle noch kein Nachweis formuliert, dies geschieht im Abschnitt „Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 7“.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die notwendige Kraft des Federelements hängt von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab (z.B. endgültige Gestalt der Sperrklinken, Lage des Kontaktpunkts zwischen Federelement und Sperrklinke bzw. Sandwichzunge usw.). Daher ist eine Auslegung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich, sie wird in Kapitel 5 bei der Gestaltung des Prototyps vorgenommen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 4

Der Festigkeitsnachweis gegen Abscherung der Sperrklinkenachse lautet:

$$\frac{F_{K,ax}}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{Bolzen}}{2}\right)^2} \leq \frac{R_{m,Bolzen}}{s_B}$$

Der Festigkeitsnachweis gegen zu hohe Flächenpressung im Achslager lautet [34]:

$$\frac{F_{K,ax}}{d_{Bolzen} \cdot b_K} \leq \frac{R_{p0,2}}{s_F}$$

4.6.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 5

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der äußeren VE-Zungen.

Versagensfall 6

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der inneren VE-Zungen.

Versagensfall 7

Die VE-Zungen werden so stark aufgebogen, dass die Sperrklinken unter Belastung in y-Richtung nach außen umklappen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 5

Die höchste Beanspruchung tritt im Querschnitt A neben dem Mittelsteg auf, da hier das Biegemoment, welches die Sperrklinken in der äußeren VE-Zunge bewirken, maximal ist.

Folgende Belastungen wirken an den äußeren VE-Zungen:

- $F_{SW,N}$ führt zu einer Biegebelastung in A.

$$\Rightarrow \sigma_{SW,N} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{F_{SW,N} \cdot n \cdot l_{kl}}{b \cdot s_{VEAM}^2 \cdot 6}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A. Dabei wird eine mögliche Verdrehung des Querschnitts durch unterschiedliche Dicken der inneren und äußeren VE-Zungen vereinfachend nicht berücksichtigt.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}}{b \cdot s_{VEAM} + b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in A. Es gelten die gleichen Annahmen wie bei F_{K1} .

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{\frac{M_{Bx}}{d}}{b \cdot s_{VEAM} + b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in A um die z-Achse, d.h. auf einer Seite herrscht Zug-, auf der anderen Druckbeanspruchung.

$$\Rightarrow \sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Bz}}{\frac{s_{VEAM} \cdot b^2}{6} + \frac{s_{VEIM} \cdot b^2}{6}}$$

- F_{Qz} führt zu einer Schubbeanspruchung in A.

$$\Rightarrow \tau_5 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Qz}}{b \cdot s_{VEAM}}$$

M_{Ty} ist hier uninteressant, da durch das Verdrehen der Deckbleche in der Klemmstelle keine zusätzliche Belastung auf die Zungen wirkt, sondern lediglich die kraftübertragenden Flächen an den Sandwich-Deckblechen bzw. VE-Zungen reduziert werden.

Die maximal auftretende Beanspruchung im kritischen Querschnitt A ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. $\sigma_{SW,N}$, σ_1 , σ_2 und σ_3 sowie τ_4 und τ_5 können dabei direkt addiert werden. Die Vergleichsspannung ergibt sich nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] zu:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{(\sigma_{SW,N} + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|)^2 + 3 \cdot (\tau_4 + \tau_5)^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{s_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 6

Die höchste Beanspruchung tritt im Querschnitt B neben dem Mittelsteg auf, da hier das Biegemoment, welches die Sperrklinken in der inneren VE-Zunge bewirken, maximal ist.

Folgende Belastungen wirken an den inneren VE-Zungen:

- $F_{SW,N}$ führt zu einer Biegebelastung in B.

$$\Rightarrow \sigma_{SW,N} = \frac{M_B}{W_B} = \frac{F_{SW,N} \cdot n \cdot l_{kl}}{b \cdot \frac{s_{VEIM}^2}{6}}$$

- $F_{Z/Dy}$ führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_1 = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{Z/Dy}}{b \cdot s_{VEAM} + b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bx} führt zu einer Zug- oder Druckbeanspruchung in B.

$$\Rightarrow \sigma_2 = \frac{\frac{M_{Bx}}{d}}{b \cdot s_{VEAM} + b \cdot s_{VEIM}}$$

- M_{Bz} führt zu einer Biegung in B um die z-Achse.

$$\sigma_3 = \frac{M_B}{W_B} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M_{Bz}}{\frac{s_{VEAM} \cdot b^2}{6} + \frac{s_{VEIM} \cdot b^2}{6}}$$

M_{Ty} und F_{Qz} sind hier uninteressant, da das Abheben der VE-Zungen vom Sandwich-Deckblech durch die vorangegangenen Festigkeitsnachweise ausgeschlossen wurde. Die Bewegung der inneren VE-Zungen, die wesentlich steifer als die äußeren sind, wird dabei vernachlässigt, d.h. es ergibt sich für die äußeren VE-Zungen in z-Richtung keine Belastungsänderung.

Die maximal auftretende Beanspruchung im kritischen Querschnitt B ergibt sich durch Bilden der Vergleichsspannung. $\sigma_{SW,N}$, σ_1 , σ_2 und σ_3 sowie τ_4 und τ_5 können dabei direkt addiert werden. Die Vergleichsspannung ergibt sich nach der Gestaltänderungsenergiehypothese [34] zu:

$$\sigma_{V,GEH} = \sqrt{\left(|\sigma_{SW,N}| + |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|\right)^2 + 3 \cdot (\tau_4 + \tau_5)^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$\sigma_{V,GEH} \leq \frac{R_{p0,2,VE}}{S_F}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 7

Die Aufbiegung der VE-Zungen kann analog zum Zentralschraubenverbinder ermittelt werden (Kapitel 4.3.4). Die Verschiebung f an der Stelle der Sperrklinken kann damit wie folgt ermittelt werden:

$$f = \left[\frac{12}{E \cdot b} \cdot \left(\frac{\lg es}{H-h} \right)^3 \left[\ln H + \frac{2}{H} \cdot \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right) - \frac{1}{2 \cdot H^2} \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right)^2 \right] - \ln \left(h + (H-h) \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right) - 1,5 \right] + \left(F_{SW,N} + F_{K45} \right) + \frac{\lg es}{G \cdot b \cdot (H-h)} \cdot \ln \left(1 + \frac{(H-h) \cdot a}{\lg es \cdot \left(h + (H-h) \cdot \left(1 - \frac{a}{\lg es} \right) \right)} \right)$$

- mit l_{ges} ... Gesamtlänge der betrachteten VE-Zunge, z.B. $l_{A,ges}$
 H ... Höhe der betrachteten VE-Zunge am Mittelsteg des VEs
 h .. Höhe der betrachteten VE-Zunge am äußeren Zungenende

Zur Durchführung des Festigkeitsnachweises wird die Durchbiegung der äußeren (f_a) und inneren (f_i) VE-Zunge ermittelt. Die Bedingung gegen Versagen lautet dann unter Berücksichtigung der Sperrklinken-Stauchung aus Versagensfall 2:

$$f_a + f_i < h_{Klinke,g-C}$$

Die Kraft F_{K5} wirkt zwar nie gleichzeitig an zwei zusammengehörigen inneren und äußeren VE-Zungen, sie wird jedoch zur Vereinfachung stets mitgerechnet. Der damit zur sicheren Seite hin begangene Fehler ist sehr klein.

4.6.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Das Sandwichelement wird durch die Verbindung nur auf Flächenpressung in der Klemmstelle beansprucht. Dieser Festigkeitsnachweis wurde schon in Kapitel 4.6.4 geführt, weitere Betrachtungen sind daher nicht notwendig.

4.7 VE-Block 5: Sperrelement-Schrauben-Verbinder

Die beiden in diesem Block vertretenen Lösungen 13A und 13B unterscheiden sich nur dadurch, dass die Sperrelement (SE) -Schrauben auf beiden bzw. nur auf einer Seite des VEs eingesetzt werden. Da die Auslegung einfacher Schraubenverbindungen hinreichend bekannt ist, wird im Folgenden nur Lösung 13A mit beidseitigen SE-Schrauben betrachtet.

Bei diesem VE existiert eine bestimmte Anzahl diskreter Fügstellen, so dass die Auslegung in enger Anlehnung an Kapitel 4.4 erfolgen kann. Die nachfolgenden Berechnungen sowie die Gestaltung erfolgen zum Teil nach [37].

4.7.1 Geometrische Kennwerte

Das Fügen von Sandwich und VE geschieht über die SE-Schrauben mittels Kraftschluss. Die geometrischen Kennwerte der Verbindung werden in Abbildung 45 veranschaulicht, für eine bessere Übersicht sind die SE-Schrauben nicht dargestellt.

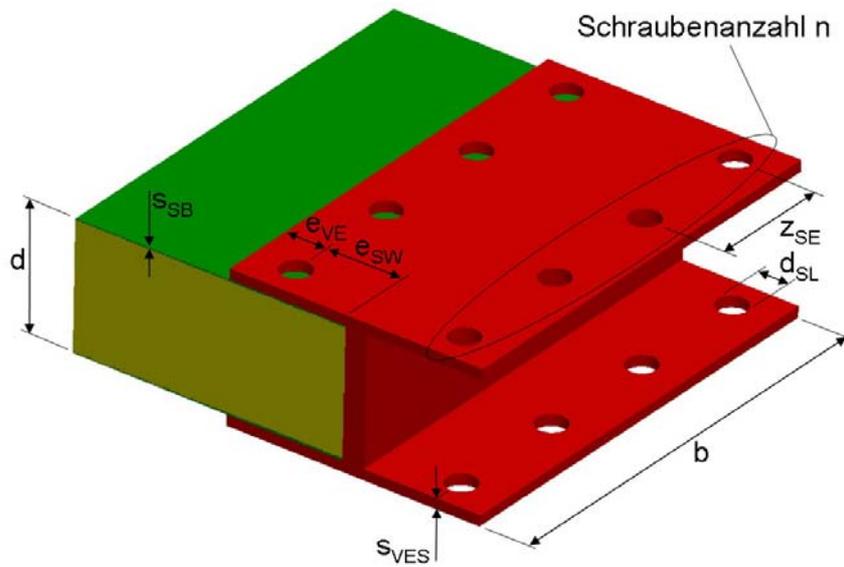


Abbildung 45: Kenngrößen der Sperrelement-Schrauben-Verbindung

Folgende Kenngrößen sind für die Auslegung relevant:

- d ... Sandwichdicke (außen)
- s_{SB} ... Dicke Sandwich-Deckblech
- s_{VES} ... Dicke der VE-Zungen im Schraubensbereich
- b ... VE-Breite
- z_{SE} ... SE-Schraubenabstand
- d_{SL} ... Schraubenloch-Durchmesser
- e_{VE} ... Randabstand der Schraubenlöcher im VE
- e_{SW} ... Randabstand der Schraubenlöcher im Sandwich
- n ... Anzahl der Schrauben pro Sandwich-Deckblech

4.7.2 Belastung der Fugestelle

Die Kräfte und Momente, die auf die Verbindungsstelle wirken, können direkt vom Standardschraubenverbinder übernommen werden. Sie sind in Tabelle 21 dargestellt.

Nr.	Belastung	Belastung Fügestelle F_F	Richtung von F_F
1	$F_{Z/Dy}$	$F_{SE1} = \frac{F_{Z/Dy}}{2 \cdot n}$	in y-Richtung
2	M_{Bx}	$F_{SE2} = \frac{M_{Bx}}{d \cdot n}$	in y-Richtung
3	M_{Bz}	$F_{SE3,max} = \frac{3 \cdot M_{Bz} \cdot (n-1)}{z_{SE} \cdot (n^3 - n)}$	in y-Richtung
4	M_{Ty}	$F_{SE4/1,max} = \frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot (n-1) \cdot z_{SE} \cdot \frac{1}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_{SE}^2} \text{ (axial)}$ $F_{SE4/2,max} = \frac{1}{2} \cdot M_{Ty} \cdot d \cdot \frac{1}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_{SE}^2} \text{ (radial)}$	in z-Richtung (axial)/in x-Richtung (radial)
5	F_{Qz}	$F_{SE5} = \frac{F_{Qz}}{2 \cdot n}$	in z-Richtung
6	F_{Qx}	$F_{SE6} = \frac{F_{Qx}}{2 \cdot n}$	in x-Richtung

Tabelle 21: Belastungen der Fügstellen des SE-Schrauben-Verbinders

4.7.3 Resultierende Gesamtbelastung

Die resultierenden Gesamtbelastungen, die radial bzw. axial auf die SE-Schrauben wirken, können direkt vom Standardschraubenverbinder übernommen werden:

$$F_{SE,radial,max} = \sqrt{\left(\frac{|F_{Z/Dy}|}{2 \cdot n} + \frac{|M_{Bx}|}{d \cdot n} + \frac{3 \cdot |M_{Bz}| \cdot (n-1)}{z_{SE} \cdot (n^3 - n)} \right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{2} |M_{Ty}| \cdot d}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_{SE}^2} + \frac{|F_{Qx}|}{2 \cdot n} \right)^2}$$

$$F_{SE,axial,max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|M_{Ty}| \cdot (n-1) \cdot z_{SE}}{d^2 + (n-1)^2 \cdot z_{SE}^2} + \frac{|F_{Qz}|}{2 \cdot n}$$

4.7.4 Festigkeitsnachweis der Fügeelemente

Für den Fügebereich der Verbindung müssen folgende Versagensfälle ausgeschlossen werden:

Versagensfall 1

Die maximal belastete SE-Schraube versagt.

Versagensfall 2

Die maximal zulässige Flächenpressung zwischen SE-Schraube und VE-Zunge bzw. Sandwich-Deckblech wird überschritten.

Versagensfall 3

$F_{SE,radial,max}$ wird so groß, dass die an der maximal belasteten Verschraubungsstelle maximal übertragbare Reibkraft überschritten wird.

Versagensfall 4

$F_{SE,axial,max}$ wird so groß, dass an einer Verbindungsstelle der Kontakt zwischen Sandwich-Deckblech und VE verloren geht.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 1

Zur Auslegung der SE-Schraube müssen die wesentlichen qualitativen Gestaltparameter festgelegt werden (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47). Die SE-Schraube ist dreiteilig aufgebaut. Beim Fügen wird der Schraubenkörper von außen mittels eines Innensechskant-Schlüssels in den Schraubenkopf gedreht, an dem gegengehalten wird (nicht dargestellt). Dadurch wird der Spreizring aufgeweitet und nach oben geschoben (das Kernmaterial des

Sandwichs wird dabei entweder verdrängt oder muss, bei einem sehr harten Kern, vor dem Fügen entfernt werden). Das Wirkprinzip des Sperrkörpers entspricht dabei der SE-Lösung 85 (translatorische Verschiebung der Sperrkörper in x- oder y-Richtung und Keileffekt, siehe Anhang). Liegt der Ring an der Unterseite der Sandwichdeckschicht an, so kann die Verbindung durch weiteres Drehen des Innensechskant-Schlüssels wie eine herkömmliche Schraubenverbindung vorgespannt werden.

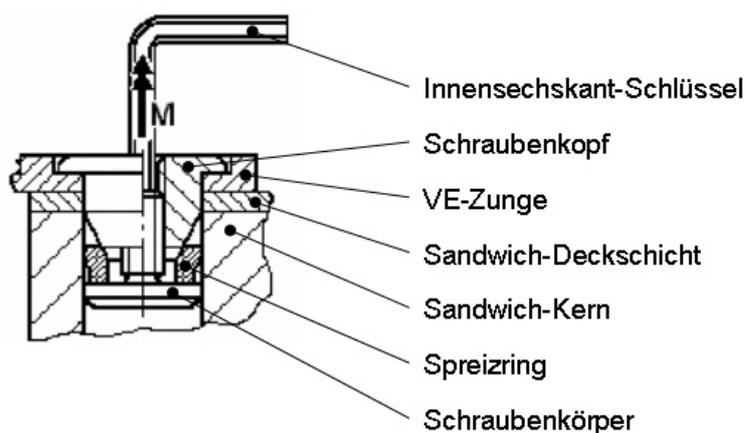


Abbildung 46: Gestalt der SE-Schraube

Eine genaue Berechnung der Schraubenverbindung nach VDI 2230 [31] ist hier nicht notwendig, da durch die nachfolgenden Betrachtungen klar wird, dass das Element, durch welches die mögliche Vorspannkraft F_V begrenzt wird, der Spreizring und nicht die Schraube ist.

Der Aufbiegevorgang des Spreizrings wird nicht weiter betrachtet. Die dabei auftretenden Schraubenkräfte sind im Vergleich zum nachfolgenden Spannvorgang der Verbindung sehr gering. Der Nachweis für die plastische Ringverformung wäre aufgrund des unsymmetrischen Spreizringquerschnitts sehr aufwändig. Die Funktionsfähigkeit des Rings wird daher mit Hilfe der in Kapitel 5 angefertigten Prototypen nachgewiesen.

Versagen des Spreizrings

Wird durch die Vorspannkraft F_V die Fließgrenze des Spreizrings überschritten, so kommt es zum Versagen. Die größte Spannung im Spreizring entsteht an der Kontaktstelle zum Schraubenkörper, da er dort im gefügten Zustand nicht mehr voll aufliegt (siehe Abbildung 47). Da der Ring aufgespreizt wird, scheiden für seine Herstellung hochfeste Werkstoffe mit hoher

Streckgrenze aus. Es wird ein Werkstoff mit gutem plastischen Verformungsvermögen und niedriger Streckgrenze benötigt. Die zulässige Flächenpressung an der Kontaktstelle zwischen Ring und Schraubenkörper wird daher mit hoher Wahrscheinlichkeit zuerst am Spreizring überschritten.

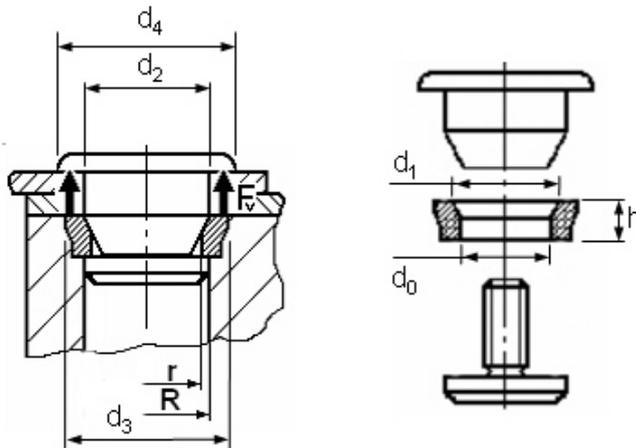


Abbildung 47: SE-Schraube in gefügtem (links) und ungefügtem (rechts) Zustand.

Im Folgenden wird die maximal zulässige Vorspannkraft der SE-Schraube berechnet.

Der Öffnungswinkel φ des Spreizrings (siehe Abbildung 48) errechnet sich folgendermaßen:

$$U_1 = L_1 = \pi \cdot d_1$$

$$U_2 = \pi \cdot d_2$$

$$L_1 = L_2 = L$$

$$\frac{L}{U_2} = \frac{360^\circ - \varphi}{360^\circ}$$

$$\varphi = 360^\circ \cdot \left(1 - \frac{L}{U_2}\right)$$

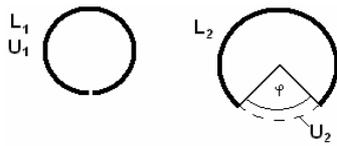


Abbildung 48: Öffnungswinkel des Spreizrings

Damit ergibt sich die druckbeanspruchte Auflagefläche A_{Druck} zwischen Spreizring und Schraubenkörper zu:

$$A_{Druck} = \frac{L}{U_2} \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2)$$

Die Druckspannung an der Auflagefläche beträgt:

$$\sigma_D = \frac{F_V}{A_{Druck}}$$

Außerdem wirkt eine Scherbelastung auf den Ring, da die Krafteinleitung nicht auf einer Wirkungslinie geschieht. Die Scherspannung beträgt:

$$\tau = \frac{F_V}{A_{Scher}} = \frac{F_V}{\frac{L}{U_2} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot h}$$

Damit ergibt sich folgende Vergleichsspannung:

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{F_V}{A_{Druck}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{F_V}{A_{Scher}}\right)^2}$$

Mit der Sicherheit s_F gegen Versagen des Rings durch Fließen,

$$S_F = \frac{R_{p0,2, Ring}}{\sigma_V},$$

ergibt sich die maximal zulässige Vorspannkraft $F_{V,zul}$ einer SE-Schraube zu:

$$F_{V,zul} = \frac{R_{p0,2, Ring}}{S_F \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{A_{Druck}^2} + \frac{3}{A_{Scher}^2} \right)}}$$

Versagen der Schraube

Der begrenzende Faktor für die maximale Schraubenkraft ist die Spannung im engsten Querschnitt der Schraube. Der Spannungsquerschnitt entspricht DIN 13-28, so dass die Kraft an der Mindest-Streckgrenze z.B. VDI 2230 Tabelle A11 entnommen werden kann. Sie beträgt z.B. für eine Schraube M8 der Festigkeitsklasse 8.8:

$$F_{0,2min} = 23400N$$

Diese Kraft liegt in der Regel weit oberhalb der Kraft, die der Spreizring aufgrund der Flächenpressung ertragen kann. Sie kann zudem durch Auswahl einer geeigneten Schraube jedem Lastfall angepasst werden, so dass ein Versagen ausgeschlossen werden kann.

Erforderliches Anzugsmoment

Das Anzugsmoment wird in Anlehnung an VDI 2230 berechnet:

$$M_A = F_{V,zul} \cdot \left(0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K \right)$$

- mit
- P ... Gewindesteigung
 - d₂ ... Flankendurchmesser des Gewindes
 - μ_G ... Reibungsbeiwert im Gewinde
 - D_{Km} ... wirksamer Durchmesser für das Reibmoment
 - μ_K ... Reibungsbeiwert unter dem Kopf des Schraubenkörpers

(alle Bezeichnungen nach VDI 2230)

M_A ist das maximale Anzugsmoment, welches der Spreizring ertragen kann.

Das erforderliche Anzugsmoment wird am größten, wenn der Ring am weitesten aufgespreizt ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der mittlere Reibdurchmesser maximal:

$$D_{Km} = \frac{2(r + R)}{2} = r + R$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 2

Die Kontaktfläche zwischen dem aufgeweiteten Spreizring und dem Sandwich-Deckblech beträgt:

$$A_{SW} = \frac{L}{U_2} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{d_3}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right)$$

Der Festigkeitsnachweis gegen zu hohe Flächenpressung lautet damit:

$$\boxed{\frac{F_V}{A_{SW}} \leq \frac{R_{p0,2,SD}}{s_F}} \quad \text{mit } R_{p0,2,SD} \dots \text{ Streckgrenze des Sandwich-Deckblechs.}$$

Die Flächenpressung am Spreizring wurde bereits im Versagensfall 1 nachgerechnet.

Die Kontaktfläche zwischen dem Schraubenkopf und der VE-Zunge beträgt:

$$A_{VE} = \pi \cdot \left(\left(\frac{d_4}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \right)$$

Der Festigkeitsnachweis gegen zu hohe Flächenpressung lautet damit:

$$\boxed{\frac{F_V}{A_{VE}} \leq \frac{R_{p0,2}}{s_F}} \quad \text{mit } R_{p0,2} \dots \text{ Streckgrenze der VE-Zunge oder des SE-Schraubenkopfs (kleinerer Wert)}$$

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 3

Die maximal belastete SE-Schraube erfährt die Kraft $F_{SE,radial,max}$. Die durch eine SE-Schraube aufgrund der Vorspannkraft F_V maximal übertragbare Reibkraft beträgt (die Reibung zwischen Spreizring und Sandwich-Deckschicht wird vernachlässigt):

$$F_{R,max,SE} = \mu_{VE-SW} \cdot F_V \quad \text{mit } \mu_{VE-SW} \dots \text{ Reibungsbeiwert zwischen VE und Sandwich-Deckblech}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$F_{SE,radial,max} \leq F_{R,max,SE}$$

Die nachfolgend untersuchte Axialbelastung der SE-Schrauben hat, wie schon bei anderen Verbindern nachgewiesen, keinen Einfluss auf diesen Nachweis.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 4

Die maximal belastete SE-Schraube erfährt die Kraft $F_{SE,axial,max}$. Jede SE-Schraube kann maximal eine Axialkraft vom Betrag F_V aufnehmen, danach verliert das Sandwich-Deckblech den Kontakt zur VE-Zunge. Der Festigkeitsnachweis lautet damit:

$$F_{SE,axial,max} \leq F_V$$

4.7.5 Festigkeitsnachweis der Verbindungselemente

Für die Verbindungselemente sind folgende Versagensfälle relevant:

Versagensfall 5

Die äußeren Belastungen führen zu einem Versagen der VE-Zungen.

Festigkeitsnachweis gegen Versagensfall 5

An dieser Stelle kann aus Kapitel 4.4.5 der Festigkeitsnachweis 5 für Lösung 3 direkt übernommen werden. Dabei müssen in den Gleichungen nur folgende Größen ersetzt werden: d_{NL} durch d_{SL} , s_{VEN} durch s_{VES} , Z_N durch Z_{SE} .

4.7.6 Festigkeitsnachweis am Sandwichelement

Das Sandwichelement wird durch die Verbindung nur auf Flächenpressung in der Klemmstelle belastet. Dieser Festigkeitsnachweis wurde schon in Kapitel 4.7.4 geführt, weitere Betrachtungen sind daher nicht notwendig.

4.8 VE-Block 6: Low-Cost-Verschlüsse

Von den drei in diesem Block vertretenen Lösungen werden aus Zeitgründen nur das Durchsetzfügen und das Körnen weiter behandelt, da sich diese beiden Lösungen sehr ähnlich sind.

Das Durchsetzfügen wird in der Industrie schon seit längerer Zeit erfolgreich angewandt. Es finden sich jedoch nur sehr wenige konkrete Informationen zur Verbindungsauslegung, da dieses Know-How fast ausschließlich bei den Herstellern liegt und jede Verbindungsaufgabe dort individuell gelöst wird. Das Körnen wird industriell kaum angewandt, so dass auch hier nur wenige Informationen verfügbar sind.

Aus den oben genannten Gründen erfolgt die Auslegung der Verbindungen dieses VE-Blocks ausschließlich nach Warkotsch [38], dessen Arbeit parallel zu dieser Dissertation durchgeführt wurde. Da eine genaue Verbindungsauslegung ohne experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der relevanten Verbindungsparameter nicht möglich ist, werden die Low-Cost-Verschlüsse an dieser Stelle nicht weiter behandelt. In Kapitel 5.8 wird mit Hilfe der bekannten Informationen ein Demonstrator erstellt, der die in [38] ermittelten besten Lösungen veranschaulicht und als Basis für weitere Untersuchungen dient.

5 Gestaltung von Prototypen

Die Leistungsfähigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sandwichverbindungen soll am IKT in einer weiteren Projektphase mittels Prüfstandversuchen nachgewiesen werden. Zu diesem Zweck wird im Folgenden von einer Lösung jedes Lösungsblocks ein Prototyp gestaltet und die entsprechenden Fertigungsunterlagen erstellt. Die Höhe der äußeren Belastungen wird bei den einzelnen Prototypen variiert, um bei späteren Versuchen unterschiedliche Lastfälle testen zu können. Um diese Versuche einfach zu gestalten werden jeweils maximal zwei Belastungen angenommen.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass der Bau der Prototypen aufgrund der eingeschränkten Fertigungsmöglichkeiten der Institutswerkstatt gewissen Zwängen unterliegt. So kann z.B. nur eine minimale VE-Zungendicke von 3mm realisiert werden, außerdem sind die Prototypen mehrteilig aufgebaut, um die Herstellung der einzelnen Bauteile durch spanende Bearbeitung zu ermöglichen. Dies führt zwar zu einer nicht optimalen Gestalt der Verbinder (z.B. nicht optimal gestalteter Übergang zwischen VE-Zungenende und Sandwichdeckblech), die wichtigsten Funktionen hinsichtlich der Verbindung zweier Sandwichelemente bleiben jedoch erhalten.

Bevor die Gestaltung der einzelnen Prototypen erfolgt, wird auf die allgemeine Formgebung der VE-Abschlüsse eingegangen.

5.1 Gestaltung der VE-Abschlüsse

Der Übergangsbereich zwischen Sandwich und VE muss besonders beachtet werden. Hier kann eine falsche Gestaltung des VEs zu einem frühzeitigen Versagen des Sandwichs führen.

Die Verbindungsstelle von Sandwich und VE kann in drei Bereiche eingeteilt werden (siehe Abbildung 49).

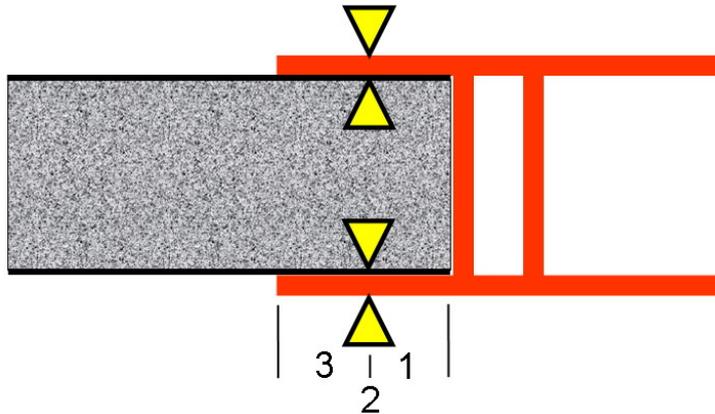


Abbildung 49: Die drei Bereiche der Verbindungsstelle

Bereich 1

Dies ist der Bereich zwischen VE-Mitte und Fügestelle. Die Gestalt wird von den Anforderungen bestimmt, die sich aus dem allgemeinen Lastfall ergeben. Die genauen Dimensionen werden während der Festigkeitsauslegung in Kapitel 4 bestimmt.

Bereich 2

Dies ist der Bereich der Fügestelle. Hier werden die äußeren Belastungen vom Sandwich in das VE geleitet oder umgekehrt. Die genauen Dimensionen werden auch hier während der Festigkeitsauslegung in Kapitel 4 bestimmt.

Bereich 3

Dies ist der Abschlussbereich des VEs und der Übergang zum Sandwich. Die Gestaltung des VEs sollte den Prinzipien der Kraftleitung entsprechen. Dabei ist vor allem auf sanfte Querschnittsübergänge zu achten, so dass die Festigkeit des Sandwichs durch die Anbindung an das VE möglichst wenig gemindert wird.

Um eine optimale Gestaltung für den Abschlussbereich zu erreichen, wird im Folgenden eine Belastungsanalyse für die drei eingesetzten VE-Typen durchgeführt. Dabei werden in

Tabelle 22 die Auswirkungen der sechs Grundbelastungen des allgemeinen Lastfalls auf den Abschlussbereich untersucht.

Nr.	Belastung	Auswirkung auf VE-Abschluss 	Auswirkung auf VE-Abschluss 
1	F_{zDy}	Keine Auswirkung, Kräfteinleitung ins VE erfolgt erst an der Fügestelle.	F_{zDy} wird durch die Klemmwirkung der VE-Zungen einer Seite schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Zug oder Druck beansprucht.
2	M_{Bx}	M_{Bx} wird an der Innenseite der Biegung schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden VE-Zungen werden auf Zug oder Druck und auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).	M_{Bx} wird auf jeder VE-Seite an der Innenseite der Biegung schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden VE-Zungen werden auf Zug oder Druck und auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).
3	M_{Bz}	Keine Auswirkung, Kräfteinleitung ins VE erfolgt erst an der Fügestelle.	M_{Bz} wird durch die Klemmwirkung der VE-Zungen einer Seite schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Biegung (d.h. Zug oder Druck) beansprucht.
4	M_{Ty}	M_{Ty} wird in den Druckzonen zwischen Sandwich und VE schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Scherung und, aufgrund der Deformation des Sandwichs, auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).	M_{Ty} wird in den Druckzonen zwischen Sandwich und VE schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Scherung und, aufgrund der Deformation des Sandwichs, auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).
5	F_{Oz}	F_{Oz} wird in der Druckzone zwischen Sandwich und VE auch schon im Bereich 3 mit aufgenommen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Scherung und, aufgrund der Deformation des Sandwichs, auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).	F_{Oz} wird in der Druckzone zwischen Sandwich und VE auch schon im Bereich 3 mit aufgenommen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Scherung und, aufgrund der Deformation des Sandwichs, auf Biegung beansprucht (diese Biegung wurde bei der Auslegung in Kapitel 4 vernachlässigt).
6	F_{Ox}	Keine Auswirkung, Kräfteinleitung ins VE erfolgt erst an der Fügestelle.	F_{Ox} wird durch die Klemmwirkung der VE-Zungen einer Seite schon im Bereich 3 auf das VE übertragen, die entsprechenden Bereiche der VE-Zungen werden auf Scherung beansprucht.

Tabelle 22: Auswirkungen der Grundbelastungen auf die VE-Abschlüsse (Bereich 3)

Die Belastungen können bzgl. Ihrer Wirkung auf die Sandwichabschlüsse in drei Gruppen eingeteilt werden.

Belastungsgruppe 1: M_{Bx}

Das Moment M_{Bx} bewirkt u.a. eine Biegung des Sandwichs, die an der jeweiligen Biegungsinenseite auch schon im Bereich 3 auf das VE übertragen wird. Daraus ergeben sich folgende Gestaltungsrichtlinien:

- Die VE-Zungen sollten biegeweich gestaltet werden, so dass eine sanfte Einleitung des Moments vom Sandwich ins VE möglich ist. Ist dies bauraumbedingt nicht möglich, so sollten die Zungenenden auf der Deckblechseite mit einem großen Radius versehen werden, damit trotzdem ein gewisser sanfter Übergang vorhanden ist.
- Die Enden der VE-Zungen sollten abgerundet sein, um evtl. auftretende Relativbewegungen zwischen Zungen und Sandwichdeckschicht ohne Verhaken zu ermöglichen.

Belastungsgruppe 2: M_{Ty} , F_{Qz}

M_{Ty} und F_{Qz} wirken in z-Richtung auf das VE. Durch eine Verformung des Sandwichs unter Last kann es, wie in Belastungsgruppe 1, zu einer Biegebeanspruchung der VE-Zungen kommen. Trotzdem genügt es hier nicht, die VE-Zungen biegeweich auszuführen, da auch die Querkraft ohne zu große Verformungen an der Verbindungsstelle ins VE geleitet werden soll.

Bei VEs mit zwei Zungen muss daher bzgl. deren Steifigkeit ein Kompromiss gefunden werden. Bei VEs mit vier Zungen bietet sich eine Aufgabenteilung an:

Die inneren Zungen werden relativ steif ausgeführt. Auf diese Weise werden Querkräfte an der zugbeanspruchten Sandwichdeckschicht abgestützt, die druckbeanspruchte und damit knickgefährdete Deckschicht wird nicht noch zusätzlich belastet (die Zug- oder Druckbeanspruchung der Deckschichten entsteht aufgrund der Sandwichbiegung, die wiederum als „Nebenwirkung“ der Querkraftbelastung auftritt). Der Rand der inneren Zungen wird dabei scharf, d.h. ohne ausgeprägten Radius, gestaltet, so dass es zwischen Sandwichkern und inneren Zungen keinen Bereich gibt, in dem die Deckschichten nicht gestützt werden. Abbildung 50 verdeutlicht diesen Sachverhalt.



Abbildung 50: Gestaltung eines VEs mit vier Zungen für Belastungsgruppe 2

Die äußeren Zungen werden biegeweich mit abgerundeten Enden ausgeführt (siehe Belastungsgruppe 1). Auf diese Weise wird die empfindlichere druckbeanspruchte Sandwichdeckschicht minimal belastet.

Belastungsgruppe 3: $F_{Z/Dy}$, M_{Bz} , F_{Qx}

Bei VEs mit vier Zungen werden diese drei Belastungen ganz oder wenigstens zum Teil über Reibung in den Einspannflächen vom Sandwich an das VE weitergegeben. Beim Einspannen der Sandwich-Deckbleche sollte ein scharfer Übergang zwischen Spannbereich und freiem Deckschichtbereich vermieden werden. Abbildung 51 zeigt auf der rechten Seite wieder die beiden Möglichkeiten bei ausreichend vorhandenem Bauraum (oben) bzw. bei beschränktem Bauraum (unten). Zusätzlich sollte am VE zur Übertragung von Druckkräften eine Anlagefläche für den Sandwichkern vorgesehen werden, so dass die Knittergefahr der Sandwichdeckschichten an der Übergangsstelle reduziert wird.

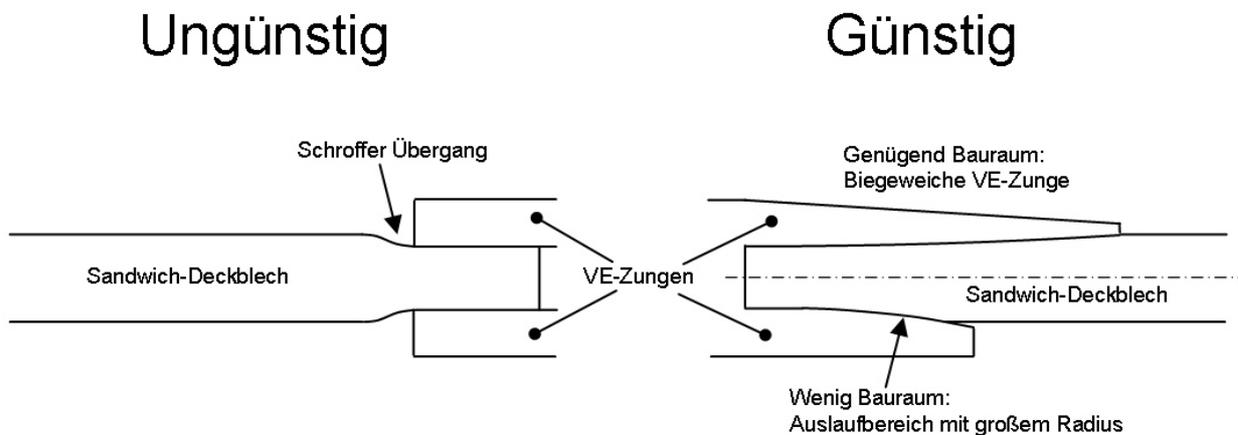


Abbildung 51: Gestaltung des VE-Spannbereichs für Belastungsgruppe 3

Tabelle 23 fasst die Gestaltungsrichtlinien für VE-Abschlüsse nochmals zusammen.

<p>I, Bauraum ausreichend</p>	<p>I, Bauraum gering</p>
<p>Abgerundete Kante</p> <p>Auslauf so sanft wie möglich, so querkraftsteif wie nötig</p>	<p>Großer Auslaufradius</p> <p>Abgerundete Kante</p>
<p>II/II, Bauraum ausreichend</p>	<p>II/II, Bauraum gering</p>
<p>Abgerundete Kante</p> <p>Sanfter Auslauf</p> <p>Kernanlagefläche</p> <p>Auslauf so sanft wie möglich, so querkraftsteif wie nötig</p>	<p>Großer Auslaufradius</p> <p>Abgerundete Kante</p> <p>Kernanlagefläche</p>

Tabelle 23: Zusammenfassung der Gestaltungsrichtlinien für VE-Abschlüsse

5.2 Prototyp 1: Standardschraubenverbinder

Für die Gestaltung des Standardschraubenverbinders wurden in Kapitel 4.2 folgende Festlegungen getroffen:

- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=10000N$ und $F_{Qz}=500N$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200mm$.
- Das Material des VEs ist Aluminium mit $E=70000 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2}\approx 150N/mm^2$, $R_m\approx 290N/mm^2$, $\tau_{aB}\approx 150N/mm^2$.
- Der Festigkeitsnachweis 1 wurde bereits in Kapitel 4.2.4 geführt.
- Aus Festigkeitsnachweis 2 folgt:

$$\sigma_1 = \frac{0,5 \cdot 10000N}{(200mm - 8 \cdot 5mm) \cdot 12,5mm + (200mm - 8 \cdot 14mm) \cdot 7mm} = 1,9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_5 = \frac{0,5 \cdot 500N}{(200mm - 8 \cdot 5mm) \cdot 12,5mm + (200mm - 8 \cdot 14mm) \cdot 7mm} = 0,096 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 1,9 \frac{N}{mm^2}$$

$$1,9 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 1,9 \leq 125$$

Abbildung 52 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Standardschraubenverbinders, Abbildung 53 bis Abbildung 55 den fertigen Prototypen. Die VE-Zungen wurden entsprechend der Gestaltungsrichtlinie für ausreichend vorhandenen Bauraum (vgl. Tabelle 23) dimensioniert.

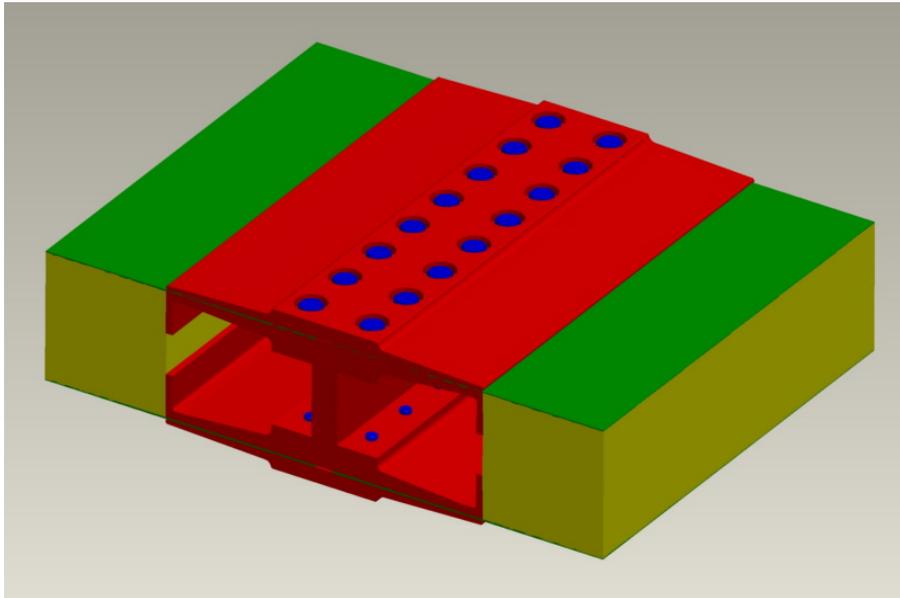


Abbildung 52: 3D-Modell des Standardschraubenverbinders in Pro/Engineer Wildfire



Abbildung 53: Fertiger Prototyp des Standardschraubenverbinders, Bild 1



Abbildung 54: Fertiger Prototyp des Standardschraubenverbinders, Bild 2

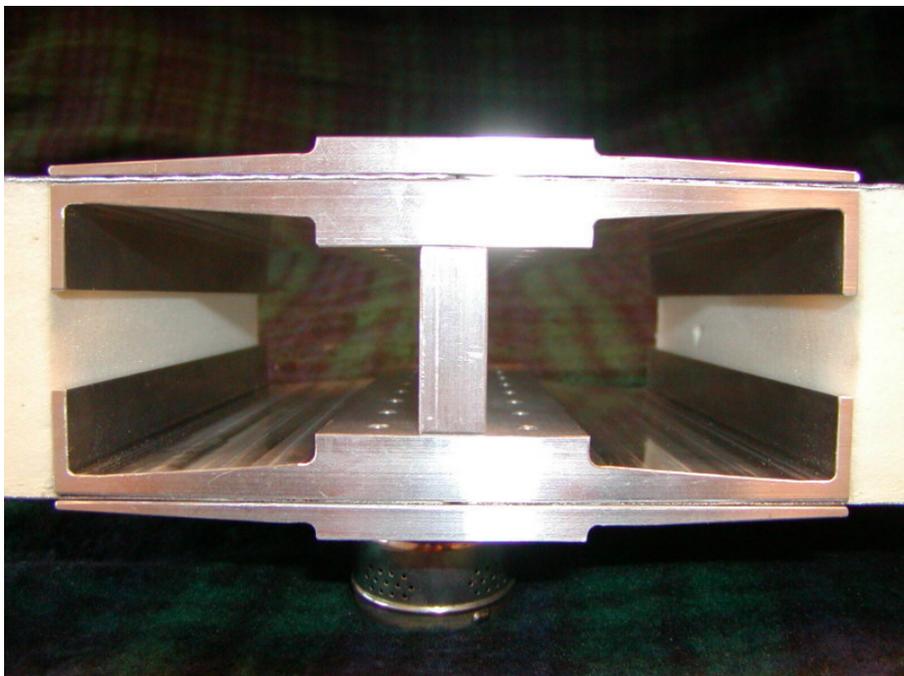


Abbildung 55: Fertiger Prototyp des Standardschraubenverbinders, Bild 3

Erster Eindruck

Das Fügen des Standardschraubenverbinders ist problemlos möglich, jedoch aufgrund der hohen Schraubenanzahl etwas zeitintensiv. Der Verbinder macht einen sehr stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht. Die massive Ausführung des VEs führt zu einem sehr hohen Gewicht, hier besteht Optimierungspotenzial.

5.3 Prototyp 2: Zentralschraubenverbinder

Für die Gestaltung des Zentralschraubenverbinders werden folgende Festlegungen getroffen (alle Festigkeitsnachweise werden nach Kapitel 4.3 durchgeführt):

- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=750N$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200mm$.
- Das Material des VEs ist Aluminium mit $E=70000 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2}\approx 150N/mm^2$, $R_m\approx 290N/mm^2$, $\tau_{aB}\approx 150N/mm^2$.
- Aus Festigkeitsnachweis 1 folgt:

$$F_{Vz} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 750N}{0,15 \cdot 2} = 2500N$$

Die inneren VE-Zungen entsprechen nicht exakt der Gestalt, die zur Ermittlung der für das Vorspannen notwendigen Verschiebung f_v angenommen wurde, für eine gute Näherung sind die ermittelten Formeln jedoch ausreichend. Damit ergibt sich:

$$f_v = f_m + f = \frac{2 \cdot (2500N) \cdot (21mm)^3}{70000 \frac{N}{mm^2} \cdot 200mm \cdot (3mm)^3} + 0,0179 = 0,1404mm$$

Die Größe f wurde wegen der komplexen Formel mit Hilfe einer Excel-Tabelle bestimmt, aus diesem Grund ist hier nur der Zahlenwert angegeben.

- Festigkeitsnachweis 2 entfällt, da $F_{45}=0$.

- Aus Festigkeitsnachweis 3 folgt:

$$\sqrt{\frac{\frac{1}{2} \cdot 2500N \cdot 70000 \frac{N}{mm^2}}{2 \cdot \pi \cdot 100mm \cdot \frac{200mm}{2} \cdot (1 - 0,3^2)}} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 39,1 \leq 125$$

- Festigkeitsnachweis 4 wurde bereits in Kapitel 4.3.4 durchgeführt.
- Aus Festigkeitsnachweis 5 folgt:

$$\sigma_{Vz} = \frac{3 \cdot 2500N \cdot 21mm}{200mm \cdot (3mm)^2} = 87,5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{750N}{4 \cdot 200mm \cdot 3mm} = 0,313 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 87,8 \frac{N}{mm^2}$$

$$87,8 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 87,8 \leq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 6 folgt:

$$\sigma_{Vz} = \frac{3 \cdot 2500N \cdot 26mm}{200mm \cdot (9mm)^2} = 12,0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{750N}{4 \cdot 200mm \cdot 9mm} = 0,10 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 12,1 \frac{N}{mm^2}$$

$$12,1 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 12,1 \leq 125$$

Abbildung 56 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Zentralschraubenverbinders, Abbildung 57 bis Abbildung 59 den fertigen Prototypen.

Aufgrund der Gestaltungsregeln für bauraumsparende VE-Abschlüsse ergibt sich zwischen den äußeren VE-Zungen und dem Sandwich-Deckblech ein Spalt. Dieser wurde mittels einer Rundschnurdichtung in den äußeren VE-Zungen geschlossen.

