

## **METHODISCHE KONZEPTION DEMONTAGEUNTERSTÜTZENDER VERBINDUNGEN**

*Jan Klett, Lucienne Blessing*

### **Kurzfassung**

Dieser Bericht behandelt die methodische Gestaltung von Verbindungen mit der allgemeinen Fragestellung, wie möglichst viele, an eine Verbindung gestellte Anforderungen erfüllt werden können und betrachtet dabei im speziellen die Entwicklung von aktiven Verbindungen zur Verbesserung von Demontageeigenschaften. Aktive Verbindungen unterscheiden sich von konventionellen dadurch, dass sie sich, aktiviert durch eine definierte Größe, selbsttätig lösen [1]. Hierzu wurde ein generelles Modell, das die notwendigen Funktionsträger und die zum mechanischen Verbinden notwendigen Prozesse enthält, entwickelt. Zur Realisierung der geforderten Eigenschaft: „aktive Verbindungslösung“ wurden die Elemente, die den Verbindungsschluss herstellen entsprechend umgestaltet. Für das Lösen des Verbindungsschlusses wurden ausschließlich Wandler mit elektrischem Strom als Eingangsgröße betrachtet. Es wurden Möglichkeiten der Aufbringung einer Vorspannkraft untersucht. Die erarbeiteten Teillösungen wurden in einem morphologischen Kasten zu Verbindungskonzepten kombiniert. Von diesen wurden zwei prototypisch realisiert und als Erfindung gemeldet.

### **1 Einleitung**

Durch eine Reduzierung des Demontageaufwands kann neben der Steigerung der Produktattraktivität auch eine Ressourcenschonung erwartet werden. Dies kann jedoch nur durch die systematische Gestaltung von Verbindungen realisiert werden, wobei vor allem das automatisierte Lösen von Verbindungen betrachtet werden soll. Hier liegt ein großes Potenzial in der Standardisierung des Verbindungslöseprozesses [1], [2], [3], [4], [5]. Eine partielle Standardisierung kann in einer einheitlichen Verbindungsgestaltung gesehen werden, die dazu führt, dass Verbindungen auf die gleiche Weise mit dem gleichen Lösewerkzeug gelöst werden können. Hierbei muss jedoch noch immer das Lösewerkzeug exakt positioniert werden. Zur vollständigen Standardisierung des Verbindungslöseprozesses wurde der Ansatz verfolgt, aktive Verbindungen zu verwenden, die sich, aktiviert durch eine definierte Größe selbsttätig lösen. Auf diese Weise entfällt ein verbindungsspezifisches Lösewerkzeug und der Positionierprozess beschränkt sich auf die Kopplung der aktivierenden Größe mit der Verbindung.

### **2 Motivation**

Aktive Verbindungen können einzeln aber auch gleichzeitig (simultan) gelöst werden sowie in unterschiedlichen Produkten, bei gleicher aktivierender Größe verwendet und der Verbindungslöseprozess somit identisch und produktunabhängig gestaltet werden. Durch die dadurch ansteigende Stückzahl an zu demontierenden Produkten mit gleichem Verbindungslöseprozess könnte die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Automatisierung erfüllt, und somit ein Beitrag zu einer wirtschaftlicheren Demontage geleistet werden. Dieser Ansatz ist in einigen Literaturstellen bereits betrachtet worden [1], [3], [4], [5], jedoch wurde der Schwerpunkt dieser Arbeiten mehr auf die Gestaltung der Funktionsträger, die für das aktive Lösen bereits existierender Verbindungen erforderlich sind, gelegt, als auf die Optimierung der Verbindung selbst, die sich gemäß [6] zusammensetzt aus Verbindungsmittel und Berührungsflächen der Verbindungspartner. Die methodische Entwicklung und Optimierung des Verbindungsmittels steht im Vordergrund dieses Beitrags.

