

Simulationsgestützte konstruktive Gestaltung von Funktionselementen

Martin-Christoph Wanner, Thomas Nehls

Der Einsatz von Funktionselementen in der Fertigung und Montage erhält einen immer größeren Stellenwert, da diese Elemente eine große Flexibilität im Vergleich zu konventionellen Fügeverfahren aufweisen.

Innovative Blindnietmutter-Schraub-Systeme sind als neue Füge-technologie in der Lage, die Prozesszeiten bei der Herstellung einer Blindnietmutterverbindung erheblich zu reduzieren.

Um die Funktion und die technologischen Eigenschaften dieses Funktionselements zu realisieren, muss die konstruktive Gestaltung einen iterativen Prozess durchlaufen, der zu auf die Fügeaufgabe optimierten Geometrien führt.

Mechanische Fügeverbindungen sind heutzutage aus keiner Fertigung- und Montagelinie im Automobil-, Karosserie-, Waggon- und Flugzeugbau wegzudenken. Das Anwendungsgebiet der mechanischen Füge-technik ist dabei sehr vielfältig.

In der Dünnpblech verarbeitenden Industrie sind Blindnietmutter neben der herkömmlichen Schraubverbindung, selbstschneidenden Schrauben und Blindnieten das am häufigsten verwendete Fügeelement. Blindnietmutter eignen sich sehr gut, um in ein zur Schraubenlänge verhältnismäßig

dünnes Blech ein tragendes Gewinde einzubringen. Diese Fertigungsoperation erfolgt im Gegensatz zum konventionellen Verschrauben bei einseitiger Zugänglichkeit und bietet somit Vorteile im Montageprozess.

Durch die aktuellen Anforderungen in der Fertigungstechnik besteht ein großer Informationsbedarf an spezifischen Eigenschaften mechanisch gefügter Verbindungen. Ein

wesentlicher Schwerpunkt der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeit, ist die Beschreibung und Bewertung der mechanisch gefügten Verbindungen hinsichtlich ihrer Tragverhaltenseigenschaften wie zum Beispiel in /2/ oder /4/. Diese Informationen sind

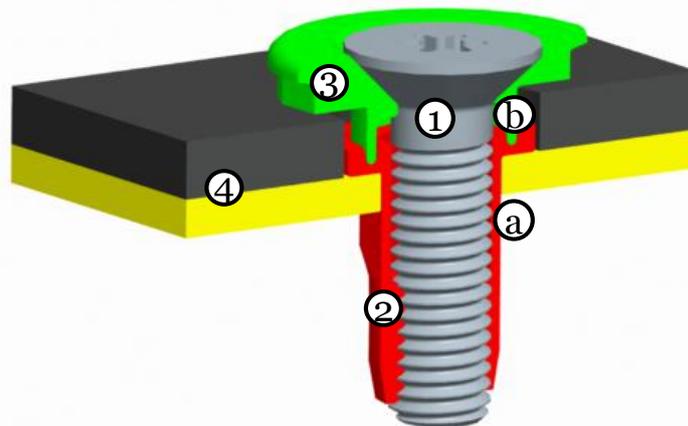


Abb. 1: innovatives Fügeelement Blindnietmutter-Schraub-System; 1-Schraube; 2-Blindnietmutter; 3-Scheibe; 4-Bauteile; a-Faltzone 1; b-Faltzone 2

eine wichtige Eingangsgröße für die Dimensionierung solcher Verbindungen sowie übergeordneter Konstruktionen.

Vorgehensweise

Bei der Neuentwicklung eines Funktionselements sind keine Eigenschaften dieses Elements, wie zum Beispiel das Umformverhalten oder eine typische Prozesskurve, bekannt. Lediglich der Vergleich

mit ähnlichen Fügeoperationen kann erste Anhaltspunkte liefern. Daher verläuft ein Entwicklungsprozess bei der Produktentwicklung stets iterativ, um mit einfachen Variationen des Systems, das zunächst nahe an ähnlichen Funktionselementen ist, ein

optimiertes Ergebnis zu erzielen. Problematisch ist diese Vorgehensweise bei einer rein experimentellen Entwicklung des Funktionselements, da es dabei dazu kommen kann, dass der Iterationsprozess in eine falsche Richtung läuft und sehr viel Zeit und Kapital in die Prototypenfertigung investiert

werden muss, bevor die Fehlentwicklung erkannt wird. Um die Iterationsschritte zu minimieren kann auf das Werkzeug der numerischen Simulation zurückgegriffen werden. Dabei können die Auswirkungen von Geometrieänderungen nach einer numerischen Berechnung direkt mit den Ergebnissen des vorherigen Iterationsschritts verglichen werden. Erst nach zufriedenstellenden

Ergebnissen müssen Prototypen gefertigt werden, deren Eigenschaften experimentell untersucht werden können. Diese Ergebnisse sollten einem Abgleich mit ähnlichen Funktionselementen unterzogen werden um sicherzustellen, dass das zu entwickelnde Funktionselement mindestens gleiche Eigenschaften besitzt und eine Neuentwicklung sinnvoll ist.

Wird eine konventionelle Blindnietmutter (BNM) mit dem neuen Blindnietmutter-Schraub-System (BMS) verglichen, müssen das Umformverhalten und resultierende Verbindungseigenschaften in der numerischen Simulation untersucht werden. Hierbei werden mittels vereinfachenden Annahmen die realen Gegebenheiten der Verbindung nachempfunden. Auf experimenteller Seite müssen alle relevanten Eigenschaften, wie zum Beispiel resultierende Klemmkräfte oder maximal ertragbare Scherzugkräfte ermittelt werden. Weiterhin müssen Werkstoff- und Reibungsparameter als Eingangsgrößen für die Simulation bestimmt werden.