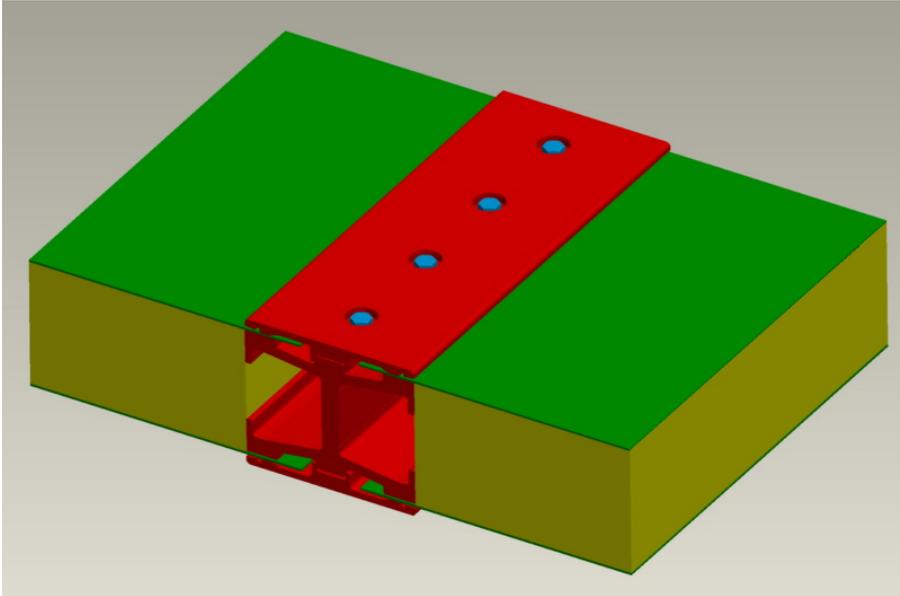


Abbildung 56: 3D-Modell des Zentralschraubenverbinders in Pro/Engineer Wildfire

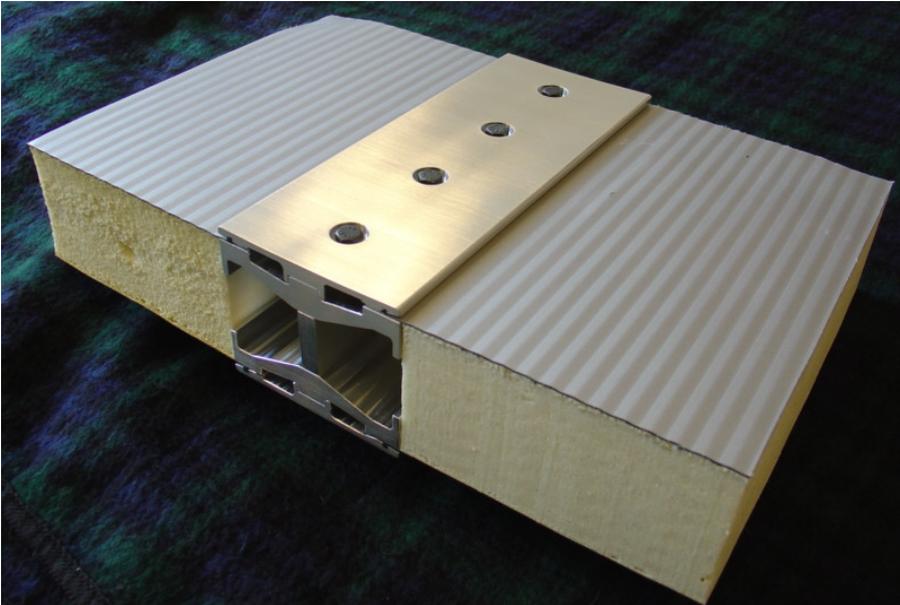


Abbildung 57: Fertiger Prototyp des Zentralschraubenverbinders, Bild 1

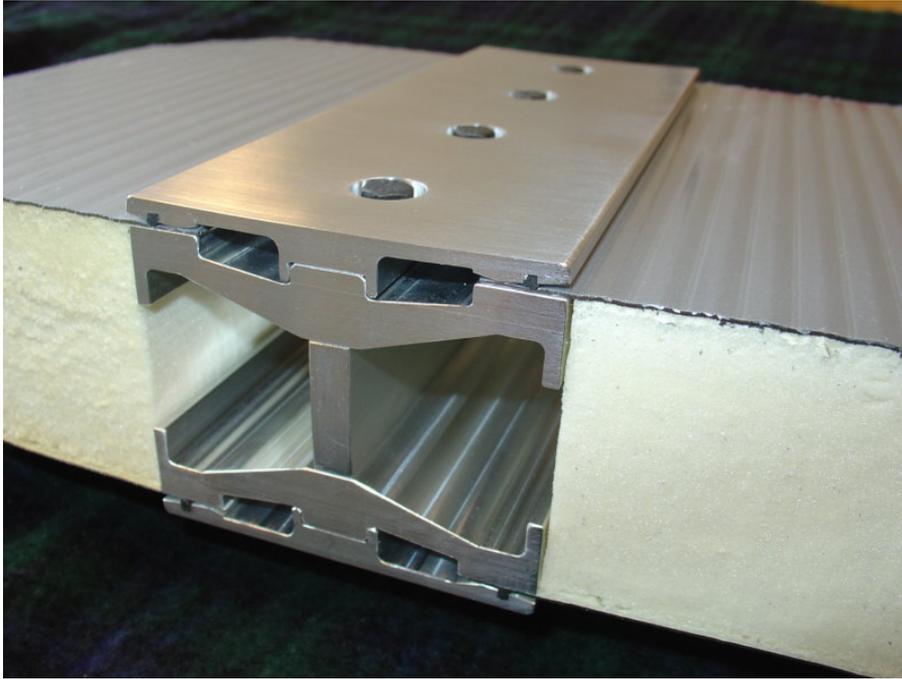


Abbildung 58: Fertiger Prototyp des Zentralschraubenverbinders, Bild 2

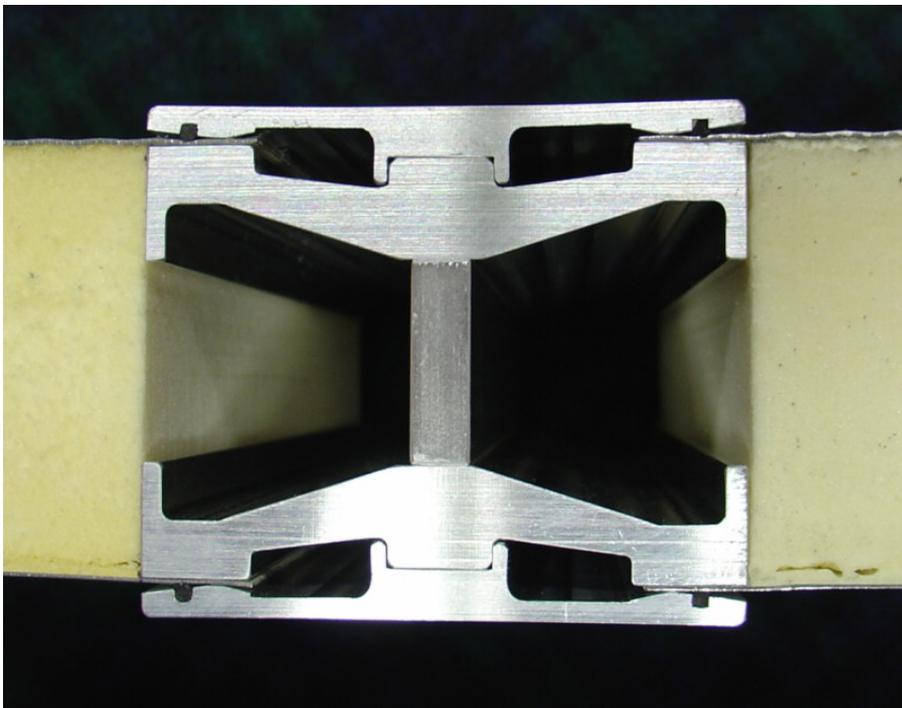


Abbildung 59: Fertiger Prototyp des Zentralschraubenverbinders, Bild 3

Erster Eindruck

Das Fügen des Zentralschraubenverbinders ist problemlos und vergleichsweise schnell möglich. Wird das VE wieder geöffnet, so kehren die vorgespannten äußeren VE-Zungen wieder in Ihre ursprüngliche Lage zurück, d.h. es liegt eine rein elastische Biegung vor. Der Verbinder macht einen stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht. Das VE ist relativ leicht, jedoch besteht auch hier noch Optimierungspotenzial.

5.4 Prototyp 3: Blindnietverbinder

Für die Gestaltung des Blindnietverbinders werden folgende Festlegungen getroffen (alle Festigkeitsnachweise werden nach Kapitel 4.4 durchgeführt):

- Als Verbindungselement wird Lösung 3 ausgewählt.
- Als Blindniet wird der Typ M-Lock aus Aluminium mit 100°-Senkkopf und 6,4mm Durchmesser verwendet ($Q_N=5783N$, $Z_n=3959N$).
- Es werden pro Sandwich-Deckblech $n=5$ Niete verwendet.
- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=6000N$ und $F_{Qz}=500N$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200mm$.
- Das Material des VE ist Aluminium mit $E=70000 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2}\approx 150N/mm^2$, $R_m\approx 290N/mm^2$, $\tau_{aB}\approx 150N/mm^2$.
- Für die Nietbelastungen erhält man:

$$F_{N,Scher,max} = \frac{6000N}{2 \cdot 5} = 600N, \quad F_{N,Zug,max} = \frac{500N}{2 \cdot 5} = 50N$$

- Aus Festigkeitsnachweis 1 folgt:
 $600N \leq 0,5 \cdot 5783N \cdot 1$, d.h. $600 \leq 2891,5$
- Aus Festigkeitsnachweis 2 folgt:

$$50N \leq \frac{3959N}{1,2}, \text{ d.h. } 50 \leq 3299$$

- Aus Festigkeitsnachweis 3 folgt:

$$\frac{600N}{5783N \cdot 0,5 \cdot 1} + \frac{50N}{0,2 \cdot 3959N \cdot \frac{1}{1,2}} < 1, \text{ d.h. } 0,28 < 1 \text{ mit } k=0,2 \text{ [4]}$$

- Aus Festigkeitsnachweis 4 folgt:

$$600N \leq 150 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 6,9\text{mm} \cdot 0,8\text{mm} \cdot \frac{1}{1,2}, \text{ d.h. } 600 \leq 690$$

Der zulässige Lochlaibungsdruck am Sandwich-Deckblech wird nicht überschritten. Dieser Nachweis ist für Lochlaibung ausreichend, da die VE-Zungen dicker als das Deckblech sind und die Druckfestigkeit des Niets mit der des Deckblech vergleichbar ist.

- Aus Festigkeitsnachweis 5 folgt:

$$\sigma_1 = \frac{0,5 \cdot 6000N}{(200\text{mm} - 5 \cdot 6,9\text{mm}) \cdot 5\text{mm}} = 3,63 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_5 = \frac{0,5 \cdot 500N}{200\text{mm} \cdot 5\text{mm}} = 0,25 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 3,66 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$3,66 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq \frac{150 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 3,66 \leq 125$$

- Festigkeitsnachweis 6 entfällt.
- Aus Festigkeitsnachweis 7 folgt:

$$600N \leq \frac{0,7 \cdot 290 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 5\text{mm} \cdot e_{VE}}{2,8}, \text{ d.h. } e_{VE} \geq 1,66\text{mm}$$

- Aus Festigkeitsnachweis 8 folgt:

$$600N \leq \frac{0,7 \cdot 290 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 0,8\text{mm} \cdot e_{SW}}{2,8}, \text{ d.h. } e_{SW} \geq 10,34\text{mm}$$

Abbildung 60 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Blindnietverbinders, Abbildung 61 bis Abbildung 62 den fertigen Prototypen.

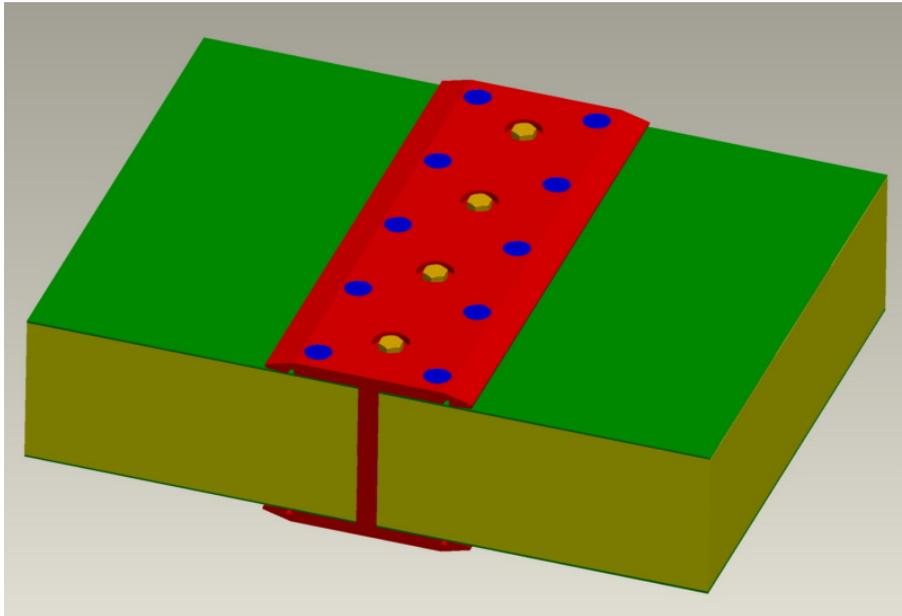


Abbildung 60: 3D-Modell des Blindnietverbinders in Pro/Engineer Wildfire



Abbildung 61: Fertiger Prototyp des Blindnietverbinders, Bild 1



Abbildung 62: Fertiger Prototyp des Blindnietverbinders, Bild 2



Abbildung 63: Fertiger Prototyp des Blindnietverbinders, Bild 3

Erster Eindruck

Das Fügen des Blindnietverbinders ist problemlos möglich, die einzelnen Niete können mit sehr geringem Zeitaufwand gesetzt werden. Der Verbinder macht einen stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht. Der Blindnietverbinder ist der Prototyp mit der geringsten Masse, trotzdem kann auch hier noch optimiert werden.

5.5 Prototyp 4: Exzenterverbinder

Für die Gestaltung des Exzenterverbinders werden folgende Festlegungen getroffen (alle Festigkeitsnachweise werden nach Kapitel 4.5 durchgeführt):

- Die Anzahl der inneren Zungen wird auf $n=4$ festgelegt.
- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=1000N$ und $F_{Qz}=500N$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200mm$.
- Das Material der äußeren VE-Zungen und des Mittelstegs ist Aluminium mit $E=70000 N/mm^2$, $R_{p0,2}\approx 150N/mm^2$, $R_m\approx 290N/mm^2$, $\tau_{aB}\approx 150N/mm^2$.
- Das Material der Exzenter, der Exzenterwelle und der inneren VE-Zungen ist C45 mit $E=210000 N/mm^2$, $R_{p0,2}\approx 490N/mm^2$, $R_m\approx 700N/mm^2$.
- Aus Festigkeitsnachweis 1 folgt:

$$F_{VzE} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 1000N}{4 \cdot 0,2 \cdot 2} = 625N$$

$$f_V = f_m + f = \frac{2 \cdot 625N \cdot (37mm)^3}{210000 \frac{N}{mm^2} \cdot 20mm \cdot (3mm)^3} + 0,11mm = 0,67mm$$

Die Größe f wurde wegen der komplexen Formel mit Hilfe einer Excel-Tabelle bestimmt, aus diesem Grund ist hier nur der Zahlenwert angegeben.

- Aus Festigkeitsnachweis 2 folgt:

$$625N \geq \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot 500N, \text{ d.h. } 625 \geq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 3 folgt:

$$\sqrt{\frac{0,5 \cdot 625N \cdot 105000 \frac{N}{mm^2}}{2 \cdot \pi \cdot 5mm \cdot 20mm \cdot (1 - 0,3^2)}} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 240 \leq 125$$

Die Bedingung ist nicht erfüllt. Eine Vergrößerung des Klemmradius der inneren Zungen im Spannungsbereich könnte das Problem beheben. Die Fertigung eines solchen Radius ist für die institutseigene Werkstatt jedoch eine kaum zu lösende Aufgabe, da hierfür die erforderlichen Werkzeuge fehlen. Da eine geringe plastische Verformung der Sandwich-Deckbleche jedoch nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Funktion der Verbindung hat und der Wert für $R_{p0,2}$ des Sandwich-Deckblechs sehr vorsichtig angesetzt wurde, wird die bestehende Gestalt an dieser Stelle beibehalten.

- Aus Festigkeitsnachweis 4 folgt:

$$\sigma_{VzE} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 625N \cdot 37mm}{200mm \cdot (10mm)^2} = 13,9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{1000N}{4 \cdot 200mm \cdot 10mm} = 0,125 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_5 = \frac{500N}{2 \cdot 10mm \cdot 200mm} = 0,125 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 14,0 \frac{N}{mm^2}$$

$$14,0 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 14 \leq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 5 folgt:

$$\sigma_{VzE} = \frac{3 \cdot 625N \cdot 37mm}{20mm \cdot (3mm)^2} = 385 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{1000N}{4 \cdot 20mm \cdot 4 \cdot 3mm} = 1,04 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 386,04 \frac{N}{mm^2}$$

$$386,04 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{490 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 386,04 \leq 408$$

Die zentrale Spanneinheit des Exzenterverbinders besteht aus einer Welle mit aufgeschobenen Doppel-exzenter-Ringen, über die die inneren VE-Zungen vorgespannt werden. Abbildung 64 verdeutlicht den Aufbau. Die Ringe werden durch Passstifte mit der Welle gefügt. Beide Bauelemente werden aus C45 gefertigt.

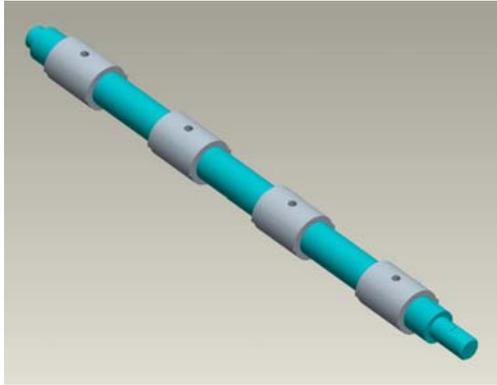


Abbildung 64: Welle und Doppel-exzenter-Ringe des Exzenterverbinders

Folgende Festigkeitsnachweise sind relevant:

- Die Welle wird über die Schlüssel­fläche am rechten Ende gedreht, d.h. der Absatz der Schlüssel­fläche wird mit dem gesamten Drehmoment belastet, das zum Spannen der inneren VE-Zungen übertragen werden muss.

Das notwendige Anzugsmoment M_A kann über das Momentengleichgewicht an der Welle bestimmt werden, die Ermittlung der Reibkräfte zwischen den Doppel-exzenter-Ringen und den inneren VE-Zungen geschieht mit $\mu_{\text{Stahl-Alu}}=0,28$ („Worst Case“).

Erforderliches Anzugsmoment: $M_A \geq 12,6Nm$ mit $d_{\text{Doppel-exzenter-ring}}=18mm$

Die Torsionsspannung im Wellenabsatz der Schlüssel­fläche ergibt sich mit $d_{\text{Schlüssel­flächenabsatz}}=8mm$ zu:

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{12600Nmm}{\frac{\pi}{16} \cdot (8mm)^3} = 125,33 \frac{N}{mm^2}$$

Die zulässige Spannung beträgt $\tau_{tF,C45} \approx 0,58 \cdot R_{p0,2} = 284,2 \frac{N}{mm^2}$, d.h. die Dimensionierung ist ausreichend.

- Die Bolzen, die die Doppelexzenter-Ringe mit der Welle fügen, werden auf Scherung beansprucht. Mit einem Wellendurchmesser von $d_{\text{Welle}}=12\text{mm}$ ergibt sich nach Bildung des Momentengleichgewichts am Bolzen eine Scherspannung von:

$$\tau_{\text{Bolzen}} = 37,14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Diese Spannung ist sehr klein, d.h. die Dimensionierung ist ausreichend.

Abbildung 65 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Exzenterverbinders, zum besseren Verständnis sind die Sandwichelemente transparent dargestellt. Abbildung 66 bis Abbildung 68 zeigen den fertigen Prototypen.

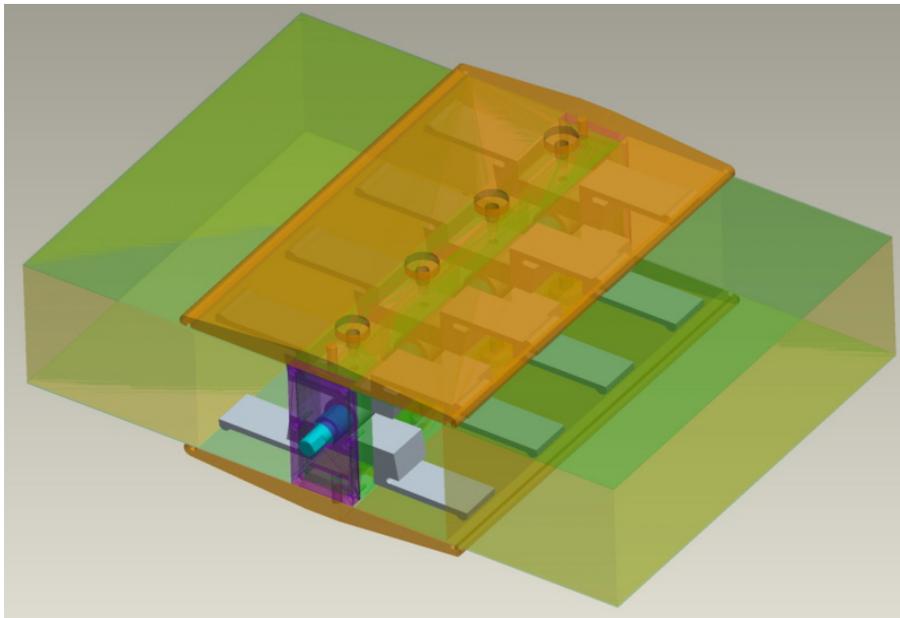


Abbildung 65: 3D-Modell des Exzenterverbinders in Pro/Engineer Wildfire



Abbildung 66: Fertiger Prototyp des Exzenterverbinders, Bild 1

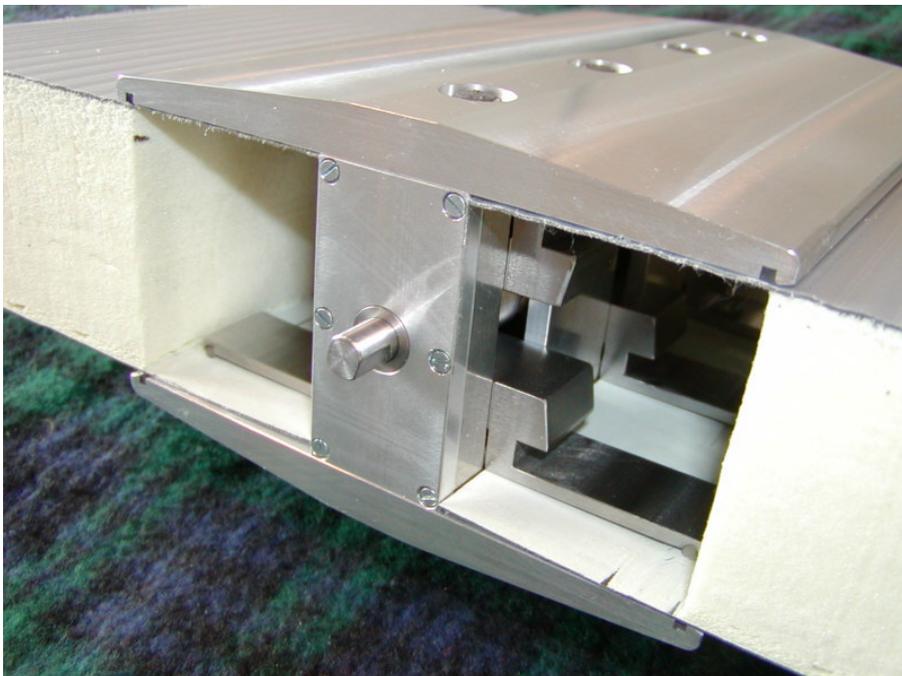


Abbildung 67: Fertiger Prototyp des Exzenterverbinders, Bild 2

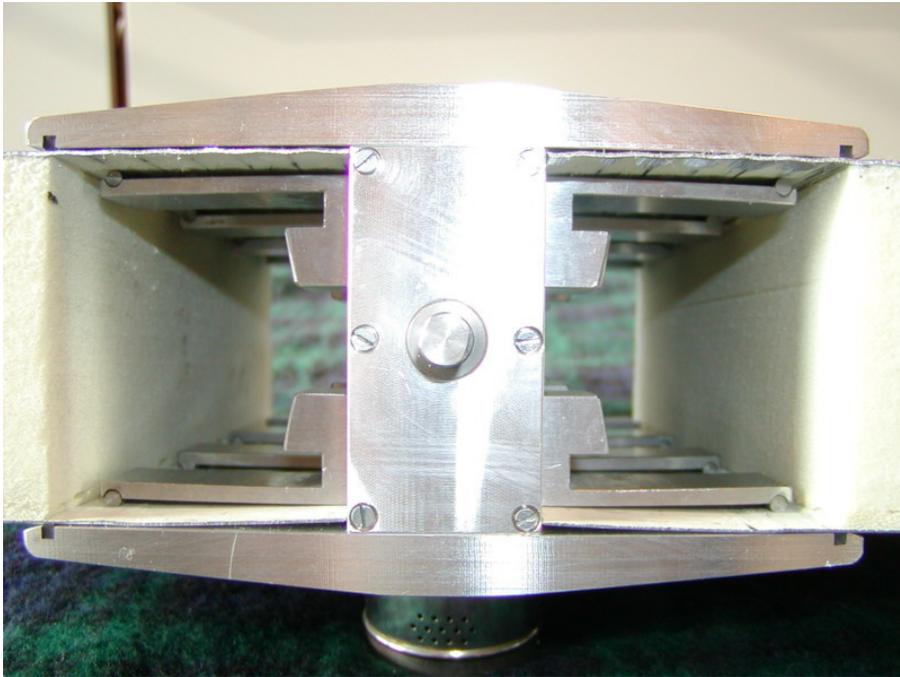


Abbildung 68: Fertiger Prototyp des Exzenterverbinders, Bild 3

Erster Eindruck

Das Fügen des Exzenterverbinders ist problemlos und sehr schnell möglich. Der Verbinder macht einen sehr stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht. Wird das VE wieder geöffnet, so nehmen die vorgespannten inneren VE-Zungen wieder ihre ursprüngliche Gestalt an, d.h. es liegt eine rein elastische Biegung vor. Der Exzentermechanismus ist leichtgängig und gut bedienbar. Der Exzenterverbinder ist der schwerste und aufgrund seiner Mechanik auch der teuerste der Prototypen. Ob sich für dieses VE, das mit Sicherheit noch ein hohes Optimierungspotenzial besitzt, Anwendungen finden lassen, wird sich im nächsten Projektzeitraum am IKT zeigen.

5.6 Prototyp 5: Sperrklinkenverbinder

Für die Gestaltung des Sperrklinkenverbinders werden folgende Festlegungen getroffen (alle Festigkeitsnachweise werden nach Kapitel 4.6 durchgeführt):

- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=100N$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200mm$.
- Das Material des VEs ist Aluminium mit $E=70000N/mm^2$, $R_{p0,2}\approx 150N/mm^2$, $R_m\approx 290N/mm^2$, $\tau_{aB}\approx 150N/mm^2$.
- Die Sperrklinkenbreite beträgt $30mm$ bei $n=3$.
- Aus Festigkeitsnachweis 1 folgt:

$$\sqrt{\frac{100N \cdot \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot \tan(11,3^\circ)} \cdot 105000 \frac{N}{mm^2}}{2 \cdot \pi \cdot 1mm \cdot 30mm \cdot (1 - 0,3^2)}} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 226 \leq 125$$

Der Festigkeitsnachweis ist nicht erfüllt. Dieses Problem könnte mit einer Vergrößerung des Spitzenradius der Sperrklinken gelöst werden. Eine solche Maßnahme würde jedoch die Abmaße der Klinken vergrößern, was bei dem geringen Bauraum zwischen den Sandwichzungen ein erhebliches Problem darstellt. Darüber hinaus würden die geometrischen Verhältnisse an der Klemmstelle komplexer, doch gerade bei einem Prototypen sollten diese so einfach wie möglich sein, um eine sichere Funktion zu gewährleisten. Da eine geringe plastische Verformung der Sandwich-Deckbleche die Funktion der Verbindung nicht gefährdet und bei den Prüfstandversuchen keine starken Verformungen beobachtet wurden, wird die Gestalt des Verbinders an dieser Stelle beibehalten.

- Aus Festigkeitsnachweis 2 folgt:

$$h_{Klinke,g} = 3,49999mm + 6,69999mm = 10,19998mm$$

- Festigkeitsnachweis 3

Die notwendige Federkraft wird über die nun fertige Sperrklinkengestalt (siehe Abbildung 69) wie folgt ermittelt:

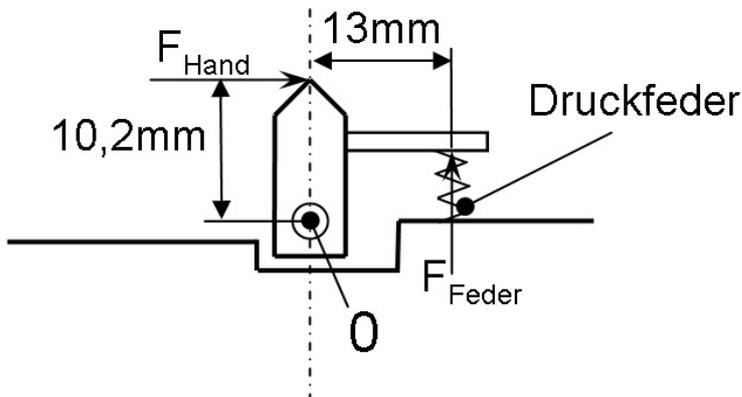


Abbildung 69: Sperrlinkengestalt des Prototypen (nicht maßstäblich)

Unter der Annahme, dass das manuelle Fügen von Sandwich und VE mit einer maximalen Handkraft von 100N geschehen soll, ergibt das Momentengleichgewicht um Punkt 0:

$$F_{Feder} = \frac{10,2mm}{13mm} \cdot \frac{100N}{6} = 13,1N$$

- Aus Festigkeitsnachweis 4 folgt:

$$\frac{85,1N}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{4mm}{2}\right)^2} \leq \frac{692 \frac{N}{mm^2}}{2}, \text{ d.h. } 3,39 \leq 346$$

$$\frac{85,1N}{4mm \cdot 30mm} \leq \frac{508 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 0,71 \leq 423,3$$

- Aus Festigkeitsnachweis 5 folgt:

$$\sigma_{V,GEH} = \frac{83,4 \frac{N}{mm^2} \cdot 3 \cdot 20,25mm}{\frac{200mm \cdot (9mm)^2}{6}} + \frac{\frac{1}{2} \cdot 100N}{200mm \cdot (9mm + 15mm)} = 1,89 \frac{N}{mm^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet also:

$$1,89 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 1,89 \leq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 6 folgt:

$$\sigma_{V,GEH} = \frac{83,4 \frac{N}{mm^2} \cdot 3 \cdot 20,25mm}{\frac{200mm \cdot (15mm)^2}{6}} + \frac{\frac{1}{2} \cdot 100N}{200mm \cdot (9mm + 15mm)} = 0,69 \frac{N}{mm^2}$$

Der Festigkeitsnachweis lautet also:

$$0,69 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 0,69 \leq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 7 folgt:

Die Verschiebung der äußeren Zunge beträgt $f_a=0,00089mm$.

Die Verschiebung der inneren Zunge beträgt $f_i=0,000198mm$.

f_a und f_i wurden wegen der komplexen Formel mit Hilfe einer Excel-Tabelle bestimmt, aus diesem Grund sind hier nur Zahlenwerte angegeben. Bei der Berechnung wurden die in der inneren Zunge vorhandenen Taschen, in denen die Sperrklinken positioniert sind, nicht berücksichtigt. Aufgrund der hohen Zungendicke von 15mm am Mittelsteg und 12mm an den Außenseiten kann diese Vereinfachung getroffen werden, der dadurch entstehende Fehler ist vernachlässigbar klein.

Als Festigkeitsnachweis ergibt sich damit:

$$0,00089mm+0,000198mm < 10,19998mm-10mm, \text{ d.h. } 0,001088 < 0,19998$$

Abbildung 70 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Sperrklinkenverbinders, zum besseren Verständnis sind die äußeren VE-Zungen transparent dargestellt. Abbildung 71 bis Abbildung 73 zeigen den fertigen Prototypen.

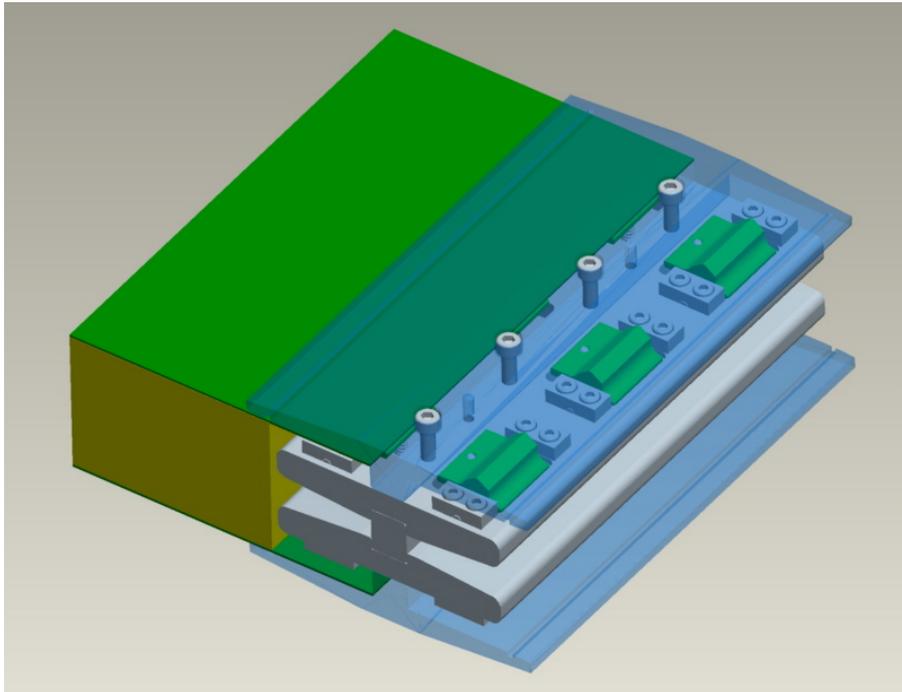


Abbildung 70: 3D-Modell des Sperrklinkenverbinders in Pro/Engineer Wildfire

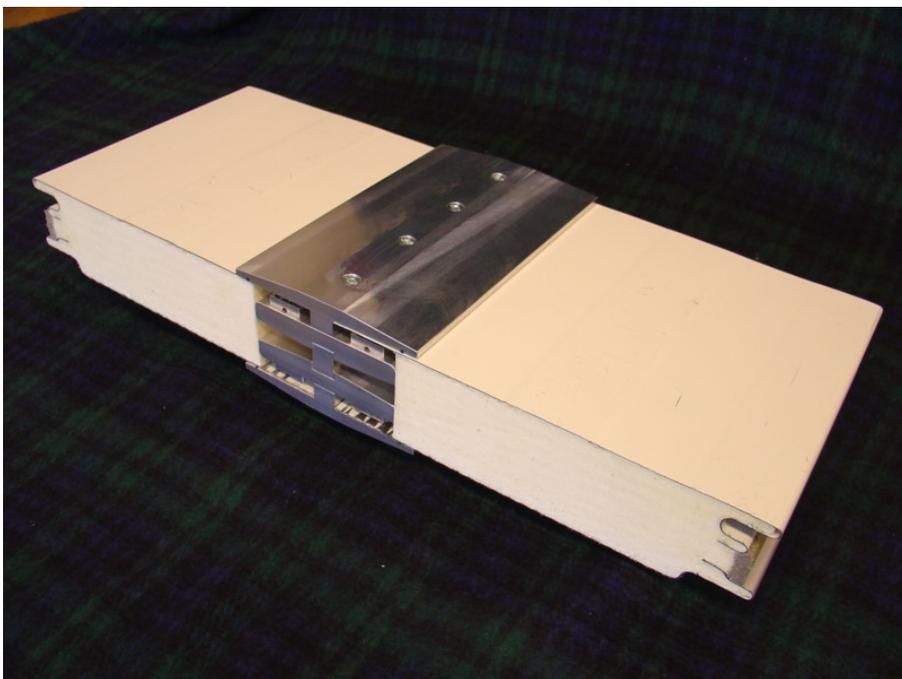


Abbildung 71: Fertiger Prototyp des Sperrklinkenverbinders, Bild 1

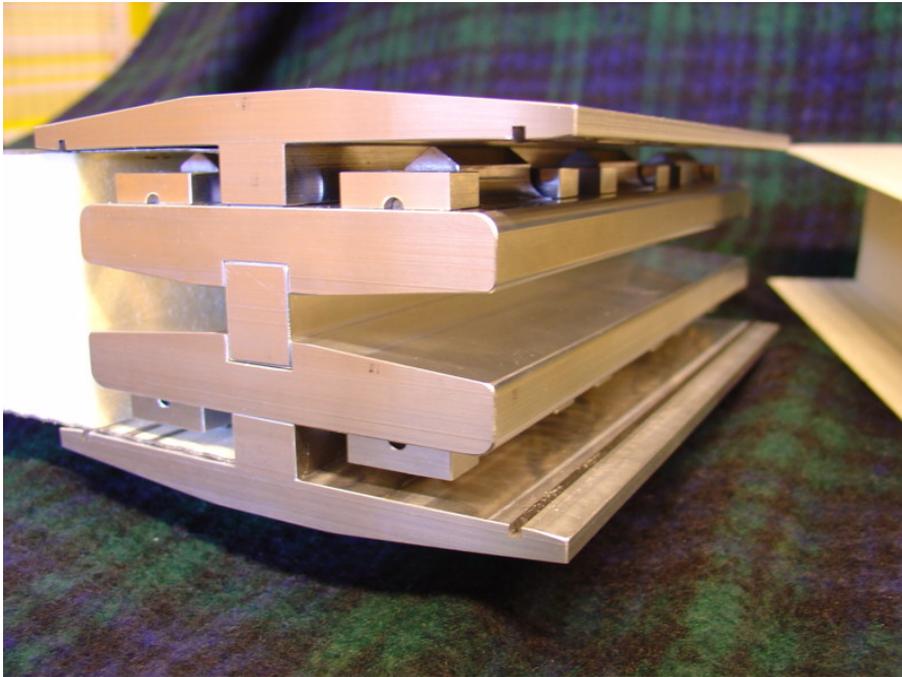


Abbildung 72: Fertiger Prototyp des Sperrklinkenverbinders, Bild 2



Abbildung 73: Innere VE-Zunge des Sperrklinkenverbinders

Erster Eindruck

Das Fügen des Sperrklinkenverbinders, d.h. das Einschleiben der Sandwichs, ist problemlos und sehr schnell möglich. Der Verbinder macht einen sehr stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht. Das Öffnen des VEs ist bisher nur durch Lösen der Schraubenverbindungen der äußeren Zungen möglich, hier sollte noch ein geeigneter Lösemechanismus gefunden werden. Die für die ersten Versuche zur Verfügung stehenden Sandwichelemente weisen an einer Seite eine gewellte Deckschicht auf. Diese drückt die Klinken weiter als berechnet nach innen. Die Verbindung ist zwar augenscheinlich fest, jedoch sollten für eine sichere Verbindung im Selbsthemmungsbereich nur glatte Deckschichten verwendet werden, die überdies nicht verbogen sein sollten. Fügeversuche mit einem glatten Distanzblech, dessen Oberfläche sogar etwas ölverschmiert war, verliefen sehr erfolgreich, d.h. auch bei niedrigem Haftreibungskoeffizient ist ein Fügen möglich. Der Verbinder ist aufgrund der geforderten hohen Steifigkeit seiner Zungen sehr schwer, hier besteht Optimierungsbedarf.

5.7 Prototyp 6: SE-Schrauben-Verbinder

Für die Gestaltung des SE-Schrauben-Verbinders werden folgende Festlegungen getroffen (alle Festigkeitsnachweise werden nach Kapitel 4.7 durchgeführt):

- Als Verbindungselement wird Lösung 13A ausgewählt.
- Es werden pro Sandwich-Deckblech $n=3$ SE-Schrauben verwendet.
- Als äußere Belastung wird $F_{Z/Dy}=4000\text{N}$ und $F_{Qz}=500\text{N}$ angenommen.
- Die Breite beträgt $b=200\text{mm}$.
- Das Material des VEs ist Aluminium mit $E=70000\text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2}\approx 150\text{N/mm}^2$, $R_m\approx 290\text{N/mm}^2$, $\tau_{aB}\approx 150\text{N/mm}^2$.
- Das Material der SE-Schraube (Körper und Kopf) ist C45 mit $E= 210000\text{N/mm}^2$, $R_{p0,2}=490\text{N/mm}^2$, $R_m=750\text{N/mm}^2$. Der Spreizring besteht aus Kupfer mit $R_{p0,2}=100\text{N/mm}^2$, $R_m=200\text{N/mm}^2$. Kupfer ist aufgrund seiner Neigung, sich unter konstantem Druck plastisch zu verformen, kein ideales Material für diese Anwendung. Es ist jedoch der einzige Werkstoff, der ein sehr gutes plastisches

Verformungsvermögen bei niedriger Streckgrenze aufweist und zum Zeitpunkt der Fertigung der SE-Schrauben problemlos und günstig als Rundmaterial erhältlich ist. Die Auswahl eines optimalen Spreizring-Werkstoffs wird daher dem nachfolgenden Projektzeitraum am IKT überlassen.

- Aus Festigkeitsnachweis 1 folgt:

$$A_{Druck} = \frac{75,4mm}{100,5mm} \cdot \pi \cdot \left((8mm)^2 - (7mm)^2 \right) = 35,4mm^2$$

$$A_{Scher} = \frac{75,4mm}{100,5mm} \cdot \pi \cdot 16mm \cdot 5mm = 188,6mm^2$$

$$F_{V,zul} = \frac{100 \frac{N}{mm^2}}{1,2 \cdot \sqrt{\frac{1}{(35,4mm^2)^2} + \frac{3}{(188,6mm^2)^2}}} = 2805N$$

Als Schraube wird eine M8, Festigkeitsklasse 8.8 gewählt.

$$M_A = 2805N \cdot \left(0,16 \cdot 1,25mm + 0,58 \cdot 7,188mm \cdot 0,1 + \frac{7mm + 8mm}{2} \cdot 0,25 \right) = 6,990Nm$$

- Aus Festigkeitsnachweis 2 folgt:

$$\frac{2805N}{\frac{75,4mm}{100,5mm} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{20mm}{2} \right)^2 - \left(\frac{16mm}{2} \right)^2 \right)} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 33,1 \leq 125$$

- Aus Festigkeitsnachweis 3 folgt:

$$\frac{4000N}{2 \cdot 3} \leq 0,25 \cdot 2805N, \text{ d.h. } 666,7 \leq 701,25$$

- Aus Festigkeitsnachweis 4 folgt:

$$\frac{500N}{2 \cdot 3} \leq 2805N, \text{ d.h. } 83,3 \leq 2805$$

- Aus Festigkeitsnachweis 5 folgt:

$$\sigma_1 = \frac{0,5 \cdot 4000N}{(200mm - 3 \cdot 16mm) \cdot 7,2mm} = 1,83 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_5 = \frac{0,5 \cdot 500N}{200mm \cdot 7,2mm} = 0,174 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V,GEH} = 1,85 \frac{N}{mm^2}$$

$$1,85 \frac{N}{mm^2} \leq \frac{150 \frac{N}{mm^2}}{1,2}, \text{ d.h. } 1,85 \leq 125$$

Abbildung 74 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte Modell des SE-Schrauben-Verbinders, Abbildung 75 ein Modell sowie eine Schnittzeichnung der SE-Schraube, Abbildung 76 bis Abbildung 78 den fertigen Prototypen. Die SE-Schrauben sind den Fertigungsmöglichkeiten der Institutswerkstatt angepasst (zweiteiliger, mit Schweißpunkt gefügter SE-Schrauben-Körper (siehe Abbildung 78)).

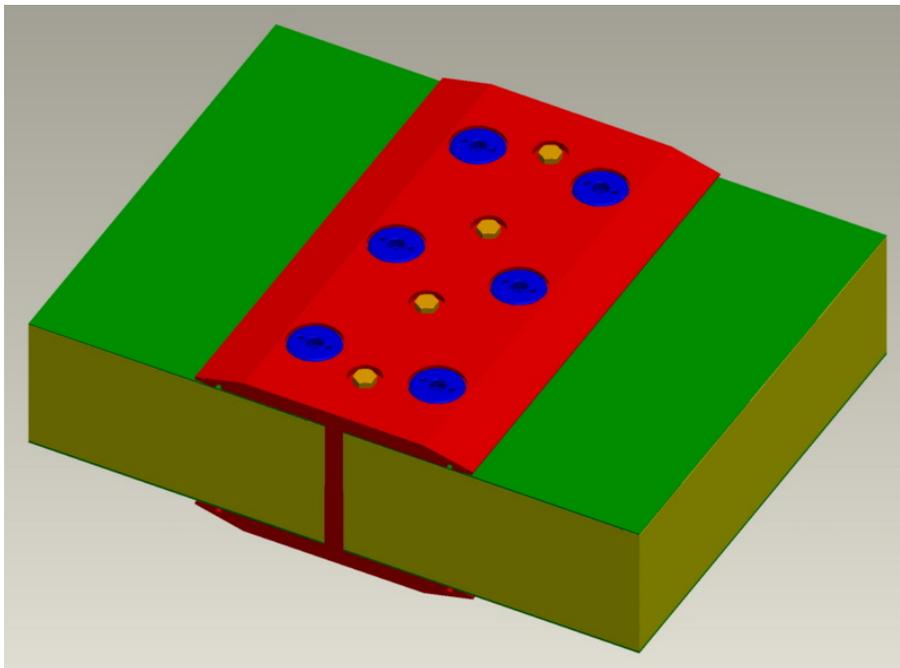


Abbildung 74: 3D-Modell des SE-Schrauben-Verbinders in Pro/Engineer Wildfire

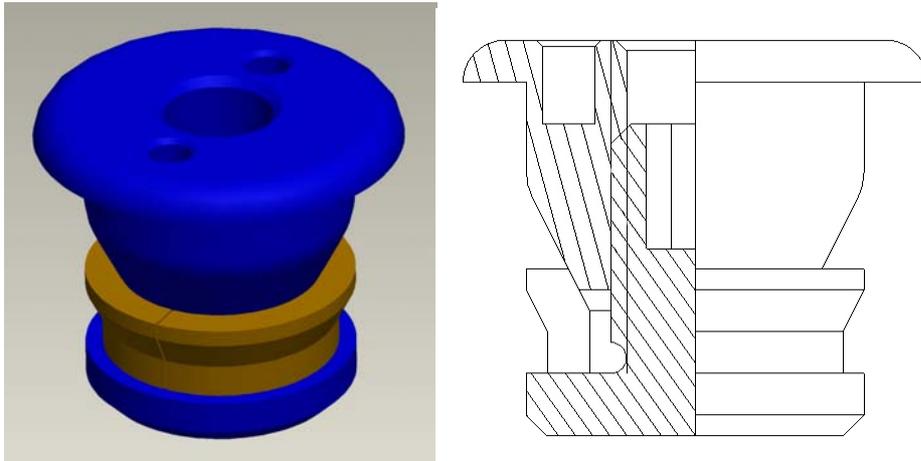


Abbildung 75: 3D-Modell und Schnittzeichnung der SE-Schraube in Pro/Engineer Wildfire



Abbildung 76: Fertiger Prototyp des SE-Schrauben-Verbinders, Bild 1



Abbildung 77: Fertiger Prototyp des SE-Schrauben-Verbinders, Bild 2



Abbildung 78: Fertige Prototypen der SE-Schraube, rechts im ungefügten, links im gefügten Zustand

Erster Eindruck

Das Fügen des SE-Schrauben-Verbinders ist problemlos möglich. Die Schrauben werden in die vorgebohrten Löcher gesetzt, der Schraubenkörper wird unter gleichzeitigem Gegenhalten des Schraubenkopfs mit einem Innensechskant-Schlüssel im Gegenuhrzeigersinn gedreht. Dabei spreizt sich der Kupferring so lange auf, bis er am Sandwich-Deckblech anliegt und die Verbindung verspannt werden kann. Der Verbinder macht einen stabilen Eindruck, die Sandwichs bewegen sich bei manueller Kraffteinwirkung nicht. Das Gewicht des Prototyps ist vergleichsweise gering, hier besteht jedoch trotzdem Optimierungspotenzial.

5.8 Prototyp 7: Low-Cost-Verbinder

Der Prototyp der Low-Cost-Verbinder ist, wie schon in Kapitel 4.8 erwähnt, ein Demonstrator für die Verfahren Durchsetzfügen und Körnen. Dabei wurden die vier besten Verfahren nach [38] realisiert, d.h. jede der vier Fügstellen weist eine andere Gestalt auf.

Abbildung 79 zeigt das in Pro/Engineer Wildfire generierte 3D-Modell des Demonstrators. Dabei sind die oberen Sandwichzungen abgehoben, so dass die Fügstellen sichtbar werden.

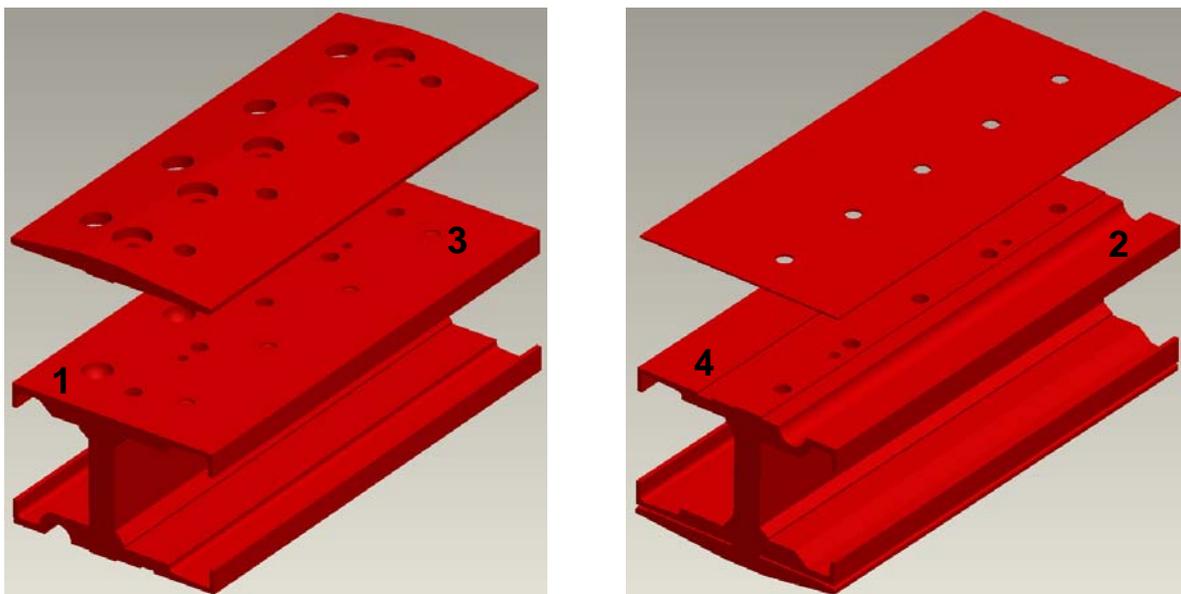


Abbildung 79: 3D-Modell des Low-Cost-Verbinders in Pro/Engineer Wildfire

Im Folgenden werden die vier verschiedenen Fügstellen näher erläutert.