Die zur Verfügung stehenden Effekte zur Wandlung der aktiven Größe in eine Größe, die das Lösen der Verbindung durchführt, sollen möglichst effektiv und effizient eingesetzt und dadurch erreicht werden, dass die zum Lösen der Verbindung erforderlichen Funktionsträger einfach und kostengünstig gestaltet werden können und somit eine aktive Verbindung nicht wesentlich teurer wird als eine konventionelle. Dazu sollen die vom Verbindungsmittel zu erfüllenden Anforderungen hinsichtlich des Verbindungsprozesses sowie der eigentlichen Verbindungsfunktion, wobei insbesondere die Möglichkeit der Aufbringung einer Vorspannkraft zu nennen ist, mit konventionellen Verbindungsmitteln vergleichbar sein, jedoch hinsichtlich der Anforderung an einen einfachen Prozess zur Schlusslösung optimiert werden.

Mit der allgemein steigenden Zahl zu erfüllender Verbindungsanforderungen, die durch Fertigung, Recycling, Variantenbildung etc. entstehen, wird die Verbindungsgestaltung immer komplexer. Um diese Komplexität zu handhaben, erscheint eine methodische Vorgehensweise immer notwendiger. Daher wurde anhand durchdringender (Bolzen-) Verbindungen ein erster Ansatz zur Verbindungsgestaltung entwickelt, der sich vorerst nur auf die Optimierung des Verbindungsmittels bezieht und sich durch weiterführende Arbeiten auch auf die Optimierung der Berührungsflächen der Verbindungspartner erstrecken soll.

### 3 Methode

#### 3.1 Allgemeine Betrachtung

##### 3.1.1 Verbindung

Um zunächst die von durchdringenden (Bolzen-) Verbindungen auszuführenden Funktionen im allgemeinen zu definieren, wurden diese analysiert und eine generelle Verbindungsdarstellung auf Basis der Teilfunktionen und der zu ihrer Erfüllung notwendigen Funktionsträger erstellt (Bild 1). Dazu wurden die Funktionen „Verbinden“ und „Verbindungs lösen“ in Teilfunktionen aufgegliedert und die Elemente der Verbindung diesen Teilfunktionen als Funktionsträger zugeordnet. Die Grafik auf der linken Seite von Bild 1 zeigt das Modell der Verbindung. Die Grafik auf der rechten Seite von Bild 1 zeigt die Teilfunktionen der Funktionen Verbinden und Verbindungs lösen und ordnet über die Balken die an den Funktionen beteiligten Funktionsträger zu. Um die Verbindungspartner (V1 und V2) zu verbinden, werden V1 und V2 durch das Zusammenfassungselement (ZE) zusammengefasst. Danach wird durch das Schlusselement (SE) der Schluss zwischen V1, V2 und ZE erzeugt. Zur Auflösung der Verbindung wird der Schluss der Verbindung am Schlusselement (SE) aufgelöst und V1, V2 und ZE entfügt.

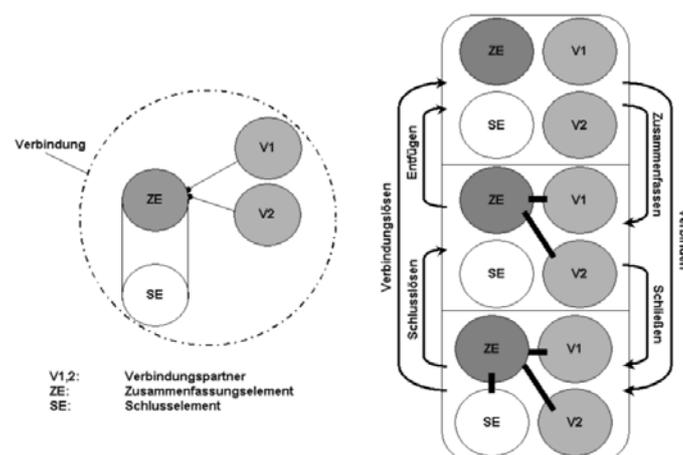


Bild 1: Generelle Darstellung einer durchdringenden (Bolzen-)Verbindung und ihrer Zustände