Betrachtungsgegenstand

Für die Herstellung einer Verbindung mittels konventioneller BNM sind sechs Arbeitsschritte nötig und mehrere Werkzeuge müssen eingesetzt werden. Der Grundgedanke des BMS-Systems liegt darin, dass die Verbindung in drei Schritten unter Verwendung eines einzigen Werkzeugs her-

gestellt werden kann. Bei einer vergleichenden Betrachtung des Setzprozesses einer konventionellen BNM mit dem des BMS-Systems sind trotz der ähnlichen Fügetechnologie signifikante Unterschiede festzustellen. Die einzelnen Verarbeitungsstufen der konventionellen BNM und des BMS-Systems sind in Abbildung 2 gegenübergestellt. Weiterhin würde das BMS-System das Setzen und Verspannen der Bauteile in einem Arbeitsgang ermöglichen. Des Weiteren wäre für das Herstellen einer Verbindung kein Spezialwerkzeug nötig. Lediglich ein Aufsatz für ein handelsübliches Ver-

schraubungswerkzeug, wie z.B. ein Akku- oder Pneumatikschrauber, wird benötigt. Nach der Positionierung der Bauteile, deren Bohrungen konzentrisch ausgerichtet werden, kann das BMS-System eingeführt werden. Anschließend wird das Verarbeitungswerkzeug angesetzt und ein Drehmoment auf die Schraube aufgebracht. Durch die Rotation der Schraube wird zunächst die Blindnietmutter umgeformt. Diese verklemt sich auf dem unteren Bauteil und realisiert eine feste Verbindung. Nach der vollständigen Umformung der Blindnietmutter wird ein weiterer Umformbereich des

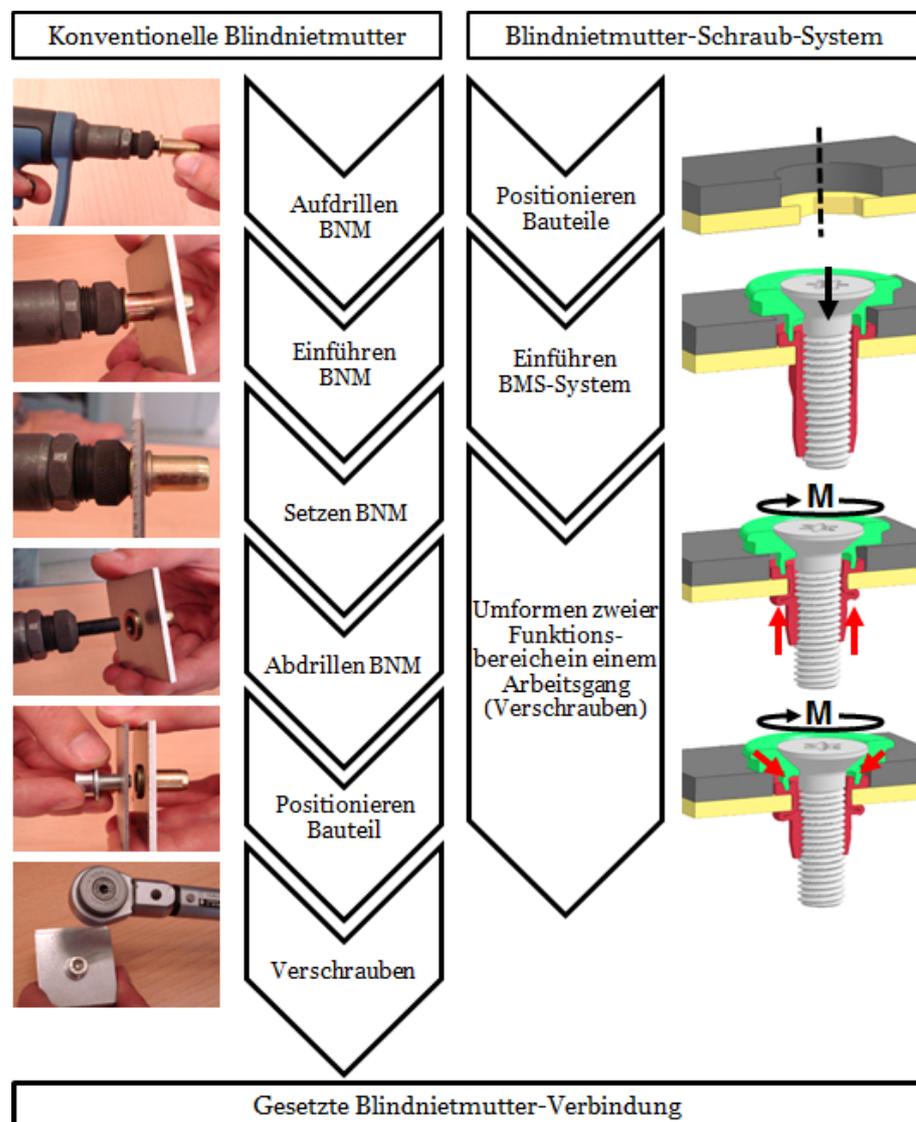


Abb. 2: Vergleich der Verarbeitungsstufen BNM vs. BMS-System

BMS-Systems, der sich zwischen der Scheibe und der modifizierten BNM befindet, durch die Einwirkung des Drehmoments umgeformt. Durch diese Verformung wird die Scheibe auf das zweite Bauteil gepresst, zwischen den Bauteilen wird eine Klemmkraft erzeugt. Schematisch ist dieser Vorgang ebenfalls in der Abbildung 2 dargestellt.