Fügstelle 1

Die Verbindung von Sandwich und VE erfolgt mittels Körnen. Um den Fügevorgang zu vereinfachen und die erforderlichen Fügekräfte in Grenzen zu halten, ist die äußere VE-Zunge vorgelocht, so dass lediglich das Sandwich-Deckblech in die diskreten Vertiefung der inneren VE-Zunge gezogen werden muss. Als Fügestempel kommt ein abgerundeter Durchschlag mit einem Spitzenradius von 8mm zum Einsatz.

Fügstelle 2

Die Verbindung von Sandwich und VE erfolgt mittels Körnen. Im Gegensatz zu Fügstelle 1 ist die äußere VE-Zunge hier nicht vorgelocht, so dass diese zusammen mit dem Sandwich-Deckblech in die Vertiefung der inneren VE-Zunge gezogen werden muss. Die Vertiefung ist hier als Nut ausgeführt, so dass sie bei einer späteren Fertigung des VEs durch Strangpressen ohne Nachbearbeitung direkt hergestellt werden kann.

Fügstelle 3

Die Verbindung von Sandwich und VE erfolgt mittels Durchsetzfügen. Wie bei Fügstelle 1 ist die äußere VE-Zunge vorgelocht, die innere weist diskrete Fügstellen auf. Es kommt ein spezieller Fügestempel zum Einsatz.

Fügstelle 4

Die Verbindung von Sandwich und VE erfolgt mittels Durchsetzfügen. Wie bei Fügstelle 2 ist die äußere VE-Zunge nicht vorgelocht, die innere weist eine nutförmige Vertiefung auf. Es kommt der gleiche Fügestempel wie bei Fügstelle 3 zum Einsatz.

Abbildung 80 zeigt die Querschnitte der Vertiefungen in den inneren VE-Zungen, in die die jeweiligen Fügepartner hineingezogen werden. Die Querschnitte der Nuten und der diskreten Vertiefungen sind dabei gleich. Bei ihrer Formgebung mussten im Vergleich zu den Empfehlungen von [38] aufgrund der beschränkten Fertigungsmöglichkeiten der Institutswerkstatt einige Vereinfachungen vorgenommen werden.



Abbildung 80: Querschnitte der Vertiefungen in den inneren VE-Zungen für Körnen (links) und Durchsetzfugen (rechts)

Da die erforderlichen Fügekräfte pro Fügestelle beim Körnen unbekannt sind und beim Durchsetzfügen im Bereich mehrere Tonnen liegen können, sind die inneren VE-Zungen mit waagrechten Passflächen versehen, so dass die beiden VE-Seiten durch geeignete einschiebbare Fügestützen (Abbildung 82) verbunden werden können. Die Druckkräfte des Fügevorgangs müssen damit nicht alleine über den Mittelsteg abgeleitet werden. Auf der VE-Seite ohne vorgelochte äußere VE-Zungen wird zum Fügen mit Hilfe der Mittelsteg-Schrauben ein Niederhalter auf dem VE platziert (Abbildung 82), der ein ungewolltes Verformen der äußeren VE-Zungen verhindert.

Abbildung 81 zeigt das fertige 3D-Modell des Demonstrators, Abbildung 82 bis Abbildung 84 zeigen den Prototypen vor und während des Fügevorgangs, Abbildung 85 und Abbildung 86 die fertig gefügte Verbindung.

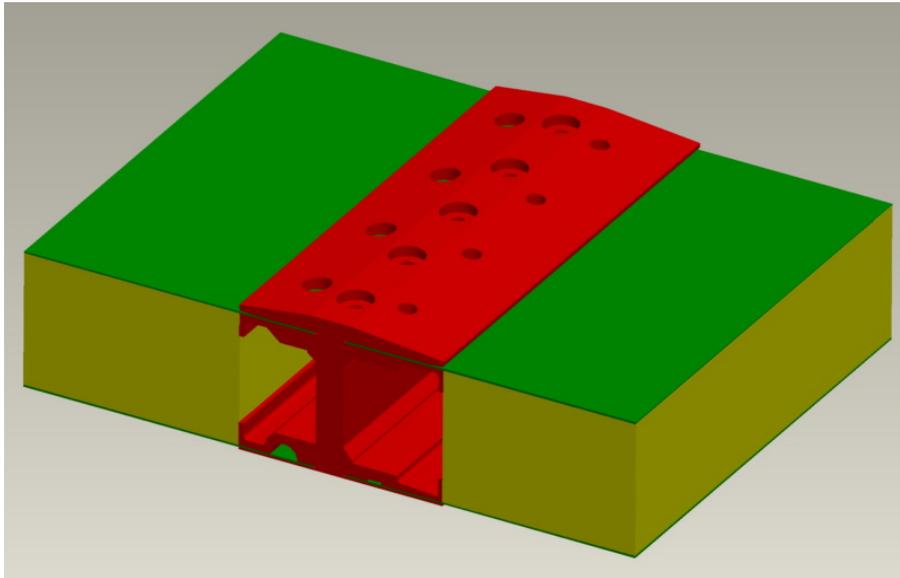


Abbildung 81: 3D-Modell des fertigen Low-Cost-Verbinders in Pro/Engineer Wildfire



Abbildung 82: Demonstrator des Low-Cost-Verbinders mit Fügestützen, links Fügestellen 1 und 3, rechts Fügestellen 2 und 4 mit Niederhalter

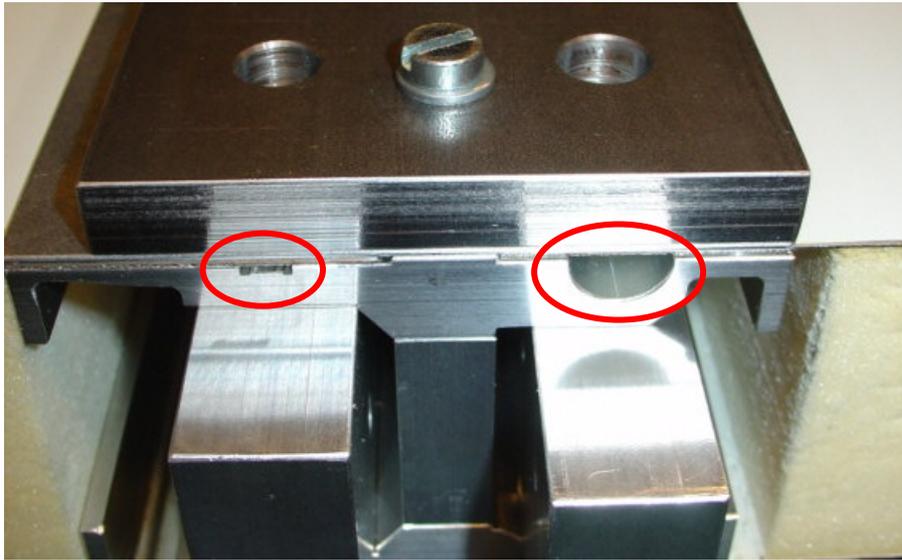


Abbildung 83: Nutformen an den Fügstellen (links für Durchsetzfügen, rechts für Körnen)

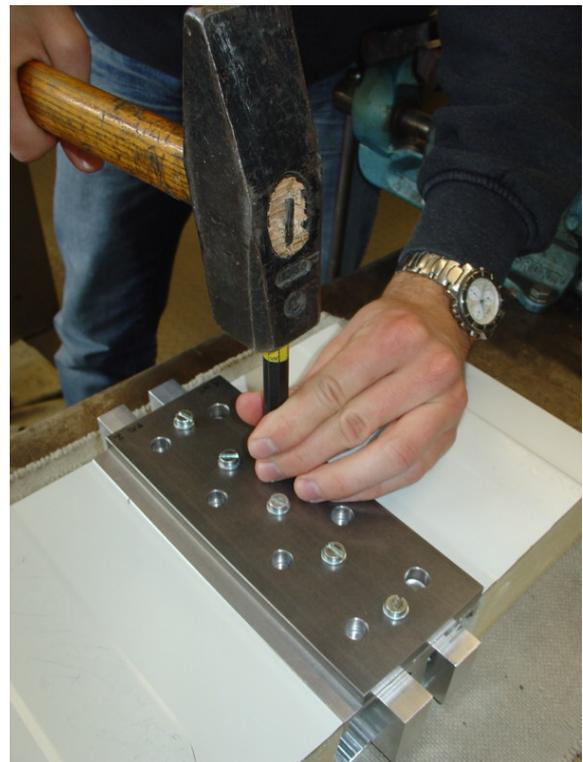
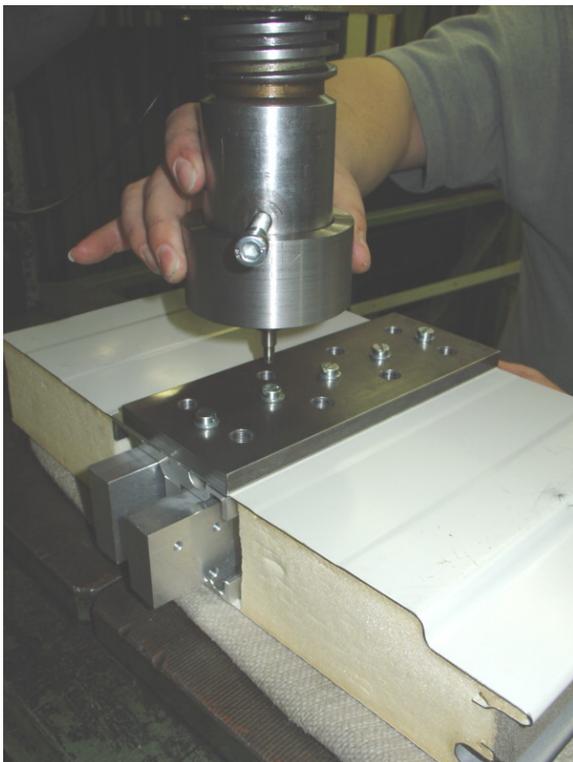


Abbildung 84: Fügevorgang des Low-Cost-Verbinders (links Durchsetzfügen, rechts Körnen)

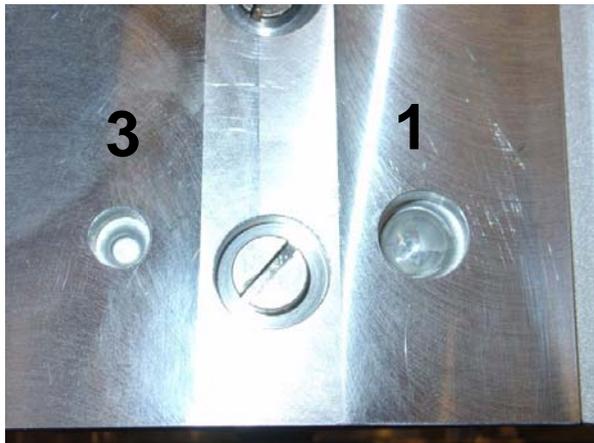


Abbildung 85: Fertige Fügestellen, Bezeichnung entsprechend vorheriger Festlegung (siehe Abbildung 79)

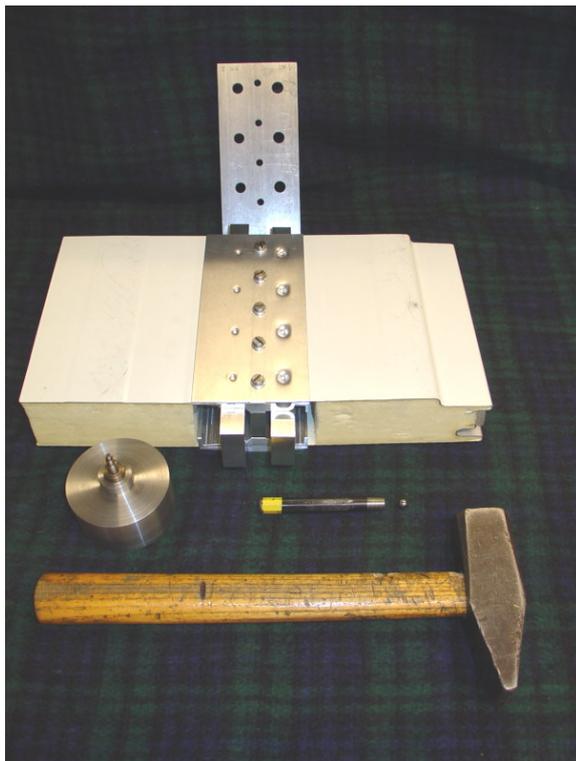


Abbildung 86: Fertiger Demonstrator des Low-Cost-Verbinders mit Fügestützen, Niederhalter (hinten), Durchsetzfuge-Stempel (vorne links) sowie Hammer, Durchschlag und Kugel für das Körnen

Erster Eindruck

Das Fügen des Low-Cost-Verbinders erfolgte auf zweierlei Art:

- Das Durchsetzfügen wurde mit Hilfe einer weggesteuerten hydraulischen Presse durchgeführt. Der Fügeweg betrug an beiden Fügestellen ca. 2mm. Als Werkzeug kam ein selbst gefertigter Fügestempel zum Einsatz (siehe Abbildung 84), der auf den Zylinder der Hydraulikpresse aufgeschoben wurde.
- Das Körnen erfolgte mit Hilfe einer Stahlkugel, die mittels Hammer und Durchschlag in die Vertiefungen getrieben wurde (es war kein Körner mit runder Spitze verfügbar).

Das Fügen war bei beiden Verbindungstypen problemlos möglich. Die Fügepunkte des Durchsetzfügens sind klar ausgeprägt (siehe Abbildung 85) und entsprechen optisch den Abbildungen, die in Fachbüchern gefunden werden können. Aus fertigungstechnischen Gründen war das Anbringen der sonst üblichen Hinterschneidungen in den Fügenuten hier nicht möglich, so dass die Sandwich-Deckschicht nach Abnahme der äußeren Verbinderzunge nach außen abgehoben werden kann. Dieses Problem, das mit Hilfe geeigneter Fertigungsverfahren gelöst werden kann, hat jedoch keinen spürbaren Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Die Sandwichs bewegen sich bei manueller Krafteinwirkung nicht.

Beim Körnen hat sich gezeigt, dass die Tiefe der Nut bzw. der einzelnen Bohrungen etwas zu groß gewählt ist. Die Bleche konnten nicht vollständig in die Vertiefungen gezogen werden, ohne dass es zu Rissen kam, außerdem ist bei manueller Krafteinwirkung ein minimales Spiel zwischen Sandwich und Verbinder spürbar. Dieses Problem kann jedoch durch kleinere Nut- bzw. Vertiefungsdurchmesser gelöst werden.

Zusammenfassend kann das Fügen mittels Durchsetzfügen und Körnen als erfolgreich bezeichnet werden. Es besteht jedoch Optimierungsbedarf, sowohl bei den oben genannten Punkten als auch beim Gewicht des VE.

5.9 Beurteilung der Prototypen anhand der Anforderungsliste

Die Prototypen (siehe Abbildung 87) stellen das Ergebnis dieser Arbeit dar. Die erste Beurteilung geschieht mit Hilfe der Anforderungsliste aus Kapitel 3.1, in der die Forderungen und Wünsche an die Verbindungseigenschaften formuliert wurden.

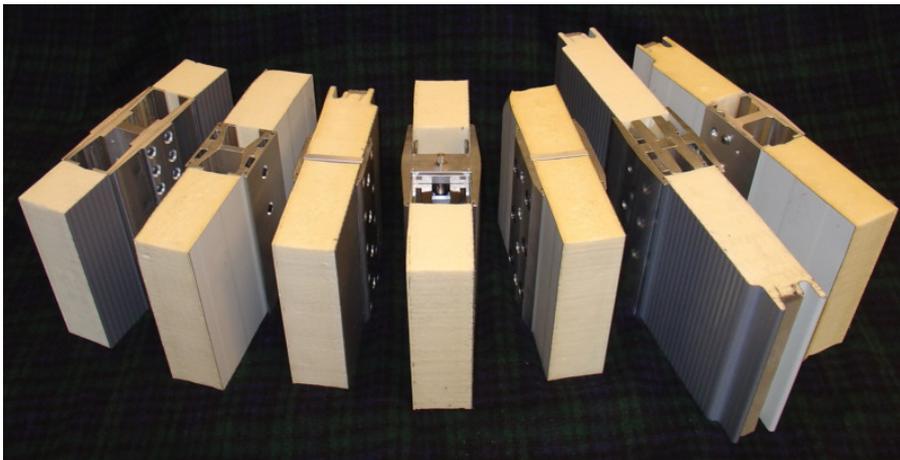


Abbildung 87: Die sieben Verbinder-Prototypen als Ergebnis dieser Dissertation

Im Folgenden werden die einzelnen Punkte der Anforderungsliste mit den tatsächlichen Eigenschaften der Prototypen verglichen.

1. Die Verbindungen sind in der Lage, die auftretenden Kräfte und Momente weiterzuleiten. Die dazu notwendigen Auslegungen konnten für fast alle Prototypen formuliert werden. Die Berechnung des Low-Cost-Verbinders ist ebenfalls möglich, dazu sind jedoch weitere umfangreiche Forschungen notwendig.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
2. Die Abmaße der Verbinder wurden mit Hilfe der Gestaltungsrichtlinie für VE-Abschlüsse grob festgelegt. Eine optimale Gestaltung kann erst erfolgen, wenn genaue Kenntnisse über die Eigenschaften der Sandwichelemente vorliegen.
Ergebnis: Die Anforderung wurde im Rahmen des aktuellen Wissensstands erfüllt, es besteht jedoch Optimierungsbedarf.

3. Die Verformungen an der Verbindungsstelle sind sehr gering, es kommt zu keiner Funktionsgefährdung.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
4. Das Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit konnte noch nicht ausreichend umgesetzt werden. Dies liegt zum einen an den ungenügenden Kenntnissen bzgl. des Sandwichverhaltens, zum anderen an den fertigungstechnischen Möglichkeiten der Institutswerkstatt, in der z.B. nur Sandwichungen mit einer minimalen Dicke von 3mm am äußeren Ende hergestellt werden können.
Ergebnis: Die Anforderung wurde nicht erfüllt.
5. Das Gewicht der VEs ist zum Teil noch sehr hoch. Eine Gewichtsoptimierung ist zwar möglich, hätte jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.
Ergebnis: Die Anforderung wurde teilweise erfüllt.
6. Es wurde eine Gestaltungsrichtlinie für VE-Abschlüsse erarbeitet.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
7. Die Werkstoffverträglichkeit zwischen VE und Sandwichelement ist bei den Prototypen gegeben. Die Festlegung weiterer Werkstoffkombinationen ist im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll und sollte im weiteren Verlauf der Forschungen am IKT erfolgen.
Ergebnis: Die Erfüllung der Anforderung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden.
8. Die Eignung der VEs für verschiedene Sandwichmaterialien wurde nicht überprüft, dies hätte den Rahmen der Arbeit gesprengt. Sie sollte im weiteren Verlauf der Forschungen am IKT untersucht werden.
Ergebnis: Die Erfüllung der Anforderung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden.
9. Die Deckschichten werden durch das VE fixiert, ihr Abstand ändert sich nicht wesentlich.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
10. Die Komplexität der VEs ist gering, nach einer Gestaltoptimierung ist eine Großserienfertigung möglich.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.

11. Es sind nur wenige Vorbereitungsarbeiten an den Sandwichs nötig, dies sind, wo erforderlich, das partielle Ausräumen des Kerns sowie das Anbringen von kreisrunden Öffnungen in der Deckschicht.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
12. Eine Positionierung der Sandwichs über das VE ist problemlos möglich.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
13. Bis auf das Durchsetzfügen sind die meisten Montagevorgänge einfach. Durch geeignete Werkzeuge sollte jedoch auch hier ein Fügen auf einfache Weise möglich sein.
Ergebnis: Die Anforderung wurde erfüllt.
14. Die optische Erscheinung der Prototypen leidet unter den begrenzten Fertigungsmöglichkeiten am Institut. So sind alle VEs mehrteilig aufgebaut und verschraubt, die Schraubenköpfe sind zwar versenkt aber dennoch sichtbar. Bei anderen Fertigungsverfahren (z.B. Strangpressen) entstehen diese Nachteile nicht.
Ergebnis: Die Anforderung wurde im Rahmen der Fertigungsmöglichkeiten am IKT erfüllt, es besteht jedoch Optimierungsbedarf.

Von 14 Anforderungen an die Verbindungen wurden also acht ganz, drei teilweise und eine nicht erfüllt. Bei zwei Anforderungen ist eine Beurteilung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

Da die nicht bzw. nur teilweise erfüllten Anforderungen durch eine Optimierung der Verbinder erfüllt werden können, ist dieses Ergebnis als sehr positiv zu bewerten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine wichtige Zielsetzung in vielen Bereichen des Maschinenbaus ist die Gewichtsreduktion technischer Produkte. Diese wird durch geeignete Bauweisen und leichte Werkstoffe erreicht. Eine Werkstoffgruppe, die eine sehr hohe Steifigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht aufweist, sind die Sandwichwerkstoffe. Sie werden heutzutage hauptsächlich im Bauwesen sowie im Container- und Behälterbau eingesetzt, im klassischen Maschinenbau gibt es bis jetzt jedoch nur wenige Anwendungsbeispiele.

Einer der Gründe für die nur langsame Ausbreitung der Sandwichwerkstoffe im Maschinenbau ist das Fehlen einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. Sandwichs werden vor allem durch stoffschlüssige Verfahren wie z.B. Kleben gefügt. Diese Verfahren sind oft aufwändig, teuer und schwer automatisierbar. Mechanische, d.h. rein kraft- oder formschlüssige Verbindungen, befinden sich entweder erst im Prinziplösungsstadium oder sind nicht in der Lage, die Kräfte und Momente aufzunehmen, die ein Sandwich theoretisch ertragen kann. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung leistungsfähiger mechanischer Verfahren zum Verbinden von Sandwichmaterialien.

Im ersten Teil der Dissertation werden alle theoretisch möglichen Lösungen zur mechanischen Verbindung zweier Sandwichelemente erarbeitet. Dies geschieht durch systematische Variation der beiden Hauptbestandteile einer solchen Verbindung, der „Verbindungselemente“ (erzeugen Kontaktflächen zum Sandwich) und der „Fügeelemente“ (fügen die Kontaktflächen miteinander). Mittels mehrerer Bewertungsschritte werden unbrauchbare Lösungen ausgesondert und damit die besten aller möglichen Lösungen identifiziert.

Im zweiten Teil der Dissertation erfolgt die Festigkeitsauslegung der besten Verbindungen. Dazu wird ein allgemeiner Lastfall definiert, auf dessen Basis die notwendigen Festigkeitsnachweise für Verbindungs- und Fügeelemente in allgemeiner Form formuliert werden. Die auf diese Weise erarbeiteten Formeln können für alle beliebigen Abmaße der

Verbinder und unterschiedliche Lastfälle eingesetzt werden, so dass eine Automatisierung des Festigkeitsnachweises am PC möglich ist.

Im dritten Teil der Dissertation werden die besten Lösungen zu Prototypen weiterentwickelt. Dazu werden die quantitativen Gestaltparameter festgelegt, die Festigkeitsauslegungen aus Abschnitt zwei mit nun konkreten Zahlenwerten durchgeführt sowie, nach erfolgreichem Festigkeitsnachweis, die notwendigen Fertigungsunterlagen erstellt. Der Bau erfolgt in der institutseigenen Werkstatt.

Die Weiterführung des mit dieser Arbeit gegründeten Forschungsbereichs am IKT soll in zwei Richtungen erfolgen.

Zum einen sollen die Prototypen optimiert werden. Sie erfüllen zwar die meisten Anforderungen, die in der Anforderungsliste zu Beginn der Arbeit formuliert wurden, in einigen Punkten ist jedoch eine Weiterentwicklung notwendig [39]. So sollte z.B. das zum Teil hohe Gewicht der Verbinder durch geeignete Maßnahmen reduziert werden, so dass der Gewichtsvorteil der Sandwichelemente auch in Kombination mit der Verbindung erhalten bleibt. Darüber hinaus sollte eine Anpassung an das Fertigungsverfahren „Strangpressen“ erfolgen, mit dem eine wirtschaftliche Großserienfertigung erst möglich wird. Die Integration von Zusatzfunktionen konnte, abgesehen von der Abdichtung der Fügestelle, im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden. Auch sind die Verbinder bisher nur für gerade Fügstellen geeignet, Radien oder Ecken wurden noch nicht betrachtet. Aus diesen Punkten ergeben sich weitere Aufgabenfelder für zukünftige Entwicklungen.

Zum anderen sollen die Prototypen mit Hilfe der FEM-Methode optimiert werden. Dazu ist vor allem die genaue Erforschung des Sandwich-Verhaltens unter Belastung erforderlich. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen zu einer Weiterentwicklung und Optimierung der Verbindungen führen. Die Verifizierung der optimierten Prototypen erfolgt dann mit Hilfe eines Prüfstands, der am IKT aufgebaut werden soll.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **Wiedemann, J.:** *Leichtbau 1: Elemente*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1996.
- [2] **Koller, R.:** *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1998.
- [3] **Koschade, R.:** *Die Sandwichbauweise*. 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn 2000.
- [4] **Klein, B.:** *Leichtbau-Konstruktion*. 4. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 2000.
- [5] **Schnaas, J.:** *Reparaturfreundliche Fahrzeugkonstruktion*. DER NAHVERKEHR 4/97 34-41.
- [6] **Degischer, H.P.:** *Metallschäume*. 1. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH 2000.
- [7] **N.N.:** *Bausysteme aus Stahl für Dach und Fassade*. Dokumentation 558. 2. Auflage. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum 2000.
- [8] **Funke, H.:** *Sandwich-Leichtbauteile in Wabenbauweise*. Internet-Informationenbroschüre der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH Waldenbuch, aufgerufen am 4.11.2003. <http://www.r-g.de>.
- [9] **Sedliakova, N.; Simancic, F.; Kovacic, J.; Minar, P.:** *Metallschäume 1997* 177-185. Bremen: MIT 1997.

- [10] **Hertel, H.:** *Leichtbau*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1980.
- [11] **Burzer, J.; Bergmann, H.W.; Kalinitchenko, :** *Sheet Metal 1998, Vol. I.* 133-142.
- [12] **N.N.:** *Aluminiumschaum, Merkblatt W 17 1.* 1. Auflage. Aluminium Zentrale e.V. 1999.
- [13] **Starlinger, A.; Wieschermann, J.:** *Über den Einsatz von Hybridbauweisen im modernen Schienenfahrzeug- und Busbau.* Aufsatz der Alcan Alesa Engineering Ltd., Zürich, Schweiz.
- [14] **Seeliger, H.-W.; Beichelt, C.:** *Fertigungs- und Anwendungsstrategien für Aluminiumschaum-Sandwich Bauteile.* Internetseite der Wilhelm Karmann GmbH, aufgerufen am 12.11.2003. <http://www.karmann.com>.
- [15] **N.N.:** *Sandwichkonstruktionen.* Internetseite des Fachgebiets Leichtbau-Konstruktion der Universität Kassel, aufgerufen am 12.11.2003. http://www.uni-kassel.de/fb15/lbk/download/leichtbau/19_Sandwich.pdf.
- [16] **N.N.:** *Metallische Schäume aus Dresden für neuartige Anwendungen.* Dresdner Transferbrief 04/2001. Internetseite der TU-Dresden, aufgerufen am 12.11.2003. <http://www.tu-dresden.de/vd51/trabrief/042001/s17.html>.
- [17] **N.N.:** *Metallschaum-Sandwichstrukturen für trennende Schutzeinrichtungen an Hochgeschwindigkeitswerkzeugmaschinen.* Internetseite des Projekt Nr. BIA6058 der gewerblichen Berufsgenossenschaften (BG), aufgerufen am 13.11.2003. <http://www.hvbg.de/d/bia/pro/pr6058.htm>.
- [18] **Hübner, A.; Stuttmann, D.:** *Sandwichbauweise, Entstehung und Anwendung.* Seminar „Innovativer Stahlbau“. Internetseite des Lehrstuhls für Baukonstruktion I der RWTH Aachen, aufgerufen am 13.11.2003. <http://arch.rwth-aachen.de/twl/www.twl/mitarbeiter/hachul/dat/21.pdf>.

- [19] **Czichy, R.:** *Leichtbau in Luft- und Raumfahrt*. Aufsatz der Lockheed Martin GmbH. Internetseite der TU-Cottbus, aufgerufen am 13.11.2003. http://www.pantarhei.tu-cottbus.de/Vortraege_Inno/Czichy1.pdf.
- [20] **N.N.:** *Konstruktion bei Lehmar*. Internetseite der Lehmar AG, aufgerufen am 13.11.2003. <http://www.lehmar.com/Technik/technikhome.htm>.
- [21] **Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.:** *Konstruktionslehre*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2003.
- [22] **Bauer, C.-O.:** *Handbuch der Verbindungstechnik*. 1. Auflage. München, Wien: Carl Hanser 1991.
- [23] **Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.:** *Maschinenelemente*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2001.
- [24] **Tochtermann, W.; Bodenstein, F.:** *Konstruktionselemente des Maschinenbaus*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1979.
- [25] **Ilias, N.:** *Gespräch vom 15.8.2002*. Firma Alcan Alesa Engineering Ltd., Zürich, Schweiz.
- [26] **Schnaas, J.; Meier, U.:** *Innovatives Rohbaukonzept für ein modulares Straßenbahnfahrzeug*. DER NAHVERKEHR 6/96 48-53.
- [27] **Hübler, A.C.; Hahn, U.; Weidner, J.; Schneider, J.:** *Krafteinleitung an Bauelementen*. "Konstruktionspraxis" 04/99, Leserdienst-Kennziffer 314.
- [28] **Fohn, M.:** *2D/3D-Konturverfolgung für das Laserstrahlschweissen*. Internetseite des Fraunhofer ILT (Institut für Lasertechnik), aufgerufen am 14.11.2003. <http://www.ilt.fhg.de/ger/jb00-s64.html>.
- [29] **Decker, K.-H.:** *Maschinenelemente*. 8. Auflage. München, Wien: Hanser 1982.

- [30] **Kempf, A.:** *Mathematische Herleitungen zur Auslegung mechanischer Sandwichverbindungen*. Forschungsbericht des Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik IKT der RWTH Aachen, 2004.
- [31] **VDI-Richtlinie 2230:** *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Düsseldorf: VDI Verlag 2001.
- [32] **Gold, P.W.:** *Maschinenelemente, Vorlesungsumdruck Band I*. 1. Auflage. Aachen: Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung 2001.
- [33] **Kammer, C.:** *Aluminium Taschenbuch 3*. 16. Auflage. Düsseldorf: Aluminium 2003.
- [34] **Beitz, W.; Grote, K.-H.:** *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. 19. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1997.
- [35] **Steinilper, W.; Röper, R.:** *Maschinen- und Konstruktionselemente 2*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1993.
- [36] **Grandt, J.:** *Blindniettechnik*. 1. Auflage. Landsberg/Lech: verlag moderne industrie AG 1994.
- [37] **Noll, M.:** *Konstruktion mechanischer Verbindungselemente zum Fügen von Sandwichbauteilen*. Studienarbeit am Institut für Konstruktionstechnik IKT der RWTH Aachen, 2004.
- [38] **Warkotsch, C.:** *Verbindung von Sandwichelementen mittels Durchsetzfügen, Körnen und fließlochformenden Schrauben*. Studienarbeit am Institut für Konstruktionstechnik IKT der RWTH Aachen, 2004.
- [39] **Feldhusen, J.; Kempf, A.:** *Methodische Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik für Sandwichelemente*. Konstruktion 9-2004.

Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

A1	Lösungsfeld theoretisch möglicher Verbindungselemente	A5
A2	Nutzwertanalyse der besten Verbindungselemente	A40
A3	Prinziplösungen für Sandwichverbindungen	A43
A3.1	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G2, Variation der Fügeelemente	A43
A3.1.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A43
A3.1.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A44
A3.1.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A45
A3.1.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A46
A3.1.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A47
A3.1.6	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A48
A3.1.7	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A49
A3.1.8	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A50
A3.1.9	Fügeelement 25 „Einpressverbindung“	A54
A3.1.10	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A55
A3.2	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement D10, Variation der Fügeelemente	A56
A3.2.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A56
A3.2.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A58
A3.2.3	Fügeelement 05 „Falzverbindung“	A59
A3.2.4	Fügeelement 06 „Körnverbindung“	A60
A3.2.5	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A61
A3.2.6	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A62
A3.2.7	Fügeelement 09 „Sickenverbindung“	A63
A3.2.8	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A64
A3.2.9	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A65
A3.2.10	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A66
A3.2.11	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A69
A3.2.12	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A70
A3.2.13	Fügeelement „Verpress- und Quetschverbindung“	A78
A3.2.14	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A78
A3.3	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement D1, Variation der Fügeelemente	A79
A3.3.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A79
A3.3.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A80
A3.3.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A81
A3.3.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A82
A3.3.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A83
A3.3.6	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A84
A3.3.7	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A85
A3.3.8	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A90
A3.3.9	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A91
A3.3.10	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A96

A3.4	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement A1, Variation der Fügeelemente	A98
A3.4.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A98
A3.4.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A99
A3.4.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A99
A3.4.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A100
A3.4.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A101
A3.4.6	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A102
A3.4.7	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A103
A3.4.8	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A106
A3.4.9	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A107
A3.4.10	Fügeelement 25 „Einpressverbindung“	A110
A3.4.11	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A111
A3.5	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement C11, Variation der Fügeelemente	A112
A3.5.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A112
A3.5.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A113
A3.5.3	Fügeelement 05 „Falzverbindung“	A114
A3.5.4	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A115
A3.5.5	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A116
A3.5.6	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A117
A3.5.7	Fügeelement 17 „Nut- und Feder-Verbindung“	A118
A3.5.8	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A119
A3.5.9	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A122
A3.5.10	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A123
A3.5.11	Fügeelement 25 „Einpressverbindung“	A127
A3.5.12	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A128
A3.6	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement F7, Variation der Fügeelemente	A129
A3.6.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A129
A3.6.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A130
A3.6.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A130
A3.6.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A131
A3.6.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A132
A3.6.6	Fügeelement 21 „Schraubverbindung“	A134
A3.6.7	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A137
A3.6.8	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A138
A3.6.9	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A142
A3.7	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement B3, Variation der Fügeelemente	A144
A3.7.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A144
A3.7.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A145
A3.7.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A146
A3.7.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A146
A3.7.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A147
A3.7.6	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A149
A3.7.7	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A152
A3.7.8	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A153
A3.7.9	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A156

A3.8	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement C1, Variation der Fügeelemente	A157
A3.8.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A158
A3.8.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A159
A3.8.3	Fügeelement 06 „Körnverbindung“	A160
A3.8.4	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A161
A3.8.5	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A162
A3.8.6	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A163
A3.8.7	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A164
A3.8.8	Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“	A165
A3.8.9	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A168
A3.8.10	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A169
A3.8.11	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A174
A3.9	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement E7, Variation der Fügeelemente	A175
A3.9.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A175
A3.9.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A176
A3.9.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A176
A3.9.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A177
A3.9.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A178
A3.9.6	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A179
A3.9.7	Fügeelement 21 „Schraubverbindung“	A180
A3.9.8	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A183
A3.9.9	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A184
A3.9.10	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A187
A3.10	Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G10, Variation der Fügeelemente	A188
A3.10.1	Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“	A188
A3.10.2	Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“	A189
A3.10.3	Fügeelement 07 „Lappverbindung“	A189
A3.10.4	Fügeelement 08 „Schränkverbindung“	A190
A3.10.5	Fügeelement 10 „Nietverbindung“	A191
A3.10.6	Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“	A192
A3.10.7	Fügeelement 21 „Schraubverbindung“	A193
A3.10.8	Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“	A196
A3.10.9	Fügeelement 24 „Spannverbindung“	A197
A3.10.10	Fügeelement 25 „Einpressverbindung“	A200
A3.10.11	Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren	A201
A4	Sperrelemente	A202
A4.1	Physikalische Effekte zur Aktivierung der Sperrelemente	A202
A4.2	Prinziplösungen für Sperrelemente	A207
A4.2.1	Fall 1: Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y- Achse, Gelenk unten	A208
A4.2.2	Fall 2: Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y- Achse, Gelenk Mitte	A212
A4.2.3	Fall 3 Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y- Achse, Gelenk oben	A215
A4.2.4	Fall 4: Rotation der Sperrkörper um die z-Achse	A219

A4.2.5	Fall 5: Rotation der Sperrkörper um die z-Achse (Langloch)	A221
A4.2.6	Fall 6: Translation der Sperrkörper in der x- und y-Ebene	A222
A4.2.7	Fall 7: Sonderfälle (Bewegungsrichtung der Sperrkörper nicht eindeutig bestimmbar)	A225
A5	Nutzwertanalyse der besten Sandwichverbindungen	A226

A1 Lösungsfeld theoretisch möglicher Verbindungselemente

Im Folgenden wird durch Kombination der VE-Grundelemente und der Sandwichelemente (siehe Tabelle A1) das Lösungsfeld aller möglichen Sandwich-Verbindungselemente aufgespannt.

Herkömmliche VEs (Grundelemente)		Sandwichelemente			
1		5		8	
2		6		9	
3		7a		10	
4a		7b		11	
4b		7c			
4c					

Tabelle A1: Verbindungselementgruppen

Die Kombinatorik hält sich dabei an folgende Regeln:

- Jedes Element bzw. jede Elementkombination wird jeweils mit den nachfolgenden Elementen kombiniert. Auf diese Weise ergeben sich alle möglichen Kombinationen.
- Wenn sich zwei VEs berühren oder durchdringen, wird der resultierende Körper als neues, komplexeres VE angesehen.

- Es handelt sich bisher nur um qualitative Betrachtungen, die genaue Gestalt sowie die quantitativen Parameter der Verbindungselemente werden damit noch nicht festgelegt.

Sämtliche bei der Kombinatorik entstehende VEs werden direkt einer Grobbewertung unterzogen, um das sehr große Lösungsfeld frühzeitig durch Identifizierung unbrauchbarer Lösungen einzuschränken. Dabei führen folgende Kriterien zum Ausschluss einer Lösung:

- Geometrische Unverträglichkeit (g)
An einer oder mehreren Stellen der Lösung durchdringen sich Sandwichdeckschichten oder Sandwichdeckschicht und VE, oder die Sandwichdeckschicht müsste gleichzeitig in zwei Richtungen verformt werden (Beispiel: Kombination aus Grundelement 2 und Sandwichelement 10).
- Einschließung eines VEs in einem anderen (e)
Eines der Verbindungselemente wird vollständig von einem anderen umschlossen bzw. ist mit diesem deckungsgleich und damit überflüssig (Beispiel: Kombination der Grundelemente 3 und 5).
- Nachbau eines Grundelements aus einem anderen (n)
Eine Sandwichverbindung kommt bei Grundelementen mit rechtem/linken Teil nur zustande, wenn die entsprechenden Teile miteinander gefügt werden und somit ein anderes Grundelement „nachgebaut“ wird (Beispiel: Sandwichverbindung mit Grundelement 6 baut Grundelement 2 nach).
- VE-Teile ohne Funktion (f)
Die durch die Kombination neu hinzugekommenen Elemente besitzen keine Funktion bzw. ihre Funktion kann durch ein anderes Grundelement einfacher realisiert werden (Beispiel: Kombination der Grundelemente 1 und 7b).

Lösungen, die während der Bewertung ausscheiden, werden in der Kombinatorik nicht weiter verfolgt.

Tabelle A2 zeigt das gesamte Lösungsfeld. Die Bezeichnung der einzelnen Lösungen erfolgt durch die Nummern der Grund- bzw. Sandwichelemente in der Reihenfolge Ihrer Kombination. Durch „/“ getrennte Grund-/Sandwichelemente stellen bereits verifizierte und damit brauchbare Lösungen dar, ein mit „ , “ getrenntes Grund-/Sandwichelement ist das neueste zur betrachteten Lösung hinzugefügte Element.

So besteht beispielsweise das VE „1/7b,7c“ aus der schon verifizierten Kombination der Grundelemente 1 und 7b, die im aktuellen Schritt mit dem Grundelement 7c kombiniert wird.

Lösung Nr.	Bezeichnung	Eignung (✓/x)	Begründung bei Nichteignung
1.	1	✓	
2.	1,2	✓	
3.	1,3	✓	
4.	1,4a	✓	
5.	1,4b	✓	
6.	1,4c	x	f
7.	1,5	✓	
8.	1,6	✓	
9.	1,7a	x	e
10.	1,7b	x	f
11.	1,7c	x	f
12.	1,8	x	g

13.	1,9	x	g
14.	1,10	✓	
15.	1/2,3	x	e
16.	1/2,4a	✓	
17.	1/2,4b	✓	
18.	1/2,4c	x	f
19.	1/2,5	x	e
20.	1/2,6	x	e
21.	1/2,7a	x	e
22.	1/2,7b	x	f
23.	1/2,7c	x	f
24.	1/2,8	x	g
25.	1/2,9	x	g
26.	1/2,10	x	g

27.	1/3,4a	x	e
28.	1/3,4b	✓	
29.	1/3,4c	x	f
30.	1/3,5	x	e
31.	1/3,6	x	e
32.	1/3,7a	x	e
33.	1/3,7b	x	f
34.	1/3,7c	x	f
35.	1/3,8	x	g
36.	1/3,9	x	g
37.	1/3,10	x	g
38.	1/4a,4b	x	e
39.	1/4a,4c	x	e,f
40.	1/4a,5	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

41.	1/4a,6	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
42.	1/4a,7a	x	e
43.	1/4a,7b	x	f
44.	1/4a,7c	x	f
45.	1/4a,8	x	g
46.	1/4a,9	x	g
47.	1/4a,10	✓	
48.	1/4b,4c	x	e,f
49.	1/4b,5	✓	
50.	1/4b,6	✓	
51.	1/4b,7a	x	e
52.	1/4b,7b	x	f
53.	1/4b,7c	x	f
54.	1/4b,8	x	g

55.	1/4b,9	x	g
56.	1/4b,10	✓	
57.	1/5,6	x	f
58.	1/5,7a	x	e
59.	1/5,7b	x	f
60.	1/5,7c	x	f
61.	1/5,8	x	g
62.	1/5,9	x	g
63.	1/5,10	✓	
64.	1/6,7a	x	e
65.	1/6,7b	x	f
66.	1/6,7c	x	f
67.	1/6,8	x	g
68.	1/6,9	x	g

69.	1/6,10	✓	
70.	1/2/4a,4b	×	e
71.	1/2/4a,4c	×	e,f
72.	1/2/4a,5	×	e
73.	1/2/4a,6	×	e
74.	1/2/4a,7a	×	e
75.	1/2/4a,7b	×	f
76.	1/2/4a,7c	×	f
77.	1/2/4a,8	×	g
78.	1/2/4a,9	×	g
79.	1/2/4a,10	×	g
80.	1/2/4b,4c	×	e,f
81.	1/2/4b,5	×	e
82.	1/2/4b,6	×	e

83.	1/2/4b,7a	x	e
84.	1/2/4b,7b	x	f
85.	1/2/4b,7c	x	f
86.	1/2/4b,8	x	g
87.	1/2/4b,9	x	g
88.	1/2/4b,10	x	g
89.	1/3/4b,4c	x	e,f
90.	1/3/4b,5	x	e
91.	1/3/4b,6	x	e
92.	1/3/4b,7a	x	e
93.	1/3/4b,7b	x	f
94.	1/3/4b,7c	x	f
95.	1/3/4b,8	x	g
96.	1/3/4b,9	x	g

97.	1/3/4b,10	x	g
98.	1/4a/5,6	x	e
99.	1/4a/5,7a	x	e
100.	1/4a/5,7b	x	f
101.	1/4a/5,7c	x	f
102.	1/4a/5,8	x	g
103.	1/4a/5,9	x	g
104.	1/4a/5,10	✓	
105.	1/4a/6,7a	x	e
106.	1/4a/6,7b	x	f
107.	1/4a/6,7c	x	f
108.	1/4a/6,8	x	g
109.	1/4a/6,9	x	g
110.	1/4a/6,10	✓	

111.	1/4a/7b,7c	×	e,f
112.	1/4a/7b,8	×	g,f
113.	1/4a/7b,9	×	g
114.	1/4a/7b,10	×	f
115.	1/4a/7c,8	×	g,f
116.	1/4a/7c,9	×	g
117.	1/4a/7c,10	×	f
118.	1/4b/5,6	×	e
119.	1/4b/5,7a	×	e
120.	1/4b/5,7b	×	f
121.	1/4b/5,7c	×	f
122.	1/4b/5,8	×	g
123.	1/4b/5,9	×	g
124.	1/4b/5,10	✓	

125.	1/4b/6,7a	x	e
126.	1/4b/6,7b	x	f
127.	1/4b/6,7c	x	f
128.	1/4b/6,8	x	g
129.	1/4b/6,9	x	g
130.	1/4b/6,10	✓	
131.	2	✓	
132.	2,3	x	e
133.	2,4a	✓	
134.	2,4b	✓	
135.	2,4c	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
136.	2,5	x	e,n
137.	2,6	x	e
138.	2,7a	✓	

139.	2,7b	x	f,n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
140.	2,7c	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
141.	2,8	✓	
142.	2,9	✓	
143.	2,10	x	g
144.	2/4a,4b	x	e
145.	2/4a,4c	x	e,f
146.	2/4a,5	x	e,n
147.	2/4a,6	x	e
148.	2/4a,7a	✓	
149.	2/4a,7b	x	f,n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
150.	2/4a,7c	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
151.	2/4a,8	✓	
152.	2/4a,9	✓	

153.	2/4a,10	x	g
154.	2/4b,4c	x	e,f
155.	2/4b,5	x	e
156.	2/4b,6	x	e
157.	2/4b,7a	✓	
158.	2/4b,7b	x	f
159.	2/4b,7c	x	f
160.	2/4b,8	✓	
161.	2/4b,9	x	f
162.	2/4b,10	x	g
163.	2/4c,5	x	e,n
164.	2/4c,6	x	e
165.	2/4c,7a	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
166.	2/4c,7b	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

167.	2/4c,7c	x	f
168.	2/4c,8	x	g
169.	2/4c,9	✓	
170.	2/4c,10	x	g
171.	2/7a,7b	x	e
172.	2/7a,7c	x	n
173.	2/7a,8	✓	
174.	2/7a,9	✓	
175.	2/7a,10	x	g
176.	2/7b,7c	x	e,n
177.	2/7b,8	x	f
178.	2/7b,9	✓	
179.	2/7b,10	x	g
180.	2/7c,8	x	f

181.	2/7c,9	✓	
182.	2/7c,10	×	g
183.	2/8,9	×	g
184.	2/8,10	×	g
185.	2/9,10	×	g
186.	2/4a/7a,7b	×	e,f
187.	2/4a/7a,7c	×	n,f
188.	2/4a/7a,8	✓	
189.	2/4a/7a,9	✓	
190.	2/4a/7a,10	×	g
191.	2/4a/7b,7c	×	e
192.	2/4a/7b,8	×	f
193.	2/4a/7b,9	✓	
194.	2/4a/7b,10	×	g

195.	2/4a/7c,8	×	f
196.	2/4a/7c,9	✓	
197.	2/4a/7c,10	×	g
198.	2/4a/8,9	×	g
199.	2/4a/8,10	×	g
200.	2/4a/9,10	×	g
201.	2/4b/7a,7b	×	e,f
202.	2/4b/7a,7c	×	n,f
203.	2/4b/7a,8	✓	
204.	2/4b/7a,9	×	f
205.	2/4b/7a,10	×	g
206.	2/4b/8,9	×	g
207.	2/4b/8,10	×	g
208.	2/4c/7a,7b	×	e

209.	2/4c/7a,7c	×	n
210.	2/4c/7a,8	×	g
211.	2/4c/7a,9	✓	
212.	2/4c/7a,10	×	g
213.	2/4c/7b,7c	×	e
214.	2/4c/7b,8	×	g
215.	2/4c/7b,9	✓	
216.	2/4c/7b,10	×	g
217.	2/4c/9,10	×	g
218.	2/7a/8,9	×	g
219.	2/7a/8,10	×	g
220.	2/7a/9,10	×	g
221.	2/7b/9,10	×	g
222.	2/7c/9,10	×	g

223.	2/4a/7a/8,9	x	g
224.	2/4a/7a/8,10	x	g
225.	2/4a/7a/9,10	x	g
226.	2/4a/7b/9,10	x	g
227.	2/4b/7a/8,9	x	g
228.	2/4b/7a/8,10	x	g
229.	2/4c/7a/9,10	x	g
230.	2/4c/7b/9,10	x	g
231.	3	✓	
232.	3,4a	x	e
233.	3,4b	x	f
234.	3,4c	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
235.	3,5	x	e
236.	3,6	x	e

237.	3,7a	✓	
238.	3,7b	×	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
239.	3,7c	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
240.	3,8	✓	
241.	3,9	✓	
242.	3,10	×	g
243.	3/4c,5	×	e
244.	3/4c,6	×	e
245.	3/4c,7a	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
246.	3/4c,7b	×	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
247.	3/4c,7c	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
248.	3/4c,8	×	g
249.	3/4c,9	✓	

250.	3/4c,10	x	g
251.	3/7a,7b	x	e
252.	3/7a,7c	x	n
253.	3/7a,8	✓	
254.	3/7a,9	✓	
255.	3/7a,10	x	g
256.	3/7b,7c	x	e
257.	3/7b,8	x	f
258.	3/7b,9	✓	
259.	3/7b,10	x	g,n
260.	3/7c,8	x	f
261.	3/7c,9	✓	
262.	3/7c,10	x	f,g
263.	3/8,9	x	g

264.	3/8,10	x	g
265.	3/9,10	x	g
266.	3/4c/7a,7b	x	e,n
267.	3/4c/7a,7c	x	n
268.	3/4c/7a,8	x	g
269.	3/4c/7a,9	✓	
270.	3/4c/7a,10	x	g
271.	3/4c/7b,7c	x	n
272.	3/4c/7b,8	x	g
273.	3/4c/7b,9	✓	
274.	3/4c/7b,10	x	
275.	3/4c/7c,8	x	g
276.	3/4c/7c,9	✓	
277.	3/4c/7c,10	x	g

278.	3/4c/9,10	x	g
279.	3/7a/8,9	x	g
280.	3/7a/8,10	x	g
281.	3/7a/9,10	x	g
282.	3/7b/9,10	x	g
283.	3/7c/9,10	x	g
284.	3/4c/7a/9,10	x	g
285.	3/4c/7b/9,10	x	g
286.	3/4c/7c/9,10	x	g
287.	4a	✓	
288.	4a,4b	x	e
289.	4a,4c	x	e
290.	4a,5	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
291.	4a,6	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

292.	4a,7a	x	f
293.	4a,7b	x	f
294.	4a,7c	x	f
295.	4a,8	✓	
296.	4a,9	x	f
297.	4a,10	✓	
298.	4a/5,6	x	e
299.	4a/5,7a	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
300.	4a/5,7b	x	f,n
301.	4a/5,7c	x	f,n
302.	4a/5,8	x	n
303.	4a/5,9	x	f
304.	4a/5,10	✓	
305.	4a/6,7a	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

306.	4a/6,7b	×	f,n
307.	4a/6,7c	×	f,n
308.	4a/6,8	×	n
309.	4a/6,9	×	n,f
310.	4a/6,10	✓	
311.	4a/8,9	×	g
312.	4a/8,10	×	g
313.	4a/5/7a,7b	×	f,e,n
314.	4a/5/7a,7c	×	n,f
315.	4a/5/7a,8	×	n
316.	4a/5/7a,9	×	f,n
317.	4a/5/7a,10	✓	
318.	4a/6/7a,7b	×	e,n,f
319.	4a/6/7a,7c	×	n,f

320.	4a/6/7a,8	x	n
321.	4a/6/7a,9	x	n,f
322.	4a/6/7a,10	✓	
323.	4b	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
324.	4b,5	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
325.	4b,6	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
326.	4b,7a	x	f
327.	4b,7b	x	f
328.	4b,7c	x	f
329.	4b,8	✓	
330.	4b,9	x	f
331.	4b,10	x	f
332.	4b/5,6	x	e,n
333.	4b/5,7a	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

334.	4b/5,7b	x	f,n
335.	4b/5,7c	x	f,n
336.	4b/5,8	x	n
337.	4b/5,9	x	f,n
338.	4b/5,10	x	f
339.	4b/6,7a	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
340.	4b/6,7b	x	f,n
341.	4b/6,7c	x	f,n
342.	4b/6,8	x	n
343.	4b/6,9	x	f,n
344.	4b/6,10	x	f
345.	4b/8,9	x	g,f
346.	4b/8,10	x	g
347.	4b/5/7a,7b	x	e,f

348.	4b/5/7a,7c	x	n,f
349.	4b/5/7a,8	x	n
350.	4b/5/7a,9	x	n,f
351.	4b/5/7a,10	x	f
352.	4b/6/7a,7b	x	e,n
353.	4b/6/7a,7c	x	n
354.	4b/6/7a,8	x	n
355.	4b/6/7a,9	x	n,f
356.	4b/6/7a,10	x	f
357.	4c	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
358.	4c,5	x	n,f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
359.	4c,6	x	n,f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
360.	4c,7a	x	f
361.	4c,7b	x	n,f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

362.	4c,7c	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
363.	4c,8	×	g
364.	4c,9	✓	
365.	4c,10	×	f
366.	4c/5,6	×	e,n
367.	4c/5,7a	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
368.	4c/5,7b	×	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
369.	4c/5,7c	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
370.	4c/5,8	×	g
371.	4c/5,9	×	n
372.	4c/5,10	×	f
373.	4c/6,7a	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
374.	4c/6,7b	×	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.