Bei der Analyse der Funktionen wurde festgestellt, dass die Eigenschaften der Funktion „Verbindungs lösen“ im wesentlichen von der Teilfunktion „Schluss lösen“ abhängen und daher der Prozess des Schlusslösen maßgeblich den Aufwand des Verbindungs lösen bestimmt. Über die Zuordnung der Teilfunktionen auf die erforderlichen Funktionsträger in Bild 1 konnten die Elemente der Verbindung, aus denen die Eigenschaften des Prozesses zum Schluss lösen resultieren, erkannt werden, und die Anforderungen an diesen Prozess auf die Merkmale dieser Elemente zurückgeführt werden.

Neben der Optimierung des Prozesses zum Schluss lösen dürfen die erforderlichen funktionalen Eigenschaften der Verbindung nicht vernachlässigt werden. Hierzu ist der zwischen den Verbindungspartnern geforderte Freiheitsgrad sowie die maximalen Belastungen, die die gesperrten Richtungssinne ertragen müssen relevant. Dies kann Vorspannkräfte zur Verstärkung des Schlusses zwischen den Verbindungspartnern erfordern, was sich ebenfalls in der Gestaltung des Verbindungsmittels niederschlagen muss.

### 3.1.2 Verbindungslösung

Damit die Verbindung den Prozess des Schluss lösen aktiv ausführen kann, muss sie um die Funktionsträger, die zum aktiven Lösen der Verbindung erforderlich sind, im folgenden als Schluss löseelement definiert, erweitert werden. Der Prozess des Schluss lösen soll durch Zuführung einer definierten Größe ausgeführt werden, so dass der Einsatz von verbindungs spezifischem Werkzeug nicht mehr erforderlich ist. Um eine allgemeine Lösung einer Verbindung mit Schluss löseelement zu erhalten, wurde anhand der generellen Darstellung der Verbindung (Bild 1) betrachtet und analysiert, an welcher Stelle der Verbindung das Schluss löseelement angreifen muss, um den Prozess des Schluss lösen ausführen zu können. Dazu wurde Bild 1 entsprechend erweitert und in Bild 2 eine allgemeine Lösung einer aktiven Verbindung skizziert.