Zielstellung

Als Zielstellung des abgeschlossenen Forschungsvorhabens /1/ stand die simulationsgestützte konstruktive Gestaltung des BMS-Systems unter vergleichender Betrachtung einer konventionellen BNM.

Dabei sollte die Geometrie des Funktionselements BMS, die als Grobentwurf vorgegeben war, optimiert und das Umformverhalten in bestimmten Geometriebereichen untersucht werden. Spezifische Tragverhaltenseigenschaften und das Umformverhalten konventioneller BNM wurden als Zielkriterien herangezogen.

Numerische vs. experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen einer numerischen Simulation ist es unabdingbar die gewonnenen Ergebnisse mit realen Ergebnissen aus Experimenten abzugleichen, um die Plausibilität der Daten zu überprüfen und die getroffenen Annahmen zu verifizieren. Weiterhin müssen diverse Randbedingungen bei der Modellerstellung beachtet werden, da es sich bei einer Simulation immer um eine vereinfachte Abbildung der realen Gegebenheiten handelt. Hier-

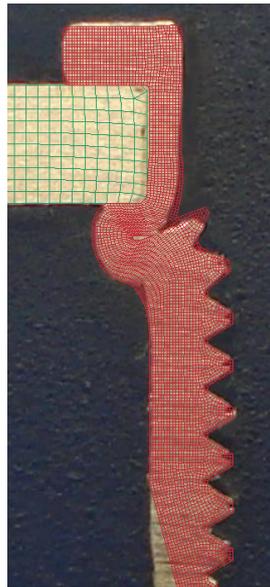


Abb. 3: Ergebnis der zweidimensionalen BNM-Simulation

zu zählen unter anderem Lagerungs-, Belastungs- und Werkstoffrandbedingungen sowie die Wahl der Finiten Elemente bei der Vernetzung des Simulationsmodells und die Realisierung von Kontakten zwischen den einzelnen Komponenten des Modells. Im Rahmen des Forschungsvorhabens /1/ wurde das FEM-Programm LS-DYNA® von LSTC verwendet. LS-

DYNA® ist ein explizites FEM-Programm, das zur Simulation dynamischer Umformvorgänge geeignet ist. Die Integration der Bewegungsgleichung und somit die Lösung der Umformsimulation wird über ein zentrales Differenzen-Schema realisiert, für dessen Berechnung lediglich bekannte Werte des vorherigen Integrations-schritts benötigt werden. /5/ Um das Umformverhalten des BMS-Systems in /1/ zu simulieren, wurde zunächst das angesetzte Werkstoffmodell mit Hilfe einer Simulation von konventionellen BNM in verschiedenen Setzstufen verifiziert. Der Abgleich der Simulationsdaten mit Schlibbildern von gesetzten Blindnietmuttern konnte - trotz der vereinfachten zweidimensionalen Simulation - übereinstimmende Ergebnisse liefern (siehe Abbildung 3).

LS-DYNA® stellt für Simulation der plastischen Verformung einen vielseitigen Materialkatalog zur Verfügung. Für diese Untersuchungen wurde das Materialmodell MAT_PIECEWISE_LINEAR_

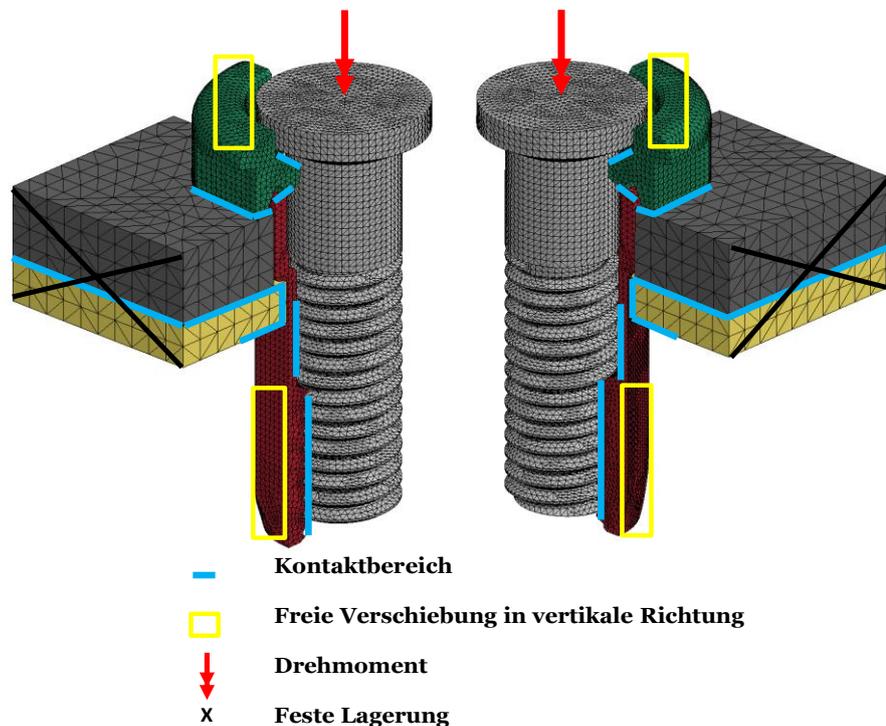


Abb. 4: dreidimensionales Viertelmodell des Geometricansatzes mit Randbedingungen