375.	4c/6,7c	×	f
376.	4c/6,8	×	g
377.	4c/6,9	×	f,n
378.	4c/6,10	×	f
379.	4c/7b,7c	×	e,n
380.	4c/7b,8	×	g
381.	4c/7b,9	✓	
382.	4c/7b,10	×	f,n
383.	4c/7c,8	×	g
384.	4c/7c,9	✓	
385.	4c/7c,10	×	f
386.	4c/9,10	×	g
387.	4c/5/7a,7b	×	e,n
388.	4c/5/7a,7c	×	n

389.	4c/5/7a,8	x	g
390.	4c/5/7a,9	x	n
391.	4c/5/7a,10	x	f
392.	4c/5/7b,7c	x	e
393.	4c/5/7b,8	x	g
394.	4c/5/7b,9	x	n
395.	4c/5/7b,10	x	n
396.	4c/5/7c,8	x	g
397.	4c/5/7c,9	x	n
398.	4c/5/7c,10	x	f
399.	4c/6/7a,7b	x	e,n
400.	4c/6/7a,7c	x	n
401.	4c/6/7a,8	x	g
402.	4c/6/7a,9	x	n

403.	4c/6/7a,10	x	f
404.	4c/6/7b,7c	x	e
405.	4c/6/7b,8	x	g
406.	4c/6/7b,9	x	n
407.	4c/6/7b,10	x	n
408.	4c/7b/9,10	x	g
409.	4c/7c/9,10	x	g
410.	5	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
411.	5,6	x	e
412.	5,7a	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
413.	5,7b	x	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
414.	5,7c	x	f
415.	5,8	✓	
416.	5,9	x	f

417.	5,10	✓	
418.	5/7a,7b	×	e
419.	5/7a,7c	×	n
420.	5/7a,8	×	f
421.	5/7a,9	×	f
422.	5/7a,10	✓	
423.	5/7b,7c	×	e
424.	5/7b,8	×	f
425.	5/7b,9	✓	
426.	5/7b,10	×	f,n
427.	5/8,9	×	g
428.	5/8,10	×	g
429.	6	×	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
430.	6,7a	×	n

431.	6,7b	x	n
432.	6,7c	x	n,f
433.	6,8	✓	
434.	6,9	x	f
435.	6,10	✓	
436.	6/8,9	x	g
437.	6/8,10	x	g
438.	7a	x	n
439.	7b	x	n, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
440.	7b,7c	x	e
441.	7b,8	x	f
442.	7b,9	✓	
443.	7b,10	x	
444.	7b/9,10	x	g

445.	7c	×	f, trotzdem können weitere Kombinationen sinnvoll sein, d.h. wird weiter verfolgt.
446.	7c,8	×	f
447.	7c,9	✓	
448.	7c,10	×	f
449.	8	✓	
450.	8,9	×	g
451.	8,10	×	g
452.	9	✓	
453.	9,10	×	g
454.	10	✓	

Tabelle A2: Lösungsfeld theoretisch möglicher Verbindungselemente

A2 Nutzwertanalyse der besten Verbindungselemente

Im Folgenden wird für die 78 Verbindungselemente, die in der Grobbewertung aus Kapitel 3.2.1 als sinnvoll bewertet wurden, eine Nutzwertanalyse durchgeführt (siehe Tabelle A3).

VE Nr.	Hohe übertragbare Kräfte und Momente (1)	Eindeutige und kurze Kraftleitungswege (2)	Keine Steifigkeitssprünge (3)	Optisch unauffällig (4)	Geringer Aufwand zur Vorbereitung des Sandwichts (5)	Geringe Komplexität der Verbindungselemente (6)	Geringe Anzahl an Einzelelementen (7)	Einfacher Fügevorgang (8)	Positionierung der zu verbindenden Sandwichts zueinander ist einfach und präzise (9)	Gesamtpunktzahl	Rang	Lösung
A1	8	10	10	9	10	9	9	10	3	8,48	4	A1
B1	8	0	3	9	10	8	8	0	2	5,393	51	B1
C1	9	10	10	9	6	9	7	7	5	7,95	8	C1
D1	10	10	10	9	5	6	8	8	8	8,525	3	D1
E1	10	10	0	9	4	8	8	8	7	6,52	29	E1
F1	10	10	0	9	4	8	7	8	3	6	45	F1
G1	9	10	8	9	5	8	5	7	3	7,128	17	G1
A2	8	0	10	9	1	9	9	0	3	5,35	52	A2
B2	10	10	0	9	6	3	10	10	10	7,405	15	B2
C2	10	0	0	9	0	8	7	0	2	3,795	75	C2
D2	8	0	10	9	1	8	8	0	2	5,185	55	D2
E2	10	0	0	9	0	8	6	0	2	3,775	76	E2
F2	10	0	8	9	0	8	4	0	2	5,143	60	F2
G2	9	10	10	9	10	6	10	10	9	9,465	1	G2
A3	10	10	0	9	4	6	8	8	9	6,73	26	A3
B3	10	10	8	9	5	6	6	7	9	8,133	7	B3
C3	8	0	10	9	1	6	10	0	9	6,06	43	C3
D3	10	0	0	9	0	6	8	0	9	4,65	67	D3
E3	10	0	8	9	0	6	6	0	9	6,018	44	E3
F3	0	10	0	9	10	8	10	0	2	3,145	78	F3
G3	10	0	8	9	0	8	5	0	3	5,288	54	G3

A4	9	10	9	7	5	4	10	6	8	7,714	12	A4
B4	10	10	9	4	5	4	6	6	8	7,744	11	B4
C4	8	10	10	1	1	8	10	10	2	6,475	32	C4
D4	3	10	10	9	1	8	10	0	2	4,29	70	D4
E4	6	0	3	9	0	8	10	0	8	4,033	72	E4
F4	9	0	10	9	0	5	10	8	10	7,28	16	F4
G4	9	0	10	2	0	9	5	6	6	6,125	40	G4
A5	9	10	10	0	1	8	6	10	2	6,615	27	A5
B5	8	0	10	2	0	9	5	6	6	5,85	46	B5
C5	9	0	10	2	0	6	5	7	9	6,565	28	C5
D5	9	0	9	2	0	6	5	7	9	6,389	37	D5
E5	9	10	0	9	0	8	8	0	2	3,98	73	E5
F5	9	0	10	7	0	5	8	7	10	7,005	19	F5
G5	9	0	10	0	0	6	6	7	9	6,475	34	G5
A6	9	10	8	9	0	8	6	0	2	5,348	53	A6
B6	10	0	0	0	1	8	5	8	8	5,17	56	B6
C6	9	0	0	0	1	8	5	8	8	4,895	64	C6
D6	9	0	0	1	1	7	5	7	8	4,805	66	D6
E6	8	0	0	1	1	7	5	7	8	4,53	68	E6
F6	7	0	3	9	0	8	10	0	8	4,308	69	F6
G6	10	0	8	5	0	8	2	0	2	4,883	65	G6
A7	9	10	10	0	1	7	6	9	2	6,47	35	A7
B7	9	10	0	8	0	8	5	0	2	3,865	74	B7
C7	10	0	10	0	1	4	6	8	9	6,995	20	C7
D7	10	0	0	0	1	5	6	8	8	5,13	61	D7
E7	9	10	10	8	6	9	5	7	5	7,855	9	E7
F7	10	10	10	5	5	6	6	8	8	8,265	6	F7
G7	10	10	0	8	4	8	6	8	7	6,425	36	G7
A8	8	10	9	0	1	8	7	10	3	6,309	39	A8
B8	9	0	10	3	0	6	10	8	9	6,845	24	B8
C8	8	10	10	0	1	9	7	10	3	6,505	30	C8
D8	10	0	10	9	0	6	10	8	10	7,575	13	D8
E8	9	10	0	10	4	8	10	8	7	6,34	38	E8
F8	9	0	10	0	0	8	5	7	6	6,12	41	F8
G8	9	0	10	8	0	9	7	7	9	6,995	22	G8
A9	10	0	10	0	0	5	6	8	9	6,855	23	A9
B9	10	0	10	8	0	6	8	8	10	7,48	14	B9
C9	10	0	0	0	1	7	5	8	8	5,15	58	C9
D9	10	0	0	8	0	8	8	8	9	5,635	48	D9
E9	10	10	0	0	1	7	5	8	3	4,965	63	E9
F9	10	0	0	5	0	8	4	0	2	3,515	77	F9
G9	9	0	0	3	1	8	10	8	8	5,16	57	G9
A10	10	0	0	9	0	8	10	8	9	5,73	47	A10
B10	9	10	0	10	0	8	9	0	2	4,055	71	B10
C10	8	10	0	10	0	8	9	8	8	5,53	49	C10
D10	10	10	10	9	6	4	10	10	10	9,185	2	D10
E10	9	0	10	1	0	6	10	8	9	6,735	25	E10
F10	9	0	0	1	1	7	10	8	8	5,03	62	F10

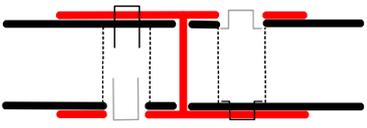
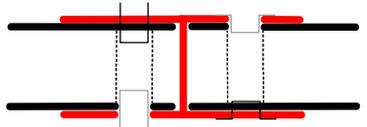
G10	8	10	10	10	6	9	9	7	5	7,77	10	G10
A11	8	0	10	3	0	9	9	7	6	6,11	42	A11
B11	9	0	10	9	0	9	9	7	9	7,09	18	B11
C11	9	10	10	9	6	6	10	8	8	8,45	5	C11
D11	8	10	8	10	0	8	7	0	2	5,148	59	D11
E11	7	10	8	9	0	8	9	7	8	6,483	31	E11
F11	7	10	10	3	1	10	10	10	3	6,475	32	F11
G11	7	10	10	10	1	10	10	0	2	5,485	50	G11
A12	6	10	10	9	0	10	10	10	8	6,995	20	A12

Tabelle A3: Nutzwertanalyse der besten Verbindungselemente

A3 Prinziplösungen für Sandwichverbindungen

A3.1 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G2, Variation der Fügeelemente

A3.1.1 Fügelement 01 „Blechsteppverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	-	++	✗
2		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.	--	--	++	✗

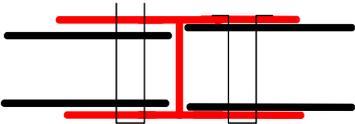
3		Einstoßen der Klammern durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	++	--	--	×
---	-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	----	----	----	---

Tabelle A4: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.1.2 Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“

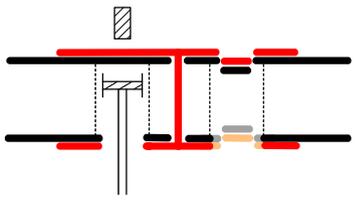
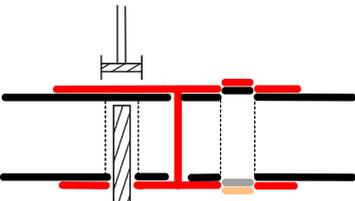
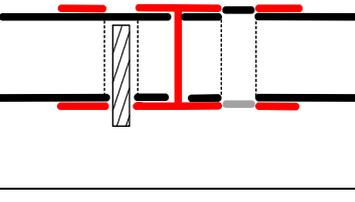
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch den Kern hindurch).	--	-	0	×
2		Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch den Kern hindurch) und Gegenhalter (von außen).	--	-	0	×
3		Örtliche plastische Verformung der Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch den Kern hindurch), VE bildet den Gegenhalter.	--	0	0	×

Tabelle A5: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Durchsetzfügeverbindung“

A3.1.3

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

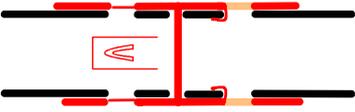
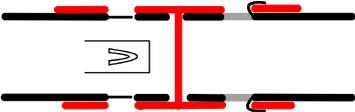
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht nach innen gebogen.	--	+	+	×
2		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen.	--	+	0	×
3		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umbogen.	--	++	0	×
4		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umbogen. Sicherung durch Klemmelement.	--	++	++	✓

Tabelle A6:

Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.1.4

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

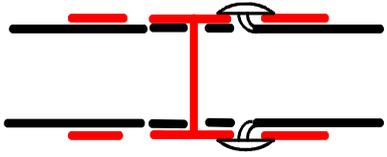
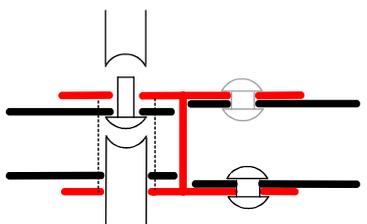
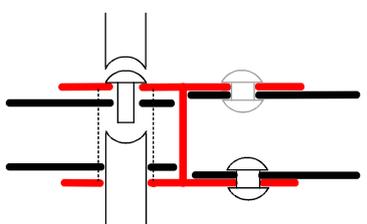
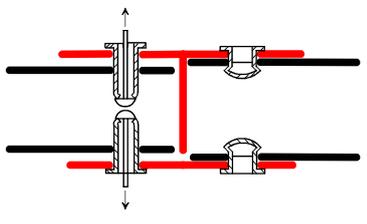
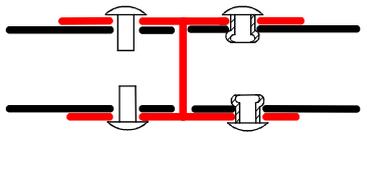
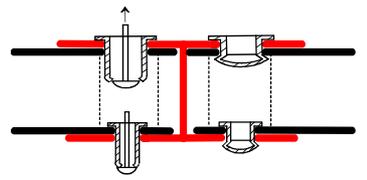
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Laschen der Sandwichdeck- schicht werden durch Öffnun- gen im VE nach außen gebö- gen und verdreht.</p>	--	-	-	✗
2		<p>In der Tiefe versetzte Laschen des VEs werden durch Öff- nungen in der Sandwich- Deckschicht nach innen gebö- gen und durch den Kern hin- durch verdreht.</p>	--	--	-	✗

Tabelle A7: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.1.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von außen.	--	--	++	✗
2		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
3		Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	++	++	++	✓
4		Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	++	++	++	✓
Fügen von einer Seite						
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	+	++	✓

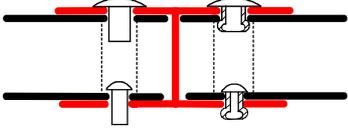
6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	++	✓
---	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

Tabelle A8: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.1.6 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

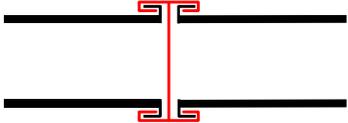
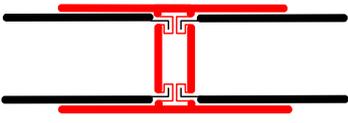
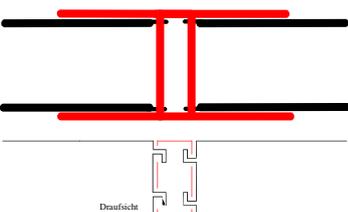
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>Seitliches Einschieben des Sandwich in das VE, VE-Deckbleche als Nuten ausgebildet.</p>	--	++	0	×
2		<p>Seitliches Einschieben des Sandwichs in das VE, VE-Mittelsteg mit Nuten.</p>	--	++	-	×
3		<p>Haken in Sandwichdeckschicht. Direktes Einschieben des Sandwichs ins VE, Fixieren durch seitliches Verschieben.</p>	--	++	--	×

Tabelle A9: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.1.7

Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

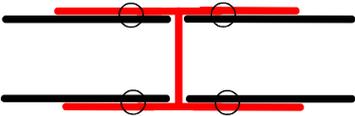
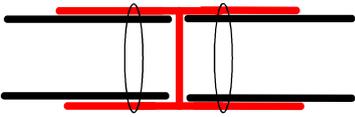
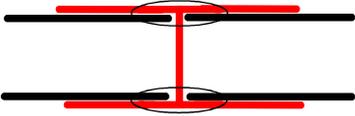
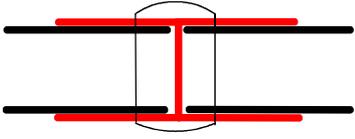
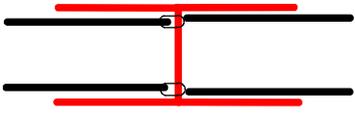
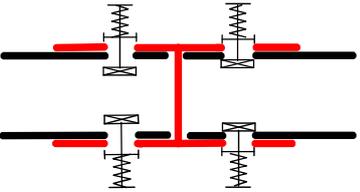
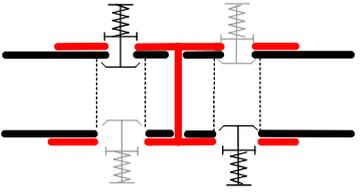
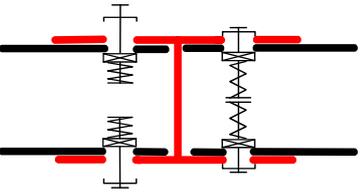
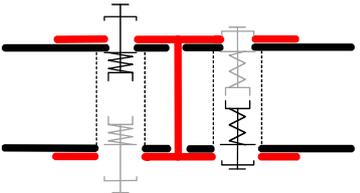
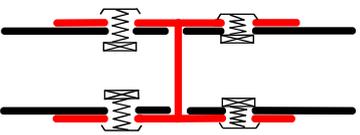
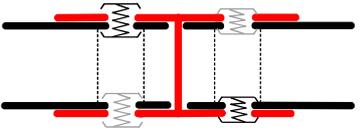
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	0	--	-	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten.	+	0	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	0	--	0	×
4		Komplettes Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten mit einer Naht.	++	0	--	×
5		Direktes Vernähen von VE-Mittelsteg und Sandwichdeckschicht.	0	--	+	×

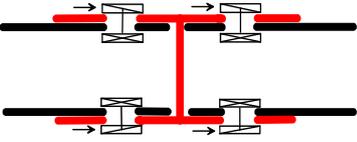
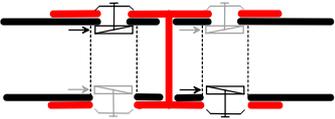
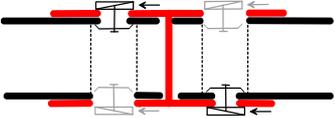
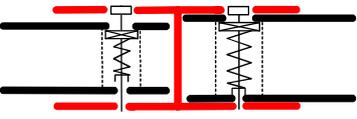
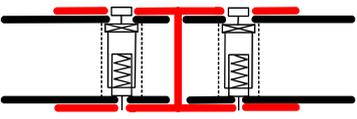
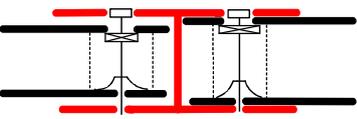
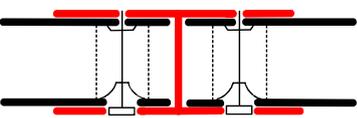
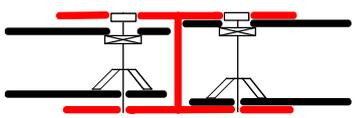
Tabelle A10: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.1.8

Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	+	+	✓
2		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	✗
3		Einsetzen der Spannelemente mit SE von außen, innen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	--	+	✗
4		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern, innen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	✗
5		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement, Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	-	+	✗
6		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	✗

7		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	0	0	-	×
8		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch, Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	-	×
9		Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Verspannung durch Zurückziehen der Biegefeder.	0	+	-	×
10		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	-	--	×
11		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	--	×
12		Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	-	--	×
13		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Drehfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	0	--	×
14		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines außen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	0	+	--	×

15		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	0	0	0	×
16		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	×
17		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	-	0	×
Fügen von einer Seite						
18		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Druckfeder und Sperrelement.	--	-	-	×
19		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Zugfeder und Sperrelement.	--	-	-	×
20		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Biegefeder und Sperrelement.	--	-	-	×
21		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung durch Zurückziehen der Biegefeder.	--	+	-	×
22		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Schubfeder und Sperrelement.	--	--	-	×

23		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung durch Zurückziehen der Schubfeder.	--	0	-	×
24		Einbringen des FE-Teils der Blechschraube durch das obere Gewindekernloch. Anziehen verspannt Deckbleche gegen VE.	--	0	-	×
25		Lange Blechschraube mit SE. Zurückdrehen verspannt die Sandwichdeckschichten gegen das VE.	--	-	-	×
26		Lange Blechschraube mit SE und kernlochbohrender Spitze.	--	--	-	×
27		Schraube mit FE-Spitze und SE-Mutter. Verspannung der beiden Sandwich-Deckschichten gegen das VE.	--	-	-	×
28		Schraube mit SE oben, Hohl-schraube mit Innengewinde unten. Verspannung der beiden Sandwich-Deckschichten gegen das VE.	--	-	0	×
29		Schraube mit SE oben, in unterer Standardschraube drehbar gelagert. Verspannung der beiden Sandwich-Deckschichten gegen das VE.	--	-	0	×

Tabelle A11: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.1.9

Fügeelement 25 „Einpressverbindung“

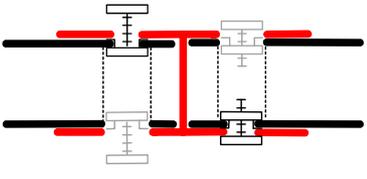
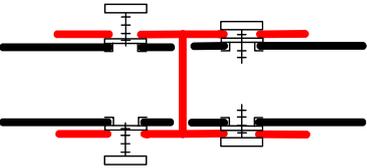
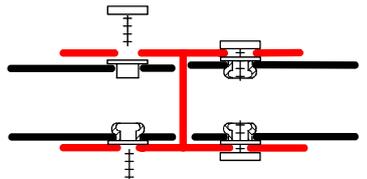
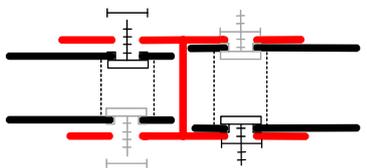
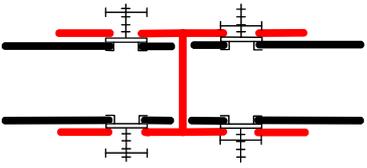
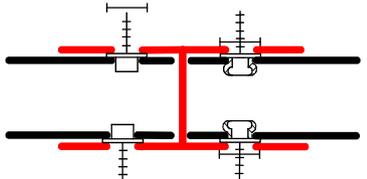
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		In der Tiefe versetztes Einpressen von Muttern in die Sandwichdeckschicht, Montage von innen durch Kern hindurch. Dann Verschraubung mit VE.	--	++	++	✓
2		Einpressen von flachen Muttern in die Sandwichdeckschicht, Montage von außen. Dann Verschraubung mit VE.	0	++	++	✓
3		Flache „Sprengmutter“ (ähnlich Sprengniet), Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, dann Verschrauben mit VE.	+	++	++	✓
4		Versetztes Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage von innen durch Kern hindurch. Dann Verschraubung mit VE.	0	++	++	✓
5		Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage von außen. Dann Verschraubung mit VE.	--	++	++	✓
6		„Sprengkopfschrauben“ (ähnlich Sprengniet), Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, dann Verschrauben mit VE mittels Mutter.	+	++	++	✓

Tabelle A12: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Einpressverbindung“

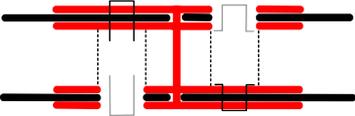
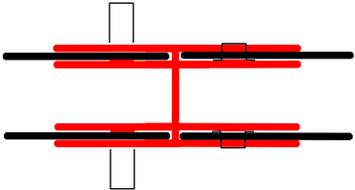
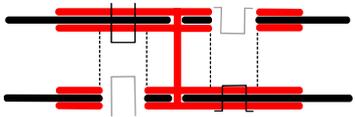
A3.1.10 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE G2 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Diese Verbindung ist nicht fertigbar, da der Gegenhalter nicht positioniert werden kann.
- Körnverbindung: Die Verbindung ist kaum belastbar, da das Sandwich aufgrund des deformierbaren Kerns aus dem VE herausrutschen kann.
- Sickenverbindung: Die Verbindung ist kaum belastbar, da das Sandwich aufgrund des deformierbaren Kerns aus dem VE herausrutschen kann.
- Verpress- u. Quetschverb.: Die Verbindung ist geometrisch nicht möglich (VE umschließt die Sandwichdeckschicht nicht).

A3.2 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement D10, Variation der Fügeelemente

A3.2.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	-	++	✗
2		Einstoßen der Klammern von außen durch die äußere VE-Schicht und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden automatisch beim Einstoßen durch Führung am inneren VE-Teil.	--	++	++	✓
3		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.	--	--	++	✗

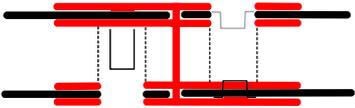
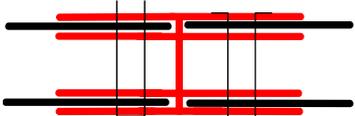
4		<p>Einstoßen der Klammern von innen durch die innere VE-Schicht und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden automatisch beim Einstoßen durch Führung am äußeren VE-Teil.</p>	--	--	++	×
5		<p>Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.</p>	--	--	--	×

Tabelle A13: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.2.2

Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

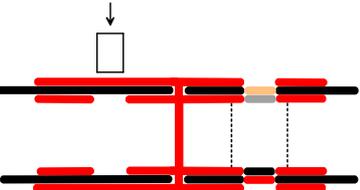
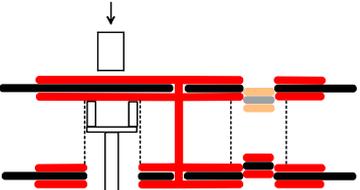
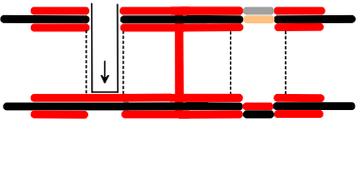
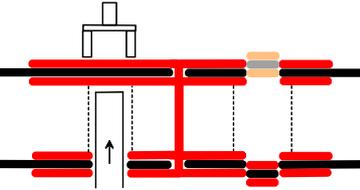
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). Der innere VE-Teil bildet den Gegenhalter.</p>	--	++	+	✓
2		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). Der Gegenhalter wird durch den Kern hindurch geführt.</p>	--	-	+	✗
3		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch). Der äußere VE-Teil bildet den Gegenhalter.</p>	--	0	+	✗
4		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch) und Gegenhalter.</p>	--	-	+	✗

Tabelle A14: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.2.3

Fügeelement 05 „Falzverbindung“

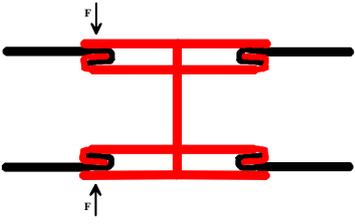
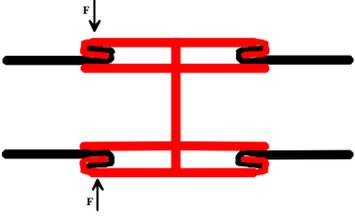
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Seitliches Einführen der vorgebogenen Sandwichelemente ins innen vorgebogene VE, Fügen durch Zusammenpressen der Verbindungsstellen (innerer VE-Teil bildet Gegenhalter).</p>	--	+	+	✗
2		<p>Seitliches Einführen der vorgebogenen Sandwichelemente ins außen vorgebogene VE, Fügen durch Zusammenpressen der Verbindungsstellen (innerer VE-Teil bildet Gegenhalter).</p>	--	+	+	✗

Tabelle A15: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Falzverbindung“

A3.2.4

Fügeelement 06 „Körnverbindung“

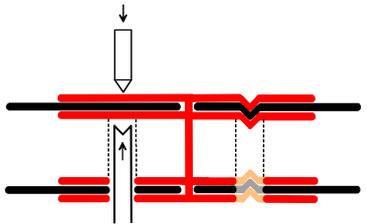
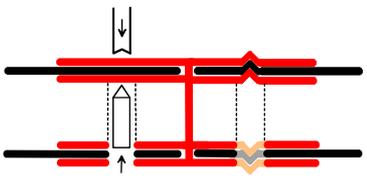
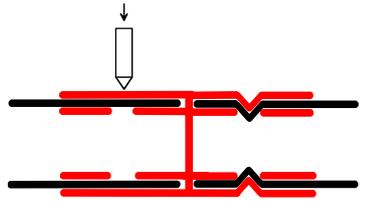
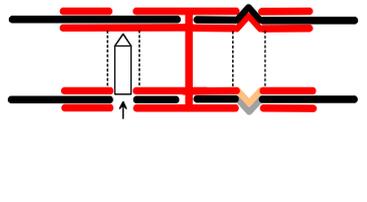
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Erzeugung einzelner, in der Tiefe versetzter Körnpunkte mittels Körner und durch den Kern hindurch geführten Gegenhalter.	--	0	+	×
2		Erzeugung einzelner, in der Tiefe versetzter Körnpunkte mittels Körner und durch den Kern hindurch geführten Gegenhalter.	--	0	+	×
3		Erzeugung einzelner Körnpunkte mittels Körner. Der innere VE-Teil bildet den Gegenhalter.	--	++	+	✓
4		Erzeugung einzelner, in der Tiefe versetzter Körnpunkte mittels durch den Kern hindurch geführten Körner. Der äußere VE-Teil bildet den Gegenhalter.	--	+	+	×

Tabelle A16: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Körnverbindung“

A3.2.5

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

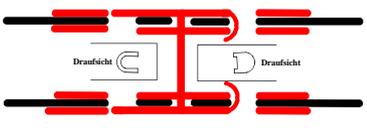
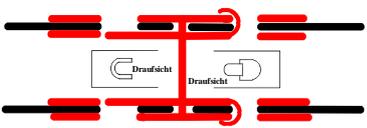
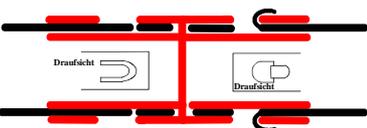
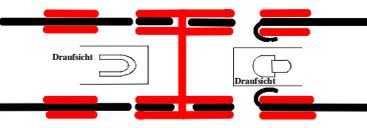
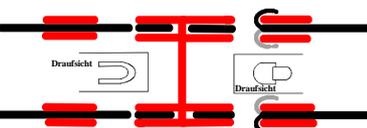
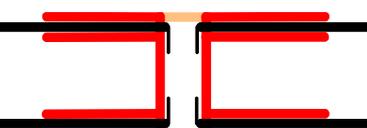
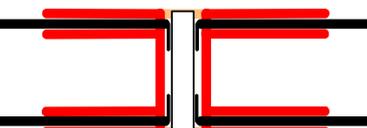
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Innenteil des VEs nach innen gebogen.	--	+	+	×
2		VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Außenteil des VEs nach außen gebogen.	--	0	+	×
3		Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen VE-Teil nach außen gebogen.	--	-	0	×
4		Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im unteren VE-Teil nach innen gebogen.	--	0	0	×
5		Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen und unteren VE-Teil nach außen bzw. innen gebogen.	--	-	0	×
6		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umbogen.	--	++	0	×
7		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umbogen. Sicherung durch Klemmelement.	--	++	++	✓

Tabelle A17: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.2.6

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

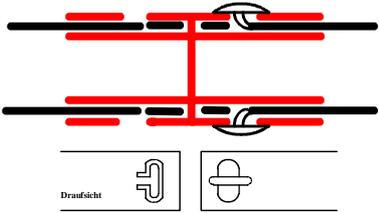
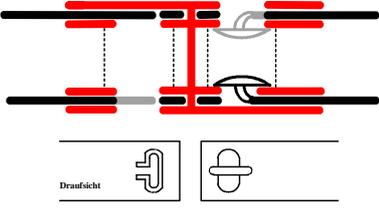
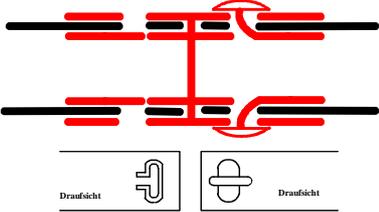
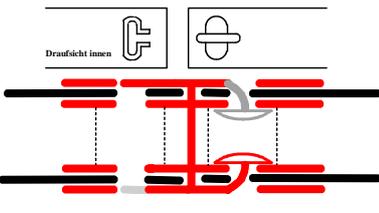
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1	 <p style="font-size: small;">Draufsicht  </p>	Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	-	✗
2	 <p style="font-size: small;">Draufsicht  </p>	In der Tiefe versetzte Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	-	✗
3	 <p style="font-size: small;">Draufsicht   Draufsicht</p>	Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	-	✗
4	 <p style="font-size: small;">Draufsicht innen  </p>	In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	-	✗

Tabelle A18: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.2.7

Fügeelement 09 „Sickenverbindung“

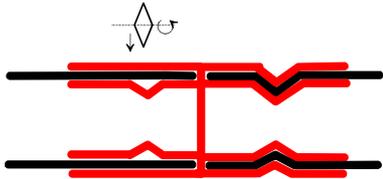
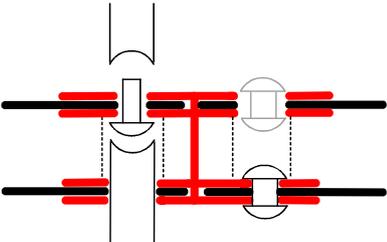
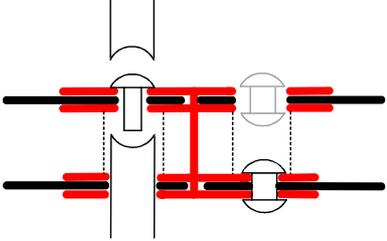
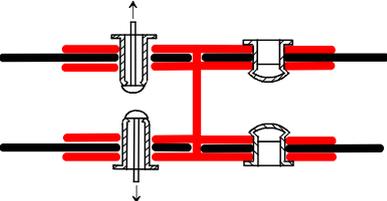
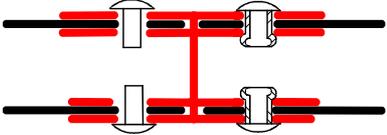
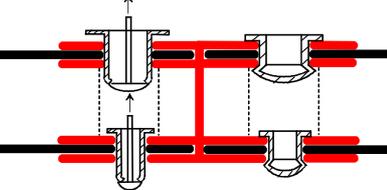
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		<p>Eindrücken einer Sicke in oberen VE-Teil und Sandwichdeckschicht entlang der VE-Oberfläche. innerer VE-Teil bildet den Gegenhalter.</p>	--	-	+	x

Tabelle A19: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Sickenverbindung“

A3.2.8

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von außen.	--	--	++	✗
2		Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
3		Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	++	++	✓
4		Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	--	++	++	✓
Fügen von einer Seite						
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	+	++	✓

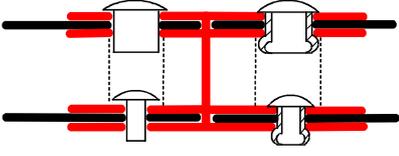
6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	++	✓
---	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

Tabelle A20: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.2.9 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

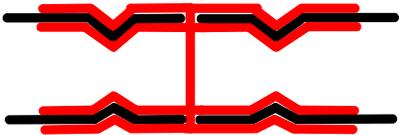
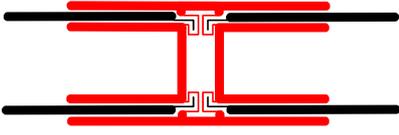
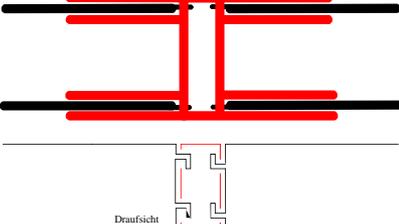
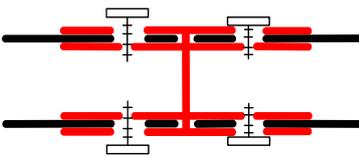
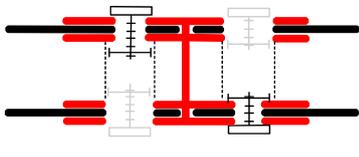
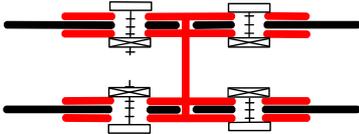
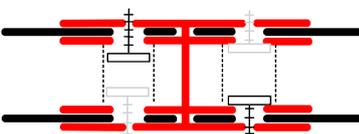
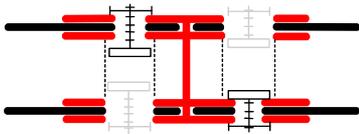
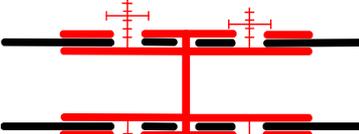
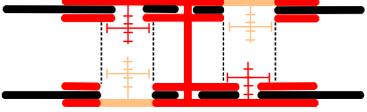
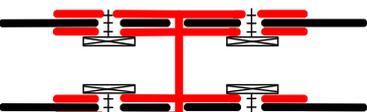
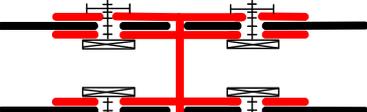
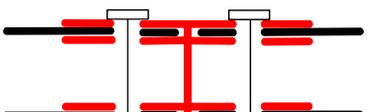
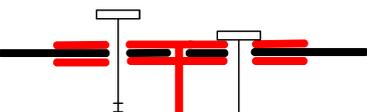
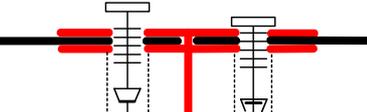
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		<p>Montage durch seitliches Einschieben. Form und Lage der VE-Nut können variiert werden.</p>	--	++	0	x
2		<p>Seitliches Einschieben des Sandwichs in das VE, VE-Mittelsteg mit Nuten.</p>	--	++	-	x
3		<p>Haken in Sandwichdeckschicht. Direktes Einschieben des Sandwichs ins VE, Fixieren durch seitliches Verschieben.</p>	--	++	--	x

Tabelle A21: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.2.10

Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben von außen direkt ins VE.	--	++	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von außen in innen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	×
3		Einsetzen der Schrauben mit SE-Muttern von außen.	--	0	++	×
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE, Montage durch Kern hindurch.	--	-	++	×
5		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen in außen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	×
6		Gewindebolzen gehören zum Innenteil des VEs, Montage der Muttern von außen.	--	0	++	×

7		Gewindebolzen gehören zu den äußeren Teilen des VEs und sind in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch.	--	-	++	×
8		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.	--	+	++	(✓) 
9		Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	--	+	++	(✓) 
10		Eindreihen der Schrauben in die gegenüberliegenden äußeren Muttern.	--	0	++	×
11		Gewindebolzen gehören zum äußeren Teil des VEs. Montage der Muttern von außen auf der gegenüberliegenden Seite.	--	-	++	×
Fügen von einer Seite						
12		Eindreihen der Schrauben in das gegenüberliegende äußere VE-Element.	--	+	++	✓
13		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	++	✓

14		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	++	✓
15		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	++	✓
16		Unabhängiges Eindreihen der Hohlschraube und der inneren Schraube.	--	+	++	✓
17		Oben Hohlschraube mit innenliegender SE-Mutter, unten lange Standardschraube.	--	-	++	✗
18		Oben Hohlschraube mit SE-Kopf und außenliegender Mutter, unten lange Standardschraube.	--	0	++	(✓)
19		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube.	--	+	++	✓
20		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube mit SE-Mutter.	--	0	++	(✓)

21		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen SE-Schraube mit äußerer Mutter.	--	+	++	(✓)
22		SE-Schrauben oben, Standardschrauben unten.	--	+	++	(✓)

Tabelle A22: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

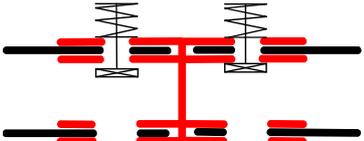
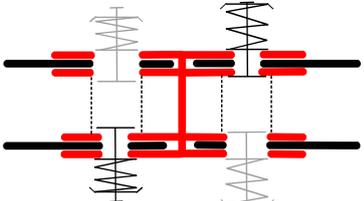
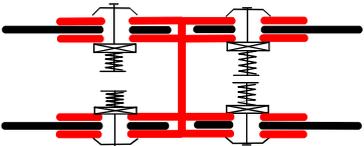
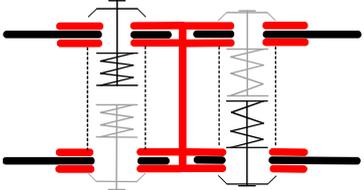
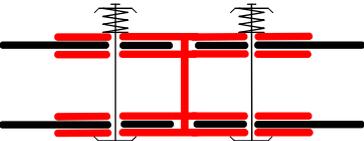
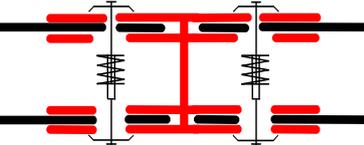
A3.2.11 Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichteilen an vier Stellen.	--	--	0	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte).	--	0	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte, jeweils eine oben und unten).	--	--	0	×
4		Alle Elemente werden durch eine Naht verbunden.	--	0	--	×

Tabelle A23: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

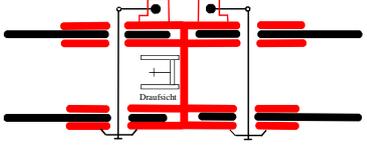
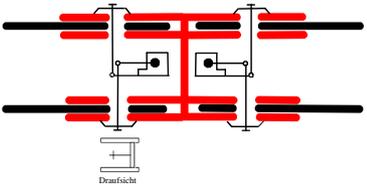
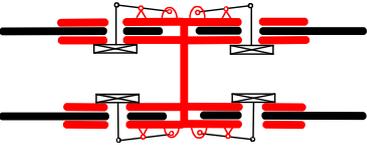
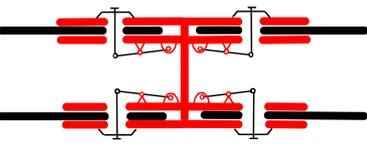
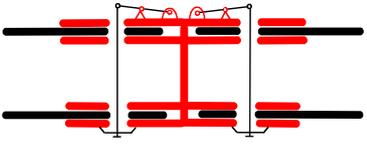
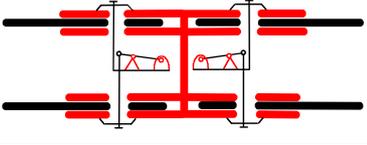
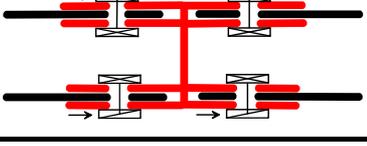
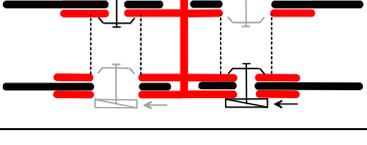
A3.2.12

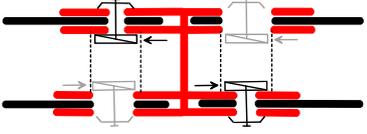
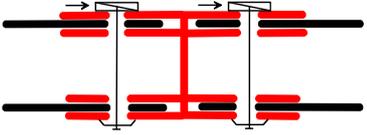
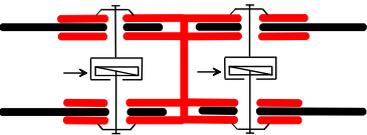
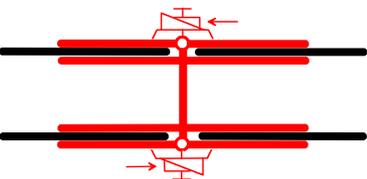
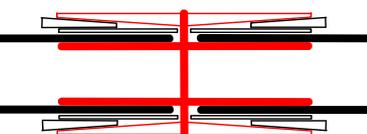
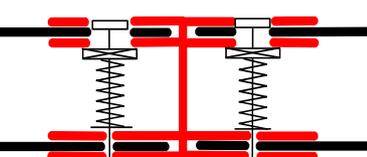
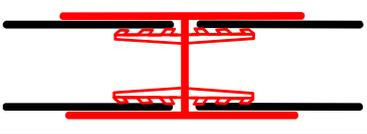
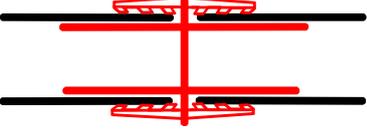
Fügeelement 24 „Spannverbindung“

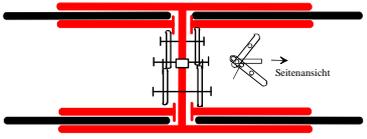
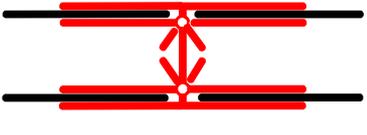
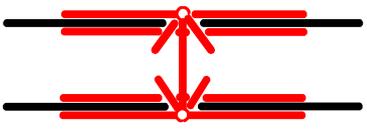
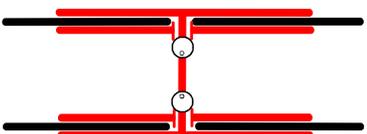
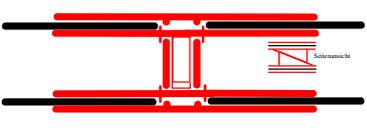
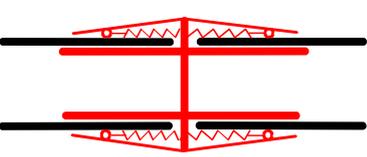
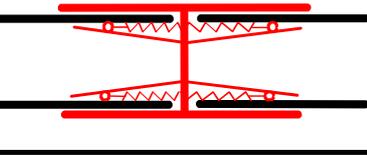
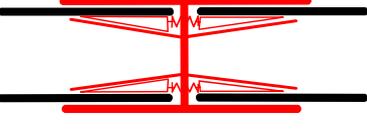
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
Fügen von einer Seite						
1		Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	0	+	×
2		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	×
3		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	0	+	×
4		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder, Montage durch Kern hindurch.	--	0	+	×
5		Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	×
6		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	×

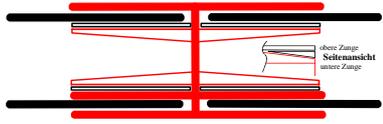
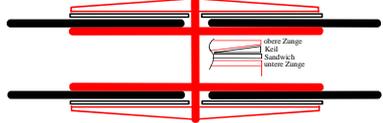
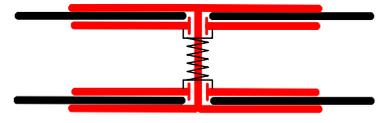
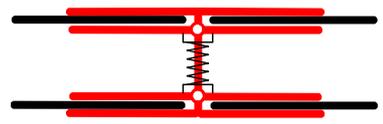
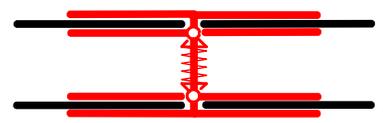
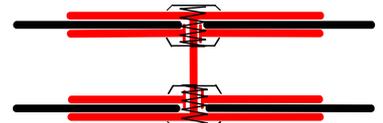
7		Zugfeder-Spannelement mit SE, Montage von außen.	--	0	+	×
8		Zugfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	×
9		Zugfeder-Spannelement für seitenweise Verspannung.	--	0	+	×
10		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	-	+	×
11		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×
12		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	++	+	✓
13		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	×
14		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	×

15		Äußerer Teil des VE als Biegefeder ausgebildet.	--	+	+	×
16		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	--	0	×
17		Schubfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet, mit außen liegender Feder. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	×
18		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	0	0	×
19		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	0	0	×
20		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	0	0	×
21		Drehfeder-Spannelement mit SE und außen liegender Feder.	--	0	--	×
22		Drehfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder.	--	-	--	×

23		Drehfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweises Verspannen.	--	0	--	×
24		Drehfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweises Verspannen.	--	-	--	×
25		Hebel-Spannelement, außen liegend mit SE.	--	0	0	×
26		Hebel-Spannelement, innen liegend mit SE.	--	-	0	×
27		Hebel-Spannelement für seitenweises Verspannen, außen liegend.	--	0	0	×
28		Hebel-Spannelement für seitenweises Verspannen, innen liegend.	--	--	0	×
29		Keil-Spannelement, außen liegend, mit SE.	--	0	0	×
30		Keil-Spannelement, außen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	-	0	×

31		Keil-Spannelement, innen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	×
32		Keil-Spannelement, außen liegend, für seitenweises Verspannen.	--	0	0	×
33		Keil-Spannelement, innen liegend, für seitenweises Verspannen.	--	--	0	×
34		Mittige Keil-Spannelemente, außen liegend.	--	0	-	×
35		Verspannen von Sandwich-deckschicht und VE durch von außen eingetriebenen Keil.	--	+	+	×
Fügen von einer Seiten oder nur durch Einschieben						
36		Druckfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	-	-	×
37		Unterer VE-Teil mit Schubelementen, erlauben Einschieben, verhindern Lösen.	--	++	+	✓
38		Oberer VE-Teil mit Schubelementen, erlauben Einschieben, verhindern Lösen.	--	++	+	✓

39		Hebelmechanismus verspannt die translatorisch verschiebbaren inneren VE-Teile gegen die äußeren.	--	++	0	×
40		Die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile werden über nach außen geführte Hebel gespannt.	--	++	-	×
41		Die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile werden über nach außen geführte Hebel gespannt.	--	++	-	×
42		Exzentermechanismus verspannt die translatorisch verschiebbaren inneren VE-Teile gegen die äußeren.	--	++	+	✓
43		Keilmechanismus verspannt die translatorisch verschiebbaren inneren VE-Teile gegen die äußeren.	--	++	+	✓
44		Sperrollen im äußeren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	0	×
45		Sperrollen im inneren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	0	×
46		Sperkeile im äußeren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	0	×
47		Sperkeile im inneren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	0	×

48		Sperrkeile im inneren Sandwichteil verspannen durch seitliches Einschieben Sandwich und VE.	--	+	+	×
49		Sperrkeile im äußeren Sandwichteil verspannen durch seitliches Einschieben Sandwich und VE.	--	+	+	×
Sonstige (eindeutige Zuordnung der Fügeseite nicht möglich)						
50		Zentrale Druckfeder drückt die translatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	0	×
51		Zentrale Druckfeder drückt die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	-	×
52		Zentrale Zugfeder, zieht die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile über Hebel nach außen.	--	+	-	×
53		Zentrale Zugfeder, zieht die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile über Hebel nach innen.	--	+	-	×
54		Zentrale Druckfeder drückt die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	+	-	×
55		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die translatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	0	×

56		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	-	×
57		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	++	-	×
58		Zentrale Zugfeder, zieht die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	+	-	×
59		Innerer Teil des VE als Biegefeder ausgebildet.	--	+	+	×
60		Schubelement im Mittelsteg drückt die inneren VE-Teile nach außen.	--	+	0	×
61		Äußere VE-Teile durch Schubelement verbunden.	--	+	-	×
62		Äußerer VE-Teil ist zweigeteilt und über Drehfeder mit Mittelsteg verbunden.	--	+	-	×
63		Innerer VE-Teil ist zweigeteilt und über Drehfeder mit Mittelsteg verbunden.	--	+	-	×
64		Drehfedern, drehen die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	--	×

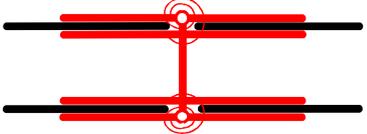
65		Drehfedern, drehen die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	+	--	✗
----	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

Tabelle A24: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.2.13 Fügeelement „Verpress- und Quetschverbindung“

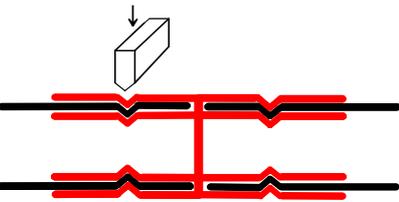
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Großflächiges Verquetschen des Verbindungselementes mit dem Sandwichdeckblech.	--	-	+	✗

Tabelle A25: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Verpress- und Quetschverbindung“

A3.2.14 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE D10 nicht geeignet:

- Einpressverbindung: Für die Einpressteile ist kein Bauraum vorhanden, da das Sandwichdeckblech in einen Spalt im VE eingeschoben wird.