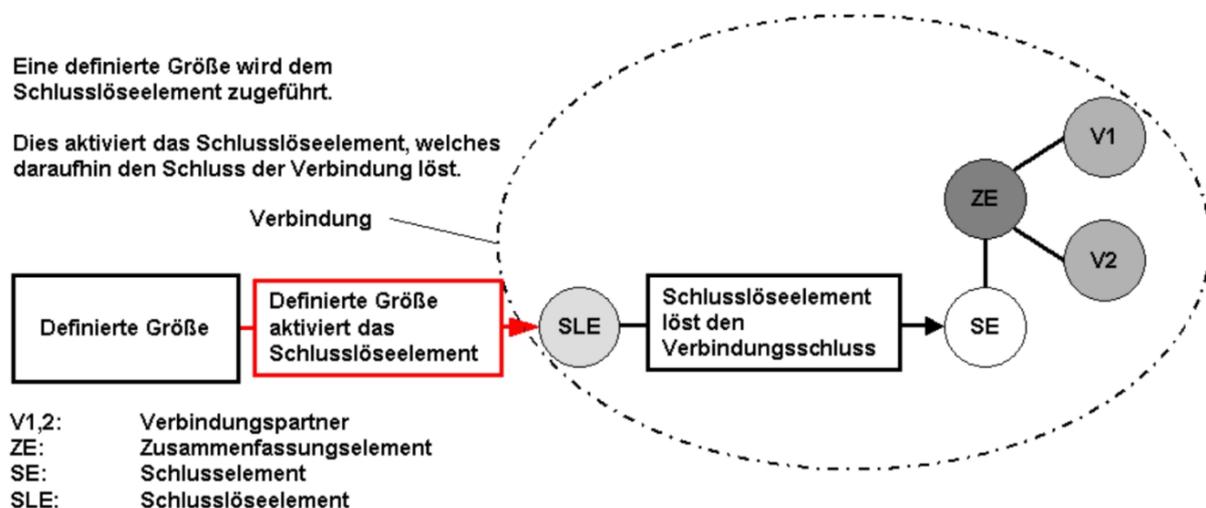


Bild 2: Allgemeine Lösung einer aktiven Verbindung

Im Gegensatz zu konventionellen Verbindungen, bei denen der Prozess zur Schlusslösung eine Positionierung eines verbindungs spezifischen Werkzeugs erfordert, ist das Schluss löseelement bereits positioniert und benötigt zur Auslösung nur noch eine definierte, verbindungs unspezifische, aktivierende Größe. Um gegenüber konventionellen Verbindungen Vorteile zu erhalten, darf die aktivierende Größe keine genaue Positionierung erfordern, sondern muss von außen relativ einfach zu den entsprechenden Schluss löseelementen geführt werden können.

### 3.2 Methodische Konzeption von Verbindungskonzepten

#### 3.2.1 Konzeption des Schlusselements

Das Lösen des Schlusses konventioneller Verbindungen erfordert oftmals eine Überlagerung translatorischer und rotatorischer Bewegungsabläufe entlang und um verschiedene Achsen. Diese Bewegungsabläufe sind zumeist zu komplex um von einfachen Schluslöseelementen ausgeführt werden zu können. Um mit einfachen Schluslöseelementen auszukommen, sind daher Schlüsse erforderlich, die durch möglichst einfach durchführbare Prozesse bzw. einer möglichst einfachen Kinematik sowie geringem Kräfte- bzw. Momentenbedarf gelöst werden können. Mit Wandlern einfach zu realisierende Bewegungsabläufe sind translatorische und rotatorische Bewegungen entlang einer bzw. um eine Achse.

Die in lösbaren Verbindungen technischer Produkte am häufigsten vorkommende Schlussart ist der Formschluss. Daher wurden hier zunächst nur Gestaltvarianten von Schlüssen betrachtet, die über die Form einen Schluss zwischen den Verbindungspartnern und dem Zusammenfassungselement herstellen. Anhand der prinzipiellen Skizzen in Bild 3 wurden die erforderlichen Merkmale und Verhältnisse lösbarer Verbindungen, die auf Formschluss basieren, untersucht und allgemein wie folgt beschrieben:

„Reversible Vergrößerung des Querschnitts des Zusammenfassungselements durch das Schlusselement, so dass eine unabhängige Bewegung des Zusammenfassungselements, des Schlusselements und der Verbindungspartner entlang der Z-Achse durch die Querschnittsvergrößerung verhindert wird.“