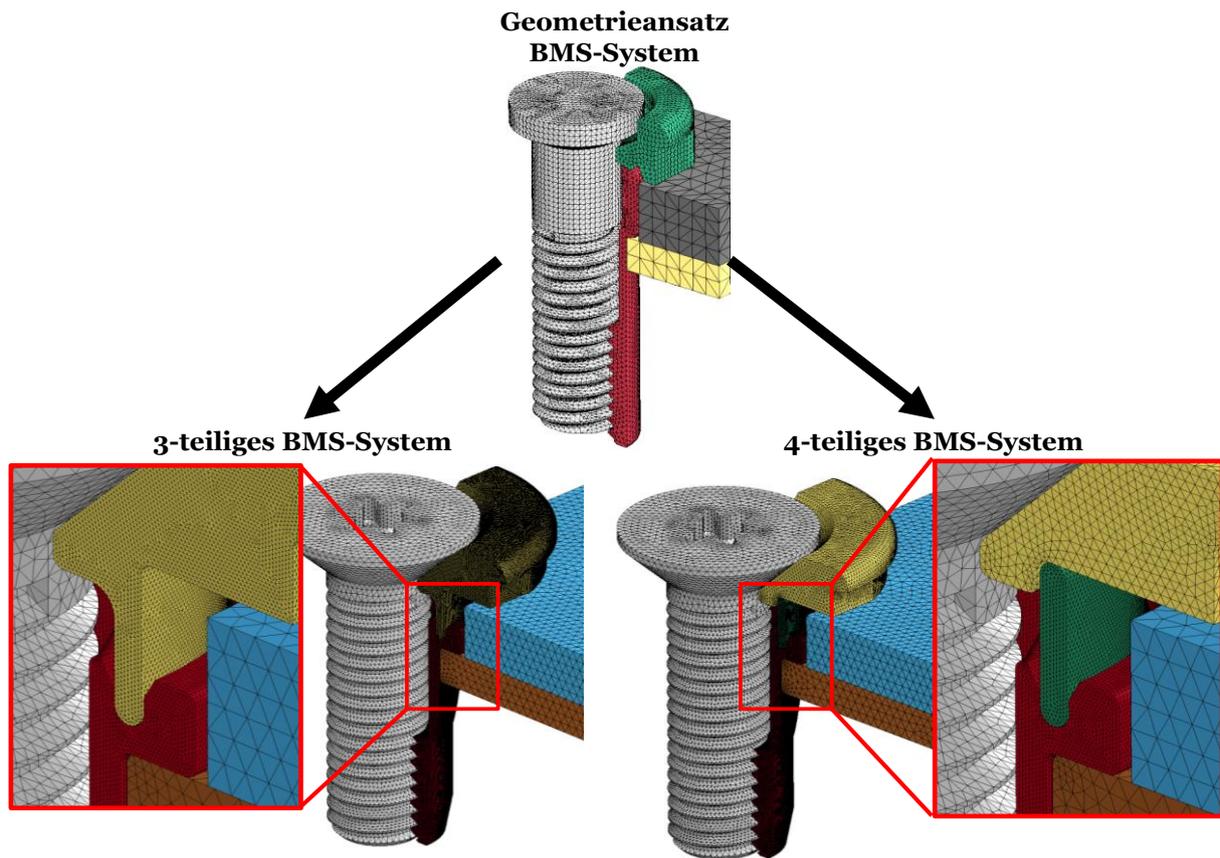


Abb. 5: Geometrievarianten des BMS-Systems

PLASTICITY (Mat 024) gewählt und durch eine Fließkurve des BNM-Werkstoffs ergänzt. Weiterhin wurde diese mit einer Dehnratenabhängigkeit nach Cowper und Symonds belegt. Dadurch wird die Fließspannung in Abhängigkeit von der Dehnratenrate mit einem Faktor multipliziert und an die Umformgeschwindigkeit angepasst. Die angenommenen Konstanten wurden einer Arbeit /6/ von Hu und Zhao entnommen. In dieser Arbeit sind ebenfalls die Grundlagen erläutert. Für weiterführende Informationen sei hier auf /7/ und /8/ verwiesen, in denen die Implementierung in das FEM-Programm erläutert und die Grundlage für die Annahme der Dehnratenabhängigkeit geklärt wird.

Nach der Verifizierung des Werkstoffmodells wurden dreidimensionale Viertelmodelle des BMS-Systems erstellt (Abbildung 4), um das Umformverhalten des Ver-

bindungselements numerisch in einer vertretbaren Simulationszeit zu untersuchen. Die gewonnenen Ergebnisse wurden zunächst auf die Plausibilität des Umformverhaltens untersucht. Da die Umformung der modifizierten BNM der einer konventionellen BNM entsprach, wurden Prototypen gefertigt und experimentell untersucht. Diese

Experimente zeigten, dass die Reibung zwischen der Scheibe und der BNM zu gering war, um ein Mitdrehen der BNM zu verhindern. Weiterhin konnte die Kraft, die zur Umformung der zweiten Faltzone benötigt wurde, nicht aufgebracht werden, ohne die Schraube zu überlasten. Daher wurde der geometrische Aufbau des BMS-Systems