A3.3 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement D1, Variation der Fügeelemente

A3.3.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

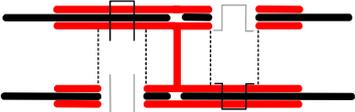
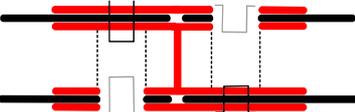
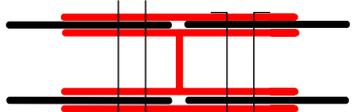
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	-	++	✗
2		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.	--	--	++	✗
3		Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	--	--	--	✗

Tabelle A26: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.3.2

Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“

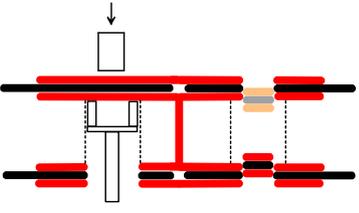
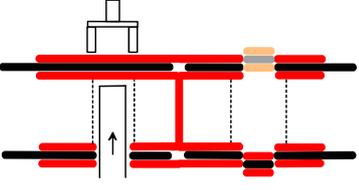
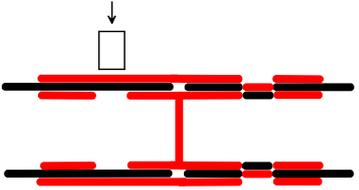
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht von außen durch Stempel. Der Gegenhalter wird von innen durch den Kern hindurch aufgesetzt.</p>	--	-	+	✗
2		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch). Der Gegenhalter wird von außen aufgesetzt.</p>	--	-	+	✗
3		<p>Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). Der innere VE-Teil bildet den Gegenhalter.</p>	--	0	+	✗

Tabelle A27: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Durchsetzfügeverbindung“

A3.3.3

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

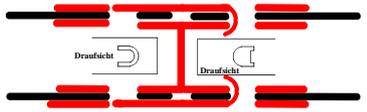
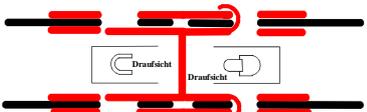
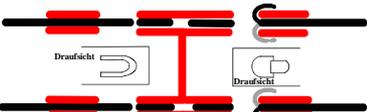
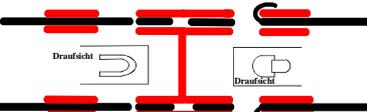
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Innenteil des VEs nach innen gebogen.</p>	--	+	+	×
2		<p>VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Außenteil des VEs nach außen gebogen.</p>	--	0	+	×
3		<p>Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen und unteren VE-Teil nach außen bzw. innen gebogen.</p>	--	0	0	×
4		<p>Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen VE-Teil nach außen gebogen.</p>	--	0	0	×

Tabelle A28: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.3.4

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

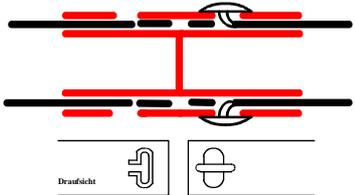
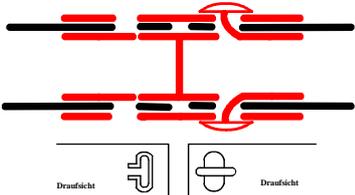
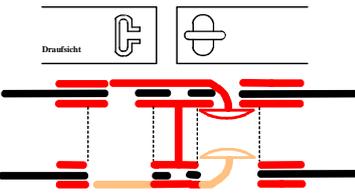
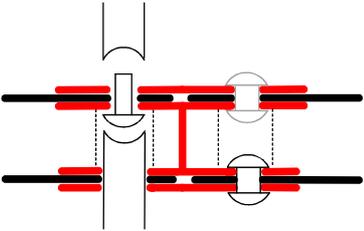
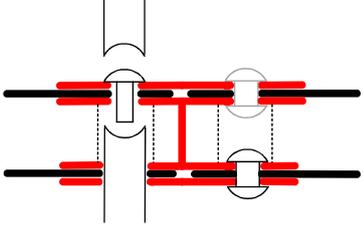
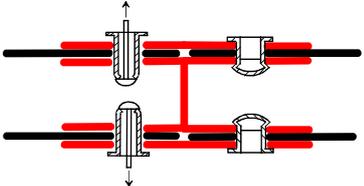
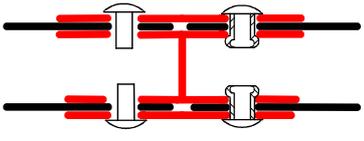
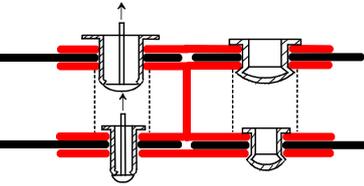
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1	 <p style="font-size: small;">Draufsicht  </p>	Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	-	✗
2	 <p style="font-size: small;">Draufsicht   Draufsicht</p>	Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	-	✗
3	 <p style="font-size: small;">Draufsicht  </p>	In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	-	✗

Tabelle A29: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.3.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von außen.</p>	--	--	++	✗
2		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	++	++	✓
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	++	++	✓
5		<p>Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	-	++	✗

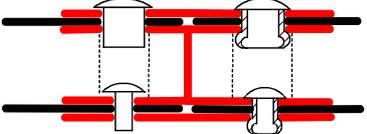
6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	-	++	X
---	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

Tabelle A30: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.3.6 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

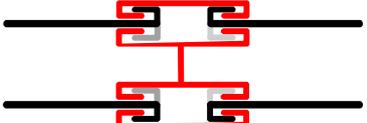
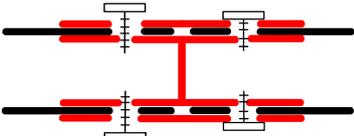
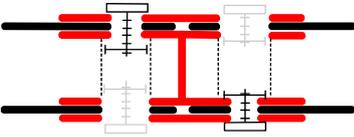
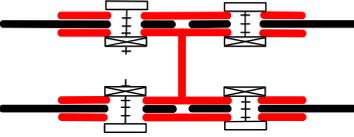
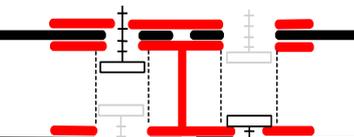
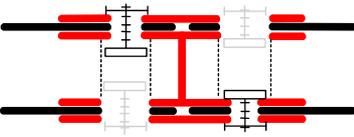
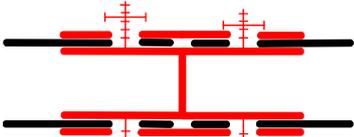
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/X
1		<p>Montage durch seitliches Einschieben. Das Deckblech wird als Nasen nach oben bzw. unten gebogen.</p>	--	++	0	X

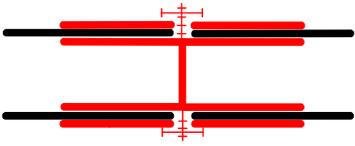
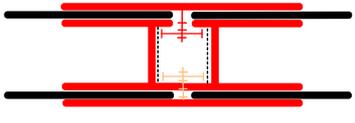
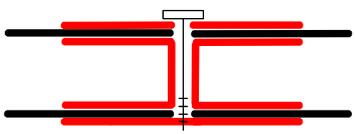
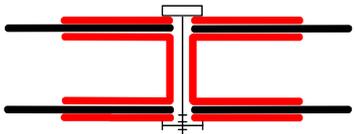
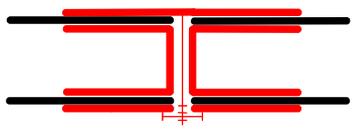
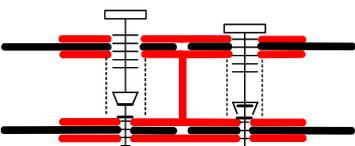
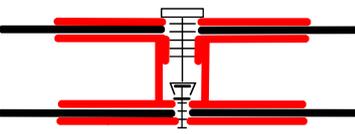
Tabelle A31: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

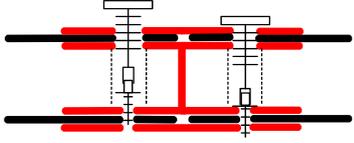
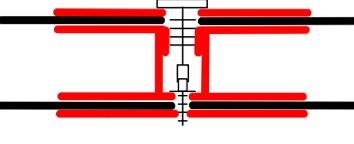
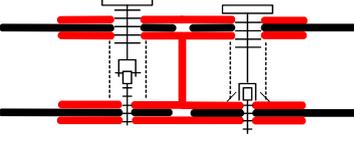
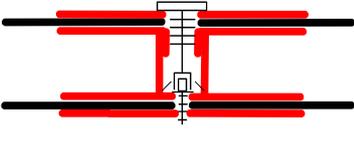
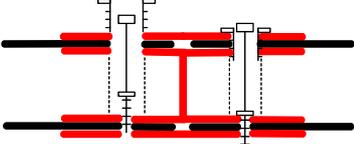
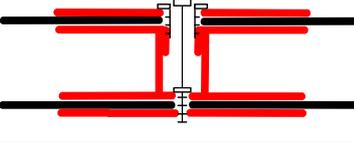
A3.3.7

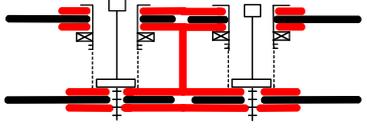
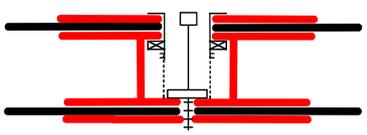
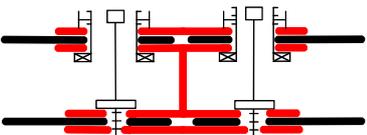
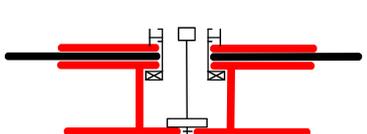
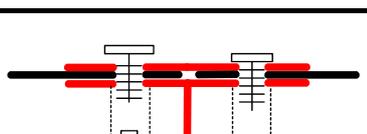
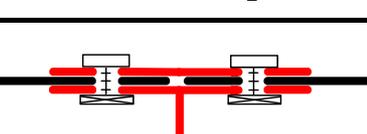
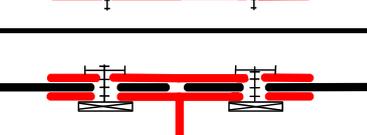
Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben von außen direkt ins VE.	--	++	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von außen in innen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	×
3		Einsetzen der Schrauben mit SE-Muttern von außen.	--	0	++	×
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE, Montage durch Kern hindurch.	--	-	++	×
5		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen in außen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	×
6		Gewindebolzen gehören zum Innenteil des VE, Montage der Muttern von außen.	--	0	++	×

7		Gewindebolzen gehören zu den äußeren Teilen des VE und sind in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch.	--	-	++	×
8		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.	--	+	++	(✓)
9		Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	--	+	++	(✓)
10		Eindreihen der Schrauben in das gegenüberliegende äußere VE-Element.	--	+	++	✓
11		Eindreihen der Schrauben in die gegenüberliegenden äußeren Muttern.	--	0	++	×
12		Gewindebolzen gehören zum äußeren Teil des VE. Montage der Muttern von außen auf der gegenüberliegenden Seite.	--	-	++	×
13		Eindreihen der zentralen Schrauben von außen direkt ins VE.	--	++	+	✓
14		Eindreihen der zentralen und in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE, Montage durch Kern hindurch.	--	0	+	×

15		Zentrale Gewindebolzen gehören zum inneren Teil des VE. Montage der Muttern von außen.	--	+	+	×
16		In der Tiefe versetzte zentrale Gewindebolzen gehören zum äußeren Teil des VE. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch.	--	-	+	×
17		Eindreihen der zentralen Schraube in das gegenüberliegende äußere VE-Element.	--	++	+	✓
18		Eindreihen der zentralen Schraube in die außen angeordnete Mutter.	--	0	+	×
19		Zentraler Gewindebolzen gehört zum äußeren Teil des VE. Montage der Mutter von außen auf der gegenüberliegenden Seite.	--	0	+	×
Fügen von einer Seite						
20		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	++	✓
21		Eindreihen der zentralen Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	+	×

22		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	+	++	✓
23		<p>Eindreihen der zentralen Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	+	+	✗
24		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	+	++	✓
25		<p>Eindreihen der zentralen Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	+	+	✗
26		<p>Unabhängiges Eindreihen der Hohl-schraube und der inneren Schraube.</p>	--	+	++	✓
27		<p>Unabhängiges Eindreihen der zentralen Hohl-schraube und der zentralen inneren Schraube.</p>	--	++	+	✓

28		Oben Hohl-schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten lange Standardschraube.	--	-	++	✗
29		Oben zentrale Hohl-schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten lange Standardschraube.	--	0	+	✗
30		Oben Hohl-schraube mit SE-Kopf und außen liegender Mutter, unten lange Standardschraube.	--	0	++	✗
31		Oben zentrale Hohl-schraube mit SE-Kopf und außen liegender Mutter, unten lange Standardschraube.	--	+	+	✗
32		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube.	--	+	++	✓
33		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube mit SE-Mutter.	--	0	++	✗
34		Eindreihen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen SE-Schraube mit äußerer Mutter.	--	+	++	(✓) 
35		SE-Schrauben oben, Standardschrauben unten.	--	+	++	(✓) 

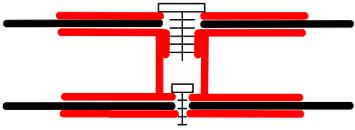
36		Eindreihen der unteren zentralen Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen zentralen Schraube.	--	+	+	×
----	-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	---	---

Tabelle A32: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.3.8 Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

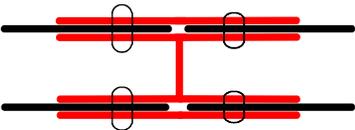
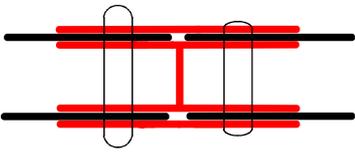
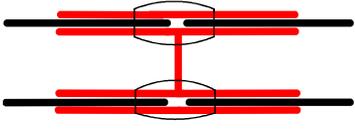
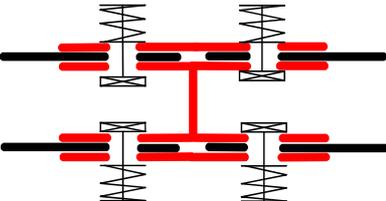
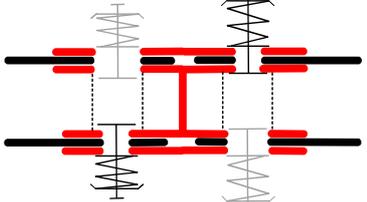
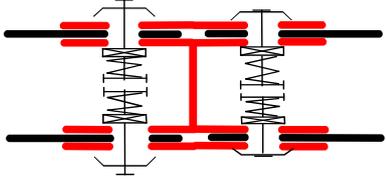
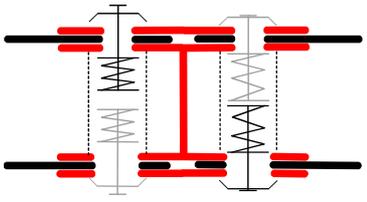
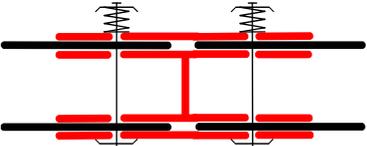
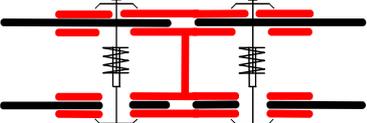
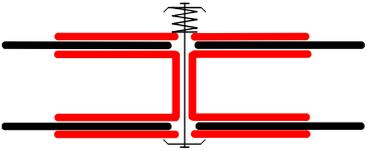
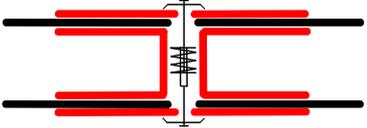
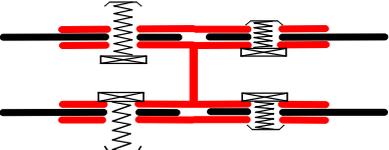
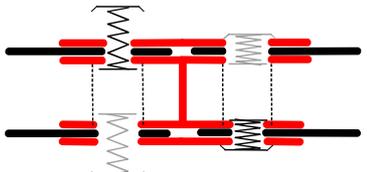
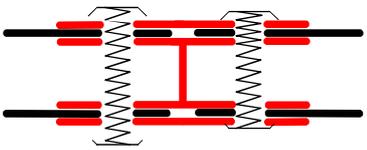
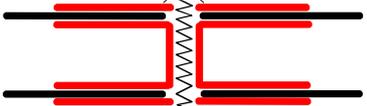
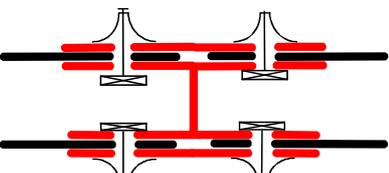
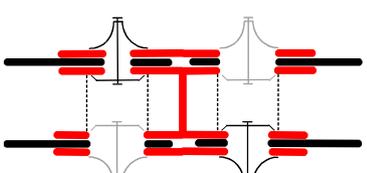
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichteilen an vier Stellen.	--	--	0	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte).	--	0	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte, jeweils eine oben und unten).	--	--	0	×
4		Alle Elemente werden durch eine Naht verbunden.	--	0	--	×

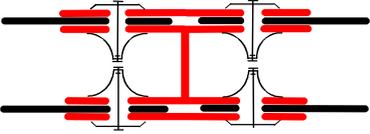
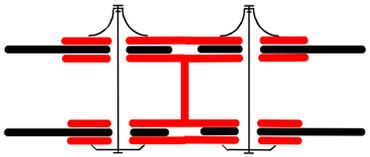
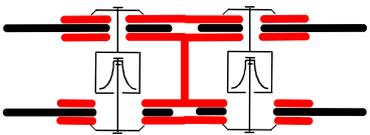
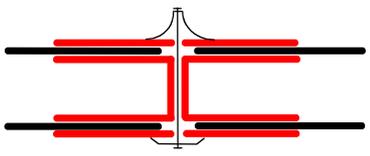
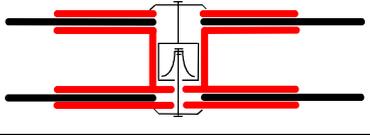
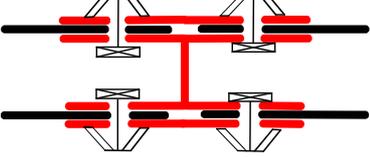
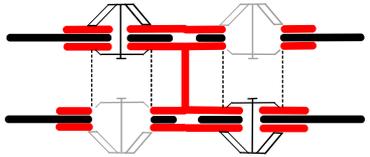
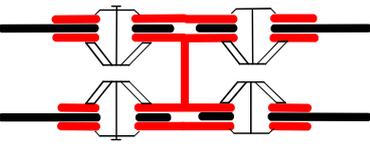
Tabelle A33: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

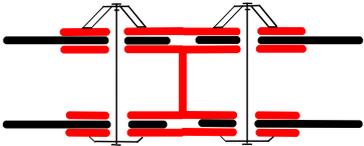
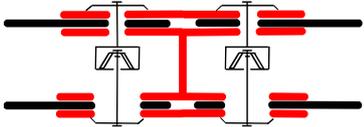
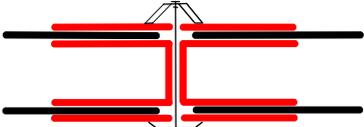
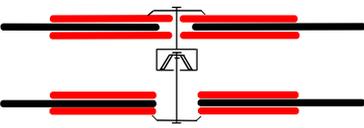
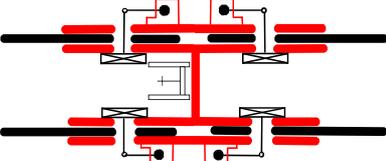
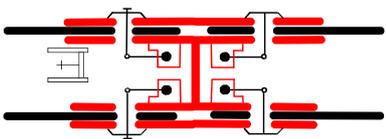
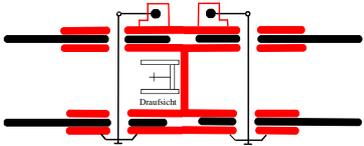
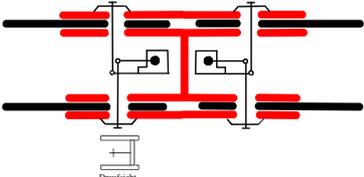
A3.3.9

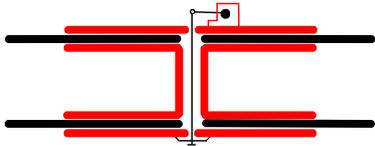
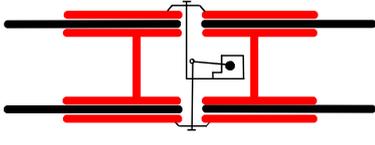
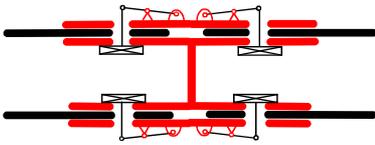
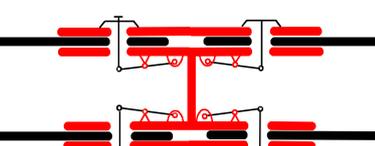
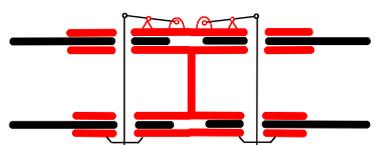
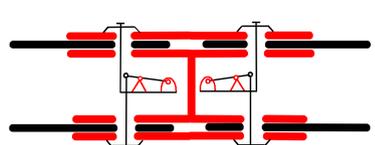
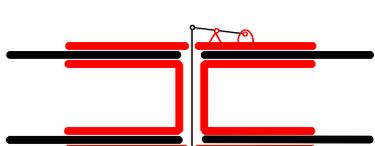
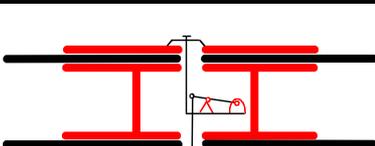
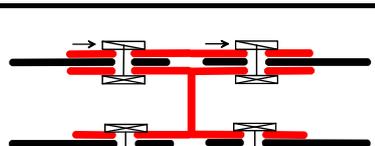
Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE, Montage von außen.</p>	--	+	+	✗
2		<p>In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	-	+	✗
3		<p>Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder und SE, Montage von außen.</p>	--	--	+	✗
4		<p>In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	0	+	✗
5		<p>Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.</p>	--	+	+	✗
6		<p>Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.</p>	--	+	+	✗

7		Zentrales Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder.	--	+	0	×
8		Zentrales Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	+	0	×
9		Zugfeder-Spannelement mit SE, Montage von außen.	--	-	+	×
10		Zugfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	×
11		Zugfeder-Spannelement für seitenweise Verspannung.	--	0	+	×
12		Zentrales Zugfeder-Spannelement.	--	0	0	×
13		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	0	-	×
14		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	-	-	×

15		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	++	-	×
16		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	-	×
17		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	-	×
18		Zentrales Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder.	--	+	0	×
19		Zentrales Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	+	-	×
20		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	-	--	×
21		Schubfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet, mit außen liegender Feder. Montage durch Kern hindurch.	--	--	--	×
22		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	-	--	×

23		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	0	--	×
24		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	-	--	×
25		Zentrales Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder.	--	-	-	×
26		Zentrales Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	-	--	×
27		Drehfeder-Spannelement mit SE und außen liegender Feder.	--	0	--	×
28		Drehfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder.	--	-	--	×
29		Drehfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweises Verspannen.	--	0	--	×
30		Drehfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweises Verspannen.	--	-	--	×

31		Zentrales Drehfeder-Spannelement mit außen liegender Feder.	--	0	--	×
32		Zentrales Drehfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	-	--	×
33		Hebel-Spannelement, außen liegend mit SE.	--	+	--	×
34		Hebel-Spannelement, innen liegend mit SE.	--	--	--	×
35		Hebel-Spannelement für seitenweises Verspannen, außen liegend.	--	+	--	×
36		Hebel-Spannelement für seitenweises Verspannen, innen liegend.	--	--	--	×
37		Zentrales Hebel-Spannelement, außen liegend.	--	0	-	×
38		Zentrales Hebel-Spannelement, innen liegend.	--	--	--	×
39		Keil-Spannelement, außen liegend, mit SE.	--	0	0	×

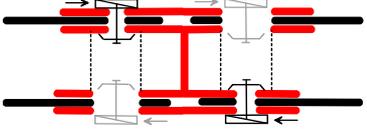
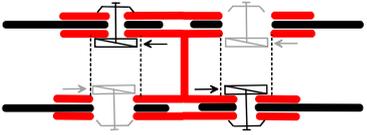
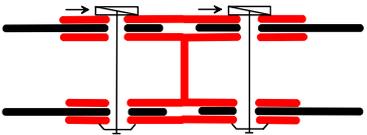
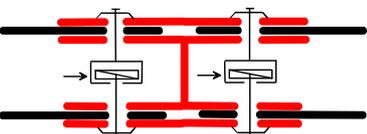
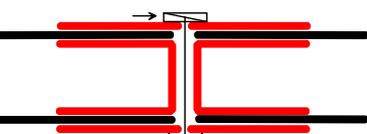
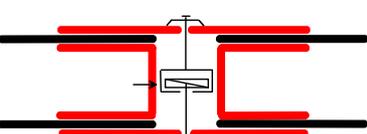
40		Keil-Spannelement, außen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	-	0	×
41		Keil-Spannelement, innen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	--	0	×
42		Keil-Spannelement, außen liegend, für seitenweises Verspannen.	--	0	0	×
43		Keil-Spannelement, innen liegend, für seitenweises Verspannen.	--	--	0	×
44		Zentrales Keil-Spannelement, außen liegend.	--	0	0	×
45		Zentrales Keil-Spannelement, innen liegend.	--	--	0	×

Tabelle A34: Prinziplösungen für das VE D1 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.3.10 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE D1 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.

- Körnverbindung: Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden. Daher kann die Verbindung auch nur sehr kleine Kräfte übertragen.
- Sickenverbindung: Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden. Daher kann die Verbindung auch nur sehr kleine Kräfte übertragen.
- Einpressverbindung: Für die Einpressteile ist kein Bauraum vorhanden, da das Sandwichdeckblech in einen Spalt im VE eingeschoben wird.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.

A3.4 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement A1, Variation der Fügeelemente

A3.4.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

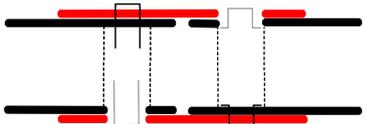
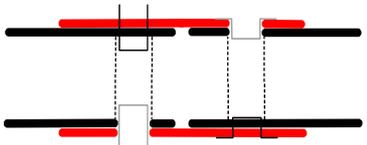
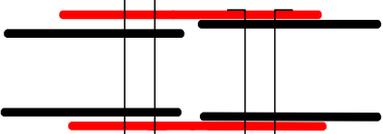
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	--	+	✗
2		Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.	--	--	+	✗
3		Einstoßen der Klammern durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	++	--	--	✗

Tabelle A35: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.4.2 Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

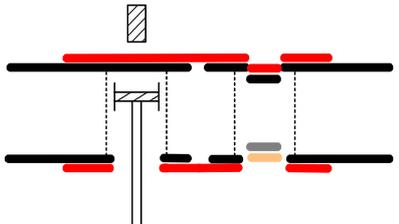
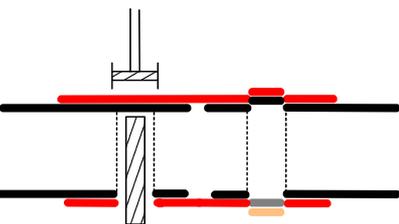
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch den Kern hindurch).	--	--	--	✗
2		Örtliche plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch den Kern hindurch) und Gegenhalter (von außen).	--	--	--	✗

Tabelle A36: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.4.3 Fügeelement 07 „Lappverbindung“

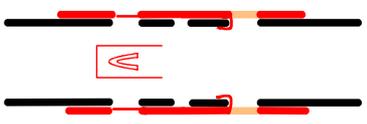
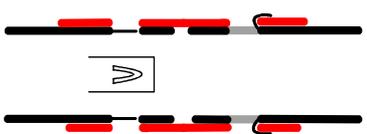
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht nach innen gebogen.	--	0	-	✗
2		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen.	--	0	-	✗

Tabelle A37: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.4.4

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

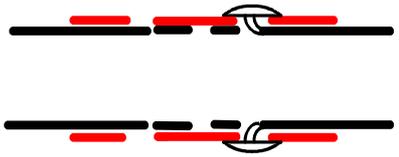
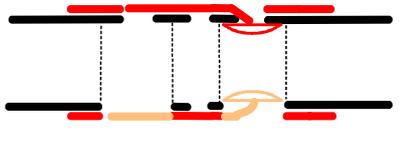
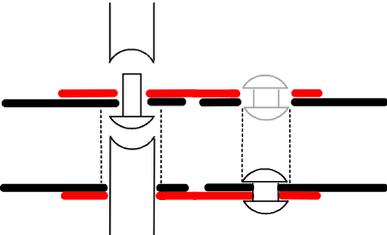
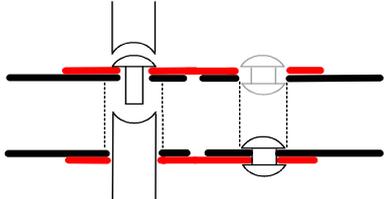
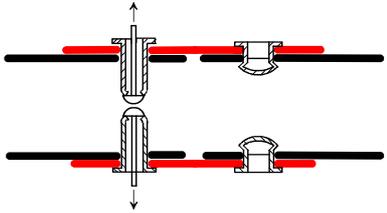
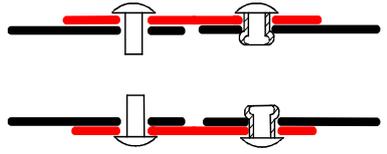
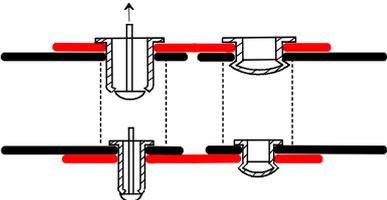
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen und verdreht.</p>	--	--	--	✗
2		<p>In der Tiefe versetzte Laschen des VE's werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.</p>	--	--	--	✗

Tabelle A38: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.4.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von außen.	--	--	+	✗
2		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
3		Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	++	+	+	✓
4		Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	++	+	+	✓
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	0	+	✗

6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	0	+	×
---	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	---	---

Tabelle A39: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Nietverbindung“

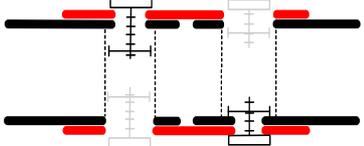
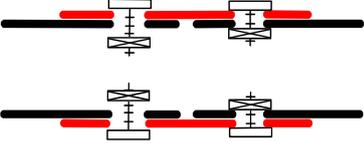
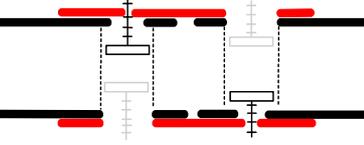
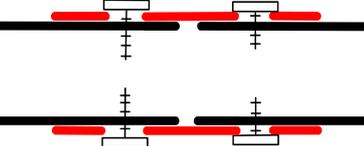
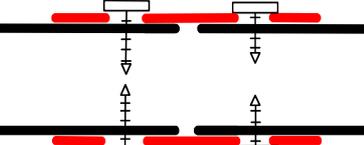
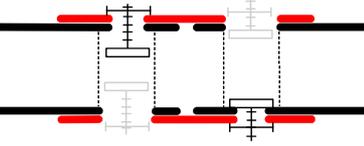
A3.4.6 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

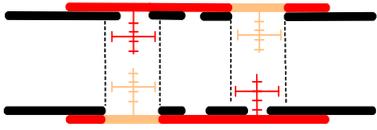
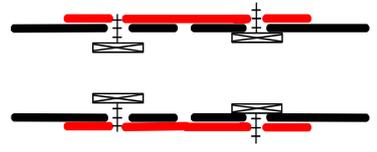
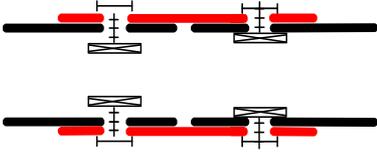
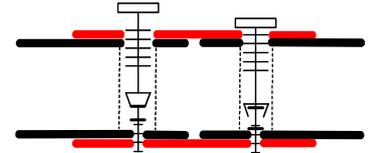
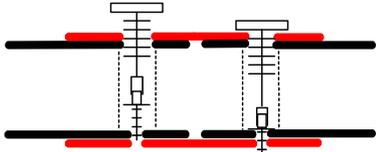
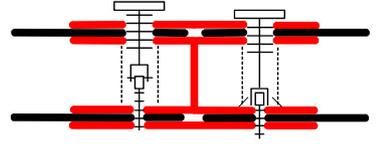
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>Seitliches Einschieben des Sandwich in das VE, VE-Deckbleche als Nuten ausgebildet.</p>	--	+	--	×

Tabelle A40: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.4.7

Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von außen in innen befindliche Muttern. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
2		Einsetzen der Schrauben mit SE-Muttern von außen.	0	-	+	✗
3		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE. Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	✗
4		Eindreihen der Blechschrauben von außen, Kernlöcher in Deckblech vorgebohrt.	+	+	-	✓
5		Eindreihen der kernlochbohrenden Blechschrauben von außen.	++	0	-	✓
6		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen in außen befindliche Muttern. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	✗

7		Gewindebolzen gehören zum VE und sind in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
8		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt. Verspannen durch Herausdrehen.	0	0	+	✓
9		Schraube mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	--	0	+	✗
Fügen von einer Seite						
10		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	0	✗
11		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	0	✗
12		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	0	✗

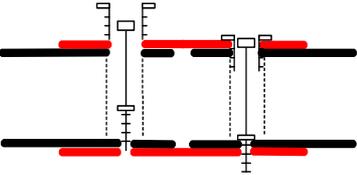
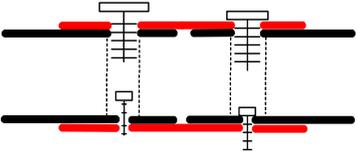
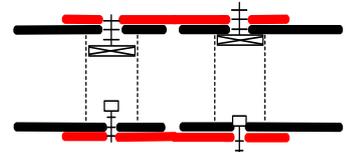
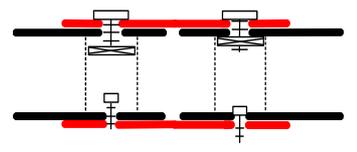
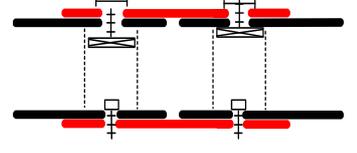
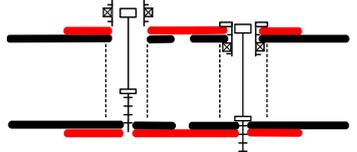
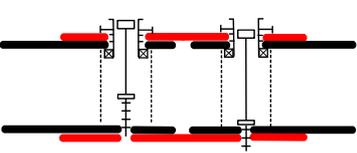
13		Unabhängiges Eindrehen der Hohl- schraube und der inneren Schraube.	--	0	0	×
14		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Blechschaube.	--	0	0	×
15		SE-Schrauben oben, Stan- dardschrauben unten.	--	0	+	×
16		Schraube mit SE-Mutter oben, Standardschraube unten.	--	-	+	×
17		SE-Schraube mit Mutter oben, Standardschraube unten.	--	0	+	×
18		Hohl- schraube mit SE-Mutter oben, Standardschraube unten.	--	--	+	×
19		Hohl- schraube mit SE-Kopf und Mutter oben, Standarsch- raube unten.	--	-	+	×

Tabelle A41: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.4.8

Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

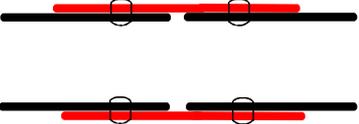
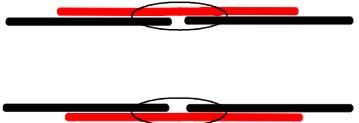
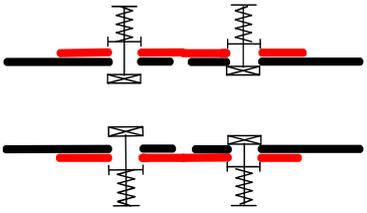
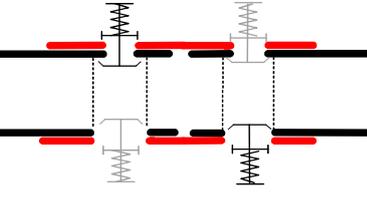
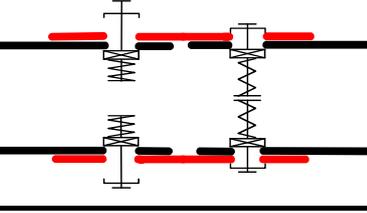
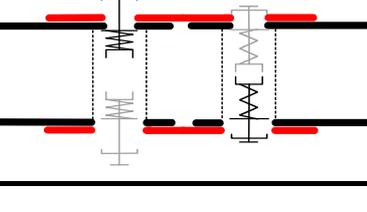
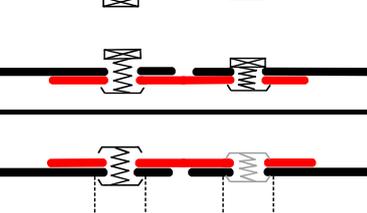
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	0	--	--	x
2		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	0	--	-	x

Tabelle A42: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.4.9

Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	0	0	x
2		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	x
3		Einsetzen der Spannelemente mit SE von außen, innen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	--	0	x
4		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern, innen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	x
5		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement, Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	0	--	0	x
6		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	x

7		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	0	-	--	×
8		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch, Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	×
9		<p>Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Verspannung durch Zurückziehen der Biegefeder.</p>	0	+	--	×
10		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	0	--	--	×
11		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	×
12		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	0	--	--	×
13		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Drehfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	0	-	--	×

14		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines außen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.</p>	0	0	--	×
15		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	0	-	-	×
16		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	×
17		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	×

Tabelle A43: Prinziplösungen für das VE G2 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.4.10 Fügeelement 25 „Einpressverbindung“

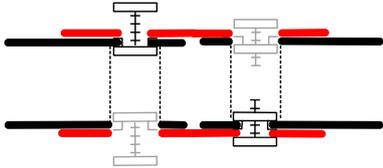
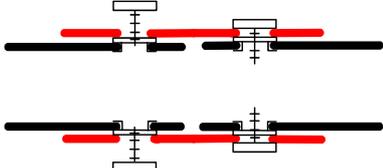
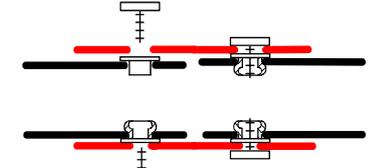
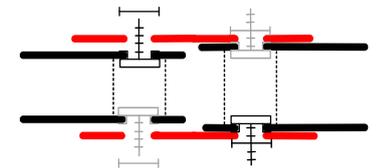
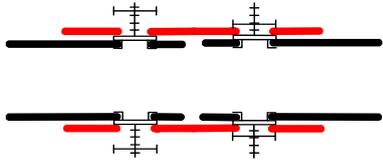
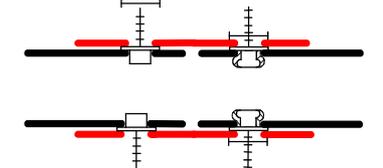
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		In der Tiefe versetztes Einpressen von Muttern in die Sandwichdeckschicht. Montage von innen durch Kern hindurch. Dann Verschraubung mit VE.	--	+	+	✗
2		Einpressen von flachen Muttern in die Sandwichdeckschicht. Montage von außen. Dann Verschraubung mit VE.	0	+	+	✓
3		Flache „Sprengmuttern“ (ähnlich Sprengniet), Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, Verschraubung mit VE.	+	+	+	✓
4		Versetztes Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage von Innen durch Kern hindurch. Dann Verschraubung mit VE.	--	+	+	✗
5		Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage von außen. Dann Verschraubung mit VE.	--	+	+	✗
6		„Sprengkopfschrauben“ (ähnlich Sprengniet), Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, dann Verschrauben mit VE mittels Mutter.	+	+	+	✓

Tabelle A44: Prinziplösungen für das VE A1 und das Fügeelement „Einpressverbindung“

A3.4.11 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE A1 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Diese Verbindung ist nicht fertigbar, da der Gegenhalter nicht positioniert werden kann.
- Körnverbindung: Die Verbindung fällt auseinander, da die beiden VE-Teile nicht verbunden sind.
- Sickenverbindung: Die Verbindung fällt auseinander, da die beiden VE-Teile nicht verbunden sind.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Der Gegenhalter zum Verquetschen kann nicht positioniert werden.