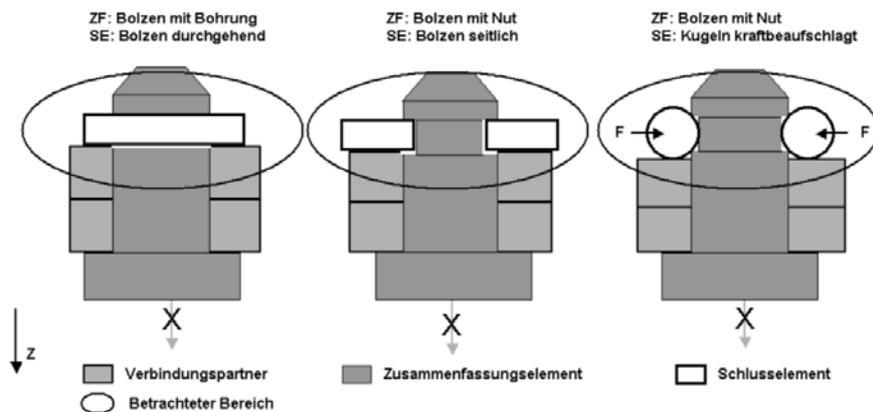


Bild 3: Prinzipielle Skizzen lösbarer, auf Formschluss basierender Verbindungen

Zur Konzeption eines Schlusselements mit einfachem Prozess zum Schlusslösen muss die Eigenschaft „reversibel“ um die Anforderung „einfach“, zu „einfach reversibel“ erweitert werden und die Merkmale an der Verbindung entsprechend gestaltet werden. Dazu wurden Überlegungen angestellt, wie das Schlusselement, das ja die „Querschnittsvergrößerung“ des Zusammenfassungselements durch Kopplung realisiert, wieder vom Zusammenfassungselement entkoppelt werden kann. Hierzu wurden die Merkmale, durch die die Kopplung zwischen Schlusselement und Zusammenfassungselement realisiert und erhalten bleibt mit der Fragestellung betrachtet, wie diese wieder „einfach“ entkoppelt werden können. Dies kann durch Vereinfachung des Prozesses zur Positionsänderung des Schlusselements realisiert werden. Nachfolgend wurden die Positionen „gekoppelt“ und „entkoppelt“ betrachtet und in Bild 4 Kopplungen von Schlusselement und Zusammenfassungselement konzipiert und skizziert, mit denen durch rein translatorische Bewegung der Wechsel aus der Position „gekoppelt“ in die Position „entkoppelt“ möglich ist. Dabei wurde das Schlusselement weiter unterteilt in Schlusselement 1 und Schlusselement 2 (SE1, SE2). Die Funktionen von SE1 und

SE2 gehen aus dem Ansatz für eine Methode zur Konzeption einfach zu entkoppelnder Schlusselemente (s.u.) hervor.

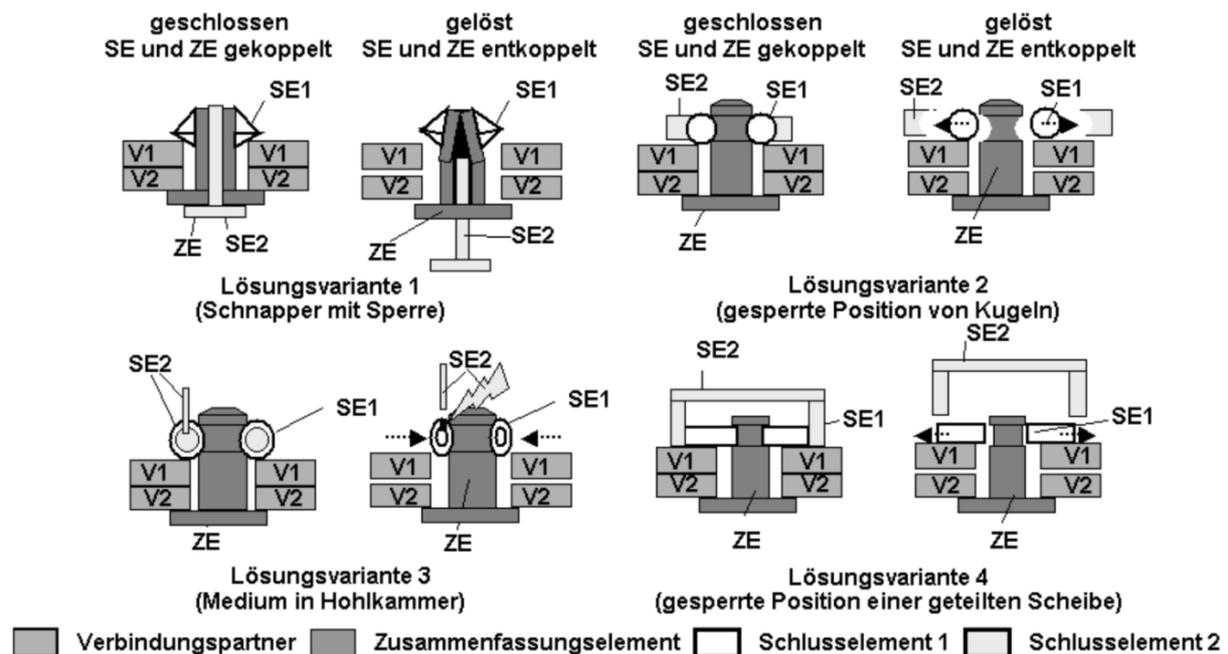


Bild 4: Konzepte für einfach trennbare Kopplungen zwischen ZE und SE

Die Betrachtung der Konzepte von Bild 4 führte zu dem nachfolgend beschriebenen Ansatz für eine allgemeine Methode zur Generierung von einfach zu entkoppelnden Schlusselementen:

- Kopplung von ZE und SE1 so, dass eine Relativbewegung in axialer Richtung gesperrt ist, wobei die Relativbewegung in radialer Richtung erhalten bleiben muss,
- Verbleibende Relativbewegung in radialer Richtung muss durch SE2 gesperrt werden,
- SE2 ist die Schnittstelle zum Schluslöseelement, die Gestaltung von SE2 bestimmt den Prozess zum Schlusserzeugen und vor allem zum Schluslösen.

Die beschriebenen Konzepte aus Bild 4 wurden in den morphologischen Kasten für die Gesamtlösung (Bild 5) eingetragen.

### 3.2.2 Konzeption von Schluslöseelementen

Als Eingangs- bzw. Auslösegröße des Schluslöseelements wurde vorerst nur elektrischer Strom betrachtet. Dieser kann dem Schluslöseelement einfach steuerbar zugeführt werden, so dass der Gefahr einer, durch äußere Einflüsse initiierten, ungewollten Schluslösung weitgehend entgegen gewirkt werden kann.

Die in Betracht gezogenen Wandler sollen elektrischen Strom in mechanische Energie wandeln. Hierfür stehen Motore, Elektromagnete und elektrische Widerstände (z.B. Heizdraht) für die Wandlung in rotatorische, translatorische und über die thermische Erwärmung des Widerstands molekulare Bewegungen zur Verfügung. Diese Möglichkeiten der Wandlung elektrischen Stroms in mechanische Größen wurden in den morphologischen Kasten für die Gesamtlösung (Bild 5) eingetragen.

### 3.2.3 Realisierung einer Vorspannkraft

Bei der bisherigen Betrachtung blieb die Aufbringung einer Vorspannkraft zunächst unberücksichtigt. Vorspannkraften können in verschiedener Form auf die Verbindung aufgebracht werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung elastischer Energiespeicher, die in Form von Teller- oder Spiralfedern zwischen Verbindungspartner und Schlusselement platziert werden. Nachteilig bei dieser Lösung ist zum einen die Ungenauigkeit der Vorspannkrafteinstellung, da diese nur in Stufen, entsprechend der zur Verfügung stehenden Federn möglich ist und zum anderen, dass Zusatzeile, nämlich die Federn erforderlich sind.

Eine stufenlos justierbare Vorspannkraft kann über die Paarung eines Gewindebolzens und einer Gewindebohrung auf die Verbindungspartner aufgebracht werden. Durch diese Vorspannkrafterzeugung wird jedoch zugleich auch ein Formschluss erzeugt, der aufgrund sich überlagernder Rotations- und Translationslösebewegungen nicht durch ein einfaches Schluslöseelement gelöst werden kann. Aus diesem Grund soll diese Möglichkeit nur als Vorspannkrafterzeugung, nicht jedoch als einfach zu lösendes Schlusselement betrachtet werden.

Beide Lösungsprinzipien wurden in den morphologischen Kasten für die Gesamtlösung (Bild 5) eingetragen.

### 3.2.4 Konzeption von Verbindungskonzepten

Im morphologischen Kasten für die Gesamtlösung (Bild 5) wurden die möglichen Teillösungen zur Erfüllung der, an die Verbindung gestellten Anforderungen hinsichtlich des Schlusses, der Schluslösung und der Vorspannkraft eingetragen und anschließend miteinander zu Gesamtlösungsvarianten (GLV) kombiniert. Lösungsvarianten 5 und 6 der Funktion Schließen sind Gestaltvariationen von Lösungsvarianten 2 und 4.