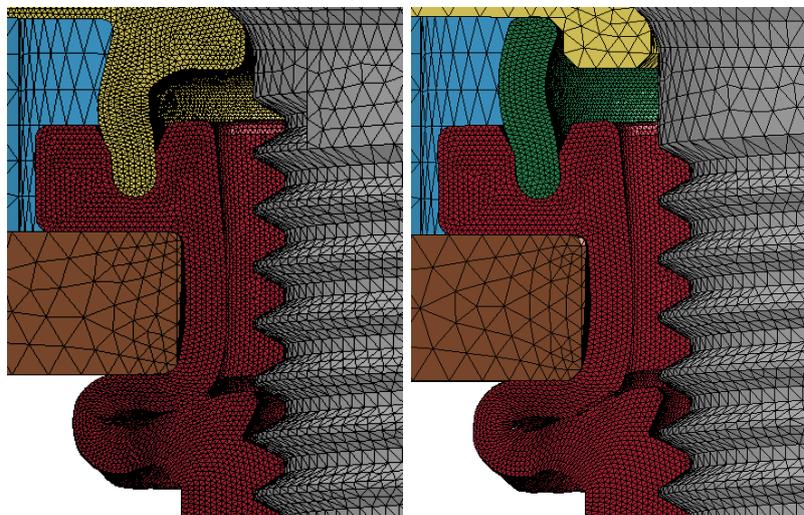


Abb. 6: Faltzonen der Geometrievarianten nach dem Simulationende

überarbeitet. Die BNM mit rundem Schaft wurde durch eine BNM mit Sechskantgeometrie ersetzt, um ein Mitdrehen im Setzprozess zu verhindern. Des Weiteren wurde die zweite Faltzone aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten überarbeitet. Diese wurde von der BNM getrennt und in einer Variante in die Scheibe integriert. Die zweite Variante, die untersucht wurde, hatte eine separate zweite Faltzone, die als weiteres Bauteil in Form einer Hülse eingeführt wurde. Die vorgenommenen geometrischen Variationen sind in Abbildung 5 gegenübergestellt.

Für die Berechnung der Modelle wurden die entsprechenden Randbedingungen angesetzt, die in experimentellen Betrachtungen ermittelt und auch bei dem ersten Ansatz angewendet wurden (Abbildung 4). Die Ergebnisse der Simulation des dreiteiligen und vierteiligen BMS-Systems konnte ein plausibles Umformverhalten aufzeigen. Dabei formte sich die erste Faltzone - der mittlere Bereich der BNM - aufgrund der gleichen Geometrie bei beiden Modellen identisch um. Unterschiede waren lediglich im Bereich der zweiten Faltzone feststellbar. Durch die verschiedenen Lagerungsbedingungen dieser Faltzone, war ein differenziertes Verformungsbild erkennbar. Während sich die zweite Faltzone des dreiteiligen

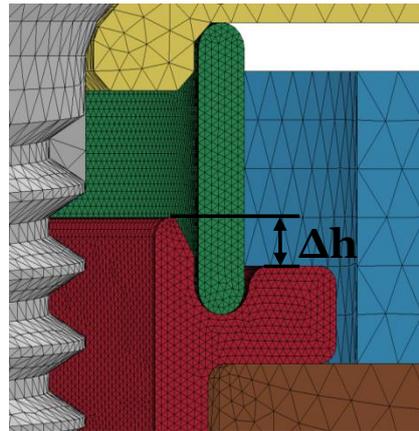


Abb. 8: Geometrievariation der BNM des BMS-Systems

BMS-Systems nur in einem kleinen Bereich verformen kann, ist es beim vierteiligen BMS-System möglich fast die gesamte Länge der Hülse, die diese Faltzone repräsentiert, als Knicklänge auszunutzen. Die umgeformten Bereiche der beiden Systeme können der Abbildung 6 entnommen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Veränderung der BNM-Geometrie und die Separierung der zweiten Faltzone die Umsetzung der Idee des BMS-Systems ermöglichen können.

Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wurden die Simulationsmodelle um weitere Bauteile ergänzt und der Fügeprozess erneut simuliert. Dabei wurden die Modelle an experimentelle Proben, die mit Prototypen der BMS-Systeme gefügt waren, angepasst. Hierzu mussten die Modellgeometrie und Lagerungsrandbedingungen im

Vergleich zu den Ausgangsmodellen (Abbildung 5 unten) modifiziert werden. Auch hier wurden Ergebnisse erzielt, die eine Übereinstimmung mit dem realen Umformverhalten der BMS-Systeme zeigen, wie es aus Abbildung 7 hervorgeht. Sowohl die Verformung der BNM als auch das Verhalten der Bauteile wurde durch die Simulationsmodelle abgebildet. Weiterhin veranschaulicht Abbildung 7 das Verbindungsprinzip des BMS-Systems, das sich durch die sequentielle Umformung zweier Bereiche des Systems - den Faltzonen - fest mit einem Bauteil verspannt und anschließend die weiteren Bauteile zusammenpresst und eine Klemmkraft zwischen diesen erzeugt.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus Abbildung 6 und Abbildung 7 werden die unterschiedlich angesetzten Lagerungsrandbedingungen ersichtlich. Durch die größere Anzahl an Freiheitsgraden ist es möglich, den realen Setzprozess nachzuempfinden. Die genaue Analyse der Simulationsergebnisse und der Schlibilder hat auch weiteres Entwicklungspotential aufgezeigt. Dabei sollten die Lagerungsbedingungen der zweiten Faltzone modifiziert werden, um eine vereinfachte Umformung zu ermöglichen. Die Veränderung der Lagerung wurde durch die Reduzierung der Höhe des Außenbereichs des BNM-Kopfes

realisiert (Abbildung 8). Das führte zu einer Erhöhung der Freiheitsgrade der unteren Lagerungsstelle der zweiten Faltzone und somit zu einer erleichterten Verformung. Die Simulationsergebnisse mit dieser Veränderung ergaben eine Reduktion der Umformgrade in dieser Faltzone um bis zu 23 Prozent.