A3.5 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement C11, Variation der Fügeelemente

A3.5.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

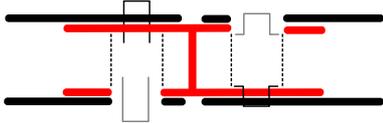
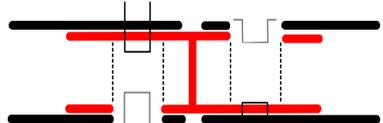
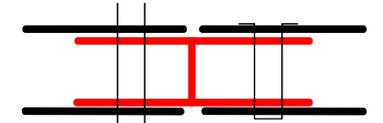
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen einer Klammer von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	-	++	✗
2		Einstoßen einer Klammer von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von außen.	--	--	++	✗
3		Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich. Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	--	--	--	✗

Tabelle A45: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.5.2

Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

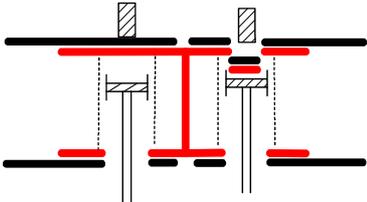
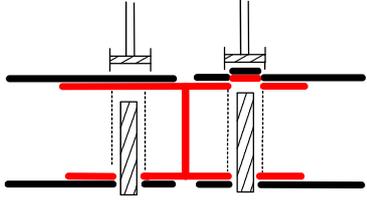
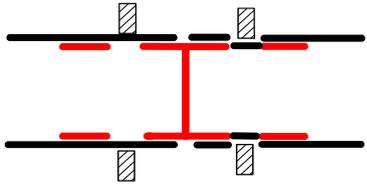
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch Kern hindurch).	--	-	0	×
2		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von innen durch den Kern) und Gegenhalter (von außen).	--	-	0	×
3		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). VE dient als Gegenhalter	--	0	0	×

Tabelle A46: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.5.3 Fügeelement 05 „Falzverbindung“

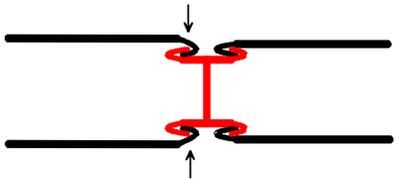
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Seitliches Einschieben des vorgebogenen Sandwichs in das VE. Fügen durch gegenseitiges Verpressen	--	0	+	x

Tabelle A47: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Falzverbindung“

A3.5.4

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

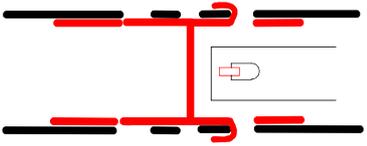
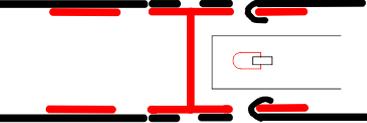
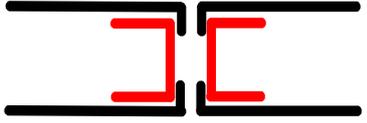
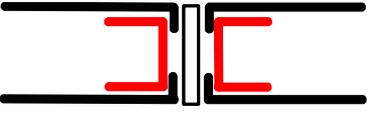
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der VE-Deckschicht werden durch die Öffnung im Sandwich nach außen gebogen.	--	+	+	✗
2		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch die Öffnung im VE nach innen gebogen.	--	+	0	✗
3		Laschen der Sandwichdeckschicht werden ins VE-Mittelstück geschoben und umgebogen.	--	++	-	✗
4		Laschen der Sandwichdeckschicht werden ins VE-Mittelstück geschoben und umgebogen. Sicherung durch Klemmelement.	--	++	++	✓

Tabelle A48: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.5.5

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

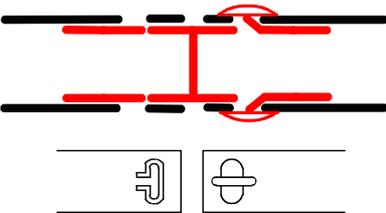
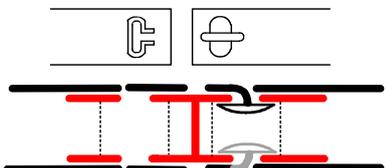
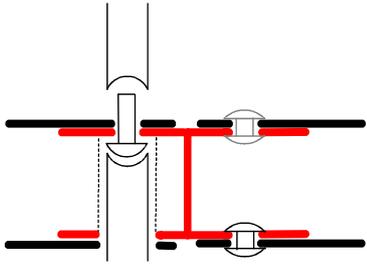
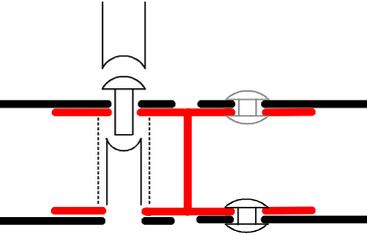
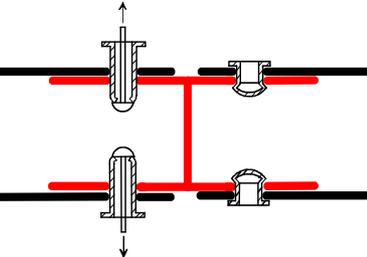
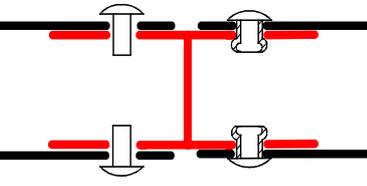
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Laschen der VE-Deckschicht werden durch Öffnungen im Sandwich nach außen gebogen und verdreht.</p>	--	-	-	✗
2		<p>Laschen der VE-Deckschicht werden durch Sandwich hindurch nach innen gebogen und verdreht.</p>	--	--	-	✗

Tabelle A49: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.5.6

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von außen.</p>	--	--	++	✗
2		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	++	++	✓
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	++	++	✓
Fügen von einer Seite						

5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	+	++	✓
6		Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	--	+	++	✓

Tabelle A50: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Nietverbindung“

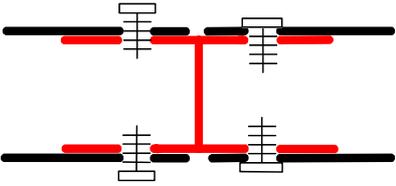
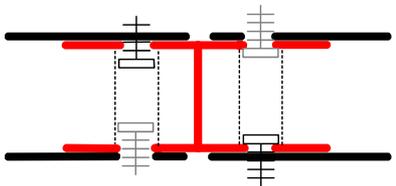
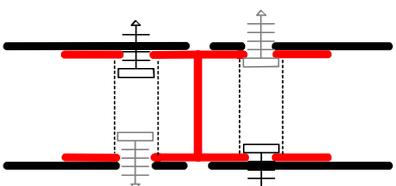
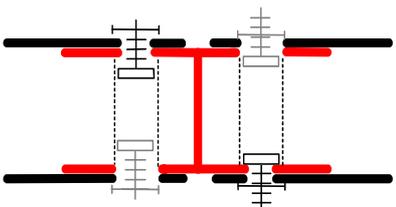
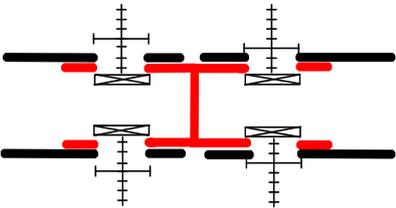
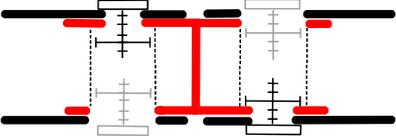
A3.5.7 Fügeelement 17 „Nut- und Feder-Verbindung“

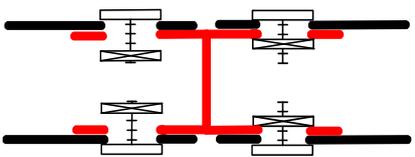
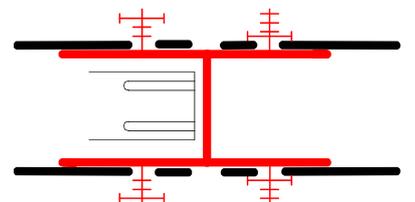
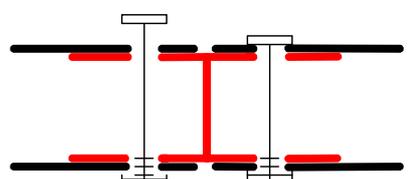
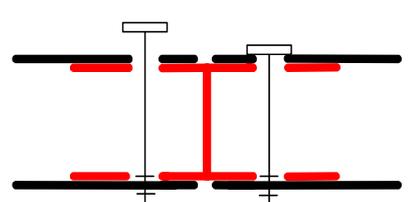
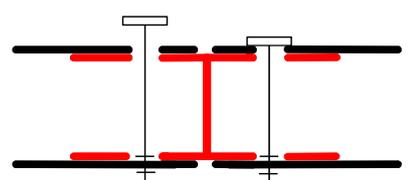
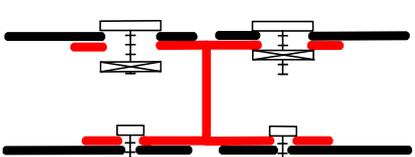
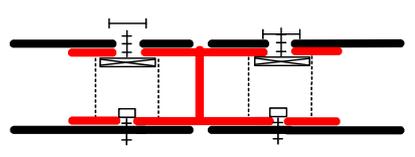
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Seitliches Einschieben des VEs in das Sandwich, Sandwich-Deckbleche als Nuten ausgebildet.	--	++	0	x

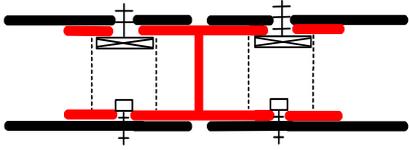
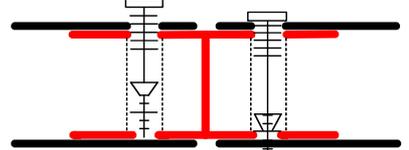
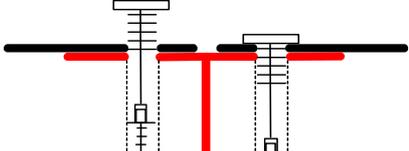
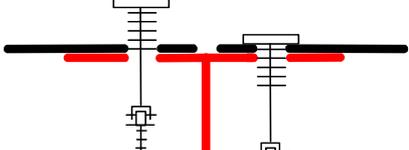
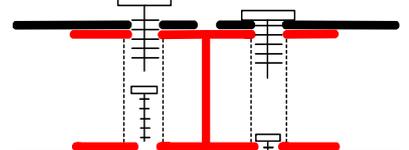
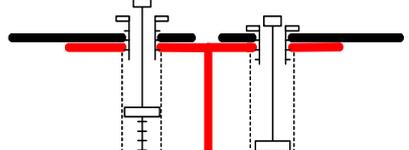
Tabelle A51: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Nut- und Feder-Verbindung“

A3.5.8

Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schraube direkt in das VE.	--	++	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Blechschrauben direkt in die Sandwichdeckschicht. Montage durch Kern hindurch.	--	0	0	✗
3		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Blechschrauben mit Bohrspitze direkt in die Sandwichdeckschicht. Montage durch Kern hindurch.	--	-	0	✗
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Schrauben durch den Kern. Montage der Mutter von außen.	--	--	++	✗
5		Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	--	+	++	(✓) 
6		In der Tiefe versetzte Schrauben mit innenliegenden Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗

7		Schraube mit innenliegenden SE-Muttern.	--	0	++	×
8		Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern. Montage durch Schlitze in Sandwichdeckschicht.	--	0	++	×
9		Verspannen des Sandwichs mit VE durch Schraube und Mutter.	--	0	++	×
Fügen von einer Seite						
10		Verspannen des Sandwichs mit VE durch Blechschraube.	--	+	0	×
11		Verspannen des Sandwichs mit VE durch Blechschraube mit Bohrspitze.	--	+	0	×
12		Oben Schraube mit innenliegender SE-Mutter, unten Blechschraube.	--	0	+	×
13		SE-Schraube mit Mutter oben, Blechschraube unten. Montage der unteren Schrauben durch Kern hindurch.	--	0	+	×

14		SE-Blechschaube oben, Blechschaube unten. Montage der unteren Schraube durch Kern hindurch.	--	0	+	✗
15		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Blechschaube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	++	+	✓
16		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	++	+	✓
17		Kombischraube für obere (Standardgewinde) und untere Deckschicht (Blechschaube). Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und ermöglicht das Anziehen der oberen Schraube.	--	++	+	✓
18		Obere Schraube mit Standardgewinde, untere Schraube als Blechschaube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	+	+	✗
19		Obere Schraube als Hohl-schraube, untere Schraube lange Blechschaube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	+	+	✗

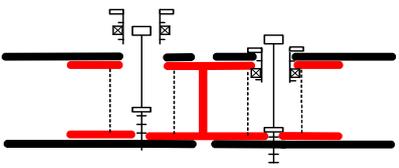
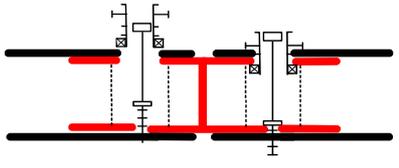
20		Hohlschraube mit SE-Mutter oben, Blechschraube unten.	--	-	+	×
21		Hohlschraube mit SE-Kopf und Mutter oben, Blechschraube unten	--	0	+	×

Tabelle A52: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.5.9 Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

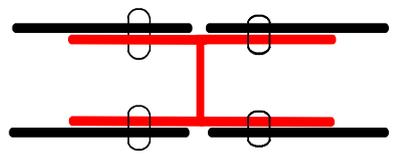
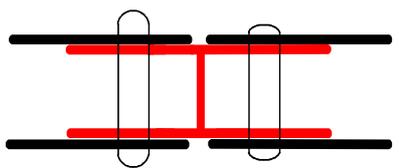
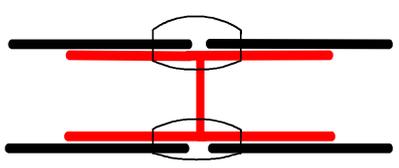
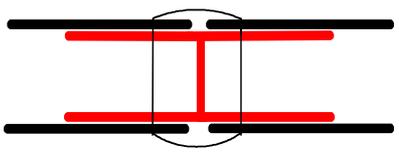
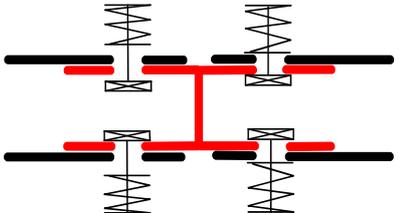
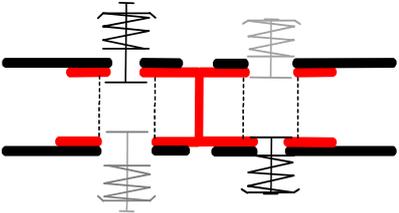
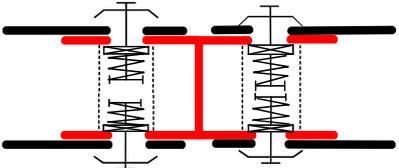
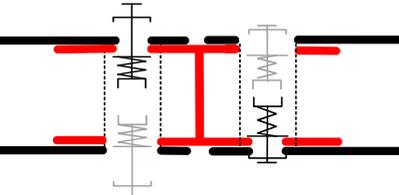
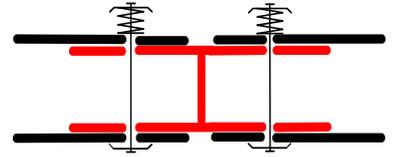
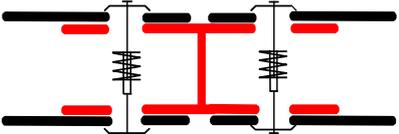
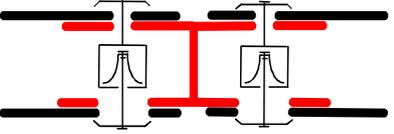
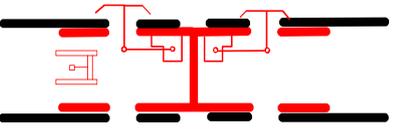
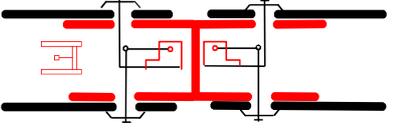
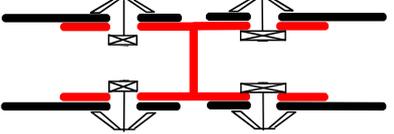
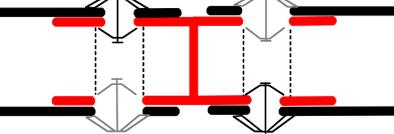
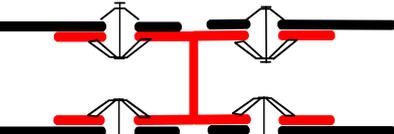
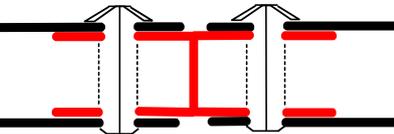
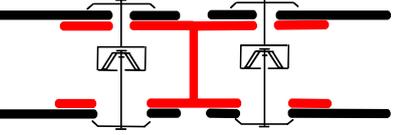
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	--	--	-	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten.	--	0	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	--	--	0	×
4		Komplettes Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten mit einer Naht.	--	0	--	×

Tabelle A53: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.5.10 Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	+	+	✗
2		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	✗
3		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	--	+	✗
4		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Druckfeder und Sperrelement.	--	-	+	✗
5		Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	✗
6		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	+	✗

7		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	×
8		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch Kern hindurch, Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	×
9		Einsetzen des Spannelements durch Sandwich, innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	0	+	×
10		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	0	-	×
11		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	-	×
12		Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	++	-	×
13		Einsetzen des Spannelementes durch Sandwich, außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	+	-	×

14		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	-	×
15		Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	-	--	×
16		Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	-	--	×
17		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.	--	-	--	×
18		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	--	×
19		Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	--	×
20		Einsetzen des Spannelementes durch Sandwich, außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.	--	0	--	×
21		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	-	--	×

22		Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	--	--	×
23		Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	--	--	×
24		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	0	0	×
25		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	-	0	×
26		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	×
27		Einsetzen des Spannelements durch Sandwich, außen liegendes Keilelement bringt Vorspannkraft auf.	--	0	0	×
28		Innen liegendes Keil-Spannelement für seitenweises Verspannen.	--	--	0	×

Tabelle A54: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.5.11 Fügeelement 25 „Einpressverbindung“

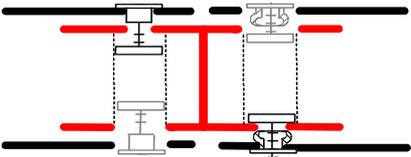
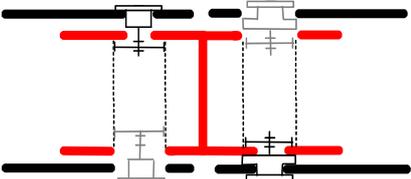
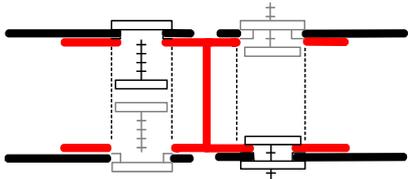
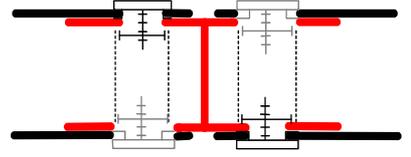
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Flache Sprengmutter (ähnlich Sprengniet) in der Tiefe versetzt, Einsetzen in die Sandwichdeckschicht von außen, danach Verschraubung von innen.	--	--	++	×
2		„Sprengkopfschrauben“ (ähnlich Sprengniet) in der Tiefe versetzt, Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, danach Verschrauben mit VE mittels Mutter von innen.	--	--	++	×
3		Versetztes Einpressen von Muttern in die Sandwichdeckschicht, Montage von außen. Danach Verschraubung mit VE von innen durch Sandwich.	--	0	++	×
4		In der Tiefe versetztes Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage außen. Danach Verschraubung mit VE von innen durch Sandwich.	--	0	++	×

Tabelle A55: Prinziplösungen für das VE C11 und das Fügeelement „Einpressverbindung“

A3.5.12 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE C11 nicht geeignet:

- Körnverbindung: Die Verbindung ist kaum belastbar, da sich die Sandwichdeckschichten aufbiegen können.
- Sickenverbindung: Die Verbindung ist kaum belastbar, da sich die Sandwichdeckschichten aufbiegen können.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Verbindung ist geometrisch nicht möglich (VE umschließt die Sandwichdeckschicht nicht).

A3.6 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement F7, Variation der Fügeelemente

A3.6.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

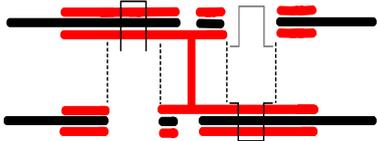
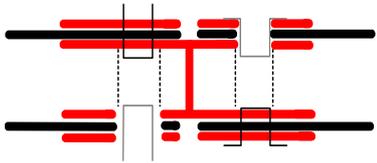
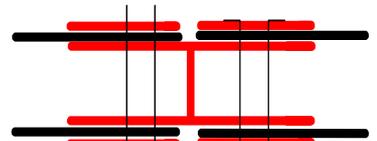
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen einer Klammer von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	-	++	✗
2		Einstoßen einer Klammer von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von außen.	--	--	++	✗
3		Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich. Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	--	--	--	✗

Tabelle A56: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.6.2

Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“

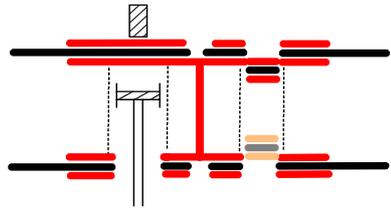
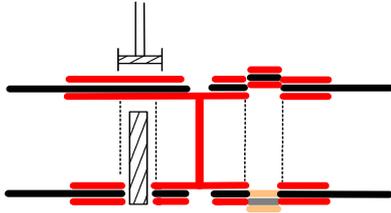
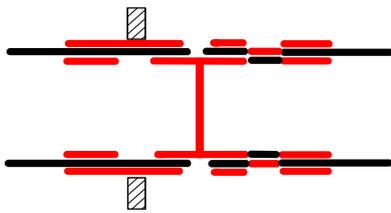
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch Kern hindurch).	--	-	0	✗
2		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von innen durch den Kern) und Gegenhalter (von außen).	--	-	0	✗
3		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). VE dient als Gegenhalter.	--	0	0	✗

Tabelle A57: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Durchsetzfügeverbindung“

A3.6.3

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

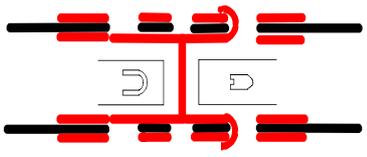
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der Sandwichdeckschicht und der VE-Deckschicht werden durch die Öffnung nach außen gebogen.	--	0	+	✗

Tabelle A58: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.6.4

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

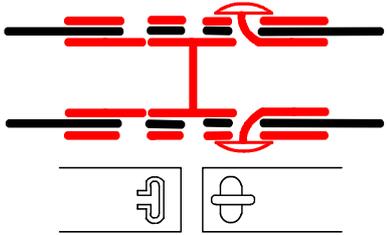
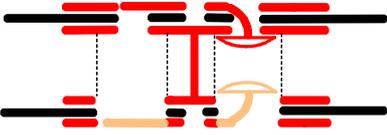
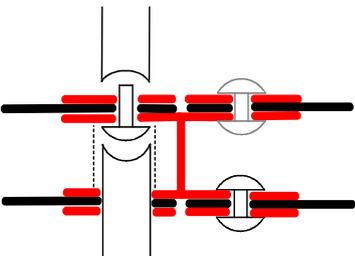
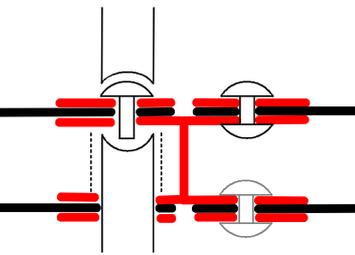
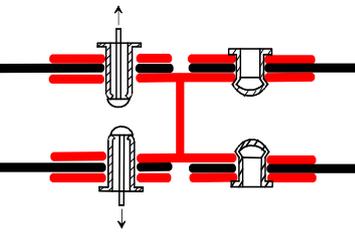
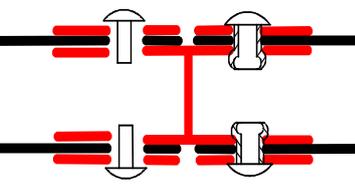
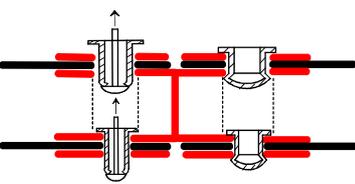
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.</p>	--	-	-	×
2		<p>In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.</p>	--	--	-	×

Tabelle A59: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.6.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von außen.</p>	--	--	++	✗
2		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	++	++	✓
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	++	++	✓
5		<p>Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	-	++	✗

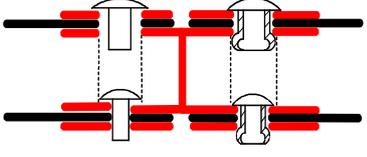
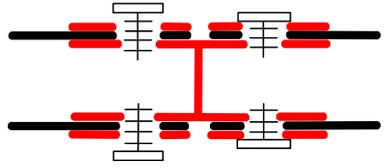
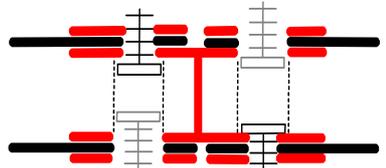
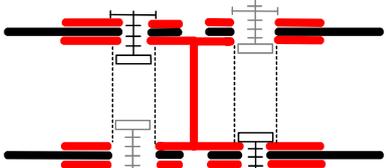
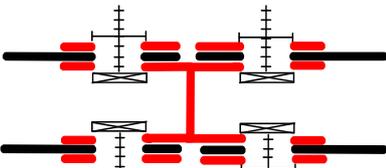
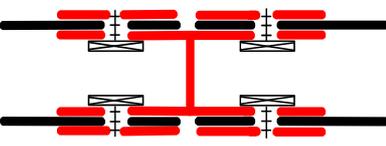
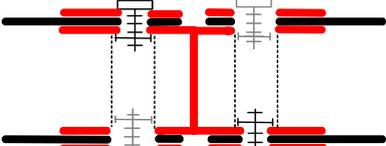
6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	-	++	×
---	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

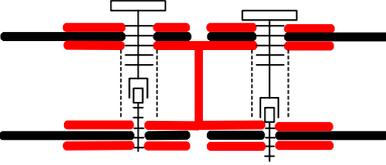
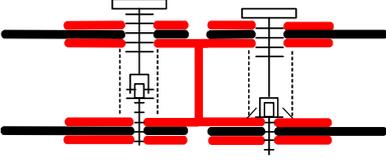
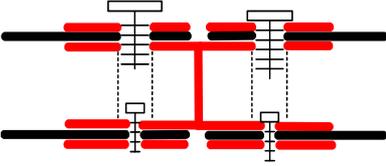
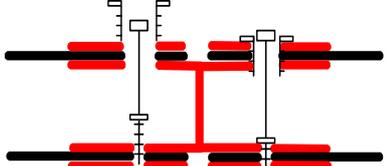
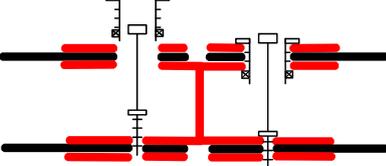
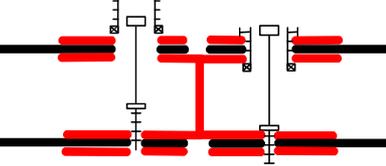
Tabelle A60: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.6.6

Fügeelement 21 „Schraubverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben direkt in das VE.	--	++	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Schrauben direkt in die Sandwichdeckschicht und die äußere VE-Schicht. Montage durch Kern hindurch.	--	-	++	✗
3		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Schrauben durch den Kern. Montage der Muttern von außen.	--	--	++	✗
4		Schrauben mit SE Kopf und von außen montierten Muttern.	--	+	++	(✓) 
5		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.	--	+	++	(✓) 
6		In der Tiefe versetzte Schrauben mit innenliegenden Muttern. Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗

7		Schrauben mit innenliegenden SE-Muttern.	--	0	++	×
8		Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern. Schlitz in Sandwich-deckschicht ermöglichen Montage.	--	0	++	×
9		In der Tiefe versetzte Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern von innen durch Sandwich hindurch.	--	-	++	×
10		Durchgehende Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern von außen.	--	-	++	×
11		Verspannen des Sandwichs mit VE durch Schraube und Mutter.	--	0	++	×
Fügen von einer Seite						
12		Verspannen des Sandwichs mit VE durch Schraube.	--	+	++	✓
13		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Schraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	++	++	✓

14		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	++	++	✓
15		<p>Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Schraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.</p>	--	++	++	✓
16		<p>Obere und untere Schraube mit Standardgewinde. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.</p>	--	+	++	✓
17		<p>Obere Schraube als Hohl-schraube, untere Schraube lange Standardschraube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.</p>	--	+	++	✓
18		<p>Oben Hohlschraube mit innen liegender SE-Mutter, unten lange Standardschraube.</p>	--	-	++	✗
19		<p>Oben SE-Schraube mit außen liegender Mutter, unten Standardschraube.</p>	--	0	++	✗

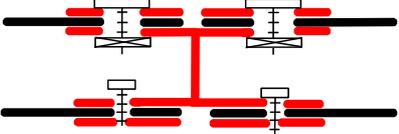
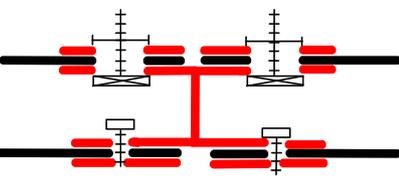
20		Oben Schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten Standardschraube.	--	0	++	×
21		Oben Schraube mit SE-Kopf und außen liegender Mutter, unten Standardschraube.	--	+	++	(✓) 

Tabelle A61: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.6.7 Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

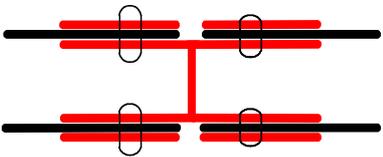
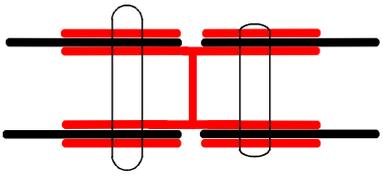
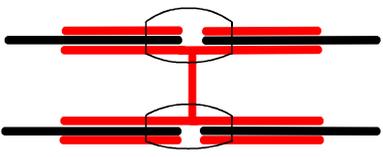
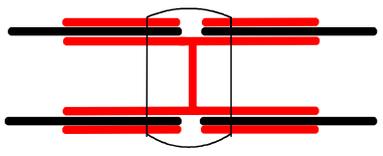
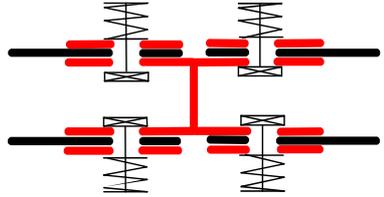
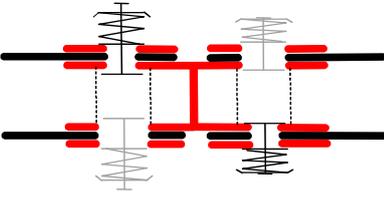
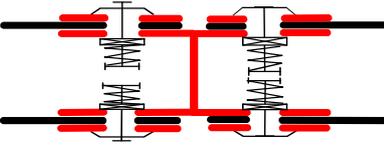
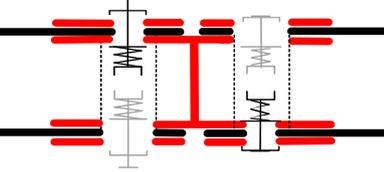
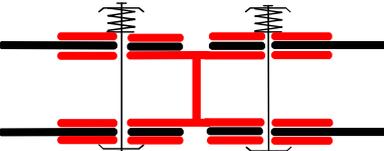
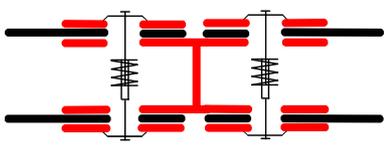
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	--	--	-	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten.	--	0	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	--	--	0	×
4		Komplettes Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten mit einer Naht.	--	0	--	×

Tabelle A62: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

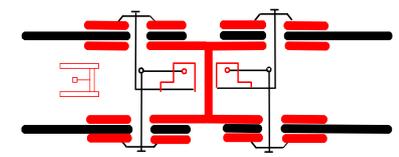
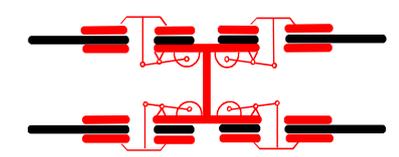
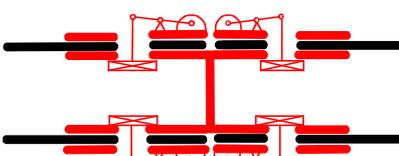
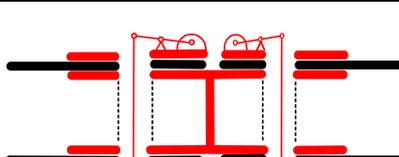
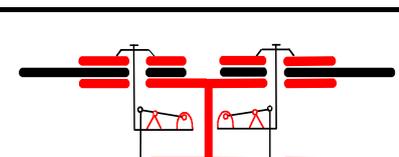
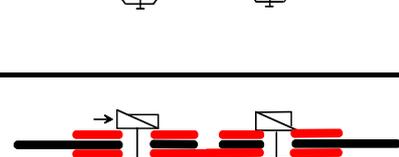
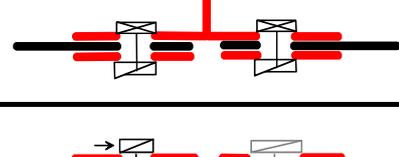
A3.6.8

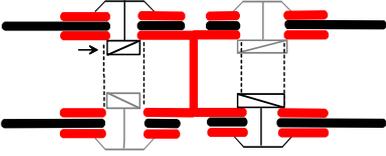
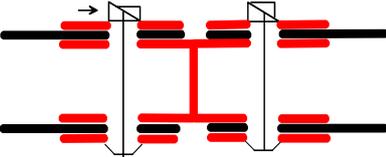
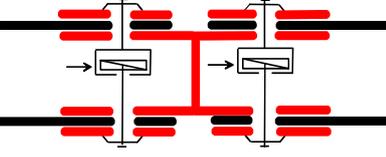
Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	+	+	✗
2		<p>In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	-	+	✗
3		<p>Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder und SE. Montage von außen.</p>	--	--	+	✗
4		<p>Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Druckfeder und Sperrelement.</p>	--	-	+	✗
5		<p>Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder für seitenweise Verspannung.</p>	--	+	+	✗
6		<p>Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.</p>	--	+	+	✗

7		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	×
8		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch Kern hindurch. Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	+	×
9		Einsetzen des Spannelements durch Sandwich, innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	0	+	×
10		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	0	-	×
11		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch Kern hindurch, innen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	-	×
12		Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	++	-	×
13		Einsetzen des Spannelements durch Sandwich hindurch, außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.	--	+	-	×
14		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	+	-	×

15		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.	--	-	--	×
16		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	--	×
17		Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	-	--	×
18		Einsetzen des Spannelements durch Sandwich, außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.	--	0	--	×
19		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	-	--	×
20		Außen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine außen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	0	--	×
21		Außen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine außen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	0	--	×
22		Innen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	-	--	×

23		Innen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.	--	-	--	×
24		Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	-	--	×
25		Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines außen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	+	--	×
26		Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines außen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	+	--	×
27		Innen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.	--	--	--	×
28		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	0	0	×
29		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern Hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.	--	-	0	×

30		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	0	X
31		<p>Einsetzen des Spannelements durch Sandwich, außen liegendes Keilelement bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	0	0	X
32		<p>Innen liegendes Keil-Spannelement für seitenweises verspannen.</p>	--	--	0	X
<p>Tabelle A63: Prinziplösungen für das VE F7 und das Fügeelement „Spannverbindung“</p>						

A3.6.9 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

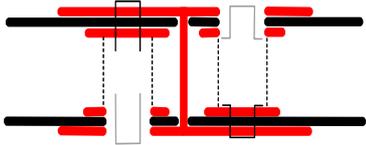
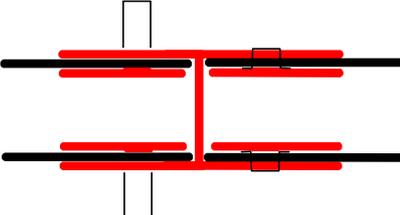
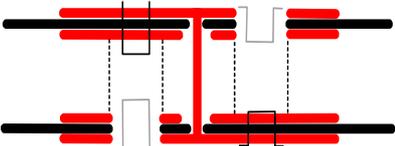
Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE F7 nicht geeignet:

- Falzverbindung:** Bei dieser Verbindung sind die oberen „losen“ Teile des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.
- Körnverbindung:** Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden. Daher kann die Verbindung auch nur sehr kleine Kräfte übertragen.
- Sickenverbindung:** Bei dieser Verbindung sind die oberen „losen“ Teile des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.
- Nut und Feder-Verb.:** Bei dieser Verbindung sind die oberen „losen“ Teile des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.

- Einpressverbindung: Für die Einpressteile ist kein Bauraum vorhanden, da das Sandwichdeckblech in einen Spalt im VE eingeschoben wird.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Bei dieser Verbindung ist der obere „lose“ Teil des VE überflüssig und nicht mit dem Rest des VE verbunden.

A3.7 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement B3, Variation der Fügeelemente

A3.7.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
2		<p>Einstoßen der Klammern von außen durch die äußere VE-Schicht und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden automatisch beim Einstoßen durch Führung am inneren VE-Teil.</p>	--	+	++	✓
3		<p>Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.</p>	--	--	++	✗

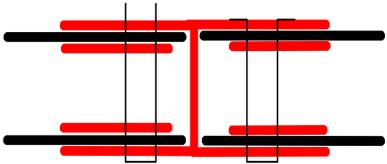
4		Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.	--	--	--	×
---	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	----	----	----	---

Tabelle A64: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.7.2 Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

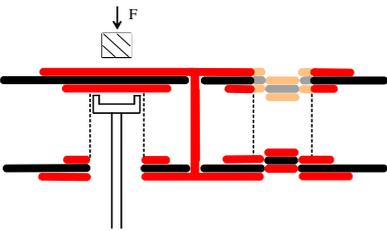
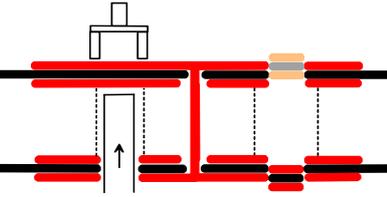
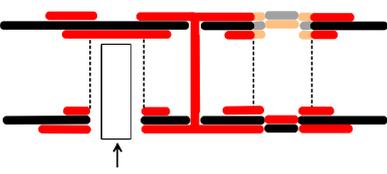
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). Der Gegenhalter wird durch den Kern hindurch geführt.	--	--	+	×
2		Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch) und Gegenhalter.	--	--	0	×
3		Örtliche, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht. (von innen). Der äußere VE-Teil dient als Gegenhalter.	--	-	0	×

Tabelle A65: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.7.3 Fügeelement 07 „Lappverbindung“

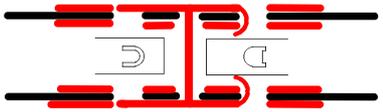
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Innenteil des VEs nach innen gebogen.	--	0	+	✗

Tabelle A66: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.7.4 Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

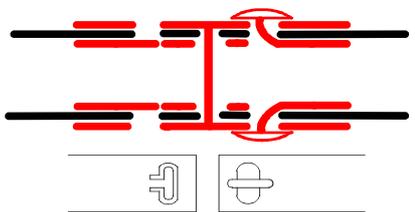
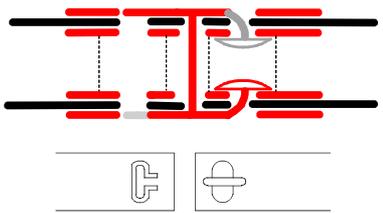
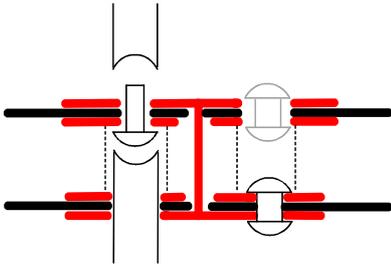
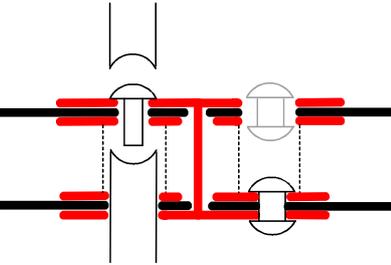
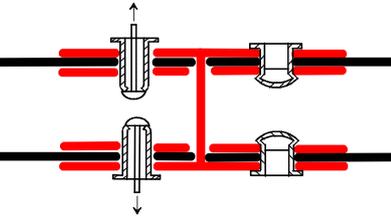
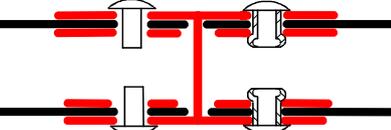
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwichdeckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.	--	--	--	✗
2		In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	--	✗

Tabelle A67: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.7.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von außen.</p>	--	--	++	✗
2		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	++	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	+	++	✓
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	++	✓
Fügen von einer Seite						

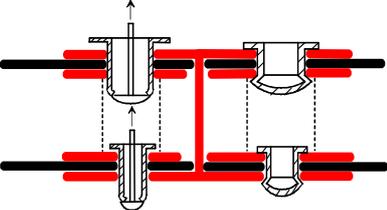
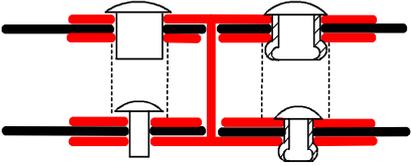
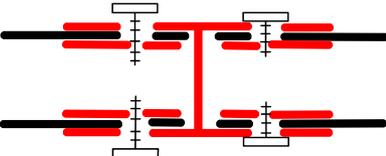
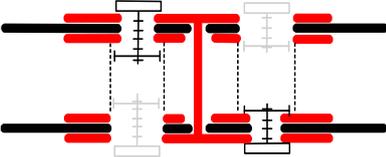
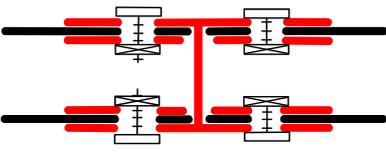
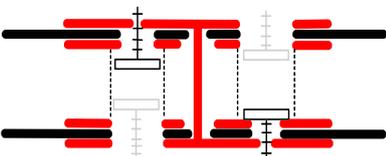
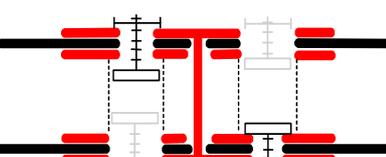
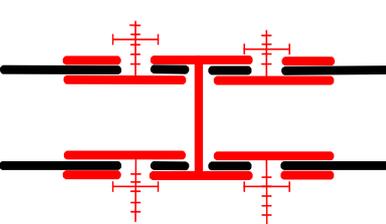
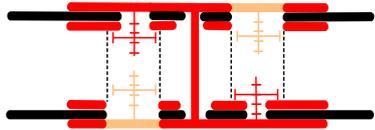
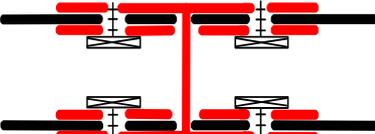
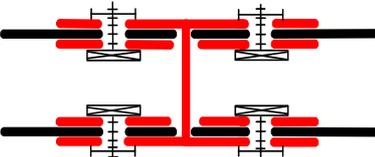
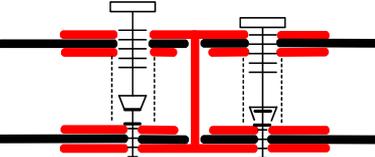
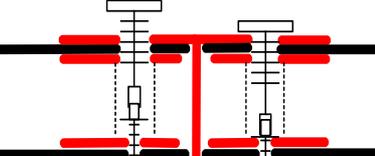
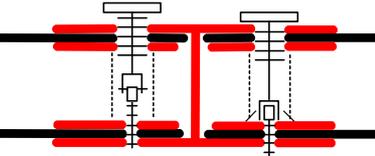
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	0	++	×
6		Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	--	0	++	×

Tabelle A68: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.7.6

Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben von außen direkt ins VE.	--	+	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von außen in innen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
3		Einsetzen der Schrauben mit SE-Muttern von außen.	--	-	++	✗
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
5		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen in außen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
6		Gewindebolzen gehören zum Innenteil des VE, Montage der Muttern von außen.	--	-	++	✗

7		<p>Gewindebolzen gehören zu den äußeren Teilen des VE und sind in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch. Montage des Sandwichs durch Schlitze in Deckschicht.</p>	--	--	++	×
8		<p>Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.</p>	--	0	++	×
9		<p>Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.</p>	--	0	++	×
<p>Fügen von einer Seite</p>						
10		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	0	++	×
11		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	0	++	×
12		<p>Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.</p>	--	0	++	×

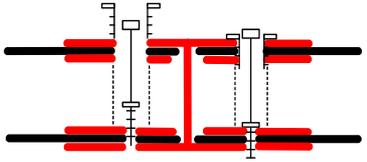
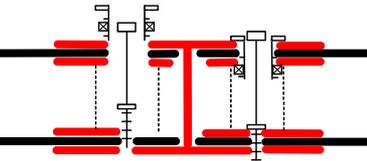
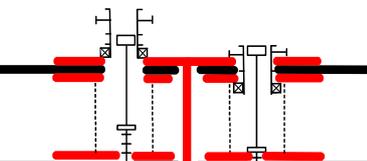
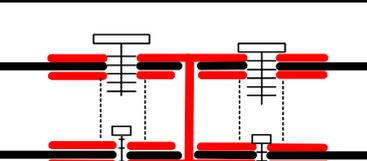
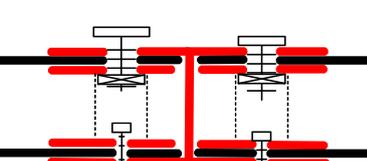
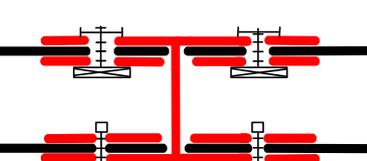
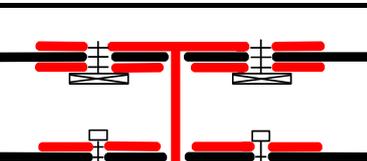
13		Unabhängiges Eindrehen der HohlSchraube und der inneren Schraube.	--	0	++	×
14		HohlSchraube mit SE-Mutter oben, Schraube unten.	--	-	++	×
15		HohlSchraube mit SE-Kopf und Mutter oben, Schraube unten.	--	0	++	×
16		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube.	--	0	++	×
17		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube mit SE-Mutter.	--	-	++	×
18		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen SE-Schraube mit äußerer Mutter.	--	0	++	×
19		SE-Schrauben oben, Standardschrauben unten.	--	0	++	×

Tabelle A69: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.7.7

Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

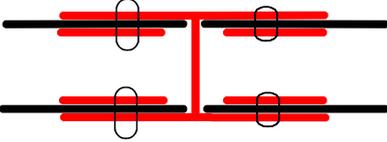
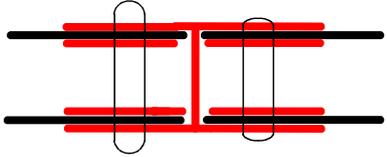
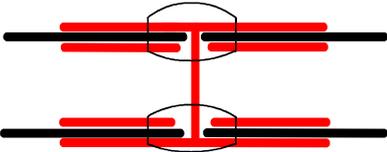
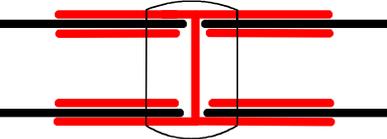
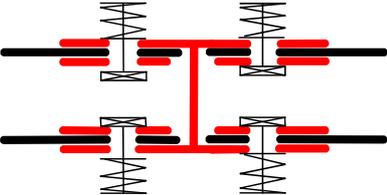
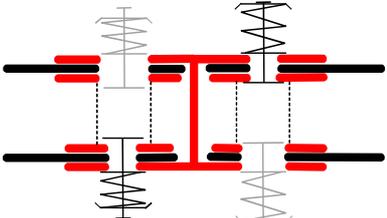
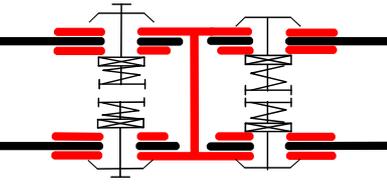
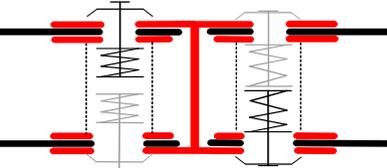
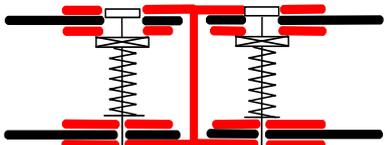
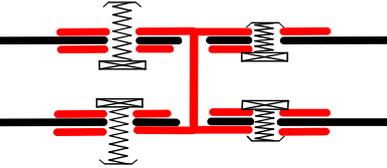
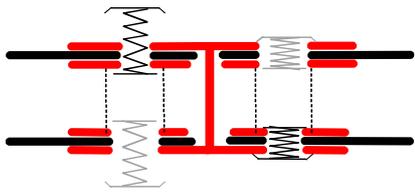
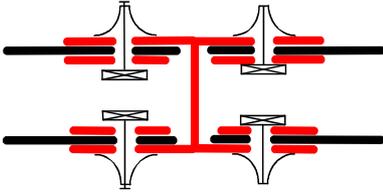
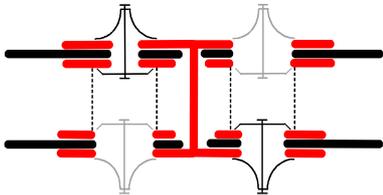
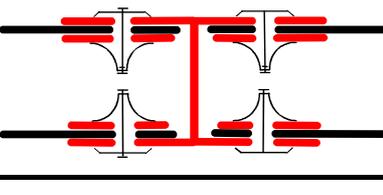
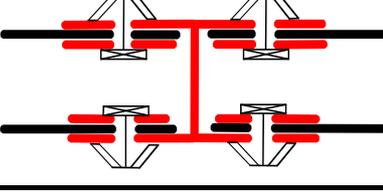
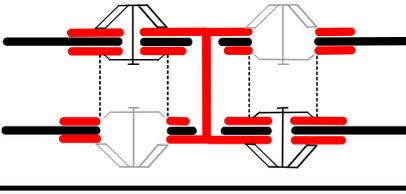
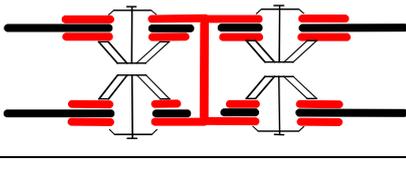
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichteilen an vier Stellen.	--	--	-	×
2		Seitenweises Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte).	--	-	--	×
3		Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte, jeweils eine oben und unten).	--	--	0	×
4		Alle Elemente werden durch eine Naht verbunden.	--	-	--	×

Tabelle A70: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.7.8

Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	-	+	✗
2		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
3		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	-	+	✗
4		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder, Montage durch Kern hindurch.	--	-	+	✗
5		Druckfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder für seitenweise Verspannung.	--	-	-	✗
6		Zugfeder-Spannelement mit SE, Montage von außen.	--	-	+	✗

7		Zugfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×
8		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	--	-	×
9		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×
10		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	+	+	×
11		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	--	0	×
12		Schubfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet, mit außen liegender Feder. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	×
13		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	-	0	×

14		Drehfeder-Spannelement mit SE und außen liegender Feder.	--	-	--	×
15		Drehfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder.	--	--	--	×
16		Hebel-Spannelement, außen liegend mit SE.	--	-	0	×
17		Hebel-Spannelement, innen liegend mit SE.	--	--	0	×
18		Keil-Spannelement, außen liegend mit SE.	--	-	0	×
19		Keil-Spannelement, außen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	--	0	×
20		Keil-Spannelement, innen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	×

Tabelle A71: Prinziplösungen für das VE B3 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.7.9 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind nicht für das VE B3 geeignet:

- Falzverbindung: Einlegeteile sind überflüssig, Gegenhalter ist nicht positionierbar.
- Körnverbindung: Verbindung ist kaum belastbar, da das Sandwich aufgrund des deformierbaren Kerns aus dem VE herausrutschen kann. Einlegeteile sind überflüssig.
- Sickenverbindung: Verbindung ist kaum belastbar, da das Sandwich aufgrund des deformierbaren Kerns aus dem VE herausrutschen kann. Einlegeteile sind überflüssig.
- Nut- u. Feder-Verb.: Einlegeteile sind überflüssig.
- Einpressverbindung: Nicht möglich, da der Bauraum unter der Sandwichdeckschicht bereits von den Einlegeteilen besetzt ist.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Verbindung ist geometrisch nicht möglich (VE umschließt die Sandwichdeckschicht nicht).