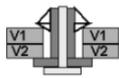
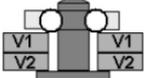
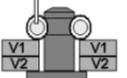
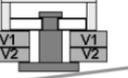
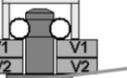
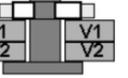
	Lösungs- variante 1	Lösungs- variante 2	Lösungs- variante 3	Lösungs- variante 4	GLV 1 Lösungs- variante 5	GLV 2 Lösungs- variante 6
Schließen						
Schluslösen	Rotation durch Elektromotor	Translation durch Elekt- romagnet	Erwärmung durch Heiz- draht			
Vorspannen	Feder	Gewindebol- zen/ Gewin- debohrung				

Bild 5: Morphologischer Kasten zur Kombination der Teillösungen

## 4 Ergebnis

Die Kombination der obigen Teillösungen im morphologischen Kasten ergab zwei Verbindungsmittelkonzepte, die prototypisch umgesetzt wurden. Als Vorspannkrafterzeugung wurde das Lösungskonzept Gewindebolzen-Gewindebohrung gewählt, daher können die Verbindungsmittel beider Verbindungsmittelkonzepte wie konventionelle Gewindebolzen verwendet werden und stufenlos justierbare Vorspannkraften realisiert werden. Das Aufbringen des Moments zum Justieren der Vorspannkraft wird über dafür vorgesehene Werkzeuggriffsgeometrien gewährleistet. Gegenüber der Verwendung von Federn zur Realisierung

einer Vorspannkraft können bei Integration der Gewindebohrungen in einen Verbindungspartner Verbindungsmittel wie Muttern eingespart werden. Des Weiteren ist der Verbindungsprozess identisch mit dem konventioneller Schraubverbindungen, während der Löseprozess jedoch erleichtert wurde. Durch die prototypische Umsetzung konnte anschließend überprüft werden, ob die erforderlichen Funktionen gewährleistet sind. Für die beiden Konzepte wird derzeit ein Gebrauchsmusterschutz beantragt. Nachfolgend wird eines der beiden Verbindungsmittel näher erläutert.

#### 4.1 Aufbau und Funktion des entwickelten Verbindungsmittels

Das entwickelte Verbindungsmittel besteht aus (Zahlen beziehen sich auf Bild 6) einem Bolzen (1), mit einem Gewinde auf einer Seite und einem Keilprofil auf der anderen Seite, einem Ring aus drei Ringsegmenten (2), einem Band (3) aus Kunststoff zur Umschlingung der Ringsegmente (2) sowie einem Heizdraht (4) zwischen einem der Ringsegmente (2) und dem Band (3).



Bild 6: CAD-Modell des Verbindungskonzepts

#### 4.2 Wirkweise des Schlusses

Das Keilprofil des Bolzens (1) wird formschlüssig durch die drei Ringsegmente (2) abgestützt und somit die axiale Relativbewegung gesperrt. Die Fixierung der Segmente, also die Sperrung der radialen Relativbewegung erfolgt durch das Band (3). Die Vorspannkraft wird über die Berührstellen vom Bolzen (1) auf die Ringsegmente (2) und über diese auf das Band (3) übertragen.