Abb. 7: Vergleich der Simulationsergebnisse mit einem Schlibbild des BMS-Systems

Reibung im Setzprozess des BMS-Systems

Ein weiterer wichtiger Aspekt einer Umformsimulation mit Komponenten die sich relativ zu einander bewegen, ist die Betrachtung der Reibung. Dieser physikalische Wert hat einen großen Einfluss auf den Setzprozess sowohl im Experiment als auch in der numerischen Simulation. Für die Untersuchungen in /1/ wurde ein Prüfstand nach DIN EN ISO 16047 /3/ entwickelt, der in der Lage ist die Messgrößen zu erfassen, die für eine Berechnung der Reibbeiwerte benötigt werden. Untersuchungsgegenstand waren anwendungsspezifische Beschichtungssysteme, die im Gewinde und unter dem Schraubenkopf aufgetragen wurden. Die Untersuchungen ergaben signifikante Unterschiede zwischen den Beschichtungssystemen, die eine große Auswirkung auf den Setzprozess zeigten. Bei allen untersuchten Systemen waren die erreichten Klemmkräfte in vergleichbaren Größenordnungen, jedoch wichen die benötigten Anzugsmomente stark voneinander ab. Für die numerische Simulation wurden Reibbeiwerte zwischen 0,14 für den Kontakt im Gewinde und 0,17 im Kontaktbereich zwischen Schraube und Scheibe angesetzt. Allen weiteren Kontaktbereichen wurde ein für Metalle typischer Reibbeiwert von 0,2 zugewiesen.

Mit Hilfe des entwickelten Prüfstandes konnten nicht nur die Reibbeiwerte ermittelt, sondern auch die Prozesskurven analysiert werden. Beispielfhaft sind in Abbildung 9 die simulierten Prozesskurven des dreiteiligen und des vierteiligen BMS-Systems den aufgenommenen Prozesskurven eines Prototyps gegenübergestellt. Aufgrund unter-

www.utfscience.de IV/2013

Wanner, M.-C.; Nehls, T.: Simulationsgestützte konstruktive Gestaltung von Funktionselementen
Verlag Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Str. 7 a, 96047 Bamberg, www.umformtechnik.net

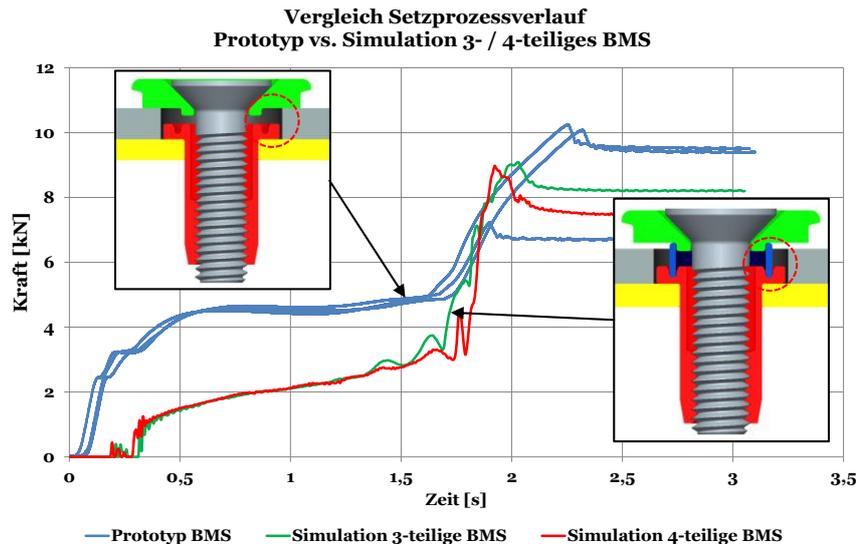


Abb. 9: Vergleich der Prozesskurven

schiedlicher Geometrien der untersuchten Prototypen und der simulierten BMS-Systeme, kann der erste Bereich der Prozesskurven durch die Simulationsmodelle nicht nachempfunden werden. Die experimentellen Untersuchungen wurden ohne die zweite Faltzone an der Scheibe durchgeführt, um das Unterkopfmoment, das zur Ermittlung der exakten Reibbeiwerte dient, messen zu können. Das führte dazu, dass die Scheibe bereits zu Beginn des Versuchs auf den Fügeteilen, zwischen denen die Kraft gemessen wird, auflag. Daher liegen die Kraftwerte der Experimente über denen der Simulationen in diesem Bereich (siehe Abbildung 9).

Signifikanter für die resultierenden Tragverhaltenseigenschaften sind die nach dem Setzprozess verbleibenden Klemmkräfte. Diese liegen für die beiden Simulationsmodelle im Bereich der experimentellen Werte. Dieser Vergleich zeigt, dass die Simulationsmodelle die resultierenden Verbindungseigenschaften der BMS-Systeme abbilden können.