A3.8 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement C1, Variation der Fügeelemente

Dieses Verbindungselement kann, je nach Bedarf, mit oder ohne mittige Verbindung der nebeneinander liegenden Elementteile ausgeführt werden.

A3.8.1

Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

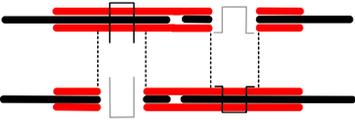
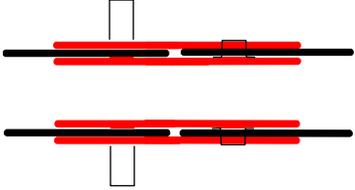
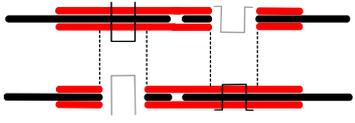
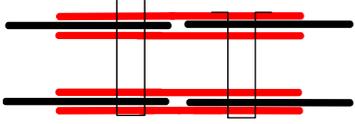
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.</p>	--	--	+	✗
2		<p>Einstoßen der Klammern von außen durch die äußere VE-Schicht und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden automatisch beim Einstoßen durch Führung am inneren VE-Teil.</p>	--	0	+	✗
3		<p>Einstoßen der in der Tiefe versetzten Klammern von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht), Umlegen der Enden von außen.</p>	--	--	+	✗
4		<p>Einstoßen einer Klammer durch das gesamte Sandwich, Umlegen der Enden auf der anderen Seite.</p>	--	--	--	✗

Tabelle A72: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.8.2

Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

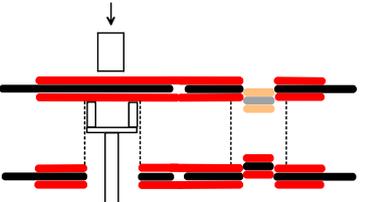
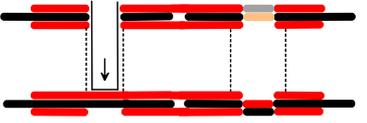
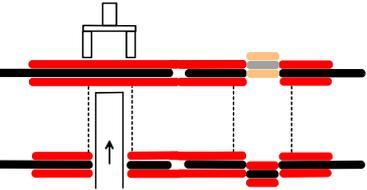
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von außen). Der Gegenhalter wird durch den Kern hindurch geführt.</p>	--	--	0	×
2		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch). Der äußere VE-Teil bildet den Gegenhalter.</p>	--	--	0	×
3		<p>Örtliche, in der Tiefe versetzte, plastische Verformung von VE und Sandwichdeckschicht durch Stempel (von innen durch Kern hindurch) und Gegenhalter.</p>	--	--	0	×

Tabelle A73: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.8.3

Fügeelement 06 „Körnverbindung“

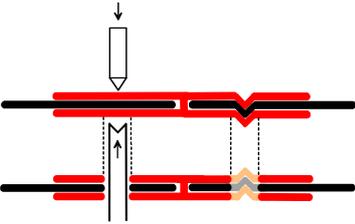
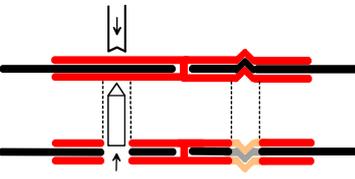
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		<p>Erzeugung einzelner in der Tiefe versetzter Körnpunkte mittels Körner und durch den Kern hindurch geführten Gegenhalter.</p>	--	0	0	×
2		<p>Erzeugung einzelner in der Tiefe versetzter Körnpunkte mittels Körner und durch den Kern hindurch geführten Gegenhalter.</p>	--	0	0	×

Tabelle A74: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Körnverbindung“

A3.8.4

Fügeelement 07 „Lappverbindung“

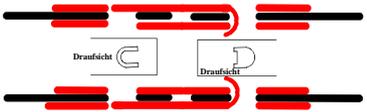
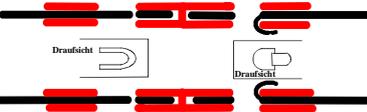
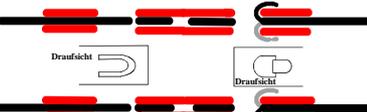
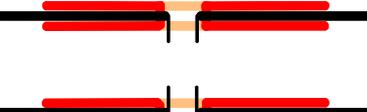
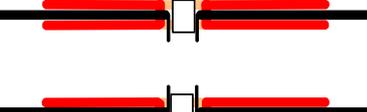
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Innenteil des VEs nach innen gebogen.</p>	--	--	--	✗
2		<p>VE-Laschen werden durch Öffnungen in der Sandwich-Deckschicht und im Außenteil des VEs nach außen gebogen.</p>	--	--	--	✗
3		<p>Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen VE-Teil nach außen gebogen.</p>	--	-	-	✗
4		<p>Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im unteren VE-Teil nach innen gebogen.</p>	--	0	-	✗
5		<p>Sandwichlaschen werden durch Öffnungen im oberen und unteren VE-Teil nach außen bzw. innen gebogen.</p>	--	--	--	✗
6		<p>Laschen der Sandwich-Deckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umgebogen.</p>	--	++	-	✗
7		<p>Laschen der Sandwich-Deckschicht werden durch Öffnungen im VE-Mittelstück geschoben und umgebogen. Sicherung durch Klemmelement.</p>	--	++	+	✓

Tabelle A75: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.8.5

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

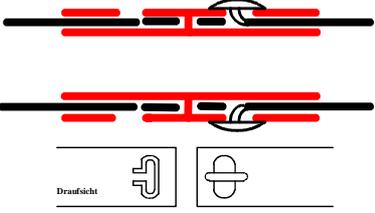
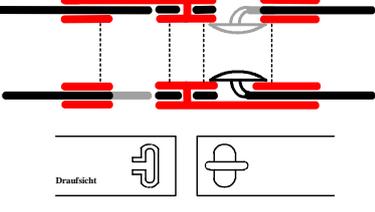
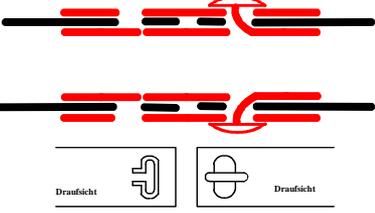
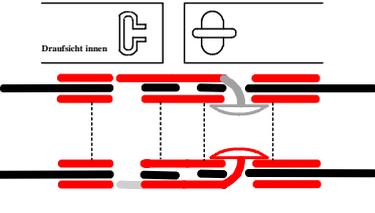
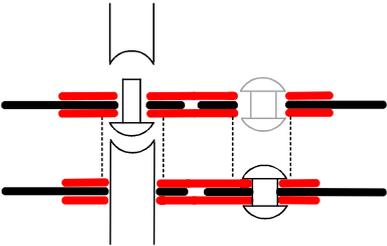
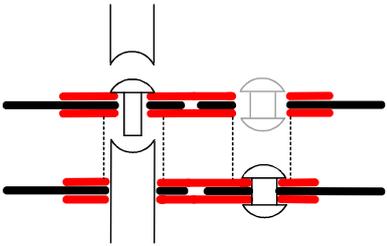
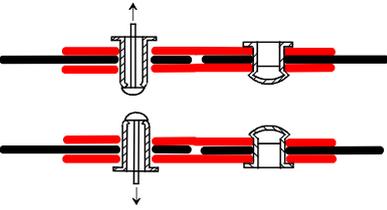
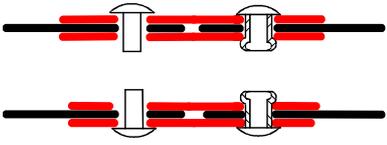
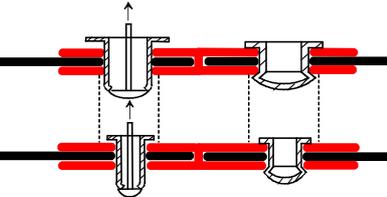
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1	 <p>Draufsicht  </p>	Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	--	✗
2	 <p>Draufsicht  </p>	In der Tiefe versetzte Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch Öffnungen im VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	--	✗
3	 <p>Draufsicht   Draufsicht</p>	Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.	--	-	--	✗
4	 <p>Draufsicht innen  </p>	In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.	--	--	--	✗

Tabelle A76: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.8.6

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von außen.</p>	--	--	+	✗
2		<p>Standardniete, in der Tiefe versetzt. Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	+	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	+	+	✗
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	+	✗
Fügen von einer Seite						
5		<p>Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	+	+	✗

6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	+	X
---	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---	---	---

Tabelle A77: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Nietverbindung“

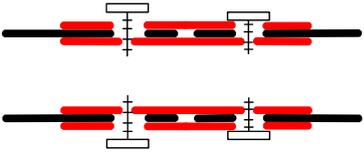
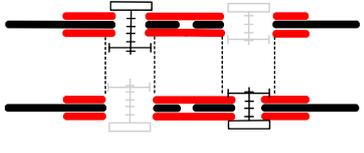
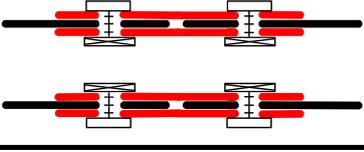
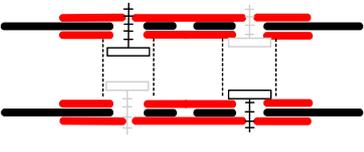
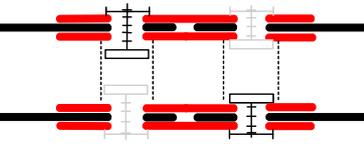
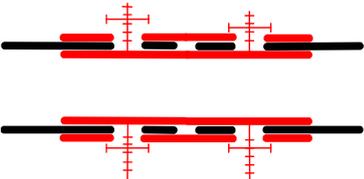
A3.8.7 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

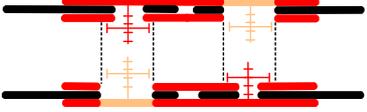
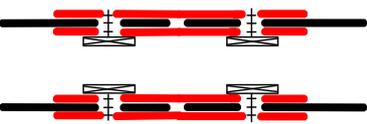
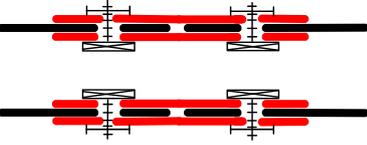
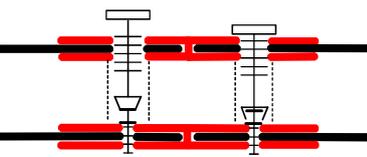
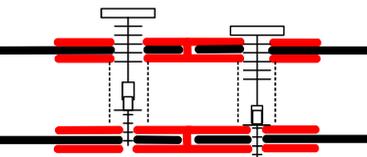
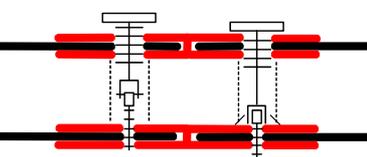
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/X
1		<p>Montage durch seitliches Einschieben. Form und Lage der VE-Nut können variiert werden.</p>	--	++	-	X
2		<p>Seitliches Einschieben des Sandwichs in das VE, VE-Mittelsteg mit Nuten.</p>	--	++	--	X
3		<p>Haken in Sandwichdeckschicht. Direktes Einschieben des Sandwichs ins VE, Fixieren durch seitliches Verschieben.</p>	--	++	--	X

Tabelle A78: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.8.8

Fügeelement 21 „Schraubenverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben von außen direkt ins VE.	--	+	++	✓
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von außen in innen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
3		Einsetzen der Schrauben mit SE-Muttern von außen.	--	-	++	✗
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen direkt ins VE, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
5		Eindreihen der in der Tiefe versetzt angeordneten Schrauben von innen in außen befindliche Muttern, Montage durch Kern hindurch.	--	--	++	✗
6		Gewindebolzen gehören zum Innenteil des VE, Montage der Muttern von außen.	--	-	++	✗

7		Gewindebolzen gehören zu den äußeren Teilen des VE und sind in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage der Muttern von innen durch Kern hindurch.	--	--	++	×
8		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.	--	0	++	×
9		Schrauben mit SE-Kopf und von außen montierten Muttern.	--	0	++	×
Fügen von einer Seite						
10		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	++	×
11		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	++	×
12		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht der Bolzen und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	++	×

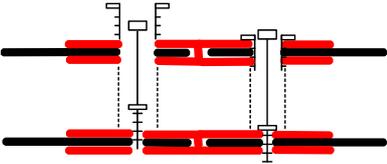
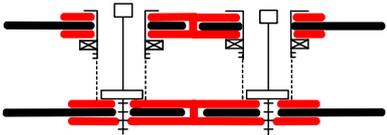
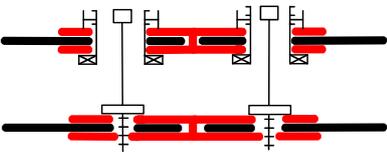
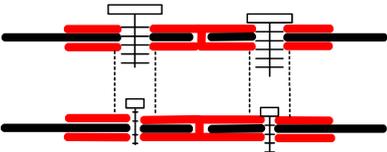
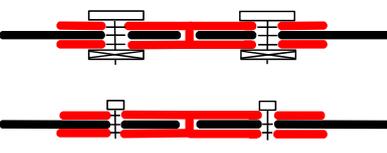
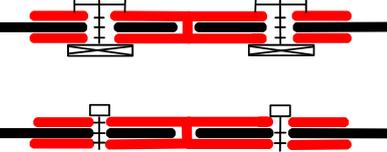
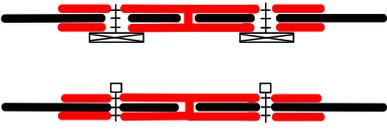
13		Unabhängiges Eindrehen der Hohl- schraube und der inneren Schraube.	--	0	++	×
14		Oben Hohl- schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten Standardschraube.	--	-	++	×
15		Oben SE-Schraube mit außen liegender Mutter, unten Stan- dardschraube.	--	0	++	×
16		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube.	--	0	++	×
17		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen Schraube mit SE-Mutter.	--	-	++	×
18		Eindrehen der unteren Schraube durch den Kern, danach Montage der oberen SE-Schraube mit äußerer Mutter.	--	0	++	×
19		SE-Schrauben oben, Stan- dardschrauben unten.	--	0	++	×

Tabelle A79: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.8.9

Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

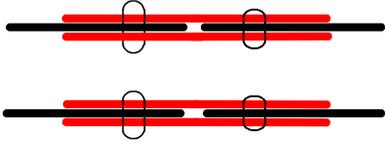
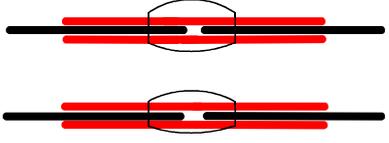
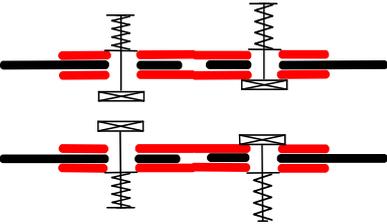
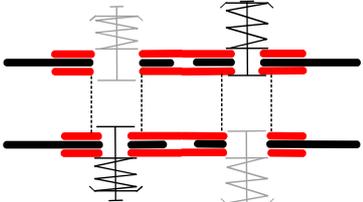
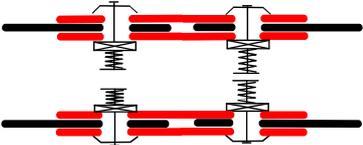
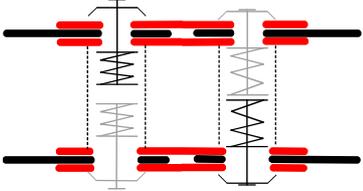
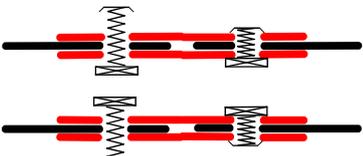
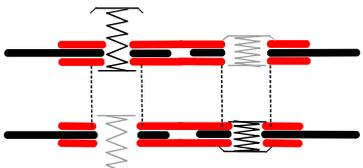
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichteilen an vier Stellen.	--	--	0	×
2		Vernähen von VE und Sandwichelementen (zwei Nähte, jeweils eine oben und unten).	--	--	0	×

Tabelle A80: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.8.10

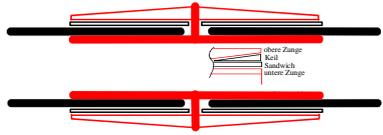
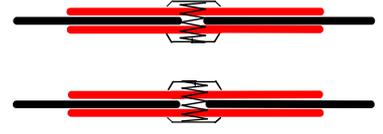
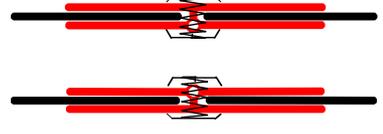
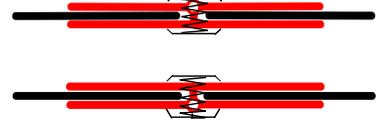
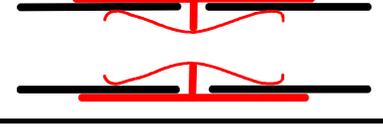
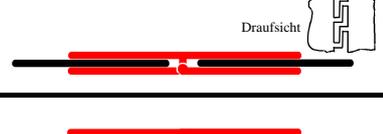
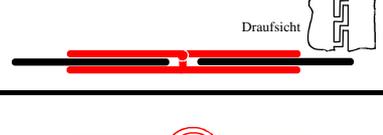
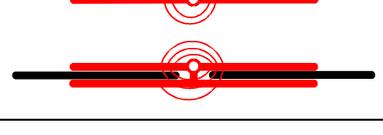
Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
Fügen von zwei Seiten						
1		Druckfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	-	0	x
2		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	x
3		Druckfeder-Spannelement mit innen liegender Feder und SE, Montage von außen.	--	-	0	x
4		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder, Montage durch Kern hindurch.	--	-	0	x
5		Zugfeder-Spannelement mit SE, Montage von außen.	--	-	0	x
6		Zugfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	x

7		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	--	0	×
8		Biegefeder-Spannelement mit außen liegender Feder, in der Tiefe versetzt angeordnet. Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	×
9		Biegefeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	+	0	×
10		Schubfeder-Spannelement mit außen liegender Feder und SE.	--	--	-	×
11		Schubfeder-Spannelement, in der Tiefe versetzt angeordnet, mit außen liegender Feder. Montage durch Kern hindurch.	--	--	-	×
12		Schubfeder-Spannelement mit innen liegender Feder.	--	-	-	×
13		Drehfeder-Spannelement mit SE und außen liegender Feder.	--	0	--	×
14		Drehfeder-Spannelement mit SE und innen liegender Feder.	--	-	--	×

15		Hebel-Spannelement, außen liegend mit SE.	--	-	-	×
16		Hebel-Spannelement, innen liegend mit SE.	--	--	-	×
17		Keil-Spannelement, außen liegend, mit SE.	--	-	-	×
18		Keil-Spannelement, außen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	--	-	×
19		Keil-Spannelement, innen liegend, in der Tiefe versetzt. Montage durch den Kern hindurch.	--	--	-	×
20		Mittige Keil-Spannelemente, außen liegend.	--	0	--	×
21		Verspannen von Sandwich-Deckschicht und VE durch von außen eingetriebenen Keil.	--	+	0	×
Fügen von einer Seiten oder nur durch Einschieben						
22		Unterer VE-Teil mit Schubelementen, erlauben Einschieben, verhindern Lösen.	--	++	0	×

23		Oberer VE-Teil mit Schubelementen, erlauben Einschieben, verhindern Lösen.	--	++	0	×
24		Die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile werden über nach außen geführte Hebel gespannt.	--	++	--	×
25		Die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile werden über nach außen geführte Hebel gespannt.	--	++	--	×
26		Exzentermechanismus verspannt die translatorisch verschiebbaren inneren VE-Teile gegen die äußeren.	--	++	0	×
27		Sperrollen im äußeren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	-	×
28		Sperrollen im inneren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	-	×
29		Sperkeile im äußeren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	-	×
30		Sperkeile im inneren Sandwichteil erlauben Einschieben der Sandwichdeckschicht und verhindern Lösen.	--	++	-	×
31		Sperkeile im inneren Sandwichteil verspannen durch seitliches Einschieben Sandwich und VE.	--	+	0	×

32		Sperrkeile im äußeren Sandwichteil verspannen durch seitliches Einschieben Sandwich und VE.	--	+	0	×
Sonstige (eindeutige Zuordnung der Fügeseite (noch) nicht möglich)						
33		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die translatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	0	-	×
34		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	--	×
35		Zentrale Zugfeder-Spannelemente, ziehen die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	+	--	×
36		Innerer Teil des VE als Biegefeder ausgebildet.	--	+	0	×
37		Äußerer Teil des VE als Biegefeder ausgebildet.	--	+	0	×
38		Äußerer VE-Teil ist zweigeteilt und über Drehfeder mit Mittelsteg verbunden.	--	+	--	×
39		Innerer VE-Teil ist zweigeteilt und über Drehfeder mit Mittelsteg verbunden.	--	+	--	×
40		Drehfedern, drehen die rotatorisch beweglichen Sandwichinnenteile nach außen.	--	+	--	×

41		Drehfedern, drehen die rotatorisch beweglichen Sandwichaußenteile nach innen.	--	+	--	×
----	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------	----	---	----	---

Tabelle A81: Prinziplösungen für das VE C1 und das Fügeelement „Spannverbindung“

A3.8.11 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE C1 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Die Verbindung kann nicht hergestellt werden, da ein Gegenhalter fehlt (die beiden Seiten sind nicht verbunden).
- Sickenverbindung: Die Verbindung kann nicht hergestellt werden, da ein Gegenhalter fehlt (die beiden Seiten sind nicht verbunden).
- Einpressverbindung: Für die Einpressteile ist kein Bauraum vorhanden, da das Sandwichdeckblech in einen Spalt im VE eingeschoben wird.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Die Verbindung kann nicht hergestellt werden, da ein Gegenhalter fehlt (die beiden Seiten sind nicht verbunden).

A3.9 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement E7, Variation der Fügeelemente

A3.9.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

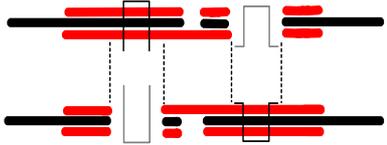
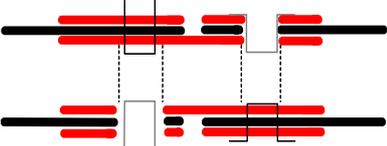
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Einstoßen einer Klammer von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.	--	--	+	✗
2		Einstoßen einer Klammer von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von außen.	--	--	+	✗

Tabelle A82: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.9.2 Fügeelement 03 „Durchsetzfügeverbindung“

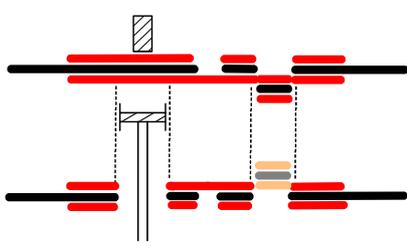
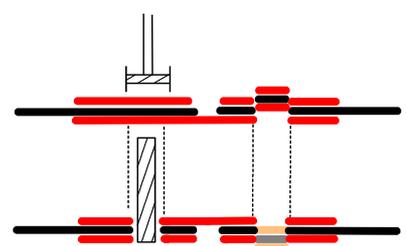
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch Kern hindurch).	--	--	-	✗
2		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von innen durch den Kern) und Gegenhalter (von außen).	--	--	-	✗

Tabelle A83: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Durchsetzfügeverbindung“

A3.9.3 Fügeelement 07 „Lappverbindung“

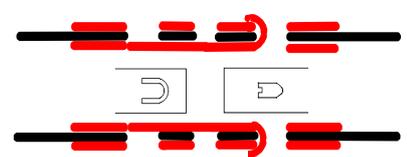
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der Sandwichdeckschicht und der VE-Deckschicht werden durch die Öffnung nach außen gebogen.	--	-	0	✗

Tabelle A84: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.9.4

Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

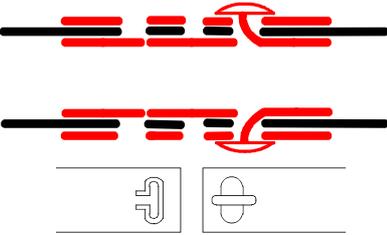
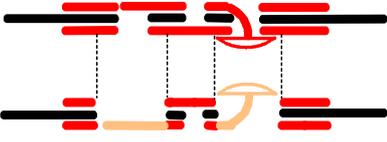
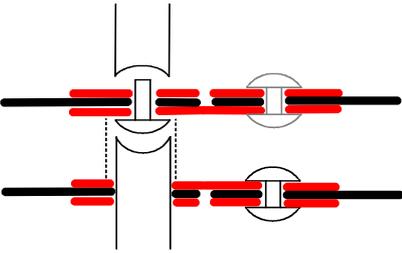
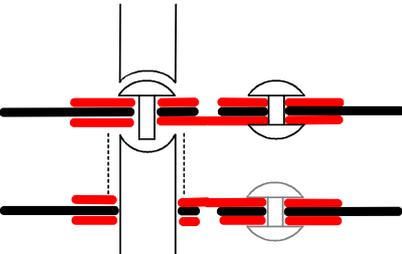
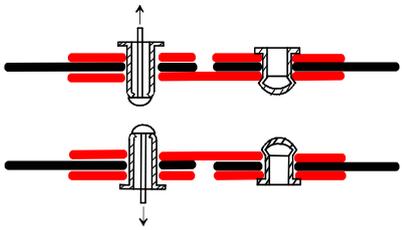
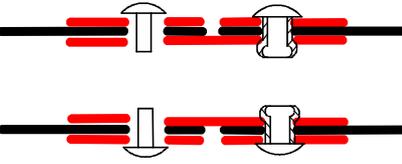
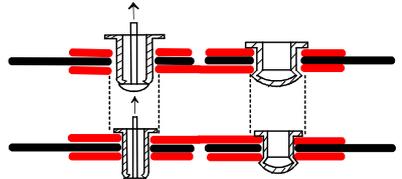
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Laschen der unteren VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach außen gebogen und verdreht.</p>	--	--	--	✗
2		<p>In der Tiefe versetzte Laschen der oberen VE-Zunge werden durch Öffnungen in Sandwich-Deckschicht und VE nach innen gebogen und durch den Kern hindurch verdreht.</p>	--	--	--	✗

Tabelle A85: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.9.5

Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von außen.	--	--	+	✗
2		Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfs von innen durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
3		Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	+	+	✗
4		Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	--	+	+	✗
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	--	+	✗

6		<p>Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	--	+	X
---	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	----	---	---

Tabelle A86: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Nietverbindung“

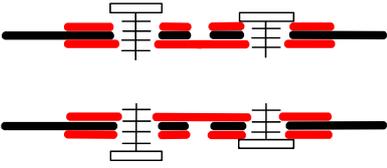
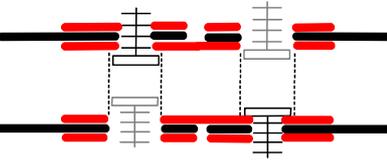
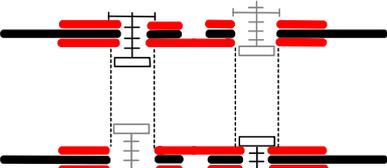
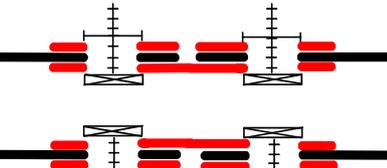
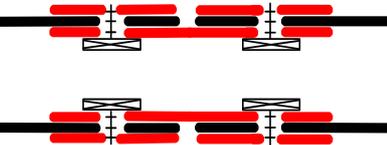
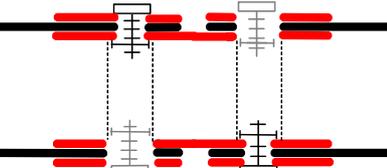
A3.9.6 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/X
1		<p>Montage durch seitliches Einschieben. Form und Lage der VE-Nut können variiert werden.</p>	--	+	-	X
2		<p>Seitliches Einschieben des Sandwichs in das VE, VE-Mittelsteg mit Nuten.</p>	--	+	--	X
3		<p>Haken in Sandwich-Deckschicht. Direktes Einschieben des Sandwichs ins VE, Fixieren durch seitliches Verschieben.</p>	--	+	--	X

Tabelle A87: Prinziplösungen für das VE D10 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.9.7

Fügeelement 21 „Schraubverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindrehen der Schrauben direkt in das VE.	--	+	+	×
2		Eindrehen der in der Tiefe versetzten Schrauben direkt in die Sandwichdeckschicht und die äußere VE-Schicht. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×
3		Eindrehen der in der Tiefe versetzten Schrauben durch den Kern. Montage der Muttern vom außen.	--	--	+	×
4		Schrauben mit SE Kopf und von außen montierten Muttern.	--	0	+	×
5		Schrauben mit SE-Kopf, direkt von außen ins VE geschraubt, Verspannen durch Herausdrehen.	--	0	+	×
6		In der Tiefe versetzte Schrauben mit innenliegenden Muttern. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×

7		Schrauben mit innenliegenden SE Muttern.	--	-	+	✗
8		Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern. Schlitz in Sandwich-deckschicht ermöglichen Montage.	--	-	+	✗
9		In der Tiefe versetzte Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern von innen durch Sandwich hindurch.	--	--	+	✗
Fügen von einer Seite						
10		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Schraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	+	+	✗
11		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	+	+	✗
12		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Schraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	+	+	✗

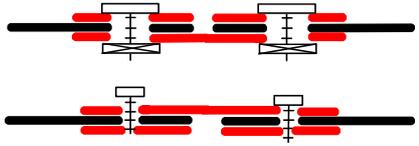
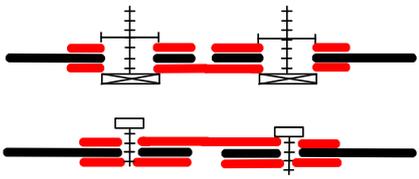
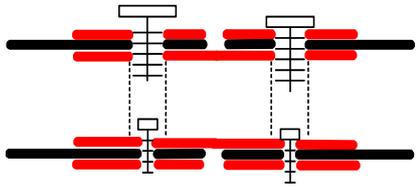
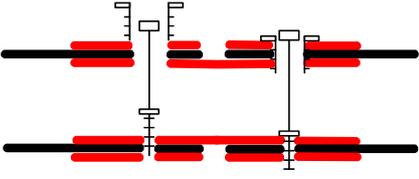
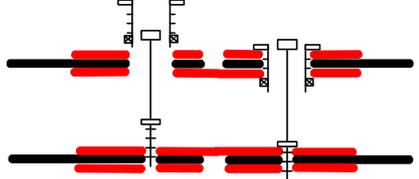
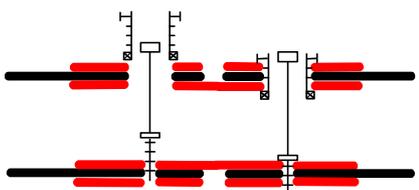
13		Oben Schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten Standardschraube.	--	0	++	×
14		Oben SE-Schraube mit außen liegender Mutter, unten Standardschraube.	--	+	++	(✓) 
15		Obere und untere Schraube mit Standardgewinde. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	0	+	×
16		Obere Schraube als Hohl-schraube, untere Schraube lange Standardschraube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	0	+	×
17		Oben Hohl-schraube mit innen liegender SE-Mutter, unten Standardschraube.	--	-	++	×
18		Oben SE-Hohl-schraube mit außen liegender Mutter, unten Standardschraube.	--	0	++	×

Tabelle A88: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.9.8

Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

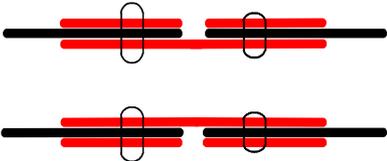
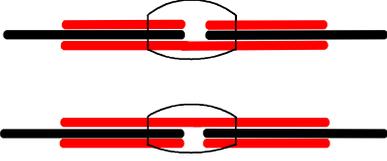
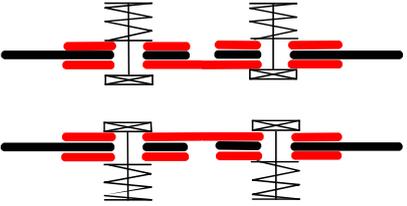
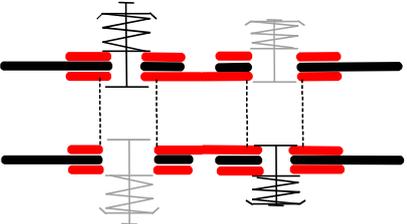
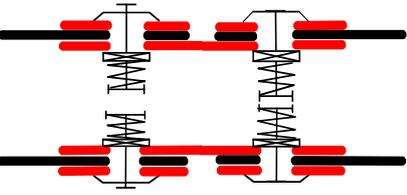
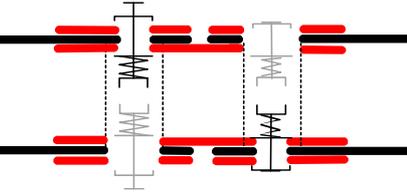
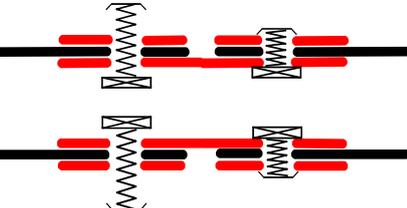
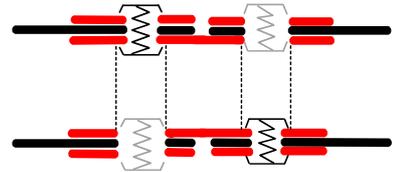
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	--	--	--	✗
2		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	--	--	-	✗

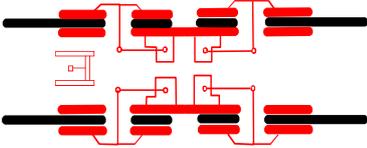
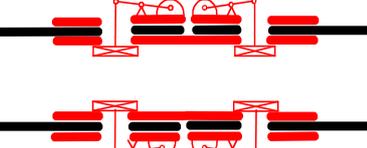
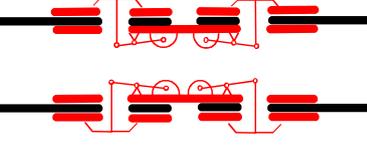
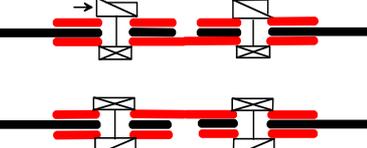
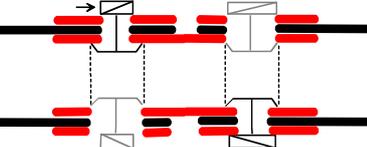
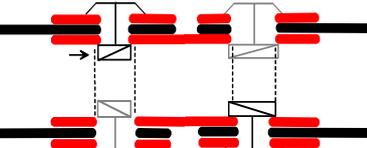
Tabelle A89: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.9.9

Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	0	0	x
2		In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.	--	--	0	x
3		Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder und SE. Montage von außen.	--	--	0	x
4		Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Druckfeder und Sperrelement.	--	--	0	x
5		Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	x
6		Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch Kern hindurch. Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.	--	--	0	x

7		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	-	--	✗
8		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, innen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
9		<p>Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	+	--	✗
10		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
11		<p>Einsetzen des in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
12		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
13		<p>Außen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine außen liegende Drehfeder aufgebracht.</p>	--	-	--	✗

14		<p>Innen liegendes Spannelement. Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.</p>	--	--	--	✗
15		<p>Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines außen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.</p>	--	0	--	✗
16		<p>Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.</p>	--	--	--	✗
17		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	-	-	✗
18		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	✗
19		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	✗
<p>Tabelle A90: Prinziplösungen für das VE E7 und das Fügeelement „Spannverbindung“</p>						

A3.9.10 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE E7 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Die Verbindung ist nicht herstellbar, da kein Gegenhalter positioniert werden kann.
- Körnverbindung: Die Verbindung ist nicht herstellbar, da es keinen Gegenhalter gibt (die beiden VE-Seiten sind nicht verbunden).
- Sickenverbindung: Die Verbindung ist nicht herstellbar, da es keinen Gegenhalter gibt (die beiden VE-Seiten sind nicht verbunden).
- Einpressverbindung: Für die Einpressteile ist kein Bauraum vorhanden, da das Sandwichdeckblech in einen Spalt im VE eingeschoben wird.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Die Verbindung ist nicht herstellbar, da es keinen Gegenhalter gibt (die beiden VE-Seiten sind nicht verbunden).

A3.10 Sandwichverbindungen mit dem Verbindungselement G10, Variation der Fügeelemente

A3.10.1 Fügeelement 01 „Blechsteppverbindung“

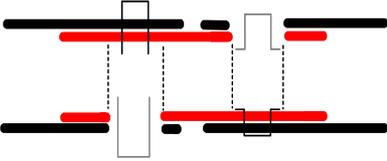
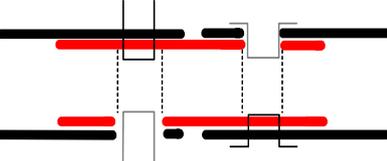
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Einstoßen einer Klammer von außen durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von innen durch den Kern hindurch.</p>	--	--	+	✗
2		<p>Einstoßen einer Klammer von innen (durch den Kern hindurch) durch das VE und die Sandwich-Deckschicht (beides nicht vorgelocht). Umlegen der Enden von außen.</p>	--	--	+	✗

Tabelle A91: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Blechsteppverbindung“

A3.10.2 Fügeelement 03 „Durchsetzfugeverbindung“

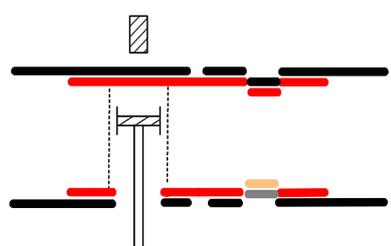
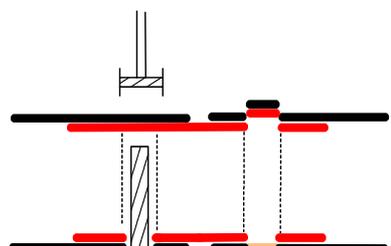
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von außen) und Gegenhalter (von innen durch Kern hindurch).	--	--	-	✗
2		Örtliche plastische Verformung von Sandwichdeckschicht und VE durch Stempel (von innen durch den Kern) und Gegenhalter (von außen).	--	--	-	✗

Tabelle A92: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Durchsetzfugeverbindung“

A3.10.3 Fügeelement 07 „Lappverbindung“

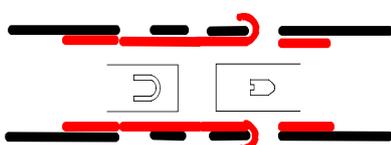
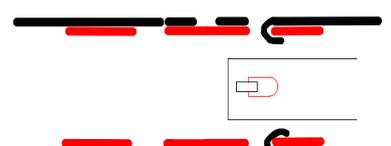
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der VE-Deckschicht werden durch die Öffnung nach außen gebogen.	--	0	0	✗
2		Laschen der Sandwichdeckschicht werden durch die Öffnung nach innen gebogen.	--	0	-	✗

Tabelle A93: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Lappverbindung“

A3.10.4 Fügeelement 08 „Schränkverbindung“

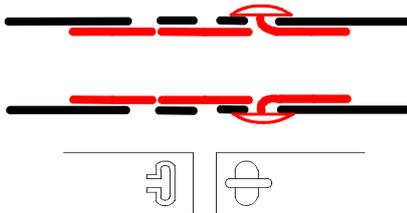
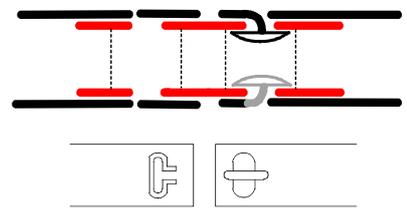
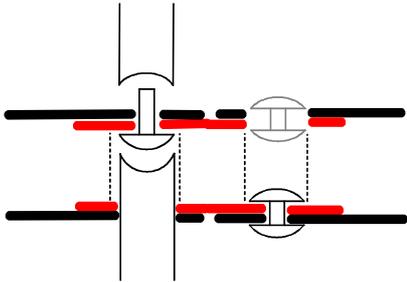
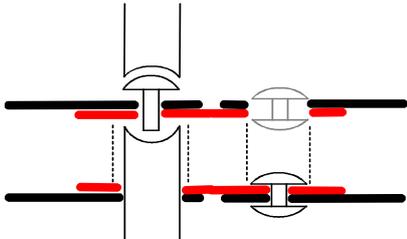
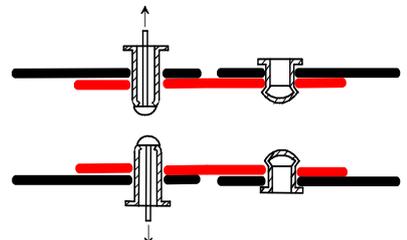
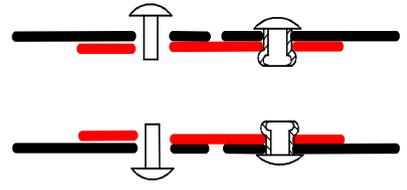
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		Laschen der VE-Deckschicht werden durch Öffnungen im Sandwich nach außen gebogen und verdreht.	--	--	--	✗
2		Laschen der VE-Deckschicht werden durch Sandwich hindurch nach innen gebogen und verdreht.	--	--	--	✗

Tabelle A94: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Schränkverbindung“

A3.10.5 Fügeelement 10 „Nietverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von innen durch Kern hindurch. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von außen.</p>	--	--	+	✗
2		<p>Standardniete, Positionierung von Niet und Gegenhalter von außen. Aufsetzen des Kopfmachers und Formen des Schließkopfes von innen durch Kern hindurch.</p>	--	--	+	✗
3		<p>Blindniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.</p>	--	+	+	✗
4		<p>Sprengniete, Positionierung von außen, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.</p>	--	+	+	✗
Fügen von einer Seite						

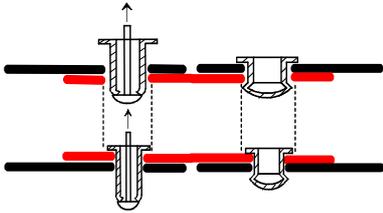
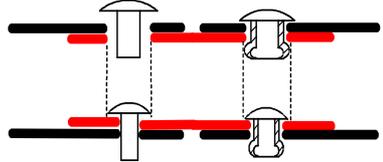
5		Blindniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Herausziehen des integrierten Kopfmachers.	--	0	+	X
6		Sprengniete, Positionierung von außen bzw. durch Kern hindurch, Bildung des Schließkopfs durch Explosion einer geringen Sprengstoffmenge am Schaftende.	--	0	+	X

Tabelle A95: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Nietverbindung“

A3.10.6 Fügeelement 17 „Nut und Feder-Verbindung“

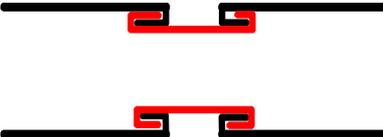
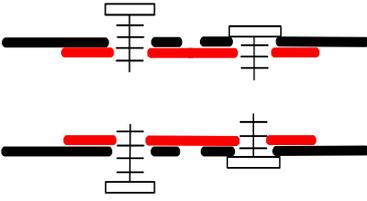
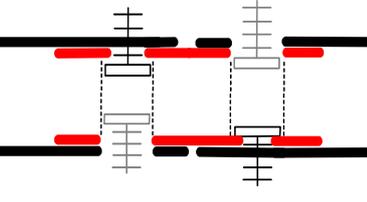
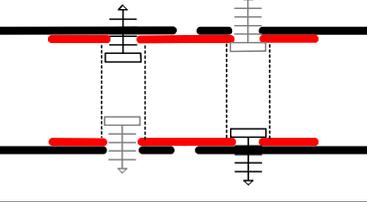
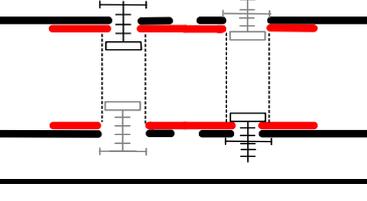
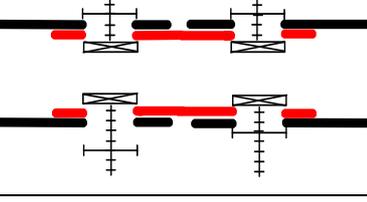
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		Seitliches Einschieben des VEs in das Sandwich, Sandwich-Deckbleche sind als Nuten ausgebildet.	--	+	-	X

Tabelle A96: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Nut und Feder-Verbindung“

A3.10.7 Fügeelement 21 „Schraubverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
Fügen von zwei Seiten						
1		Eindreihen der Schrauben direkt in das VE.	--	+	+	✗
2		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Blechschrauben direkt in die Sandwichdeckschicht. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	✗
3		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Blechschrauben mit Bohrspitze direkt in die Sandwichdeckschicht. Montage durch Kern hindurch.	--	--	-	✗
4		Eindreihen der in der Tiefe versetzten Schrauben durch den Kern. Montage der Mutter von außen.	--	--	+	✗
5		Schrauben mit SE Kopf und von außen montierten Muttern.	--	0	+	✗

6		In der Tiefe versetzte Schrauben mit innenliegenden Muttern. Montage durch Kern hindurch.	--	--	+	×
7		Schrauben mit innenliegenden SE-Muttern.	--	-	+	×
8		Gewindebolzen gehören zum VE. Verschrauben durch Muttern. Schlitz in Sandwichdeckschicht ermöglichen Montage.	--	-	+	×
Fügen von einer Seite						
9		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Blechschraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	0	0	×
10		Eindreihen der Kombischraube. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten rutscht die Verbindung zw. den beiden Teilen durch (Klebe-, Löt- oder Pressverbindung) und der obere Schraubenteil kann angezogen werden.	--	0	0	×
11		Kombischraube für obere und untere Deckschicht. Bei Erreichen des Anzugsmoments unten bricht die Sollbruchstelle oberhalb der Blechschraube und ermöglicht das Anziehen der oberen Standardschraube.	--	0	0	×

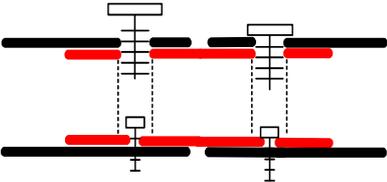
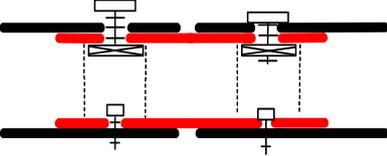
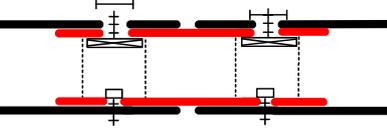
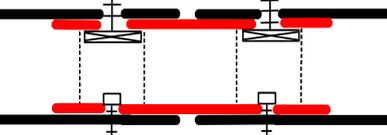
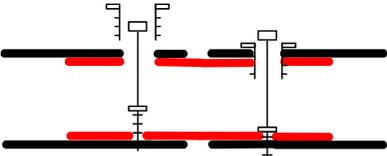
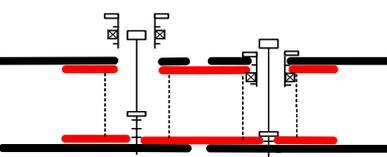
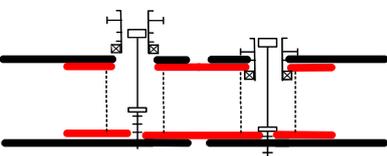
12		Obere Schraube als Standardschraube und untere Schraube als Blechschraube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	0	0	×
13		Schraube mit SE-Mutter oben, Blechschraube unten.	--	--	0	×
14		SE-Schraube mit Mutter oben, Blechschraube unten. Montage der unteren Schrauben durch Kern hindurch.	--	-	0	×
15		SE-Blechschraube oben, Blechschraube unten. Montage der unteren Schraube durch Kern hindurch.	--	-	0	×
16		Obere Schraube als Hohl-schraube, untere Schraube lange Blechschraube. Montage der unteren Schraube durch Sandwich hindurch.	--	0	0	×
17		Hohlschraube mit SE-Mutter oben, Blechschraube unten.	--	--	0	×
18		Hohlschraube mit SE-Kopf und Mutter oben, Blechschraube unten.	--	-	0	×