#### 4.3 Wechsel geschlossener - gelöster Zustand

Die Schlusslösung erfolgt, indem Strom durch den Heizdraht (4) geleitet und dadurch das Band (3) durch die Wärmeentwicklung im Heizdraht (4) lokal zerstört und geöffnet wird. Dadurch wird die Positionierung der Ringsegmente (2) zu einem Ring aufgehoben und der Bolzen (1) und die Ringsegmente (2) werden relativ zueinander beweglich. Aus der zwischen dem Bolzen (1) und den Ringsegmenten (2) wirkenden Vorspannkraft resultiert eine Kraft in radialer Richtung auf die Ringsegmente (2). Ist diese Kraft größer als die Reibkraft zwischen den Ringsegmenten (2) und dem Verbindungspartner, bewegen sich die Ringsegmente (2) vom Bolzen (1) fort und die Verbindung zwischen den Verbindungspartnern ist gelöst. Der Schluss kann durch die Positionierung der Ringsegmente (2) zu einem Ring um den Bolzen (1) und die Fixierung dieser Position mit einem neuen Band (3) wiederholt hergestellt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand eines begrenzten Spektrums an Verbindungsprinzipien und Eingangs- bzw. Auslösegrößen für das Schluslöseelement wurde ein Ansatz zur methodischen Entwicklung von Verbindungskonzepten mit aktiver Schluslösung generiert. Durch das methodische Vorgehen bei der Verbindungsmittelgestaltung sind dabei ungewöhnliche aber funktionale Lösungen entstanden. Die Verwendung von zwei Schlusselementen in einer Verbindung bei-

spielsweise führte dazu, dass zwei wichtige, jedoch widersprechende Anforderungen erfüllt werden konnten. Zum einen bleiben konventionelle Verbindungs- sowie Schlusslöseprozesse erhalten, zum anderen ist eine aktive Schlusslösung der Verbindung möglich. Zudem besteht die Möglichkeit der stufenlosen Vorspannkraftjustierung.

Die vorgeschlagene Methodik soll im weiteren Verlauf auf alle Arten mechanischer Verbindungen übertragen werden. Neben dem hier exemplarisch behandelten Kriterium der Demontageunterstützung sollen dann alle verbindungsrelevanten Eigenschaften berücksichtigt werden können. Dabei sollen über die Anforderungen prinzipielle Lösungen erarbeitet werden, die dann mit Hilfe von Konstruktionskatalogen, wie in [7] beschrieben, konkretisiert werden können. Sind die prinzipiellen Lösungen hier nicht existent, soll eine Konkretisierung mit Hilfe der in [8] beschriebenen Konstruktionsmethodik durchgeführt werden.

Das Ziel der Methodik ist, die Verbindung von zwei Verbindungspartnern so effektiv und effizient wie möglich zu gestalten, wobei möglichst viele Funktionsträger der Verbindung sinnvoll in die Verbindungspartner integriert werden sollen, um auf separate Verbindungsmittel zu Gunsten niedrigerer Teilezahlen und dadurch weniger Handhabungsschritte verzichten zu können.

## 6 Literatur

- [1] Braunschweig, A.: Flexibel automatisierte Demontage. Fachaufsatz, Konstruktion 9-2003, S. 54ff., VDI
- [2] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin 1997
- [3] Neubert, H.: Simultan lösbare Verbindungen zur Rationalisierung der Demontage in der Feinwerktechnik. Dissertation TU Dresden, 2000
- [4] Chiodo, J.D. et al: Eco-Design for Active Disassembly Using Smart Materials. Proceedings of the second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST), 2-6 March 1997, Pacific Grove, California, USA, p. 269
- [5] Tanskanen, P.; Takala, R.: Integrierte Demontage-Mechanismen für tragbare Elektrogeräte. Fachaufsatz, Konstruktion 1/2-2003, S. 57ff., VDI
- [6] VDI-Richtlinie 2232: Methodische Auswahl fester Verbindungen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990
- [7] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 3, Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung, Springer-Verlag 1996
- [8] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993

Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing  
Dipl.-Ing. Jan Klett  
Fachgebiet Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik  
Technische Universität Berlin, Sekr. H 10  
Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin  
Tel: +49-30-314-26686  
Fax: +49-30-314-26481  
Email: [blessing@ktem.tu-berlin.de](mailto:blessing@ktem.tu-berlin.de)  
[klett@ktem.tu-berlin.de](mailto:klett@ktem.tu-berlin.de)  
URL: <http://www.ktem.tu-berlin.de>

Die Arbeit wurde im Rahmen des Sfb 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“ von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) gefördert.