Tragverhaltenseigenschaften BNM vs. BMS

Im Rahmen des Forschungsvorhabens /1/ wurde die

Tragverhaltenseigenschaft der Scherzugfestigkeit des BMS-Systems in einem quasistatischen Scherzugversuch ermittelt. Diese Größe dient als Auslegungswert und wurde bereits in anderen Untersuchungen von Funktionselementen, zum Beispiel in /4/, als Bewertungskriterium herangezogen.

Die typischen Verläufe der Scherzugkurven sind in Abbildung 10 dargestellt. In diesem Diagramm werden die Scherzugkräfte über dem Traversenweg der Zugprüfmaschine aufgetragen. Der Vergleich der Kurvenverläufe weist deutliche Unterschiede auf. Das BMS-System kann gegenüber der konventionellen BNM in der ersten Belastungsphase größere Kräfte ertragen. Durch den fehlenden Fügeseitigen Verbundelement ergibt sich eine größere Auflagefläche zwischen den Bauteilen in der die Haftreibung wirksam ist. Weiterhin werden größere Verformungen ertragen bis die Probe zerstört wird. Charakteristische Versagensform war das Abscheren der Schraube in der Trennfuge. Dieses Versagen trat sowohl bei der konventionellen BNM als auch beim BMS-System auf.

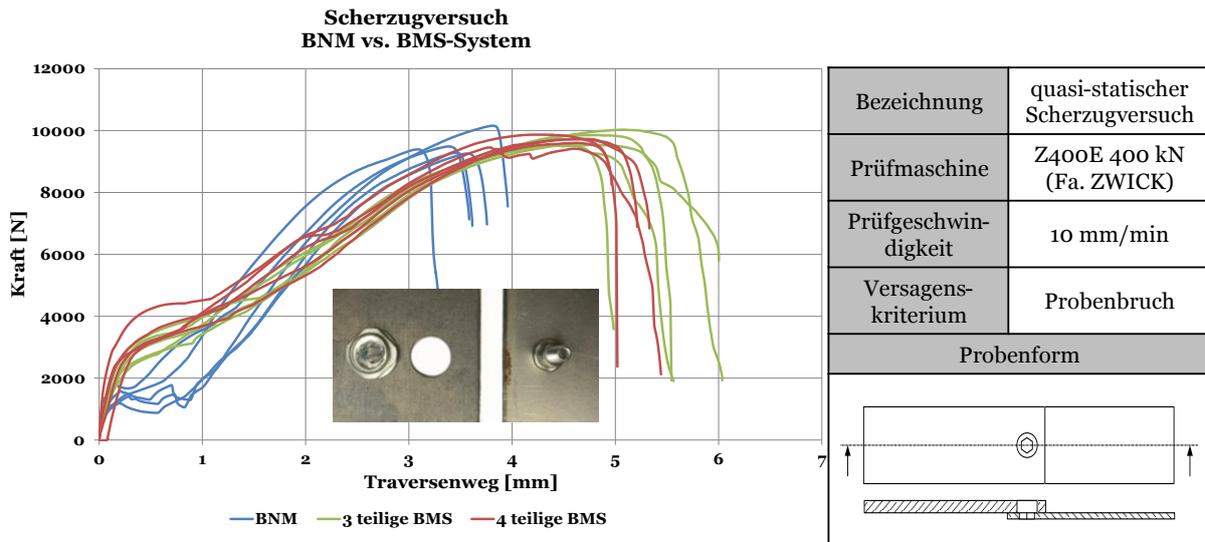


Abb. 10: charakteristische Kurvenverläufe im Scherzugversuch

Die Auswertung der Zugversuchsdaten erfolgte über die erreichten Maximalkräfte und über das in /2/ vorgestellte Streckkraftäquivalent. Es weist dem Verbindungselement einen Bemessungswert zu, der mit der Streckkraft eines Metalls vergleichbar ist /2/. Maßgeblichen Einfluss hat dabei die Steifigkeit des Fügepunkts und somit der Kurvenverlauf der Scherzugkurve.

Abbildung 11 zeigt die statistischen Ergebnisse aus den Scherzugversuchen, die in /1/ durchgeführt wurden. Die Auswertung der Maximalkräfte

zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen der konventionellen BNM und dem BMS-System. Größere Unterschiede sind bei der Auswertung über das Streckkraftäquivalent festzustellen. Die berechneten Kräfte liegen für das BMS-System ca. 10% über denen der konventionellen BNM und weisen eine geringere Streuung auf.

Zusammenfassung

Der Setzprozess einer konventionellen BNM ist durch die große Anzahl an Verarbeitungsschritten und die Benutzung mehrerer Werkzeuge

gekennzeichnet. Aus der Überlegung diesen Ablauf zu vereinfachen entstand die Idee des Blindnietmutter-Schraub-Systems. Dieses System vereinfacht den Setzprozess und kann eine Blindnietmutterverbindung in drei einfachen Arbeitsschritten realisieren.

Die konstruktive Gestaltung des BMS-Systems wurde in /1/ in drei Schritte unterteilt. Zunächst wurden alle relevanten Parameter, wie das Werkstoffverhalten, die Reibverhältnisse und Lagerungsbedingungen eines solchen Funktionselements, in experimentellen Untersuchungen bestimmt.

Anschließend wurden die gewonnenen Daten durch den Abgleich mit Experimenten in vereinfachter Weise, d.h. mit Hilfe zweidimensionaler Simulationen und Schliffbildern von konventionellen BNM, verifiziert.