Tabelle A97: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Schraubenverbindung“

A3.10.8 Fügeelement 23 „Wickeln und Nähen“

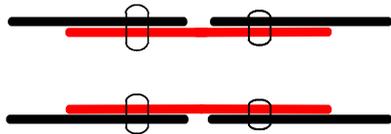
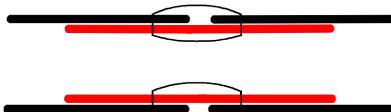
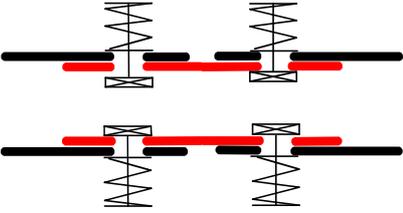
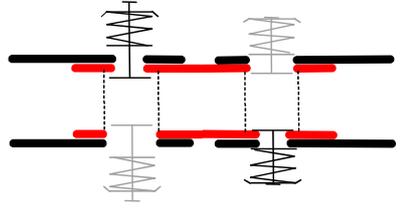
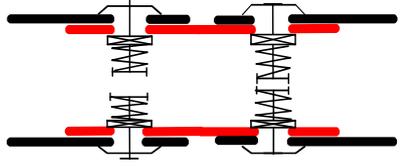
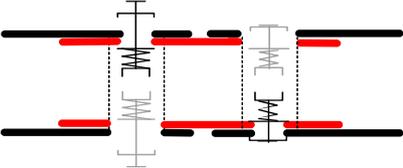
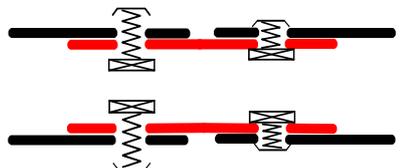
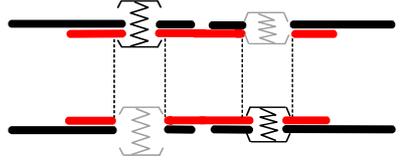
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/×
1		Direktes Vernähen von VE und Sandwichdeckschicht.	--	--	--	×
2		Vernähen von VE und Sandwichdeckschichten, jeweils oben und unten.	--	--	-	×

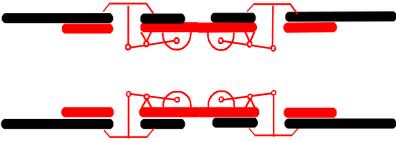
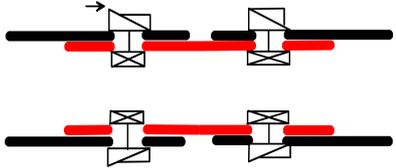
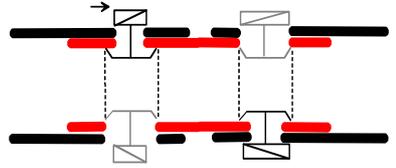
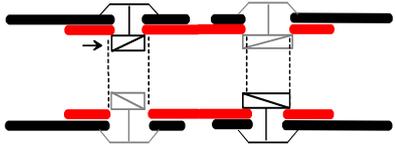
Tabelle A98: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Wickeln und Nähen“

A3.10.9

Fügeelement 24 „Spannverbindung“

Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/x
1		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Druckfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	0	0	x
2		<p>In der Tiefe versetzte Druckfeder-Spannelemente mit außen liegenden Federn, Montage durch Kern hindurch.</p>	--	--	0	x
3		<p>Druckfeder-Spannelemente mit innen liegender Feder und SE. Montage von außen.</p>	--	--	0	x
4		<p>Einsetzen der Spannelemente in Kern, Verspannung mittels Druckfeder und Sperrelemente.</p>	--	--	0	x
5		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Innen liegende Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	0	x
6		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch Kern hindurch. Zugfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	0	x

7		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	-	--	✗
8		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch, innen liegende Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
9		<p>Einsetzen der Spannelemente mit innen liegender Feder von außen, Biegefeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	+	--	✗
10		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegendes Schubelement bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
11		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente von innen durch den Kern hindurch. Außen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
12		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen. Innen liegende Schubfeder bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	--	✗
13		<p>Vorspannkraft wird durch eine innen liegende Drehfeder aufgebracht.</p>	--	--	--	✗

14		<p>Vorspannkraft wird durch entsprechende Arretierung eines innen liegenden Hebelmechanismus aufgebracht.</p>	--	--	--	✘
15		<p>Einsetzen der Spannelemente von außen mittels Sperrelement. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	-	-	✘
16		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Außen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	✘
17		<p>Einsetzen der in der Tiefe versetzten Spannelemente durch den Kern hindurch. Innen liegender Keilmechanismus bringt Vorspannkraft auf.</p>	--	--	-	✘
<p>Tabelle A99: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Spannverbindung“</p>						

A3.10.10 Fügeelement 25 „Einpressverbindung“

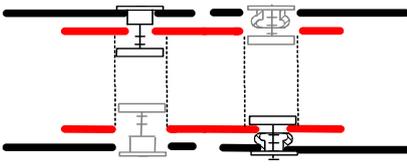
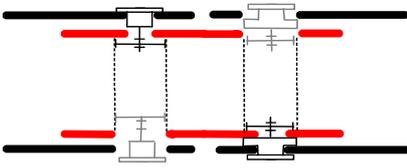
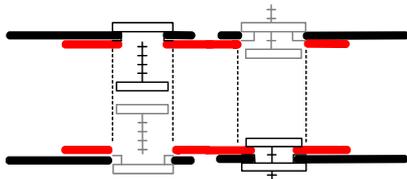
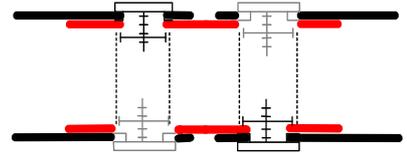
Nr.	Prinziplösung	Beschreibung				✓/✗
1		<p>Flache Sprengmutter (ähnlich Sprengniet) in der Tiefe versetzt, Einsetzen in die Sandwichdeckschicht von außen, danach Verschraubung von innen.</p>	--	--	+	✗
2		<p>„Sprengkopfschrauben“ (ähnlich Sprengniet) in der Tiefe versetzt, Einsetzen in die Sandwich-Deckschicht von oben, danach Verschrauben mit VE mittels Mutter von innen.</p>	--	--	+	✗
3		<p>Versetztes Einpressen von Muttern in die Sandwichdeckschicht, Montage von außen. Danach Verschraubung mit VE von innen durch Sandwich.</p>	--	-	+	✗
4		<p>In der Tiefe versetztes Einpressen von Schrauben in die Sandwichdeckschicht, Montage außen. Danach Verschraubung mit VE von innen durch Sandwich.</p>	--	-	+	✗

Tabelle A100: Prinziplösungen für das VE G10 und das Fügeelement „Einpressverbindung“

A3.10.11 Nicht geeignete mechanische Fügeverfahren

Folgende mechanische Fügeverfahren sind für das VE G10 nicht geeignet:

- Falzverbindung: Die Verbindung ist nicht fertigbar, da kein Gegenhalter positioniert werden kann.
- Körnverbindung: Verbindung ist kaum belastbar, da das Sandwich aufgrund der wenig biegesteifen Deckschichten aus dem VE heraus rutschen kann.
- Sickenverbindung: Die Verbindung ist nicht fertigbar, da kein Gegenhalter positioniert werden kann.
- Verpr.- u. Quetschverb.: Die Verbindung ist geometrisch nicht möglich (VE umschließt die Sandwichdeckschicht nicht).

A4 Sperrelemente

A4.1 Physikalische Effekte zur Aktivierung der Sperrelemente

Für die Bewegung der Sperrkörper von der Montage- in die Sperrposition wird ein zusätzlicher Mechanismus benötigt. Die Funktionsstruktur dieses Mechanismus muss als Ausgangsgröße einen Weg bzw. eine Kraft aufweisen. Sie kann mit Hilfe zweier Grundfunktionen realisiert werden: „Vergrößern/Verkleinern“ oder „Wandeln“.

In Tabelle A2 und Tabelle A102 sind diejenigen physikalischen Effekte aufgeführt, mit deren Hilfe die beiden Grundfunktionen prinzipiell realisiert werden können. Außerdem wurde eine Grobbewertung bzgl. der Eignung der Effekte durchgeführt.

Grundfunktion „Vergrößern/Verkleinern“

Physikal. Effekt	Eignung (✓/✗)	Begründung bei Nichteignung
Hebel	✓	-
Keil	✓	-
Kapillarität	✗	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Querkontraktion	✓	-
Schub	✓	-
Fluid-Effekt	✓	-
Reibung	✗	Reibkraft wirkt stets parallel zur Bewegungsrichtung.
Hysterese	✗	Verlustfreie Kraftleitung nicht möglich.

Tabelle A101: Physikalische Effekte der Grundfunktion „Vergrößern/Verkleinern“ mit den Ausgangsgrößen Weg oder Kraft

Grundfunktion „Wandeln“

Physikal. Effekt	Eignung (✓/✗)	Begründung bei Nichteignung
Bewegungsgesetz	✗	Beschreibt nur den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Weg, keine Krafterzeugung.
Weissenberg-Effekt	✗	Erzielbare Kräfte zu gering.
Hook	✓	-
Querkontraktion	✓	-
Schub	✓	-
Torsion	✓	-
Coulomb I	✗	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Coulomb II	✗	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Auftrieb	✗	Erzielbare Kräfte zu gering, lageabhängig.
Boyle-Mariotte	✓	-
Stehende Welle	✗	Keine Krafterzeugung.
Resonanz	✗	Schwingung nicht erwünscht, lageabhängig.
Schallanregung	✗	Erzielbare Kräfte zu gering.
Wärmedehnung	✗	Erzielbarer Weg zu gering.
Wärmedehnungsanomalie	✗	Erzielbarer Weg zu gering.
Elektrostriktion	✗	Erzielbarer Weg zu gering.
Magnetostraktion	✗	Erzielbarer Weg zu gering.

Oberflächenspannung	×	Erzielbare Kräfte zu gering, lageabhängig.
Gravitation	×	Erzielbare Kräfte zu gering, lageabhängig.
Zentrifugalkraft	✓	-
Gravitationsdruck	×	Erzielbare Kräfte zu gering, lageabhängig.
Kapillardruck	×	Erzielbare Kräfte zu gering.
Energiesatz	×	Zu aufwändig.
Coriolis-Kraft	×	Zu aufwändig.
Impuls	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Bernoulli-Gesetz	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Wirbelstrom	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Zähigkeit	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Turbulenz	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Profilauftrieb	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Magnuseffekt	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Strömungswiderstand	✓	-
Newton-Axiom	×	Beschreibt nur den Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung, für Antrieb nicht nutzbar.
Resonanz-Absorption	×	Nur zur Energieabsorption geeignet.
Schalldruck	×	Erzielbare Kräfte zu gering.
Dampfdruckkurve	×	Zu aufwändig.

Gasgleichung	×	Zu aufwändig.
Osmotischer Druck	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Biot-Savart-Gesetz	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Elektrokinet. Effekt	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Hysterese	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Rel. Dielektr.-Konstante	×	Reibkraft wirkt stets parallel zur Bewegungsrichtung, Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Einstein-de Haas-Effekt	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Ferro-, Para- und Diamagnetika	×	Erzielbare Kräfte zu gering.
Influenz	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.
Strahlungsdruck	×	Erzielbare Kräfte zu gering, zu aufwändig.

Tabelle A102: Physikalische Effekte der Grundfunktion „Wandeln“ mit den Ausgangsgrößen Weg oder Kraft

A4.2 Prinziplösungen für Sperrelemente

Im Folgenden werden die möglichen Prinziplösungen für Sperrelemente dargestellt und grob bewertet (Tabelle A103bis Tabelle A109). Dabei wird die Bewegung der Sperrelemente im Raum durch ein x,y,z-Koordinatensystem beschrieben (siehe Abbildung A1).

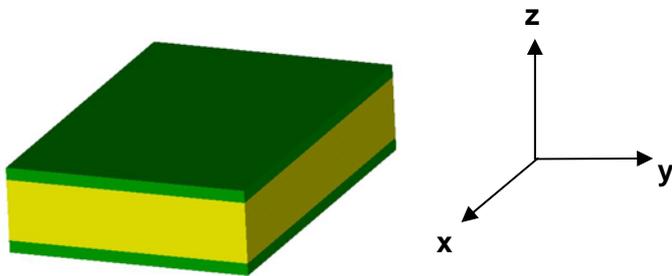
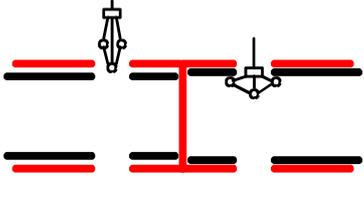
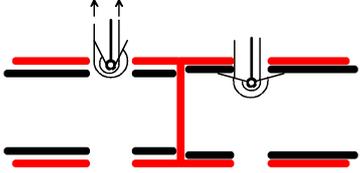
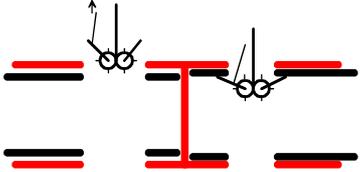
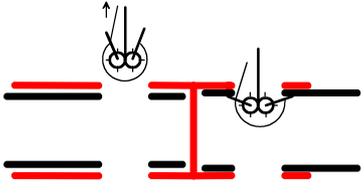
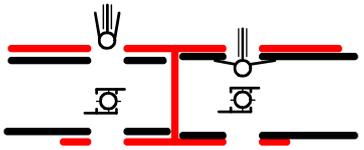
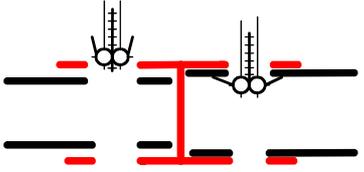
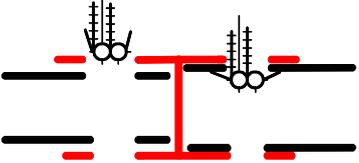
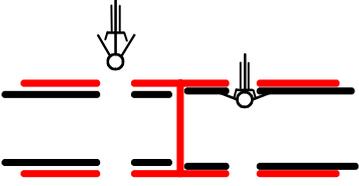
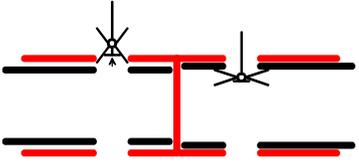
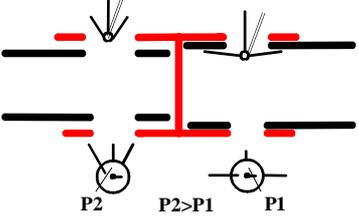
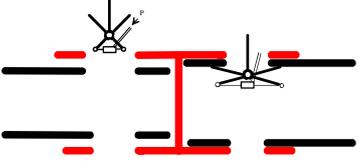
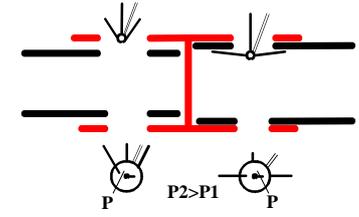


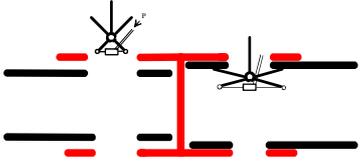
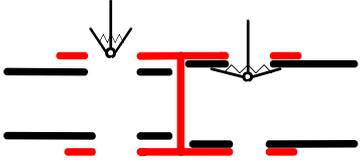
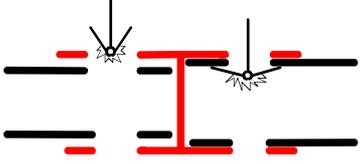
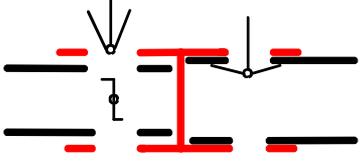
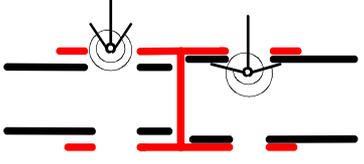
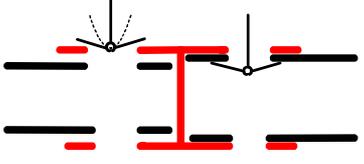
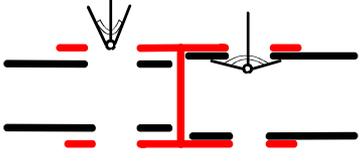
Abbildung A1: x,y,z-Koordinatensystem zur Beschreibung der Sperrelement-Bewegung

Wesentliche Kriterien für die Bewertung der einzelnen Lösungen sind eine einfache und kostengünstige Herstellbarkeit, eine einfache Bedienung sowie das Vermögen, die Sperrkörper mit genügend Kraft in das Kernmaterial hinein auszufahren. Ein weiteres wesentliches Kriterium ist die Verriegelung der Sperrkörper im ausgefahrenen Zustand. Diese ist bei manchen Lösungen von selbst gegeben (z.B. wenn die Sperrkörper-Ausfahrriichtung senkrecht zur Belastungsrichtung des Fügelements (z-Richtung) steht oder die äußeren Kräfte durch symmetrische Anordnung ein Gleichgewicht bilden (siehe z.B. Lösungen Nr. 80 und 33)). Sie kann aber auch durch zusätzliche Maßnahmen erreicht werden, die dann jedoch einfach zu realisieren sein sollten.

A4.2.1 Fall 1: Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y-Achse, Gelenk unten

Nr.	Skizze	Beschreibung	Eignung	Kommentar
Physikalischer Effekt: Hebel				
1		Sperrarme werden über Hebelmechanismus geöffnet.	✓	
2		Sperrarme werden durch Seilzüge geöffnet.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
3		Sperrarm wird per Hebel geöffnet und die Bewegung mittels Zahnrad auf den anderen Arm übertragen.	x	Zu aufwändige Herstellung.
4		Sperrarm wird per Seil geöffnet und die Bewegung mittels Zahnrad auf den anderen Arm übertragen.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
5		Sperrarme werden durch Zahnradgetriebe über Welle im Schaft geöffnet.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung.
6		Sperrarme werden mit einer Zahnstange über Zahnräder gespreizt.	x	Zu aufwändige Herstellung.

7		Sperrarme werden durch einen Zahnriementrieb bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
Physikalischer Effekt: Keil				
8		Sperrarme werden mit Spreizplatte auseinander gedrückt.	✓	
9		Sperrarme werden mit Spreizplatte auseinander gezogen.	✓	
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
10		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering, Dichtungsprobleme.
11		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				
12		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.

13		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Hook				
14		Sperrarme werden durch eine Druckfeder gespreizt.	x	Ungünstige Kraftleitung, Feder muss geführt werden.
15		Sperrarme werden durch eine Zugfeder gespreizt.	✓	
16		Sperrarme bestehen aus elastischem Material und werden verdreht.	x	Drehstabfeder ist zu kurz.
17		Sperrarme werden mittels Spiralfeder gespreizt.	x	Erzielbare Kräfte zu gering, Feder benötigt zu viel Bauraum.
18		Sperrarme bestehen aus einem elastischen Material.	✓	
19		Sperrarme werden durch ein elastisches Federelement gespreizt.	✓	
Physikalischer Effekt: Zentrifugalkraft				

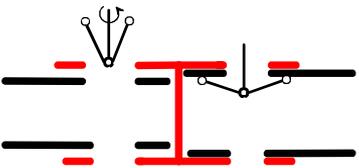
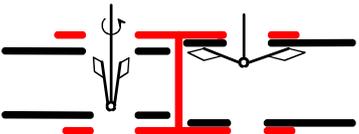
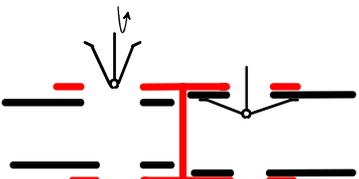
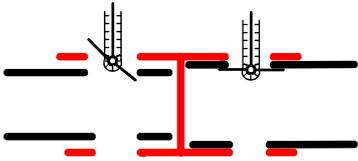
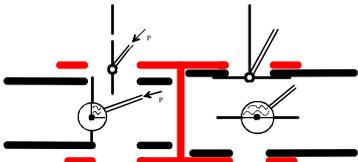
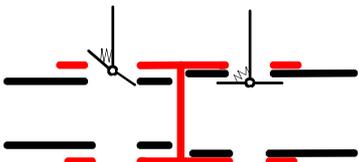
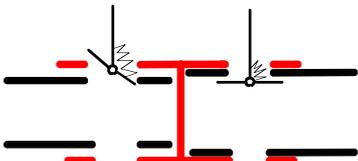
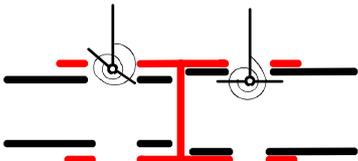
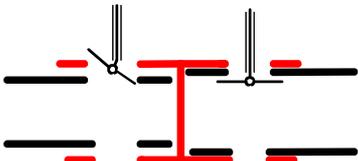
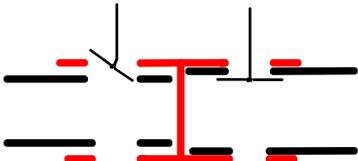
20		Sperrarme werden von der Zentrifugalkraft gespreizt.	✓	
Physikalischer Effekt: Strömungswiderstand				
21		Spreizarme schneiden sich bei Drehung in das Kernmaterial.	✓	
22		Spreizarme schneiden sich beim Herausziehen in das Kernmaterial.	✓	

Tabelle A103: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 1

A4.2.2 Fall 2: Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y-Achse, Gelenk Mitte

Physikalischer Effekt: Hebel				
23		Sperrarm wird über Hebelmechanismus gedreht.	✓	
24		Sperrarm wird durch das Herunterdrücken einer Hülse verdreht.	✓	
25		Sperrarm wird durch Seilzug gedreht.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
26		Sperrarm wird über einen Seilzug gedreht.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
27		Sperrarme werden per Zahnradgetriebe bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung.
28		Sperrarm wird durch eine kleine Gabel gedreht.	x	Zu aufwändige Herstellung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
29		Sperrarme werden mittels Zahnstange gedreht.	x	Zu aufwändige Herstellung.

30		Sperrarme werden durch einen Zahnriemen gedreht.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				
31		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Hook				
32		Sperrarm wird durch eine Druckfeder verdreht.	x	Ungünstige Kraftleitung, Feder muss geführt werden.
33		Sperrarm wird durch eine Zugfeder verdreht.	✓	
34		Sperrarm wird mittels Spiralfeder verdreht.	x	Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering, Feder benötigt zu viel Bauraum.
35		Sperrarm wird durch ein elastisches Federelement verdreht.	x	Zu aufwändig, einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
36		Schaft bestehen aus elastischem Material und wird verdreht.	✓	

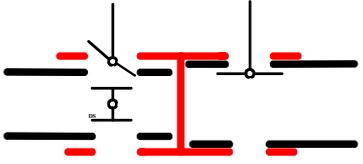
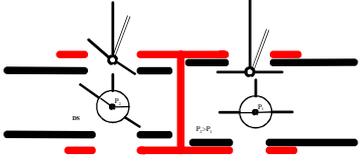
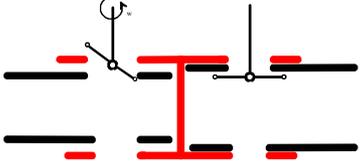
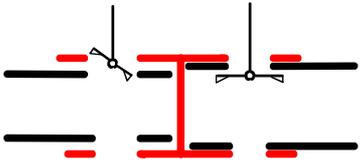
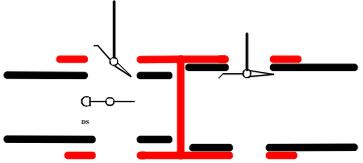
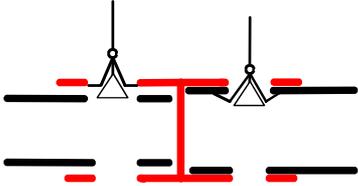
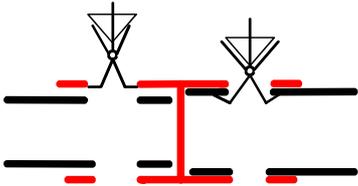
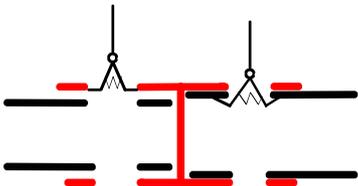
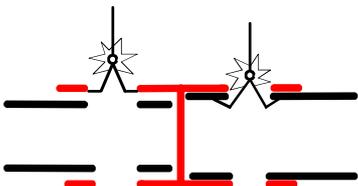
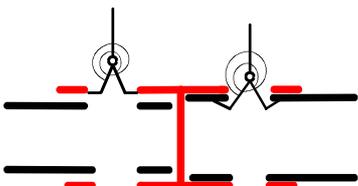
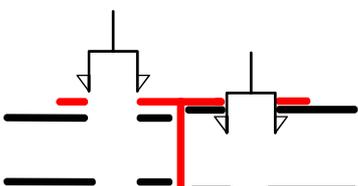
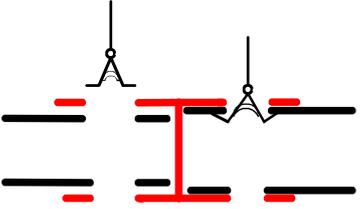
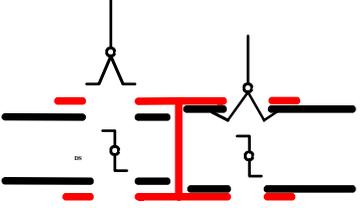
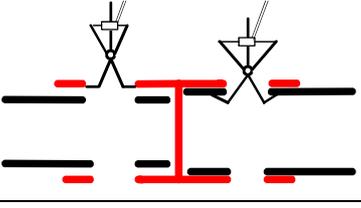
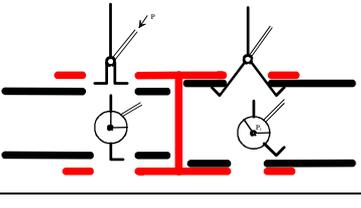
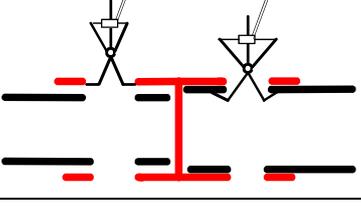
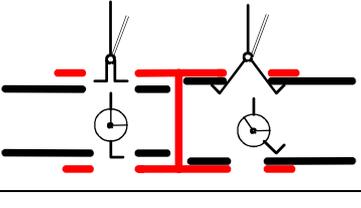
37		Sperrarm wird mittels Drehstabfeder bewegt.	x	Drehstabfeder ist zu kurz.
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
38		Sperrarm wird durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Zentrifugalkraft				
39		Sperrarme werden durch Zentrifugalkraft ausgeklappt.	✓	
Physikalischer Effekt: Strömungswiderstand				
40		Spreizarme schneiden sich bei Drehbewegung in das Kernmaterial.	✓	
41		Beim Herausziehen bietet ein Spreizarm Widerstand, der andere schneidet aufgrund geringen Widerstands durch das Material.	✓	

Tabelle A104: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 2

A4.2.3 Fall 3 Rotation der Sperrkörper um die x- bzw. y-Achse, Gelenk oben

Physikalischer Effekt: Hebel				
42		Sperrarme werden über Hebelmechanismus geöffnet.	✓	
43		Sperrarme werden durch Seilzüge geöffnet.	✗	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering. Arretierung in Sperrposition schwierig.
44		Sperrarm wird per Seil geöffnet und die Bewegung mittels Zahnrad auf den anderen Arm übertragen.	✗	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering. Arretierung in Sperrposition schwierig.
45		Sperrarme werden durch Zahnradgetriebe über Welle im Schaft geöffnet.	x	Zu aufwändige Herstellung.
46		Sperrarme werden mit einer Zahnstange über Zahnräder gespreizt.	x	Zu aufwändige Herstellung.
47		Sperrarme werden durch einen Zahnriementrieb bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering. Arretierung in Sperrposition schwierig.
Physikalischer Effekt: Keil				

48		Sperrarme werden mittels Spreizkeil auseinander gezogen.	✓	
49		Sperrarme werden mittels Spreizkeil auseinander gedrückt.	✓	
Physikalischer Effekt: Hook				
50		Sperrarme werden durch eine kurze Druckfeder gespreizt.	x	Arretierung in Sperrposition schwierig.
51		Sperrarme werden durch eine lange Zugfeder gespreizt.	x	Ungünstige Kraftleitung. Arretierung in Sperrposition schwierig.
52		Sperrarme werden mittels Spiralfeder gespreizt.	x	Feder benötigt zu viel Bauraum, einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering. Arretierung in Sperrposition schwierig.
53		Sperrarme bestehen aus elastischem Material und werden gebogen.	✓	

54		Sperrarme werden durch ein elastisches Federelement gespreizt.	x	Arretierung in Sperrposition schwierig.
55		Sperrarme bestehen aus elastischem Material und werden verdreht.	x	Drehstabfeder ist zu kurz. Arretierung in Sperrposition schwierig.
Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				
56		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Dichtungsprobleme.
57		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
58		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
59		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Zentrifugalkraft				

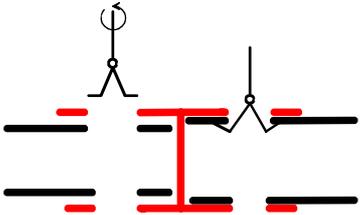
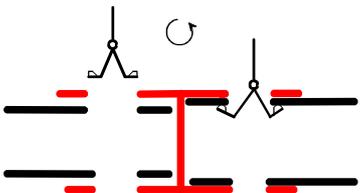
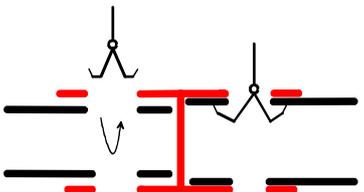
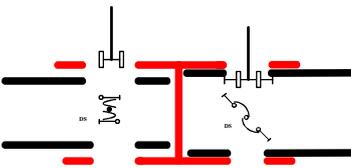
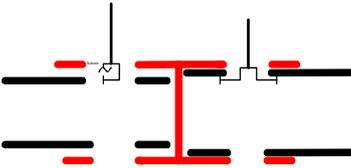
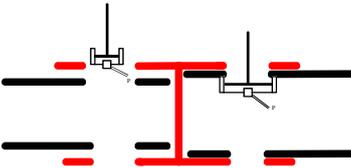
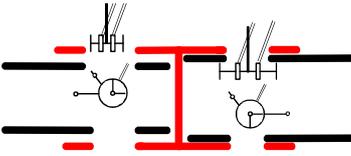
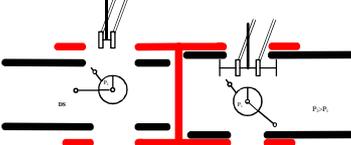
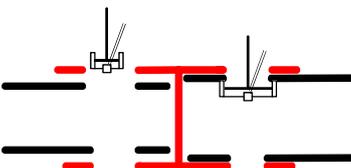
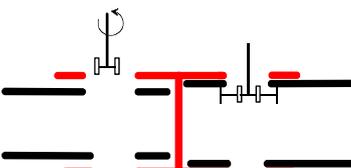
60		Sperrarme werden von der Zentrifugalkraft gespreizt.	x	Arretierung in Sperrposition schwierig.
Physikalischer Effekt: Strömungswiderstand				
61		Spreizarme schneiden sich bei Drehung in das Kernmaterial.	x	Arretierung in Sperrposition schwierig.
62		Spreizarme schneiden sich beim Herausziehen in das Kernmaterial.	x	Arretierung in Sperrposition schwierig.

Tabelle A105: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 3

A4.2.4 Fall 4: Rotation der Sperrkörper um die z-Achse

Physikalischer Effekt: Hebel				
63		Sperrelemente werden über Klauen herausgedreht.	✘	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
64		Sperrarme werden über ein Zahnradgetriebe herausgedreht.	✘	Zu aufwändige Herstellung.
65		Sperrarme werden über eine direkte Ansteuerung ausgeschwenkt.	✓	
Physikalischer Effekt: Hook				
66		Sperrarme werden durch eine Druckfeder gespreizt.	x	Ungünstige Kraftleitung, Feder muss geführt werden.
67		Sperrarme werden durch eine Zugfeder gespreizt.	x	Ungünstige Kraftleitung.
68		Sperrarme werden mittels Spiralfeder gespreizt.	x	Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
69		Sperrarme bestehen aus einem elastischen Material.	✓	

70		Sperrarme werden durch ein elastisches Federelement gespreizt.	✓	
71		Sperrarmaufhängungen bestehen aus einem elastischen Material.	x	Länge der Torsionsfedern zu gering, Aufhängung verformt sich auch im Sperrzustand.
Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				
72		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
73		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung. Einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
74		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Drehzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
75		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Zentrifugalkraft				
76		Sperrarme werden von der Zentrifugalkraft gespreizt.	✓	

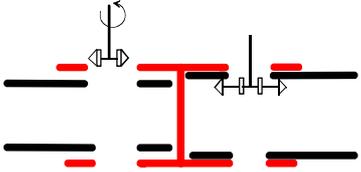
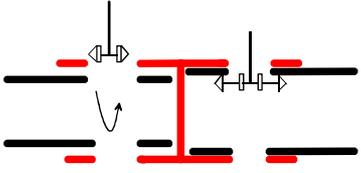
Physikalischer Effekt: Strömungswiderstand				
77		Spreizarme schneiden sich bei Drehung ins Kernmaterial.	✓	
78		Spreizarme schneiden sich beim Herausziehen in das Kernmaterial.	✓	

Tabelle A106: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 4

A4.2.5 Fall 5: Rotation der Sperrkörper um die z-Achse (Langloch)

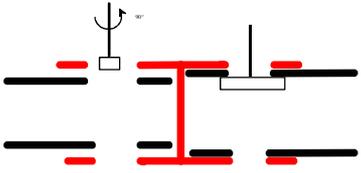
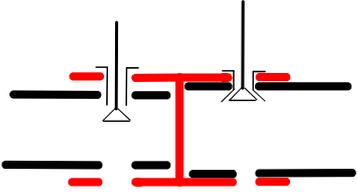
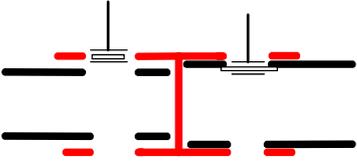
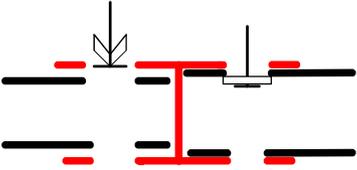
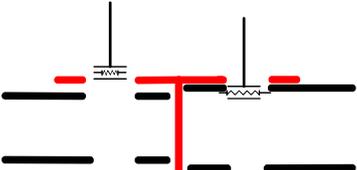
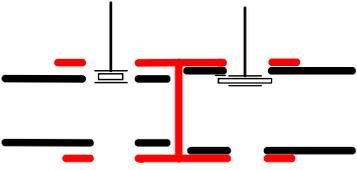
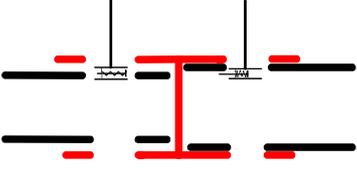
79		Aktivierung durch Drehung des Schaftes.	x	Einbringen der Langlöcher ins Sandwich ist sehr aufwändig.
----	-------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------	---	------------------------------------------------------------

Tabelle A107: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 5

A4.2.6 Fall 6: Translation der Sperrkörper in der x- und y-Ebene

Physikalischer Effekt: Hebeleffekt				
80		Sperrelemente werden über einen Hebelmechanismus auseinander geschoben.	x	Zu aufwändige Herstellung.
81		Sperrelemente werden über einen Hebelmechanismus auseinander geschoben.	x	Zu aufwändige Herstellung.
82		Sperrarme werden durch Seilzüge geöffnet.	x	Zu aufwändig, einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
83		Sperrarme werden durch Zahnradgetriebe über Welle im Schaft geöffnet.	x	Zu aufwändige Herstellung und Bedienung.
Physikalischer Effekt: Keileffekt				
84		Keilförmige Sperrelemente werden auseinander gedrückt.	✓	
85		Keil drückt Sperrelemente auseinander.	✓	
86		Keil drückt Sperrelemente auseinander.	✓	

87		Hülse wird am Ende durch einen Keil aufgeweitet.	✓	
Physikalischer Effekt: Querkontraktion				
88		Elastisches Material wird auseinander gedrückt.	✓	
Physikalischer Effekt: Schub				
89		Sperrelemente werden durch Schubkraft verformt.	✓	
Physikalischer Effekt: Hook				
90		Sperrelemente werden durch die Kraft einer Feder auseinander gedrückt.	✓	
91		Sperrelement besteht aus elastischem Material, das bei der Montage gestaucht wird.	x	Federweg ist zu kurz, einleitbare Kräfte zur Verdrängung des Kernmaterials zu gering.
92		Zugfeder fährt Sperrelement aus.	✓	
Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				

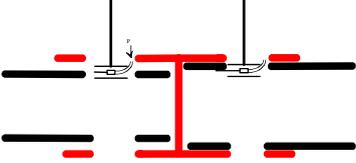
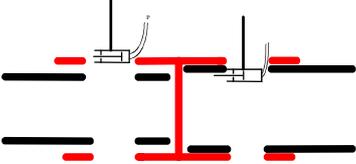
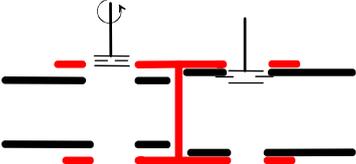
93		Sperrarme werden durch hydraulische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
94		Sperrarme werden durch pneumatische Druckbeaufschlagung im Druckzylinder bewegt.	x	Zu aufwändige Herstellung, Dichtungsprobleme.
Physikalischer Effekt: Zentrifugalkraft				
95		Sperrarme werden durch die Zentrifugalkraft ausgefahren.	✓	

Tabelle A108: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 6

A4.2.7 Fall 7: Sonderfälle (Bewegungsrichtung der Sperrkörper nicht eindeutig bestimmbar)

Physikalischer Effekt: Fluid-Effekt				
96		Schaft wird durch hydraulische Druckbeaufschlagung aufgeweitet.	✓	
Physikalischer Effekt: Boyle-Mariotte				
97		Schaft wird durch pneumatische Druckbeaufschlagung aufgeweitet.	x	Erzielbare Drücke bei Pneumatik zu gering, sonst sehr großer Aufwand.
Physikalischer Effekt: Örtlich begrenzter chemischer Effekt				
98		Schaft wird durch Druck, ausgelöst durch eine chemische Reaktion, aufgeweitet.	✓	

Tabelle A109: Prinziplösungen für Sperrkörper mit Grobbewertung, Fall 7

A5 Nutzwertanalyse der besten Sandwichverbindungen

Im Folgenden wird für die 83 Sandwichverbindungen, die in der Grobbewertung aus Kapitel 3.4 als sinnvoll bewertet wurden, eine Nutzwertanalyse durchgeführt (siehe Tabelle A110).

Lösung Nr.	Bezeichnung	Gewichtung												Gesamtpunktzahl	Rang	Lösung
		0,275	0,022	0,11	0,088	0,055	0,16	0,01	0,01	0,01	0,01	0,125	0,125			
		Hohe übertragbare Kräfte und Momente (1)	Eindeutige und kurze Kraftleitungswege (2)	Großflächige Fügestellen zw. Sandwich und VE (3)	Keine Steifigkeitssprünge (4)	Optisch unauffällig (5)	Geringer Aufwand zur Vorbereitung des Sandwichs (6)	Geringe Komplexität der Verbindungselemente (7)	Geringe Anzahl an Einzelelementen (8)	Geringe Komplexität der Fügeelemente (9)	Geringe Dichte an Fügeelementen (10)	Einfacher Fügevorgang (11)	Positionierung der zu verbindenden Sandwichs zueinander ist einfach und präzise (12)			
1	G2_07_4	6	10	8	7	9	0	0	10	10	6	5	10	5,996	78	1
2	G2_10_3	8	7	7	8	6	9	3	10	9	2	9	10	8,213	3	2
3	G2_10_4	7	7	6	8	7	9	3	10	6	2	7	10	7,603	19	3
4	G2_10_5	8	7	7	8	5	5	3	10	9	2	7	10	7,268	42	4
5	G2_10_6	7	7	7	8	5	5	3	10	6	2	6	10	6,838	56	5
6	G2_21_1	6	7	2	8	6	9	3	10	9	2	8	10	6,988	50	6
7	G2_21_2	6	7	2	8	6	10	3	10	9	2	3	10	6,523	67	7
8	G2_21_3	8	7	7	8	4	7	3	10	2	2	3	10	6,963	51	8
9	G2_21_5	8	7	7	8	8	7	0	10	0	2	7	10	7,633	13	9
10	G2_21_7	8	7	7	8	6	7	3	10	0	2	0	10	6,678	64	10
11	G2_21_11	8	7	7	8	4	7	0	10	2	2	3	10	6,933	53	11
12	G2_21_12	8	7	7	8	8	7	0	10	0	2	7	10	7,633	13	12
13	G2_24_1	5	7	7	8	0	7	3	10	0	0	4	10	6,003	77	13
14	G2_25_1	8	7	7	8	6	5	3	10	2	4	4	10	6,898	55	14
15	G2_25_2	8	7	7	8	6	8	3	10	2	2	4	10	7,358	35	15

16	G2_25_3	8	7	7	8	6	8	3	10	0	2	6	10	7,588	22	16
17	G2_25_4	8	7	7	8	4	5	3	10	2	4	4	10	6,788	57	17
18	G2_25_5	8	7	7	8	4	8	3	10	2	2	4	10	7,248	43	18
19	G2_25_6	8	7	7	8	4	8	3	10	0	2	6	10	7,478	29	19
20	D10_01_2	5	7	0	10	9	5	0	10	9	1	10	10	6,404	71	20
21	D10_03_1	7	10	6	8	8	5	1	10	10	2	10	10	7,479	28	21
22	D10_06_3	6	10	6	10	8	5	0	10	10	2	10	10	7,37	34	22
23	D10_07_7	8	10	9	10	9	0	0	10	9	7	5	10	6,92	54	23
24	D10_10_3	9	10	8	10	6	4	1	10	9	3	9	10	8,03	6	24
25	D10_10_4	8	10	8	10	7	4	1	10	6	3	7	10	7,53	26	25
26	D10_10_5	9	10	8	10	5	3	1	10	9	3	7	10	7,565	23	26
27	D10_10_6	8	10	8	10	5	3	1	10	6	3	6	10	7,135	48	27
28	D10_21_1	10	10	9	10	6	4	0	10	9	5	9	10	8,425	1	28
29	D10_21_12	9	10	9	7	6	4	0	10	9	5	9	10	7,886	9	29
30	D10_21_13	10	10	8	10	6	3	0	10	4	5	5	10	7,605	16	30
31	D10_21_14	10	10	8	10	6	3	0	10	4	5	5	10	7,605	16	31
32	D10_21_15	10	10	8	10	6	3	0	10	4	5	5	10	7,605	16	32
33	D10_21_16	10	10	8	10	4	3	0	10	2	4	6	10	7,59	21	33
34	D10_21_19	10	10	9	10	6	3	0	10	9	5	9	10	8,265	2	34
35	D10_24_12	5	10	5	10	6	4	1	10	2	1	4	10	5,885	79	35
36	D10_24_37	7	10	10	5	10	5	0	5	10	10	10	10	7,785	10	36
37	D10_24_38	7	10	10	5	6	5	0	5	10	10	10	10	7,565	24	37
38	D10_24_42	9	10	9	5	10	5	0	5	10	10	9	10	8,1	5	38
39	D10_24_43	9	10	9	5	10	5	0	5	10	10	5	10	7,6	20	39
40	D1_10_3	9	10	8	10	6	4	3	8	9	3	9	8	7,78	11	40
41	D1_10_4	8	10	8	10	7	4	3	8	6	3	7	8	7,28	41	41
42	D1_21_1	10	10	9	10	6	4	0	8	9	5	9	8	8,155	4	42
43	D1_21_10	9	10	9	7	6	4	0	8	9	5	9	8	7,616	15	43
44	D1_21_13	9	10	9	6	6	5	0	8	9	7	9	8	7,708	12	44
45	D1_21_17	10	10	9	6	6	5	0	8	9	7	9	8	7,983	8	45
46	D1_21_20	10	10	8	10	6	3	0	8	4	5	5	8	7,335	38	46
47	D1_21_22	10	10	8	10	6	3	0	8	4	5	5	8	7,335	38	47
48	D1_21_24	10	10	8	10	6	3	0	8	4	5	5	8	7,335	38	48
49	D1_21_26	10	10	9	10	4	3	0	8	4	5	6	8	7,46	30	49
50	D1_21_27	10	10	9	6	4	3	0	8	4	7	9	8	7,503	27	50
51	D1_21_32	10	10	9	10	6	3	0	8	9	5	9	8	7,995	7	51
52	A1_10_3	8	7	6	8	6	9	3	9	9	2	9	3	7,218	45	52
53	A1_10_4	7	7	6	8	7	9	3	9	6	2	7	3	6,718	63	53
54	A1_21_4	6	7	2	8	6	9	3	9	9	2	8	3	6,103	76	54
55	A1_21_5	6	7	2	8	6	10	3	9	9	2	3	3	5,638	82	55
56	A1_21_8	8	7	7	8	8	7	0	9	0	2	7	3	6,748	58	56
57	A1_25_2	8	7	6	8	6	8	3	9	2	2	4	3	6,363	72	57
58	A1_25_3	8	7	6	8	6	8	3	9	0	2	4	3	6,343	73	58
59	A1_25_6	8	7	6	8	4	8	3	9	0	2	4	3	6,233	74	59
60	C11_07_4	6	10	8	8	9	0	0	10	9	6	5	8	5,824	80	60
61	C11_10_3	8	7	6	8	6	4	3	10	9	2	9	8	7,053	49	61
62	C11_10_4	7	7	6	8	7	4	3	10	6	2	7	8	6,553	66	62
63	C11_10_5	8	7	6	8	6	3	3	10	9	2	7	8	6,643	65	63

64	C11_10_6	7	7	6	8	6	3	3	10	6	2	6	8	6,213	75	64
65	C11_21_1	8	7	7	8	6	4	0	10	9	4	9	8	7,153	47	65
66	C11_21_15	8	7	7	8	6	3	0	10	4	2	5	8	6,423	68	66
67	C11_21_16	8	7	7	8	6	3	0	10	4	2	5	8	6,423	68	67
68	C11_21_17	8	7	7	8	6	3	0	10	4	2	5	8	6,423	68	68
69	F7_10_3	8	7	8	8	6	4	3	6	9	3	9	8	7,243	44	69
70	F7_10_4	7	7	8	8	7	4	3	6	6	3	7	8	6,743	59	70
71	F7_21_1	9	7	9	8	5	4	0	6	9	5	9	8	7,563	25	71
72	F7_21_12	8	7	9	7	5	4	0	6	9	5	9	8	7,2	46	72
73	F7_21_13	9	7	8	8	5	3	0	6	4	5	5	8	6,743	59	73
74	F7_21_14	9	7	8	8	5	3	0	6	4	5	5	8	6,743	59	74
75	F7_21_15	9	7	8	8	5	3	0	6	4	5	5	8	6,743	59	75
76	F7_21_16	9	7	9	8	5	3	0	6	4	5	9	8	7,353	36	76
77	F7_21_17	9	7	9	8	5	3	0	6	4	5	9	8	7,353	36	77
78	B3_01_2	3	7	0	9	9	6	0	6	9	0	10	9	5,751	81	78
79	B3_10_3	8	7	8	9	6	4	3	6	9	2	9	9	7,446	31	79
80	B3_10_4	7	7	8	9	7	4	3	6	6	2	7	9	6,946	52	80
81	B3_21_1	9	7	9	9	6	3	0	6	9	4	7	9	7,411	32	81
82	C1_07_7	2	7	5	10	10	0	0	7	9	6	0	5	3,529	83	82
83	C1_21_1	9	10	9	10	6	5	0	7	9	4	7	5	7,395	33	83

Tabelle A110: Nutzwertanalyse der besten Sandwichverbindungen

Lebenslauf – Alexander Kempf

12.10.1972	geboren in Stuttgart
1979-1983	Martin-Luther-Grundschule Stuttgart
1983-1992	Gottlieb-Daimler-Gymnasium Stuttgart
1992-1993	Caritasverband für Stuttgart e.V.
1993-1995	Maschinenbaustudium an der Universität Stuttgart, Vordiplom
1995-1998	Maschinenbaustudium an der Universität Kaiserslautern, Diplom
10/98 – 07/04	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Allgemeine Konstruktions- technik des Maschinenbaus der RWTH Aachen
seit 09/04	Mitarbeiter der MAN Nutzfahrzeuge AG München
02.12.2004	Promotion