Abschließend wurde mit Hilfe eines ersten Geometrieansatzes, der die Idee des vereinfachten Setzens einer Blindnietmutter realisieren sollte, das BMS-System numerisch simuliert. Durch die Analyse der Simulati-

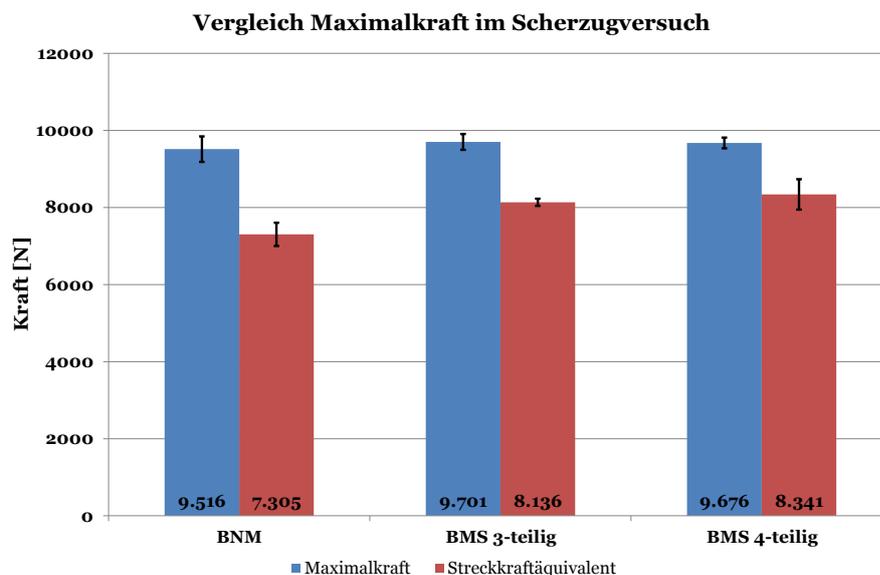


Abb. 11: Vergleich der Maximalkraft- und Streckkraftäquivalentwerte

onsergebnisse und experimentelle Untersuchungen von Prototypen konnten Optimierungspotentiale aufgezeigt werden. Diese wurden im weiteren Verlauf der Entwicklung des Funktionselements BMS in mehreren Geometrievarianten umgesetzt. Diese Simulation des BMS-Systems konnte, durch die experimentellen Untersuchungen des Werkstoffverhaltens und der Reibbeiwerte gestützt, positive Ergebnisse liefern. Das Umformverhalten der Simulationsmodelle entspricht dem des realen Fügelements. Auch bei variierten Randbedingungen konnten die Verformungsverhältnisse abgebildet werden. Zusätzlich wurde ein weiterer Optimierungsansatz des Funktionselements diskutiert, der die Umformung erleichtert und geringere Beanspruchungen des Blindnietmutter-Schraub-Systems hervorruft. Die weiteren experimentellen Untersuchungen zu den Tragverhaltenseigenschaften konnten zeigen, dass das neue Fügeelement Blindnietmutter-Schraube eine äquivalente Technologie zur konventionellen Blindnietmutter darstellt.

Wobei die Berechnung des Streckkraftäquivalents Vorteile des BMS-Systems in Hinsicht auf die Scherfestigkeit gegenüber einer Blindnietmutter aufzeigt. Ein weiterer Vorteil dieses innovativen Funktionselements liegt in der einfachen Verarbeitung. Durch die sequentielle Umformung zweier Funktionsbereiche des BMS-Systems, kann die Fügeaufgabe in wenigen einfachen Arbeitsschritten erfolgen und somit der Arbeitsaufwand für einen Fügepunkt reduziert werden.

Literatur

- /1/ Wanner, Martin-Christoph et al., Numerische und experimentelle Untersuchungen von Blindnietmutter-Schraub-Systemen, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., ISBN 978-3-86776-413-1, August 2013
- /2/ Delin, M.; Entwicklung eines Kennwertkonzeptes zur Bewertung der Tragverhaltenseigenschaften mechanisch gefügter Verbindungen; Dissertation, Universität Rostock, Lehrstuhl Fertigungstechnik, 2007
- /3/ 16047, DIN EN ISO: Verbindungselemente - Drehmoment / Vorspannkraft-Versuch. DIN, 2005
- /4/ Wanner, Martin-Christoph et al., Einsatz von blindgenieteten Funkti-

onselementen in ausgewählten Bauteilwerkstoffen, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., ISBN 978-3-86776-327-1, März 2009

/5/ Voelkner, Wolfgang und Süße, Dietmar, Vergleichende Untersuchungen zur Simulation von Stufenfolgen bei der Herstellung von rotationssymmetrischen Umformteilen, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., ISBN 978-3-86776-139-0, August 1999

/6/ Yu-qun, Hu und Ya-pu, Zhao, Scale Effect of Plastic Strain Rate. Chinese Journal of Aeronautics Vol.14 Nr.1., Februar 2001

/7/ Cowper, G.R., Symonds, P.S., Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams, Brown University, Applied Mathematics Report, 1958

/8/ Livermore Software Technology Corporation, Keyword User's Manual Version 971 Bd. Vol. II, Mai 2007

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner, Leiter des Lehrstuhls Fertigungstechnik der Universität Rostock und des Fraunhofer Anwendungszentrums Großstrukturen in der Produktionstechnik

M.Sc. Thomas Nehls, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik